

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Online měřicí systém teploty**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Luboš BĚHAL**

Osobní číslo: **E16N0077P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Online měřicí systém teploty**

Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište možnosti online diagnostiky elektrických zařízení.
2. Uveďte a zhodnoťte možnosti měření teploty, principy, čidla, přesnosti.
3. Popište možnosti zpracování online naměřených dat.
4. Sestavte a vyzkoušejte měřicí řetězec.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

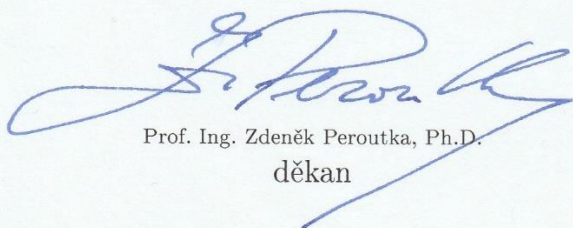
1. Diagnostika elektrických zařízení, Mentlík a kol. BEN
2. Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, Mentlík a kol. BEN 2011
3. internetové zdroje

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**

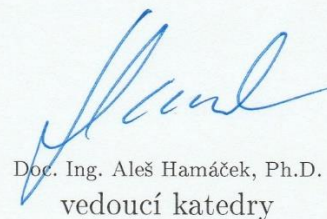
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**



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



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

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem on-line diagnostického systému pro měření teploty transformátorového oleje. Práce je rozčleněna do čtyř hlavních kapitol. První kapitola obecně popisuje diagnostiku transformátorů a diagnostické systémy. Druhá kapitola vnáší diagnostiku do kontextu diagnostikovaných veličin a degradačních vlivů. Třetí kapitola přibližuje možnosti měření teploty a na základě toho určování životnosti. Čtvrtá kapitola je praktická, popisuje návrh měřicího řetězce, programové řešení měření teploty v software LabVIEW, finální realizaci měřicího řetězce a jsou zde popsány možnosti on-line zpracování a zobrazení dat.

## **Klíčová slova**

Transformátor, diagnostika, funkční diagnostika, transformátorový olej, izolace, termočlánek, LabVIEW

## **Abstract**

This master thesis is focused on design of an on-line diagnostic system for transformer oil temperature measuring. Thesis is divided into four main chapters. First chapter describes the diagnostics of transformers and diagnostic systems. Second chapter explains degradation process and diagnostic quantities. Chapter three shows possibilities of temperature measuring and transformer lifetime determining. Fourth chapter is practical, describes the design and implementation of the measuring device and LabVIEW software solution. Possibilities of on-line processing of measured values are also described there.

## **Keywords**

Transformer, diagnostics, functional diagnostics, transformer oil, insulation, thermocouple, LabVIEW

## Prohlášení

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 29.5.2019

Luboš Běhal

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>6</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ</b> .....	<b>12</b>
1.1 DIAGNOSTICKÝ PROCES, SYSTÉM.....	12
1.1.1 Diagnostický proces.....	12
1.1.2 Diagnostický systém.....	13
1.2 ON-LINE DIAGNOSTIKA, DIAGNOSTICKÉ SYSTÉMY .....	13
1.2.1 Měřicí systémy .....	14
1.2.2 Monitorovací systémy .....	14
1.2.3 Expertní systémy .....	15
1.2.4 Měřicí systémy na bázi PC [zdroj].....	17
<b>2 DIAGNOSTIKOVANÉ VELIČINY</b> .....	<b>18</b>
2.1.1 Teplota .....	18
2.1.2 Vlhkost v oleji.....	19
2.1.3 Rozpuštěné plyny, obsah vodíku, kyslíku.....	20
2.2 VELIČINY DIAGNOSTIKOVANÉ NA TRANSFORMÁTORECH.....	21
<b>3 MĚŘENÍ TEPLoty, STÁRNUTÍ TRANSFORMÁTORU</b> .....	<b>22</b>
3.1 MĚŘENÍ TEPLoty OLEJE V HORNÍ ČÁSTI TRANSFORMÁTORU .....	22
3.1.1 Jímkové odporové stonkové teploměry.....	22
3.2 MĚŘENÍ TEPLoty VINUTÍ.....	23
3.2.1 Přímé měření teploty vinutí.....	23
3.2.2 Nepřímé měření teploty vinutí.....	25
3.3 URČOVÁNÍ HOT-SPOT TEPLoty.....	26
3.4 SPOTŘEBA ŽIVOTNOSTI.....	28
3.5 STUPEŇ POLYMERIZACE A JEHO VÝPOČET .....	29
<b>4 TVORBA MĚŘICÍHO ŘETĚZCE PRO MĚŘENÍ TEPLoty</b> .....	<b>30</b>
4.1 SBĚR DAT.....	30
4.1.1 NI CompactDAQ.....	30
4.1.2 LabVIEW.....	32
4.2 NÁVRH MĚŘICÍHO PROGRAMU V PROSTŘEDÍ LABVIEW .....	33
4.2.1 Měření teploty .....	35
4.2.2 Zaznamenávání minimální a maximální teploty.....	37
4.2.3 Signalizace překročení maximální povolené teploty .....	38
4.2.4 Měření doby běhu .....	38
4.2.5 Výpočet teploty hot-spot.....	39
4.2.6 Výpočet relativní spotřeby životnosti a určení zbytkové životnosti .....	40
4.2.7 Tvorba a přizpůsobení uživatelského panelu .....	42
4.2.8 Ukládání naměřených hodnot do souboru .....	45

4.3	ZPROVOZNĚNÍ MĚŘICÍHO ŘETĚZCE .....	48
4.3.1	<i>Nastavení programu a implementace měření teploty</i> .....	48
4.3.2	<i>Zapojení řetězce, ukázka funkce</i> .....	50
4.4	MOŽNOSTI ON-LINE ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH ÚDAJŮ.....	51
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>54</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A DALŠÍCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>		<b>56</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>		<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratek

<i>a</i> .....	Koeficient [-]
<i>A</i> .....	Materiálová konstanta [-]
<i>AKM</i> .....	Tepelná kopie vinutí
<i>API</i> .....	Application Programming Interface
<i>b</i> .....	Koeficient [-]
<i>B</i> .....	Materiálová konstanta [-]
<i>CAN</i> .....	Sběrnice (Controller Area Network)
<i>CASE</i> .....	Computer-Aided Software Engineering
<i>DAQ</i> .....	Data Acquisition
<i>DP</i> .....	Stupeň polymerizace (Degree of Polymerization)
<i>e</i> .....	Eulerovo číslo
<i>G</i> .....	Programovací jazyk
<i>g</i> .....	Rozdíl teploty vinutí a oleje při jmenovitých podmínkách [°C]
<i>GaAs</i> .....	Arsenid gallitý, polovodič
<i>H</i> .....	Činitel nejteplejšího místa [-]
<i>HTTP</i> .....	Hypertext Transfer Protocol
<i>IP</i> .....	Internet Protocol
<i>K</i> .....	Činitel zatížení [-]
<i>LIN</i> .....	Sériová komunikace (Local Interconnect Network)
<i>M<sub>0</sub></i> .....	Molekulová hmotnost jednotky monomeru
<i>M<sub>n</sub>(t)</i> .....	Průmětná hmotnost polymeru v čase t
<i>NI</i> .....	National Instruments
<i>NI MAX</i> .....	National Instruments Measurement & Automation Explorer
<i>OS X</i> .....	Operační systém macOS
<i>p</i> .....	Konstanta [-]
<i>PC</i> .....	Osobní počítač
<i>PCI</i> .....	Počítačová sběrnice
<i>Pt</i> .....	Platina
<i>Pt100</i> .....	Platinové teplotní čidlo
<i>Q</i> .....	Činitel dodatečných ztrát [-]
<i>RS – 232</i> .....	Sériová komunikace
<i>RS – 485</i> .....	Sériová komunikace

<i>RTD</i> .....	Odporový měřič teploty (Resistance Temperature Detector)
<i>S</i> .....	Činitel zvýšení gradientu [-]
<i>subVI</i> .....	Podprogram v LabVIEW
<i>t</i> .....	Průměrná životnost vzorků [jednotka času]
<i>T</i> .....	Termodynamická teplota [K]
<i>T<sub>hN</sub></i> .....	Aktuální teplota [°C]
<i>T<sub>H-S</sub></i> .....	Teplota nejteplejšího místa [°C]
<i>TPT – 32</i> .....	Optovláknové čidlo společnosti Sequoia
<i>USB</i> .....	Universal Serial Bus, sériová sběrnice
<i>V</i> .....	Relativní spotřeba životnosti [jednotka času]
<i>VI</i> .....	Program v LabVIEW (Virtual Instrument)
<i>W</i> .....	Výška vodiče vinutí [mm]
<i>WTI</i> .....	Ukazatel teploty vinutí (Winding Temperature Indicator)
<i>y</i> .....	Exponent proudu v závislosti teploty na přírůstku [-]
<i>θ</i> .....	Teplota [°C]
<i>θ<sub>0</sub></i> .....	Teplota oleje v horní části transformátoru [°C]
<i>θ<sub>h</sub></i> .....	Teplota hot-spot [°C]
<i>θ<sub>tw</sub></i> .....	Teplota horní části vinutí [°C]

## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1.1 SCHÉMA MĚŘICÍHO SYSTÉMU .....	14
OBRÁZEK 1.2 SCHÉMA MONITOROVACÍHO SYSTÉMU. ....	15
OBRÁZEK 1.3 SCHÉMA EXPERTNÍHO SYSTÉMU .....	16
OBRÁZEK 3.1 ODPOROVÝ TEPLOMĚR PT100 .....	22
OBRÁZEK 3.2 FISO NORTECH SENTINEL (VLEVO) A NORTECH TT (VPRAVO) .....	25
OBRÁZEK 3.3 ZJEDNODUŠENÝ TEPLOTNÍ MODEL TRANSFORMÁTORU.....	26
OBRÁZEK 4.1 ŠASI NI cDAQ-9184 S PŘIPOJENÝM MODULEM NI 9211 .....	32
OBRÁZEK 4.2 STRUKTURA WHILE A ROZBALOVACÍ MENU LOOP CONDITION .....	34
OBRÁZEK 4.3 NASTAVENÍ ČASU SMYČKY.....	35
OBRÁZEK 4.4 FUNKCE ZOBRAZENÍ DATA A ČASU .....	35
OBRÁZEK 4.5 BLOK PRO NASTAVENÍ IMAGINÁRNÍ TEPLoty OLEJE.....	36
OBRÁZEK 4.6 OVLADAČ VÝSTUPNÍHO ODPORU IMAGINÁRNÍHO TERMOČLÁNKU .....	36
OBRÁZEK 4.7 BLOK PRO URČOVÁNÍ A RESET MINIMÁLNÍ TEPLoty OLEJE .....	37
OBRÁZEK 4.8 BLOK PRO SIGNALIZACI PŘEKROČENÍ NASTAVENÉ TEPLoty .....	38
OBRÁZEK 4.9 BLOK MĚŘENÍ DOBY BĚHU.....	39
OBRÁZEK 4.10 BLOK VÝPOČTU HOT-SPOT TEPLoty .....	40
OBRÁZEK 4.11 BLOK VÝPOČTU RELATIVNÍ SPOTŘEBY ŽIVOTNOSTI.....	41
OBRÁZEK 4.12 BLOK URČOVÁNÍ ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI TRANSFORMÁTORU.....	42
OBRÁZEK 4.13 OVLÁDACÍ PANEL SE ZAPNUTÝMI MOŽNOSTMI NASTAVENÍ.....	43
OBRÁZEK 4.14 ZOBRAZOVÁNÍ NASTAVITELNÝCH ÚDAJŮ POMOCÍ PROPERTY NODES .....	43
OBRÁZEK 4.15 BLOK ZOBRAZOVÁNÍ TEPLoty OLEJE V GRAFU .....	44
OBRÁZEK 4.16 NASTAVENÍ POČTU DESETINNÝCH MÍST V INDIKÁTORECH.....	45
OBRÁZEK 4.17 BLOK VYTVOŘENÍ SOUBORU A ZÁPISU HLAVIČKY SOUBORU .....	46
OBRÁZEK 4.18 STRUKTURA WHILE ZÁPISU HODNOTY DO SOUBORU .....	48
OBRÁZEK 4.19 BLOK MĚŘENÍ TEPLoty POMOCÍ FUNKCE DAQ ASSISTANT .....	49
OBRÁZEK 4.20 NASTAVENÍ FUNKCE DAQ ASSISTANT PRO MĚŘENÍ TEPLoty .....	50
OBRÁZEK 4.21 TERMOČLÁNEK TYP K .....	50
OBRÁZEK 4.22 ZAPOJENÍ MĚŘICÍHO ŘETĚZCE.....	51
OBRÁZEK 4.23 MODEL ZOBRAZENÍ MĚŘENÍ ONLINE.....	52
OBRÁZEK 4.24 OKNO NASTAVENÍ FUNKCE WEB PUBLISHING TOOL .....	53

## Úvod

Rostoucí výkon výpočetní techniky a rozšiřující se pole jejího využití stále otevírají nové možnosti v oblasti diagnostiky elektrických strojů. Díky pokročilejší technice a internetu se stávají standardem systémy, které dříve nebylo možné realizovat. Na elektrických zařízeních všeho druhu je možné více či méně sofistikovaně zaznamenávat teplotu, opotřebení a další údaje, které vedou k lepší spolehlivosti a delší životnosti těchto zařízení.

Tato práce je zaměřena na systémy vedoucí ke zjištění vlastností elektrických zařízení, konkrétně transformátorů, s cílem seznámit se s možnostmi diagnostiky obecně, online diagnostiky a měřením teploty těchto zařízení. Tyto údaje jsou teoretickým základem diplomové práce a jsou nadále využity při vlastní realizaci měření. V praktické části je zpracován návrh programu a tvorba řetězce pro měření teploty, s důrazem na následující požadavky:

- kontinuální měření teploty transformátorového oleje,
- výpočet teploty nejteplejšího místa transformátoru,
- výpočet životní fáze transformátoru.

V této části jsou aplikovány poznatky získané v teoretické rešerši a poznatky získané během realizace návrhu.

Dále jsou popsány možnosti následného online zpracování naměřených dat a možnosti vzdáleného ovládání navrženého programu.

Transformátory, přestože se jedná o spolehlivá zařízení navržená pro soustavný chod po dlouhou dobu, mají také svá úskalí většinou spojená s jejich údržbou. Během používání transformátorů dochází k opotřebení pevné izolace, případně k degradaci vlastností izolačního oleje. Velký vliv na stárnutí izolace má právě teplota, není však zdaleka jediná. Zanedbáním údržby, případně špatně načasovanými servisními intervaly se provozovatel transformátoru vystavuje nebezpečí odstávky transformátoru vlivem poruchy. Diagnostika má za úkol získávat informace o stavu transformátorů během jejich života, na jejich základě určovat jejich konkrétní stav a plánovat další postup z hlediska údržby. Tím se omezí množství provozních problémů, které mají zároveň negativní ekonomický dopad.

# 1 Diagnostika transformátorů

Z důvodu předcházení poruchám, omezení maximální zátěže nebo výpočtu relativního zestárnutí izolačního oleje je nutné provádět během života transformátoru zkoušky. Testování transformátorů lze rozdělit do dvou základních skupin podle toho, zda jsou vlastnosti ověřovány bez provozního napětí při přerušném provozu, nebo se zařízení sleduje nepřetržitě při provozu. Z tohoto hlediska se zkoušky dělí na tzv. off-line a on-line diagnostiku. [1]

## 1.1 Diagnostický proces, systém

### 1.1.1 Diagnostický proces

Diagnostický proces elektrického zařízení má za úkol odstranit problémy vzniklé při uvádění stroje do provozu, kontrolu okamžitého stavu a určení předpovědi vývoje tohoto stavu. Je možné ho rozdělit do dvou částí. V první části diagnostického procesu jsou stanoveny metody použité ke sledování a vytvořeny spolehlivostní zkoušky. Ve druhé části se na základě těchto zkoušek určuje stav stroje. K určení technického stavu slouží diagnostické signály, ty jsou v závislosti na režimu zařízení buď testovací nebo funkční. Diagnostické signály vytvoří na zařízení odezvy, na jejichž základě je možné získat informace o tom, zda zařízení v daný moment splňuje požadované nároky na funkčnost. [1, 2]

Testovací diagnostika (off-line) zjišťuje stav zařízení na základě reakcí výstupních signálů na vstupní tzv. stimulační signály. Testovací diagnostika se provádí za odstávky zařízení, aby nebyly stimulační signály rušeny provozem zařízení. Naměřené hodnoty se porovnávají s předepsanými mezemi. Využívá se plánovaných periodických intervalů testů. Použití je vhodné u strojů s nižšími nároky na spolehlivost a u strojů, kde se nepředpokládají rychlé dynamické změny stavu. Cena testovací diagnostiky je nižší, než je tomu v případě diagnostiky funkční. [1]

Funkční diagnostika (on-line) naopak využívá signálů vznikajících při běžném provozu zařízení a částečně je těmito signály i řízena. Systém pracuje s mechanismem kontroly hodnot, jejich nepřetržitým sledováním a porovnáváním. Funkční diagnostika se nasazuje na systémy, u kterých je potřeba zajistit vysokou bezpečnost a spolehlivost. [1]

### 1.1.2 Diagnostický systém

Diagnostický systém je nástroj provádějící diagnostické procesy, který v sobě souhrnně obsahuje zařízení potřebná k diagnostice a diagnostické postupy. Vytvoření diagnostického systému je komplexní proces obsahující následující činnosti:

- **zkoumání diagnostikovaného zařízení**, jeho funkčních stavů, funkce v bezporuchovém stavu, poruchovosti jednotlivých součástí, vazeb a závislosti prvků, provozních signálů objektu,
- **vytvoření matematického modelu a diagnostických postupů**, testovací metodiky a vhodných diagnostických programů
- **realizace diagnostického zařízení**, prozkoumání současných diagnostických zařízení a principů jejich návrhu, návrh potřebných přístrojů, proškolení pracovníků, zhodnocení ekonomického dopadu. [1]

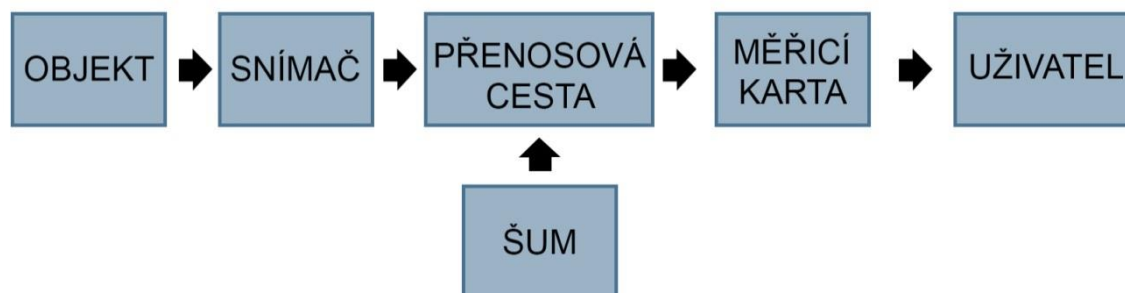
## 1.2 On-line diagnostika, diagnostické systémy

