

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MĚŘICÍ SYSTÉM NA BÁZI COMPACTDAQ

Autor práce: Bc. Ondřej RAUNER

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel TRNKA, Ph.D.

PLZEŇ 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej RAUNER**
Osobní číslo: **E17N0026P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Měřicí systém na bázi CompactDAQ**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování

1. Popište diagnostické metody a přístupy používané v elektrotechnice
2. Navrhněte strukturu online diagnostického systému
3. Sestavte měřicí řetězec
4. Navrhněte systém pro zpracování naměřených dat
5. Prakticky ověřte funkčnost navrženého systému





Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Internetové zdroje, IEEE Xplore
2. Diagnostika elektrických zařízení, BEN, Mentlík, Trnka P., a kol.
3. Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, Mentlík, Trnka, P., a kol. BEN 2011

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

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



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



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

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje na problematiku správy aktiv a přístupu k jejich údržbě z hlediska četnosti a nákladů. Taktéž přináší pohled na propojení technologií a elektrotechnické diagnostiky. Částí diplomové práce jsou také vybrané diagnostické metody, jež jsou v současnosti využívány. Cílem praktické části je příklad vytvořeného měřicího systému na bázi CompactDAQ.

Klíčová slova

Asset management, údržba, diagnostika, vysokonapěťový kabel, točivý stroj, transformátor, teplota, napětí, měřicí systém, CompactDAQ, LabVIEW a MATLAB.

Abstract

The presented diploma thesis is focused on the issue of the assets management and the access to their maintenance from frequency and costs point of view. An overview of the technologies and the electrical diagnostics coupling is brought as well. Another part of the diploma thesis includes description of several contemporary used diagnostics methods. The goal of thesis' practical part is an example of created measuring system based on CompactDAQ.

Keywords

Asset management, maintenance, diagnostics, high voltage cable, rotating machine, transformer, temperature, voltage, measuring system, Compact DAQ, LabVIEW, MATLAB.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení diplomovou práci, zpracovanou během mého studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené odborné literatury a pramenů. Veškerý software, použitý při jejím řešení a zpracování, byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

.....
podpis

V Plzni, dne 15. června 2020

Bc. Ondřej Rauner

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlovi Trnkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce, za možnost spolupráce na projektech katedry a při přípravě konference Diagnostika 18 a 20. Za konzultace bych rád poděkoval Ing. Svatoslavovi Chládkovi. Především však děkuji své rodině a přítelkyni za podporu během studia.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	3
Úvod	5
1 Asset management	6
1.1 Časové hledisko asset managementu	7
1.1.1 Krátkodobá správa aktiv	7
1.1.2 Střednědobá správa aktiv	8
1.1.3 Dlouhodobá správa aktiv	8
1.2 Dělení údržby	8
1.2.1 Údržba po poruše	8
1.2.2 Údržba dle časového plánu	9
1.2.3 Údržba dle aktuálního stavu	9
1.2.4 Prognostika a proaktivní údržba	10
1.2.5 Porovnání druhů údržby	11
2 Elektrotechnická diagnostika	12
2.1 Diagnostika kabelů	16
2.1.1 Online měření částečných výbojů	16
2.1.2 Offline měření ztrátového činitele	18
2.2 Diagnostika točivých strojů	20
2.2.1 Vibrační diagnostika	20
2.3 Diagnostika transformátorů	25
2.3.1 Detekce plynů v oleji	25
2.3.2 Vlhkost oleje	30
2.3.3 Měření teploty	34
2.3.4 Měření napětí a proudů	42
3 Návrh měřicího systému	43
3.1 Měřicí systém	43
3.1.1 Měřené veličiny	44
3.1.2 Prostředí měřicího systému v LabVIEW a práce s daty	46
3.1.3 Ověření funkčnosti navrženého systému	50
Závěr	53
Použité zdroje	54

Seznam obrázků	62
Seznam tabulek	64
Přílohy	I
Příloha A: Block Diagram	I
Příloha B: Dostupné měřicí moduly a šasi na KET	III
Příloha C: Funkce v MATLABu	X
Příloha D: Program vytvořeného měřicího systému	XI
Příloha E: Video z praktického ověření funkčnosti systému	XI

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbols

DS		diagnostická relační struktura
A		množina parametrů
R		množina relací
t	(s)	čas
$\text{tg}\delta$	(–, %)	ztrátový činitel
U	(V)	elektrické napětí
I	(A)	elektrický proud
P	(W)	výkon
π	(–)	Ludolfovo číslo
f	(Hz)	frekvence
C	(F)	elektrická kapacita
m	(kg)	hmotnost
b	(N s m ⁻¹)	součinitel tlumení
k	(N m ⁻¹)	tuhost pružiny
\mathbf{a}	(m s ⁻²)	zrychlení
\mathbf{v}	(m s ⁻¹)	rychlost
y	(m)	výchylka
\mathbf{F}	(N)	síla
\mathbf{B}	(T)	magnetická indukce
l	(m)	délka vodiče
θ	(°C)	teplota
RS	(–, %)	relativní saturace oleje
$V_{\text{H}_2\text{O}}$	(ppm)	objem vody v oleji
τ	(–)	propustnost světla
λ	(m)	vlnová délka
γ	(K ⁻¹)	koeficient teplotní roztažnosti
H	(–)	činitel teploty Hot-Spot
g_r	(°C)	teplotní gradient
K	(–)	poměr zatěžovacího a jmenovitého proudu
V	(–)	relativní rychlost stárnutí

Zkratky

ČSN	Česká technická norma
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Dispečerské řízení a sběr dat)
IBM	Incident Based Maintenance (Údržba po poruše)
TBM	Time Based Maintenance (Údržba dle časového plánu)
CBM	Condition Based Maintenance (Údržba dle aktuálního stavu)
FBM	Forecast Based Maintenance (Prediktivní údržba)
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis (Analýza účinků a následků poruchy)
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (Kritická analýza účinků a následků poruchy)
FMSA	Failure Mode Symptom Analysis (Analýza příznaku selhání)
RCM	Reliability Centered Maintenance (Údržba zaměřená na spolehlivost)
RBM	Risk Based Maintenance (Údržba zaměřená na minimalizaci rizik)
EN	European Standard (Evropská norma)
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
HFCT	High Frequency Current Transformer (Vysokofrekvenční proudový transformátor)
VLF	Very low frequency (Velmi nízké frekvence)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství)
MWT	Monitored Withstand Test (Monitorovaný test odolnosti)
PE	Polyetylén
XLPE	Zesítný polyetylén
DGA	Dissolved Gas Analysis (Analýza rozpuštěných plynů)
IEC	International Electrotechnical Commission (Mezinárodní elektrotechnická komise)
UV	Ultraviolet (ultrafialový)
CCD	Charge-Coupled Device (Zařízení s vázanými náboji)
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems (Mikro elektro mechanický systém)
IP	Ingress Protection (Stupeň krytí)
NI	National Instruments (Název americké společnosti)
DAQ	Data Acquisition (Získávání dat)

Úvod

Správa majetku je alfou a omegou prosperity každé společnosti, a to bez ohledu na obor podnikání. Před necelými deseti lety vyústila neustávající touha lidstva po nových technologiích, poznání a digitalizaci v začátek čtvrté průmyslové revoluce. Její vlivy postupně zasahují a ovlivňují všechna industriální odvětví včetně elektrotechniky. Z tohoto důvodu se společnosti více orientují na digitalizaci správy majetku. Jedním z klíčů k úspěchu je kooperace měřicích a diagnostických systémů. Ty sledují aktuální stav zařízení a na jeho základě stanovují budoucí vývoj života. Kupříkladu touto cestou lze naplánovat údržbářské práce, nebo výměnu zastaralých komponent, aby nedošlo k poruše.

Cílem první kapitoly diplomové práce je nastínit a seznámit se s problematikou asset managementu z hlediska časového i nákladového. Druhá pasáž je věnována elektrotechnické diagnostice. V ní jsou popsány vybrané metody jejího využití pro kabely vedoucí vysoké napětí, točivé stroje a transformátory distribučních a přenosových soustav. Závěrečná kapitola kvalifikační práce přibližuje vlastní návrh měřicího systému. Ten získává a dále pracuje s údaji o teplotě a napětí zmíněných transformátorů.

1 Asset management

Správa aktiv či *majetku*, anglicky označovaná jako *asset management*, je systematický a koordinovaný soubor činností a postupů, kterými společnosti spravují svůj majetek či aktiva, jejich výkon, rizika a náklady v průběhu životního cyklu. Aktivem se rozumí cokoliv, co vlastníkovvi generuje zisk. Cílem je udržet hodnotu majetku na co nejvyšší úrovni, popřípadě tuto hodnotu ještě navýšit a dosáhnout strategického plánu. V praxi existují dva pohledy na asset management, a to z pohledu správy financí a z pohledu facility managementu. [1], [2]

Správa majetku z pohledu *správy financí* znamená, že finanční instituce a společnosti se zaobírají svým majetkem v peněžité formě. Jedná se o zhodnocování peněz prostřednictvím investic na peněžních a kapitálových trzích. [2]

Správa majetku z pohledu *facility managementu* označuje proaktivní řízení a nakládání zejména s nemovitým majetkem, tedy jeho údržbu, opravy a další investice. Klade si za cíl zajistit maximální efektivnost a návrat vloženého kapitálu. [2]

Řízení životního cyklu aktiv je základem asset managementu a je obsaženo v mezinárodních standardech řady ČSN ISO 55000. Z hlediska elektrotechniky se za tzv. *fyzické aktivum* může považovat např. transformátor nebo generátor. Životní cyklus takovýchto zařízení prochází následujícími fázemi: akvizice (pořízení), instalace, provoz, údržba, obnova a likvidace. Na obrázku (1.1) je systematicky znázorněn životní cyklus fyzického aktiva. [3]



Obrázek 1.1: Životní cyklus fyzického aktiva. [3] – převzato a upraveno.

Pro vlastníka aktiva začíná jeho životní cyklus v momentě pořízení. Nicméně v některých oborech předchází nákupu zařízení jeho návrh, vývoj a předprovozní zkoušení. Jako příklad může sloužit výměna transformátoru v rozvodně, kdy si pořizovatel musí dopředu rozmyslet, jaký výkon, parametry nebo životnost od něj očekává. Právě pro učení životnosti se v dnešní době užívají online diagnostické systém. Ve fázi provozu se očekávají výnosy z provozu stroje. Žádné zařízení se neobejde bez údržby, která vytváří přidanou hodnotu. Avšak po určité době je nemožné zařízení provozovat, nebo se samotný provoz stává neefektivním a je nutné dané zařízení obnovit. Čili vyměnit ho za nové. Kruh se uzavírá ve chvíli likvidace. [3]

Pouze ve stadiu provozu nabývá tzv. *cash flow*¹ kladných hodnot. Ostatní fáze cyklu představují investice a náklady. Mezi náklady, jež jsou vynaloženy ve fázích plánování, pořízení, instalace, údržby a obnovy, a výnosy ve fázi provozu stroje existuje silný vztah. Razantní šetření ve fázi plánování a počáteční investici se s největší pravděpodobností vrátí v podobě chybně nastavených provozních parametrů, vyšších nákladů na instalaci a údržbu, obnovu a likvidaci zařízení. [3]

1.1 Časové hledisko asset managementu

Z hlediska časového horizontu se asset management v distribučních soustavách, dle [4], dělí do tří základních skupin: *krátkodobý*, *střednědobý*, *dlouhodobý*.

1.1.1 Krátkodobá správa aktiv

Pro krátkodobou správu aktiv je hranice časového horizontu v řádech týdnů. Spíše by se dalo říct, že se jedná o správu v reálném čase. Patří sem zajištění bezpečné a spolehlivé dodávky elektrické energie, monitoring systémových řízení a oprava nastalých poruch. Z hlediska distributora je sledování vybraných parametrů systému důležité, protože tímto způsobem lze zabránit výskytu poruchových stavů, jako je výpadek sítě. Pro monitorování slouží tzv. SCADA² systémy, jež umožňují dispečinku vzdálenou správu zařízení. Tyto systémy získávají základní parametry o sledovaném zařízení (např. napětí, proud, vlhkost nebo teplota), které jsou zasílány a ukládány v řídicím centru v reálném čase. Typickým příkladem SCADA systému je monitorování netěsností na potrubí. Pokud se netěsnost objeví, tak systém omezí průtok kapaliny potrubím, nebo uzavře přívodní ventil, aby omezil nebezpečí vzniku poruchy. Samozřejmostí je chybové hlášení dispečerovi, který bude nastalou situací dále řešit. SCADA systémy jsou „šité na míru“ svému účelu (od domovních aplikací až po jadernou elektrárnu), protože není možné vytvořit jeden univerzálně aplikovatelný systém. Historie SCADA sahá až do 60. let minulého století, avšak s příchodem průmyslu 4.0 došlo k jeho značnému rozšíření. [4], [5]

¹Český význam anglického pojmu *cash flow* je finanční tok či tok peněz.

²Zkratka z anglického: *Supervisory Control and Data Acquisition*.

1.1.2 Střednědobá správa aktiv

Ve střednědobém managementu aktiv hraje výraznou roli údržba, jejíž finanční zatížení se vyjádří jako součet nákladů na samotný servis a odhadovaných ztrát při odstávce. Plánován údržby je kompromisem mezi časovým intervalem, kdy lze potenciálně identifikovat možnou závadu a co nejnižším počtem odstávek zařízení. Údržba ve střednědobém výhledu je trojího druhu [4]:

- **Akutní** – nastává po poruchovém stavu, kdy je nutné závadu odstranit.
- **Preventivní** – je prováděna v daných intervalech. Klade si za úkol udržet zařízení ve správném provozním stavu, čímž dochází k minimalizaci selhání.
- **Předpovídaná** – kombinuje předchozí dva typy údržby. Snaží se kriticky hodnotit funkční důležitost zařízení, a to s využitím všech dostupných informací získaných během pravidelných kontrol, diagnostického testování nebo z monitorování aktuálního stavu.

1.1.3 Dlouhodobá správa aktiv

Dlouhodobá správa aktiv je spojována s pokročilým vývojem cílů a jejich dosažitelnosti ve stanoveném časovém horizontu. Ve své podstatě se jedná o strategické plánování a je potřeba zahrnout mnoho aspektů, jako jsou zvyšující se spotřeba elektrické energie, zavádění nových technologií, zvyšování kvality, minimální poruchovosti a v neposlední řadě i zvýšených nároků na šetrnost k životnímu prostředí. Důležitým faktem je, že nesmí být opomenuta žádná maličkost, protože při radiální konstrukci elektrické sítě odpovídá její spolehlivost nejméně spolehlivému prvku. [4]

1.2 Dělení údržby

Ruku v ruce se stále rostoucím vývojem nových technologií dochází ke změnám v přístupu k údržbě zařízení. Těmto změnám napomáhá vývoj nových diagnostických systémů a do popředí vstupuje tzv. *online diagnostika*. V následujících odstavcích jsou vysvětleny jednotlivé přístupy k údržbě.

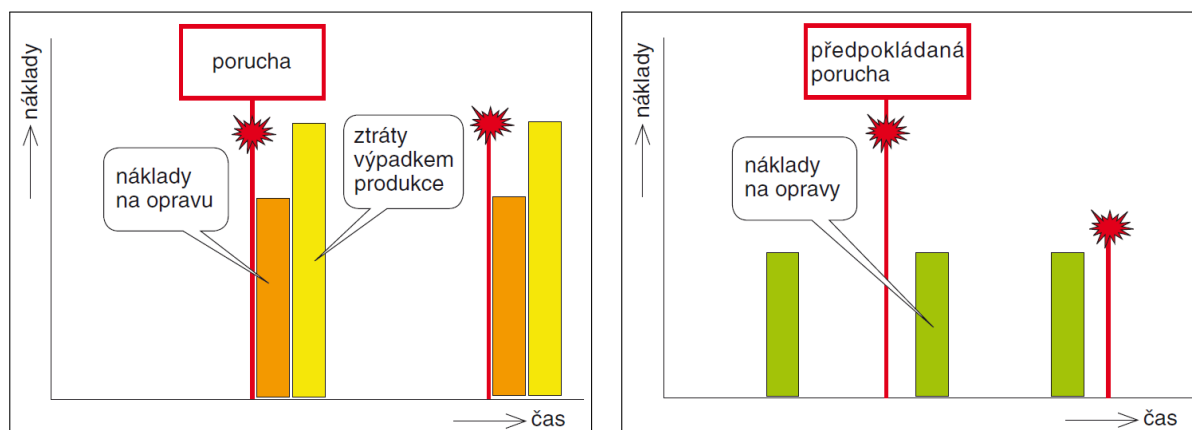
1.2.1 Údržba po poruše

Tento druh údržby bývá nejčastěji označován jako *Incident Based Maintenance* (IBM) a je vhodné jej použít v oblastech, kde případný výpadek nemá katastrofální následky, jako jsou škoda na majetku, vliv na životní prostředí, ohrožení lidských životů apod. Z obrázku (1.2a) lze vyzorovat, že poruchový stav znamená ztráty v podobě výpadku produkce a vznik nákladů na opravu. To jsou také důvody, proč je využitelnost v energetice

minimální. Například v elektronice či telekomunikacích je tomu jinak, protože jednotlivé části jsou zpravidla bezúdržbové. Z hlediska spolehlivosti musí být zajištěno zdvojnásobení zařízení, což by, v již zmíněné energetice, vedlo ke zdvojnásobení nákladů. [6], [7]

1.2.2 Údržba dle časového plánu

Způsob údržby podle časového plánu se pro elektrická zařízení využívá nejdéle. V literatuře je tato údržba často nazývána *Time Based Maintenance* (TBM). Bývá spojena s jednorázovým diagnostickým šetřením a jeho závislost na nákladech se nachází na obrázku (1.2b). Dle [4] se TBM řadí do střednědobého výhledu správy aktiv. Četnost údržby závisí na druhu a významu zařízení a je prováděna bez ohledu na aktuální provozní stav objektu. První částí TBM je vizuální prohlídka zařízení, očištění povrchů a kontrola funkce všech komponent. Poté následuje diagnostika požadovaných parametrů, z níž se vyvozují závěry. Limitní hodnoty sledovaných veličin jsou normalizovány a z diagnostického šetření se vydává správa o stavu sledovaného zařízení, které zahrnují i prognostiku budoucího stavu. Vyhodnocení získaných dat vyžaduje dostatečné zkušenosti v oboru a pracovníci musejí být schopni využívat různé fyzikální, empirické a statistické postupy ke stanovení jednotlivých výsledků a navržení následných opatření. Pokud si to stav zařízení žádá, tak je zapotřebí provést opravu, nebo vyměnit opotřebované části stroje a příslušenství. [6], [7], [8]



(a) Schéma systému údržby po poruše. [7] – převzato.

(b) Schéma systému údržby dle časového plánu. [7] – převzato.

Obrázek 1.2: Schéma systému údržby po poruše a dle časového plánu.

1.2.3 Údržba dle aktuálního stavu

Tato údržba je nazývána *Condition Based Maintenance* (CBM) a využívá online diagnostiku. Během ní se pomocí pečlivě vybraných parametrů monitoruje sledované zařízení za plného provozu. Dle [4] patří CBM do střednědobého výhledu správy aktiv. Principiálně se jedná o to, že plán údržby je vytvářen na základě aktuálního stavu diagnostikova-

ného objektu, viz (1.3a), nikoliv na odhadované době jako v předchozím případě. Tím jsou značně sníženy náklady na opravy. CBM se těší hojnému využití v Kanadě a Čínské lidové republice. Nicméně ani my, v České republice, nezůstáváme pozadu, a to díky společnosti ČEPS, která implementovala online monitorovací zařízení do všech svých transformátorů. Stejnou rétoriku vyznává i skupina ČEZ, jenž podniká obdobné kroky. [8]

Ke zvýšení spolehlivosti systému a k optimalizování údržby může dojít již ve fázi projektu i na existujícím systému. Aplikovat lze výkonný analytický postup FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) nebo také FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*). FMEA lze přeložit jako účinek a důsledek poruchy a FMECA je rozšířeno o analýzu kritičnosti poruchy. Jedná se o analyzování každé možné poruchy z hlediska změn chování systému. Dále jsou brány v potaz příčiny vzniku těchto změn a vyplývající následky s hodnocením závažnosti poruchy a jejím vlivem na provozuschopnost systému jako celku. Pro zachování maximalizování věrohodnosti diagnózy a prognózy libovolné poruchy je využíván postup FMSA (*Failure Mode Symptom Analysis*) zabývající se příznaky poruchových stavů. [9]

Pojmy spojené s údržbou dle aktuálního stavu

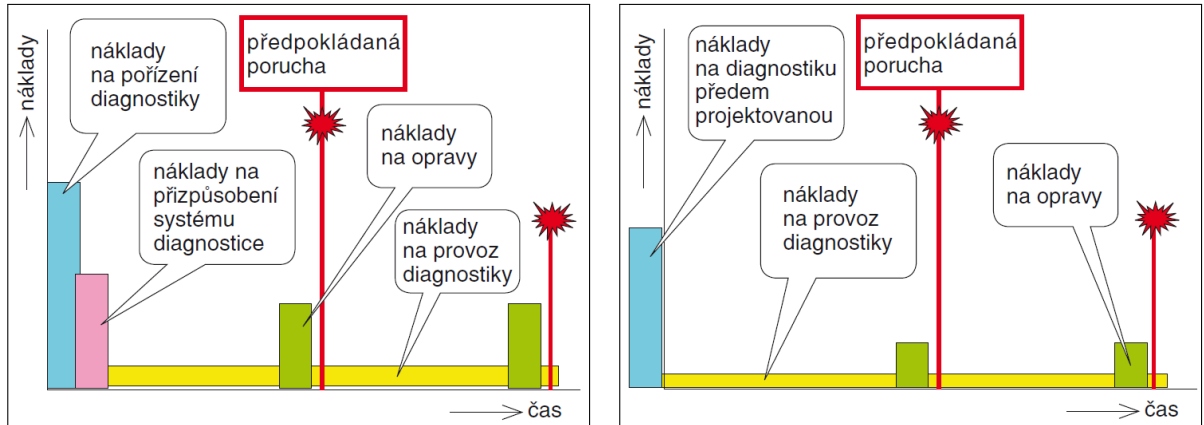
- **Prediktivní údržba** – anglicky: *Forecast Based Maintenance* (FBM) je dána na základě chování diagnostických parametrů v čase a předpovídá budoucí stav monitorovaného objektu. [6]
- **Údržba zaměřená na spolehlivost** – anglicky: *Reliability Centered Maintenance* (RCM) má za cíl vytvořit takový systém údržby, jaký pomůže minimalizovat celkové provozní náklady a zároveň zachovat požadovanou úroveň spolehlivosti a bezpečnosti. RCM se původně začala uplatňovat v leteckém průmyslu na přelomu 50. a 60. let minulého století a v počátku 90. let se rozšířila do dalších industriálních odvětví. [10]
- **Údržba zaměřená na minimalizaci rizik** – anglicky: *Risk Based Maintenance* (RBM) definuje údržbářské práce skrze posouzení rizika selhání. Vyvažuje rizika s náklady na údržbu. Říká, že údržba je přednostně prováděna na zařízeních, kde v případě výpadku hrozí ohrožení života nebo majetku. [11]

1.2.4 Prognostika a proaktivní údržba

Prognostika slouží k predikci možného místa, druhu, času a příčiny poruchy na základě degradačních procesů. Vyžaduje znalost prostředí, provozních a okolních vlivů i konstrukce zařízení. Užitečné jsou záznamy a historie údržbářských činností, oprav a časový vývoj diagnostických parametrů. [6]

Proaktivní údržba prozatím není v energetice hojně využívána. Jedná se o pomyslnou nadstavbu CBM. Soustředěna je na minimalizaci okolních vlivů, které nastávají při in-

stalaci a není je možné zásadním způsobem ovlivnit. Nicméně jak je patrné ze schématu (1.3b), tak v prování s údržbou dle aktuálního stavu odpadají náklady na přizpůsobení systému samotné diagnostice. Již při výrobě zařízení či stroje je pamatováno na budoucí diagnostický systém, čemuž odpovídá vybrání vhodných míst pro umístění snímačů teploty, vibrací, nebo k odběru vzorků maziva. Do ostrého provozu je poté uváděn stroj s komplexním diagnostickým systémem. [6], [7]



(a) Schéma systému údržby dle aktuálního stavu. [7] – převzato.

(b) Schéma systému proaktivní údržby. [7] – převzato.

Obrázek 1.3: Schéma systému údržby dle aktuálního stavu a proaktivní údržby.

1.2.5 Porovnání druhů údržby

Následující tabulka (1.1) ukazuje porovnání výše uvedených druhů údržby z hlediska nákladů na opravy, použitelnosti v moderní energetice, vhodnosti pro klíčová zařízení a využití diagnostiky.

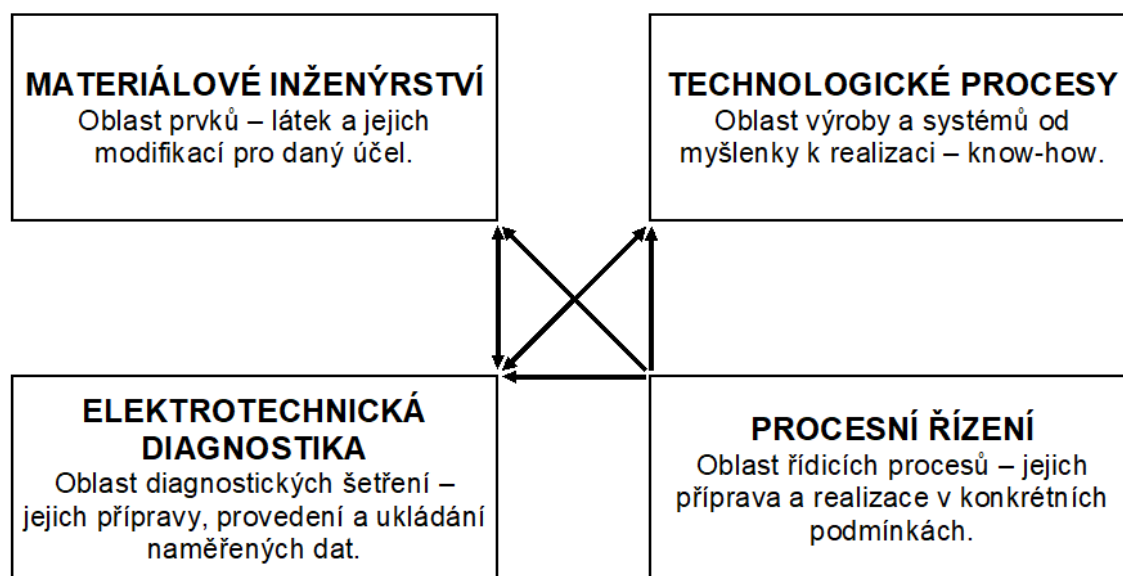
Tabulka 1.1: Porovnání druhů údržby.

