

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ**  
**ELEKTRONIKY**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Condition based management elektrických zařízení**

**vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Trnka Ph.D.**

**2012**

**autor: Bc. Michal Svoboda**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal SVOBODA**  
Osobní číslo: **E10N0078P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**  
Název tématu: **Condition based management elektrických zařízení**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište současný stav managementu stavu elektrických zařízení během jejich provozu.
2. Stanovte zásady pro on-line diagnostiku stavu elektrických zařízení.
3. Navrhněte systém pro monitoring stavu elektrického zařízení a určení jeho zbytkové životnosti.
4. Sledujte vybrané parametry elektroizolačních materiálů během jejich degradace a popište problematiku transferu informace o stavu parametru do monitorovacího systému.

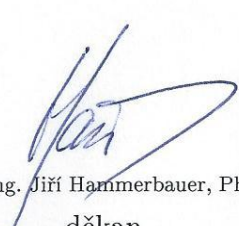


Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

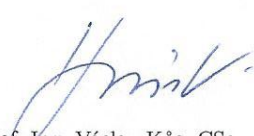
1. V. Mentlík a kol. Diagnostika elektrických zařízení, BEN 2008.
2. Heathcote M. J. J&P Trasformer Book, Elsevier, ISBN 0750611588, dostupná v EK407
3. Internetové databáze, elektronické informační zdroje
4. Normy IEC, EN, ČSN, IEEE

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

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Condition based management elektrických zařízení**

Předkládaná diplomová práce se zabývá využitím condition based managementu v oblasti elektrických strojů velkých výkonů. V první části je diskutován současný stav při plánování odstávek a jeho nevýhody. Poté jsou popsány možnosti zefektivnění této činnosti. Druhá část se zabývá výběrem vhodných diagnostických metod a zásadami jejich aplikace při diagnostice elektrických strojů. Jsou zde specifikovány aspekty měření v praxi. Poslední dvě části prezentují návrh softwaru na výpočet zbytkové životnosti elektrického stroje včetně postupu matematického modelování odolnosti elektroizolačního systému vůči degradačním procesům.

### **Klíčová slova**

condition based management, on-line diagnostika, off-line diagnostika, hodnocení stavu, zbytková životnost

56 stran

26 obrázků

1 tabulka

8 stran příloh

## **Condition based management of electrical appliances**

This master thesis deals with the use of condition based management in high power electrical machines. In first part, there is a description of today's due planning system and its disadvantages. Then, the possibilities of increasing efficiency of this procedure are described. Second part occupies with choosing appropriate diagnostic methods and principles of their application in electrical machines diagnostics. Last two parts present a design of software for electrical machine rest lifetime estimation, including a methodology of mathematical modeling of electro-insulating system resistance to degradation processes.

### **Key words**

condition based management, on-line diagnostics, off-line diagnostics, state evaluation, rest lifetime

56 pages

26 pictures

1 table

8 pages of appendices

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne 9.května.2012

Jméno, příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále děkuji všem, kteří napomáhali vzniku této práce.

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>0 ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1 SOUČASNÝ STAV MANAGEMENTU ELEKTRICKÝCH STROJŮ .....</b>	<b>11</b>
1.1 DEGRADAČNÍ PROCESY .....	11
1.1.1 Tepelné namáhání.....	12
1.1.2 Mechanické namáhání.....	12
1.1.3 Elektrické namáhání.....	13
1.1.4 Kombinované namáhání.....	13
1.2 SYSTÉMY ÚDRŽBY TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ .....	14
1.3 ROLE DIAGNOSTIKY V ÚDRŽBĚ ELEKTRICKÝCH STROJŮ.....	15
1.4 OFF-LINE DIAGNOSTIKA .....	15
1.5 ON-LINE DIAGNOSTIKA .....	16
<b>2 ASPEKTY ON-LINE DIAGNOSTIKY .....</b>	<b>17</b>
2.1 VÝBĚR VHODNÝCH VELIČIN .....	17
2.1.1 Elektrické parametry.....	18
2.1.2 Měření neelektrických veličin .....	18
2.2 ZÁSADY PRO MĚŘENÍ ON-LINE.....	19
2.3 SOUČASNÉ APLIKACE.....	20
2.3.1 Transformátory.....	20
2.3.2 Točivé stroje .....	21
<b>3 MODELOVÁNÍ ODOLNOSTI IZOLAČNÍHO SYSTÉMU VŮČI DETERIORACI.....</b>	<b>23</b>
3.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ .....	23
3.2 STEJNOSMĚRNÉ ZKOUŠKY .....	27
3.3 STRÍDAVÉ ZKOUŠKY .....	30
3.4 TEPelná DEGRADACE MATERIÁLU.....	32
3.5 VÝSLEDKY ZKOUŠEK STEJNOSMĚRNÝM NAPĚTÍM.....	33
3.6 VÝSLEDKY ZKOUŠEK STRÍDAVÝM NAPĚTÍM .....	36
3.7 AUTOMATIZACE MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT.....	39
<b>4 SYSTÉM PRO MONITORING STAVU ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>41</b>
4.1 PROGRAM ELMON .....	41
4.1.1 Struktura programu.....	42
4.1.2 Výpočtová část.....	43



4.1.3	<i>Koeficient relativní rychlosti stárnutí</i> .....	44
4.1.4	<i>Zobrazení výstupů</i> .....	45
4.2	PROGRAM V PROSTŘEDÍ LABVIEW .....	48
4.2.1	<i>Struktura programu</i> .....	48
4.2.2	<i>Získávání dat</i> .....	49
4.2.3	<i>Zobrazení výstupů</i> .....	50
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>51</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>53</b>
	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>56</b>

## Seznam symbolů

$\tan \delta$ [–]	ztrátový činitel
$\tau$ [hod]	doba života
$k$ [–]	relativní rychlost stárnutí
$Z_i$	inherentní životnost
$Z_s$	spotřebovaná životnost
$\rho$ [ $\Omega \cdot m$ ]	vnitřní rezistivita
$R_{iz}$ [ $\Omega$ ]	izolační odpor
$p_i$ [–]	minutový polarizační index
$\vartheta$ [ $^{\circ}C$ ]	teplota
$\bar{x}$	průměrná hodnota veličiny
$\sigma$	výběrová směrodatná odchylka
$v$ [–]	variační koeficient
$Me$	medián

## **0 Úvod**

Moderní společnost klade vysoké požadavky na efektivitu výroby a přenosu elektrické energie, zejména s ohledem na udržitelný rozvoj, ochranu životního prostředí a minimalizaci ekonomických nákladů. Jak výroba, tak i distribuce elektrické energie využívají velké množství vysokonapěťových zařízení, jejichž pořízení a provoz jsou velmi nákladné. Z tohoto hlediska je nutné věnovat pozornost jejich údržbě a minimalizovat provozní náklady, aniž by byla ohrožena kvalita elektrické energie, zejména spolehlivost dodávky.

Tato práce má za cíl popsat současný systém údržby elektrických strojů a najít způsob, jak jej zlepšit. Zefektivnění systému plánování odstávek může přinést značné úspory vlivem zkrácení doby nutné pro profylaxi a též prodloužení intervalu mezi jednotlivými odstávkami. Takové úpravy ale vyžadují perfektní znalost stavu stroje a jeho limitů.

# 1 Současný stav managementu elektrických strojů

Tak jako jakákoliv jiná zařízení, i elektrické stroje stárnou. Na elektrický stroj je možno nahlížet jako na sériový spolehlivostní řetězec několika subsystémů, přičemž výpadek jednoho z nich znamená ukončení provozuschopnosti stroje. Nejkritičtější článkem je zpravidla izolační subsystém stroje. U transformátorů velkých výkonů je izolační systém tvořen kombinací oleje a papíru. Zatímco olej lze regenerovat, popřípadě vyměnit, ztráta mechanické pevnosti papírové izolace znamená nutnost vyrobit nové vinutí.

U točivých strojů velkých výkonů je nejslabším místem izolace statorového vinutí. Na rotory je možno nahlížet jako na výměnné části, avšak pokud izolace statorových tyčí ztratí požadované parametry, znamená to prakticky konec života stroje. Samozřejmě opravy a údržba jsou nutné i na dalších podsystémech. Velkou pozornost vyžaduje mechanický podsystém, zejména tribotechnika.