On-line diagnostické metody s sebou přinesly výhody nepřetržitého sledování provozních signálů a vyhodnocování stavu zařízení za plného provozu. Tím se eliminují nevýhody klasických měření – malá rychlost měření, vysoká náročnost obsluhy měření a nutnost ručního zápisu naměřených hodnot. Zároveň však přináší ve srovnání s off-line metodami vysoké provozní náklady, vyšší složitost a potenciální zvýšenou poruchovost měřicího systému, který je složen z velkého množství senzorů a další elektroniky. Z těchto důvodů se v praxi častěji než komplexní diagnostické systémy – expertní systémy, používají menší systémy zaznamenávající a vyhodnocující jen některé dílčí veličiny, které mají přímou souvislost s degradací izolačního systému. Expertní systémy jsou potom využívány zejména v rozsáhlých provozech, kde je potřeba předcházet finančně náročným opravám způsobených odstávkami. [2, 3, 4]

Úkolem diagnostického systému není pouze nepřetržitý sběr provozních hodnot, ale zároveň jejich neprodlené vyhodnocování a monitoring aktuálního stavu. Na základě porovnání s hodnotami naměřenými v minulosti, může monitorovací systém odhadnout opotřebení a zbytkovou životnost zařízení. Systém také dává varovná hlášení při dosažení nebo překročení kritických hodnot, dává návrhy na řešení aktuální situace, případně dokáže samočinně zasahovat do řídicího systému. [2, 3]

### 1.2.1 Měřicí systémy

Měřicí systém (*obr. 1.1*) slučuje několik dílčích prvků, propojuje je a umožňuje samostatné provedení měření a interpretaci dat. V principu jsou zdrojová data zachycena senzorem a převedena do vhodné formy pro transport. Přenesené informace jsou následně přijaty přijímacím zařízením a zpracovány tak, aby si zachovaly co nejvyšší věrohodnost v porovnání s předlohou a mohly být interpretovány uživateli. [3, 5]

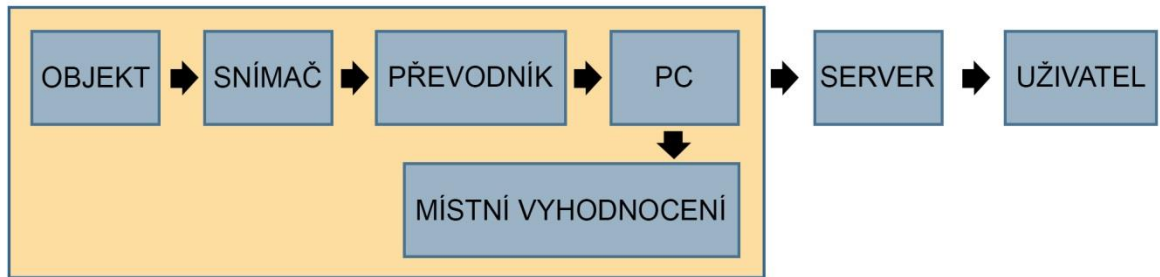


Obrázek 1.1 Schéma měřicího systému. Vlastní zpracování, 2019, dle [1]

Při přenosu na signál působí rušivé vlivy, které mohou změnit danou fyzikální veličinu přenášeného signálu. Deformaci a zkreslení signálu také způsobuje samotné přenosové prostředí. Proto, aby během přenosu nevznikala chyba a zachovala se věrohodnost přenášené informace, je potřeba zvolit vhodný typ přenosu (analogový nebo digitální) a vhodnou úpravu signálu na vysílací straně (obecně modulace, kódování a kvantování). Průmyslové prostředí obsahuje poměrně velké množství rušivých vlivů působících na signál, z toho důvodu je v případě potřeby přenosu na větší vzdálenost vhodnější použití digitálního signálu v číslicové formě. Analogový signál je více náchylný ke změnám způsobeným rušením a vykazuje nízkou odolnost. Standardem pro rozsáhlejší měřicí systémy jsou proto senzory s číslicovým výstupem a sériový přenos dat – přenos probíhá postupně po jednotlivých bitech. [1]

### 1.2.2 Monitorovací systémy

Monitorovací systém (*obr. 1.2*) kontinuálně sleduje, zaznamenává a vyhodnocuje data ze senzorů. Na základě informací naměřených v minulosti je monitorovací systém schopný podávat hlášení o dosažení nebo překročení mezních hodnot, monitorovat v reálném čase stav izolace a provozu transformátoru a na základě okamžitého vyhodnocení stavu i zasahovat do řízení transformátoru. [1]



Obrázek 1.2 Schéma monitorovacího systému. Vlastní zpracování, 2019, dle [1]

Monitorovací systém je poměrně jednoduchý. Namísto měření velkého počtu různých veličin jsou měřeny pouze ty s největším dopadem na stárnutí sledovaného objektu. Hodnoty jsou však zaznamenávány s co nejvyšší přesností, důraz je kladen na odrušení komunikace, minimalizaci ztrát, šumu apod. Vyšší přesnosti měření se zde snáze dosahuje díky relativní jednoduchosti celého systému, s čímž se váže i nižší cena a lepší dostupnost. [1]

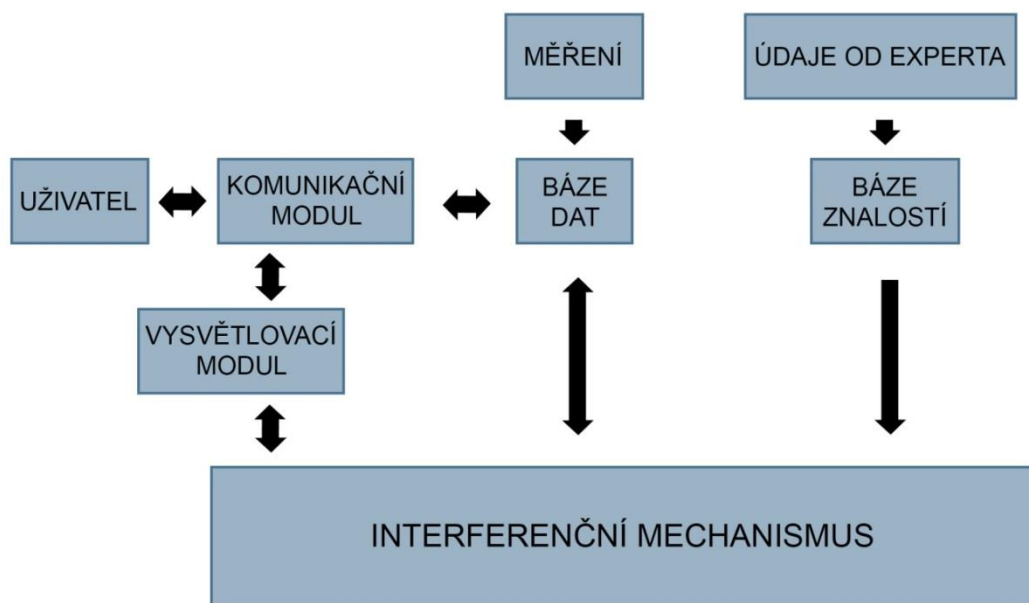
### 1.2.3 Expertní systémy

Expertní systém představuje nejvyspělejší řešení sledování zařízení. V názvu obsažené *expertní* značí, že tyto programy zvládají samostatně inteligentně rozhodnout na základě znalostí, které v sobě mají zakódované. Tím dokáží vyřešit aktuální potřeby zařízení a instruovat údržbu o postupu. Rozhodovací schopnost takového systému je srovnatelná s lidským expertem v daném oboru. Rozhodování expertního systému neprobíhá přímo, jedná se o zdůvodněná doporučení pro obsluhu. Použití takového systému je výhodné pro udržení uniformního řešení. Je však nevhodné používat expertní systém za změněných podmínek z důvodu rizika selhání. [1]

Expertní systémy se skládají z několika vzájemně propojených částí. Expertní systém tvoří báze znalostí, inferenční mechanismus, vysvětlovací modul, uživatelské rozhraní a rozhraní k dalším systémům a modul pro akvizici znalostí (*obr. 1.3*). Expertní systémy jsou schopné samostatně:

- rozhodovat,
- vysvětlovat,
- oddělit znalosti a postup jejich využití. [6, 7]





Obrázek 1.3 Schéma expertního systému. Vlastní zpracování, 2019, dle [1, 6]

Báze znalostí seskupuje veškeré znalosti různého typu, od obecných informací po úzce specializované. Expert předá systému své znalosti, včetně takzvaných heuristik (také soukromé či nejisté znalosti). Heuristiky jsou založeny na praxi experta, čímž se odlišují od laických znalostí. Heuristiky nelze nijak hmatatelně prokázat a nemusí vždy vést ke správnému výsledku. Základním požadavkem je možnost jednoduše měnit obsažená data, protože poznatky se rychle vyvíjejí a mění. Klíčové je také, aby expert každé nově získané poznatky doplnil do báze. Současné expertní systémy často využívají několikází znalostí, každá z nich potom zapisuje své závěry do sdílené datové struktury. Pokud báze znalostí neobsahuje žádná fakta, mluvíme o prázdném expertním systému. [6, 7]

Báze dat poskytuje údaje o řešeném případě a dosadí je do záznamů báze znalostí. Údaje do báze dat jsou zadávány uživatelsky v dialogovém režimu s počítačem, kdy se expertní systém dotazuje na informace a další souvislosti. Systém provede rozbor těchto informací a na jeho základě navrhuje řešení. O plynulý a uživatelsky přívětivý dialog mezi člověkem a počítačem se stará komunikační modul. Komunikaci mezi bázi dat, bázi znalostí a uživatelem zajišťuje inferenční mechanismus. Ten obsahuje doménově nezávislé algoritmy pro řešení problémů a strategii pro vyhledávání znalostí v bázi. Inferenční mechanismus je dále schopen vytvářet nové poznatky na základě současných znalostí. [6, 7]

### 1.2.4 Měřicí systémy na bázi PC

Základem systému je počítač, který je doplněný o vhodné hardwarové (měřicí karta) a softwarové (program simulující funkci měřicího přístroje) rozhraní. Počítač se senzorem komunikuje přes tzv. virtuální přístroj. Virtuální přístroj vychází z použitého softwarového prostředí, obsahuje v sobě velké množství nástrojů a simuluje funkce reálného měřicího zařízení skrze zobrazení přes počítač. Softwarové prostředí je možné upravit přesně na míru konkrétním požadavkům. Hlavními přínosy systému založenému na počítači je možnost uživatelsky definovat funkce a přizpůsobovat měřicí sestavu, nižší cena vývoje systému a celkový poměr parametrů a ceny. Je možné přivést několik digitálních vstupů najednou a funkčnost je závislá na výkonnostních možnostech počítače. [1, 8]

K digitalizaci měření je potřeba hardwarové zařízení, které je schopné zastoupit funkci měřicích přístrojů a bude komunikovat se softwarovým prostředím v PC. Může se jednat o multifunkční měřicí kartu, která se zapojí do interních sběrnic počítače (PCI) nebo o kartu, která komunikuje přes rozhraní RS-232, USB apod. Měřicí karta spolu se softwarovým prostředím představují hlavní investici. Na rozdíl od tradičních přístrojů je však možné, v případě potřeby, měnit výslednou funkčnost nebo systém rozšiřovat o další funkce. Kvůli progresivnímu rozvoji výpočetní techniky se však předpokládá častější obměna komponent z důvodu jejich rychlého morálního zastarávání. [1, 8]

Ke zpracování hodnot zaznamenaných měřicí kartou a jejich dalšímu zpracování se využívá programování pomocí CASE produktů (Computer Added Software Engeneering) – vývojových prostředí. Programování pomocí kódu v klasických programovacích jazycích by bylo náročné z hlediska znalosti použitého hardwaru, nepřehledné a také časově náročné. Vývojových prostředí existuje celá řada, liší se celkovou komplexností, od otevřených a velmi komplexních, po uzavřené systémy vytvořené pro daný typ hardwaru a konkrétní funkčnost. Dále se vývojová prostředí liší tím, zda využívají graficky nebo textově orientované programování. Mezi nejvýznamnější zástupce patří:

- HP VEE,
- Test Point,
- Dasy Lab,
- LabWindows,
- LabView. [8]

## 2 Diagnostikované veličiny

Veličin, které je možné během provozu transformátoru sledovat existuje celá řada. Klíčovým indikátorem bezporuchového provozu transformátoru je zejména stav izolační soustavy olej – papír. Nejobvyklejší příčinou vzniku závady transformátoru je navlhnutí izolačního systému. Degradací činitelé působí na izolační soustavu komplexně a mohou se vzájemně ovlivňovat. Základní vlivy podepisující se na celkové životnosti a spolehlivosti jsou:

- mechanické namáhání – rázy, otřesy, vibrace,
- klimatické vlivy,
- chemické vlivy – oxidace, kyselost prostředí,
- působení teploty a její prudké změny,
- působení elektrického pole – výboje, výkyvy intenzity pole. [2, 3]

Největší množství závad transformátoru vzniká na jeho aktivních částech, tedy na vinutí, v magnetickém obvodu a na hlavní izolaci. Kondice těchto součástí je nejvíce ovlivněna těmito parametry:

- rozpuštěné plyny,
- obsah vlhkosti,
- teplota,
- obsah kyslíku,
- doba, po kterou tyto faktory působí. [5]

### 2.1.1 Teplota

Na teplotu je při sledování parametrů potřeba brát zvláštní důraz, jedná se o základní parametr pro určení maximální zátěže. Pomocí teplotního trendu je také možné odhadnout životnost transformátoru a určit jeho zestárnutí. Vznik tepla v transformátoru je ovlivněn zejména:

- Joulovými ztrátami ve vinutí,
- ztrátami vířivými proudy ve vinutí,
- hysterezními ztrátami v magnetickém obvodu. [5]

Je velmi důležité předcházet přehřívání transformátoru, protože s rostoucí teplotou dochází k prudkému zrychlování stárnutí izolační soustavy, zhoršení izolačních a mechanických vlastností. Přehřívání může být způsobeno nevhodným nebo nedostatečným návrhem izolace, závadou transformátoru nebo jeho přetěžováním. Záměrného přetěžování je cíleně možné využít při cyklickém provozu transformátoru, kdy je vysoké zatížení (a vysoká teplota) pouze krátkodobé. Stárnutí izolace v určité míře probíhá při jakékoliv teplotě, pouze s výjimkou absolutní nuly, kdy izolace nestárne a má nekonečnou životnost. [1, 2]

### 2.1.2 Vlhkost v oleji

Vlhkost v transformátoru způsobuje snížení povrchového odporu izolantů, čímž zvyšuje riziko průrazu a spouští v oleji reakce, při nichž vznikají kyseliny. Obsah kyselin v oleji je značně nežádoucí, kyseliny rozkládají izolační papír, následně způsobují korozi kovových částí transformátoru a především vinutí. Vlhkost se do oleje může dostat z ovzduší, respektive ze vzduchu obsaženého v dilatační nádobě, případně se může tvořit jako produkt oxidačního stárnutí. Vlhkost snižuje dielektrickou pevnost oleje, čímž negativně ovlivňuje jeho izolační vlastnosti a průrazné napětí. Z hlediska toho, v jaké formě se voda v transformátoru vyskytuje, se rozlišuje několik druhů.

- **Volná voda** – nachází se převážně na dně transformátoru. Neovlivňuje přímo vlastnosti oleje, ale může se do něj dostávat vlivem jeho hygroskopických vlastností – přechází do něj v podobě rozpuštěné nebo emulgované vody.
- **Rozpuštěná voda** – je absorbována přímo v oleji. Rozpuštěné vody se lze zbavit rozprašováním oleje do vakua za nízké teploty.
- **Emulgovaná voda** – směs mikroskopických kapek vody a oleje, tvořící hydrofilní nebo hydrofobní emulzi, v závislosti na tom, zda se v oleji obsažené látky ve vodě rozpouštějí nebo ne. Emulgovaná voda se podílí na zhoršování izolačních vlastností oleje a velmi obtížně se odstraňuje. Při dodržení doporučeného postupu odběru vzorku oleje lze změřit obsah emulgované a rozpuštěné vody.
- **Reakční voda** – vzniká během chemických reakcí v oleji, které probíhají v teplejších částech (kolem aktivních částí). Při ochlazení oleje se mění na vodu rozpuštěnou.[2, 9]

Transformátory, ve kterých vykazuje pevná izolace více než 2% obsah vody, jsou označovány jako mokré transformátory. Voda takto obsažená v izolačním papíře představuje riziko za provozu při vysoké teplotě, kdy z izolace unikají vodní páry v podobě bublin. Ty se potom pohybují po dilatační nádobě spolu s olejem nebo se zachycují na vinutí, což může v obou případech vést k poškození izolace. [10]

### 2.1.3 Rozpuštěné plyny, obsah vodíku, kyslíku

Působením výbojové činnosti se v chladícím oleji vytvářejí plyny – ionizovaný kanál výboje má lokálně velmi vysokou teplotu (stovky až tisíce °C) a je olejem prudce ochlazován. K tvorbě plynů dále dochází vlivem stárnutí a rozkladu izolace. Změny struktury oleje lze zjistit analýzou plynů v oleji obsažených. V oleji se mohou vytvářet následující plyny:

- **Acetylen** vzniká působením elektrického oblouku nebo velkého proudu při teplotě minimálně 800 až 1200 °C a následném prudkém ochlazení.
- **Metan** se tvoří tepelným rozkladem oleje a působením částečných výbojů.
- **Etan a etylen** vznikají tepelným rozkladem oleje. Etylen se tvoří přednostně při teplotách nad 500 °C.
- **Vodík** se uvolňuje během elektrolýzy vody obsažené v oleji.
- **Oxid uhelnatý** indikuje zestárnutí izolačního papíru vlivem tepelného stárnutí nebo výbojů.
- **Oxid uhličitý** se v oleji tvoří opět vlivem tepelného stárnutí. [2, 11, 12]

Obsah kyslíku způsobuje, stejně jako vlhkost, rychlejší rozpad oleje, vznik kyselin a kalu. Kal se usazuje na aktivních částech transformátoru, což způsobuje zvýšení teploty a odporu. [9]

## 2.2 Veličiny diagnostikované na transformátorech

Pro provozní sledování transformátorů se používají zejména následující diagnostické veličiny, měřené na aktivní části a izolačním systému:

- **zatěžovací proud** pro zjištění tepelného namáhání,
- **přepětí a zkratové proudy** pro zjištění vlivu přechodových jevů,
- **teplotu** pro určení stupně zestárnutí izolace,
- **výskyt volných plynů v oleji a obsah vodíku** pro zjištění stavu aktivních částí,
- **hladinu oleje** pro určení těsnosti nádoby,
- **částečné výboje** pro zjištění stavu aktivních částí.