	IBM	TBM	CBM	Proaktivní údržba
<i>Náklady na opravy:</i>	Vysoké	Střední	Nízké	Nízké
<i>Využití v moderní energetice?</i>	Ne	Ano	Ano	Ano
<i>Vhodné pro klíčová zařízení?</i>	Ne	Ne	Ano	Ano
<i>Využití offline diagnostiky?</i>	Ne	Ano	Ne	Ne
<i>Využití online diagnostiky?</i>	Ne	Ano	Ano	Ano

2 Elektrotechnická diagnostika

Druhou kapitolu předkládané diplomové práce je možné rozdělit do dvou částí. První obecně pojednává o elektrotechnické diagnostice a druhá uvádí přehled vybraných diagnostických metod, technik či přístrojů vhodných pro transformátory, elektrické točivé stroje a vysokonapěťové kabely. Zaměření je především na využití pro online diagnostiku, nicméně ani offline šetření nebudou opomenuta.

Elektrotechnika je jedním z hnacích motorů celosvětového průmyslu a bez dostatečných informací by nemohla fungovat. S tím souvisejí i rostoucí nároky na přesnost, kvalitu a spolehlivost všech objektů při zachování požadované ceny. V dnešní době je nutné, z důvodu vyšší konkurenceschopnosti, se řídit skupinou norem řady ČSN EN ISO 9000 definující požadavky systému managementu kvality. Samozřejmostí je maximální důraz na šetrnost k životnímu prostředí, s tím souvisí soubor enviromentálních norem řady ČSN EN ISO 14000. [12]

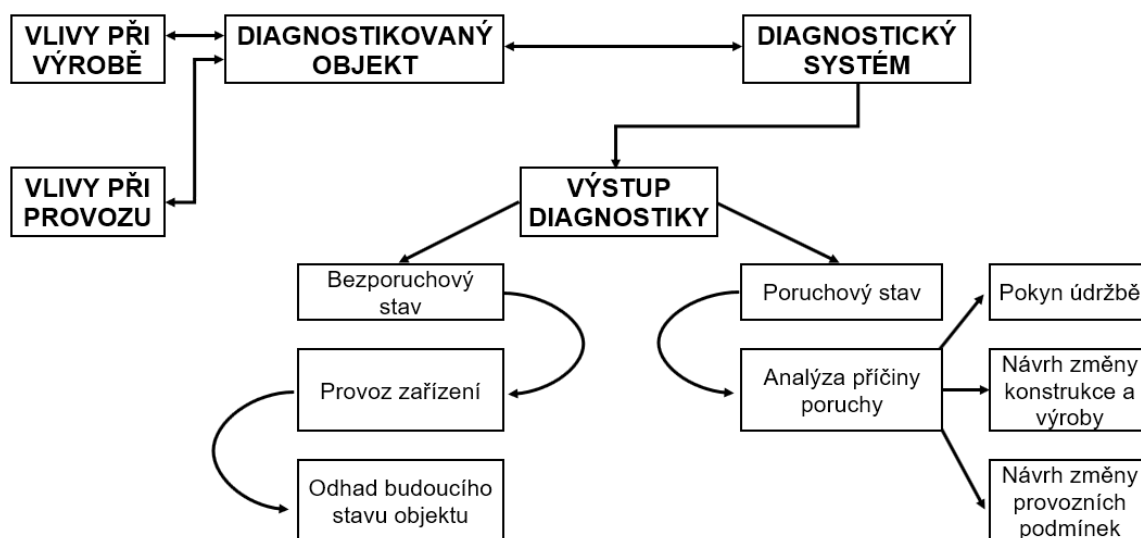


Obrázek 2.1: Struktura současné elektrotechnologie. [12] – převzato.

Při výrobě elektrotechnických zařízení dochází k prolínání více vědních disciplín. *Materiálové inženýrství* slouží k definování potřebných materiálů nebo modifikací základních látek tak, aby plnily potřebnou funkci. Již na úrovni materiálového inženýrství je nutné brát v potaz diagnostická měření, jelikož se jedná o jejich vzájemnou interakci, viz (2.1). První diagnostické šetření přichází v úvahu při vstupu materiálů do výrobního procesu a je zapotřebí získat informace, zda jsou vlastnosti v předepsaných mezích s přípustnými tolerancemi. V oblasti *technologických procesů* hraje diagnostika výraznou roli, jelikož do popředí vystupuje trojice kontrol: vstupní, mezioperační a výstupní. Díky pravidelným kontrolám se z výrobního procesu vyloučí špatné díly či jejich součásti. Pravidelné

kontroly mají i pozitivní vliv na ekonomickou bilanci, neboť se zabrání dalšímu postupu vadného výrobku. Výstupní kontrola spočívá v odzkoušení výrobku u výrobce. Diagnostika je tedy přináší zlepšení. *Procesní řízení* zahrnuje všechny výrobní procesy a má přímý vliv na materiálové inženýrství, technologické procesy a samotnou diagnostiku. [12]

Přínosy elektrotechnické diagnostiky musíme chápat v širších souvislostech, zejména v rozboru příčin poruch, ke kterým dochází nebo může dojít v průběhu provozu zařízení. Nastalé poruchy musí být uchovány v databázích a tříděny. Během šetření příčiny vzniku poruchy vyplouvají na svět zajímavé informace a fakta, jež jsou nesmírně cenná. V případě opakující se poruchy je poukázáno na nevhodnou konstrukci zařízení, což vede k její změně. Analýza opakovaných poruch může poukázat i na další možné příčiny vzniku, jakým je přetížení stroje, tedy nevhodně nastavené pracovní podmínky. Instrukce diagnostiky vedou ke krokům odstraňujícím tento zátěžový faktor. Dále může vést k pokynům pro údržbu, jak patrné ze schématu (2.2). V případě vzniku chyby či poruchy musí dojít k jejímu, co možná nejefektivnějšímu a nejrychlejšímu, odstranění. [13]



Obrázek 2.2: Vazby diagnostického systému. [12] – převzato a upraveno.

Je však samozřejmostí, že provozovatel i koncový zákazník chtějí, aby výstupem z diagnostického systému byl bezporuchový stav. Tento výstup vede ke spokojenosti všech zainteresovaných stran a jejich profitu. Na druhé misce vah je nežádoucí poruchový stav. Výraznou roli, při provozní diagnostice, hraje sledování života technického zařízení. Dochází ke sledování, ukládání údajů a vytváření cenných databází hodnot popisujících vývoj chování systému. Takto získané informace vedou k vypracování předpovědi chování systému v budoucnu. Jedná se o prognostiku, která byla popsána v předchozí kapitole. [13]

Diagnostikovaný objekt je v pomyslném středu schématu. Působí na něj provozní vlivy, jejichž zdroji jsou okolní prostředí, provozní podmínky, interakce a lidský faktor. Mezi vlivy působící při výrobě se řadí výrobní technologie, podmínky při výrobě a stejně jako v předchozím případě interakce a lidský faktor. Interakcí se rozumí vzájemné působení provozních a výrobních vlivů. [12]

Vybrané pojmy z hlediska diagnostiky, dle [9], [14]

- **Objekt** – je hlavním předmětem diagnostiky. Má své přesné určení a funkci. Skládá se z elementárních prvků propojených vzájemnými vazbami (relacemi). Ty jsou rovněž provázány s vnějším (okolním) prostředím.
 - *Prvek* – samostatná část objektu propojená relacemi.
 - *Systém* – soustava prvků plnící definovanou funkci.
- **Spolehlivost** – je obecná vlastnost výrobku, stroje nebo zařízení spočívající ve schopnosti plnit definovanou funkci. Její hodnota se pohybuje v intervalu od 0 do 1, ale zpravidla je vyjadřovaná v procentech.
 - *Bezporuchovost* – ukazuje míru způsobilosti zařízení plnit, bez vzniku poruchy, definovanou funkci, a to po stanovenou dobu a podmínek.
 - *Životnost* – je způsobilost výrobku plnit požadované funkce až do mezního stavu (údržba, výměna nebo oprava). Provozní dobu vyjádřenou počtem provozních cyklů, hodin, či kalendářní dobou je možné označit jako životnost.
 - *Udržovatelnost* – je vlastnost tkvící ve způsobilosti k předcházení poruch na základě údržby.
 - *Opravitelnost* – se projevuje při vzniku poruchy. Spočívá v jejím odhalení, zjištění příčiny a následném odstranění.
 - *Bezpečnost* – je v dnešní době prioritní vlastností. Žádné zařízení nesmí během provozu ohrožovat lidské zdraví, životní prostředí a celkový chod systému.
 - *Porucha* – je nežádoucím jevem. Předcházení poruchovým stavům řeší diagnostické systémy.

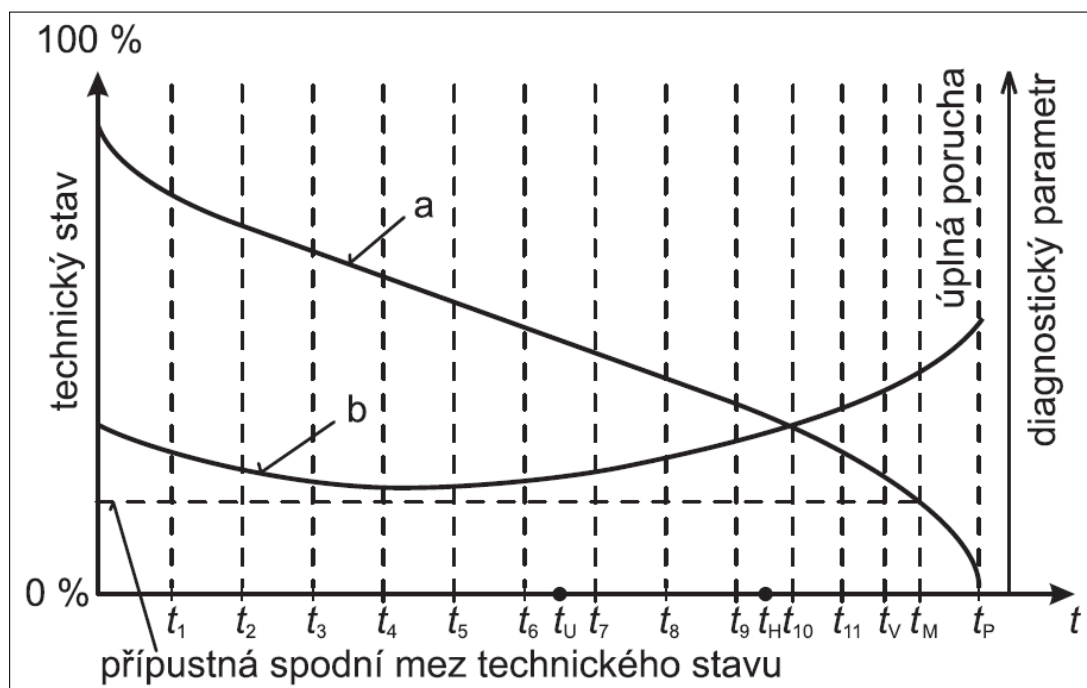
Technický stav

Množina vybraných prvků objektu a relací udává v daném okamžiku informaci o technickém stavu objektu. Volba prvků odpovídá požadovanému diagnostickému aspektu. Diagnostickou relační strukturu lze definovat vztahem:

$$DS = \{A; R\}, \quad (2.1)$$

kde DS označuje diagnostickou relační strukturu $A = \{a_i\}$ náleží množině vybraných parametrů určující technický stav hmotných prvků objektu a $R = \{r_i\}$ je množina relací mezi parametry prvků množiny A . Technický stav jakéhokoliv zařízení se s přibývajícím provozním časem mění. Avšak při správném využití online diagnostických systémů je možné sledovat tento vývoj, čímž dojde k získání aktuální informace o jeho technickém stavu. [9], [14]

Obrázek (2.3) ukazuje provázanost technického stavu (křivka a) objektu a diagnostického parametru (křivka b). Jako technický stav si lze představit provozuschopnost zařízení, která s přibývajícím provozním časem klesá. Budem-li se bavit o diagnostickém parametru, tak nám jako dobrý příklad poslouží *ztrátový činitel* $\text{tg}\delta$ izolace vinutí točivých strojů. Ten je na počátku provozu, akvizice stroje, na výrobcem a dodavatelem deklarované úrovni, jež se provozem snižuje. Důvodem tohoto snížení je působení mnoha okolních a vnitřních vlivů, mezi nimiž hraje prim působení tepla, které na počátku zapříčiní vytvrzení elektroizolačního systému statorového či rotorového vinutí. Nicméně proces vytvrzování netrvá, díky okolním a vnitřním vlivům, věčně. V případě na obrázku do doby t_4 , kdy působení vnější a vnitřních vlivů zapříčiní deterioraci izolačních schopností, tedy přírůstek $\text{tg}\delta$. Po okamžiku t_H je zvýšen interval měření, aby se předešlo nepodchycení poruchy v zárodku. Nejvhodnějším dobou pro výměnu objektu či jeho komponenty (výměna stroje či revitalizace izolace vinutí) je čas t_V . Po dosažení mezního stavu t_M je to jen krůček k poruše a značným finančním ztrátám.



Obrázek 2.3: Vývoj technického stavu objektu. [9] – převzato.

a – technický stav;

b – diagnostický parametr;

t_1, t_2, t_3, \dots – časové termíny měření;

t_U – termín údržby;

t_H – okamžik hlášení o zhoršení technického stavu objektu s prognózou o nutné opravě a zvýšení frekvence intervalů měření;

t_V – vhodná chvíle pro úpravu či výměnu objektu nebo jeho komponenty;

t_M – dosažení mezního stavu objektu;

t_P – okamžik poruchy a výpadku provozu.

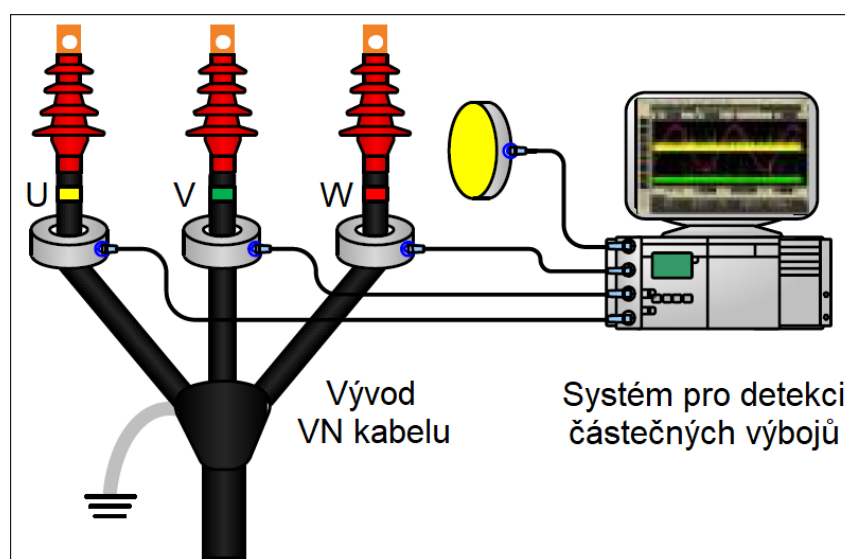
2.1 Diagnostika kabelů

Kabelová síť stále více nabývá na významu. Dochází k jejímu rozšiřování, což sebou přináší rostoucí nároky na dlouhodobou životnost a na spolehlivost dodávky elektrické energie. Vysokonapěťové kabely jsou uloženy, v potrubí, v kabelových lávkách nebo v zemi, kde jsou vystaveny přímému vlivu vlhkosti, která má vliv na degradaci izolace. Ke správnému stanovení stavu nových či již provozovaných kabelů je, stejně jako v ostatních diagnostických šetřeních, potřeba kombinace metod vedoucích k odhalení všech možných degradačních faktorů. Je nasnadě, že každé prostředí se vyznačuje jinými vlivy na zařízení. Výhodnou kombinací pro diagnostiku VN kabelů je spojení online měření *částečných výbojů* a offline měření *ztrátového činitele* $\text{tg}\delta$. [15], [16]

2.1.1 Online měření částečných výbojů

Zařízení pro online měření částečných výbojů se umísťuje v rozvodných stanicích nebo ve spojovacích skříních. Má dva hlavní úkoly: první je odhalení výbojové činnosti a druhým je její přesná lokalizace. Na VN kabel se umístí senzory, které se propojí s měřicím zařízením. Pro získání smysluplných informací, navzdory aktivnímu síťovému provozu, je nezbytné, aby software vyhodnocovacího zařízení dokázal rozlišit mezi interferenčními signály a činností částečných výbojů. [16]

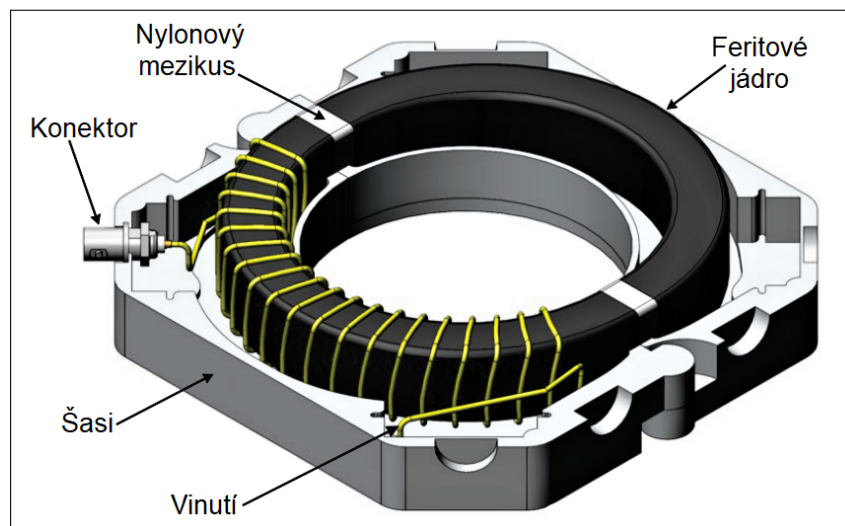
Pro detekci částečných výbojů může být použito vícero senzorů jako: vysokonapěťový vazební kondenzátor, Rogowského cívka, detektory tranzitních napětí, či senzory založené na akustické a radiofrekvenční detekci. Veškeré použití záleží na konkrétní aplikaci. Senzor s všestranným použitím je vysokofrekvenční proudový transformátor – HFCT¹. Zapojení HFCT na jednotlivé fázové vývody VN kabelu je na obrázku (2.4). [17], [18]



Obrázek 2.4: Zapojení online měřicího systému VN kabelu. [17] – převzato a upraveno.

¹Zkratka z anglického: *High Frequency Current Transformer*.

Tento typ senzoru disponuje jednoduchou instalací, nízkým rušením a je i bezpečný. HFCT pracuje na principu elektromagnetické vazby mezi vodičem (VN kabelem) a jím samotným. Aktivita částečných výbojů v pevné izolaci kabelu produkuje malé vysokofrekvenční proudy, které se šíří až do rozvodny, kde mohou způsobit nemalé škody. Detekce těchto proudů je možná pomocí vysokofrekvenčních proudových transformátorů. [17], [19]



Obrázek 2.5: Model vysokofrekvenčního transformátoru proudu. [18] – převzato a upraveno.

Na obrázku (2.5) je detailu vidět konstrukce běžného vysokofrekvenčního proudového transformátoru. HFCT se skládá z měděného vinutí, feritového jádra toroidního tvaru, šasi a nestíněného konektoru pro připojení k měřicímu systému. Výhodou je, že disponuje vysokou citlivostí a značnou šíří frekvenčního pásma. [18]

Tabulka 2.1: Úrovně výsledku diagnostiky kabelů, dle [15].

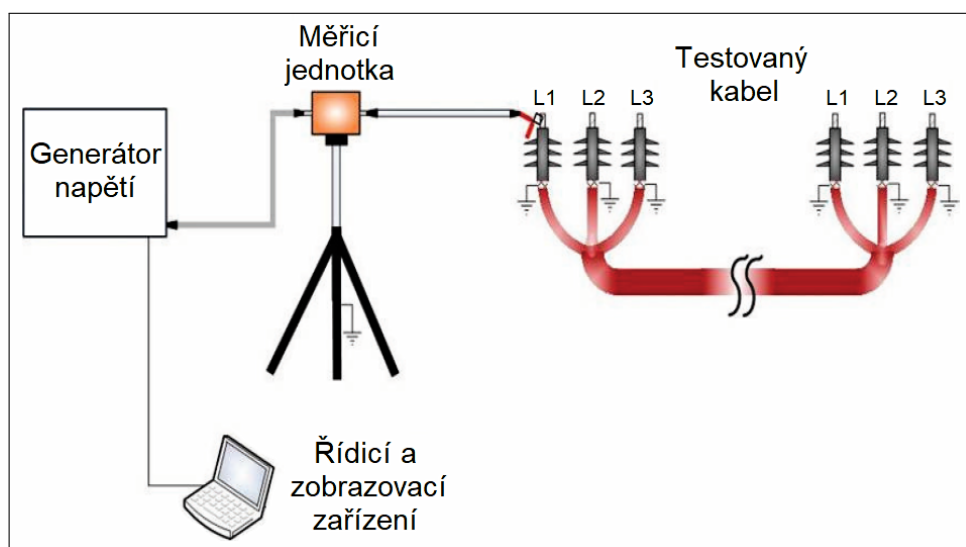
Úroveň	Výsledek	Doporučení
1	Systém není degradovaný.	Další kontrola během 2 až 3 let.
2	Systém je lehce degradovaný.	Ošetření izolace kabelu do 2 let, běžná údržba komponentů další 2 roky.
3	Nízká až střední úroveň zestárnutí, nízká pravděpodobnost selhání do 2 let.	Ošetření izolace kabelu během následujícího roku, kontrola komponent za 1 rok.
4	Střední pravděpodobnost selhání v následujících 2 letech.	Výměna kabelů i komponentů závisí na další diskuzi.
5	Vysoká pravděpodobnost selhání v následujícím roce.	Nutná okamžitá výměna kabelu a dalších komponentů.

Výstupem z tohoto online diagnostického šetření by mělo být resumé, zda je měřený vysokonapěťový kabel schopen sloužit svému účelu i nadále. V závislosti na měření mnoha set kilometrů kabelů byla vyhotovena škála [15] pro posouzení provozuschopnosti kabelu, která je zřetelná z výše uvedené tabulky (2.1).

2.1.2 Offline měření ztrátového činitele

Již bylo zmíněno, že výhodnou kombinací při diagnostice VN kabelů je spojení online a offline měření, což bylo předmětem vědecké práce, viz [16]. Autoři provedli měření částečných výbojů, když bylo zařízení v provozu. Následně lokalizovali jejich velký výskyt 350 metrů od místa měření. Pro ověření bylo provedeno offline měření částečných výbojů a potvrdilo předchozí závěr.

Nejnáchylnější místa vůči vlivům degračních činitelů, okolní vlhkost a výbojová činnost, v kabelových sítích jsou kabelové spoje. Deteriorace se projeví jako zvýšení ztrátového činitele $\text{tg}\delta$, což může vést ke ztrátě izolačních schopností. [16]



Obrázek 2.6: Zapojení zařízení pro měření $\text{tg}\delta$. [20] – převzato a upraveno.

Zapojení zařízení pro měření ztrátového činitele je na obrázku (2.6). Systém se skládá z generátoru napětí, řídicího a zobrazovacího zařízení a měřicí jednotky. Dnes je možné dostat měřicí systémy, které zahrnují všechny tři části do jedné.

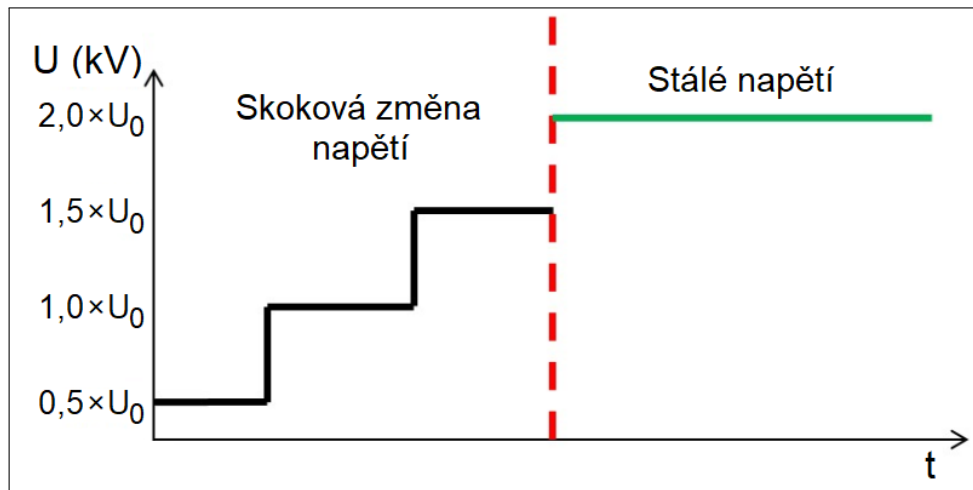
V současnosti se pro zjištění ztrátového činitele využívá metody pracující na velmi nízkých frekvencích VLF². Principem měření je připojení kabelu ke střídavému napětí s frekvencí 0,1 Hz až 1 Hz, které je až dvojnásobně větší než nominální. Normou IEEE³ 400.2 [21] je doporučeno začínat měření na $0,5 \cdot U_0$ a pokračovat až do hodnoty $1,5 \cdot U_0$. Na každé napěťové hladině by se mělo provést 6 až 10 měření z nichž se určí střední hodnota, směrodatná odchylka a tzv. *tip-up* hodnota $\text{tg}\delta$, která je dána rozdílem $1,5 \cdot U_0 - 0,5 \cdot U_0$. Doba, po kterou je prováděno měření, se pohybuje v intervalu od 30 do 60 minut. Pokud se však již během testu zjistí, že dosažené hodnoty ztrátového činitele nevykazují výrazný nárůst, tedy zhoršení izolační schopnosti, je možné snížit interval na 15 minut. Tento test se nazývá monitorovaný test odolnosti – MWT⁴. Test se dělí na dvě fáze: v první se napětí zvyšuje skokově z $0,5 \cdot U_0$ na $1,5 \cdot U_0$ s krokem $0,5 \cdot U_0$ a ve druhé je napětí zvýšeno

²Zkratka z anglického: *Very Low Frequency*.

³Zkratka z anglického: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

⁴Zkratka z anglického: *Monitored Withstand Test*.

na $2 \cdot U_0$. Druhá fáze testu je delší než první, viz obrázek (2.7). Pokud je test odolnosti kombinován s měřením částečných výbojů, pak dostává uživatel přehled o stavu kabelové sítě. [22]



Obrázek 2.7: Fáze MWT. [22] – převzato a upraveno.

Výsledky měření se porovnají s kritérii zahrnutými v příloze IEEE 400.2, ta jsou odlišná pro různé typy izolace. Kritéria uvedená v tabulce (2.2) platí pro izolaci z polyetylénu (PE) a zesíťovaného polyetylénu (XLPE) a jsou používána mimo Severní Ameriku.

Tabulka 2.2: Kritéria pro posouzení stavu PE a XLPE izolace, dle [21].