## 1.1 Degradáční procesy

Stárnutí elektrických strojů znamená vznik postupných nevratných změn vlastností, které jsou dány působením degradačních procesů. Tyto procesy lze rozdělit na následující kategorie [1]:

- tepelné
- mechanické
- elektrické
- ostatní vlivy

V praxi jsou provozovaná zařízení namáhána všemi těmito vlivy, ovšem některé mohou být dominantní. Je zřejmé, že jednotlivé subsystémy sledovaného zařízení vykazují různou odolnost vůči degradačním činitelům, a tím stárne každý jinou rychlostí. V oblasti elektrických strojů je třeba věnovat pozornost zejména degradaci elektroizolačního systému.

### 1.1.1 Tepelné namáhání

Tepelné stárnutí zahrnuje fyzikálně chemické změny, které vznikají jako důsledek chemických reakcí, kde působí teplota jako katalyzátor. Jsou to například depolymerační reakce, difuze, oxidace, apod. Základním vztahem popisujícím délku života sledovaného objektu (např. elektroizolačního systému) je Arrheniova rovnice:

$$\tau = a \cdot e^{-\frac{W_a}{R \cdot T}}, \quad (1)$$

kde:

- $\tau$  je doba života [hod],
- $W_a$  je aktivační energie procesu [eV],
- $R$  je univerzální plynová konstanta,
- $A$  je konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul,
- $T$  je absolutní teplota [T].

Podobných vztahů je několik, jsou založeny na exponenciální funkci a liší se pouze předexponenciálním a exponenciálním faktorem. Nejužívanější jsou Montsingerovo pravidlo, Büssingův teorém, Crienův model a Simoniho model [1],[2],[3].

### 1.1.2 Mechanické namáhání

Mechanické namáhání bývá též jednou z hlavních příčin degradace elektroizolačního systému. Jedná se zejména o vliv elektromagnetických, elektrodynamických a tepelných sil. Modelů popisujících mechanické namáhání je mnoho, v závislosti na typu působícího zatížení a na materiálu. Příkladem může být Odingův model [4]:

$$\tau = \left(\frac{C}{A}\right)^{\frac{1}{m}} \cdot e^{-\left(\frac{\alpha+\beta}{m}\right) \cdot \sigma}, \quad (2)$$

kde:

- $\tau$  je doba do lomu [hod],
- $\sigma$  je mechanické napětí [Pa],
- $m$  je ukazatel způsobilosti hromadit vakance,
- $C, A, \beta$  jsou konstanty,
- $\alpha$  je parametr.

Mechanické namáhání je obtížně popsatelné. Jiný známý model fyzikálního charakteru vytvořili Decht'ar a Usipov [1], avšak v praxi se využívá spíše empiricky získaných modelů, kde se nezkoumá původ jednotlivých konstant [5], [6].

### 1.1.3 Elektrické namáhání

Elektrické namáhání je souhrnem působení elektrického pole, částečných výbojů, plazivých proudů, elektrolyzy, přítomnosti prostorového náboje a dalších jevů. Jedná se o několik různých procesů, které jsou obtížně popsatelné. Z tohoto důvodu se užívá modelů empirického charakteru. Jsou to model mocninný:

$$\tau = k \cdot E^{-n}, \quad (3)$$

a model exponenciální:

$$\tau = a \cdot e^{-b \cdot E}, \quad (4)$$

kde:  $\tau$  je doba života [hod],  
 $E$  je intenzita elektrického pole [kV.mm<sup>-1</sup>],  
 $k, n, a, b$  jsou konstanty, které je třeba určit empiricky.

Dále na elektroizolační systém působí faktory, které též ovlivňují stárnutí, avšak jejich vliv nelze takto jednoduše kvantifikovat. Příkladem může být vlhkost, která bývá přítomna velmi často a může ovlivňovat elektrické (např. permitivita, odpor, elektrická pevnost) i mechanické vlastnosti (např. mechanická pevnost). Dále jsou elektroizolační materiály ovlivňovány přítomností chemikálií, ozonu a jiných znečišťujících látek. Nezanedbatelné je i působení mikroorganismů, povětrnostních vlivů, popř. záření.

### 1.1.4 Kombinované namáhání

Ve skutečnosti jsou materiály namáhány kombinací všech dříve uvedených vlivů, a tedy i výsledné stárnutí je dáno interakcí jednotlivých degradačních činitelů. Tato interakce může být přímá, nebo nepřímá. V případě nepřímé interakce je výsledné stárnutí shodné, jako kdyby byly aplikovány jednotlivé degradační procesy postupně. Naproti tomu přímá interakce degradačních činitelů způsobí zpravidla vyšší celkové zestárnutí sledovaného objektu. Příkladem může být oxidace za zvýšené teploty. Samotná teplota, ani samotná oxidace neovlivňují materiál tak, jako když tyto faktory

působí současně. Modelování kombinovaného stárnutí s přímými interakcemi jednotlivých činitelů je velmi obtížné a často může být popsáno pouze na základě empirických modelů [5].

## 1.2 Systémy údržby technických zařízení

Z hlediska technického života objektu lze současné systémy údržby rozdělit na tři metody [7]:

- údržba po poruše
- údržba dle časového plánu
- údržba dle skutečného stavu objektu

Údržba po poruše je v běžné praxi velmi často využívána. Tento způsob je vhodný například u elektroniky, výpočetní techniky nebo u zařízení s nízkou pořizovací hodnotou, u kterých není pohotovost zařízení důležitým kritériem.

Údržba dle časového plánu (v anglické literatuře označovaná time based management, nebo time based maintenance) je běžná v oblasti elektrických strojů. Rozsah údržby je dán důležitostí stroje. U malých točivých strojů (jednotky kW) se obvykle doporučuje údržba jednou ročně, jedná se zejména o dotažení šroubových spojů, kontrolu opotřebení u kluzných kontaktů, v případě stejnosměrných strojů též kontrola komutátoru a očištění lamel od mazacích olejů a prachu, změření izolačních odporů vinutí, vyčištění stroje včetně chladicího systému a kontrolu, popř. výměnu ložisek [8].

U velkých strojů o výkonech v řádu MVA je v současnosti prováděna údržba dle časového plánu. Tento harmonogram vzniká na základě statistických podkladů, přičemž je brána v potaz důležitost stroje v elektrizační soustavě, popř. bezpečnost osob.

Snahou provozovatelů těchto strojů je přejít na tzv. condition based management, tedy údržbu stroje podle jeho skutečného stavu. To je z ekonomického hlediska nejvýhodnější způsob, avšak vyžaduje aktuální informace o stavu stroje a jejich vhodné zpracování – tedy predikci zbytkové životnosti. Implementace CBM v oblasti elektrických strojů je v současné době aktuální téma, které je řešeno na předních světových konferencích [9], [10], [11], [12], [13].

### 1.3 Role diagnostiky v údržbě elektrických strojů

Diagnostika je velmi účinný nástroj pro provozovatele, jelikož jim podává informace o stavu stroje a na jejím základě lze predikovat budoucí vývoj. To provozovatelům poskytuje argumenty pro kvalifikovaná rozhodnutí o údržbě, či případné opravě sledovaného stroje. Zejména s ohledem na úsporu nákladů jsou závěry plynoucí z diagnostiky nepostradatelné. Včasné provedené diagnostické šetření může poukázat na problémy a tím účinně předcházet haváriím.

Diagnostické metody lze rozdělit dle několika kritérií [1], [7]. Z hlediska diagnostikovaného předmětu lze diagnostiku dělit na on-line (funkční) diagnostiku a off-line (testovací) diagnostiku. Off-line diagnostika je historicky starší, provádí se při odstávkách. Umožňuje měřit více parametrů a použít přesnější metody, zatímco on-line diagnostika (monitoring) se provádí za provozu stroje a podává informace o časovém vývoji sledovaných parametrů.