Účinnost chladicího systému se určuje měřením:

- **rozdílu teplot na vstupu a výstupu z chladiče,**
- **proudění oleje.**

U průchodek se zjišťuje jejich izolační stav měřením:

- **změny kapacity,**
- **částečných výbojů.**

Na přepínacích odboček je detekována:

- **pozice přepínače a počet přepnutí** pro zjištění opotřebení namáhaných částí,
- **točivý moment přepínače** pro zjištění jeho mechanického stavu. [5]

Podle volby sledovaných parametrů se odvíjí cena monitorovacího systému, je proto potřeba volbu posoudit s ohledem na konkrétní transformátor a jeho stáří. Z hlediska vlivu na stárnutí transformátoru nejsou všechny vlivy rovnocenné. Na základě zkušeností z oboru diagnostikování proto byly vybrány a doporučeny parametry, které jsou považovány za základní:

- měření výstupního napětí všech fází,
- měření výstupního proudu všech fází,
- měření teploty na vstupu a výstupu z chladiče,
- určování obsahu volných plynů v oleji,
- určování vlhkosti a obsahu vody v oleji. [2, 3]

### 3 Měření teploty, stárnutí transformátoru

Při provozu transformátoru se část elektrické energie přemění na teplo. Přestože je tato část poměrně malá ve srovnání s celkovým výkonem, který transformátor přenáší, způsobuje výrazné zvýšení teploty konstrukčních částí transformátoru. To může představovat omezení pro možný přenesený výkon transformátoru. Vlivem teploty dochází k dlouhodobé degradaci izolačního systému papír – olej. Pevné části izolačního systému nemusejí být jednoduše přístupné, zatímco olej většinou je. Při důsledné péči je možné olej udržovat v dobré kondici po dlouhou, prakticky neomezenou dobu. Neudržovaný nebo špatně udržovaný olej však rychle degraduje a výrazně snižuje životnost celého transformátoru.

#### 3.1 Měření teploty oleje v horní části transformátoru

Měření teploty v horní části transformátoru se využívá z důvodu vyšší teploty oleje v horní části transformátoru. Důvodem pro vyšší teplotu v horních vrstvách oleje je působení termosifonového efektu, kdy kapalina s vyšší teplotou má nižší hustotu. Z toho důvodu se studenější kapalina (olej) usazuje ve spodních vrstvách a teplejší kapalina je vytlačována nahoru, kde je výhodné měřit její teplotu. K měření teploty se využívají odporové stonkové teploměry umístěné v horní části nádoby. [2]

##### 3.1.1 Jímkové odporové stonkové teploměry

Jímkové odporové stonkové teploměry se využívají pro měření teploty horní vrstvy oleje. Jedná se o kontaktní snímače pracující na principu převodu změny teploty na změnu odporu. Součástí čidla je často také převodník, který zaznamenaný odpor převádí na jednotný proudový signál v rozsahu 4 až 20 mA. [2]



Obrázek 3.1 Odporový teploměr Pt100 [13]

Typickým příkladem jsou teploměry Pt100 (*obr. 3.1*), které jsou využívány pro měření teploty v širokém spektru aplikací. Jedná se o odporové měřiče teploty, také označované jako RTD (Resistance Temperature Detector). Jde v principu o kovové vlákno namotané kolem keramického nebo skleněného jádra. Materiál použitý jako odporové vlákno je velmi čistý kov, obvykle platina, nikl nebo měď. Tento materiál má velmi přesnou závislost odporu na teplotě. Při měření teploty do 500°C mají tyto detektory obecně vyšší přesnost, spolehlivost a stálost než termočlánky. Teploměry Pt100 mají nominální odpor 100  $\Omega$  (z názvu vyplývající 100 určuje odpor při 0° C, Pt určuje materiál vlákna, v tomto případě platina). Standardní senzor Pt100 má závislost teploty na odporu 0,385  $\Omega/^\circ\text{C}$ . a teplotní rozsah -200 až 500  $^\circ\text{C}$  (rozsah se v závislosti na typu může lišit). [14]

V porovnání s termočlánky mají RTD senzory obecně mnohem nižší teplotní rozsah a nižší maximální měřitelnou teplotu. Teploty nad 500  $^\circ\text{C}$  je tedy možné měřit pouze pomocí termočlánků. Pouzdro RTD senzorů má obecně větší průměr než pouzdro termočlánků, RTD senzory mají zpravidla průměr pouzdra 3,175 mm nebo 6,35 mm, termočlánky 1,6 mm nebo méně. Termočlánky mají také rychlejší odezvu na změny teploty (zlomky vteřin vs. vteřiny). RTD senzory se však vyznačují vyšší přesností než termočlánky, přesnost a teplotní stabilitu si zachovávají po mnoho let, zatímco termočlánky trpí teplotním driftem, který může nastat již po několika hodinách používání a jsou nutné kalibrace a korekce. Jelikož mají RTD senzory dostatečný rozsah pro měření teplot transformátorového oleje a vynikají právě stálostí, je jejich použití vhodnější. Teploměry Pt100 jsou v různých variacích hojně využívány pro aplikace v různých odvětvích. [14]

## 3.2 Měření teploty vinutí

Sledování teploty vinutí, je důležitý parametr využívaný k optimalizaci zatížení transformátoru, prodloužení životnosti a snížení nákladů na údržbu. Z důvodu umístění vinutí je však zjištění těchto hodnot velmi komplikované.

### 3.2.1 Přímé měření teploty vinutí

Přímé měření teploty vinutí využívá čidel přímo instalovaných do každého vinutí transformátoru. Zjištění teploty vinutí přímo není možné dosáhnout standardními metodami pracujícími na principu převodu teploty na elektrickou veličinu (např. odporovými teploměry nebo termočlánky). Z toho důvodu se používá technologie měření pomocí bodových



optovláknových snímačů. Optovláknové snímače fungují na různých principech, nejčastěji se využívá sledování změn absorpčního spektra polovodiče nebo úbytku intenzity fluorescence fosforu. Jelikož se v optických vláknech místo elektrické veličiny využívá světlo, jsou optovláknové senzory vhodné i pro použití v nebezpečných prostorách. [2, 3, 15]

Sledování změn absorpčního spektra probíhá tak, že se optickým vláknem přivede bílé světlo k polovodiči (GaAs) na konci vlákna, ten část světla pohltí a část se odrazí v dielektrickém zrcadle za polovodičem a vrací se zpět. U odraženého světla se dále zkoumá jeho barevné spektrum, z něhož se následně určí teplota polovodičového krystalu. Výhodou tohoto systému je fakt, že je zkoumána pouze informace o barvě spektra, nikoliv jeho intenzita. Z důvodu ochrany snímače před vlivy uvnitř transformátoru je optické vlákno chráněno teflonovou vrstvou a konec obsahující polovodič je uložen ve vysokoteplotním lepidle. Další možností je sledování poklesu intenzity teplotně citlivého fosforu. K fosforu je optickým vláknem přivedeno modré světlo, které vyvolává luminiscenci v červené oblasti spektra. Vyzářené světlo je opět vedeno zpět optickým vláknem a je dále zkoumána doba poklesu intenzity luminiscence. [2, 3, 15]

Konkrétním optovláknovým čidlem je např. TPT-32 vyráběná společností Sequoia. Jedná se o senzor pracující na principu změny absorpčního spektra GaAs polovodičového krystalu. Senzor je schopný měřit v teplotním rozsahu  $-40 - 250$  °C s přesností  $\pm 2$  °C a rozlišením  $0,1$  °C. Ke zpracování signálu slouží optická jednotka Nortech TT případně Nortech Sentinel. K jednotce je senzor připojen  $200$   $\mu\text{m}$  křemíkovým optickým vláknem, dostupný je v délkách od  $1$  do  $15$  metrů. [16]

Obě jednotky (Nortech Sentinel a Nortech TT, *obrázek 3.2*) poskytují až šestikanálové měření a do již existujících systémů se připojují pomocí komunikačního rozhraní RS-232 nebo RS-485. Prostřednictvím rozhraní RS-232 může být jednotka spojena s počítačem a nastavována pomocí software Nortech Commander. [3, 17, 18]



Obrázek 3.2 Fiso Nortech Sentinel (vlevo) a Nortech TT (vpravo) [17, 18]

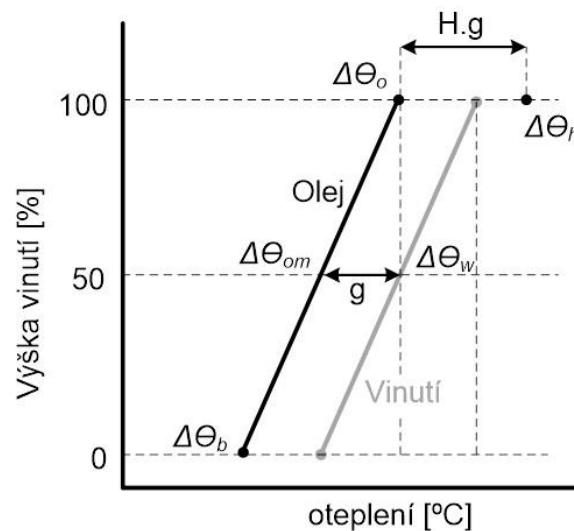
Použití optovláknových snímačů je limitováno pouze na nové transformátorové jednotky, kde je realizováno pomocí WTI (Winding Temperature Indicator). WTI zajišťuje ochranu proti přehřátí, jedná se proto o klíčové zařízení pro provoz transformátoru. Přesnost WTI však v průběhu životnosti degraduje. Při zanedbání údržby se může přesnost natolik zhoršit, že povede k nesprávnému měření hot-spot teploty a nefunkční ochraně proti přehřátí. [19]

### 3.2.2 Nepřímé měření teploty vinutí

S nepřímým měřením teploty vinutí se lze v praxi setkat častěji, protože měření přímými metodami je obtížné a hůře aplikovatelné, instalaci senzorů je potřeba realizovat již během stavby transformátoru. Nepřímá metoda, tzv. tepelná kopie vinutí (AKM), využívá měření oleje v horní části transformátoru a zatěžovacího proudu. Ve víku transformátoru je umístěna jímka naplněná olejem obsahující topný odpor, který je ohříván zatěžovacím proudem. Oteplení topného odporu v jímce je úměrné skutečnému oteplení vinutí. Teplota je zaznamenávána měřicím vlnovcem a přenášena pákovou soustavou na hřídel s mikrosplínací. Měřicí vlnovec reaguje na teplotu topného odporu a teplotu oleje v jímce. Výkyvy okolní teploty jsou vyrovnávány kompenzačním vlnovcem. [1,2]

### 3.3 Určování Hot-Spot teploty

Hot-spot teplotu, nebo také teplotu nejteplejšího místa vinutí, je třeba brát v potaz z důvodu nehomogenního rozložení teploty uvnitř transformátoru. Přestože se teplota oleje jeví v požadovaných mezích, může docházet k lokálnímu přehřívání a tím negativnímu ovlivnění životnosti transformátorové izolace. Nejvyšší teplota se zpravidla nachází na vinutí blízko horní vrstvy. Poblíž horní vrstvy se nachází největší rozptylové pole, nejvyšší teplota se ale nemusí nacházet na vrchním závitu a může být níže. Z důvodu špatné přístupnosti vinutí uvnitř transformátoru se hot-spot teplota určuje extrapolací. K výpočtu se využívá teplota horní vrstvy oleje a teplota vinutí nebo zatěžovací proud, zohledňuje se provozní stav, typ chlazení, tepelná konstanta transformátoru, typ vinutí... Přímé provozní měření je prakticky nemožné, pro přesné určení nejteplejšího místa by bylo zapotřebí velké množství snímačů, což by vedlo ke složitému a neekonomickému řešení. Z toho důvodu se přistupuje k určení hot-spot teploty výpočtem. [2, 20]



Obrázek 3.3 Zjednodušený teplotní model transformátoru [20].

Výpočetní metody pro určení hot-spot teploty jsou dány normou ČSN EN 60076. K výpočtu je také potřeba znát výsledky oteplovacích zkoušek, ty se provádí dle doporučení normy ČSN EN 60076-2. Výpočet hot-spot teploty vychází ze zjednodušeného modelu teplot transformátoru (obr 3.3), který předpokládá lineární růst teploty oleje nahoru směrem ke konci vinutí. V případě, že jsou známy výsledky oteplovacích zkoušek (je znám rozdíl teploty

vinutí a oleje  $g$ ), je teplota nejteplejšího místa vypočítána ze vztahu 3.1 [20], kde  $\theta_h$  je hot-spot teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $\theta_0$  je teplota oleje v horní části transformátoru [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $H$  je činitel nejteplejšího místa [-],  $g$  je rozdíl teploty vinutí a oleje při jmenovitých podmínkách [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $K$  je činitel zatížení [-] a  $y$  je exponent proudu v závislosti teploty na přírůstku. [20]

$$\theta_h = \theta_0 + H \cdot g \cdot K^y \quad (3.1)$$

Pokud výsledky oteplovacích zkoušek známé nejsou, k výpočtu slouží vztah 3.2 [20], kde  $\theta_h$  je hot-spot teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $\theta_0$  je teplota oleje v horní části transformátoru [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $\theta_{tw}$  je teplota horní části vinutí [ $^{\circ}\text{C}$ ] a  $H$  je činitel nejteplejšího místa [-].

$$\theta_h = \theta_0 + (\theta_{tw} - \theta_0) \cdot (H - 1) \quad (3.2)$$

Činitel nejteplejšího místa  $H$  pro běžné distribuční transformátory má hodnotu 1,1, pro velké a střední transformátory 1,3. Lze ho také vypočítat ze vztahu 3.3 [20], kde  $Q$  je činitel dodatečných ztrát [-] a  $S$  je činitel respektující zvýšení gradientu středu vinutí [-].

$$H = Q \cdot S \quad (3.3)$$

Činitel  $Q$  lze určit pomocí vztahu 3.4 [20], kde  $a$  a  $b$  jsou tabulkově dané koeficienty [-] a  $W$  je výška vodiče vinutí [mm]. [20]

$$Q = a \cdot e^{b \cdot W} \quad (3.4)$$

### 3.4 Spotřeba životnosti

S teplotou a zejména hot-spot teplotou úzce souvisí také spotřeba životnosti. Jedná se o parametr, který zohledňuje stárnutí transformátoru (a především jeho izolace) vlivem tepelného namáhání. Určení tohoto parametru je často nepřesné, protože je potřeba zahrnout do výpočtů množství podmínek a proměnných. „Jako relativně přesná metoda odhadu se jeví odečítání požadovaných hodnot z grafu životností přímky či získání výsledku pomocí výpočtu. Obojí se provádí pomocí metody nejmenších čtverců a následné extrapolace. K sestavení přímky v souřadnicovém systému  $1/T$ ,  $\log t$  je třeba znát ještě doporučené teploty stárnutí a délky zkušebních cyklů, které zjistíme z tabulky s rozsahem teplot, ve kterých se předpokládá selhání vzorků izolace.“ [1] Vzorce potřebné k určení spotřeby životnosti jsou definovány normou CEI/IEC 354 / VDE 0536. [1]

K výpočtu relativního tepelného stárnutí izolace se používá Arrheniův zákon, daný rovnicí 3.5 [1], kde  $t$  je průměrná životnost vzorků,  $A$  a  $B$  jsou materiálové konstanty a  $T$  je termodynamická teplota [K].

$$t = A \cdot e^{B/T} \quad (3.5)$$

Arrheniův zákon je možné nahradit Montsingerovým vztahem (rovnice 3.6 [1]) v případě teplotního rozsahu  $80 \div 140$  °C, čímž se výpočet zjednoduší.  $\theta$  udává teplotu ve °C a  $p$  je konstanta.

$$\text{Životnost} = e^{-p\theta} \quad (3.6)$$

Z rovnice 3.7 [1] je možné určit relativní spotřebu životnosti ( $V$ ) při teplotě nejteplejšího místa  $T_{H-S}$  [°C]. Aktuální teplota  $T_{hN}$  [°C] má normou stanovenou referenční hodnotu  $T_{hN} = 98$  °C. „Tato teplota odpovídá provozu transformátoru při jmenovitém výkonu a při teplotě chladicího prostředku 20 °C, když oteplení nejteplejšího místa činí 78 K, tzn. je o 13 K vyšší, než střední oteplení 65 K. Tyto teplotní podmínky odpovídají normálnímu

stárnutí izolace a rychlost stárnutí se při této teplotě rovná jedné.“ [1] Dosazením referenční hodnoty  $T_{hN}$  do rovnice 2.4 získáme souvislost mezi teplotou a relativní spotřebou životnosti. [1]

$$V = 2^{(T_{H-S}-T_{hN})/6} = e^{0,693(T_{H-S}-T_{hN})/6} \quad (3.7)$$

### 3.5 Stupeň polymerizace a jeho výpočet

Životnost transformátoru a jeho stárnutí je přímo závislé na stavu pevné izolace. Stav pevné izolace se určuje podle stupně polymerizace (DP). Nejedná se o ukazatel, který by přímo souvisel s měřením teploty, stupeň polymerizace posuzuje průměrnou délku molekuly celulózy  $(C_6H_{12}O_5)_n$ . Tato molekula se však zkracuje tepelným namáháním, což způsobuje křehnutí izolačního papíru až jeho úplný rozpad. Jedná se tedy o ukazatel zestárnutí transformátorové izolace vlivem působení teplotního rozkladu. Nový izolační papír má hodnotu DP v rozsahu 800 – 1000. Často je transformátor vyřazen z provozu dříve, než se kvalita jeho izolace zhorší natolik, že není možné jej nadále bezpečně a spolehlivě provozovat. Obvykle dochází k vyřazení transformátoru, pokud hodnota DP klesne na 200, tato hodnota je považována za limitní. Některé zdroje však doporučují vyřazení při poklesu DP na polovinu původní hodnoty, tj. zhruba 450. Hodnotu DP je možné vypočítat ze vztahu 3.8 [21], kde  $M_n(t)$  je průměrná hmotnost polymeru v čase  $t$  a  $M_0$  je molekulová hmotnost jednotky monomeru. Z důvodů předejití nadměrnému stárnutí izolace, se zjišťuje teplota kritických částí transformátoru. [9, 21, 22, 23]

$$DP = \frac{M_n(t)}{M_0} \quad (3.8)$$

## 4 Tvorba měřicího řetězce pro měření teploty

Navrhovaný monitorovací systém je založen na objektově orientovaném programovacím jazyce. Implementace měření teploty se skládá ze dvou základních komponentů:

- Měření vstupů
- Zpracování a interpretace naměřených hodnot

Pro interpretaci a zpracování dat je zvoleno programovací prostředí LabView, které se stará o zpracování naměřených dat, výpočty na základě zjednodušeného teplotního modelu, komunikaci s měřicím zařízením a uživatelské rozhraní. V případě potřeby implementace složitých teplotních modelů a algoritmů je možné tyto výpočty přenést ke zpracování mimo prostředí LabVIEW. Konkrétně pro výpočet teplotního modelu by bylo možné využít matematického modelu, např. v programu Matlab nebo některé z jeho alternativ (Octave, Sage apod.).