Posouzení stavu	$\text{tg}\delta(0,5 \cdot U_0)$ (10^{-3})		$\text{tg}\delta(0,5 \cdot U_0) \div \text{tg}\delta(2 \cdot U_0)$ (10^{-3})		$\text{tg}\delta(2 \cdot U_0)$ (10^{-3})
<i>Bez zásahu</i>	$< 0,1$	a	$< 0,6$	a	$< 1,2$
<i>Další měření</i>	$0,1 \div 0,5$	nebo	$0,6 \div 1$	nebo	$1,2 \div 2$
<i>Nutný zásah</i>	$> 0,5$	nebo	> 1	nebo	> 2

Důvodem, proč používá nízkých frekvencí, je snížení výkonu dodávaného do kabelu, tedy velice nízký proud při vyšší hodnotě napětí. Vyjděme z rovnice pro výkon (2.2):

$$P = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U^2, \quad (\text{W}) \quad (2.2)$$

kde f (Hz) je frekvence, C (F) představuje kapacitu izolace a U (V) přikládané napětí. Běžná frekvence napětí v síti je 50 Hz, avšak při použití napětí s velmi nízkou frekvencí (0,1 Hz) dostáváme $500\times$ nižší výkon a proud. Tento fakt znamená, že měřicí zařízení bude mít menší rozměry, což napomáhá snadnému přemístění. [23]

2.2 Diagnostika točivých strojů

Elektrické točivé stroje nelze ve výčtu opomenout. Z hlediska online diagnostiky mohou být zkoumány částečné výboje, rozběhový proud, měření jejich hluk či vibrace. Právě o *vibrační diagnostice* pojednávají následující odstavce.

Světě elektrotechniky dělí elektrické točivé stroje do různých kategorií. Nicméně pro diagnostická šetření jsou děleny do třech skupin dle výkonu: malé, střední a velké. Malé a střední zaujímají 90 % vyráběných a používaných elektrických točivých strojů. [12] Zbytek připadá na výkonem velké, které slouží jako truboalternátory, hydrogenerátory nebo vysokonapěťové motory.

2.2.1 Vibrační diagnostika

Vibrace působí nepříznivě na provoz strojů a předem signalizují možný vnik závady. Vibrodiagnostika se řadí k oborům technické diagnostiky a je užitečná při péči o točivé stroje a jejich mechanické části. Je-li prováděná kvalitně, pak se stává je nezbytnou součástí systémů údržby a současně zaručuje bezporuchový a bezpečný provoz zařízení. Vibrodiagnostice se věnuje řada norem. Například devátá část ČSN ISO 13373 [24] popisuje diagnostické metody pro elektromotory. [25]

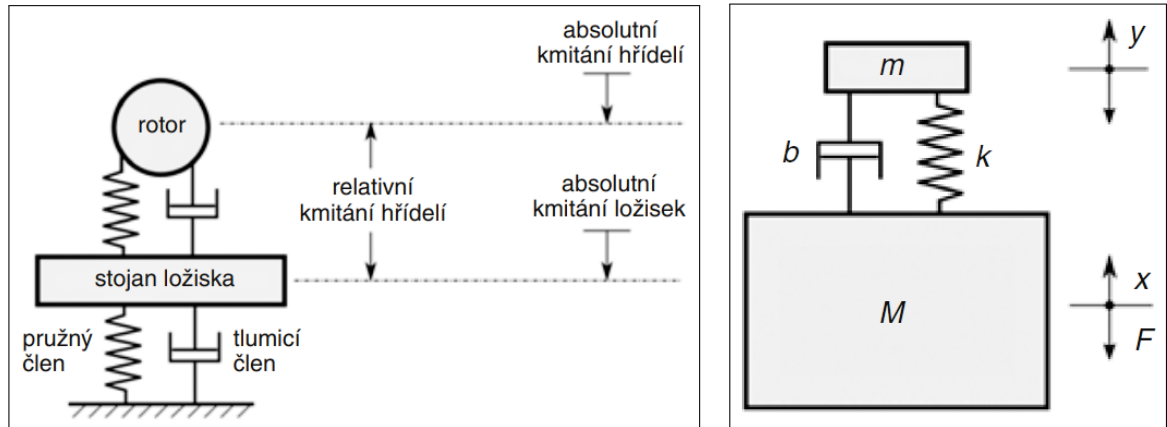
Elektrický točivý stroj, připojené zařízení a konstrukce dohromady vytváří komplexní elektromechanický celek. V době provozu stroje může dojít k jeho namáhání, jež je způsobeno kmitáním na odlišných frekvencích. Tyto frekvence stojí za zvýšením akustického hluku, který v kombinaci se stálým mechanickým namáháním vede až k selhání stroje. Největší procento vibrací pochází z ložisek, hřídelí, klikových ústrojí, vačkových mechanismů nebo nevyvážených rotačních součástí. [25], [26]

Dle publikace [26] se v elektrických točivých strojích nacházejí čtyři hlavní a vzájemně související zdroje vibrací:

- odezva jádra statoru na přitažlivou sílu mezi rotorem a statorem;
- dynamické chování rotoru v ložiscích při chodu stroje;
- vazba hřídelových ložisek na vibrace přenášené z rotoru;
- vazba konce statorového vinutí a elektromagnetické síly na vodičích.

Pro správné provedení vibrační diagnostiky je nutné vytvořit metodiku, která bude brát v potaz kinematické schéma stroje, rozmístění měřicích bodů, očekávané a limitní hodnoty, nebo zda bude měření dotykové či bezdotykové. Z hlediska samotného kmitání je důležité odlišit, zda se jedná o absolutní či relativní kmitání. *Absolutní kmitání* popisuje pohyb tělesa (zařízení, části stroje) vzhledem k planetě Zemi, tedy fixnímu bodu. *Relativní kmitání* je pohyb ke zvolenému relativnímu bodu jako je rám stroje, jenž sám může kmitat vzhledem zemskému souřadnému systému (2.8a). Bylo by pošetilé se domnívat, že veškeré vibrace je možné měřit přímo v místě jejich vzniku. Například kmity hřídele uložené v kluzných ložiskách utlumí mazivo. Takže na tělese ložiska, na rozdíl od uložení hřídele

ve valivých ložiskách, vibrace nelze měřit. K analýze je potřeba relativní snímač kmitů hřídele proti rámu, popřípadě navíc měřit absolutní vibrace samotného rámu. [12], [27]



(a) Relativní a absolutní kmity. [27] – převzato.

(b) Obecný princip snímače vibrací. [27] – převzato.

Obrázek 2.8: Relativní a absolutní kmity a obecný princip snímače vibrací.

Měření vibrací

Z hlediska mechaniky lze pohyb popsat pomocí dráhy (vychýlení za rovnovážné polohy), rychlosti a zrychlení (2.8b). Jednotlivé veličiny jsou na sobě matematicky závislé a popisuje je následující matematický vztah⁵:

$$m \cdot \ddot{y} + b \cdot \dot{y} + k \cdot y = \mathbf{F}_b = M \cdot \ddot{x}, \quad (\text{N}) \quad (2.3)$$

kde m (kg) je hmotnost snímače, b (N s m^{-1}) je součinitel tlumení, k (N m^{-1}) je tuhost pružiny, \ddot{y} (m s^{-2}) je zrychlení snímače vzhledem k objektu, \dot{y} (m s^{-1}) je rychlost, y (m) je vychýlení z rovnovážné polohy, \mathbf{F}_b (N) je budící síla, M (kg) je hmotnost objektu a \ddot{x} (m s^{-2}) je zrychlení objektu. Z rovnice (2.3) plyne, že vhodnou volbou parametrů m , b a k lze vytvořit snímač jakékoliv charakteristické veličiny kmitavého pohybu. [27], [28]

Snímač výchylky

Obecně snímače výchylky fungují na několika principech: magnetický, optický, kapacitní nebo indukční. Polední jmenovaný našel uplatnění ve vibrační diagnostice. Využívá k měření vzdálenosti mezi špičkou snímače a vodivým povrchem vysokofrekvenčních střídavých vířivých proudů, které vnikají v oscilátoru a dále prochází cívku zabudovanou ve snímači. V okolí špičky snímače vzniká elektromagnetické pole s frekvencí cca 1,5 MHz. Toto pole indukuje ve vodivém materiálu vířivé (Foucaultovy) proudy, jež pohltí část energie, což se projeví změnou impedance cívky. Vzhledem k vysokofrekvenčnímu principu

⁵Zápis derivací v rovnici (2.3) je proveden tzv. Newtonovou notací: $\ddot{y} = \frac{d^2 y}{dt^2}$, $\dot{y} = \frac{dy}{dt}$, $\ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2}$. Derivace je možné nahradit běžnějším zápisem: \mathbf{a} – zrychlení a \mathbf{v} – rychlost.

jde o snímače s vysokou citlivostí na parazitní vlivy, jako jsou např. vnější elektromagnetická pole, délka kabelu apod. To je důvod, proč se elektronika uzavírá do stíněných krytů a kabel vedoucí ke špičce snímače má neměnnou délku. Snímače odpovídají konkrétnímu materiálu hřídele a nemohou být použity pro hřídel vyrobený z jiného materiálu. Důvodem je závislost výstupního napětí na frekvenci elektromagnetického pole, na vodivosti měřeného materiálu a na jeho permeabilitě. Obvyklá citlivost snímače výchylky je $8 \text{ mV}/\mu\text{m}$. Koeficienty b a k , ze vztahu (2.3) jsou výrazně menší než koeficient m a je možné je zanedbat, čímž dostáváme: $m \cdot \dot{y} = M \cdot \ddot{x} \Rightarrow y \approx x$. Vychýlení objektu z rovnováhy se projeví jako změna vzdálenosti mezi ním a snímačem. [27], [29]

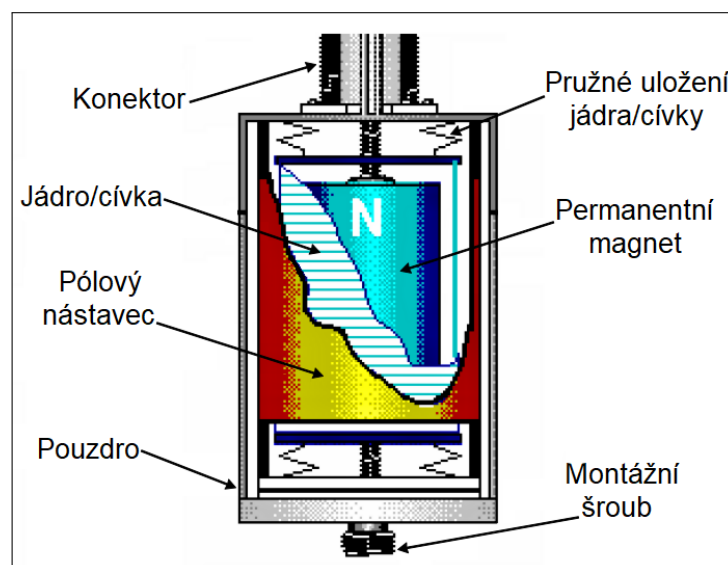
Snímač rychlosti

Navážeme-li na konec předchozího odstavce, tak při dominantním koeficientu b , v rovnici (2.3), platí, že $b \cdot \dot{y} = M \cdot \ddot{x} \Rightarrow y \approx \dot{x}$. Z toho plyne, že vibrace sledovaného objektu odpovídají rychlosti. Snímače rychlosti pracují na principu elektromagnetické indukce, tedy pohybem cívky v magnetickém poli se jejich vývodech indukuje napětí:

$$U_i = \mathbf{B} \cdot l \cdot \mathbf{v}, \quad (\text{V}) \quad (2.4)$$

kde U_i (V) je indukované napětí, \mathbf{B} (T) je magnetická indukce, l (m) je délka vodiče cívky a \mathbf{v} (m s^{-1}) odpovídá rychlosti kmitání pouzdra snímače. Velikost indukovaného napětí je, dle vztahu (2.4) přímo úměrná rychlosti mezi cívkou a magnetickým polem. Relativní rychlost odpovídala vibracím měřeného stroje. [27], [29]

Konstrukčně (2.9) se snímač skládá z *permanentního magnetu* a *cívky*, která je uložena na velmi měkkých pružinách a vlivem své setrvačnosti zůstává v klidu, zatímco permanentní magnet kmitá společně s pouzdem. V některých případech je vodič cívky navinut dvousměrně, a to z důvodu vyrušení externích elektrických polí. Elektrodynamické sní-



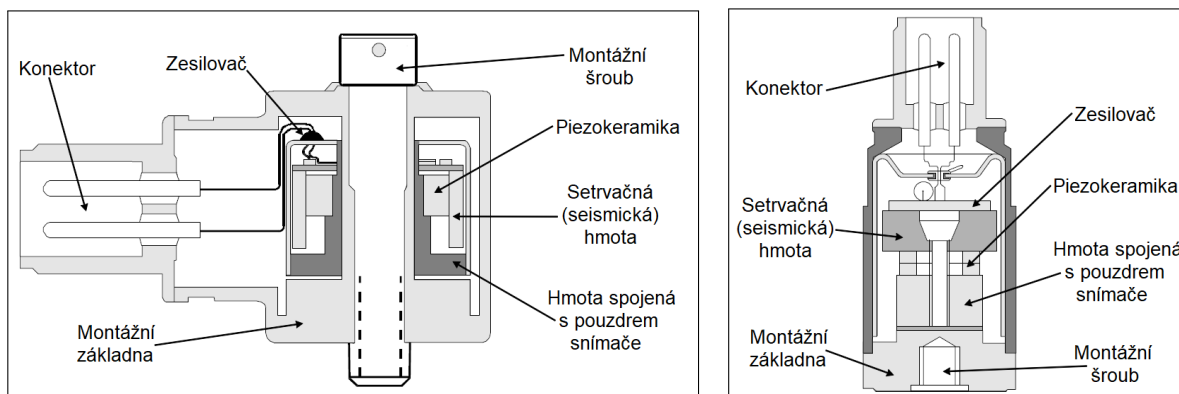
Obrázek 2.9: Snímač rychlosti s popisem. [29] – převzato a upraveno.

mače mají frekvenční rozsah daný konstrukcí. Obvykle se pohybuje od jednotek hertzů až po 3,5 kHz. Avšak kvůli již zmíněnému vnějšímu rušení a citlivosti na boční vibrace (odlišné od směru citlivé osy) jsou na ústupu. Postupně jsou nahrazovány akcelerometry, jejichž integrovaný signál poskytuje informaci o rychlosti kmitavého pohybu. [27], [29]

Snímač zrychlení

Snímače zrychlení jsou mezi širokou veřejností spíše známé pod označením **akcelerometry**. Jako v předchozích dvou případech vyjdeme z rovnice (2.3). Zanedbáme-li m a b , pak $k \cdot y = M \cdot \ddot{x} \Rightarrow y \approx \ddot{x}$. Jak je vidět, tak zrychlení objektu odpovídá výchylce. Akcelerometry jsou v současnosti považovány za základní snímače vibrací, protože s nimi lze měřit vibrace od 0 Hz až do 40 kHz. [27] Existují tři principy práce snímačů: piezoelektrický, kapacitní a piezorezistivní MEMS⁶. Bližší informace o kapacitních a piezorezistivních MEMS akcelerometrech jsou uvedeny v [25] a [30].

Piezoelektrické akcelerometry jsou principiálně založeny na piezoelektrickém jevu. Deformací destičky z piezoelektrického keramického materiálu vznikne elektrický náboj, jehož velikost odpovídá deformaci. Piezokeramika se nachází mezi setrvačnou (seismickou) hmotou a hmotou pevně s pouzdrum snímače, která je v kontaktu s měřeným strojem. Pokud diagnostikovaný stroj vibruje, tak hmota pevně spojená s pouzdrum snímače kmitá, zatímco seismická hmota je v klidu. Tak vzniká síla působící na piezokeramický prvek, který je touto silou deformován, čímž vzniká elektrický náboj. Vzniknuvší náboj je přímo úměrný zrychlení stroje. Samotný elektrický náboj není možné přenášet na delší vzdálenosti, a proto je nutné převést náboj na napětí pomocí zesilovače. U starší modelů byl tento zesilovač externího charakteru, ale v moderních snímačích je součástí pouzdra. Citlivost se udává v mV/g a nikoliv v pC/g. Referenční (seismická) hmota je v klidu, proto akcelerometry měří absolutní vibrace. S velikostí akcelerometru se zlepšuje jeho citlivost a schopnost měřit nižší frekvence. [25], [29]



(a) Smykový snímač zrychlení. [29] – převzato a upraveno.

(b) Tlakový snímač zrychlení. [29] – převzato a upraveno.

Obrázek 2.10: Smykový a tlakový snímač zrychlení.

⁶Zkratka z anglického: *Micro Electro Mechanical Systems*.

Dvojice obrázků (2.10) znázorňuje konstrukci smykového a tlakového snímače zrychlení. První jmenovaný našel, díky širokému frekvenčnímu rozsahu, malému vlivu teploty a odolnosti, značné uplatnění ve vibrační diagnostice. Uplatnění druhého jmenovaného snižuje náchylnost na změny teploty. [25], [29]

Protože jsou akcelerometry nejrozšířenějšími snímači vibrací, je důležité věnovat zvýšenou pozornost jejich uchycení ke sledovanému objektu. Způsob upevnění snímače má vliv především na frekvenční rozsah, v němž je možné měřit vibrace. Také jde o zdroj nejistot měření. Následující tabulka (2.3) uvádí dostupné možnosti uchycení akcelerometrů spolu s jejich klady a zápory. Podrobnosti jsou dostupné v [9] a [29].

Tabulka 2.3: Druhy upevnění akcelerometrů, dle [29].

Upevnění	Klady	Zápory
<i>Šrouby</i>	Pevné uchycení, zachování frekvenčního rozsahu snímače.	Nutnost vynikajícího opracování povrchu a kolmosti závitového otvoru.
<i>Lepidlo</i>	Zachování frekvenčního rozsahu snímače.	Teplotní omezení (tání lepidla).
<i>Magnet</i>	Rychlý způsob uchycení.	Limitace frekvencí (2 kHz), nutnost vynikajícího opracování povrchu.
<i>Včelí vosk</i>	Rychlý způsob uchycení.	Limitace teplotou (max. 40 °C), nevhodné pro diagnostiku, využitelné v laboratoři.

Reálné využití zmíněných snímačů

Snímač výchylky (2.11a) monitoruje vibrace pocházející z hřídele rotoru.

Snímač rychlosti (2.11b) se nachází konstrukční části stroje (rámu statoru).

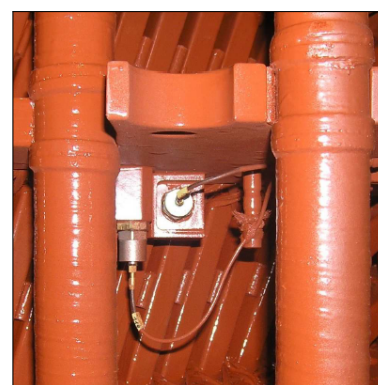
Snímač zrychlení (2.11c) umístěný na konci statorového vinutí točivého stroje.



(a) Snímač výchylky.



(b) Snímač rychlosti.



(c) Snímač zrychlení.

Obrázek 2.11: Reálné zapojení snímače výchylky, rychlosti a zrychlení. [28] – převzato.

2.3 Diagnostika transformátorů

Transformátory hrají důležitou roli při transportu elektrické energie z místa výroby ke koncovému zákazníkovi (domácnosti, továrny, nemocnice, atd.). V mnoha případech slouží tato zařízení desítky let a v důsledku rostoucí poptávky po elektrické energii bývaly často přetěžovány. Provoz transformátorové soustavy vyžaduje značné finanční prostředky na straně provozovatele. Taktéž jeho výměna je nákladná a časově náročná záležitost. V posledních letech je možné pozorovat, že vzrostla poptávka po nových transformátorech a nerostných surovinách používaných během výroby. To mělo za následek vyšší cenu zařízení a prodloužení dodací doby. Začátky diagnostiky transformátorů sahají do padesátých let minulého století. Jak bylo již zmíněno v první kapitole, tak stále větší slovo má údržba zakládající se na sledování aktuálního stavu provozovaného objektu (CBM), jež využívá online diagnostických metod. Jejich úkolem je stanovit, zda nechat zařízení v provozu, zahájit údržbu, ba dokonce ho vyměnit za nové. [31], [32], [33]

Za provozu působí na izolační systém transformátoru teplotní, elektrické a mechanické namáhání. Teplotní namáhání mají na svědomí Joulovy ztráty ve vinutí a ztráty v magnetickém obvodu. Výbojová činnost způsobená elektrickým polem snižuje elektrickou životnost, dále se objevují zkratky, které mohou vést k posunu vinutí. Samotný izolační systém olej-papír velmi trpí zvýšenou teplotou, intenzitou elektrického pole, vlhkostí, přítomností pevných částic a kyslíku. Provozem transformátoru vznikají: organické kyseliny, aldehydy, ketony, mýdla a polymery nenasycených uhlovodíků. Souhrnně se nazývají produkty stárnutí. Vedou ke snížení elektroizolační schopnosti a rychlejšímu stárnutí celého systému. [31], [33]

2.3.1 Detekce plynů v oleji

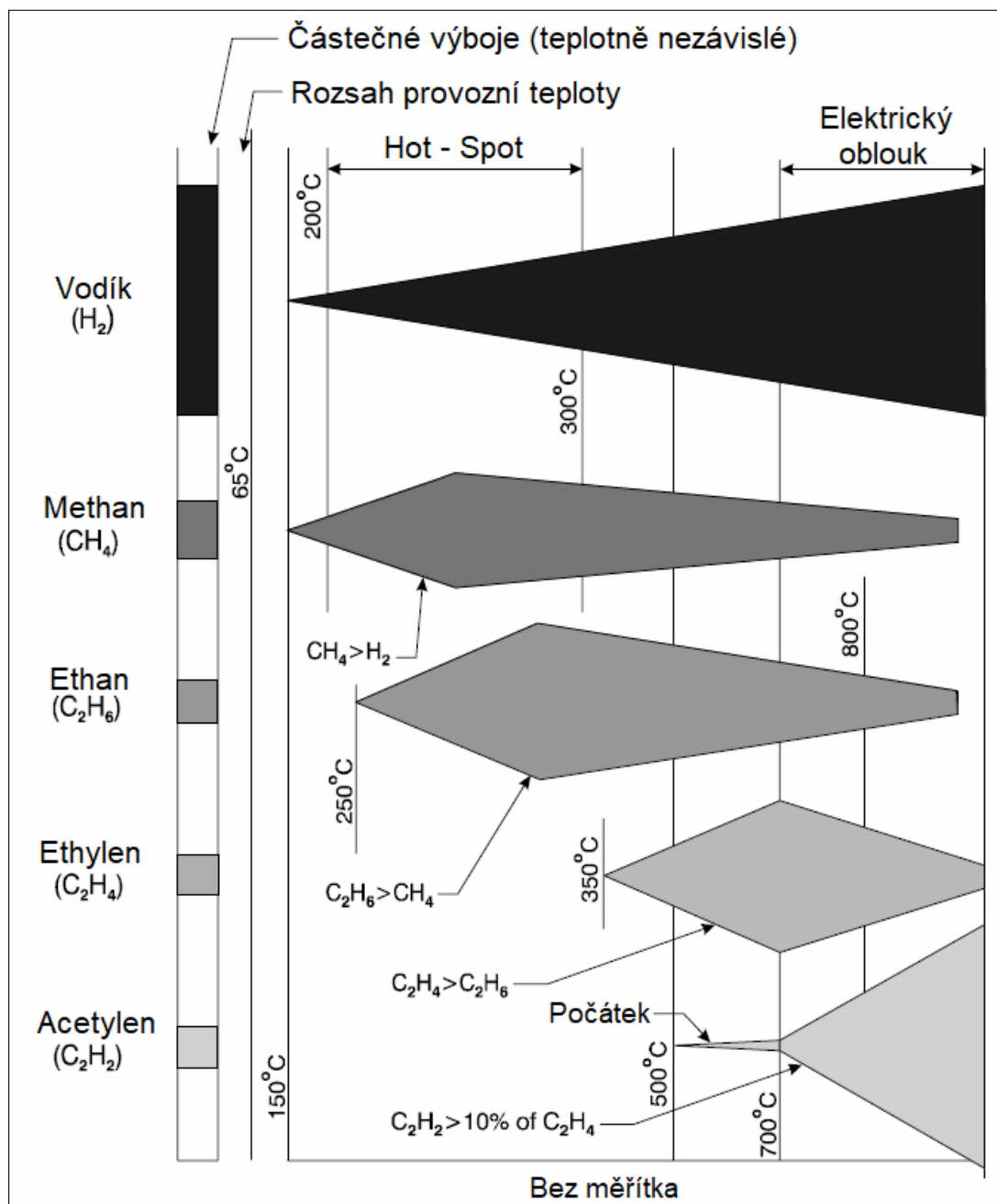
Jednou z nejrozšířenějších metod sloužících při diagnostice transformátorů je detekce rozpuštěných plynů v oleji – DGA⁷. Tyto plyny vnikají rozkladem oleje a pevné izolace, a to jako důsledek elektrických a tepelných poruch. Majoritním zdrojem plynů jsou částečné výboje, při nichž dosahuje teplota vodivého kanálu až k tisíci stupňů Celsia. Tímto exotermickým⁸ dějem dojde k narušení vazeb C-H a C-C. Tím vnikají nestabilní fragmenty vstupující do dalších reakcí, jejichž produkty jsou plyny jako ethylen (C_2H_4), acetylen (C_2H_2), ethan (C_2H_6), methan (CH_4), vodík (H_2) a jiné. Ke vzniku plynů v oleji dále vedou korozivní reakce oceli a nenatřených povrchů nebo ochranných nátěrů. [34]

V transformátorech nejčastěji využívány minerální a rostlinné oleje založené na vazbách uhlíku, vodíku a kyslíku, nejslabší vazbou je C-H, která značí tepelnou poruchu. [12] Ve výzkumu [35] bylo potvrzeno, že DGA je schopna podchytit přibližně 70 % nejčastějších příčin selhání olejových transformátorů.

⁷Zkratka z anglického: *Dissolved Gas Analysis*.

⁸Při exotermické reakci dochází k uvolnění energie ve formě tepla.

Obrázek (2.12) ukazuje vnikající plyny při poruchách v oleji. Jak je vidět, tak vznik plynů začíná při teplotě 150 °C. První vzniká vodík, pak methan a ethan. Od 500 °C se výrazněji projevuje ethylen a kolem 800 °C acetylen. Výčet vznikajících plynů provozem transformátoru by nebyl úplný bez oxidu uhličitého (CO₂) a uhelnatého (CO), jež pocházejí z C-O vazeb polymerních řetězců obsažených v pevné izolaci. K tomu dochází při teplotách vyšších než 105 °C. [12] Během rozkladu pevné izolace působí tři mechanismy: hydrolýza, pyrolýza a oxidace. *Pyrolýza*⁹ je procesem, kdy vlivem tepla dochází k úplnému rozkladu pevné izolace. *Hydrolýza*¹⁰ znamená, že chemické sloučeniny jsou de-



Obrázek 2.12: Plyny uvolňované při rozkladu oleje. [36] – převzato a upraveno.