### 1.4 Off-line diagnostika

Provozovatel stroje musí určit, jaké diagnostické metody a veličiny bude na strojích sledovat. Tato volba musí být strategicky plánovaná. Některé diagnostické veličiny mají vypovídací hodnotu pouze tehdy, pokud jsou měřeny opakovaně, respektive lze sledovat jejich vývoj v čase. V současné době se na daný stroj podle důležitosti v soustavě vyčlení určité finanční prostředky a podle nich jsou vybrány vhodné diagnostické metody a naplánován režim zkoušek.

V případě transformátorů bývá off-line diagnostika prováděna obvykle v dvouletých cyklech. První rok se odeberou vzorky oleje a provede rozbor. Druhý rok je stroj odstaven a proměřen, přičemž rozbor oleje se provádí též. Rozbor transformátorového oleje poskytuje velké množství cenných informací o stavu papírové složky izolace.

U točivých strojů je situace složitější. Pro provedení off-line diagnostiky je odstávka nevyhnutelná, stroj musí být rozebrán a rotor vyjmut. U točivých strojů nelze provést takovéto zobecnění. Postupuje se vždy individuálně.

Off-line diagnostika izolačního systému je prováděna na strojích při odstávkách. Tyto odstávky bývají zapříčiněny potřebou oprav na turbíně, mechanickém subsystému stroje či z jiných důvodů. Aby byla délka odstávky co nejnižší a tím minimalizován též ušlý zisk, je třeba odstávku pečlivě připravit a naplánovat. Často se ale stává, že



jednotlivá měření nejsou prováděna za shodných podmínek, tzn., není zajištěna opakovatelnost a diagnostické výroky tak ztrácejí jistotu. V případě, že se některý experiment nepodaří, mnohdy na jeho opakování nezbývá prostor v rozvrhu odstavky. Některé zkoušky nelze opakovat z principu – například měření odporu vinutí za tepla.

## **1.5 On-line diagnostika**

On-line diagnostika probíhá za provozu stroje, neumožňuje tedy budít sledovaný objekt vlastním zdrojem signálu. Informace získané pouze z provozních signálů mají omezenou vypovídací schopnost. Oproti pravidelným off-line šetřením ovšem poskytují cenné informace o postupném vývoji sledovaných parametrů, a tím i postupných poruch. On-line diagnostické systémy měří a zaznamenávají hodnoty sledovaných veličin v pravidelných intervalech. Délka těchto intervalů je pro každou veličinu různá a závisí na fyzikální podstatě popisovaného jevu. Tepelné jevy mají dlouhé časové konstanty a relativně úzké rozmezí hodnot. Nízké nároky na zpracování dat jsou například pro měření teploty vinutí točivých strojů. Zde může být dostatečný 8-bitový převodník s frekvencí menší než 1 Hz. Naproti tomu mechanické a zejména elektrické jevy probíhají ve výrazně kratších časech. Pro měření částečných výbojů jsou využívány přístroje s vyšším rozlišením a frekvencí v řádu MHz.

## 2 Aspekty on-line diagnostiky

V dnešní době je na trhu velké množství diagnostických metod vhodných pro použití v elektrických strojích. Výrobci nabízejí různá zařízení od velmi jednoduchých jednoúčelových měřidel až po komplexní monitorovací systémy. Z hlediska zpracování dat je výhodné integrovat všechny diagnostické signály do jednoho místa a zpracovávat je centrálně. On-line diagnostické metody jsou v praxi nasazovány, naměřená data ukládána do databází, avšak mnohdy nejsou vyhodnocována aktuálně, ale pouze uchovávána pro pozdější vyhodnocení. K predikci vývoje degradace izolačního systému je nezbytné znát hodnoty měřených veličin v minulosti a jejich trendy.

### 2.1 Výběr vhodných veličin

Abychom získali co nejpřesnější charakteristiku stavu sledovaného zařízení, je třeba shromáždit co největší množství informací, tedy měřit co největší množství parametrů. Proti tomu stojí požadavky na cenu diagnostiky a náročnost zpracování dat. Je tedy nezbytné vybírat pouze ty nejdůležitější parametry. V první řadě je třeba vytipovat nejslabší místa sledovaného objektu a následně parametry, které je charakterizují.

Například u transformátoru je nejslabším místem izolace vinutí. Kriteériem zestárnutí je ztráta mechanické pevnosti papírové izolace. Mechanické zkoušky papíru však není možné dělat za provozu stroje. Lze tedy sledovat teplotu oleje, jelikož je známo, že ztráta mechanické pevnosti koresponduje s tepelnou degradací papíru. Na základě znalosti průběhu teploty lze tedy usuzovat na stav papírové složky.

V případě točivých strojů velkých výkonů je izolační systém složitější, pro izolování statorových tyčí se používá tříkomponentních pásek, kterými je tyč ovijena. Samotná páska ani návin nejsou homogenní, což dává prostor pro rozvoj degradačních procesů a tím variabilitu parametrů. Vhodný parametr, který popisuje degradaci tohoto izolačního systému, může být například svodový proud nebo ztrátový činitel  $\tan \delta$ . S ohledem na rozmanitost degradačních procesů a složitost izolačních systémů je zřejmé, že pro popis stavu izolačního systému nestačí jediná veličina. S rostoucím počtem sledovaných veličin roste přesnost popisu stavu sledovaného zařízení, avšak též ekonomické náklady. Určení optimálního počtu sledovaných parametrů je rozhodnutím provozovatele v závislosti na důležitosti provozovaného zařízení.

### 2.1.1 Elektrické parametry

Z elektrických parametrů jsou měřeny základní provozní veličiny: napětí jednotlivých fází, proudy a okamžité hodnoty činného a jalového výkonu. Pomocí těchto veličin a znalosti konstrukce stroje lze vypočítat okamžitou teplotu vinutí, a tedy i odhadovat teplotu izolace.

Dále je možné měřit částečné výboje. Touto problematikou se zabývá norma ČSN EN 60270 [14]. Elektrické metody detekce lze rozdělit na přímé a nepřímé. Přímé metody sledují přímo proudové impulzy, které provázejí vznik částečných výbojů a nepřímé metody umožňují měřit elektromagnetické pole, které výboje vyzařují. Částečné výboje sledujeme ze dvou pohledů. Prvním je určení intenzity výbojové činnosti. K tomu lze použít například přímou globální metodu. Druhým úkolem je lokalizace místa výbojů, v točivých strojích například pomocí kapacitní drážkové sondy, která je zabudována pod drážkovými klíny.

Významným parametrem je ztrátový činitel. Tato veličina je spojená především s off-line diagnostikou, avšak dnešní zařízení, např. IDD firmy Doble jej umožňuje měřit on-line [15].

### 2.1.2 Měření neelektrických veličin

Historicky nejstarší měřenou neelektrickou veličinou na elektrických strojích je teplota. Teplotu lze on-line měřit pomocí termočlánků, odporových čidel, na principu emisivity a dalšími způsoby. Vedle toho je možné teplotu dopočítávat ze znalosti modelu stroje a aktuálního výkonu. Tento způsob je využíván například pro získání teploty transformátorového vinutí nebo tzv. hot-spot teploty.

U přístupných částí lze využít termovizních kamer, kdy lze porovnat skutečný obraz a obraz tepelné emise sledovaného objektu. Tím lze snadno lokalizovat „horká místa“. Termovizní kamery disponují vysokou citlivostí, jejich obsluha je jednoduchá a výsledky jsou velmi dobře čitelné.

Neelektrickými metodami je možné měřit i částečné výboje. Používá se několika principů. Jedním z nich je akustická detekce. Výbojová činnost je provázena vznikem akustické emise, tedy zvukových vln širokého spektra frekvencí. Tato metoda se používá v on-line diagnostice transformátorů, kdy jsou přímo do nádoby umístěny sondy a naměřená data následně softwarově zpracována [16], [17].

Projevy výbojové činnosti lze sledovat též opticky, a sice jak ve viditelném spektru, tak v UV oblasti. Často se využívá kombinace snímání ve viditelném a UV spektru, zejména kvůli přehlednému zobrazení. Přítomnost částečných výbojů se projevuje též lokálním ohřevem. Lze tedy použít i citlivých termovizních kamer. Optické metody jsou použitelné pouze u částí přístupných, tedy v on-line diagnostice např. pro sledování průchodek, vývodů a přístrojů VN.