Kontinuální měření teploty poskytuje v reálném čase obraz o stavu chladicího oleje a výpočty jsou schopny zhodnotit jeho stav v kontextu životnosti. Vstupními hodnotami jsou naměřené, případně dopočítané hodnoty teplot, hodnoty udané výrobcem transformátoru, hodnoty vycházející z oteplovacích zkoušek. Výsledky jsou ukládány a mohou sloužit jako vstup pro další celky, především monitorování a analýzu dat.

### 4.1 Sběr dat

#### 4.1.1 NI CompactDAQ

CompactDAQ je platforma pro sběr dat vyvinutá společností National Instruments. Tato platforma podporuje širokou škálu hardwaru a softwaru pro sběr a zpracování dat. Platforma se skládá z hardwarové a softwarové části. Hardwarová část zahrnuje kontrolér či šasi, které je schopné pojmout až 8 I/O modulů. Kontrolér zajišťuje připojení k PC, v závislosti na koncovém užití se může jednat o USB modul, Ethernet modul nebo bezdrátový Wi-Fi modul. Kontrolér je dále možné osadit libovolnými I/O moduly National Instruments série C. Konkrétně se jedná o následující typy modulů:

- **modul s napěťovým výstupem** – generuje napěťové signály,
- **univerzální analogový vstup** – poskytuje analogové vstupy pro měření napětí, proudu, teploty a tlaku,

- **CAN rozhraní** – umožňuje připojení a komunikaci prostřednictvím CAN (*Controller Area Network*) rozhraní,
- **napět'ový a proudový vstup** – poskytuje analogové měřicí kanály pro měření proudu a napětí,
- **vstup pro zvuky a vibrace** – poskytuje dynamické získávání zvukových signálů a vibrací,
- **vstupní modul čítače** – provádí úlohy čítače jako počítání událostí, měření period, měření šířky pulsu a měření frekvence,
- **teplotní vstup** – získává hodnoty měření z termočlánků a odporových teplotních čidel,
- **napět'ový vstup** – měří vstupní napětí, poskytují izolaci a nadproudovou ochranu pro vysokonapět'ové aplikace,
- **proudový vstup** – poskytuje proudová měření,
- **digitizér** – získává a analyzuje analogové signály v časové a frekvenční oblasti,
- **relé výstup** – poskytuje výstupní signály z elektromechanických a polovodičových relé,
- **digitální modul** – poskytuje možnosti digitálního vstupu a výstupu,
- **modul s proudovým výstupem** – umožňuje ovládat průmyslové pohony řízené proudem,
- **vstupní modul Strain/Bridge** – poskytuje analogové vstupy pro tenzometrická měření,
- **LIN rozhraní** – umožňuje připojení a komunikaci prostřednictvím LIN (*Local Interconnect Network*) rozhraní. [24,25]

Softwarovou část platformy obstarává programovací prostředí. Bezproblémovou kompatibilitu prostředí s veškerým DAQ hardwarem zajišťuje rozšířený ovladač NI-DAQmx. Ovladač je kompatibilní s prostředími LabVIEW, DAQExpress, LabWindows/CVI, C/C++, C#, Visual Basic (.NET). [24]

Výhodou platformy CompactDAQ je nižší cena a snadná přenositelnost. Pro industriální užití se však více hodí odolný systém NI Compact RIO, případně NI PXI – systém založený na průmyslových počítačích s operačním systémem Windows.

Pro tvorbu měřicího řetězce bude z platformy CompactDAQ použit Ethernetový modul NI cDAQ-9184 a karta pro měření teploty NI 9211 (*obrázek 4.1*).

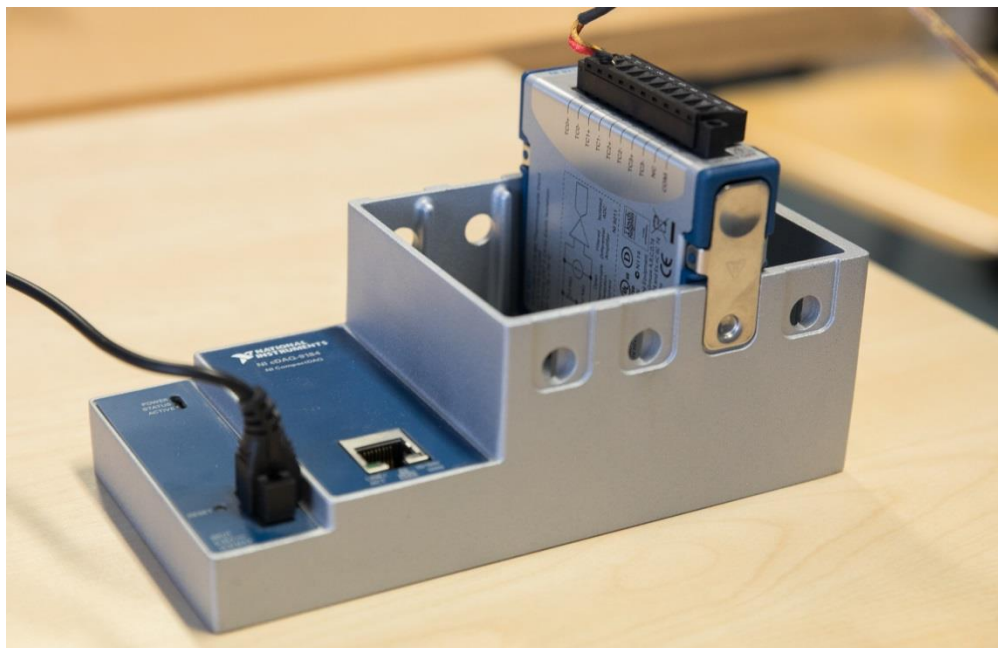


### NI cDAQ-9184

Jedná se o šasi s Ethernetovým připojením schopné pojmout až čtyři měřicí karty. Díky možnosti připojení šasi do sítě lze realizovat vzdálená měření. Toto šasi je dále dostupné v několika verzích pro připojení 1, 4 nebo 8 karet. [24]

### NI 9211

Čtyřkanálová měřicí karta série C pro realizace přesných měření pomocí termočlánků. Karta obsahuje vyhlazovací filtry, detekci poruchy termočlánku a je dvojitě izolovaná, což zvyšuje odolnost proti šumu a přináší vysoký měřicí rozsah. [25]



Obrázek 4.1 Šasi NI cDAQ-9184 s připojeným modulem NI 9211, vlastní zpracování, 2019.

#### 4.1.2 LabVIEW

LabVIEW je programovací prostředí pro měřicí, testovací a kontrolní systémy. Programovací jazyk je založen na grafickém jazyce G, který je multiplatformní. Program lze provozovat na platformách Microsoft Windows, OS X, UNIX a Linux. Programovací jazyk G byl poprvé představen v Apple Mackintosh v roce 1986.

Prostředí programu je založeno na objektově orientovaném programování a mezi jeho velké výhody patří celková intuitivnost ovládání pomocí grafického rozhraní, které pomáhá zvyšovat produktivnost tvorby návrhu. Program také obsahuje velké množství API

(Application Programming Interface) pro hardware, pomocí kterého je poté možné snímat měřené veličiny přímo do programu.

Grafické prostředí programu je složeno z několika hlavních částí: hlavního panelu, blokového schématu a takzvaných icon a connector pane. Tyto části dohromady tvoří vlastní program, takzvané VI (Virtual Instrument). Hlavní panel (front panel) je uživatelské prostředí, do kterého jsou vkládány vstupy a výstupy (controls, indicators apod.). Pomocí hlavního panelu lze program ovládat, kompilovat, spouštět, zadávat parametry apod. Ovládání je také grafické, lze navolit množství různých spínačů, tlačítek, otočných voličů, posuvníků a další. Zobrazovat výstupy je možné pomocí displejů, LED diod, grafů, diagramů apod.

Blokové schéma (block diagram) obsahuje grafický zdrojový kód. Objekty na hlavním panelu se zobrazují jako terminály v blokovém schématu a jsou vzájemně propojené cestami a uzly. Cesty mají barvu podle toho, jaký datový typ reprezentují a šířku podle toho, zda se jedná o pole či skalár. Lze pracovat s konstantami, strukturami formou rámečků a dalším propojováním VI a subVI. Blokovaný diagram má dále nápovědu, která ukazuje, jakou má daný terminál funkci a popisuje jeho vstupy a výstupy. V blokovém diagramu se pracuje s paletou obsahující terminály, ty se dále umísťují do blokového diagramu. Icon a connector pane jsou důležité části VI, které jsou nezbytné pro použití subVI, jejich pomocí se nastavují vstupy a výstupy subVI a tvoří se ikona subVI. SubVI se dá chápat jako podprogram s vlastním VI. Užitečnou součástí LabVIEW je také funkce osciloskopu, která je důležitá zejména při odhalování a odstraňování faktických chyb v programu, které na rozdíl od chyb syntaktických nelze jednoduše odhalit pomocí chybových hlášení (Error list). Osciloskop je funkční při spuštěném programu (příkaz Run), kliknutím na libovolné spojení (objeví se malá ikona P v kroužku).

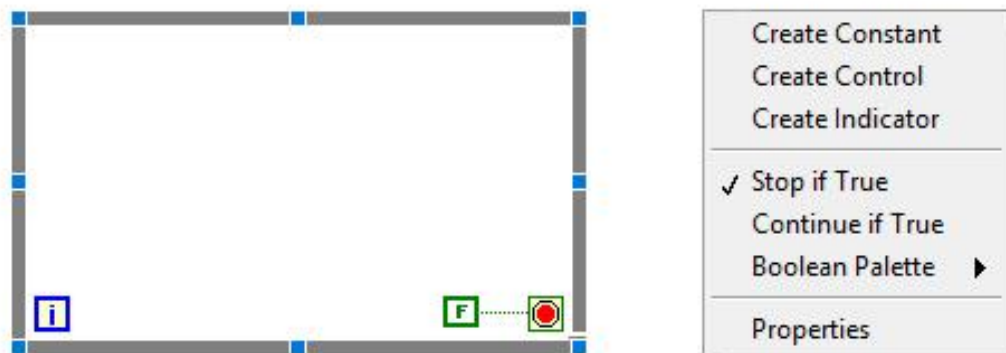
## 4.2 Návrh měřicího programu v prostředí LabVIEW

Program pro měření byl vytvořen v prostředí LabVIEW ve verzi 2014. Funkce programu spočívá v zaznamenání teploty termočlánkem přes měřicí kartu NI 9211 a Ethernetové šasi NI cDAQ-9184. Zaznamenaná hodnota teploty je programem dále zpracována tak, aby se zobrazily nebo uložily následující údaje:

- minimální a maximální teplota,
- teplota vinutí,

- teplota nejteplejšího místa hot-spot,
- relativní spotřeba životnosti transformátoru,
- zbytková životnost transformátoru,
- doba běhu.

S výjimkou ukládání do souboru, které je realizováno jako samostatný blok grafického kódu, jsou všechny následující komponenty součástí struktury. Z možných struktur, které jsou v LabVIEW k dispozici, byl vybrán cyklus *While*, který se stará o opakovaný průběh. Program probíhá do té doby, dokud je splněna podmínka *Loop Condition* (obr. 4.2), v tomto případě se běh ukončí, pokud je na *Loop Condition* přiveden booleovský signál *True*. Jelikož by na reálném transformátoru byla teplota měřena kontinuálně a program probíhal bez zastavení až do poruchy, odstavení, údržby apod., je na *Loop Condition* přiváděna hodnota *False*. Kliknutím pravým tlačítkem myši na ikonu *Loop Condition* lze nastavit, zda se smyčka bude ukončovat signálem *True* nebo *False*.



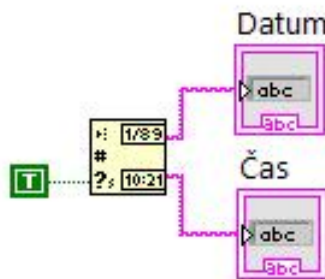
Obrázek 4.2 Struktura *While* a rozbalovací menu *Loop Condition*, vlastní zpracování, 2019.

Ve struktuře *While* je dále možné určit, jak často má iterace proběhnout. Pokud není vzorkování upraveno uživatelem, je standardně nastaveno na hodnotu 1. Číslo reprezentuje čas v ms, tedy iterace se provede každou 1 ms. Pro kontinuální měření je však takový čas zbytečně krátký a přidané rozlišení by s ohledem na dobu provozu transformátoru (tisíce hodin), přinášelo pouze redundanci měření, nikoliv opravdové zpřesnění. Pro účely testovacího programu bylo proto vzorkování upraveno pomocí funkce *Wait Until Next ms Multiple* na kterou je přivedena číselná konstanta (integer) s hodnotou 1000, další iterace tedy proběhne za 1 s (obr. 4.3).



Obrázek 4.3 Nastavení času smyčky, vlastní zpracování, 2019.

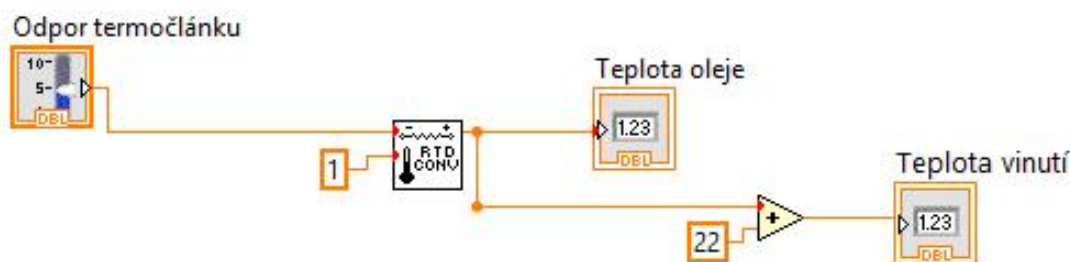
Za základní část navrhovaného programu lze považovat také zobrazení aktuálního data a času. To zajišťuje funkce *Get Date/Time String*, jejímž výstupem jsou indikátory datového typu *string* pro čas a datum (obr. 4.4). Do vstupu funkce je přivedena booleovská konstanta *True*. Tento krok není nutný, záleží, zda je u času požadováno zobrazování sekund (zde se sekundy zobrazují). Pokud není tato volba žádoucí, není potřeba přivádět žádný signál. Pozor, funkce *Get Date/Time String* získává hodnotu data a času z údajů systému PC, je proto důležité aby byly v počítači tyto hodnoty správně nastaveny.



Obrázek 4.4 Funkce zobrazení data a času, vlastní zpracování, 2019.

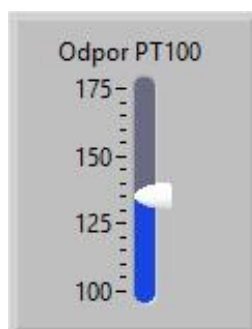
#### 4.2.1 Měření teploty

Ve stádiu tvorby a odladění programu je použito imaginární měření teploty, není tedy připojen reálný měřicí prvek a hodnota teploty je nastavena uživatelsky. Blok zobrazený na obrázku 4.5 bude po dokončení programu nahrazen jiným, který zajistí snímání teploty z připojené měřicí karty. Nastavení reálného měřicího prvku je blíže popsáno v kapitole 4.3 věnující se zapojení měřicího řetězce.



Obrázek 4.5 Blok pro nastavení imaginární teploty oleje, vlastní zpracování, 2019.

K nastavení imaginární teploty slouží posuvný volič na uživatelském panelu (obr. 4.6). Nastavená hodnota reprezentuje odpor termočládku volitelný v rozsahu 100 až 175 Ohm, což odpovídá rozsahu teplot zhruba 0° C až 200° C. Odpor je převeden na teplotu pomocí subVI *Convert RTD Reading*. Nastavenou teplotu lze sledovat indikátorem teploty oleje na ovládacím panelu.

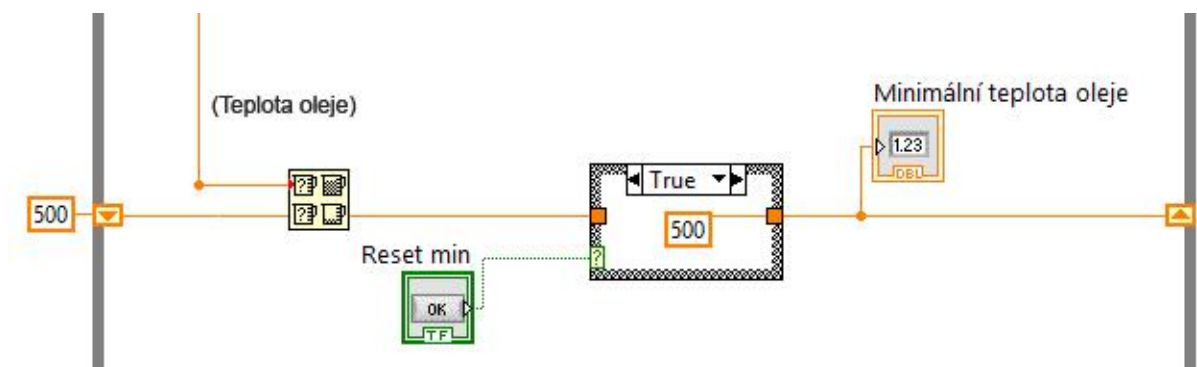


Obrázek 4.6 Ovladač výstupního odporu imaginárního termočládku, vlastní zpracování, 2019.

Měření teploty vinutí zde není fyzicky zavedeno, teplota vinutí je také imaginární a získává se přičtením konstanty k teplotě oleje v horní vrstvě. Při reálném použití měřicího řetězce by teplota byla vinutí získávána přímo, použitím optovláknového snímače teploty, případně by byla dopočtena ze zátěžového proudu transformátoru pomocí nepřímého měření teploty vinutí AKM.

#### 4.2.2 Zaznamenávání minimální a maximální teploty

Záznam minimální a maximální teploty obstarává funkce *Max & Min*, která porovnává dvě vstupní hodnoty a ve dvou výstupech vrací vyšší a nižší hodnotu. Prvním vstupem je naměřená hodnota teploty oleje, druhým vstupem je uložena nejnižší/nejvyšší teplota. Z důvodu použití této funkce uvnitř *While* smyčky nelze hodnotu uložit do proměnné uvnitř smyčky, protože by byla uložena jen do další iterace, potom by byla opět přepsána aktuální hodnotou. Toto lze vyřešit použitím posuvných registrů, které uloží výstupní hodnotu a předají ji do další iterace jako hodnotu vstupní. Aby po spuštění programu byly v první iteraci dvě hodnoty k porovnávání, je z vnějšku do vstupního posuvného registru přivedena číselná konstanta, která pro minimum obsahuje příliš vysokou hodnotu a pro maximum naopak příliš nízkou hodnotu. Tyto hodnoty jsou zvoleny vzhledem k předpokládanému rozsahu teplot oleje tak, aby byly okamžitě přepsány reálně naměřenou teplotou. Jako vstupní maximální teplota bylo zvoleno 0° C, jako vstupní minimální teplota 500° C. Indikátor teploty je umístěn mezi funkci *Max & Min* a výstupní registr.