⁹Z řeckého *pyro* = oheň a *lysis* = rozklad.

¹⁰Z řeckého *hydro* = voda a *lysis* = rozklad.

gradovány vodou, což vede ke zvýšení vlhkosti v oleji. Posledním zmíněným mechanismem je *oxidace*, při níž izolační systém ničí působení kyslíku. [33]

Ekologičtější smýšlení polední dekády ovlivňuje také chladicí a izolační médium transformátorů. Postupně se ustupuje od minerálních olejů a jejich místo zaujímají lépe biodegradabilní oleje bázi přírodních esterů. Použitím přírodních esterů je olej degradován *hydrogenací*, během níž vzniká volný vodík H_2 . [32]

Navážeme-li na informaci, že cca 70 % poruch je možné zaznamenat s využitím DGA, pak vyvstává otázka, jak to provést. Ještě před několika lety byla v nemalé míře požívána poměrně neefektivní procedura, kdy byl z transformátoru odebrán vzorek oleje, dále byl odeslán do laboratoře, která provedla analýzu a zaslala výsledek. Je zřejmé, že tento *offline* postup vyžaduje značné časové a finanční náklady a prakticky nedisponuje velkou výpovědní hodnotou o současném stavu zařízení, jelikož byl prováděn jednou či vícekrát do roka. S postupem technologií kupředu se i do oblasti monitorování plynů v oleji dostal *online* monitoring, který usnadňuje správu zařízení. Z pohledu počtu monitorovaných plynů jsou uplatňovány dva hlavní typy zařízení: jedno-plynové a více-plynové. [31], [36]

Jedno-plynové zařízení zpravidla měří hodnotu vodíku. Jelikož se jedná o nejlehčí plyn a vzniká při nižších teplotách než ostatní plyny, viz obrázek (2.12), je důležité znát jeho obsah. Sensory pro detekci mohou sloužit jako hlásiče náhlého zvýšení vodíku, což umožňuje odhalit nastávající poruchu. Hlavní výhodou tohoto systému je relativně nízká cena, dále snadná instalace nebo minimální požadavky na údržbu. Mezi nevýhody patří nemožnost sledovat další produkované plyny, nutnost dodatečných laboratorních měření a nemožnost rozpoznání vzniku elektrického oblouku. [36]

Více-plynové zařízení představuje komplexnější řešení než v předchozím případě. Dnešní více-plynová zařízení jsou konstruována tak, že může být monitorováno až devět různých plynů. Aktuální kondice transformátoru je vyhodnocována rychleji, přesněji a odpadájí nároky na dodatečné laboratorní zkoušky. Další výhodou je detailní popis selhání v závislosti na vnikajících plynech. Naopak zvýšené požadavky na údržbu senzorů, delší čas instalace a vyšší pořizovací náklady jsou brány jako nevýhody. [36]

Nepodcenění výběru senzorů je alfou a omegou celého měřicího zařízení. Na výběr mají vliv: důležitost spravovaného a následky selhání objektu či cena. Právě důležitost transformátoru v celé soustavě hraje významnou roli při výběru vhodného zařízení. Více-plynová varianta je využívána pro objekty s větší vahou v hierarchii celé transformátorové soustavy. [36]

V průběhu let bylo vyvinuto mnoho metod pracujících na principu plynové chromatografie [37] a vyhodnocují obsah plynů na základě jejich koncentrací. Některé z nich jsou popsány v normě ČSN IEC 60599 [38]. Jako příklady uveďme: Dörnenburgovu a Rogersovu poměrovou metodu [39] či Duvalův trojúhelník, jehož princip je součástí této práce.

Duvalův trojúhelník

Na základě dlouhodobého zkoumání vyvinul v šedesátých let minulého století Michel Duval¹¹ tuto metodu, která je spolehlivá, přesná a v praxi snadno aplikovatelná. [40]

Základem je poměrné procentuální zastoupení třech plynů (methan, ethylen a acetylen) a jejich poměrné znázornění do trojúhelníkového grafu. [39] Graf je rozdělen na sedm poruchových (dílčích) zón, z nich každá znamená rozdílný typ chyby:

PD – částečné výboje (*Partial discharges*);

D1 – výboje se nízkou energií (*Discharges of low energy*);

D2 – výboje s vysokou energií (*Discharges of high energy*);

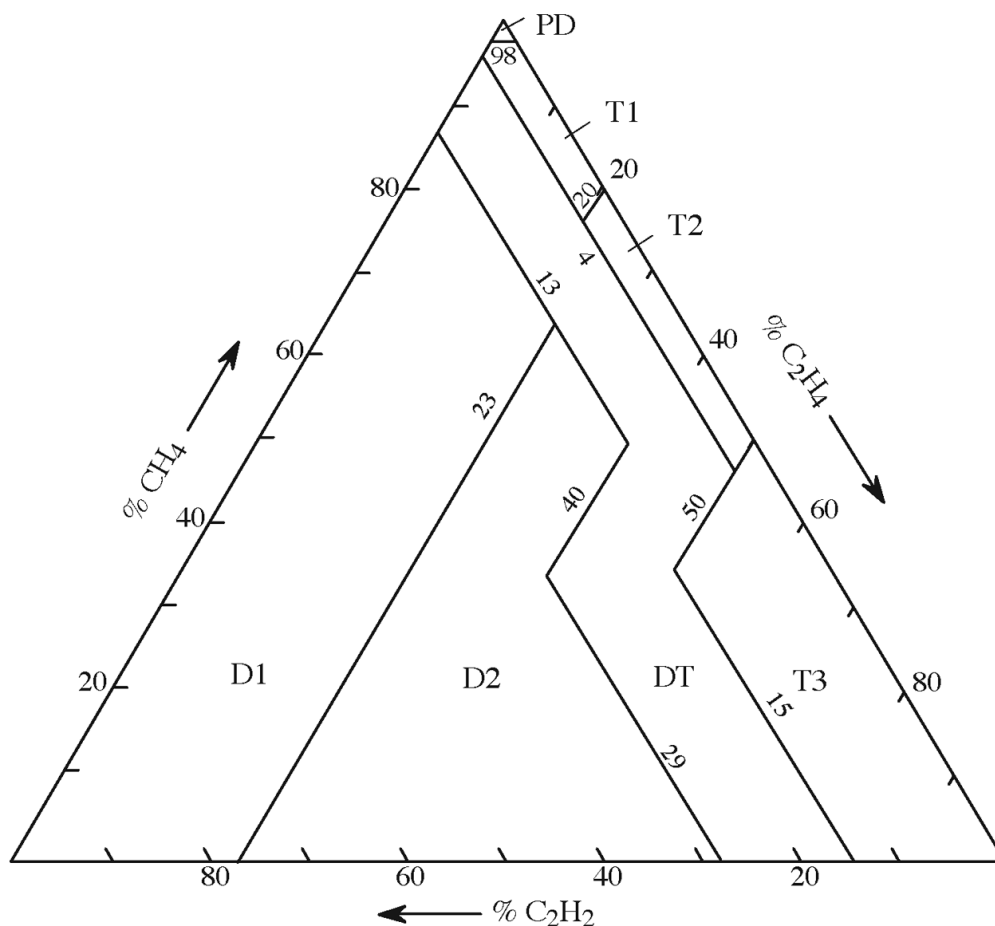
T1 – tepelná porucha, $\theta < 300 \text{ }^\circ\text{C}$ (*Thermal faults of temperature < 300 }^\circ\text{C}*);

T2 – tepelná porucha, $300 \text{ }^\circ\text{C} < \theta < 700 \text{ }^\circ\text{C}$

(*Thermal faults of temperature $300 \text{ }^\circ\text{C} < \theta < 700 \text{ }^\circ\text{C}$*);

T3 – tepelná porucha, $\theta > 700 \text{ }^\circ\text{C}$ (*Thermal faults of temperature > 700 }^\circ\text{C}*);

DT – smíšená elektrická a tepelná porucha (*Mixtures of electrical and thermal faults*).



Obrázek 2.13: Duvalův trojúhelník. [42] – převzato.

¹¹Kanadský vědec a chemik zabývající se rozkladem plynů v transformátorovém oleji. Je držitelem 16 patentů a autorem více než 100 vědeckých prací a mezinárodních standardů. V roce 2012 byl oceněn cenou IEEE Hermana Halperina za přínos v oblasti přenosu a distribuce elektrické energie. [41]

Obrázek (2.13) ukazuje klasický Duvalův trojúhelník využívaný pro minerální oleje. S rostoucí poptávkou po olejích šetrnějších k životnímu prostředí (rostlinné či silikonové) došlo k jeho modifikacím, které jsou popsány v [42] a [43].

Výpočet plynových poměrů

Koncentrace methanu, ethylenu a acetylenu jsou vyjádřeny v ppm¹² a na základě následujících vztahů [42] přepočteny na procentuální podíl každého z plynů.

$$\%C_2H_2 = 100 \cdot \frac{C_2H_2}{C_2H_2 \cdot C_2H_4 \cdot CH_4} \quad (\%) \quad (2.5)$$

$$\%C_2H_4 = 100 \cdot \frac{C_2H_4}{C_2H_2 \cdot C_2H_4 \cdot CH_4} \quad (\%) \quad (2.6)$$

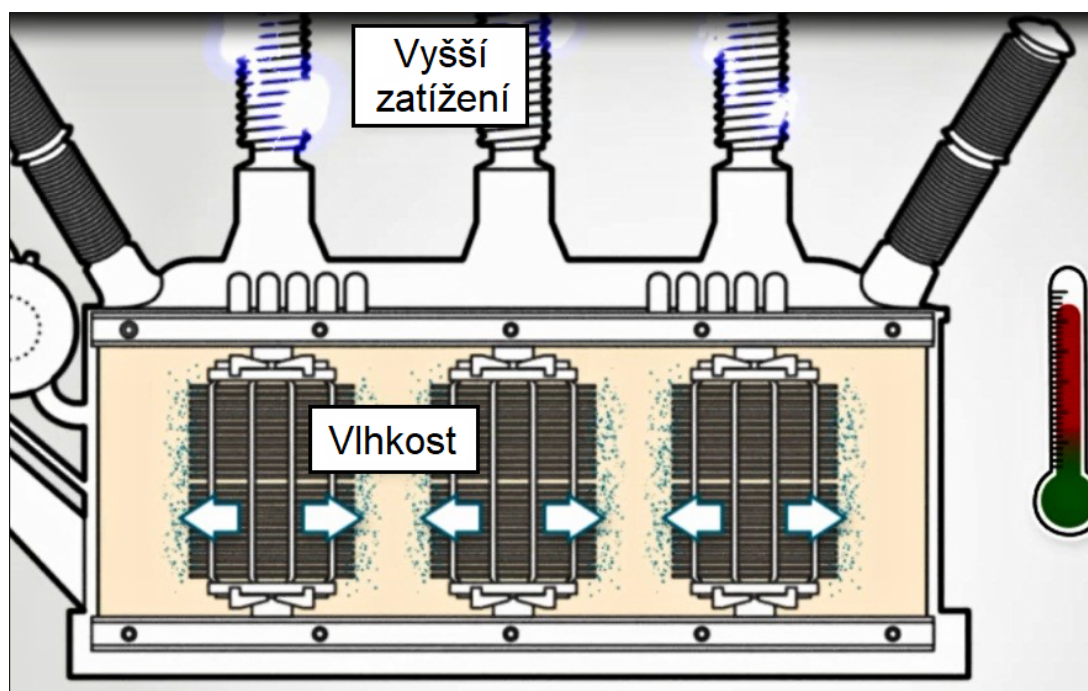
$$\%CH_4 = 100 \cdot \frac{CH_4}{C_2H_2 \cdot C_2H_4 \cdot CH_4} \quad (\%) \quad (2.7)$$

Po dosažení příslušných poměrů se jejich hodnota vynese do grafu rovnoběžně s ukazateli náležícími jednotlivým stranám. Průsečík přímek náležící plynovým poměrům pak udává, jaký druh poruchy se s největší pravděpodobností vyskytne. [40]

¹²Parts per million označuje jednu miliontinu z celku.

2.3.2 Vlhkost oleje

Dalším degradačním činitelem izolačního systému olejem plněných transformátorů je vlhkost v něm obsažená. Jejím působením se snižuje povrchový odpor izolantu a navyšuje se riziko vzniku průrazu. Přítomnost vlhkosti působí jako katalyzátor reakcí produkujících kyseliny napadající pevnou izolaci za vzniku dalších kyselin a vody, což může vést ke korozi vinutí, nádoby transformátoru nebo kovových konstrukčních částí. [12], [44]



Obrázek 2.14: Pohyb vlhkosti při zvýšené zátěži transformátoru. [46] – převzato a upraveno.

Vodní znečištění pochází z vícero zdrojů. Uvedme si ty hlavní: zbytková vlhkost, atmosférická vlhkost a rozklad celulózy a oleje. *Zbytková vlhkost* se objevuje u nových transformátorů, které byly vysušeny v průběhu výroby. Ideálně by se měla její hodnota blížit 0,5 %. V praxi je však vyšší (okolo 1 %). V místech s větší vrstvou izolace se pohybuje od 2 % do 4 %. Provozem dochází k jejímu postupnému prosakování do olejových struktur. [44]

Atmosférická vlhkost vzniká ze vzduchu obsaženého v dilatační nádobě, kdy dochází k vyrovnávání atmosférického tlaku a tlaku vně stroje. Příčinou jsou narušené či nekvalitní těsnící prvky. [45]

Rozklad celulózy a oleje vytváří, dle [46] a [47], 98 ÷ 99 % vlhkosti. Uvolňování vody do oleje roste spolu s teplotou a zatížením, viz obrázek (2.14). Pokud jsou tyto změny příliš náhlé a časté, pak se uvolňuje více vodních částic, které se postupně usazují na dně nádoby a jsou označovány jako volná voda či déšť (v anglicky prané literatuře). [47]

Formy vody v oleji

- **Rozpuštěná voda** – se dostává do transformátorového oleje vlivem jeho hygroskopických¹³ vlastností a v oleji je vázána mezimolekulárními silami. Její maximální množství není stálé, neboť závisí na druhu izolačního oleje, na teplotě a stupni zestárnutí. [48]
- **Volná voda** – neovlivňuje přímo dielektrické vlastnosti oleje, avšak její přítomnost je nežádoucí, neboť vlivem teploty a kvality izolačního oleje, se může určité množství uvolňovat do olejového média v podobě vody rozpuštěné nebo emulgované. [48]
- **Emulgovaná voda** – významně zhoršuje dielektrické vlastnosti oleje. Především snižuje jeho elektrickou pevnost. Jedná se o směs submikroskopických kapek vytvářejících s olejem hydrofilní¹⁴ či hydrofobní¹⁵ emulze. Hydrofilní emulze vznikají, pokud jsou v oleji přítomny látky rozpustné ve vodě a nikoli v oleji. U hydrofobních emulzí je mechanismus opačný. Cizí složky jsou rozpustné v oleji nikoliv ve vodě. Oba druhy emulze jsou stálé a jejich odstranění je obtížné. [48]

Obsah vody v oleji se uvádí v jednotkách ppm¹⁶. Dále se pro určení poměru vody a oleje používá procentuální vyjádření *relativní saturace oleje RS*:

$$\%RS = 100 \cdot \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{H}_2\text{O}_{\text{sat}}}}, \quad (\%) \quad (2.8)$$

kde $V_{\text{H}_2\text{O}}$ (ppm) je reálný obsah vody a $V_{\text{H}_2\text{O}_{\text{sat}}}$ (ppm) je maximální obsah vody pro danou teplotu. V případě, že $V_{\text{H}_2\text{O}} \geq V_{\text{H}_2\text{O}_{\text{sat}}}$, dochází k nasycení, neboli saturaci, oleje vodou, tedy k tvorbě vody v kapalně formě. Tento stav je nežádoucí. [46]

Měření vlhkosti a vysoušení oleje

Měření vlhkosti oleje se velmi často neprovádí samostatně. Spolu s ním jsou měřeny plyny rozpuštěné plyny, nebo soudobě dochází k vysoušení oleje, což se stále rozšiřuje. Nyní bude představen vybraný typ senzoru a metoda vysoušení oleje.

Senzory pro měření vlhkosti

Senzor pro měření vlhkosti v oleji pracuje na principu absorpce vody v tenké polymerní vrstvě (filmu). Na obrázku (2.15) je znázorněna konstrukce takového senzoru. Ten se skládá ze čtyř částí: skelný substrát, spodní elektroda, tenká vrstva polymeru a horní elektroda. Molekuly vody pronikají do tenké polymerní vrstvy, čímž mění její dielektrické vlastnosti a kapacitu senzoru. Vodní molekuly putují z a do polymerního filmu,

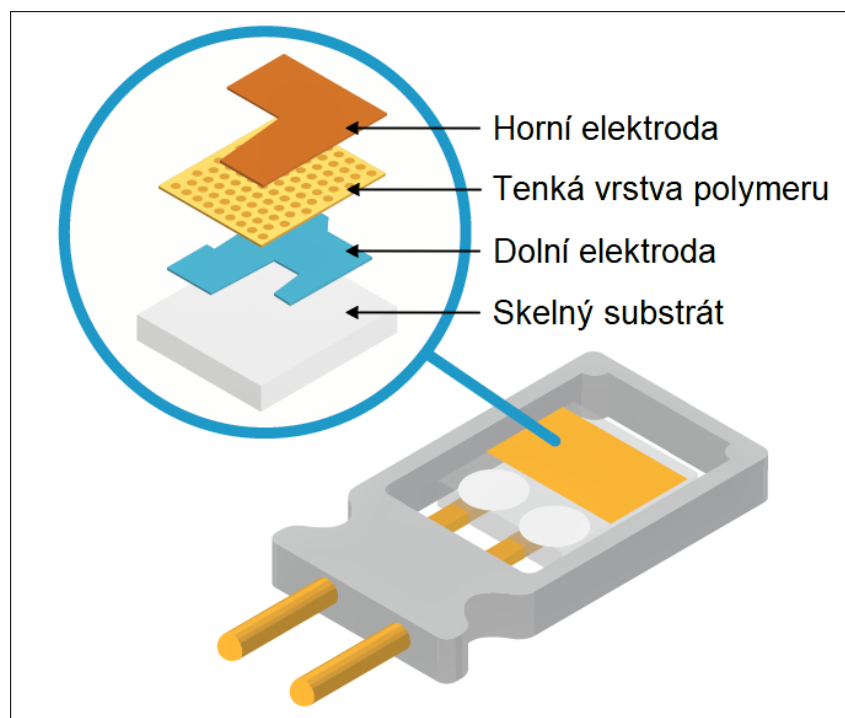
¹³Hygroskopičnost je schopnost látky snadno pohlcovat a udržovat vzdušnou vlhkost.

¹⁴Český ekvivalent je vodomilný.

¹⁵Český ekvivalent je odpuzující vodu.

¹⁶Objem jednoho litru vody v jednom milionu litrů oleje: $V_{\text{vody}}/V_{\text{oleje}}$.

dokud nenastane rovnováha mezi vlhkostí vrstvy a oleje. Pokud je k senzoru připojeno elektronické měřicí zařízení s převodníkem kapacity senzoru na vlhkost, tak vniká přesný analyzátor vlhkosti. [49], [50]



Obrázek 2.15: Konstrukce senzoru pro měření vlhkosti. [50] – převzato a upraveno.

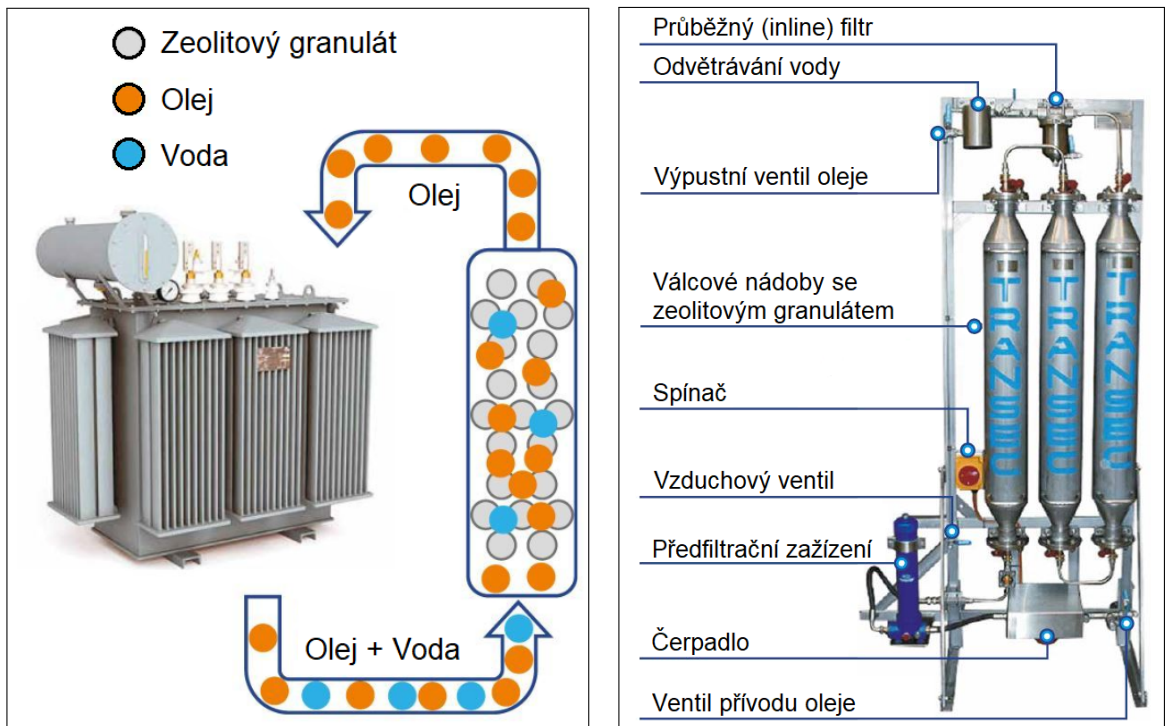
Další možné typy senzorů jsou založeny na odražení laserového paprsku v optickém vlákne [51], nebo ke sledování vlhkosti využívá keramických senzorů [52].

Online vysoušení oleje

Spojením monitorování a vysoušení oleje za provozu vzniká diagnostický systém zahrnující dvě užitečné věci. V praxi se využívají dva typy vysoušecích systémů: *celulózový filtr* a *molekulární síto*. Oba dva fungují na stejném principu, tedy na proudění oleje skrz filtrační zařízení, jehož konstrukce zahrnuje filtrační válce, čerpadla a ventily.

- **Celulózový filtr** – svou konstrukcí připomíná filtr do venkovních bazénů. Jejich nevýhodou je právě výrobní materiál – celulóza. Ta může při dlouhém provozu degradovat a do oleje se z ní uvolňují nečistoty, a proto musí být měněna v pravidelných intervalech. Celulózovými filtry je možné zachytit částice větší než 1 μm jako kovy, karbon a vlákna. [53]
- **Molekulární síto** – se skládá z velmi malých pórů o stejné velikosti. K výrobě těchto sít se využívá zeolitu v granulátové formě, což je hlinitokřemičitý minerální materiál s velikostí pórů 0,4 nm. Absorbovány jsou molekuly s menším průměrem než je uvedená velikost pórů. Na obrázku (2.16) je vidět průchod oleje filtrem, během něhož jsou vytvářeny polární vazby mezi zachycenými vodními molekulami a

zeolitovým granulátem, který je schopen vázat vlhkost, odpovídající až 20 % jeho vlastní hmotnosti. Absorpční kapacita klesá s rostoucí teplotou. Čistění molekulárního síta se provádí ohřátím nad teplotu 130 °C. Objem odfiltrované vody se různí dle výrobce zařízení, avšak v průměru se kapacita jednoho filtračního válce pohybuje v rozmezí 3 ÷ 4 litrů vody. Z důvodu větší efektivity je výhodné instalovat tři filtrační válce (objem zachycené vody 9 ÷ 12 litrů) a na přívodní potrubí umístit průběžné (inline) filtry pro záchyt větších nečistot o velikosti cca 10 μm. V případě saturace filtru vodou musí dojít k výměně celého válce, která nezabere více než 30 minut. Pohled na reálné zařízení k filtraci oleje je na obrázku (2.16b). [53], [54], [55]



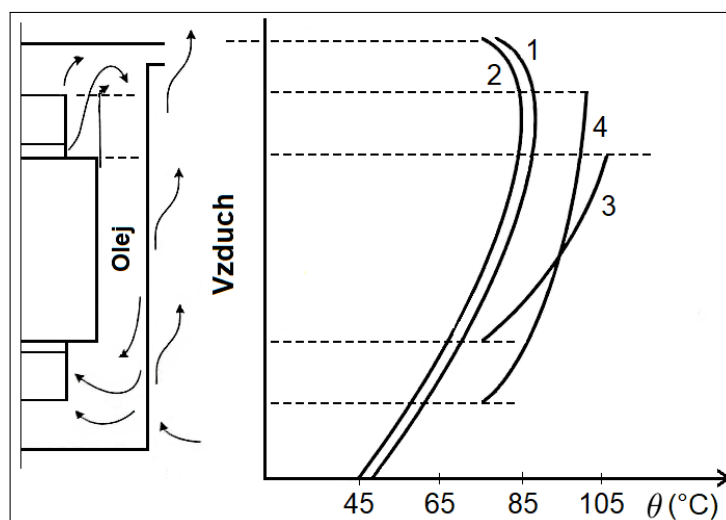
(a) Názorné schéma vysoušení oleje. [55] – převzato a upraveno.

(b) Reálné zařízení k vysoušení oleje. [56] – převzato a upraveno.

Obrázek 2.16: Schématický a názorný pohled na zařízení k vysoušení oleje.

2.3.3 Měření teploty

V žebříčku nejvýznamnějších degračních činitelů elektroizolačního systému patří teplotě první místo a její monitorování patří k základům diagnostiky výkonových transformátorů. Při přeměnách elektrické energie dochází ke ztrátám, které se projevují vznikem tepla ve vinutí, v magnetickém obvodu a dalších částech v transformátoru. Vzhledem k tepelné nehomogenitě celého transformátoru, tedy použití různých materiálů s odlišnou tepelnou kapacitou a vodivostí (magnetické plechy, pevná a kapalná izolace, měděné vinutí, stěna nádoby, atd.), se jedná o poměrně složitý systém v přímé interakci s okolím o rozdílnou teplotou. Oteplení závisí na intenzitě chlazení, zatížení a ztrátách. Zvýšená teplota je aktivátorem, katalyzátorem a zdrojem energie degračních procesů způsobujících ireversibilní změny ve struktuře izolačních materiálů. Nicméně ke stárnutí izolace dochází nepřetržitě, nejen při vyšší teplotě. V ideálním případě by byla životnost izolace nekonečná, což je možné pouze při absolutní nule ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$). Vlhkost, oxidace a teplota společně tvoří hlavní mechanismus stárnutí transformátorového papíru. [6], [12]



Obrázek 2.17: Rozložení teplot v závislosti na výšce transformátoru. [12] – převzato a upraveno.