V točivých strojích lze pro sledování aktivity částečných výbojů použít metody detekce obsahu ozonu  $O_3$  v chladicím vzduchu. Používá se kolorimetrická, elektrochemická a fotometrická metoda. V případě transformátorů lze detekovat obsah plynů v izolačním oleji. Tyto plyny vznikají jako produkty degradace transformátorového oleje a jsou to vodík  $H_2$ , methan  $CH_4$ , ethen  $C_2H_4$ , ethin  $C_2H_2$  a propen  $C_3H_6$ . Jednotlivé plyny se určují pomocí plynové chromatografie (DGA) a z jejich poměru lze dále identifikovat typ závady [18].

V točivých strojích se na degradaci izolačního systému podílí velkou měrou též mechanické namáhání. Vibrace jsou způsobeny jednak nedokonalostí mechanického vyvážení hřídele, jednak magnetostrickí a dále vznikají jako důsledek mechanických sil při různých provozních stavech stroje, jako je přechod kritických otáček u turbogenerátorů, zkratové síly, změny zátěžného momentu, otřesy strojů a zařízení připojených na hřídel a další. Měření vibrací v praxi je velmi obtížné s ohledem na požadavky vysoké odolnosti vůči elektrickému a magnetickému poli a tlaku chladicího média [6].

## 2.2 Zásady pro měření on-line

On-line měřicí zařízení nesmí za žádných okolností omezovat nebo ohrožovat spolehlivý chod stroje. Náležitou pozornost je proto nezbytné věnovat výběru rozmístění jednotlivých čidel tak, aby nehrozil přeskok mezi aktivními částmi stroje a měřicím zařízením. Zařízení připojená sériově k testovanému objektu tvoří v teorii spolehlivosti sériové články, výsledná spolehlivost systému je tedy dána součinem dílčích spolehlivostí. Jinými slovy výsledná spolehlivost systému klesá. Pokud jsou měřicí zařízení připojena paralelně k testovanému stroji a došlo by k průrazu měřicího zařízení, pak by nastal zkrat na stroji.

Dále je nezbytné volit umístění čidel tak, aby nebyly signály rušeny přítomností elektromagnetického pole. Často jsou k tomuto účelu využívány optické kabely.

V případě většího množství čidel, například pro měření teploty každé tyče statorového vinutí generátoru, rostou nároky na prostor pro kabeláž a dále je nutné řešit umístění svorkovnice. V transformátorech jsou využívány systémy pro měření parametrů oleje. Tato zařízení se montují na výstup z chladičů. Je tedy nezbytné, aby zde byl dostatek prostoru pro manipulaci.

## 2.3 Současné aplikace

V souběhu s vývojem byly diagnostické systémy postupně nasazovány, a tak je v současné době možné najít v provozu různá zařízení. Vývoj postupoval dvěma směry, jednak směrem zvyšování počtu sledovaných parametrů a jednak zvyšováním spolehlivosti systému. Všechna tato zařízení umožňují zobrazení naměřených hodnot na display a zároveň odesílání do počítače k následnému zpracování. V počátcích tato zařízení obsluhoval klasický kancelářský počítač, ovšem v provozovaných podmínkách vykazoval nízkou spolehlivost. Proto byly kancelářské počítače nahrazeny průmyslovými, které mají zpravidla nižší výkon, avšak pro zpracování naměřených dat jsou dostačující. Průmyslové počítače vykazují výrazně vyšší odolnost vůči prachu, vibracím, vlhkosti i teplotě.

### 2.3.1 Transformátory

Všechny klíčové transformátory přenosové soustavy České republiky jsou diagnostikovány on-line. Provozovatel přenosové sítě, společnost ČEPS, na těchto strojích nasazoval postupně zařízení na diagnostiku plynů obsažených v transformátorovém oleji. Nejznámější z používaných zařízení je řada výrobků Hydran [19], které umožňují měření kompozitní hodnoty plynů rozpuštěných v oleji. Tato zařízení komunikují pomocí RS 232, RS 485 a dnešní modely též pomocí LAN, CanBus, či TCP/IP. Výrobce, firma GE Energy Services, dále nabízí například zařízení Intellix pro měření osmi analogových veličin.

Dalšími zařízeními pro plynovou chromatografii (DGA), které jsou v ČR používány, je například řada Calisto [20], výrobce Morgan Schaffer nebo výrobky Transfix, Minitrans, Taptrans a Multitrans [19], výrobce Kelman. Výrobci nabízejí řady produktů podle počtu sledovaných plynů, čili provozovatel si může vybrat vhodné zařízení s ohledem na cenu.

Důležitou informací jsou teploty na různých místech stroje – v magnetickém obvodu, teplota vinutí, teplota oleje před a za chladičem, teplota horní vrstvy oleje a další. Dále je softwarově dopočítávána tzv. hot-spot teplota, tj. teplota nejteplejšího místa v transformátoru, která je dále používána k výpočtu zbytkové životnosti stroje. Tato metodika je popsána v normě ČSN IEC 60076-7 [21].

Dále je v praxi monitorován stav průchodek. Příkladem používaného zařízení může být IDD [15] společnosti Doble. Toto zařízení měří kapacitu a ztrátový činitel  $\tan \delta$ . Komunikace je možná pomocí RS 232, RS 485, TCP/IP nebo pomocí nadřazeného zařízení.

### 2.3.2 Točivé stroje

V oblasti točivých strojů není nabídka komplexních řešení monitorovacích systémů tak široká jako u transformátorů. U točivých strojů je nezbytné monitorovat více parametrů, aby provozovatel získal ucelenou informaci o stavu stroje. Takový systém je ekonomicky nákladný, a tak je využíván pouze u velmi významných strojů, zpravidla generátorů v elektrárnách.

V zahraničí jsou zmínky o měření teploty přehřívajících se tyčí na generátorech EDF. Tento systém byl nasazen v roce 1994 v jaderných elektrárnách ve Francii [22] a následně dále vyvíjen. Využívá snímání teploty pomocí optických senzorů a přenos optickými vlákny.

Elektrárny v Chorvatsku a Slovinsku jsou monitorovány systémem CoDiS [23], který je založen na bázi software LabView a využívá též přístroje pro sběr dat výrobce National Instruments.

Vlastní diagnostický software pro monitoring generátorů vyvíjí i přední výrobci diagnostické techniky. Jako příklad lze uvést výrobce GE Energy [24], který nabízí několik programů pro sledování základních parametrů, chladicího média a případných úniků, závitů na krátko a částečných výbojů.

V České republice jsou generátory v jaderných elektrárnách Temelín a Dukovany monitorovány systémem MOSAD, výrobce TES – testování energetických systémů [25]. Tento systém umožňuje měření až 120 analogových signálů – například základních elektrických parametrů (napětí, proudy), dále sledování stavu spínacích a ovládacích prvků (až 480 diskretních vstupů). Systém je modulární, a je tedy možné jej přizpůsobit konkrétnímu stroji. Z externích měřicích zařízení jsou data přenášena

pomocí standardních průmyslových sběrnic. Komunikace s uživatelem probíhá pomocí WEB rozhraní.