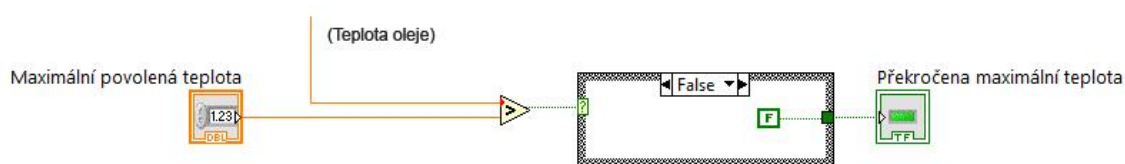


Obrázek 4.7 Blok pro určování a reset minimální teploty oleje, vlastní zpracování, 2019.

V programu je dále možné nejnižší a nejvyšší teplotu vynulovat. K tomu je použita struktura *Case*, která provádí dva různé bloky kódy, v závislosti na tom, jaká vstupní hodnota je na strukturu přivedena. Ke struktuře je přiveden vstupní signál ze spínače na panelu. Pokud není spínač sepnutý, má výstupní hodnotu *False* a struktura je překlenuta tak, aby byla průchozí. Stiskem spínače je na strukturu přiveden signál *True*, vedení výstupní hodnoty z funkce *Max & Min* se přeruší a do posuvného registru se opět předá vhodně zvolená numerická konstanta, stejně jako je tomu v první iteraci. Na obrázku 4.7 je zobrazen blok kódu zjišťující minimální teplotu.

### 4.2.3 Signalizace překročení maximální povolené teploty

Alarm překročení povolené teploty je opět řešen použitím struktury *Case*. V programu je alarm realizován rozsvícením diody na panelu. Vstupní signál *True/False* do struktury přivádí funkce *Greater?*, která zjišťuje, zda horní přivedený signál (teplota oleje) je větší než spodní. Spodní signál je numerická hodnota typu *Control*, která je uživatelem zadávána z ovládacího panelu. Při překročení zadané teploty se provede blok *True* (obr. 4.8), který obsahuje booleovskou konstantu *True* vedoucí do diody. Pokud teplota překročena není, do struktury provede se blok *False*, který obsahuje pouze konstantu *False* vedoucí do diody.



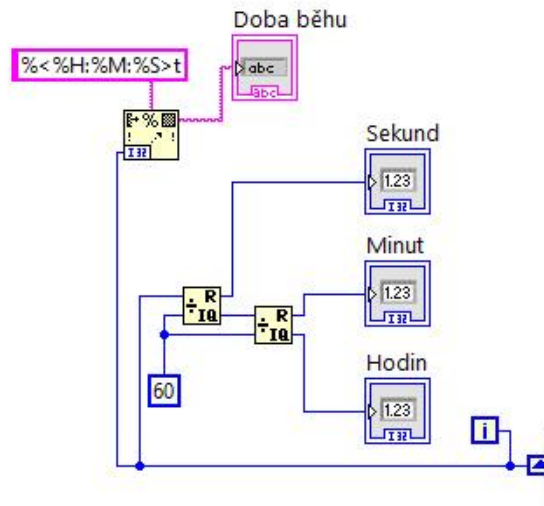
Obrázek 4.8 Blok pro signalizaci překročení nastavené teploty, vlastní zpracování, 2019.

### 4.2.4 Měření doby běhu

Dobu běhu lze určit na základě počtu iterací. Tato hodnota se ukládá při běhu programu. Jelikož je známa hodnota doby jedné iterace, v tomto případě 1000 ms, dobu běhu lze jednoduše získat připojením číselného indikátoru k čítači. Pokud by funkce *Wait Until Next ms Multiple* byla nastavena na jinou hodnotu, je nutné získanou hodnotu dále upravit násobením nebo dělením číselnou konstantou tak, aby se výsledný čas počítal v sekundách.

Zobrazení celkového času v sekundách však není příliš přehledné a lepší volbou je užití čítače hodin běhu. Možností převodu a zobrazení času je více, zde jsou využity dva způsoby (obr. 4.9). Na ovládacím panelu se čas zobrazuje tak, že hodiny, minuty a sekundy mají vlastní indikátorové okno. Toho je docíleno dvojitým použitím funkce *Quotient & Remainder*. První funkce dělí přivedený čas v sekundách číselnou konstantou 60, indikátor na výstupu zobrazuje čas v hodinách. Druhým výstupem je zbytek menší než 60, jde do druhé funkce, kde se opět dělí konstantou 60. Výstup je indikátor minut, zbytek jde do třetího indikátoru reprezentujícího sekundy. Tento způsob je vhodný pro vizuální zobrazení na panelu, pro zápis doby běhu do souboru je však vhodnější převod na *string* ve formátu

HH:MM:SS. To zajišťuje funkce *Format Into String* na jejíž vstup je přiveden čas v sekundách. Na vstupu pro formátovací řetězec je konstanta *string*, která určuje formátování výstupu. Výstupní indikátor je na ovládacím panelu skryt a jeho hodnota je později při zápisu použita jako lokální proměnná.

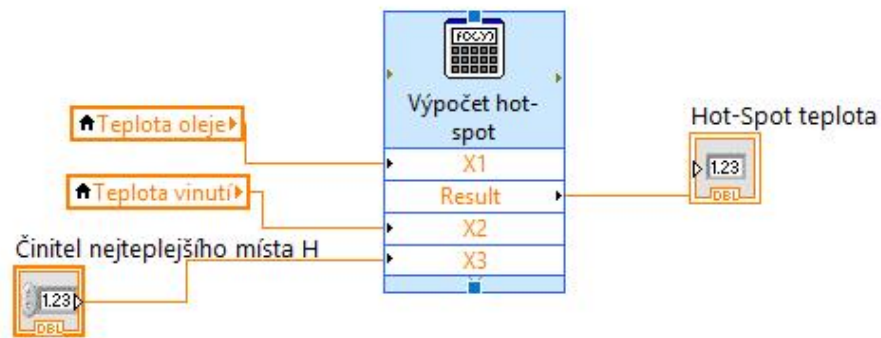


Obrázek 4.9 Blok měření doby běhu, vlastní zpracování, 2019.

#### 4.2.5 Výpočet teploty hot-spot

Teplotu hot-spot, tedy nejteplejšího místa lze určit více způsoby. Pro výpočet je nutno znát buďto teplotu horní vrstvy oleje a teplotu vinutí, nebo teplotu horní vrstvy oleje, zatěžovací proud a výsledky oteplovací zkoušky dle normy ČSN EN 60076-2. Výpočet teploty hot-spot vychází z rovnice 3.2 popsané v kapitole 3.3. Pro výpočet je tedy potřeba znát teplotu oleje v horní vrstvě, teplotu horní části vinutí a činitel nejteplejšího místa  $H$ . Teplota vinutí není programem přímo měřena, je pouze doložena s využitím zjednodušeného teplotního modelu a výsledků oteplovacích zkoušek (tabulka), kdy je k teplotě oleje přičtena hodnota  $g$ , je tedy orientačně dosaženo teploty vinutí. Pro reálné využití by však bylo nezbytné zavést buďto měření teploty vinutí optovláknovými senzory, případně upravit funkci pro využití rovnice 3.1 a zavést měření zatěžovacího proudu.





Obrázek 4.10 Blok výpočtu hot-spot teploty, vlastní zpracování, 2019.

Pro výpočet teploty hot-spot je využita funkce pro výpočet rovnice (obr. 4.10), výpočet by však bylo možné realizovat také pomocí bloků s numerickými operacemi se stejným výsledkem. Rovnice je ve funkci zadána ve tvaru:

$$Result = X1 + ((X2 - X1) * (X3 - 1)) \quad (4.1)$$

Teploty oleje a vinutí jsou na vstup přivedeny jako lokální proměnné typu *Read*. Činitel H je možné uživatelsky zadávat z ovládacího panelu a výsledná hot-spot teplota je zobrazována indikátorem na panelu.

#### 4.2.6 Výpočet relativní spotřeby životnosti a určení zbytkové životnosti

Výpočet relativní spotřeby životnosti je podobně jako výpočet hot-spot teploty řešen funkcí pro výpočet rovnice (obr. 4.11). I zde by bylo možné poskládat výpočet z jednotlivých matematických operací z palety *Numeric*. Do funkce je vložena rovnice 3.7 popsána v kapitole 3.4. Ta je zde interpretována jako:

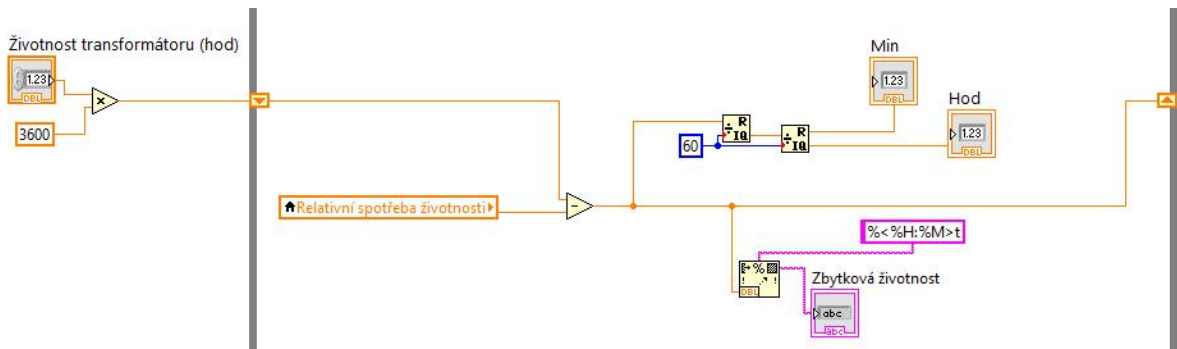
$$Result = 2 ** ((X1 - X2)/6) \quad (4.2)$$

Pro teplotu  $T_{hN}$  je zadána hodnota  $98^{\circ}\text{C}$ , v případě výpočtu pro tepelně upravený papír by hodnota byla změněna na  $110^{\circ}\text{C}$ . Dvěma hvězdičkami je interpretována mocnina. Výsledná relativní spotřeba životnosti je bezrozměrné číslo představující násobek zestárnutí za daný časový úsek.



Obrázek 4.11 Blok výpočtu relativní spotřeby životnosti, vlastní zpracování, 2019.

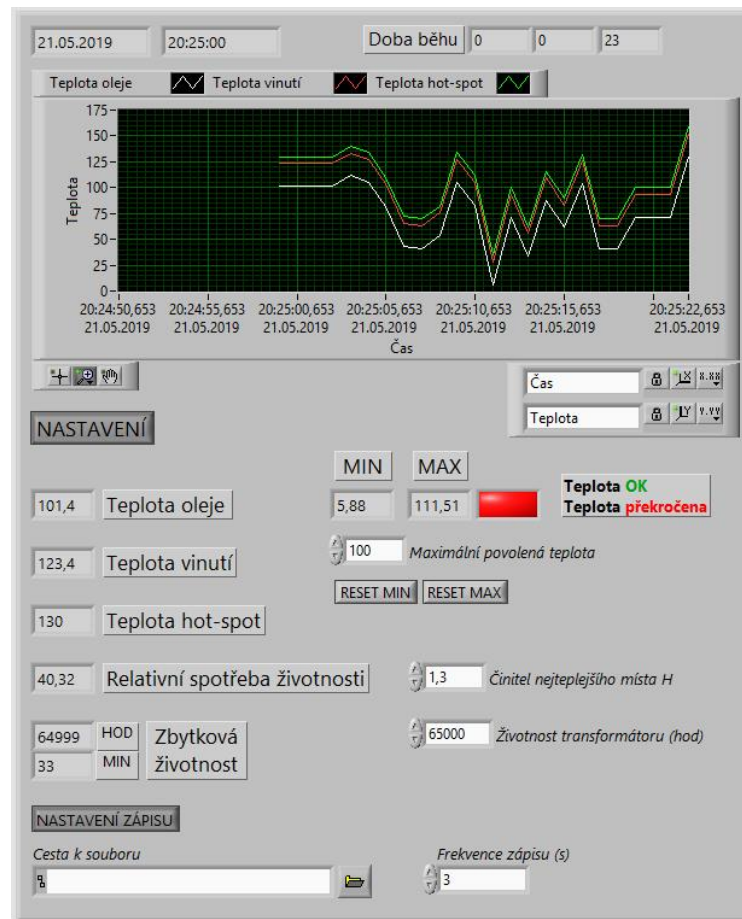
Zobrazení hodnoty relativní spotřeby životnosti by samo o sobě nemělo velkou vypovídající hodnotu, tato hodnota je proto dále využita k výpočtu zbytkové životnosti stroje s ohledem na zatížení (obr. 4.12). Zadanou životnost transformátoru v hodinách je nejprve potřeba převést na sekundy, což je realizováno vynásobením konstantou 3600. Tato hodnota je brána jako počáteční a bude použita pouze v první iteraci, je proto přivedena do posuvného registru, kde bude v další iteraci přepsána aktuální hodnotou. Uvnitř *While* smyčky je od hodnoty zbytkové životnosti odečtena hodnota relativní spotřeby. Jelikož *While* cyklus je nastaven tak, aby probíhal jednou za sekundu, není potřeba tuto hodnotu dále upravovat. V opačném případě by však byla nutná vhodná matematická úprava tak, aby relativní spotřeba byla přepočtena na spotřebu za sekundu. Po odečtení se výstupní hodnota zbytkové životnosti uloží do posuvného registru, aby byla k dispozici v další iteraci. Výstupní hodnota je rovněž zobrazena v indikátorech na ovládacím panelu. K tomu je využita funkce *Quotient & Remainder*, obdobně jako tomu bylo u měření doby běhu, které je popsáno v kapitole 4.2.4. Jelikož teplota není ani zdaleka jediným faktorem, podílejícím se na stárnutí transformátoru, je potřeba tuto hodnotu brát orientačně. Transformátory mají obecně také velmi dlouhou životnost, zpravidla v řádu let až desítek let. Z toho důvodu je zcela dostatečné zobrazovat zbytkový čas pouze v celých hodinách, minuty a sekundy jsou v programu použity spíše pro demonstraci funkce.



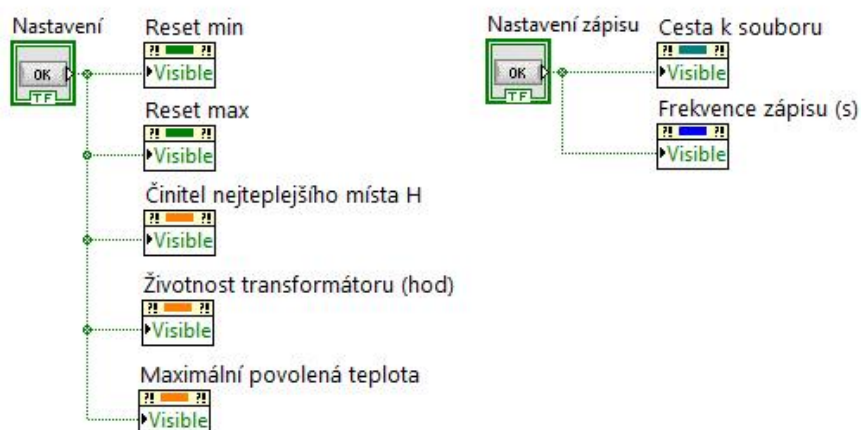
Obrázek 4.12 Blok určování zbytkové životnosti transformátoru, vlastní zpracování, 2019.

#### 4.2.7 Tvorba a přizpůsobení uživatelského panelu

Úkolem ovládacího panelu je přehledně zobrazovat naměřené a vypočtené hodnoty a jednoduše, bez potřeby zásahu do grafického kódu, nastavovat některé parametry (obr. 4.13, příloha A). Základ panelu tvoří indikátory zobrazující číselné hodnoty (datum, čas, teploty,...) popsané v předešlých kapitolách. Tyto indikátory jsou zobrazeny stále. Všechny nastavitelné údaje se zobrazí až po stisknutí tlačítka nastavení, případně nastavení zápisu, po opětovném stisknutí tlačítka jsou údaje skryty. Funkce tlačítka je zajištěna přes *Property Node* typu *Visible*. Na ovladače a indikátory, které mají být zobrazovány a skrývány stiskem tlačítka je zapotřebí kliknout pravým tlačítkem myši, ze seznamu vybrat *Create/Property Node/Visible*. Takto vytvořený property node je viditelný, pokud je na jeho vstup přivedeno *True*. Hodnota *True* je přiváděna z tlačítka a trvá do jeho opětovného stisknutí (obr. 4.14).

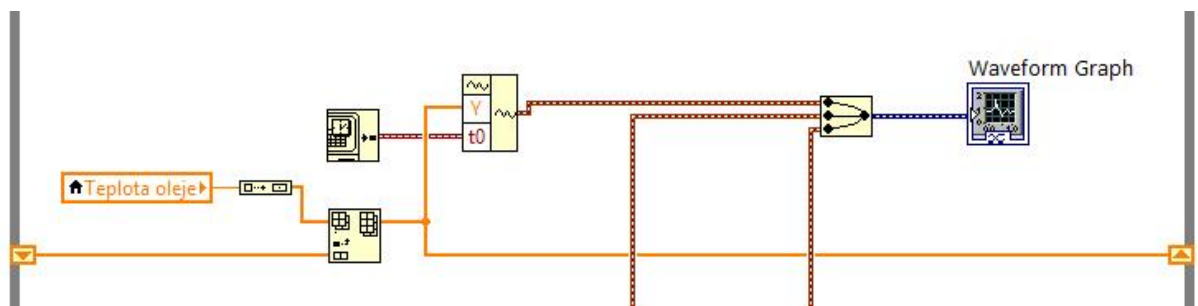


Obrázek 4.13 Ovládací panel se zapnutými možnostmi nastavení, vlastní zpracování, 2019.



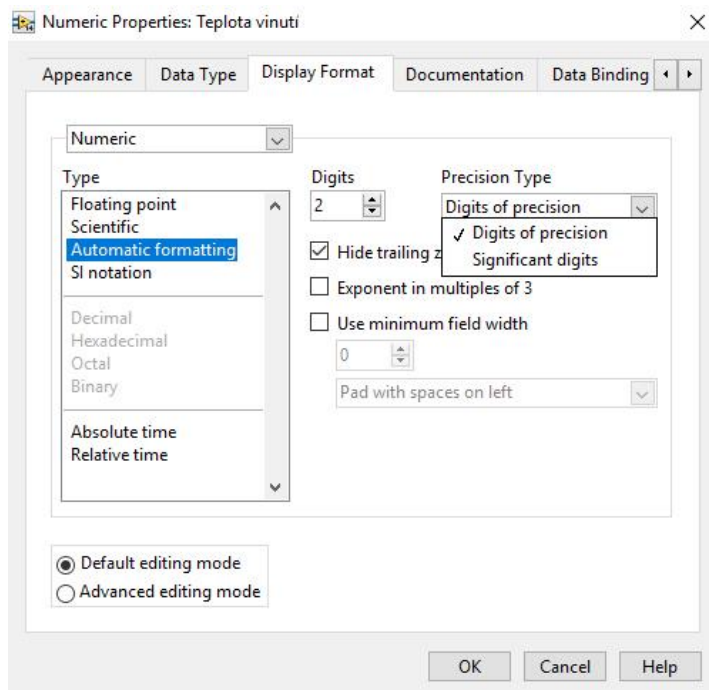
Obrázek 4.14 Zobrazování nastavitelných údajů pomocí Property Nodes, vlastní zpracování, 2019.