- 1 – teplota oleje ($^{\circ}\text{C}$);
- 2 – teplota stěny nádoby ($^{\circ}\text{C}$);
- 3 – teplota vinutí ($^{\circ}\text{C}$);
- 4 – teplota magnetického obvodu ($^{\circ}\text{C}$).

Teplu je jako jedinému z degračních činitelů neodstranitelné. Mezi vznikajícím teplem a zatěžováním platí přímá úměra, naopak mezi materiálovou náročností platí nepřímá úměra. Z hlediska ekonomické udržitelnosti je zapotřebí brát v potaz vyšší tepelnou náročnost. Během reálného provozu vedou různé příčiny ke zhoršení funkce chladicího systému, což zrychluje degrační mechanismy. Počet senzorů je přímo úměrný velikosti a významu stroje. Nejčastěji se měří teploty *oleje* a *vinutí*. [6]

Teplota oleje

Teploty oleje a jednotlivých částí transformátoru jsou rozdílné v závislosti na výšce nádoby, viz (2.17). Je dobře patrné, že směrem nahoru dochází k zvýšení teploty, která dosahuje nejvyšších hodnot na povrchu vinutí. Důvodem je, že plechy magnetického obvodu a mědi ve vinutí jsou zdrojem tepla, jež je díky výborné tepelné vodivosti sdíleno dále do nádoby, tedy směrem k papírové izolaci a olejovému chladivu. Hojně využívané jsou *odporové teploměry* umístěné v jímkách na vrchní straně či u dna transformátorové nádoby. Teploměr je v přímém kontaktu s měřeným prostředím (tzv. *kontaktní snímače*). Jedná se o praktické využití změny elektrického odporu na teplotě. Typickým příkladem odporových teploměrů jsou Pt100 a Ni1000. Samozřejmostí je požadovaný stupeň krytí (např. IP56). Odporové teploměry jsou v dnešní době vybaveny převodníky pro převod odporu na proudový signál (otevřecí proud $I_h = 4 \div 20$ mA), který dále putuje přes průmyslové sběrnice (např. RS-232, RS-485). Obvykle se teplota oleje využívá pro spínání chlazení. Často je měření teploty oleje spojeno s měřením okolního prostředí. [6], [12], [57]

Teplota vinutí

K měření teploty vinutí se využívá přímá a nepřímá metoda. *Nepřímé měření teploty vinutí* je založené na snímání teploty v horní části stroje pomocí zmíněných odporových teploměrů. V praxi je nepřímé měření teploty vinutí složité a není uplatňováno. [12]

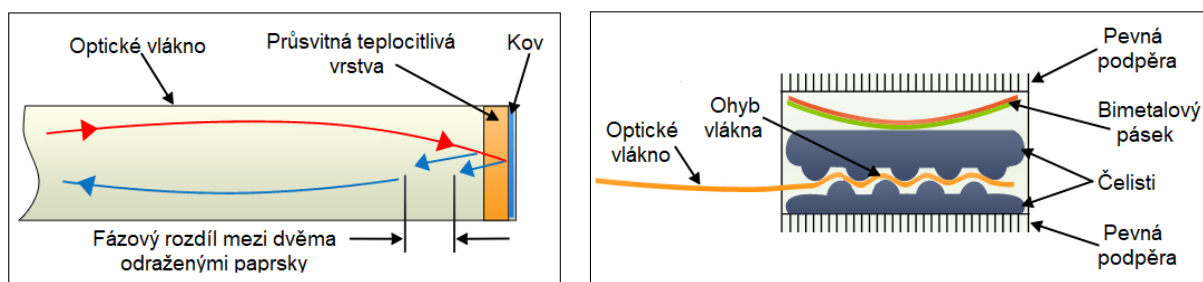
Přímé měření teploty vinutí je v porovnání s předchozím případem složitější na technologické řešení, ale na druhou stranu přináší přesnější údaje o aktuálním vývoji teploty. K realizaci se využívá optických vláken, která se vloží mezi izolované vodiče v každém vinutí. Teplotní čidla se umístí na konec vlákna nebo samotné vlákno slouží jako senzor, viz [58] a [59]. Základem přímého měření teploty vinutí optickým vláknem je změna některé z vlastností světla, vysílaného zdrojem záření do optického vlákna, vlivem působící teploty. Měněna může být: amplituda světla, jeho fáze, vlnová délka a tím i spektrum, nebo časové zpoždění vysílaných impulsů. Nespornou výhodou optických vláken jsou jejich výborné dielektrické vlastnosti. [6], [12], [57]

Dva základní způsoby změny parametrů vysílaného světla:

- ***Změna parametrů optického vlákna*** – využívá parazitních vlastností vláken (např.: disperze, optický útlum či změna rychlosti šíření světla). Na obrázku (2.18a) je vidět klasický typ optovláknového senzoru se změnou odrazu paprsku na jeho konci. Paprsek buď dopadá na teplotlivý materiál (tzv. *reflektor*) s tepelně závislou schopností odrážet nebo pohlcovat světlo, nebo reflektor disponuje stále stejnými vlastnostmi a je mu předřazen kovový materiál s proměnnou propustností. V prvním případě se vyhodnocuje změna amplitudy dopadajícího spektra. Druhý případ je odlišný a k vyhodnocení slouží změna fáze odraženého paprsku, zpoždění impulzu

nebo interference mezi teplocitlivým materiálem a reflektorem. Metoda je vhodná pro plošné měření teploty. [57]

- **Změnou vlastností materiálu na konci optického vlákna** – optický kabel slouží jako vodič světla a dle odrazu na jeho konci se určí teplota. Z obrázku (2.18b) je patrné, že bimetalový pásek reaguje prohnutím na změnu teploty, a tím dochází ke stlačení čelistí, v nichž je uloženo optické vlákno. Pohyb čelistí má za následek deformaci vlákna, čímž dojde k útlumu paprsku v tomto úseku. Metoda je výborně využitelná pro měření teploty v určitém místě. [57]



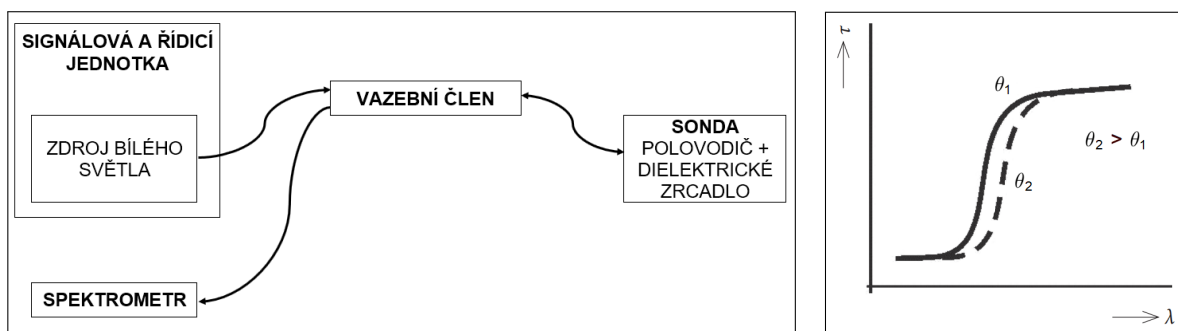
(a) Fázový rozdíl. [60] – převzato a upraveno.

(b) Deformace vlákna. [60] – převzato a upraveno.

Obrázek 2.18: Optické vlákno jako teplotní senzor.

Vybrané principy práce optovláknových senzorů:

- **Využití změn v absorpčním spektru** – vlivem teploty dochází ke změnám v absorpčním spektru krystalového polovodiče v koncovém čidle optického kabelu, které je v kontaktu s měřeným objektem. Konstrukce senzoru je patrná z obrázku (2.19a). Uvnitř signálové a řídicí jednotky je umístěn zdroj bílého světla, které je přivedeno do jedné z větví optického vazebního členu. Dále je optickým kabelem vedeno až k senzoru skládajícího se ze zmíněného polovodičového krystalu a dielektrického zrcadla. Princip přeměny teploty na změnu vlnové délky (λ) je následovný. Roste-li



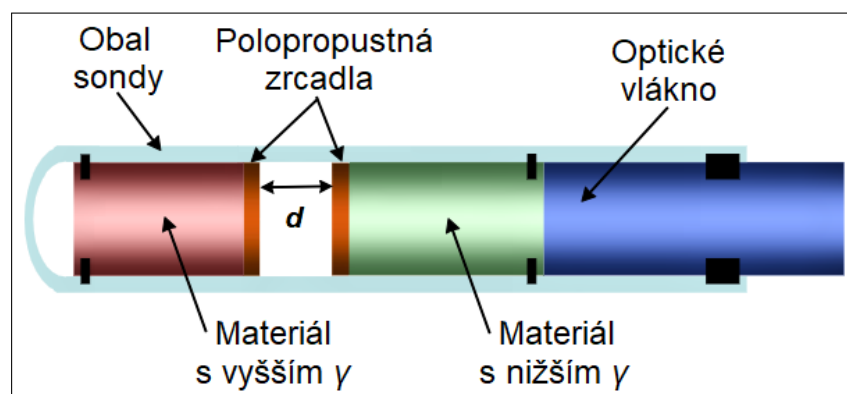
(a) Schéma pro využití změn v absorpčním spektru. [57] – převzato a upraveno.

(b) Závislost propustnosti na vlnové délce. [65] – převzato a upraveno.

Obrázek 2.19: Využití změn v absorpčním spektru.

teplota ($\theta_1 \rightarrow \theta_2$) GaAs krystalu, pak se mění závislost propustnosti τ na vlnové délce λ . Spektrum odražených paprsků posouvá k vyšším vlnovým délkám (2.19b), což je nazýváno *absorpční posun*. Bílé světlo zahrnuje široké spektrum vlnových délek a díky odraženému světlu, nikoliv intenzitě, lze ve spektrometru přesně určit teplotu krystalu. Benefitem je, že tato metoda do jisté míry nezávisí na intenzitě příchozího signálu, čímž je eliminován vliv parazitních útlumů optického vlákna. Naopak nevýhodou je relativně nízký teplotní rozsah (max. 120 °C). [12], [57], [61]

- **Využití luminoforu** – stejně jako v předchozím případě je čidlo teploty v přímém kontaktu s měřeným objektem. Světelný impuls procházející optickým vláknem a dopadá na teplotně citlivý luminofor (např. fosfor, oxisulfid gadolinia nebo europia) v čidle. Dopadající světlo způsobí na luminoforu nábojovou excitaci, tzv. *luminiscence*¹⁷, jež vede k vyzáření části dodané energie ve formě světla o určité době trvání a vlnové délce úměrné měřené teplotě objektu. Nicméně pro vyhodnocení teploty je častěji prováděno přes pokles intenzity *fluorescence*¹⁸, která taktéž závisí na teplotě objektu. Po ozáření vrstvy, obvykle UV zářením, vzniká fluorescenční záření ve viditelné oblasti, které je vedeno zpět přes optické vlákno na fotodetektor. Způsob zpracování a vyhodnocení signálu se liší u jednotlivých typů snímačů. Teploměry odolávají silným elektromagnetickým polím, prostředím s vysokým napětím, širokým rozsahem teplot (- 50 ÷ 250 °C, dle [64] až 400 °C) a disponují vysokou přesností $\cong 0,1$ °C. Jedinou limitací teploty je samotné optické vlákno, jelikož samotný luminofor je schopen pracovat i při teplotách nad 1000 °C. [57], [65]
- **Využití Fabry-Perotova interferometru** – představuje sofistikovanější a složitější měřicí systém než v předchozích případech. Snímač teploty je založen na Fabry-Perotově interferometru, který pracuje jako převodník teploty na změnu spektra



Obrázek 2.20: Teplotní senzor s Fabry-Perotovým interferometrem. [66] – převzato a upraveno.

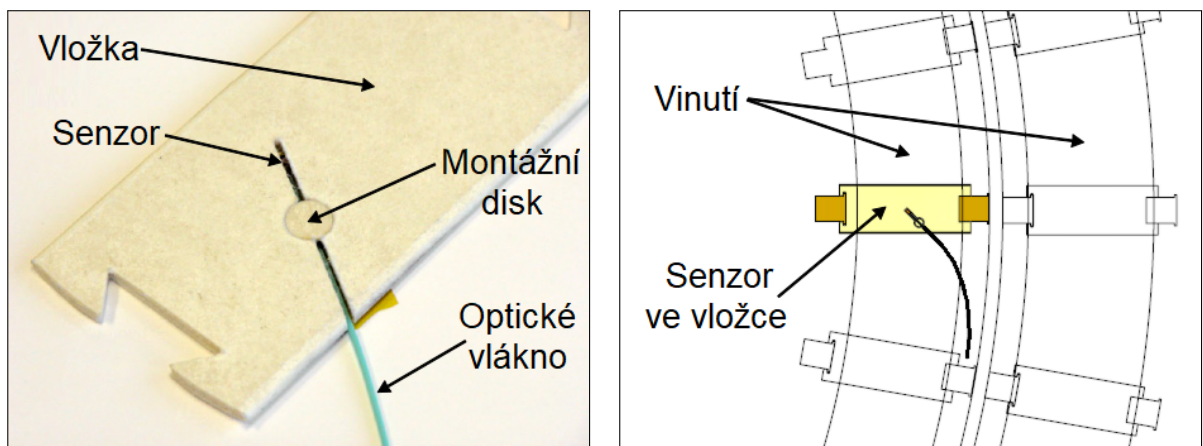
¹⁷Spontánní záření ve formě fotonů. [62]

¹⁸Typ luminiscence vyvolané účinkem jiného dopadajícího záření či dopadajících částic. [63]

světla. Světelný zdroj vyzařuje bílé světlo, a to prochází přes optické vlákno do čidla teploty na obrázku (2.20). V něm je umístěn materiál s nízkým koeficientem tepelné roztažnosti γ . Na jeho konci narazí na první polopropustné zrcadlo, kde je se 4 % světla odrazí zpět do vlákna a zbylé záření postupuje přes tzv. *Fabry-Perotovu dutinu* o proměnlivé délce d k druhému zrcadlu. Zde dojde k odrazu světla zpět do optického vlákna a dále do spektrometru s CCD¹⁹ snímačem. Odraženo je přibližně 90 % světla a zbytek je pohlcen. Interference mezi oběma odraženými paprsky vznikají charakteristické proužky, jejichž struktura odpovídá intenzitě odraženého světla a jeho vlnové délce. Spektrum odraženého světla je úměrné změně vzdálenosti d a koeficientu tepelné roztažnosti γ . Díky značnému teplotnímu rozsahu (- 50 ÷ 600 °C) a odolnosti vůči elektromagnetickým polím se tento senzor využívá k monitorování teploty leteckých motorů nebo jaderných elektráren. [68]

Reálné umístění optovláknových senzorů

Optovláknový senzor je možné umístit do jakéhokoliv místa mezi závity vinutí transformátoru, a to do předem připravených vložek. Instalované vlákno je obaleno izolací zabraňující kontaktu s olejem a následné deterioraci. Přestože jsou optická vlákna odolná vůči elektromagnetickým vlivům a vlastnímu rušení transformátoru, jejich vložením do olejového prostředí vzniká nehomogenita. Ta se projevuje hromaděním nábojů v okolí vlákna a rizikem vzniku výbojové činnosti, což je nutné řešit při návrhu stroje. [6], [69]



(a) Senzor ve vložce. [69] – převzato a upraveno.

(b) Uložení senzoru mezi závity vinutí. [69] – převzato a upraveno.

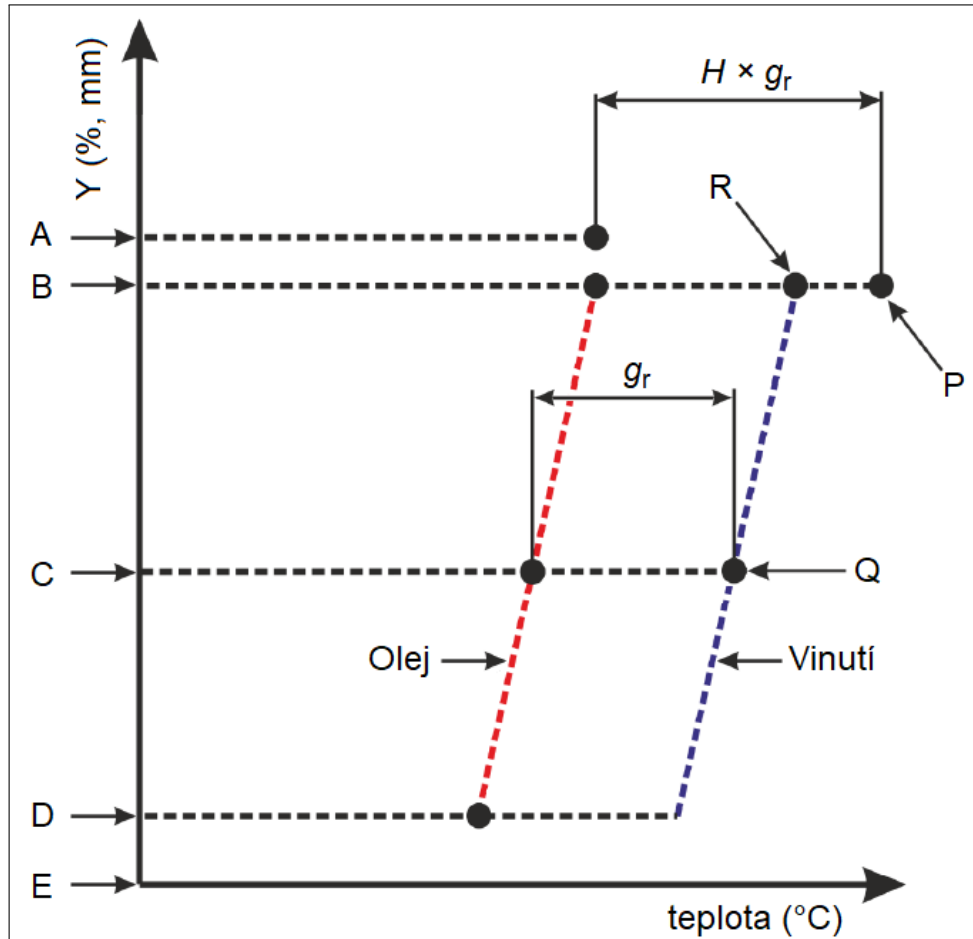
Obrázek 2.21: Uložení senzoru v transformátorovém vinutí.

Z výzkumu [70] umístění senzorů v různých drážkách vyplynulo, že naměřená teplota silně závisí pozici senzoru. Teplota mezi druhým a třetím závitem dosáhla o 12,6 °C hodnoty, než teplota měřená mezi třetí a čtvrtým. Znatelný je také gradient ve spodní a horní části vinutí, jenž činil 61 °C. Další využití optovláknových senzorů k monitoringu teploty vinutí uvádí [71].

¹⁹Zkratka z anglického: *Charge-Coupled Device*. CCD je elektronická součástka ke snímání obrazové informace. [67]

Hot-Spot teplota

Hot-Spot teplota je nejvyšší teplota v transformátoru. Ze zjednodušeného tepelného diagramu (2.22) je patrné, že rozložení teplot není homogenní a nejvyšší možné hodnoty dosahuje samotné vinutí transformátoru a jeho pevná izolace. [72]



Obrázek 2.22: Tepelný diagram. [72] – převzato a upraveno.

A – teplota v horní vrstvě, odvozená jako průměr z teploty oleje na výstupu z nádoby a teploty oleje v olejové kapse;

B – smíšená teplota oleje v nádobě v nejvyšším bodě vinutí, θ_o ($^{\circ}\text{C}$), dle předpokladů jde o stejnou teplotu jako v A, tedy $A \cong B$;

C – teplota průměrného oleje v nádobě, θ_{om} ($^{\circ}\text{C}$);

D – teplota oleje na spodním konci vinutí, θ_b ($^{\circ}\text{C}$);

E – dno nádoby transformátoru;

g_r ($^{\circ}\text{C}$) – teplotní gradient mezi středem vinutí a středem oleje v nádobě při jmenovitém proudu ;

H (–) – činitel hot-spot;

P – teplota Hot-Spot, θ_h ($^{\circ}\text{C}$);

Q – průměrná hodnota teploty vinutí stanovená měřením odporu, θ_w ($^{\circ}\text{C}$);

R – teplota v horní části vinutí, θ_{tw} ($^{\circ}\text{C}$).

Údaj o Hot-Spot teplotě má značnou váhu jako diagnostický parametr, z něhož lze stanovit omezení pro zatěžování transformátoru, odhadovat relativní zestárnutí izolace a predikovat zbytkovou životnost. Nejvyšší teploty dosahuje olej kolem vodičů v horní části vinutí, kde je maximální rozptylové pole. Avšak místo výskytu Hot-Spot teploty se může nacházet o několik závitů níže, viz [70], proto se k monitorování používá vícero senzorů. K ochlazení stroje dochází přirozeným nebo nuceným prouděním oleje v nádobě. *Přirozené proudění* spočívá, v tom že olej okolo vinutí přebírá jím produkované teplo, čímž se stává lehčím a stoupá směrem nahoru. *Nucené proudění* využívá stejného principu jako přirozené, ale navíc je urychleno čerpadly. Více informací o chlazení transformátorů je dostupných v [73]. Samotné měření Hot-Spot teploty je poměrně obtížnou záležitostí, jelikož v horní části vinutí může teplotní gradient přesáhnout 10 °C. K přímému měření, které je vždy přesnější, lze využít senzory zabudované přímo ve vinutí, což sebou nese značné požadavky na použité materiály a správný výběr místa pro takovýto senzor. Existuje jen malá pravděpodobnost, že vložení 1 až 3 senzorů, bude zjištěn skutečný Hot-Spot, a proto je nezbytné najít konsensu mezi značným množstvím senzorů a nemalými náklady na jejich pořízení. Jinou možností je odhad s využitím výpočtů získaných na základě experimentů se zjednodušeným modelem transformátoru. Při využití druhé zmíněné metody je nutné brát v potaz základní předpoklad, že teplota oleje v nádobě lineárně roste od spodního k hornímu konci vinutí, a to bez ohledu na typu chlazení. [12], [14], [72]

Statický výpočet Hot-Spot teploty

Statický výpočet hot-spot teploty byl odvozen na základě výsledků oteplovacích zkoušek, při kterých je pro jmenovité zatížení transformátoru měřen teplotní spád oleje v závislosti na druhu chlazení. Postup výpočtu Hot-Spot teploty je k nalezení v normě ČSN IEC 60076-7 [72]. Vstupními parametry jsou teplota oleje v horní vrstvě a zatěžovací proud v daném okamžiku. [6] K výpočtu jsou využívány následující vztahy:

$$\theta_h = \theta_o + H \cdot g_r \cdot K^y, \quad (^\circ\text{C}) \quad (2.9)$$

$$\theta_h = \theta_o + (\theta_{tw} - \theta_o) \cdot (H - 1), \quad (^\circ\text{C}) \quad (2.10)$$

kde $y (-)$ je exponent proudu v závislosti na přírůstku teploty, $K (-)$ značí poměr zatěžovacího a jmenovitého proudu ($\frac{I}{I_N}$), činitel teploty Hot-Spot H odpovídá rozměru zařízení a dle velikosti zařízení nabývá hodnot $1, 0 \div 2, 1$. [72] Ostatní veličiny a jejich jednotky byly uvedeny v předchozích řádcích práce.

Je samozřejmostí, že výpočtů Hot-Spot teploty je celá řada (např. metoda založená na měření teploty v dolní vrstvě oleje). Podrobněji jsou tyto metody uvedeny ve směrnici IEEE Std C57.91-1995 [74].

Dynamický výpočet Hot-Spot teploty

Dynamický výpočet Hot-Spot teploty se zakládá na řešení diferenciálních rovnic a je složitější než předchozí, ale v principu se neliší. Kromě proudu a teploty v horní vrstvě oleje je vstupním parametrem také teplota okolí. Dalšími parametry jsou časová konstanta oleje a vinutí, dále pak tabelované hodnoty odpovídající typu chlazení stroje, viz ČSN IEC 60076-7 [72]. Výhodou dynamického výpočtu je vyšší přesnost v oblasti přechodných dějů. V normě jsou uvedeny příklady výpočtů a jiná doporučení.

Rychlost stárnutí izolace

Není jednoduché najít kritérium pro nejlepší popis zbytkové životnosti transformátoru. Samotné stárnutí nebo zhoršování stavu izolace je časovou funkcí teploty, obsahu vlhkosti, kyslíku, kyselin či plynů v oleji. Při výpočtu *relativní rychlosti stárnutí* V , s řídicím parametrem v podobě Hot-Spot teploty, platí vzorce pro tepelně neupravený papír (2.11) a tepelně upravený papír²⁰ (2.12):

$$V = 2^{\frac{(\theta_h - 98)}{6}}, \quad (-) \quad (2.11)$$

$$V = e^{\left(\frac{15000}{110 - 273} - \frac{15000}{\theta_h + 273}\right)}. \quad (-) \quad (2.12)$$

Dosažením hodnot teploty Hot-Spot, do rovnic (2.11) a (2.12), vzniká následující tabulka²¹ (2.4). Hodnoty v ní obsažené ukazují, že relativní rychlost stárnutí je velice citlivá na změnu Hot-Spot teploty. Dále je patrné, že upravená papírová izolace je výrazně odolnější než neupravená. Konkrétně to lze demonstrovat na tučně zvýrazněných hodnotách, kdy neupravený papír při teplotě 98 °C stárne relativní rychlostí $V = 1,0$ a při zvýšení teploty na 110 °C se relativní rychlost zvýší 4×. Avšak upravená papírová izolace stárne při stejné teplotě (110 °C) relativní rychlostí $V = 1,0$ a při 98 °C se tato rychlost sníží na $V = 0,282$. Rozdíl pouhých 12 °C znamená, že papírová izolace stárne přibližně čtyřikrát rychleji či pomaleji. Z tohoto důvodu je monitorování Hot-Spot teploty přikládána velká váha.

Tabulka 2.4: Relativní rychlost stárnutí v důsledku Hot-Spot teploty, dle [72].