### 3 Modelování odolnosti izolačního systému vůči deterioraci

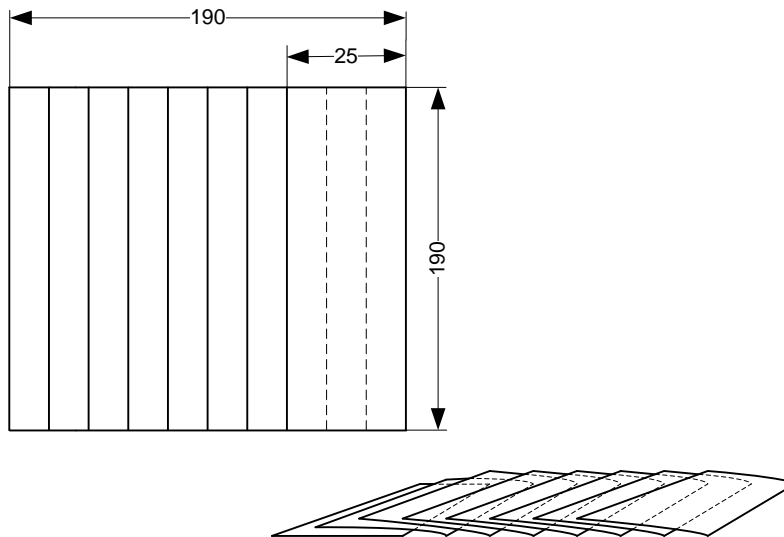
Z kapitoly 1.1 vyplývá, že pro popis deteriorace elektroizolačního systému je nezbytné najít všechny činitele, které degradaci způsobují a kvantifikovat je pomocí vhodných modelů, jejichž parametry je možné měřit, nebo určit. Kompletní popis deteriorace elektroizolačního systému je velmi komplikovaný. V této kapitole je popsán experiment jednofaktorového (teplotního) stárnutí. Byly vytvořeny vzorky elektroizolačního materiálu pro vinutí vysokonapětových točivých strojů a ty byly podrobeny teplotní degradaci. Dále byly vybrány diagnostické veličiny vhodné pro kvantifikaci stárnutí, které byly v průběhu stárnutí postupně sledovány. Vývoj těchto veličin v čase umožnil sestavit křivky odolnosti materiálu vůči teplotní degradaci. Z těchto křivek byla vybrána jedna, která slouží jako matematický model v programech pro výpočet zbytkové životnosti. Modelováním tepelné odolnosti elektroizolačních materiálů se zabývá norma ČSN EN 60216: Vlastnosti tepelné odolnosti [28]. Prezentovaný experiment probíhal v souladu s doporučením této normy.

#### 3.1 Příprava vzorků

Pro sestavení křivky odolnosti vůči působícímu zatížení byl zvolen materiál systému Resin-Rich s obchodním názvem Relanex 45.033A, výrobce COGEBI a.s. Tábor, který se používá pro ovin např. Roeblových tyčí statorového vinutí turbogenerátorů. Materiál byl dodán ve formě pásky o šířce 25 mm a tloušťce 0,22 mm.

Z tohoto materiálu byly zhotoveny plošné vzorky o rozměrech 190 x 190 mm s 2/3 překrytím, což je znázorněno na obr. 1. Tím je zajištěna výška vzorku 3 vrstvy, avšak vlivem nepřesnosti při výrobě v oblasti styku může být výška pouze 2 vrstvy.

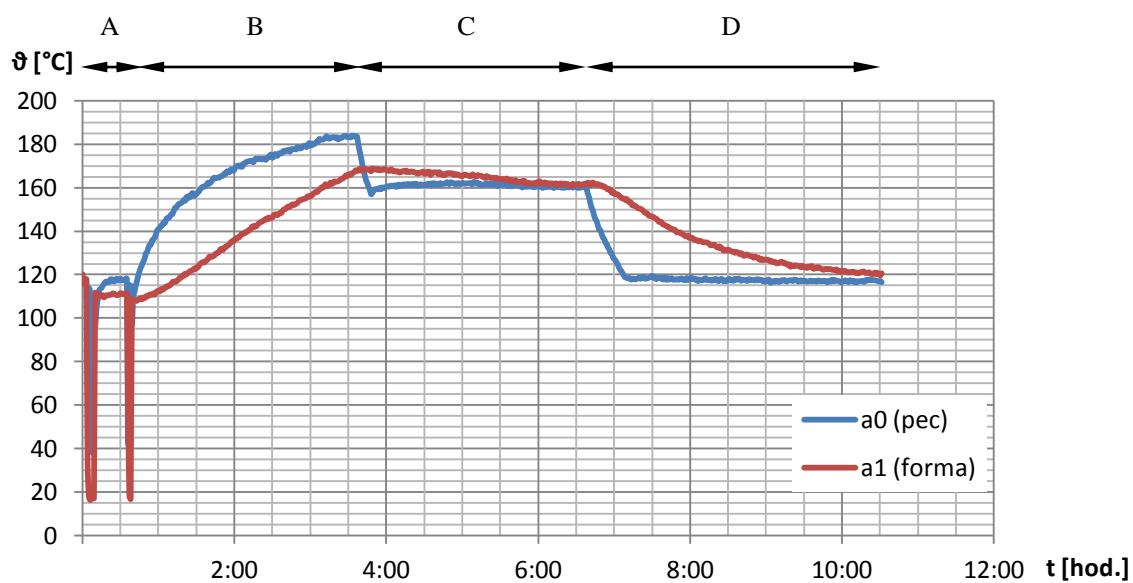




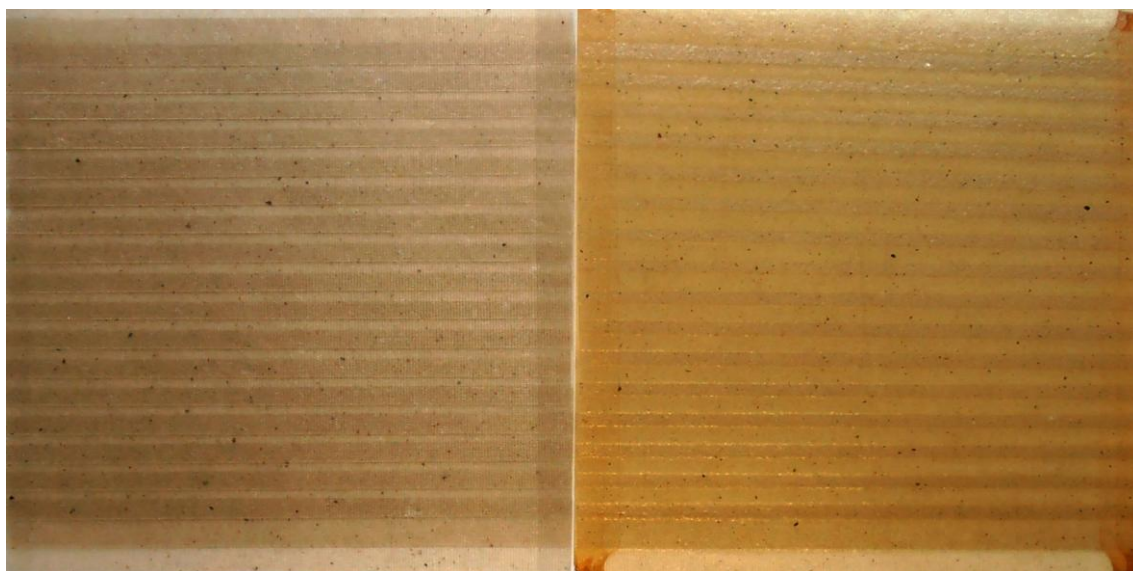
**obr. 1: naznačení způsobu skládání pásky**

Vytvrzování probíhalo v laboratořích FEL v sušárně Venticell podle postupu doporučeného výrobcem materiálu. Vytvrzovací proces byl monitorován pomocí zařízení pro sběr dat NI CompactDAQ. Program pro monitoring vytvrzovacího procesu byl vytvořen v LabView. Program komunikoval s měřicím zařízením a ukládal teplotu sušárny a formy, ve které byly vzorky vytvrzovány. K měření byly použity termočlánky, které byly kalibrovány rtuťovým teploměrem při teplotě 0 °C a 190 °C.

Záznam vytvrzovacího procesu je na obr. 2. Nejprve byla forma temperována na 120 °C (oblast A), následně do ní byly umístěny vzorky, na kterých při teplotě 110 °C po dobu 20 minut docházelo ke gelaci pryskyřice. Poté byla forma dotažena na požadovaný tlak, uvedený ve specifikaci výrobce. Následoval vytvrzovací proces, tedy zvýšení teploty na 165 °C (oblast B) a vytvrzování po dobu 3 hodin (oblast C). Poté byla teplota snížena a vzorky vyjmuty (oblast D). Porovnání vytvrzeného a nevytvrzeného vzorku je na obr. 3.