Teploty jsou dále zaznamenávány a ukládány do grafu. Na ovládacím panelu je z menu *Express/Graph Indicators* vybrána možnost *Waveform Graph*, zároveň je přidána ikona grafu do blokového diagramu. Protože jsou hodnoty teplot měřeny, zobrazovány a zpracovávány jako čísla typu double, graf není schopen je přímo zobrazit a interpretovat. Hodnoty teplot je proto nutné nejdříve převést na pole funkcí *Build Array*. Aby se ukládal a zobrazoval celý průběh grafu, je opět využito posuvných registrů, kam se ukládá pole hodnot a v další iteraci se funkcí *Insert Into Array* sloučí stávající pole s novými hodnotami teplot. Výstup této funkce vede do posuvného registru a dále do vstupu Y (osa Y) funkce *Build Waveform*, která z pole vytvoří časový průběh. Druhým vstupem funkce je časová osa  $t_0$ . Časová osa je tvořena funkcí *Get Date/Time*. V grafu se tedy zobrazuje teplota v konkrétním datu a čase. Popsaná funkce (obr. 4.15) je vytvořena třikrát, pro teplotu oleje, teplotu vinutí a hot-spot teplotu. Výstupní signály se spojují funkcí *Merge Signals* v jeden, vedoucí do grafu. Tím je zajištěno zobrazení všech průběhů v jednom grafu.



Obrázek 4.15 Blok zobrazování teploty oleje v grafu, vlastní zpracování, 2019.

Pod grafem jsou zobrazeny palety pro pohyb v grafu a pro nastavení os. Nad grafem je umístěna vysvětlivka. Vizuální stránka ovládacího panelu byla dále upravena pomocí štítků a boxů z palety *Decorations*. Ukazatele teplot jsou nastaveny tak, aby zobrazovaly dvě desetinná místa (nastavení *Digits of Precision* v *Properties*, viz obrázek 4.16). Relativní spotřeba teploty je nastavena na zobrazení 3 číslic následujících po nulách (nastavení *Significant Digits*).



Obrázek 4.16 Nastavení počtu desetinných míst v indikátorech, vlastní zpracování, 2019.

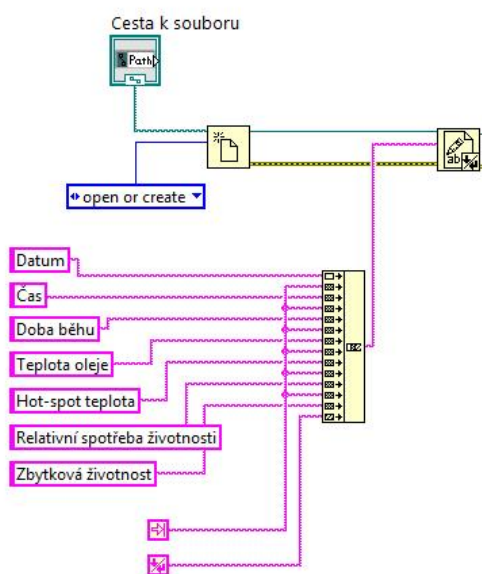
#### 4.2.8 Ukládání naměřených hodnot do souboru

Naměřené veličiny se pro další zpracování nebo kontrolu ukládají do souboru. Pro zápis jsou potřebné tři hlavní kroky.

- Vytvoření nebo načtení souboru
- Zapsání do souboru
- Ukončení souboru

Aby vytvoření a ukončení souboru neprobíhalo znovu v každé iteraci, jsou tyto části umístěny mimo *While* smyčku, kde se také nachází zápis hlavičky souboru, která představuje pouze první řádek souboru. Samotný zápis naměřených je potom realizován ve vlastní *While* struktuře, odděleně od zbytku programu. Toto řešení je využito proto, aby bylo možné nastavit odlišný interval zápisu. V případě umístění zapisovacího bloku do hlavní smyčky by zápis probíhal každou sekundu a nebylo by možné hodnotu upravovat. Ve struktuře *While* se nachází funkce *Wait Until Next ms Multiple*, jejím vstupem je číselná hodnota v sekundách zadávaná z uživatelského panelu, která je pomocí operace násobení převáděna na hodnotu v milisekundách.

V první fázi je potřeba vytvořit/načíst soubor pro zápis. To má na starosti funkce *Open/Create/Replace File* z palety *File I/O*. Tato funkce má standardně nastaven přístup pro čtení a zápis a otevření již existujícího souboru. Kliknutím pravým tlačítkem na vstup *Operation* a následnou volbou *Create/Constant* se vytvoří konstanta, kterou je možné určit, jaká operace bude se souborem provedena. Zde je zvolena možnost *Open or Create*, je tedy buďto vytvořen nový soubor, nebo se pokračuje v zápisu již existujícího souboru. Podobným způsobem je vytvořeno i nastavení cesty k souboru. Z rozbalovací nabídky je vybráno *Create/Control*, aby bylo možné cestu k souboru uživatelsky vybrat. Cestu k souboru je potřeba dále nastavit volbou *Properties*, v okně *Browse Options* a podokně *Selection Mode* mít vybrány možnosti *Folders* a *New or Existing*. To zajistí, že pokud soubor neexistuje, bude vytvořen ve zvolené složce a není potřeba mít ho předem vytvořen. Na uživatelském panelu vzniklo okno pro výběr cesty, kliknutím na ikonu složky je možné zvolit umístění souboru. Pokud má být vytvořen nový soubor je potřeba zadat jeho jméno a příponu *.txt*.



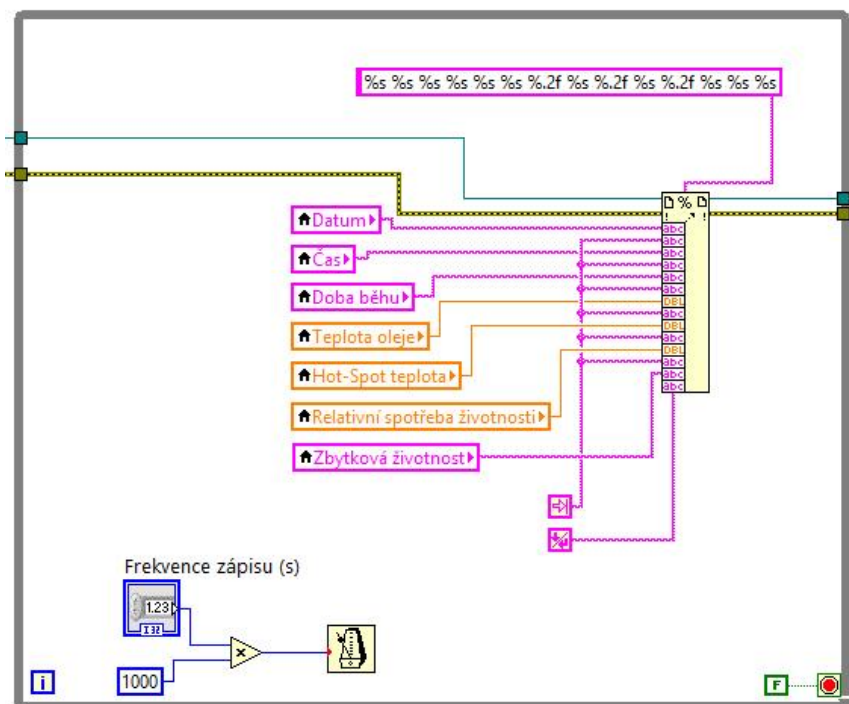
Obrázek 4.17 Blok vytvoření souboru a zápisu hlavičky souboru, vlastní zpracování, 2019.

Ve druhé fázi jsou hodnoty zapisovány do souboru pomocí funkce *Write to Text File* z palety *File I/O*. V tomto kroku je zapisována pouze hlavička souboru (obr. 4.17), funkce se proto nachází mimo strukturu *While*. Na vstup *File* je přiveden výstup *refnum out* z načtení souboru, na vstup *Text* je přivedena funkce *Concatenate Strings*, která nastavuje zápis v hlavičce. Tato funkce je použita z důvodu lepší přehlednosti a snazšího formátování, údaje by však bylo možné zapsat jen do jedné *String* konstanty. Na jednotlivé vstupy funkce *Concatenate Strings* jsou přivedeny konstanty *String* s názvy jednotlivých zapisovaných

údajů (datum, čas, doba běhu, teplota oleje, hot-spot teplota, relativní spotřeba životnosti, zbytková životnost), přičemž mezi každým řádkem s názvem je vložen obsahující konstantu *Tab* (tabulátor). Ta se stará o vložení mezery. Posledním vstupem je konec řádky (*End of Line*). Výstup *refnum out* je dále propojen s funkcí *Format Into File*, která se již nachází uvnitř struktury *While* (obr. 4.18). Funkce se stará o zápis hodnot v každé iteraci *While* cyklu. Struktura vstupů je stejná jako v případě tvorby hlavičky, místo konstant *String* jsou však formou lokálních proměnných přivedeny hodnoty z indikátorů. Lokální proměnné se získají pravým kliknutím na požadovaný indikátor a volbou *Create/Local Variable*, případně v paletě *Programming/Structures* výběrem možnosti *Local Variable* a její následnou definicí ze seznamu proměnných. Lokální proměnné je potřeba volbou *Change to Read* změnit na výstupní. Mezi jednotlivými proměnnými jsou opět vloženy tabulátory a ukončení řádky. Vstupy je následně potřeba naformátovat, aby se korektně zobrazovaly ve výstupním souboru. Klepnutím pravým tlačítkem myši na funkci a výběrem *Edit Format String* se otevře okno s výchozím formátováním dle přivedených datových typů. Přivedené *stringy* (datum, čas, doba běhu, zbytková životnost) již naformátovány jsou a ve formátování je ponecháno %s. Stejně platí pro tabulátor a konec řádky (také typu *String*). U ostatních proměnných (desetinná čísla, označeno jako %f) je vhodné určit počet čísel za desetinou čárkou. To lze provést buď zaškrtnutím možnosti *use specified precision* a zvolením počtu zobrazovaných desetinných míst, nebo přímo úpravou formátu *stringu* na % - tečka – počet požadovaných desetinných míst – f (označení pro *fractional number* – desetinné číslo). Pokud mají být například zaznamenávány teploty s přesností na dvě desetinná místa, *string* bude formátován příkazem %.2f.

Třetí fází je ukončení souboru funkcí *Close File*. Tato funkce je opět vyvedena mimo strukturu *While*, aby se soubor nezavíral při každém cyklu. Dále jsou propojeny vstupy a výstupy *Error in/out* a za funkcí zavření souboru je umístěno subVI *Simple Error Handler*, které zobrazuje případné chybové hlášení při problémech se zápisem.



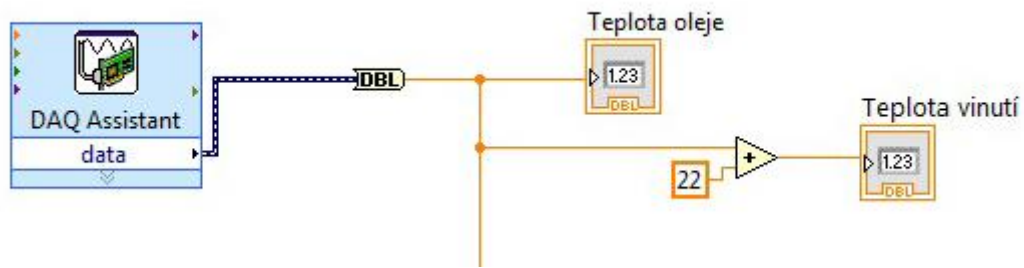


Obrázek 4.18 Struktura While zápisu hodnoty do souboru, vlastní zpracování, 2019.

## 4.3 Zprovoznění měřicího řetězce

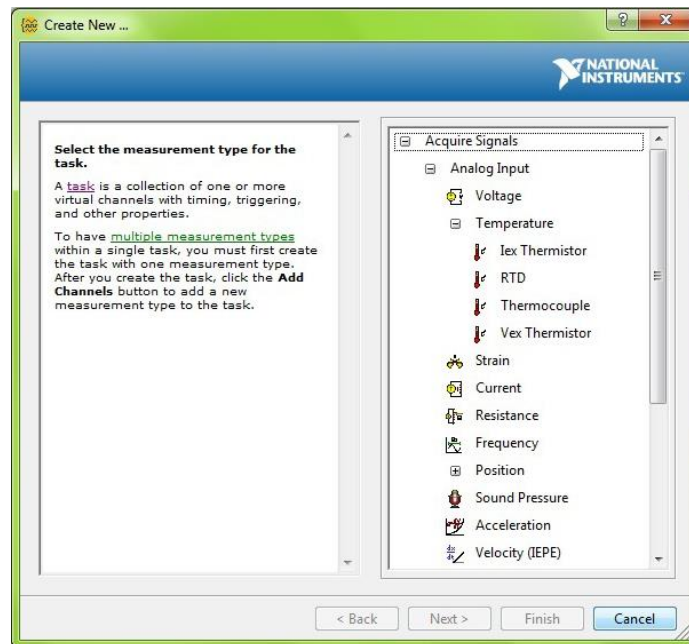
### 4.3.1 Nastavení programu a implementace měření teploty

Jak již bylo zmíněno, program byl pro reálné měření mírně upraven, tak aby byla teplota snímána přímo. V první řadě bylo zapotřebí připojit měřicí kartu s kontrolérem k PC a v programu NI MAX se ke kartě připojit. NI MAX (Measurement & Automation Explorer) je samostatný program od společnosti National Instruments, který v sobě obsahuje ovladače pro veškerý hardware NI. Po otevření NI MAX byla z rozbalovací nabídky v levém okně rozbalena nabídka *Devices and Interfaces*. Po kliknutí pravým tlačítkem myši na *Network Devices* a výběru možnosti *refresh* se otevře okno vyhledávání připojeného hardwaru. Po potvrzení nalezených voleb se v rozbalovací nabídce objeví připojený kontrolér a do něj připojená měřicí karta (*příloha B*). S připojeným hardwarem je možné nastavit měření v LabVIEW, blok je zobrazen na *obrázku 4.19*. Volič odporu a funkce *Convert RTD Reading*, je zde nahrazena funkcí *DAQ Assistant* z palety *Express*.



Obrázek 4.19 Blok měření teploty pomocí funkce DAQ Assistant, vlastní zpracování, 2019.

Po umístění funkce se zobrazí nabídka, ve které lze přehledně nastavit snímání signál. V rozbalovací nabídce *Acquire Signals/Analog Input/Temperature* byla vybrána možnost *Thermocouple* (obrázek 4.20). Pokud je měřicí karta správně připojena, objeví se v další nabídce, s možností volby počtu kanálů využitelných k měření. Zde byla vybrána možnost *a0* – jeden kanál (příloha C). Další nabídka (příloha D) umožňuje nastavit měřené parametry, určit rozsah měření, jednotky, typ termočláčku a také určit, jak často má být teplota snímána. Je také možné měřicí zařízení kalibrovat a využít vlastní korekční data. Snímání je nastaveno na sběr jednoho vzorku, jelikož se však funkce nachází ve *While* struktuře, vzorek se odečte při každé iteraci. Výstupní data jsou dále převedena na číslo typu *Double*, aby byla použitelná ve zbytku programu. Dále se již program chová standardně, jak bylo popsáno v předešlých kapitolách.



Obrázek 4.20 Nastavení funkce DAQ Assistant pro měření teploty, vlastní zpracování, 2019.

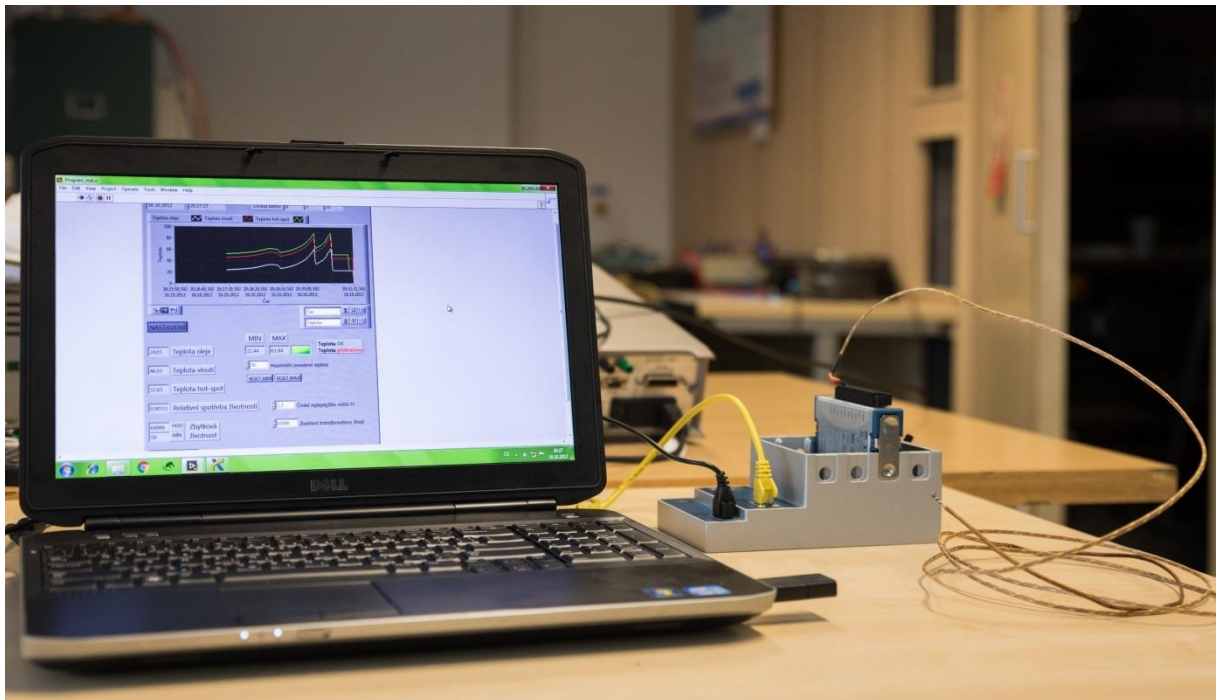
### 4.3.2 Zapojení řetězce, ukázka funkce

Základem měřicího řetězce jsou již zmíněné komponenty: šasi NI cDAQ-9184 a měřicí karta pro teplotní vstup NI 9211 (přílohy E až H). Šasi je připojeno k síťové kartě PC pomocí rozhraní Ethernet, hardware je pak nakonfigurován pomocí programu NI MAX. K teplotnímu vstupu je připojen termočlánek typu K s propojovacím kabelem ze skelného vlákna (obr 4.21) s teplotní odolností do 900° F (zhruba 482 °C).