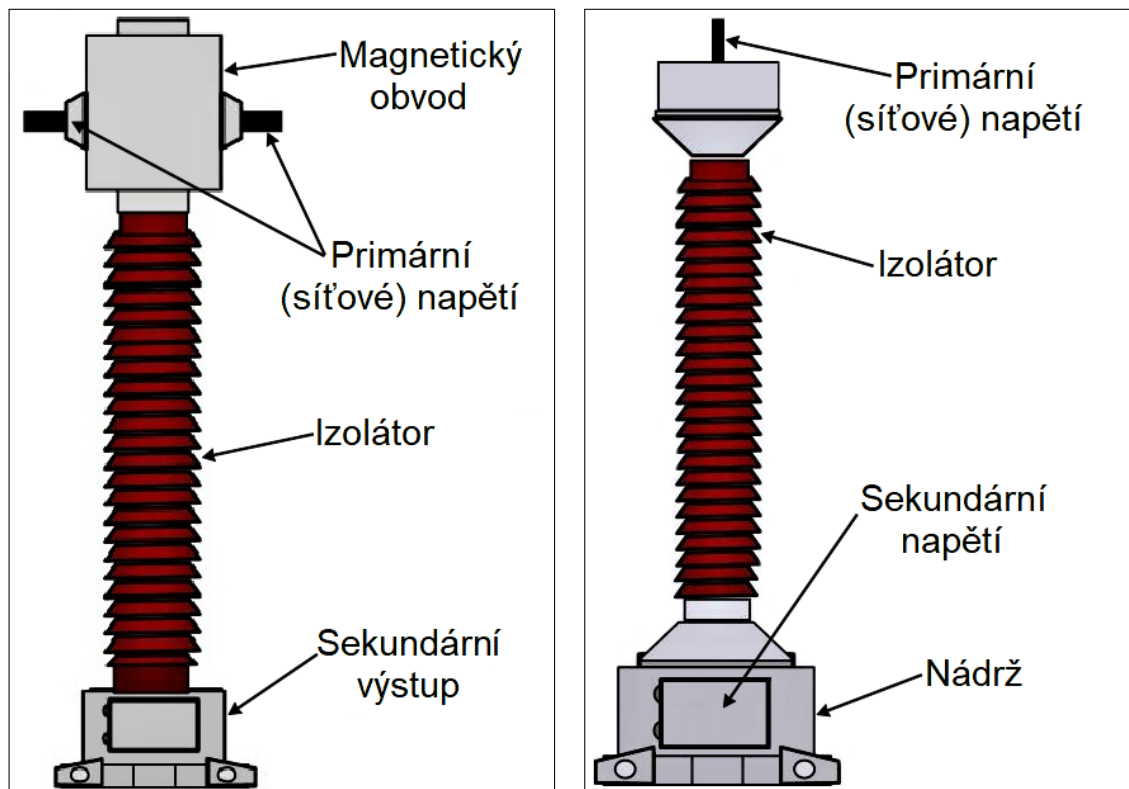
θ_h (°C)	Neupravená papírová izolace	Upravená papírová izolace
	$V_{neupravena}$ (-)	$V_{upravena}$ (-)
92	0,5	0,145
98	1,0	0,282
104	2,0	0,536
110	4,0	1,0
116	8,0	1,83

²⁰Celulózový papír s chemickou úpravou snižující jeho rozklad. Podrobněji v [72].

²¹Jedná se o vybranou část tabulky. V kompletní podobě je uvedena v [72].

2.3.4 Měření napětí a proudů

Napětí a proud se řadí mezi základní provozní parametry transformátorů a jejich monitorováním je možné získat přehled o okamžitém zatížení stroje. Na zatěžovacím proudu závisí velikost ztrát ve vinutí. Dle něj lze odhadnout velikost tepelného zatížení izolačního systému, nebo vypočítat Hot-Spot teplotu jako v rovnici (2.9). K měření napětí a proudů se využívají měřicí transformátory proudu (2.23a) a napětí (2.23b), které bývají umístěny na kondenzátorových průchodkách. Často jsou přímou součástí monitorovaného zařízení. [12]



(a) Měřicí transformátor proudu. [75] – převzato a upraveno.

(b) Měřicí transformátor napětí. [75] – převzato a upraveno.

Obrázek 2.23: Měřicí transformátory proudu a napětí.

3 Návrh měřicího systému

V současné době jsme svědky čtvrté průmyslové revoluce. To je důvodem, proč se ve velké míře nasazují nové monitorovací systémy, které jsou založené na snímání diagnostických parametrů. S dosaženými daty je možné pracovat v reálném čase nebo je schraňovat na hromadných úložištích. Technologický pokrok tak přináší mnoho funkčních řešení monitorovacích systémů, jakými jsou sledování vybraných parametrů, překročení stanovených limitů, nebo zpětná analýza.

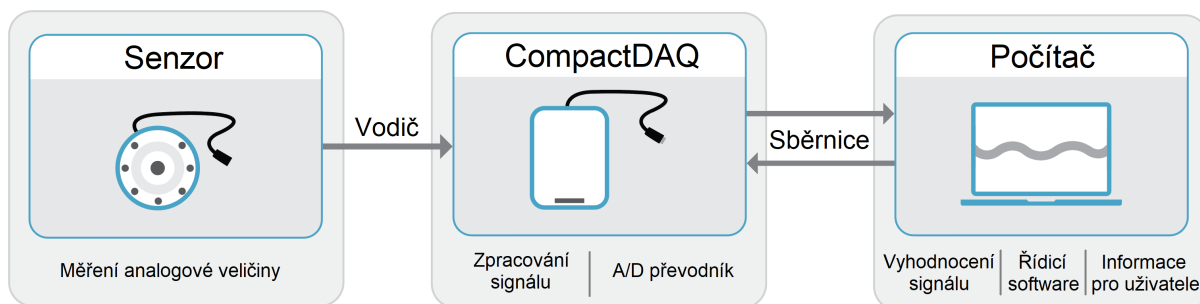
Stále více se v zorném poli provozovatelů objevují snahy o implementaci online monitorovacích systémů, jenž v reálném čase zpracovávají a vyhodnocují získaná data. Operátor poté může se těmito daty pracovat a na jejich základě plánovat údržbu.

3.1 Měřicí systém

Základem praktické části předkládané diplomové práce je měřicí systém teploty a napětí na bázi *CompactDAQ*. Program měřicího systému byl vytvořen v prostředí grafického programovacího jazyka *LabVIEW* od americké společnosti National Instruments. [76]

Tvorba programu v *LabVIEW* usnadňuje, na rozdíl od klasických programovacích jazyků, integraci měřicího zařízení. Není tedy potřeba dlouhého a mnohdy složitého kódu. Vytvořený program obsahuje dvě části: ovládací (anglický název: *Front Panel*) a výpočetní (anglický název: *Block Diagram*).

CompactDAQ systém se skládá z šasi *NI cDAQ 9184* [77], do něhož jsou zapojené měřicí moduly: *NI 9211* [78] ke snímání teploty a *NI 9221* [79] se sběrnicí DSUB k měření napětí. Šasi disponuje čtyřmi sloty pro měřicí moduly, 32 bitovým rozlišením a ethernetovým konektorem RJ-45 pro připojení k počítači či do sítě. Měřicí modul teploty *NI 9211* s 24 bitovým rozlišením byl osazen dvěma termočlánky typu K. [80] Měřicí modul napětí *NI 9221*, s rozsahem: ± 60 V stejnosměrných a rozlišením 12 bitů, byl osazen 25 pinovou sběrnicí *NI 9924* [81], do nichž byly naletovány vodiče měřicích sond. Jelikož senzory snímají analogové veličiny (teplota a napětí), tak je samozřejmostí, že každý modul je



Obrázek 3.1: Schéma měřicího řetězce s CompactDAQ. [82] – převzato a upraveno.

vybaven analogově digitálním převodníkem. Digitalizovaný signál je dále vyhodnocován připojeným počítačem, a tak jsou uživateli poskytovány informace o aktuálně naměřených hodnotách a prováděných výpočetních operacích. Schéma měřicího řetězce s CompactDAQ je zobrazeno na obrázku (3.1). Detailnější informace o měřicích modulech a šasi jsou uvedeny v Příloze B, kde jsou taktéž k nalezení parametry dalších modulů a šasi na Katedře technologií a měření.

3.1.1 Měřené veličiny

Měřicí systém je vytvořen pro monitorování stavu teploty uvnitř olejové nádoby a výstupního napětí transformátorů sloužících v napěťových hladinách VN či VVN. V následujících řádcích bude vysvětleno zpracování jednotlivých proměnných.

Napětí na výstupu z transformátoru

Napětí (U) je měřeno na sekundárním výstupu z transformátoru. To je v praxi poměrně obtížné a svým způsobem i nebezpečné. Provozovatel sítě by musel souhlasit s umístěním měřicího transformátoru napětí.

Podle uživatelem volené napěťové hladiny je programem určována procentuální odchylka, která nesmí být vyšší než $\pm 10^1$ % z napěťové hladiny, viz norma ČSN EN 60038 [83]. Pokud není odchylka v normovaných mezích dle tabulky (3.1), rozsvítí se výstražná kontrolka. Změřená hodnota napětí je následně uložena do výstupního souboru.

Tabulka 3.1: Přípustné odchylky napěťových hladin, dle [83] a [84].

Napěťová hladiny (kV)	< 1	< 10	22	35	110	220	400
Přípustná odchylka (%)	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	± 5

Teplota okolí (atmosférická)

Teplota okolí (θ_a) je značně proměnlivá veličina a její velikost závisí na daném ročním období. To je důvodem, proč měřicí systém zahrnuje indikátor rizika vzniku námrazy v zimních měsících. Aktuální hodnotě okolní teploty je v intervalu od -100 °C do 100 °C přiřazena a následně zobrazena pocitová barva (tmavě modrá – nejstudenější, červená – nejteplejší). Přesnější informace o stavu počasí v lokaci transformátoru přináší také tlačítko, jímž uživatel otevře webovou aplikaci od Českého hydrometeorologického ústavu. Změřená teplota je ukládána do výstupního souboru.

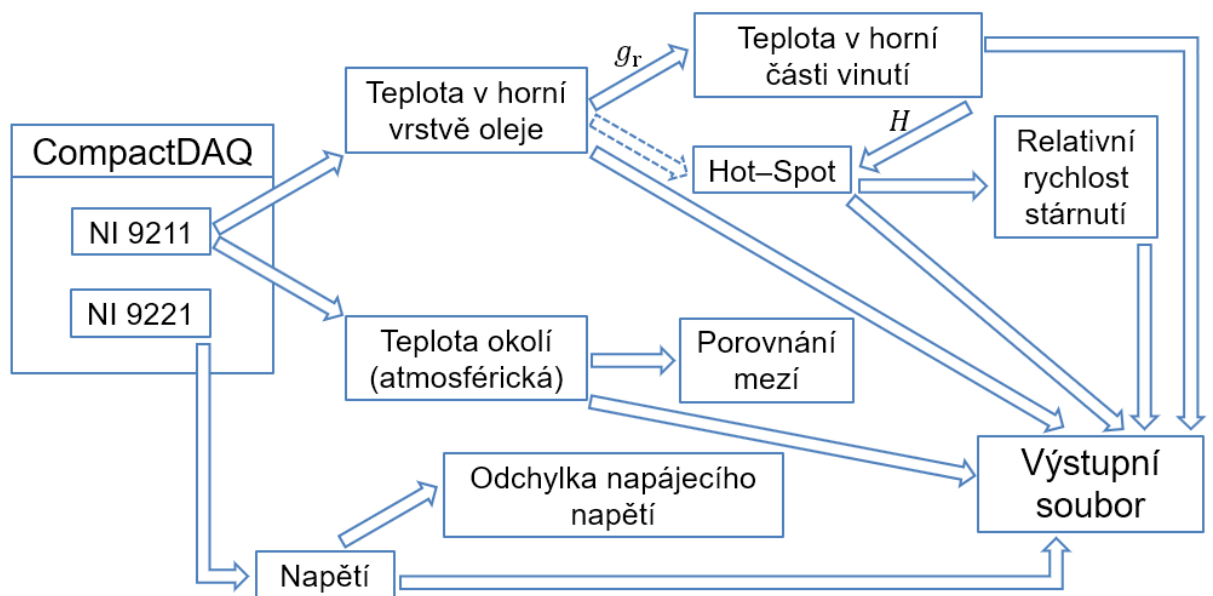
Teplota v horní vrstvě oleje

Teplota v horní vrstvě oleje (θ_o) je normou ČSN IEC 60076-7 [72] nazývána jako smíšená teplota oleje v nádobě v nejvyšším bodě vinutí. K určení relativní rychlosti stárnutí (V) je však potřeba znát Hot-Spot teplotu (θ_h) a teplotu v horní (nejvyšší) části

¹Pro napěťové hladiny 110 kV, 220 kV a 400 kV nejsou v normě ČSN EN 60038 [83] odchylky stanoveny. Uvedeny jsou v podmínkách ČEZ Distribuce [84], které schválil Energetický regulační úřad.

vinutí (θ_{tw}). V ideálním případě by právě teplota v horní části vinutí odpovídala nejvyšší možné teplotě – Hot-Spot. Ta se však nachází o několik dílků Celsiovy stupnice výše. Nejlepším možným způsobem jak získat uvedené teploty je měření. Zde však bylo naraženo na limit v počtu termočlánků.

Nicméně z obrázku (2.22) je zřejmé, že měřená teplota v horní vrstvě oleje je o gradient g_r nižší, než teplota v horní části vinutí. Uživatel tedy volí zmíněný gradient a činitel tepoty Hot-Spot (H), jehož jeho velikost je, dle výše zmíněné normy, rozdílná pro distribuční transformátory ($H = 1,1$) a transformátory se středním a velkým výkonem ($H = 1,3$). Při znalosti těchto veličin stačí jen dosadit do rovnice (2.10) a získat získat Hot-Spot teplotu. Jejím dosazením do rovnice (2.11) pro neupravený papír či do rovnice (2.12) pro tepelně upravený papír se získá aktuální hodnota relativní rychlosti stárnutí. Všechny vypočítané a změřené tepoty jsou společně s relativní rychlostí stárnutí ukládány do výstupního souboru.



Obrázek 3.2: Schéma práce měřicího systému s naměřenými daty.

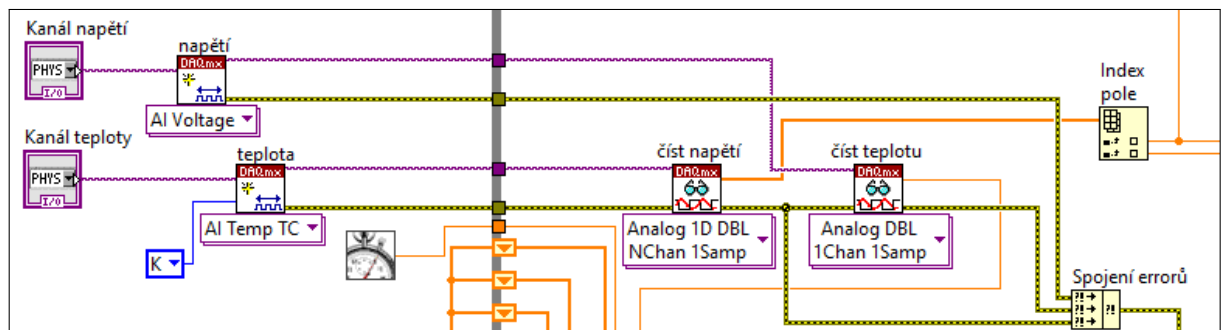
Obrázek (3.2) schématicky a per partes znázorňuje práci měřicího systému se získanými analogovými hodnotami až po jejich uložení do výstupního souboru v digitální podobě. Šipka vedoucí z teploty v horní vrstvě oleje k teplotě Hot-Spot je ohraničena čerchovanou čarou. Teplotu Hot-Spot lze vypočítat i touto cestou, kdy platí rovnice (užívaná v [70]):

$$\theta_h = \theta_o + (H \cdot g_r), \quad (^\circ\text{C}) \quad (3.1)$$

3.1.2 Prostředí měřicího systému v LabVIEW a práce s daty

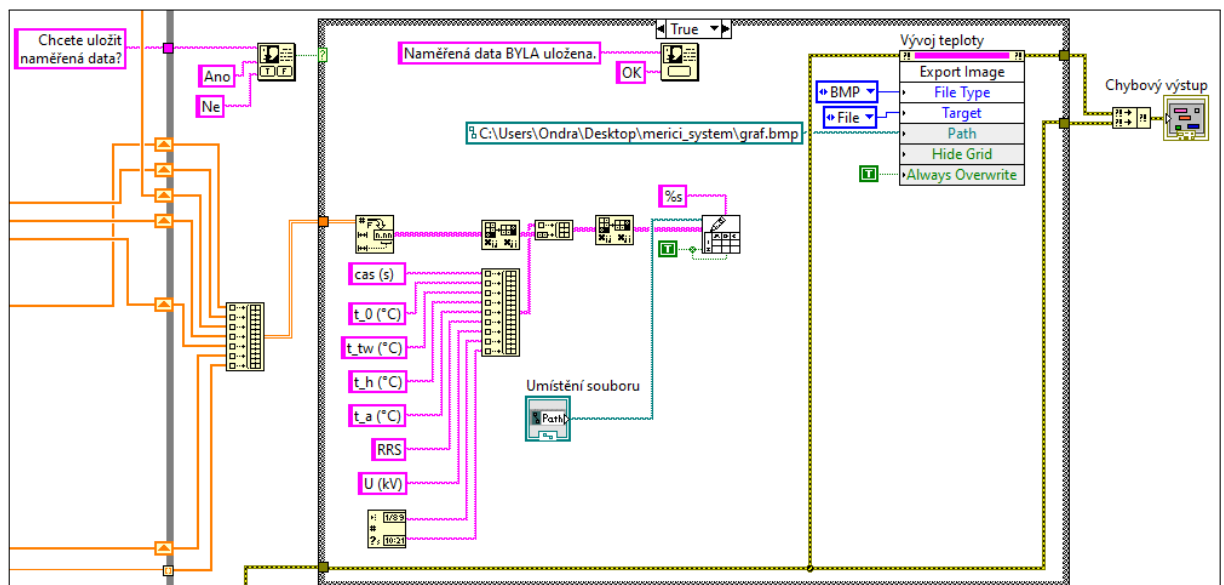
Výpočetní prostředí programu

Block Diagram by se dal právem označit jako srdce programu, jelikož zde probíhají všechny operace. Jakýkoliv indikátor, kontrolka nebo graf jsou v něm obsaženy a vzájemně propojeny pomocí „drátů“. Fungují zde také cykly jako v jiných programovacích jazycích (např.: while či for). Na obrázku (3.3) je vidět část block diagramu pro získání údajů o teplotě a napětí z měřicích senzorů. Z jednotlivých kanálů jsou naměřené hodnoty přečteny uvnitř smyčky, aby s nimi bylo možné dále pracovat. Pokud je jedním modulem získáváno více údajů v podobě pole, pak je nutné toto pole rozdělit, tedy přiřadit jednotlivým elementům indexy. V případě, na zmíněném obrázku, je to praktikováno u teploty. Důležité je také propojení chybových signálů.



Obrázek 3.3: Získání dat z jednotlivých kanálů.

Finální část programu ukazuje obrázek (3.4). Po ukončení práce programem je uživatel dotázán, zda chce získané hodnoty uložit či nikoliv. Když zvolí možnost „Ano“, poté je vykonána podmínka „True“. Získané hodnoty se tak uloží do vybraného souboru a do obrázku je také uložen graf teploty. V případě možnosti „Ne“ je vykonána podmínka



Obrázek 3.4: Uložení získaných a vypočtených dat.

„False“ a data nejsou uložena. Po provedení jedné z možností se na monitoru zobrazí hláška, zda došlo k uložení zvoleného souboru či nikoliv. Od tohoto okamžiku může uživatel pracovat se souborem uložených hodnot dle své vlastní libosti.

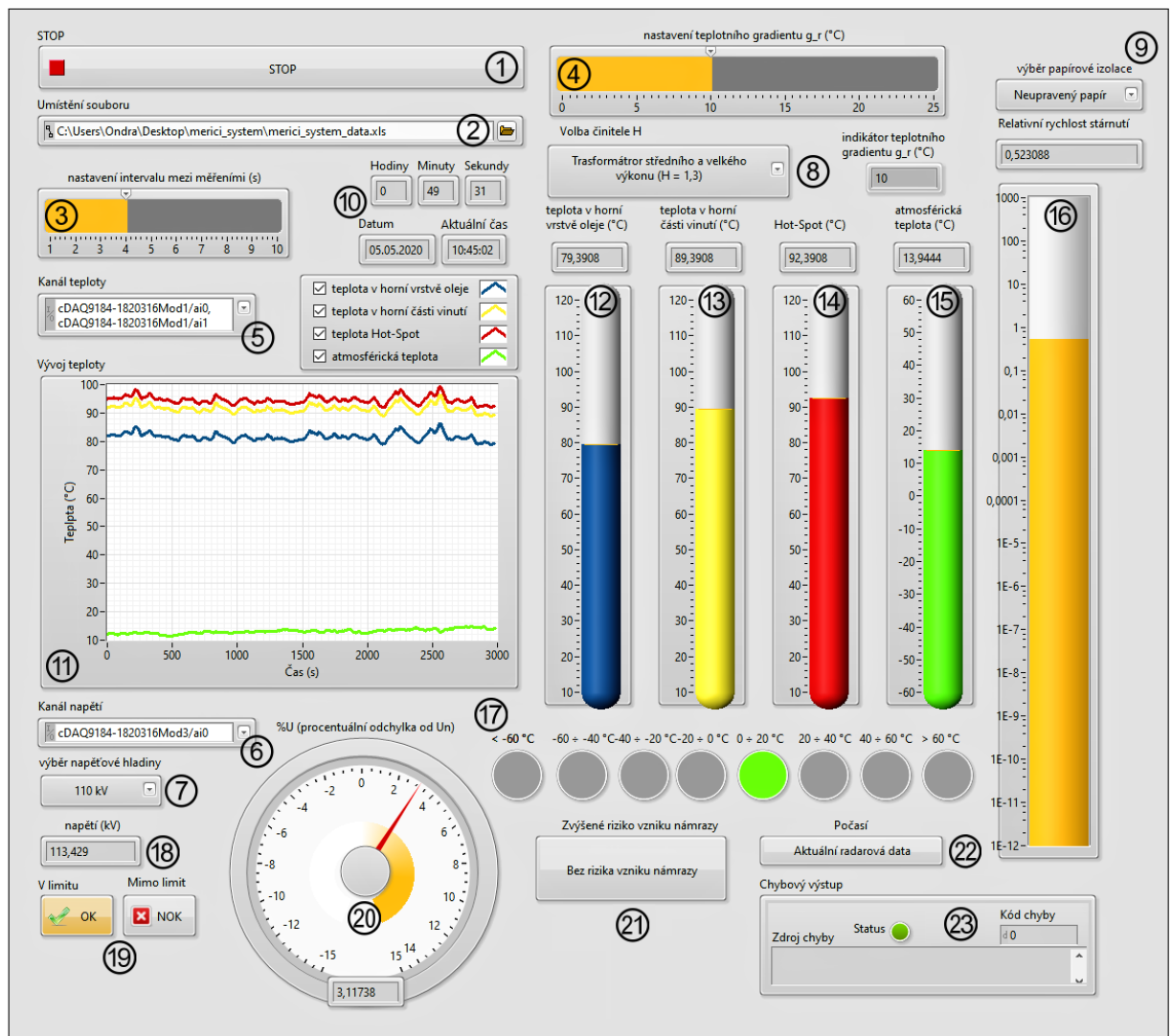
cas (s)	t_0 (°C)	t_tw (°C)	t_h (°C)	t_a (°C)	RRS	U (kV)	05.05.2020	10:50
0	81,83881	91,83881	94,83881	11,96148	0,694062	113,3955		
3	81,90251	91,90251	94,90251	11,97245	0,699188	113,3955		
7	82,0222	92,0222	95,0222	12,06265	0,708923	113,4291		
11	82,07408	92,07408	95,07408	12,19769	0,713184	113,4627		
15	82,13829	92,13829	95,13829	12,29598	0,718494	113,4291		
19	82,14651	92,14651	95,14651	12,34799	0,719177	113,3955		
23	82,13007	92,13007	95,13007	12,37233	0,717812	113,3955		
27	82,24359	92,24359	95,24359	12,44007	0,727288	113,4291		
31	82,25643	92,25643	95,25643	12,46822	0,728367	113,4291		

Obrázek 3.5: Naměřené a vypočtené hodnoty v tabulce.

Naměřené a vypočtené hodnoty je možné ukládat do nejednoho typu souboru (.txt, .xls či .csv). Dosažené hodnoty během chodu měřicího systému jsou otevřeny v MS Excel (3.5).

Prostředí pro uživatele

Měřicí systém je řízen z front panelu, jehož layout² je v obrázku (3.6). Uživateli je k dispozici řada ovládacích prvků: volba kanálů teploty a napětí, nastavení intervalu mezi měřeními, vložení cesty k výstupnímu souboru, volba činitele H , volba typu papírové izolace, výběr napěťové hladiny a otevření webu se aktuálním počasím. Dominantním prvkem levé strany ovládacího panelu je graf zobrazující vývoj teploty. Nad ním jsou ukazatele aktuálního času a doby běhu programu. Pravá strana je vyplněna ukazatelem relativní rychlosti stárnutí a chybovým výstupem. V prostředku panelu se nacházejí čtyři teploměry s jednotlivými teplotami a pod nimi jsou ukazatele teplotních mezí a upozornění na možné riziko vzniku námrazy. Levý spodní roh náleží napětí a je v něm patrný kruhový ukazatel výchylky napětí a indikátor aktuálně zvolené napěťové hladiny. Ukončení běhu programu se provádí stop tlačítkem v levém horním rohu. Jeho stisknutím dojde k ukončení měření a uživatel je tázán, zda si přeje uložit data či nikoliv.



Obrázek 3.6: Layout ovládacího panelu pro uživatele.

²Snímek layoutu byl během praktického ověření funkčnosti navrženého měřicího systému.

Pro větší názornost jsou jednotlivé ovládací prvky, indikátory a graf označeny čísly od jedné do dvaceti tří. Jejich význam je obsažen v následujícím seznamu:

- ① – STOP tlačítko k ukončení běhu programu;
- ② – volba cesty k výstupnímu souboru s daty;
- ③ – nastavení intervalu mezi měřeními;
- ④ – nastavení teplotního gradientu g_r ;
- ⑤ – volba kanálu teploty;
- ⑥ – volba kanálu napětí;
- ⑦ – výběr napěťové hladiny;
- ⑧ – volba činitele H ;
- ⑨ – výběr papírové izolace;
- ⑩ – ukazatel času;
- ⑪ – graf teplot;
- ⑫ – ukazatel teploty v horní vrstvě oleje;
- ⑬ – ukazatel teploty v horní části vinutí;
- ⑭ – ukazatel teploty Hot-Spot;
- ⑮ – ukazatel atmosférické teploty;
- ⑯ – ukazatel relativní rychlosti stárnutí;
- ⑰ – rozmezí atmosférické teploty;
- ⑱ – ukazatel napětí;
- ⑲ – kontrolky napěťové odchylky;
- ⑳ – ukazatel procentuální napěťové odchylky
- ㉑ – indikátor rizika vzniku námrazy;
- ㉒ – tlačítko pro zobrazení aktuálního počasí;
- ㉓ – indikátor chybových hlášení.