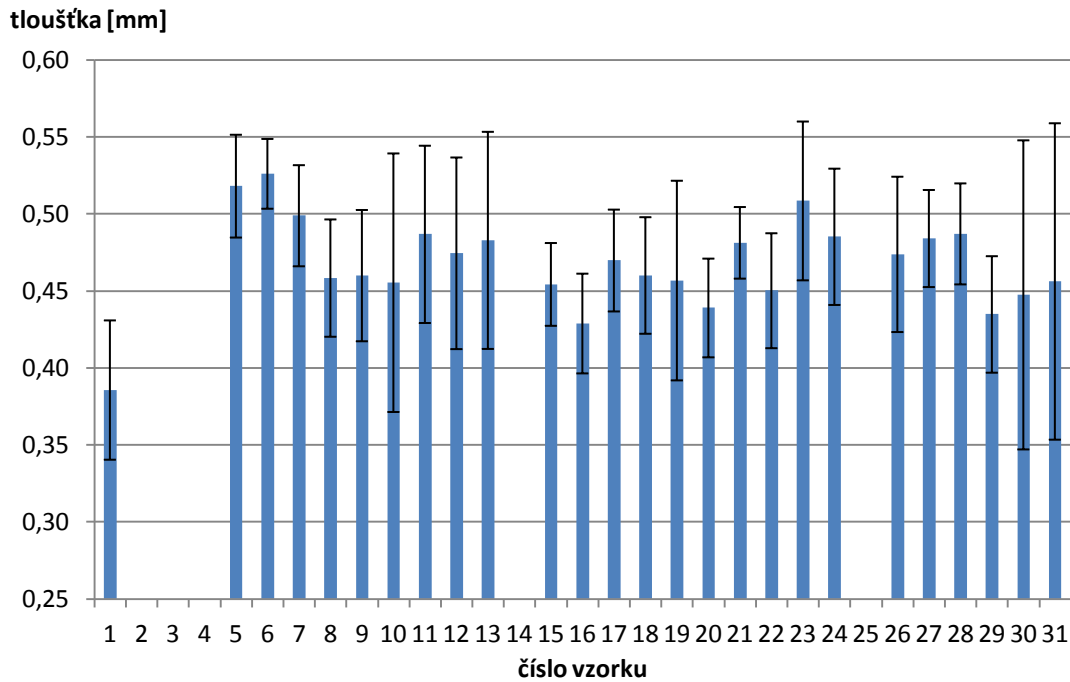


obr. 2: záznam teplot vytvrzovacího procesu, měřeno termočlánky na kanálech a0 a a1



obr. 3: nevytvrzený (vlevo) a vytvrzený (vpravo) vzorek

Tloušťka vytvrzených vzorků vykazovala velký rozptyl. To je způsobeno jednak ruční výrobou a jednak charakterem izolačního materiálu. Průměrné tloušťky vzorků jsou zobrazeny na obr. 4. Dále jsou zde vyznačeny intervaly  $\bar{x} \pm 3\sigma$ , ve kterých se pohybuje tloušťka vzorku s pravděpodobností 99,73 %.

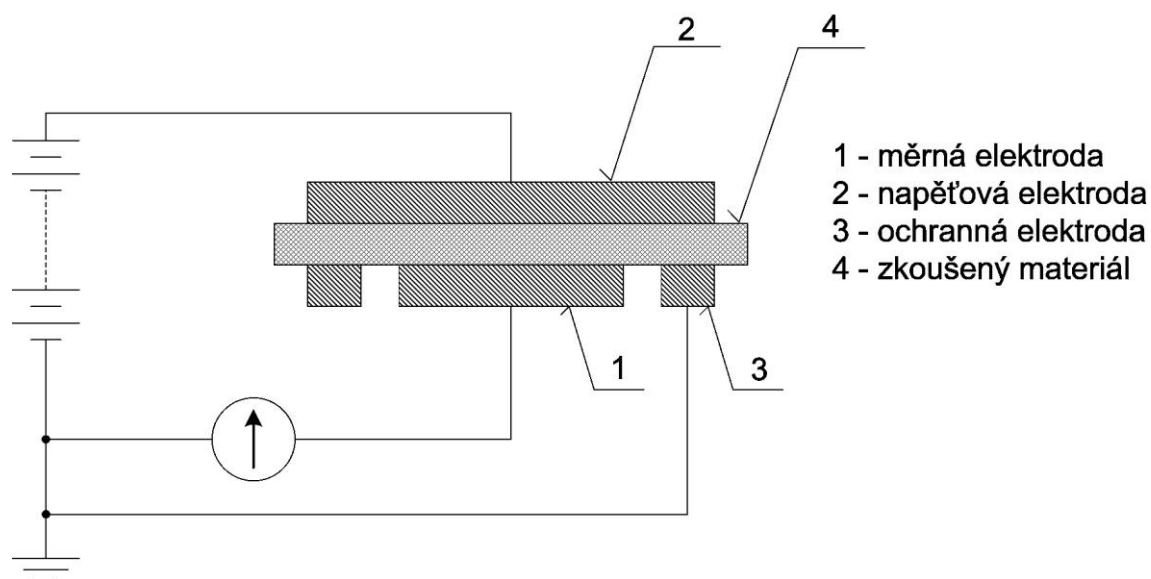


obr. 4: průměrné tloušťky vzorků s vyznačenými mezemi  $\pm 3\sigma$

### 3.2 Stejnosměrné zkoušky

Vytvrzené vzorky byly podrobeny základním stejnosměrným a střídavým zkouškám. Ze stejnosměrných zkoušek byly měřeny absorpční a resorpční charakteristiky a dále dopočteny hodnoty vnitřní rezistivity, izolačního odporu a minutového polarizačního indexu.

Měření vnitřní rezistivity je definováno normou ČSN IEC 93 [26]. Tato norma je dosud platná, avšak bude nahrazena normou IEC 62631-3: Dielektrické a izolační vlastnosti pevných izolačních materiálů – Izolační vlastnosti (stejnosměrné metody). ČSN IEC 93 doporučuje několik metod, ze kterých byla s ohledem na dostupné vzorky materiálů zvolena voltampérová metoda, která patří mezi metody přímé. Obecné schéma je na obr. 5. Přesnost této metody je závislá na přesnosti galvanometru, respektive elektrometru, použitého k měření procházejícího proudu. Skutečné uspořádání elektrod bylo opačné (viz obr. B 2 v příloze), napěťová elektroda byla vespod.

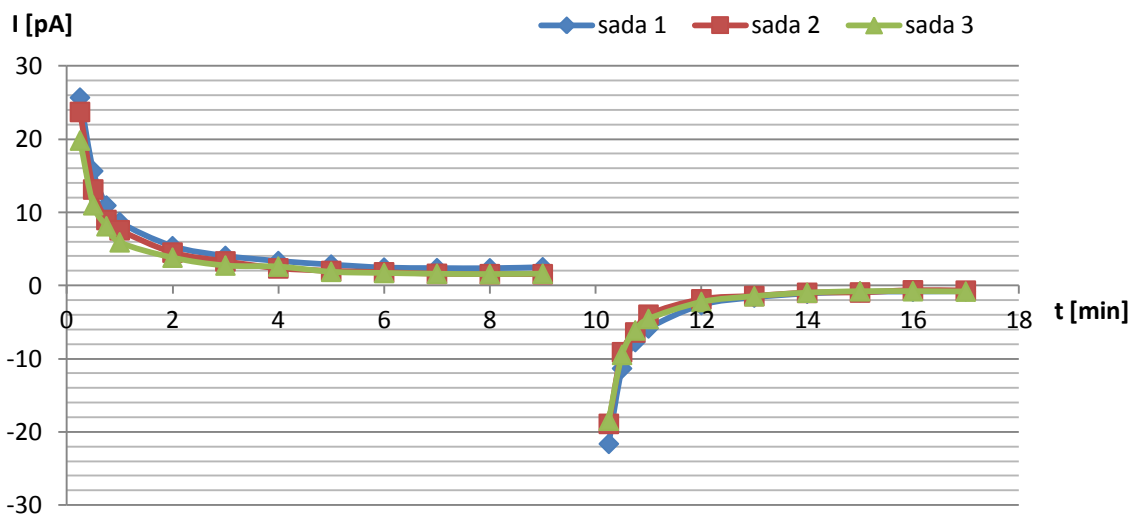


obr. 5: obecné schéma zapojení pro měření vnitřní rezistivity dle normy [26]

Vlastnosti izolantů mohou být do jisté míry ovlivněny podmínkami, ve kterých se daný materiál nachází před zkouškou a při zkoušce. Pro zajištění výpovědíschopnosti a opakovatelnosti měření je nutné provést aklimatizaci vzorků před zkouškou, popřípadě kondicionování vzorku, pokud je to nutné. Jedná se o odstranění minulých vlivů a vystavení vzorků působení okolního prostředí se stanovenými podmínkami po stanovenou dobu. Tato problematika je obsahem normy ČSN EN 60212 – Standardní

podmínky používané před zkoušením a během zkoušení pevných elektroizolačních materiálů. V souladu s normou byly vzorky před měřením uloženy na 24 hodin do zkratovací knihy, aby z nich byl odveden volný náboj.