Obrázek 4.21 Termočlánek typ K, vlastní zpracování, 2019.

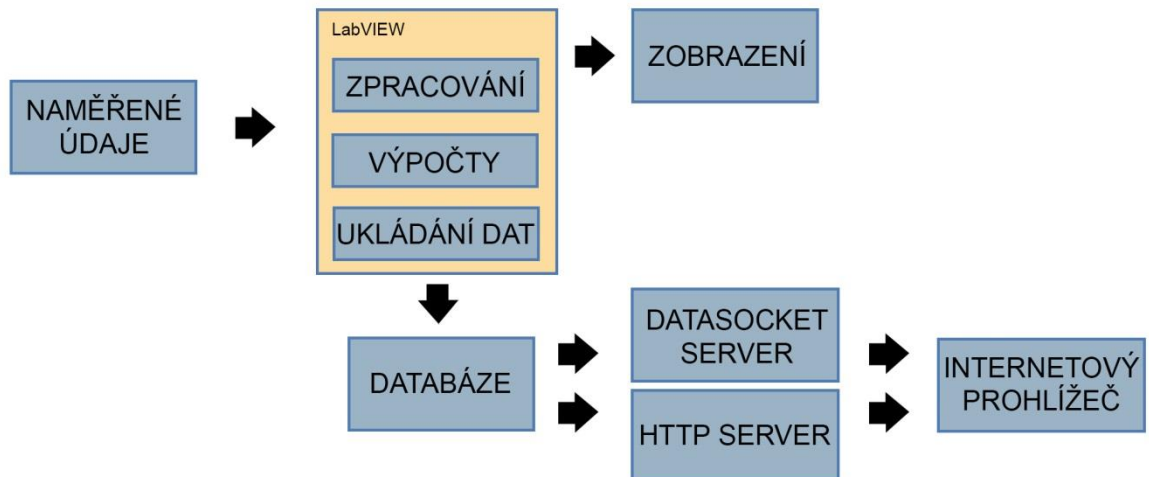
Zapojený a spuštěný měřicí řetězec je zobrazen na *obrázku 4.22*, dále potom v *příloze I*. Během měření byl spuštěn také záznam do souboru .txt, ukázka viz *příloha J*. Ambientní teplota při měření byla 22,3 °C, čemuž odpovídá i minimální zaznamenaná teplota. Termočlánek byl dále zahříván, aby bylo možné ověřit všechny funkce programu: alarm překročení teploty, zápis do grafu a výpočet životnosti. Na měřicím PC bylo v průběhu měření nastaveno nesprávné datum 16.10.2012, toto datum je tedy dále využíváno programem, jak bylo popsáno v kapitole 3.2. Při spuštění programu byl nastaven zápis do souboru s intervalem 3 s, maximální povolená teplota 50° C (z důvodu snadnějšího překročení a zkoušky indikace), životnost 65 000 hodin, činitel nejteplejšího místa H 1,3 (velké transformátory). Celý program je zobrazen v *příloze K*.



Obrázek 4.22 Zapojení měřicího řetězce, vlastní zpracování, 2019.

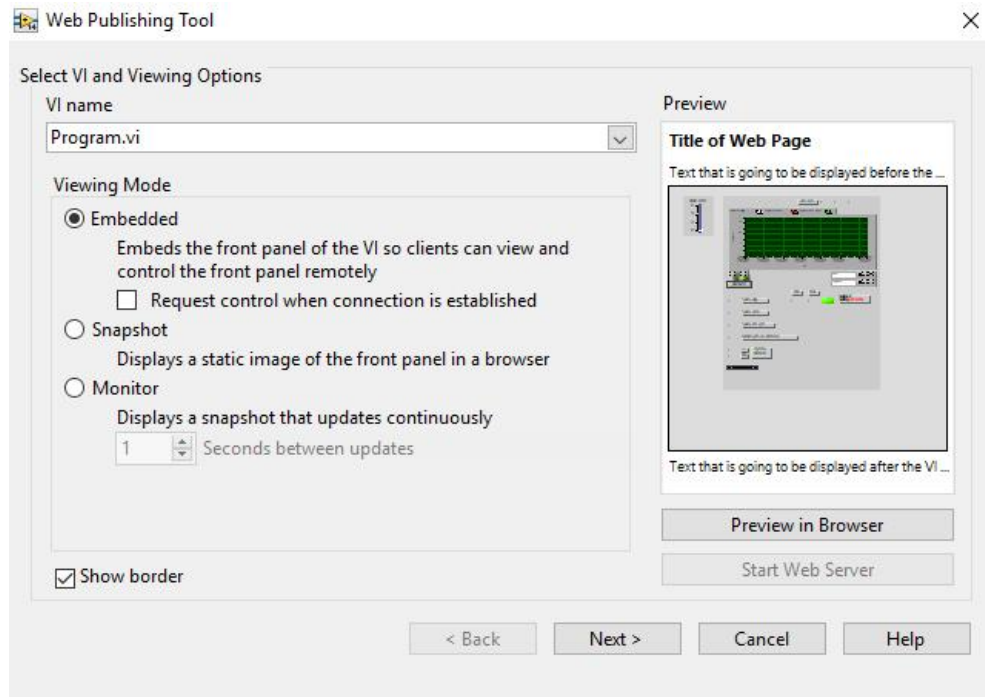
#### 4.4 Možnosti on-line zpracování naměřených údajů

Možností, jak nakládat s naměřenými údaji a jak je dále zpracovávat je velké množství. Obecně, lze využít například model ilustrovaný na *obrázku 4.23*, kdy jsou data naměřena a zpracována, následně pomocí Datasocket serveru distribuována na internet pomocí IP protokolu. HTTP server zprostředkovává zobrazení obsahu pomocí webového rozhraní.



Obrázek 4.23 Model zobrazení měření online, vlastní zpracování, 2019.

V závislosti na požadavcích je možné vytvořit online monitorovací systém pomocí funkcí, které v sobě obsahuje LabVIEW, případně jiný software, který ulehčí a uživatelsky příjemný proces nastavení. Pomocí funkce Web Publishing Tool (obrázek 4.24) je možné ovládací panel převést na server přístupný pomocí internetového prohlížeče (obrázek). Nejprve je zapotřebí nakonfigurovat připojení. To lze provést výběrem možnosti Tools/Options na hlavním panelu, následně je možné v kategorii Web Server nastavit HTTP port, vybrat VI která se budou zobrazovat a jaké přístupové právo bude webový prohlížeč mít (zobrazení/zápis). Následně je již možné zvolit Tools/Web Publishing Tool a po nastavení popisků, cesty pro uložení a internetové adresy lze program spustit online.



Obrázek 4.24 Okno nastavení funkce Web Publishing Tool, vlastní zpracování, 2019.

Další možností je využití navrženého měřicího řetězce, místo přímého připojení šasi k PC prostřednictvím rozhraní Ethernet nakonfigurovat šasi pro komunikaci v místní síti. Rozdíl mezi tímto řešením a výše zmiňovaným je následující: v případě použití funkce Web Publishing Tool je zapotřebí připojit měřicí soustavu do PC na kterém je spuštěno VI, které je následně převáděno na server a zobrazováno online. V případě použití místní sítě je potom šasi připojeno přímo do Ethernetové zdířky sítě, do které je připojeno také vzdálené PC. Na tomto PC je potom spuštěno VI, ovládání však probíhá prostřednictvím VI, nikoliv online rozhraní. Podobnou funkci jako pomocí Web Publishing Tool v LabVIEW, tedy vzdálené spuštění VI, lze docílit také softwarem třetích stran, například WebPager. Ten se vyznačuje jednodušším nastavením, kdy není potřeba instalovat servery, ovladače, porty a zároveň vyžaduje jen malé úpravy blokového schématu.

## Závěr

Cílem práce bylo popsat metody pro měření teploty elektrických zařízení a možnosti jejich online zpracování a následně realizovat měřicí řetězec pro zjišťování teploty. Jako vhodné elektrické zařízení byly vybrány transformátory. Diagnostika je jejich důležitou součástí, protože odstávky a opravy těchto často obřích strojů jsou problematické, jak z hlediska provedení oprav, tak z hlediska ekonomického, kdy na funkci transformátoru závisí provoz firem i domácností.

V teoretické části je nejprve charakterizována diagnostika transformátoru a rozdělení na testovací a funkční diagnostiku. Následně jsou popsány systémy funkční diagnostiky, z hlediska rozsahu a komplexnosti sledovaných veličin. Tato část se zaměřuje na diagnostiku transformátorů obecně a uvádí souvislosti stárnutí s ostatními veličinami, které lze diagnostikovat. Těmi jsou například vlhkost v oleji, rozpuštěné plyny a obsah kyslíku, výbojová činnost.

V další části teoretické rešerše je věnován důraz na měření teploty a na parametry, které souvisí přímo či nepřímo s teplotním stárnutím. Těmito veličinami se myslí spotřeba životnosti, která je přímo závislá na teplotě transformátorového oleje a stupeň polymerizace, kde se teplota podílí jakožto hlavní činitel stárnutí papírové izolace. Zde jsou také uvedeny konkrétní možnosti senzorů pro měření teploty a posouzena jejich možnost a vhodnost pro použití v transformátoru.

Začátek praktické části seznamuje s měřicím zařízením National Instruments řady CompactDAQ. Hardware a software firmy National Instruments byl využit při tvorbě měřicího řetězce, konkrétně za použití vývojového prostředí LabVIEW, šasi NI cDAQ-9184 a karty pro měření teploty NI 9211. Následuje popis postupu tvorby programu, kde jsou uvedeny jednotlivé funkční bloky v jejich logické posloupnosti a návaznosti jejich funkce. Do vytvořeného programu jsou mimo měření teploty oleje zahrnuty také: výpočet teploty nejteplejšího místa hot-spot, výpočet relativní spotřeby životnosti, určení zbytkové životnosti transformátoru, měření minimální a maximální teploty s indikací překročení nastavené teploty, měření doby běhu transformátoru. Údaje jsou v průběhu měření programově zapisovány do textového souboru a zobrazovány na ovládacím panelu.

Účelem vytvořeného ovládacího panelu je přehledná kontrola naměřených hodnot pomocí indikátorů a grafu teplot. Zároveň je možné uživatelsky nastavit některé vstupní parametry, např. maximální povolenou teplotu, nastavení cesty a četnosti zápisu.

Funkčnost vytvořeného programu byla následně laboratorně otestována s využitím systému CompactDAQ. Měřením bylo potvrzeno, že programově nastavené funkční požadavky, zjišťování teplot, výpočty životnosti a souborový zápis hodnot, pracují korektně a jsou schopny pracovat se skutečnými hodnotami. Poslední část práce je zaměřena na vzdálené připojení, ovládání programu a možnosti nakládání se zaznamenanými daty.

Vzhledem k rychlému vývoji výpočetní techniky je v dnešní době možné sledovat více parametrů, sledovací zařízení jsou zároveň levnější, celkově dostupnější a poskytují okamžité odezvy na stav zařízení. Nepodceněním důležitosti diagnostiky je možné prodloužit životnost a dobu bezporuchového stavu zařízení. Zároveň je diagnostika nutností k eliminaci ekonomických ztrát a provozních problémů spojených se skrytým opotřebením.



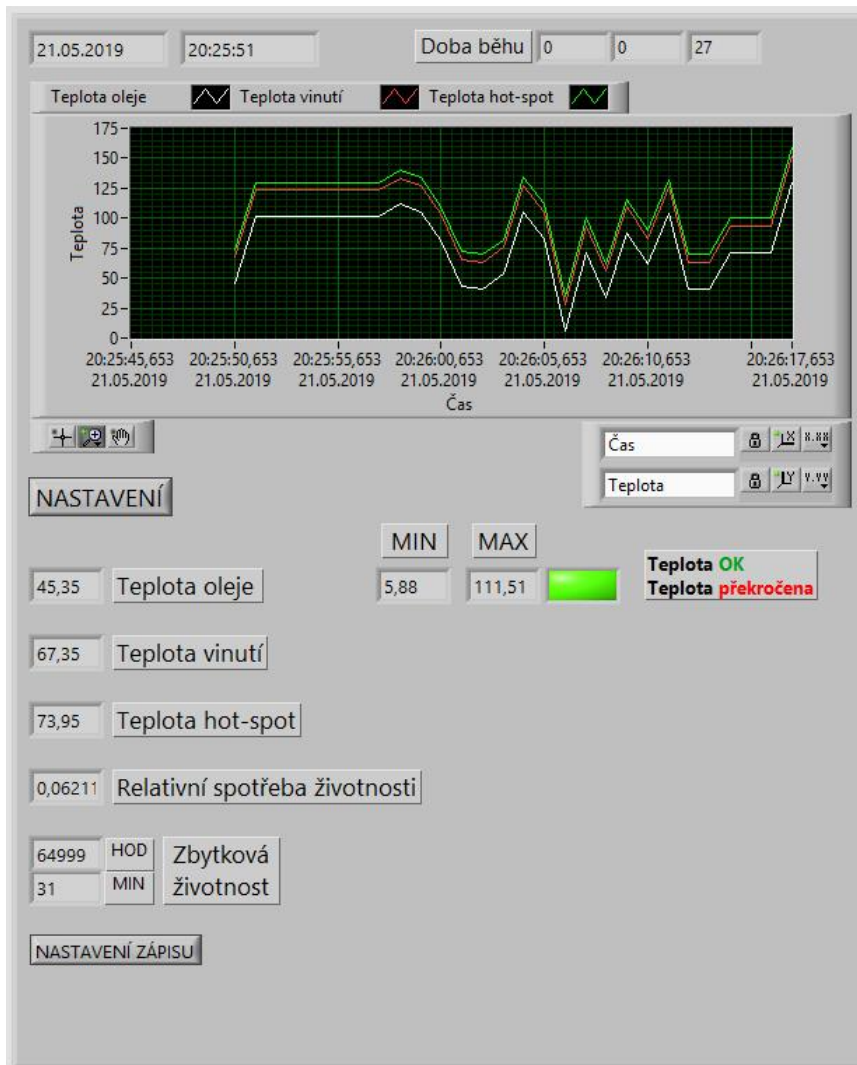
## Seznam literatury a dalších informačních zdrojů

- [1] PROSR, P. *On-line diagnostický systém výkonových transformátorů*. Disertační práce. Plzeň, 2005.
- [2] MENTLÍK, V. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vydání. Praha, 2008. 440s. ISBN: 978-80-7300-232-9
- [3] MENTLÍK, V. *Diagnostika transformátorů*. 1. vydání. Plzeň, 2006. 87s.
- [4] PROSR, P. *Monitorovací systém pro diagnostiku výkonových transformátorů*. In DISEE 2004. Bratislava: Slovak University of Technology, 2004, s. 36-39. ISBN: 80-227-2110-7
- [5] PROSR, P. *Monitorování stavu výkonových transformátorů*. In Elektrotechnika a informatika 2003. Plzeň, Západočeská univerzita, 2003, s. 118-120. ISBN: 80-70-82-993-1
- [6] Expertní systémy, [online], Mendelova univerzita v Brně [citace 28.3.2019]. Dostupný z WWW: <[https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=21856](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=21856)>
- [7] Úvod do problematiky expertních systémů, [online], Ikaros [citace 28.3.2019]. Dostupný z WWW: <<https://ikaros.cz/uvod-do-problematiky-expertnich-systemu>>
- [8] PROSR, P.; PIHERA, J.; POLANSKÝ, R.; TRNKA, P. *Využití programových prostředků pro provozní diagnostiku elektrických strojů*. In Diagnostika '05. Plzeň, Západočeská univerzita, 2005, s 185-188. ISBN: 80-7043-368-X
- [9] GHOSH, S. *Calculation of hot spot temperature and aging of a transformer*. International Journal of Technical Research and Applications, [online], [citace 9.5.2018]. Dostupný z WWW: <<http://www.ijtra.com/view/calculation-of-hot-spot-temperature-and-aging-of-a-transformer-.pdf>>
- [10] BÉRUBÉ, J.; AUBIN, J.; *Transformer winding hot spot temperature determination*. Neoptix Inc. & W. McDermid, [online], [citace 9.5.2018]. Dostupný z WWW: <[http://www.electricenergyonline.com/show\\_article.php?article=311](http://www.electricenergyonline.com/show_article.php?article=311)>
- [11] CHINCHILLA, M. U. *Diagnostika transformátorů v Kostarice*. In Diagnostika '05. Plzeň, Západočeská univerzita, 2005, s 122-124. ISBN: 80-7043-368-X
- [12] RŮŽIČKOVÁ, V. *Aspekty on-line diagnostiky transformátorů*. In Diagnostika '07. Plzeň, Západočeská univerzita, 2007, s 167-170. ISBN: 978-80-7043-557-1
- [13] Odporový teploměr Pt100 [foto], [online], Omega Engineering inc. [citace 23.5.2019]. Dostupné z WWW: <<https://www.omegaeng.cz/pptst/PR-21.html>>
- [14] STROUSE, G. F. *Standard Platinum Resistance Thermometer Calibrations from the Ar TP to the Ag FP*, National Institute of Standards and Technology, [online], [citace 11.5.2019]. Dostupný z WWW: <<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.250-81.pdf>>

- [15] Optovláknové snímače teploty pro náročná měření, [online], [citace 19.5.2018]. Dostupný z WWW: <<https://automatizace.hw.cz/clanek/2006032701>>
- [16] FISO TPT-32, [online], FISO [citace 19.5.2018]. Dostupný z WWW: <<http://www.sequoia.co.uk/product.php?id=126>>
- [17] FISO Nortech Sentinel, [online], FISO [citace 22.5.2018]. Dostupný z WWW: <<http://www.sequoia.co.uk/product.php?id=148>>
- [18] FISO Nortech TT, [online], FISO [citace 22.5.2018]. Dostupný z WWW: <<http://www.sequoia.co.uk/product.php?id=1001>>
- [19] ELMOUDI, A.; PALOLA, J.; LEHTONEN, M.; *A Transformer Thermal Model for use in an on-line Monitoring and Diagnostic System*. IEEE, 2006. ISBN: 1-4244-0178-X/06
- [20] ČSN IEC 60076-7 (351001). *Výkonové transformátory: Směrnice pro zatěžování olejových výkonových transformátorů*. Český normalizační institut: Praha, 2007. 52 s.
- [21] MENTLÍK, V. *Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie*. 1. vydání. Praha, 2011. 120s. ISBN: 978-80-7300-412-5
- [22] VALENTA, L. *Diagnostika a prodlužování životnosti výkonových transformátorů*. In Diagnostika '05. Plzeň, Západočeská univerzita, 2005, s 215-219. ISBN: 80-7043-368-X
- [23] AZIZI, D.; GHOLAMI, A.; AZIZI, D. *Hot Spot Temperature Analysis in 3 Phase Transformers Using FEM Method*. International Journal of Modern Engeneering Research, [online], [citace 9.5.2018]. Dostupný z WWW: <<http://www.ijmer.com/papers/vol%201%20issue%202/AA012425429.pdf>>
- [24] CompactDAQ Systems, [online], National Instruments [citace 8.4.2019]. Dostupný z WWW: <<http://www.ni.com/cs-cz/shop/compactdaq.html>>
- [25] CompactDAQ Modules, [online], National Instruments [citace 8.4.2019]. Dostupný z WWW: <<http://www.ni.com/cs-cz/shop/select/compactdaq-modules-category#facet:&productBeginIndex:0&orderBy:&pageView:grid&pageSize:&>>