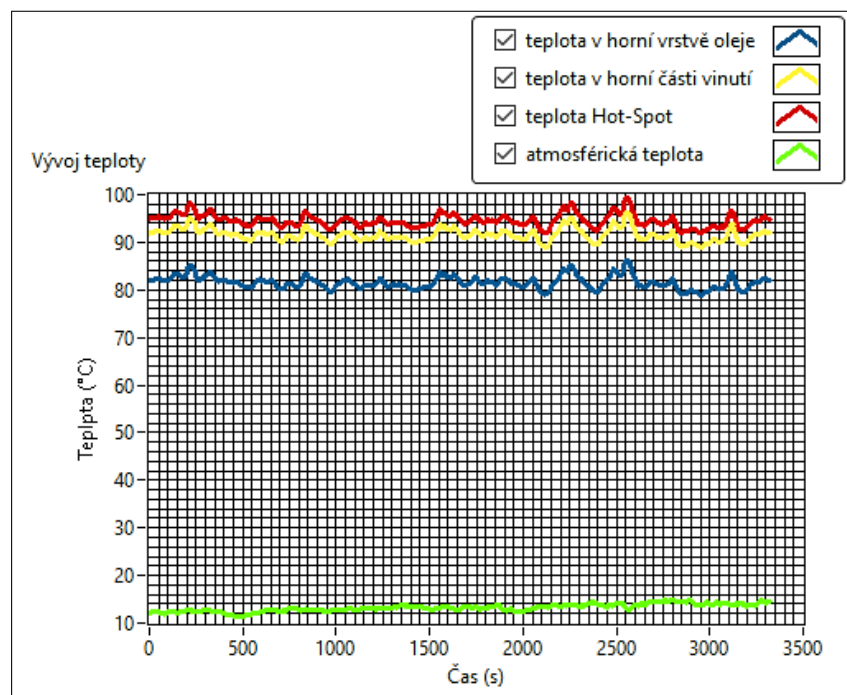
3.1.3 Ověření funkčnosti navrženého systému

Praktická zkouška navrženého systému byla provedena v domácích podmínkách. Simulovaná procentuální odchylka napětí pocházela ze dvou sériově zapojených 1,5 V baterií ($2 \cdot 1,5 \text{ V} = 3 \text{ V}$). Následně došlo k jejímu přepočtu a součtu s napětím vybrané napěťové hladiny. Tento součet byl brán jako výsledné napětí sítě a byl ukládán do výstupního souboru. Teplota okolí byla skutečná teplota okolí v době experimentu. Poslední měřenou veličinou byla teplota v horní vrstvě oleje. Termočlánek byl umístěn do těsné blízkosti větráku notebooku. Aby takto snímaná teplota odpovídala reálným provozním teplotám v transformátoru, tak byla násobena zvolenou konstantou 2,2. Další podrobnosti jsou uvedeny v tabulce (3.2).

Tabulka 3.2: Informace o prováděném ověření funkčnosti.

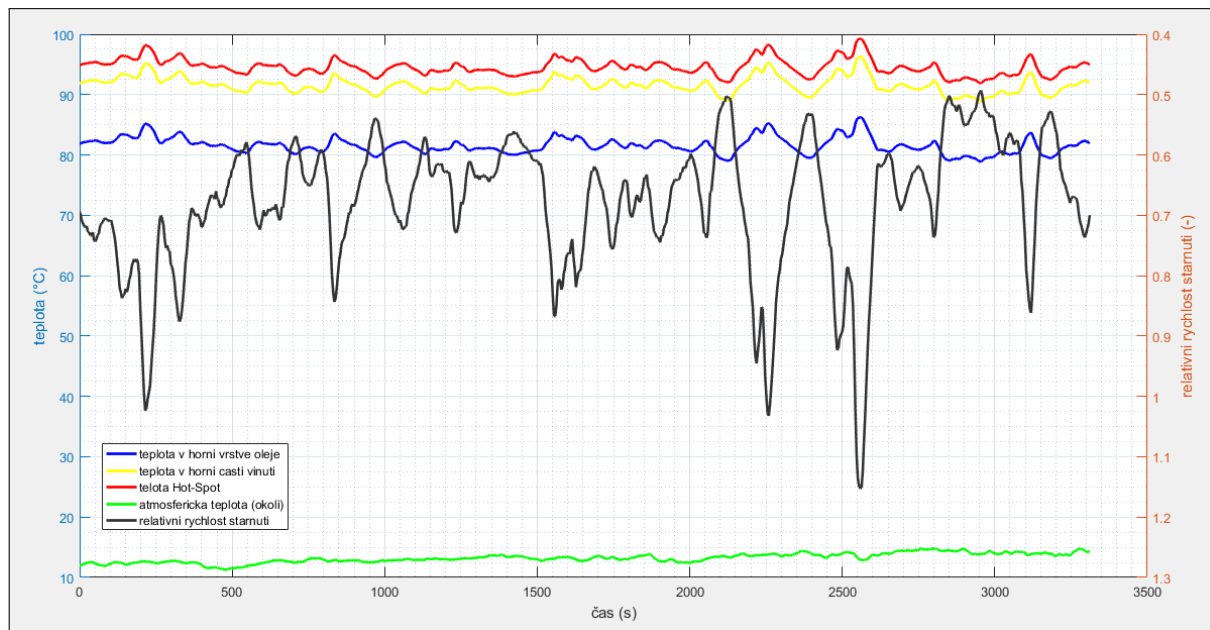
Kanály teploty	cDAQ9184-1820316Mod1/ai0 cDAQ9184-1820316Mod1/ai1
Kanál napětí	cDAQ9184-1820316Mod3/ai0
Interval mezi měřeními	4 s
Teplotní gradient g_r	10 °C
Činitel Hot-Spot H	1,3
Typ izolace	Neupravený papír
Napěťová hladina	110 kV
Doba trvání experimentu	55 minut

Po skončení měření došlo k uložení dat do zvoleného souboru, viz obrázek (3.5). Z hodnot teploty byl do obrázku automaticky vykreslen jejich graf (3.7).



Obrázek 3.7: Automaticky vykreslený teplotní graf.

Graf teplot uložený do obrázku neoplývá dobou kvalitou a případná následující práce s ním by byla obtížná. Proto byl v simulačním prostředí MATLABu vytvořen skript³, kterým lze naměřené a vypočtené hodnoty teplot, napětí a relativní rychlosti stárnutí přenést do nového grafu (3.8). Výhodou zpracování hodnot v MATLABu je, větší přehlednost a následná práce s vykresleným grafem.



Obrázek 3.8: Graf naměřených a vypočtených hodnot v MATLABu.

Z něho je velmi dobře patrné, že kolem 2500 s došlo ke dvěma nárůstům Hot-Spot teploty nad hodnotu 98 °C. To pro neupravený papír znamená, že relativní rychlost stárnutí



Obrázek 3.9: Zapojení měřicích modulů během funkční zkoušky.

³Kompletní podoba skriptu v MATLABu je k dispozici v Příloze C.

přesáhla hodnotu 1. Tím by v praxi došlo k citelně rychlejšímu úbytku života zařízení, a to je dobré si uvědomit. Okolní teplota nevykazovala výrazné výkyvy a držela kolem hodnoty 12 °C, což potvrzují i data z Českého hydrometeorologického ústavu pro den konání experimentu.

Závěr provedeného experimentu

Cílem provedeného experimentu bylo ověření funkčnosti navrženého měřicího systému. Během této zkoušky nedošlo k žádným problémům komplikujícím jeho plynulý chod. Všechny prvky fungovaly jak měly. Je však jasné, že při použití měřicího systému na skutečném zařízení, by byl vývoj jednotlivých teplot a napětí odlišný. Tedy reakce na změnu by nebyla okamžitá, ale s určitou prodlevou. Ta by závisela na několika faktorech jako umístění snímačů, způsob chlazení zařízení, okamžité zatížení, apod. Měřené napětí by v závislosti na aktuálním zatížení sítě kolísalo okolo své nominální hodnoty. Na základě provedené zkoušky funkčnosti, lze usuzovat, že měřicí systém poskytuje dobrý základ pro další práci a jeho inovace. Pro úplnost je také uvedeno zapojení během zkoušky (3.9).

V Příloze D je k nalezení kompletní vytvořený program v LabVIEW. Příloha E v sobě ukrývá komentované video z provedeného experimentu.

Závěr

První kapitola diplomové práce nastiňuje a seznamuje se současnou problematiku správy aktiv z hlediska času a nákladů. Dále jsou v ní uvedeny druhy údržby, porovnána jejich finanční náročnost a vhodnost propojení s diagnostickými šetřeními. V současnosti se stále více implementuje údržba na základě aktuálního stavu, což vede na rozšiřování online diagnostických systémů. Do budoucna bude výhodnější přistupovat k údržbě proaktivně, tedy myslet na diagnostický systém během návrhu stroje.

Následující pasáž patří elektrotechnické diagnostice. V první části kapitoly jsou nastíněny její základní principy a provázanost s dalšími vědními obory. Druhá část je o poznání obsáhlejší. V ní jsou popsány vybrané diagnostické metody pro vysokonapěťové kabely, elektrické točivé stoje a transformátory. Z hledisky kabelů byly zmíněny postupy pro online měření částečných výbojů a offline měření ztrátového činitele. U elektrických točivých strojů došlo k popsání vibrační diagnostiky a senzorů v ní používaných. Největší podíl však náležel transformátorům. Byla nastíněna problematika rozpuštěných plynů a vlhkosti v oleji, měření teploty, napětí a proudu.

Závěrečná kapitola odhaluje vytvořený měřicí systém na bázi CompactDAQ. Program systému je zpracován v LabVIEW. Navržený měřicí systém se skládá z vývojového šasi a připojených modulů k měření teploty a napětí. Navržen byl pro monitoring olejem plněných transformátorů. Z měřených teplot vypočítává relativní rychlost stárnutí papírové izolace. Další vlastností je výpočet aktuální odchylky od napájecího napětí v síti. Naměřené a vypočtené hodnoty je možné ukládat do zvoleného souboru. Pro lepší práci se získanými daty byl vytvořen skript v MATLABu, kterým lze dosažená data zobrazit v přehledném grafu. Po dokončení měřicího systému bylo provedeno několik funkčních zkoušek. Průběh a výsledek jedné z nich je k dispozici na konci poslední kapitoly.

Přestože zhotovený měřicí systém vykazuje bezvadnou funkčnost, tak se vždy najde prostor pro další inovace a vylepšení. S využitím vícero termočlánků či odporových teploměrů by bylo možné sledovat skutečné zařízení v reálném čase. Následně se naskýtá možnost sofistikovanější práce s dosaženými daty a jejich ukládání na sdílené úložiště, nebo jejich zobrazení ve webovém prohlížeči. Za úvahu by jistě stálo použití programu na podobné bázi k analýze již změřených hodnot teploty zařízení. Z nich by bylo možné získat cenné informace o vývoji rychlosti stárnutí a úbytku životnosti v daném intervalu měření. Za zmínku jistojistě stojí možnost využití šasi cRIO s FPGA, což by zajistilo vyšší aplikovatelnost měřicího zařízení v průmyslu 4.0.

Přílohy diplomové práce obsahují: Block Diagram navrženého měřicího systému (Příloha A), dostupné moduly a šasi na Katedře technologií a měření (Příloha B), funkce k zobrazení naměřených hodnot v MATLABu (Příloha C), soubor s programem v LabVIEW (Příloha D) a video z praktického ověření funkčnosti systému (Příloha E).

Použité zdroje

- [1] DIXON, R.A.J., T.M. KING a R.J. GALEOZZIE. Decision Support for Asset Management: A Defence Perspective. In: *IET & IAM Asset Management Conference 2013* [online]. Institution of Engineering and Technology, 2013, 2013, 3.02-3.02 [cit. 2019-11-30]. DOI: 10.1049/cp.2013.1942. ISBN 978-1-84919-799-1. Dostupné z: <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2013.1942>
- [2] Správa majetku (Asset management). In: *Management Mania* [online]. Wilmington (DE) 2011-2020, 13.06.2018 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/sprava-majetku-asset-management>
- [3] HLADÍK, T. Asset management podle EFNMS. *Řízení & údržba* [online]. 01.09.2015 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <http://udrzbapodniku.cz/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/asset-management-podle-efnms/>
- [4] TOR, O. a M. SHAHIDEHPOUR. Power distribution asset management. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting* [online]. IEEE, 2006, 2006, 7 pp.- [cit. 2019-12-02]. DOI: 10.1109/PES.2006.1709234. ISBN 1-4244-0493-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1709234/>
- [5] What is SCADA? *OleumTech* [online]. 2020 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://oleumtech.com/what-is-scada>
- [6] SVOBODA, M. *Implementace Condition Based Managementu elektroizolačních systémů*. Plzeň, 2017. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [7] VDOLČEK, F. Technická diagnostika v systémech údržby. *AUTOMA*. 2008, **14**(5), 30 - 32. ISSN 1210-9592.
- [8] TRNKA, P. a M. TRNKOVÁ. Správa aktiv a potřeba diagnostiky v Průmyslu 4.0. *ELEKTRO*. 2019, **25**(7), 6 - 9. ISSN 1210-0889.
- [9] KREIDL, M. a R. ŠMÍD. *Technická diagnostika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [10] LAZECKÝ, D. et al. Software solution design for application of reliability centered maintenance in preventive maintenance plan. In: *2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 1-4 [cit. 2019-12-05]. DOI: 10.1109/EPE.2017.7967354. ISBN 978-1-5090-6406-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7967354/>
- [11] MING, Z. et al. The Risk-Based Optimal Maintenance Scheduling for Transmission System in Smart Grid. In: *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering* [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 4446-4449 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1109/iCECE.2010.1082. ISBN 978-1-4244-6880-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5631632/>

- [12] MENTLÍK, V. et al. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [13] MENTLÍK, V. a R. POLANSKÝ. Aspekty strukturální elektrotechnické diagnostiky *ELEKTRO*. 2008, **18**(5), 6 - 11. ISSN 1210-0889.
- [14] MENTLÍK, V. et al. *Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-412-5.
- [15] CHATTERTON, W.J. a J.G. DEREZES. Options for cables post diagnostic testing. In: *2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)* [online]. IEEE, 2013, 2013, s. 61-65 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.1109/EIC.2013.6554203. ISBN 978-1-4673-4744-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6554203>
- [16] NEIER, T. a M. JENNY. Combined Application of Diagnostics Tools for MV Underground Cables. In: *2014 Electricity Distribution Conference – South East Asia* [online]. 2014, s. 1-6, [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/339412696/BAUR-Combined-Application-of-Diagnostics-Tools-for-MV-Underground-Cables-Full-Paper-En>
- [17] HE, S.H. et al. Investigation of High Frequency Current Transformers Used for Partial Discharge Detection. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Information Technology and Management Innovation* [online]. Paris, France: Atlantis Press, 2015, 2015, s. - [cit. 2020-01-03]. DOI: 10.2991/icitmi-15.2015.43. ISBN 978-94-6252-112-4. Dostupné z: <http://www.atlantis-press.com/php/paper-details.php?id=25839908>
- [18] ZACHARIDES, C. et al. Optimization of a High-Frequency Current Transformer Sensor for Partial Discharge Detection Using Finite-Element Analysis. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2016, **16**(20), 7526-7533 [cit. 2020-01-03]. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2600272. ISSN 1530-437X. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7543490/>
- [19] High Frequency Current Transformer for Detection and Location of PD. In: *Semantic Scholar* [online]. 2015 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/7b22/d10b5089bf6dab30c4e693765f39156af1e3.pdf>
- [20] VLF Tan Delta. In: *sebaKMT* [online]. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: https://nanopdf.com/download/vlf-tan-delta_pdf
- [21] IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz). In: *IEEE Std 400.2-2013* [online]. [cit. 2020-01-05] 2013. DOI: 10.1109/IEEESTD.2013.6517854. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6517854>
- [22] BOLLIGER, D. Simultaneous Partial Discharge and Tan Delta Measurements: New Technology in Cable Diagnostics. In: *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T & D)* [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 1-5 [cit. 2020-01-05]. DOI: 10.1109/TDC.2018.8440325. ISBN 978-1-5386-5583-2. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8440325/>

- [23] The Basics of VLF Testing. *HV Technologies* [online]. Manassas (USA), 20.06.2018 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://hvtechnologies.com/blog/basics-vlf-testing>
- [24] ČSN ISO 13373-9. *Monitorování stavu a diagnostika strojů - Monitorování stavu vibrací - Část 9: Diagnostické metody pro elektromotory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 28 s. Třídící znak 01 1440.
- [25] VOJÁČEK, A. Měření vibrací pro diagnostiku opotřebených strojů. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2015 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>
- [26] TAVNER, Peter J. et al. *Condition monitoring of rotating electrical machines*. 1st pub. London: Institution of Engineering and Technology, 2008. xxii, 282 s. IET power and energy series; 56. ISBN 978-0-86341-739-9.
- [27] ZUTH, D. a F. VDOLEČEK. Měření vibrací ve vibrodiagnostice. *AUTOMA*. 2010, **16**(1), 32 - 36. ISSN 1210-9592.
- [28] ZÁBRANSKÝ, V. a O. TŮMOVÁ. Vibration Diagnostics of Electrical Rotating Machines. In: *13th IMEKO TC10 Workshop: Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety* [online]. 2014, s. 99-104 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.imeko.org/publications/tc10-2014/IMEKO-TC10-2014-017.pdf>
- [29] BILOŠ, J. a A. BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [30] Introduction to MEMS Accelerometers. *PCB Piezotronics* [online]. 2020 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://www.pcb.com/resources/technical-information/mems-accelerometers>
- [31] MACKENZIE, E.A. et al. On-line monitoring and diagnostics for power transformers. In: *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation* [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 1-5 [cit. 2020-01-17]. DOI: 10.1109/ELINSL.2010.5549734. ISBN 978-1-4244-6298-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5549734/>
- [32] WETZER, J. The diagnostic power of oil analysis for power transformers: New developments. *Transformers Magazine* [online]. 2018, **5**(4), 66-70 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://hrcak.srce.hr/file/314127>
- [33] DONČUK, J. et al. Úroveň vývoje plynů jako diagnostické hledisko stavu výkonových transformátorů. *ElectroScope* [online]. 2013, **7**(3), 1 - 8 [cit. 2020-01-17]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/6204/1/r7c2c1.pdf>
- [34] PROSR, P. a M. BRANDT. Diagnostika olejem plněných transformátorů. *ElectroScope* [online]. 2008, **2**(4), 1 - 5 [cit. 2020-03-01]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/489/1/r2c4c3.pdf>

- [35] CIGRE. *Life management techniques for power transformers*. Technická brožura č. 227. Paříž, 2003, 130 s.
- [36] SAAD, M. a E. TENYENHUIS. On-line gas monitoring for increased transformer protection. In: *2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)* [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 1-4 [cit. 2020-01-20]. DOI: 10.1109/EPEC.2017.8286169. ISBN 978-1-5386-0817-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8286169/>
- [37] Gas Chromatography. *LibreTexts* [online]. 5.12.2019 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Supplemental_Modules_\(Analytical_Chemistry\)/Instrumental_Analysis/Chromatography/Gas_Chromatography](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Supplemental_Modules_(Analytical_Chemistry)/Instrumental_Analysis/Chromatography/Gas_Chromatography)
- [38] ČSN EN 60599 ed. 2. *Elektrická zařízení v provozu plněná minerálním olejem - Návod pro interpretaci výsledků analýz rozpuštěných a volných plynů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 40 s. Třídící znak 34 6726.
- [39] WANNAPRING, E., C. SUWANASRI a T. SUWANASRI. Dissolved Gas Analysis methods for distribution transformers. In: *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)* [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 1-6 [cit. 2020-02-02]. DOI: 10.1109/ECTICon.2016.7561320. ISBN 978-1-4673-9749-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7561320/>
- [40] AKRABI, A. et al. Intelligent agent-based system using dissolved gas analysis to detect incipient faults in power transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 2010, **26**(6), 27-40 [cit. 2020-02-03]. DOI: 10.1109/MEI.2010.5599977. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5599977/>
- [41] Michel Duval. *IEEE Xplore Digital Library* [online]. 2020 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/author/37299511200>
- [42] DUVAL, M. The duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 2008, **24**(6), 22-29 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1109/MEI.2008.4665347. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4665347/>
- [43] DESOUKY, S.S. et al. Modification of Duval triangle for diagnostic transformer fault through a procedure of dissolved gases analysis. In: *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)* [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 1-5 [cit. 2020-02-14]. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555796. ISBN 978-1-5090-2320-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7555796/>
- [44] DAVYDOV, V.G. a O. ROIZMAN Moisture assessment in power transformers. In: *VAISALA* [online]. 2002 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/VN160_Moisture_assessment_-_in_power_transformers_-_Lessons_Learned.pdf

- [45] DALTON, T. Moisture management of live transformer. *Energize*. 2008, **2008**(7), 30 - 33.
- [46] JIROUTEK, S. Moisture in Transformer Oil Behavior: A deeper look into a complex phenomenon. In: *VAISALA* [online]. 2016 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Moisture%20in%20Tranformer%20Oil%20Behavior%20Webinar.pdf>
- [47] How moisture reduces the life and performance of your transformer. *DryKeep* [online]. 2020 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.drykeep.com/how-moisture-reduces-transformer-life/>
- [48] Podrobnější přehled vybraných diagnostických metod izolačních systémů transformátoru (i přístrojových). *ELDIAG s.r.o.: Elektrotechnická diagnostika izolačních systémů* [online]. Praha, 1999 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.eldiag.cz/podrobnejsi-prehled-vybranych-diagnosticky-ch-metod-izolacnich-systemu-transformatoru-i-pristrojovych/>
- [49] OOMMEN, T.V. On-line moisture sensing in transformers. In: *[1991] Proceedings of the 20th Electrical Electronics Insulation Conference* [online]. IEEE, 1991, s. 236-240 [cit. 2020-03-21]. DOI: 10.1109/EEIC.1991.162613. ISBN 0-7803-0018-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/162613/>
- [50] Vaisala HUMICAP® Sensor for Measuring Moisture in Oil. In: *VAISALA* [online]. 2012 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/HUMICAP-for-Moisture-in-oil-B211231EN-A.pdf>
- [51] LASKAR, S. a S. BORDOLOI. Monitoring of Moisture in Transformer Oil Using Optical Fiber as Sensor. *Journal of Photonics* [online]. 2013, **2013**, 1-7 [cit. 2020-03-22]. DOI: 10.1155/2013/528478. ISSN 2314-6451. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/archive/2013/528478/>
- [52] SAHA, D. a K. SENGUPTA. Trace moisture detection in oil filled transformer by ceramic sensor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2015, **73** [cit. 2020-03-22]. DOI: 10.1088/1757-899X/73/1/012022. ISSN 1757-899X. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/73/i=1/a=012022?key=crossref.7fe3504a3470e01775162d2c4d873e0f>
- [53] LELEKAKIS, N. et al. A field study of two online dry-out methods for power transformers. in *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 2012, **28**(3), 32-39 [cit. 2020-03-22]. DOI: 10.1109/MEI.2012.6192365. ISSN 0883-7554. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6192365/>
- [54] TRANSEC: CL series. *TRANSEC* [online]. 2020 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://streamer.bitrix24.ru/MDxXO>
- [55] BRISBANE, A. Cylinder regeneration. *TRANSEC* [online]. 2020 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.transec-electric.com/#rec101743831>

- [56] Online Transformer Drying Solution. *Streamer: keep the light* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.streamer-electric.com/products/online-transformers-drying-solution/>
- [57] VOJÁČEK, A. Optické vláknové senzory pro náročná měření teploty. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2017 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/optovlaknove-senzory-pro-narocna-mereni-teploty.html>
- [58] LU, P. et al. Real-Time Monitoring of Temperature Rises of Energized Transformer Cores With Distributed Optical Fiber Sensors. *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. 2019, **34**(4), 1588-1598 [cit. 2020-02-29]. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2912866. ISSN 0885-8977. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8695809/>
- [59] UKIL, A., H. BRAENDLE a P. KRIPPNER. Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2012, **12**(5), 885-892 [cit. 2020-03-02]. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2162060. ISSN 1530-437X. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5955066/>
- [60] Příspěvatelé AutomationWiki. Fiber Optic Thermometers. *AutomationWiki* [online]. 2018 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: http://automationwiki.com/index.php/Fiber_Optic_Thermometers
- [61] Fiber-Optic Temperature Measurement. *OMEGA* [online]. [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www.omega.co.uk/technical-learning/fiber-optic-temperature-measurement.html>
- [62] Příspěvatelé WikiSkripta. Luminiscence. *WikiSkripta* [online]. 29.6.2018 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Luminiscence>
- [63] Příspěvatelé WikiSkripta. Fluorescence. *WikiSkripta* [online]. 18.6.2018 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Fluorescence>
- [64] Fiber Optic Temperature „Probes Go Where Others Can’t“. *Med Device Online* [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://www.meddeviceonline.com/doc/fiber-optic-temperature-probes-go-where-other-0001>
- [65] BEJČEK, L. Optické vláknové snímače teploty. *AUTOMA*. 2011, **17**(8-9), 38 - 43. ISSN 1210-9592.
- [66] SMARTEC (prezentující: BLIN, R.). Fabry-Perot FISO Sensors. *SlidePlayer* [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/9192050/>
- [67] CCD - Charge Coupled Device. *OptiXs* [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/slovník-17/ccd—charge-coupled-device-39>
- [68] SAWATARI, T., Y. Lin, a P. GAUBIS. Fabry-Perot Fiber-Optic Temperature Sensor: This is a prototype of rugged sensors for use in advanced engines. *Tech Briefs: Engineering Solution for Design & Manufacturing* [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné

- z: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/techbriefs/electronics-and-computers/2114#>
- [69] LumaSense Technologies LumaSHIELD Controller Installation Guide: Winding Temp. Sensors User Manual. In: *MANUALS DIRECTORY* [online]. [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://www.manualsdir.com/manuals/363926/lumasense-technologies-lumashield-controller-installation-guide-winding-temp-sensors.html?download>
- [70] KWEON, D. a K. KOO Winding Temperature Measurement in a 154 kV Transformer Filled with Natural Ester Fluid. *Journal of Electrical Engineering and Technology* [online]. 2013 **8**(1), 156-162 [cit. 2020-04-30]. DOI: 10.5370/JEET.2013.8.1.156. ISSN 1975-0102. Dostupné z: <http://koreascience.or.kr/journal/view.jsp?kj=E1EEFQ&py=2013&vnc=v8n1&sp=156>
- [71] ZHANG, X. et al. Oil-immersed transformer online hot spot temperature monitoring and accurate life loss calculation based on fiber Bragg grating sensor technology. In: *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)* [online]. IEEE, 2014, 2014, s. 1256-1260 [cit. 2020-04-30]. DOI: 10.1109/CICED.2014.6991908. ISBN 978-1-4799-4126-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6991908/>
- [72] ČSN IEC 60076-7. *Výkonové transformátory - Část 7: Směrnice pro zatěžování výkonových transformátorů ponořených do minerálního oleje*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020, 80 s. Třídící znak 35 1001.
- [73] OSBERT, J. Cooling of Transformers. *Owlcation* [online]. Seattle, 25. 5. 2018 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://owlcation.com/stem/Cooling-of-transformers>
- [74] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers. In: *IEEE Std C57.91-1995* [online]. [cit. 2020-04-26] 1996. DOI: 10.1109/IEEESTD.1996.79665. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/490538>
- [75] Difference between Current Transformer & Potential Transformer. *Electrical Concepts: Tricky but Easy Electrical Engineering!* [online]. 29. 5. 2019 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://electricalbaba.com/difference-between-current-transformer-potential-transformer/>
- [76] What Is LabVIEW?. *National Instruments* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/labview.html>
- [77] NI cDAQ 9184 Specification. In: *National Instruments* [online]. 2017 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.ni.com/pdf/manuals/372087c.pdf>
- [78] NI 9211 Datasheet. In: *National Instruments* [online]. 2015 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: https://www.ni.com/pdf/manuals/373466a_02.pdf
- [79] NI 9221 Datasheet. In: *National Instruments* [online]. 2016 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: https://www.ni.com/pdf/manuals/375905a_02.pdf
- [80] Type K Thermocouple. *THERMOCOUPLE.INFO* [online]. 2011 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.thermocoupleinfo.com/type-k-thermocouple.htm>