Měření probíhalo za normálních porovnávacích klimatických podmínek, tedy při teplotě  $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  a relativní vlhkosti  $50\% \pm 10\%$ , při napětí 500 V. Naměřené absorpční a resorpční charakteristiky jednotlivých sad jsou uvedeny na obr. 6. Hodnoty byly blízké a nevykazovaly velký rozptyl.



obr. 6: absorpční a resorpční charakteristiky

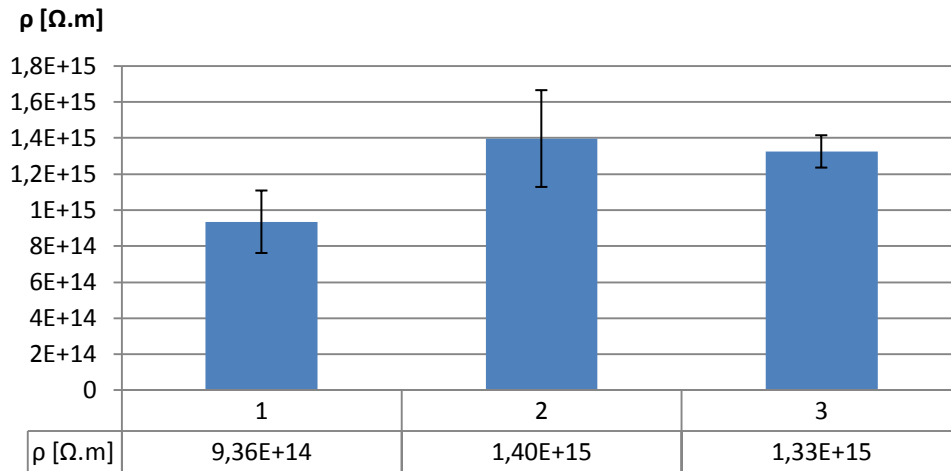
Stejnoseměrné zkoušky jsou snadno ovlivnitelné okolními elektromagnetickými a elektrostatickými poli. Pro potlačení rušení byl měřený vzorek s elektrodami umístěn do hliníkového stínícího boxu a měřicí aparatura uzemněna. Velmi důležité bylo minimalizovat manipulaci se vzorky před měřením a nehýbat se v průběhu měření, aby nedocházelo ke vzniku a akumulaci volného elektrostatického náboje v měřicím prostoru, který by ovlivňoval měření.

Z naměřených charakteristik byly dle postupu popsaného v normě ČSN IEC 93 [26] dopočteny hodnoty vnitřní rezistivity dle vztahu (5)

$$\rho = R_x \cdot \frac{A}{h}, \quad (5)$$

kde:  $R_x$  je vnitřní odpor vypočtený jako podíl přiloženého stejnosměrného napětí a ustáleného proudu protékajícího vzorkem [ $\Omega$ ],  
 $A$  je plocha měřicí elektrody [ $m^2$ ],  
 $h$  je průměrná tloušťka vzorku [ $m$ ].

Tyto hodnoty byly zprůměrovány a zobrazeny v grafu na obr. 7 podle jednotlivých sad. Dále je zde uvedeno rozpětí  $\pm 3\sigma$  každé sady za předpokladu normálního rozdělení.



**obr. 7: průměrná hodnota vnitřní rezistivity jednotlivých sad vzorků před stárnutím**

Dále byly dopočteny hodnoty izolačního odporu dle vztahu (6) a hodnoty minutového polarizačního indexu dle vztahu (7). Tyto parametry jsou definovány např. v [1] str. 37, 38.

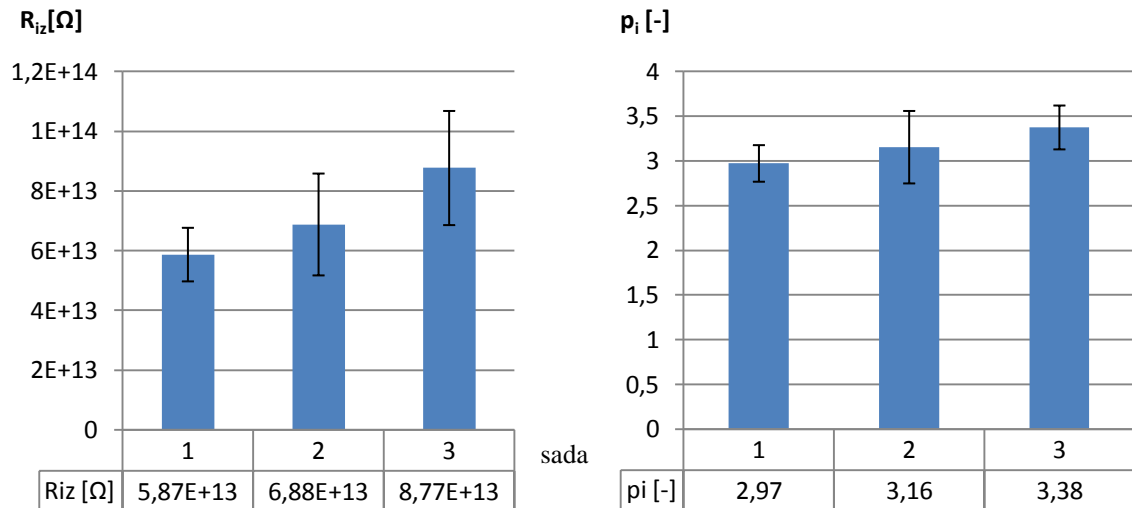
$$R_{iz} = \frac{U}{I_{60}}, \quad (6)$$

kde:  $U$  je přiložené stejnosměrné napětí [V],  
 $I_{60}$  je absorpční proud v čase 60 sekund od přiložení napětí [A],

$$p_i = \frac{I_{15}}{I_{60}}, \quad (7)$$

kde:  $I_{15}$  je absorpční proud v čase 15 sekund od přiložení napětí [A].

Vypočtené hodnoty byly zprůměrovány a zobrazeny v grafu na obr. 8 podle jednotlivých sad, obdobně jako v případě vnitřní rezistivity.