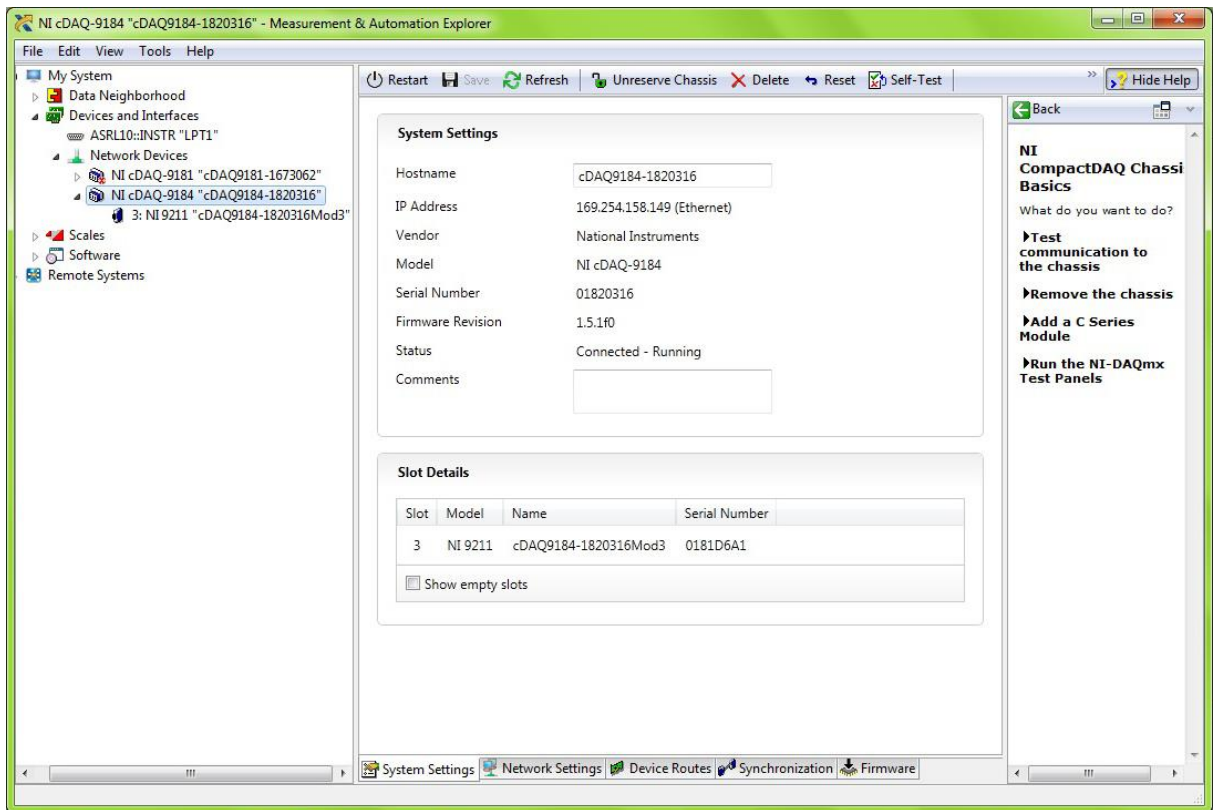
## Přílohy

### Příloha A – Ovládací panel s vypnutými možnostmi nastavení



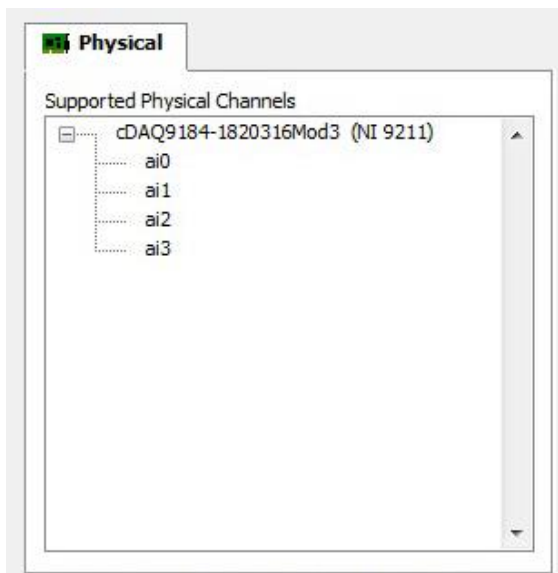
Zdroj: vlastní zpracování, 2019

## Příloha B – Připojení k hardware v programu NI MAX



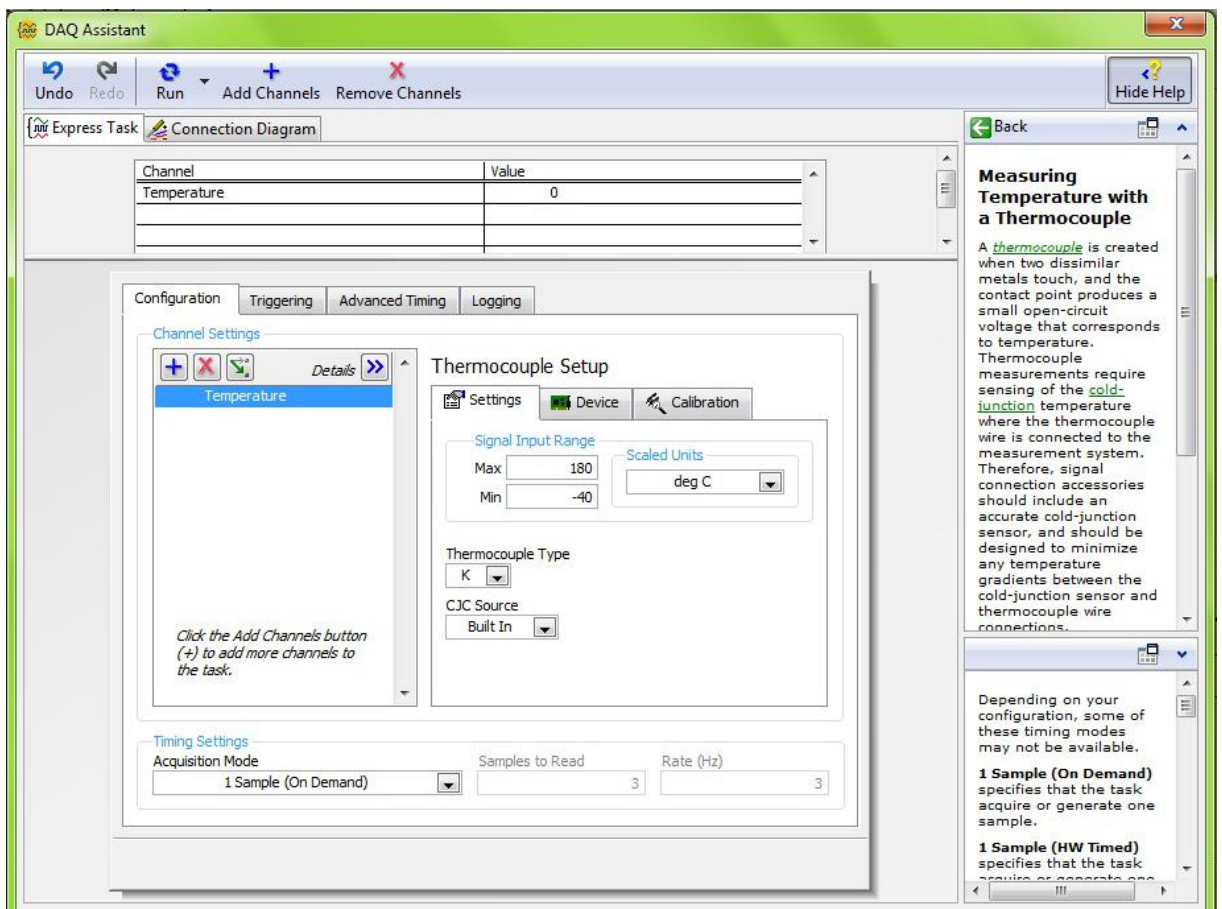
Zdroj: vlastní zpracování, 2019

## Příloha C – Výběr kanálů při konfiguraci DAQ Assistant

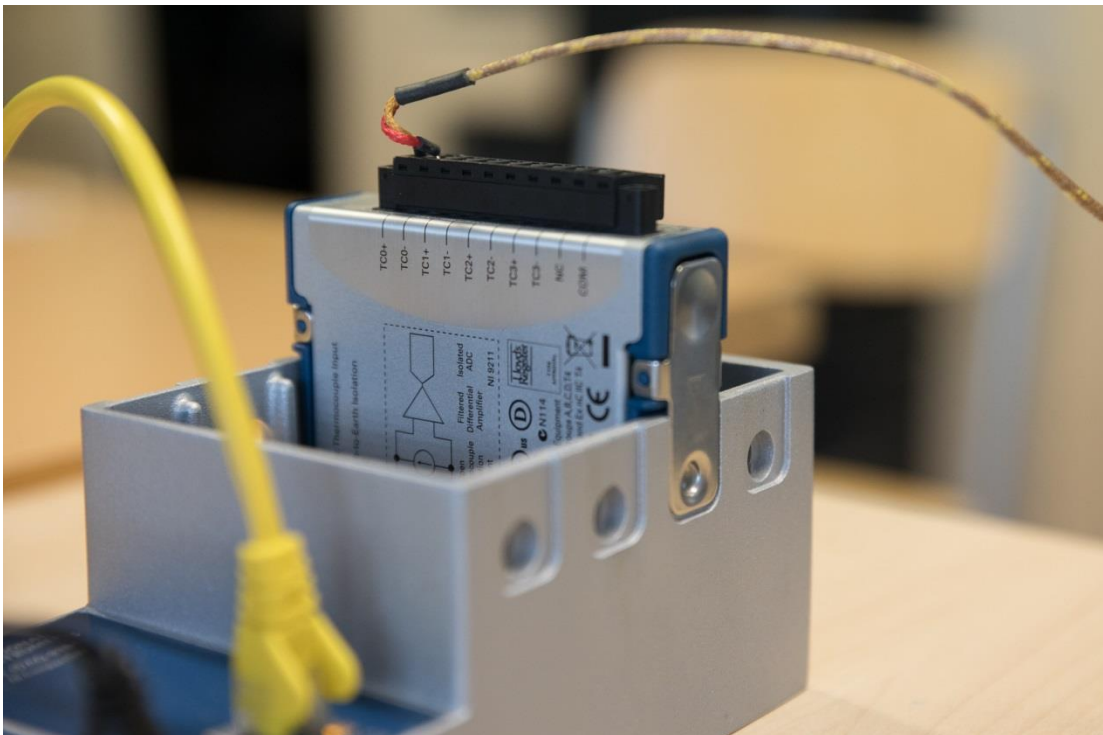


Zdroj: vlastní zpracování, 2019

## Příloha D – Nastavení měření v DAQ Assistant



Zdroj: vlastní zpracování, 2019

**Příloha E** – Detail zapojení měřicí karty NI 9211 do šasi

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

**Příloha F** – Detail šasi NI cDAQ-9184

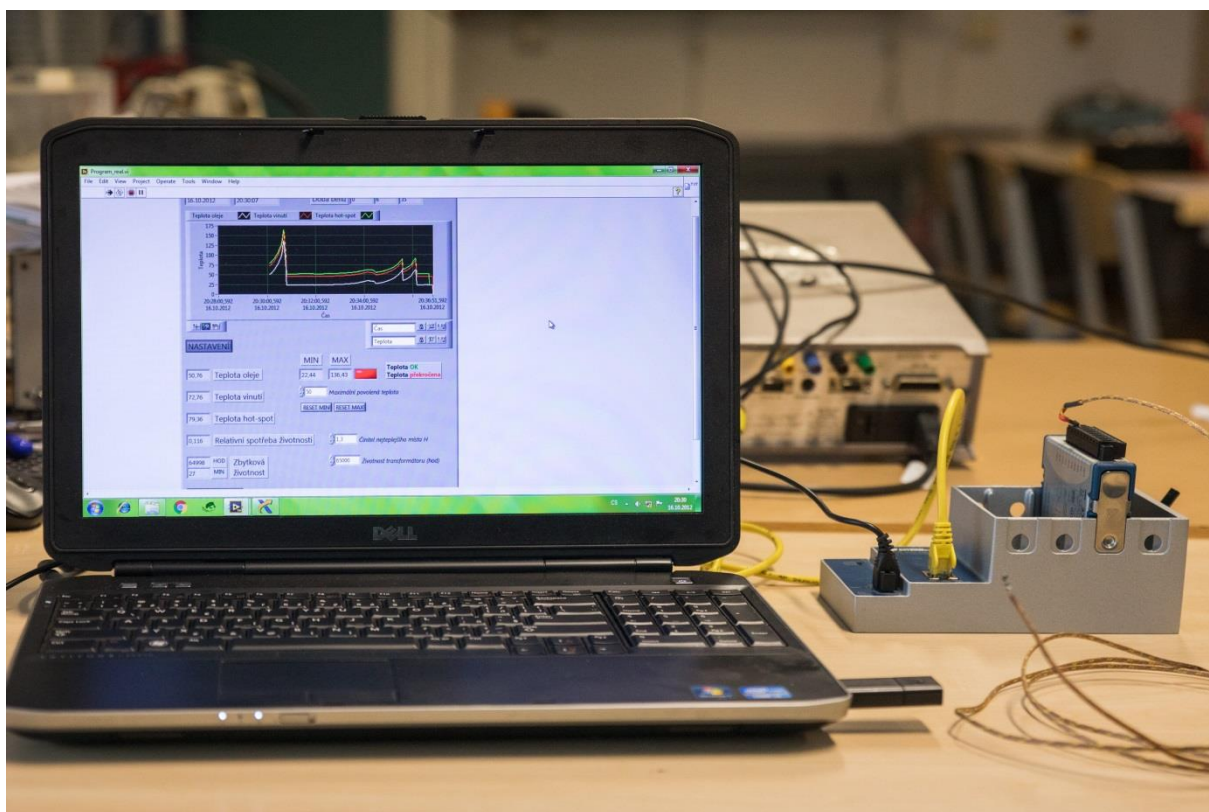
Zdroj: vlastní zpracování, 2019

**Příloha G** – Měřicí karta NI 9211

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

**Příloha H** – Měřicí karta NI 9211

Zdroj: vlastní zpracování, 2019

**Příloha I – Měřicí řetězec se spuštěným programem**

Zdroj: vlastní zpracování, 2019



## Příloha J – Ukázka zápisu

Datum	Čas	Doba běhu	Teplota oleje	Hot-spot teplota	Relativní spotřeba životnosti	Zbytková životnost
16.10.2012	20:24:03	00:00:31	39,29	53,09	0,01	64999:59
16.10.2012	20:24:06	00:00:34	60,23	90,44	0,42	64999:59
16.10.2012	20:24:09	00:00:37	56,04	85,99	0,25	64999:59
16.10.2012	20:24:12	00:00:40	52,38	82,14	0,16	64999:59
16.10.2012	20:24:15	00:00:43	46,44	76,40	0,08	64999:59
16.10.2012	20:24:18	00:00:46	43,85	73,23	0,06	64999:59
16.10.2012	20:24:21	00:00:49	41,60	70,90	0,04	64999:59
16.10.2012	20:24:24	00:00:52	39,67	68,91	0,03	64999:59
16.10.2012	20:24:27	00:00:55	37,89	67,08	0,03	64999:59
16.10.2012	20:24:30	00:00:58	36,45	65,48	0,02	64999:59
16.10.2012	20:24:33	00:01:01	34,91	64,16	0,02	64999:59
16.10.2012	20:24:36	00:01:04	41,20	62,97	0,02	64999:59
16.10.2012	20:24:39	00:01:07	58,95	88,75	0,34	64999:59
16.10.2012	20:24:42	00:01:10	54,90	84,81	0,22	64999:59
16.10.2012	20:24:45	00:01:13	51,59	81,22	0,14	64999:59
16.10.2012	20:24:48	00:01:16	48,57	78,14	0,10	64999:59
16.10.2012	20:24:51	00:01:19	45,85	75,32	0,07	64999:59
16.10.2012	20:24:54	00:01:22	43,47	72,82	0,05	64999:59
16.10.2012	20:24:57	00:01:25	41,39	70,69	0,04	64999:59
16.10.2012	20:25:00	00:01:28	39,39	68,63	0,03	64999:59
16.10.2012	20:25:03	00:01:31	37,85	66,94	0,03	64999:59
16.10.2012	20:25:06	00:01:34	36,40	65,45	0,02	64999:59
16.10.2012	20:25:09	00:01:37	35,08	64,11	0,02	64999:59
16.10.2012	20:25:12	00:01:40	33,83	62,79	0,02	64999:59
16.10.2012	20:25:15	00:01:43	32,85	61,75	0,02	64999:59
16.10.2012	20:25:18	00:01:46	31,90	60,81	0,01	64999:59
16.10.2012	20:25:21	00:01:49	30,81	59,73	0,01	64999:59
16.10.2012	20:25:24	00:01:52	29,98	58,90	0,01	64999:59
16.10.2012	20:25:27	00:01:55	29,24	58,06	0,01	64999:59
16.10.2012	20:25:30	00:01:58	28,53	57,37	0,01	64999:59
16.10.2012	20:25:33	00:02:01	27,99	56,75	0,01	64999:59
16.10.2012	20:25:36	00:02:04	27,43	56,24	0,01	64999:59
16.10.2012	20:25:39	00:02:07	27,04	55,76	0,01	64999:59
16.10.2012	20:25:42	00:02:10	26,61	55,36	0,01	64999:59
16.10.2012	20:25:45	00:02:13	28,95	55,45	0,01	64999:59
16.10.2012	20:25:48	00:02:16	31,42	59,53	0,01	64999:59
16.10.2012	20:25:51	00:02:19	32,38	60,74	0,01	64999:59
16.10.2012	20:25:54	00:02:22	32,88	61,33	0,01	64999:59
16.10.2012	20:25:57	00:02:25	33,18	61,68	0,02	64999:59
16.10.2012	20:26:00	00:02:28	33,40	61,94	0,02	64999:59
16.10.2012	20:26:03	00:02:31	33,49	62,08	0,02	64999:59
16.10.2012	20:26:06	00:02:34	33,42	62,13	0,02	64999:59