- [81] NI 9924 Datasheet. In: *National Instruments* [online]. 2016 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: https://www.ni.com/pdf/manuals/376501a_02.pdf
- [82] A Complete Guide to Data Acquisition (DAQ) Systems. *OMEGA* [online]. 2020 [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://www.omega.ca/en/resources/daq-systems>
- [83] ČSN EN 60038. *Jmenovitá napětí CENELEC*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 20 s. Třídící znak 33 0120.
- [84] Pravidla provozování distribučních soustav (Příloha 3): Kvalita napětí v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení. In: *ČEZ DISTRIBUCE* [online]. 2020 [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/ppds-2020.html>

Seznam obrázků

1.1	Životní cyklus fyzického aktiva. [3] – převzato a upraveno.	6
1.2	Schéma systému údržby po poruše a dle časového plánu.	9
1.3	Schéma systému údržby dle aktuálního stavu a proaktivní údržby.	11
2.1	Struktura současné elektrotechnologie. [12] – převzato.	12
2.2	Vazby diagnostického systému. [12] – převzato a upraveno.	13
2.3	Vývoj technického stavu objektu. [9] – převzato.	15
2.4	Zapojení online měřicího systému VN kabelu. [17] – převzato a upraveno. .	16
2.5	Model vysokofrekvenčního transformátoru proudu. [18] – převzato a upra- veno.	17
2.6	Zapojení zařízení pro měření $\text{tg}\delta$. [20] – převzato a upraveno.	18
2.7	Fáze MWT. [22] – převzato a upraveno.	19
2.8	Relativní a absolutní kmity a obecný princip snímače vibrací.	21
2.9	Snímač rychlosti s popisem. [29] – převzato a upraveno.	22
2.10	Smykový a tlakový snímač zrychlení.	23
2.11	Reálné zapojení snímače výchylky, rychlosti a zrychlení. [28] – převzato. . .	24
2.12	Plyny uvolňované při rozkladu oleje. [36] – převzato a upraveno.	26
2.13	Duvalův trojúhelník. [42] – převzato.	28
2.14	Pohyb vlhkosti při zvýšené zátěži transformátoru. [46] – převzato a upraveno.	30
2.15	Konstrukce senzoru pro měření vlhkosti. [50] – převzato a upraveno.	32
2.16	Schématický a názorný pohled na zařízení k vysoušení oleje.	33
2.17	Rozložení teplot v závislosti na výšce transformátoru. [12] – převzato a upraveno.	34
2.18	Optické vlákno jako teplotní senzor.	36
2.19	Využití změn v absorpčním spektru.	36
2.20	Teplotní senzor s Fabry-Perotovým interferometrem. [66] – převzato a upra- veno.	37
2.21	Uložení senzoru v transformátorovém vinutí.	38
2.22	Tepelný diagram. [72] – převzato a upraveno.	39
2.23	Měřicí transformátory proudu a napětí.	42
3.1	Schéma měřicího řetězce s CompactDAQ. [82] – převzato a upraveno. . . .	43
3.2	Schéma práce měřicího systému s naměřenými daty.	45
3.3	Získ dat z jednotlivých kanálů.	46
3.4	Uložení získaných a vypočtených dat.	46
3.5	Naměřené a vypočtené hodnoty v tabulce.	47

3.6	Layout ovládacího panelu pro uživatele.	48
3.7	Automaticky vykreslený teplotní graf.	50
3.8	Graf naměřených a vypočtených hodnot v MATLABu.	51
3.9	Zapojení měřicích modulů během funkční zkoušky.	51

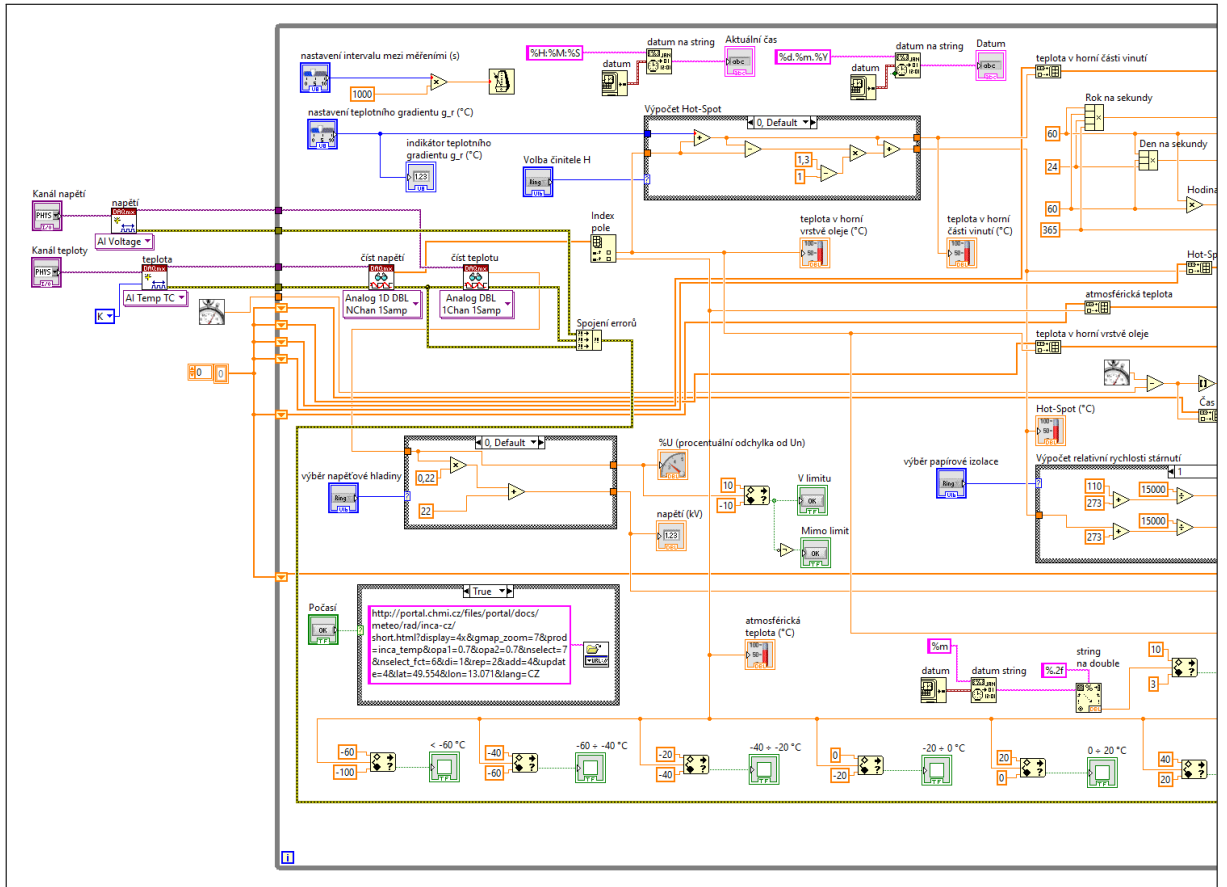
Seznam tabulek

1.1	Porovnání druhů údržby.	11
2.1	Úrovně výsledku diagnostiky kabelů, dle [15].	17
2.2	Kritéria pro posouzení stavu PE a XLPE izolace, dle [21].	19
2.3	Druhy upevnění akcelerometrů, dle [29].	24
2.4	Relativní rychlost stárnutí v důsledku Hot-Spot teploty, dle [72].	41
3.1	Přípustně odchytky napěťových hladin, dle [83] a [84].	44
3.2	Informace o prováděném ověření funkčnosti.	50

Přílohy diplomové práce

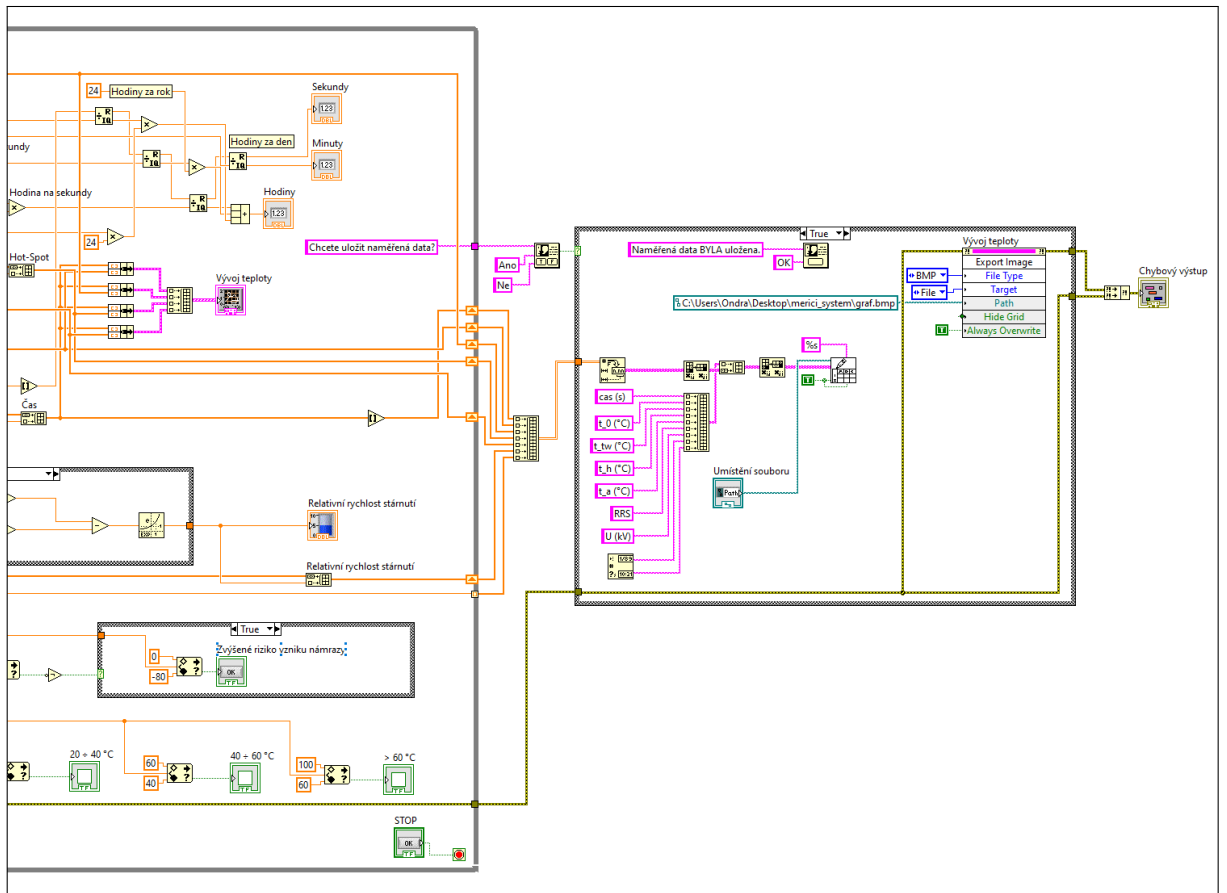
Příloha A: Block Diagram

Levá strana Block Diagramu



Levá strana Block Diagramu.

Pravá strana Block Diagramu



Pravá strana Block Diagramu.

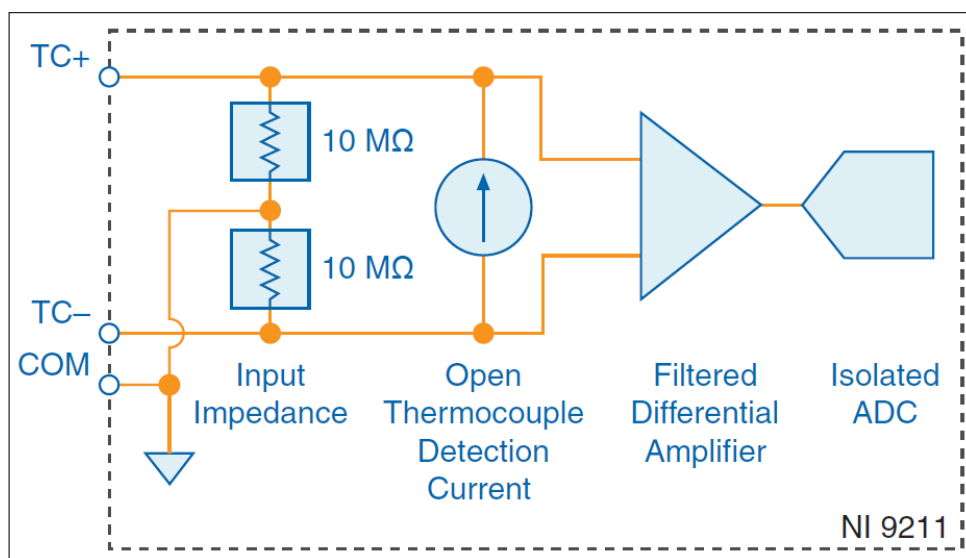
Příloha B: Měřicí a řídicí moduly a šasi na KET

Měřicí modul: NI 9211

Teplotní sériový vstupní modul NI 9211 je konstruován pro zapojení do šasi řady cDAQ a cRIO. Disponuje antialiasing filtrem, detekcí nezapojeného termočláčku (anglicky: *open thermocouple detection*) a kompenzátorem studených spojů (anglicky: *cold-junction compensation*) termočláčku do měřicího zařízení pro vysokou přesnost měření.

Parametry měřicího modulu NI 9211.

Počet kanálů	4
Izolované kanály	Ano
Typ A/D převodníku	Sigma-Delta
Rozlišení A/D převodníku	24 bitů
Rychlost vzorkování	14 S/s
Rozsah napětí	± 80 mV
Přesnost měření při 100°C	$\pm 2,11$ °C
Typy termočlámků	J, K, T, E, N, B, R, S
Typ zapojení termočlámků	Šroub
Stupeň krytí	IP40
Provozní teplota	- 40 °C ÷ 70 °C



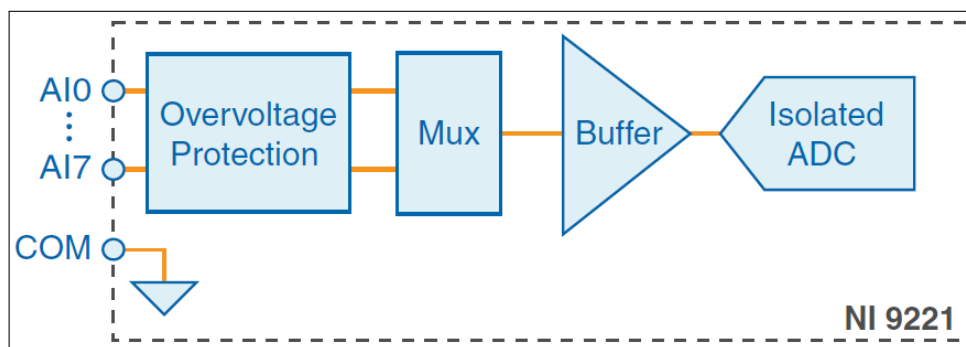
Blokový diagram měřicího modulu NI 9211.

Měřicí modul: NI 9221 s DSUB

Napěťový sériový vstupní modul NI 9221 s DSUB je konstruován pro zapojení do šasi řady cDAQ a cRIO. Modul je vhodný pro měření na průmyslové úrovni i laboratorní aplikace.

Parametry měřicího modulu NI 9221 s DSUB.

Počet kanálů	8
Izolované kanály	Ano
Typ A/D převodníku	SAR
Rozlišení A/D převodníku	12 bitů
Rychlost vzorkování	800 kS/s
Rozsah napětí	± 60 V (DC)
Přesnost měření	± 580 μ V/°C
Přepětová ochrana	± 100 V
Typ zapojení výstupu	25 pinová sběrnice NI 9924
Stupeň krytí	IP40
Provozní teplota	- 40 °C ÷ 70 °C



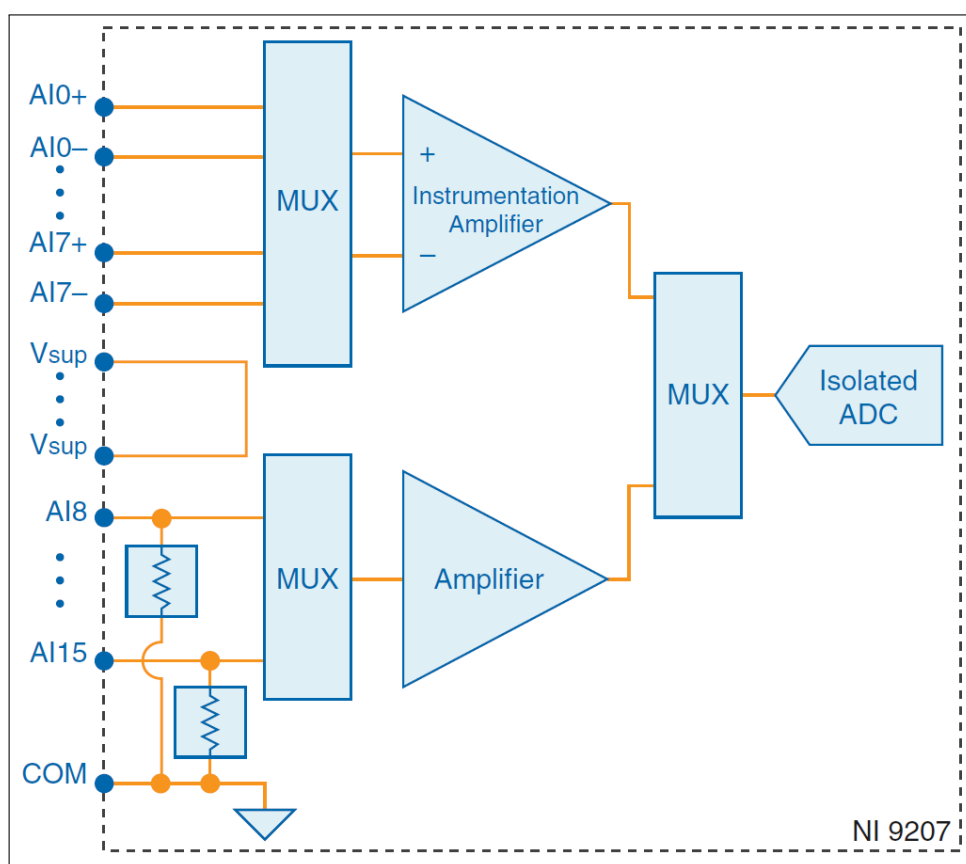
Blokový diagram měřicího modulu NI 9221 s DSUB.

Měřicí modul: NI 9207 s DSUB

Napěťový a proudový sériový vstupní modul NI 9207 s DSUB je konstruován pro zapojení do šasi řady cDAQ a cRIO. Jedná se o zakomponování dvou nejčastějších vstupů do jednoho. Tak je možné ušetřit jeden slot pro další moduly a náklady na něj.

Parametry měřicího modulu NI 9207 s DSUB.

Počet napěťových kanálů	8
Počet proudových kanálů	8
Izolované kanály	Ano
Typ A/D převodníku	Sigma-Delta
Rozlišení A/D převodníku	24 bitů
Rychlost vzorkování	500 S/s
Měřicí rozsah napětí	± 10 V (DC)
Měřicí rozsah proudu	± 20 mA (DC)
Přesnost měření napětí	± 14 μ V/ $^{\circ}$ C
Přesnost měření proudu	± 30 nA/ $^{\circ}$ C
Přepětová ochrana	± 30 V
Typ zapojení výstupu	37 pinová sběrnice NI 9923
Stupeň krytí	IP40
Provozní teplota	- 40 $^{\circ}$ C \div 70 $^{\circ}$ C



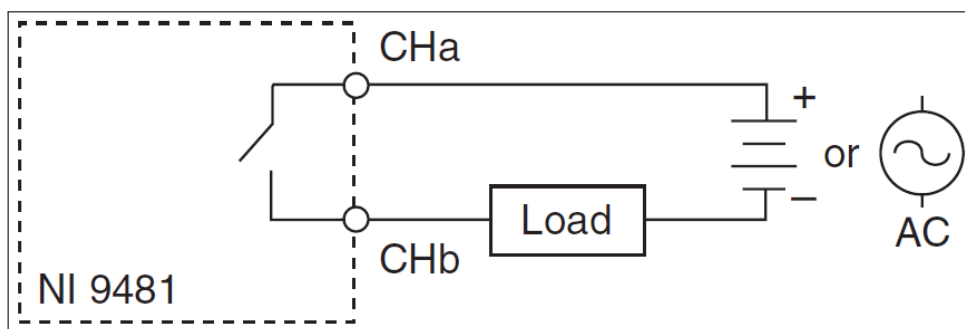
Blokový diagram měřicího modulu NI 9207 s DSUB.

Relé modul: NI 9481

Relé sériový výstupní modul NI 9481 je konstruován pro zapojení do šasi řady cDAQ a cRIO. Modul slouží k přímému spínání motorů, aktuátorů i stejnosměrných zařízení. K indikaci sepnutí jednotlivých relé jsou využívány čtyři zelené LED diody na čelní straně modulu. Každá dioda přísluší jednomu kanálu. Pokud jsou spínací kontakty spojené, tak dioda svítí.

Parametry relé modulu NI 9481.

Počet relé	4
Typ relé	Jednopolové
Počet LED diod	4
Barva LED diody	Zelená
Maximální spínací napětí	± 60 V (DC) 250 V (AC)
Maximální spínací proud na jeden kanál	4 A při 30 V (DC) 1 A při 60 V (DC) 4 A při 250 V (AC) 2 A při 30 V (DC)
Maximální spínací proud na všechny kanály	1 A při 60 V (DC) 2 A při 250 V (AC)
Stupeň krytí	IP40
Provozní teplota	- 40 °C ÷ 70 °C



Blokový diagram relé modulu NI 9481.

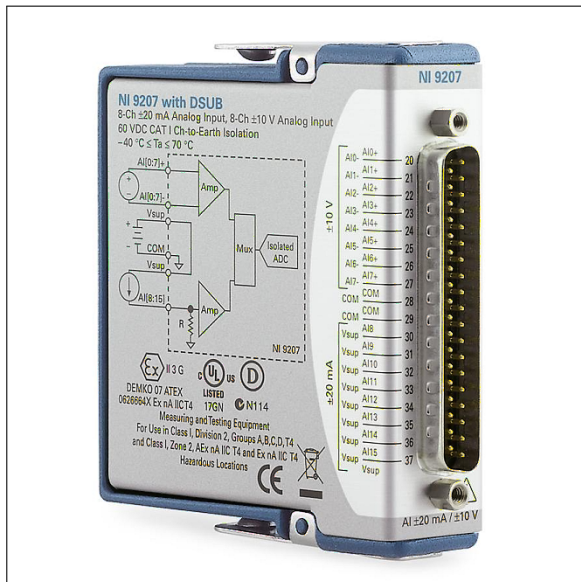
Obrázky zmíněných měřicích a relé modulů



(a) NI 9211.



(b) NI 9221 s DSUB.



(c) NI 9207 s DSUB.



(d) NI 9481.

Měřicí a relé moduly od společnosti National Instruments.

Šasi: NI cDAQ 9181

Šasi NI cDAQ 9181 slouží k zapojení jednoho modulu a jeho vzájemné komunikaci s řídicím mechanismem v počítači. Také je možné k šasi přistupovat z webového prohlížeče pomocí NI Network Browser.

Parametry šasi NI cDAQ 9181.

Počet slotů	1
Rozlišení	32 bitů
Výstup	Ethernet
Rychlost přenosu	10/100 Mbps, Auto-Negotiation
Napájecí napětí	9 ÷ 30 V (DC)
Stupeň krytí	IP30
Provozní teplota	0 °C ÷ 55 °C



Šasi NI cDAQ 9181 s jedním slotem.

Šasi: *NI cDAQ 9184*

Šasi NI cDAQ 9184 slouží k zapojení až čtyř modulů a vzájemné komunikaci mezi těmito moduly a řídicím mechanismem v počítači. Také je možné k šasi přistupovat z webového prohlížeče pomocí NI Network Browser.

Parametry šasi NI cDAQ 9184.

Počet slotů	4
Rozlišení	32 bitů
Výstup	Ethernet
Rychlost přenosu	10/100/1000 Mbps, Auto-Negotiation
Napájecí napětí	9 ÷ 30 V (DC)
Stupeň krytí	IP30
Provozní teplota	- 20 °C ÷ 55 °C



Šasi NI cDAQ 9184 se čtyřmi sloty.

Příloha C: Funkce v MATLABu

```
function zobrazeni
% co se ma nacist a zobrazit
dataset = xlsread('merici_system_data.xlsx', 'merici_system_data');
% cteni sloupce ze zvoleneho souboru
x = dataset(:,1); % cteni 1. sloupce, cas
t0 = dataset(:,2); % cteni 2. sloupce, teplota v horni vrstve oleje
t1 = dataset(:,3); % cteni 3. sloupce, teplota v horni casti vinuti
t2 = dataset(:,4); % cteni 4. sloupce, telota Hot-Spot
t3 = dataset(:,5); % cteni 5. sloupce, atmosfericka teplota (okoli)
v = dataset(:,6); % cteni 6. sloupce, relativni rychlost starnuti

figure % vykresleni grafu
%t_0
yyaxis left
plot(x, t0, '-', 'color', [0, 0, 1], 'Linewidth', 2.0) % modra
hold on
%t_tw
yyaxis left
plot(x, t1, '-', 'color', [1, 1, 0], 'Linewidth', 2.0) % zluta
hold on
%t_h
yyaxis left
plot(x, t2, '-', 'color', [1, 0, 0], 'Linewidth', 2.0) % cervena
hold on
%t_a
yyaxis left
plot(x, t3, '-', 'color', [0, 1, 0], 'Linewidth', 2.0) % zelena
hold on
%relativni rychlost starnuti
yyaxis right
set(gca,'Ydir','reverse')
plot(x, v, '-', 'color', [0.2, 0.2, 0.2], 'Linewidth', 2.0 % tmave sediva
hold off

xlabel('čas (s)') % popis osy x
yyaxis left
ylabel('teplota (°C)') % popis osy y leva
yyaxis right
ylabel('relativni rychlost starnuti (-)') % popis osy y prava
grid on % zapni mrizku
grid minor % jemnejsi mrizka
legend('teplota v horni vrstve oleje', 'teplota v horni casti vinuti',
'telota Hot-Spot', 'atmosfericka teplota (okoli)',
'relativni rychlost starnuti', 'Location', 'northwest')
end
```

Příloha D: Program vytvořeného měřicího systému

Program vytvořeného měřicího systému je k dispozici na přiloženém CD nosiči.

Příloha E: Video z praktického ověření funkčnosti systému

Video z praktického ověření funkčnosti systému je k dispozici na přiloženém CD nosiči.