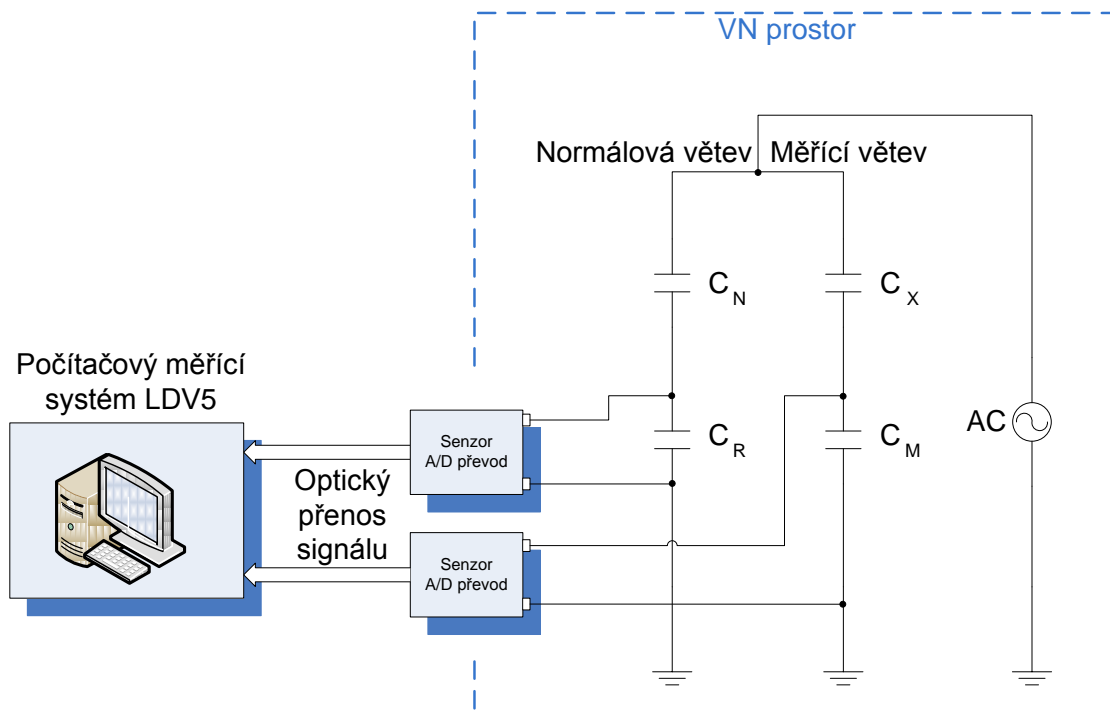


obr. 8: průměrné hodnoty izolačního odporu a polarizačního indexu jednotlivých sad vzorků.

Základní parametry popisné statistiky těchto sad jsou uvedeny v tab. A 1 v příloze.

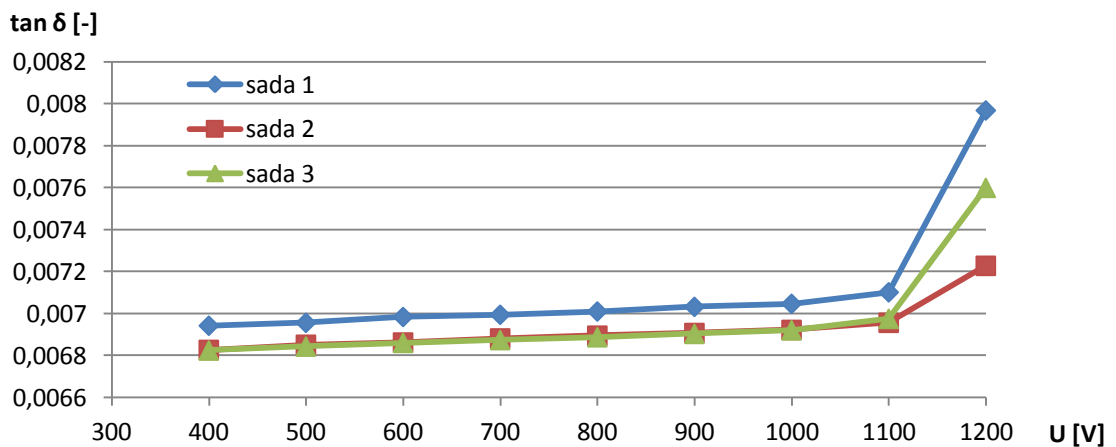
### 3.3 Střídavé zkoušky

Ze střídavých zkoušek byla měřena závislost ztrátového činitele na napětí a na teplotě. Pro měření ztrátového činitele byl využit počítačový měřicí systém LDV-5, výrobce Lemke Diagnostics. Tento měřicí systém využívá můstkového zapojení, schéma je na obr. 9, fotografie na obr. B 1 v příloze.



obr. 9: schéma zapojení můstku pro měření ztrátového činitele

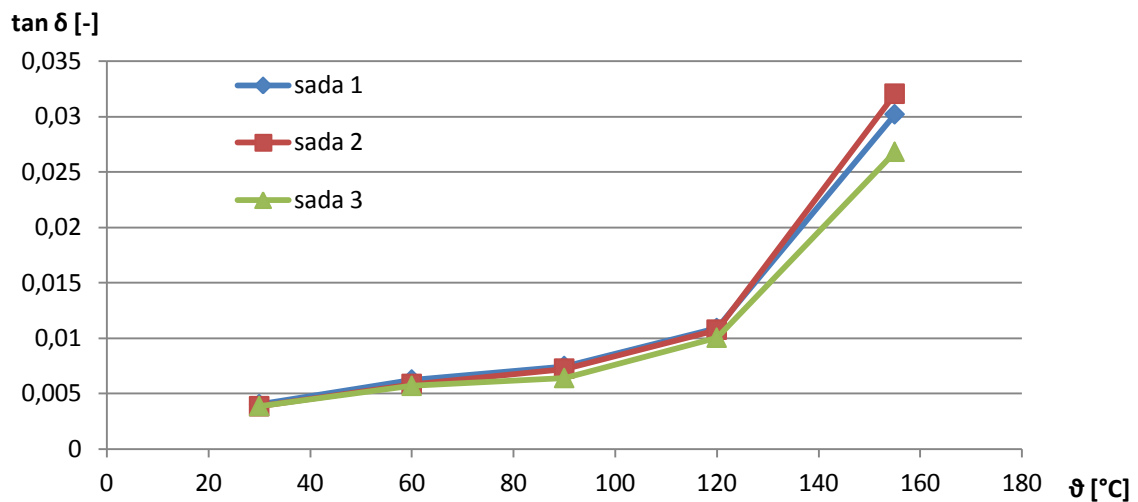
Zkoušený vzorek  $C_X$  a normálový kondenzátor  $C_N$  tvoří VN diagonálu. NN diagonála je měřena pomocí senzorů s optickým převodníkem a signál je následně přenášen optickými vlákny ke zpracování pomocí průmyslového počítače. Pro napěťovou závislost byl využit stejný elektroodový systém jako pro stejnosměrné zkoušky (viz obr. B 2 v příloze). Závislosti průměrných hodnot jednotlivých sad jsou na obr. 10. Měřeno bylo do napětí 1200 V, kdy se začaly objevovat částečné výboje.



obr. 10: závislost ztrátového činitele na napětí



Teplotní závislost byla měřena pomocí kondenzátoru s vyhřívanými elektrodami, výrobce Tettex (viz obr. B 3 v příloze). Závislosti pro jednotlivé sady jsou na obr. 11. Měření probíhalo v souladu s normou ČSN IEC 250 [27]. Byla zvolena napěťová hladina 500 V a s ohledem na časové možnosti bylo měřeno s krokem 30 °C. Poslední hodnota byla změřena na teplotní třídě materiálu, tedy hodnotě 155 °C.



obr. 11: závislost ztrátového činitele na teplotě

### 3.4 Tepelná degradace materiálu

Izolační systémy elektrických strojů jsou dimenzovány na desítky let provozu. Je zřejmé, že při vývoji těchto systémů je nezbytné zjistit výslednou životnost za kratší dobu. Proto se využívá testování při zrychlených zkouškách. Působící zatížení je vyšší než provozní, tím vzorky stárnou rychleji. Během testování jsou vzorky proměřovány. V případě nedestruktivních zkoušek je nutné zvolit kritérium, pro které již materiál nevyhovuje požadavkům. Následně jsou vzorky stárnuty a je sledována doba do dosažení kritéria. Výsledkem destruktivních zkoušek je doba do havárie vzorku – např. elektrický průraz. Zrychlené laboratorní stárnutí je přesto velmi zdlouhavý proces, proto je nezbytné jej pečlivě naplánovat.

Izolační systémy točivých strojů zpracovávají technologiemi VPI a resin-rich používají tříkomponentní pásy. Tyto pásy obsahují nosič, pojivo a plnivo. Nosičem je v tomto případě skelná tkanina, plnivem slídový papír a pojivem pryskyřice. Tyto materiály jsou vyráběny v teplotní třídě F (155 °C). Je zřejmé, že pro slídu a skelnou

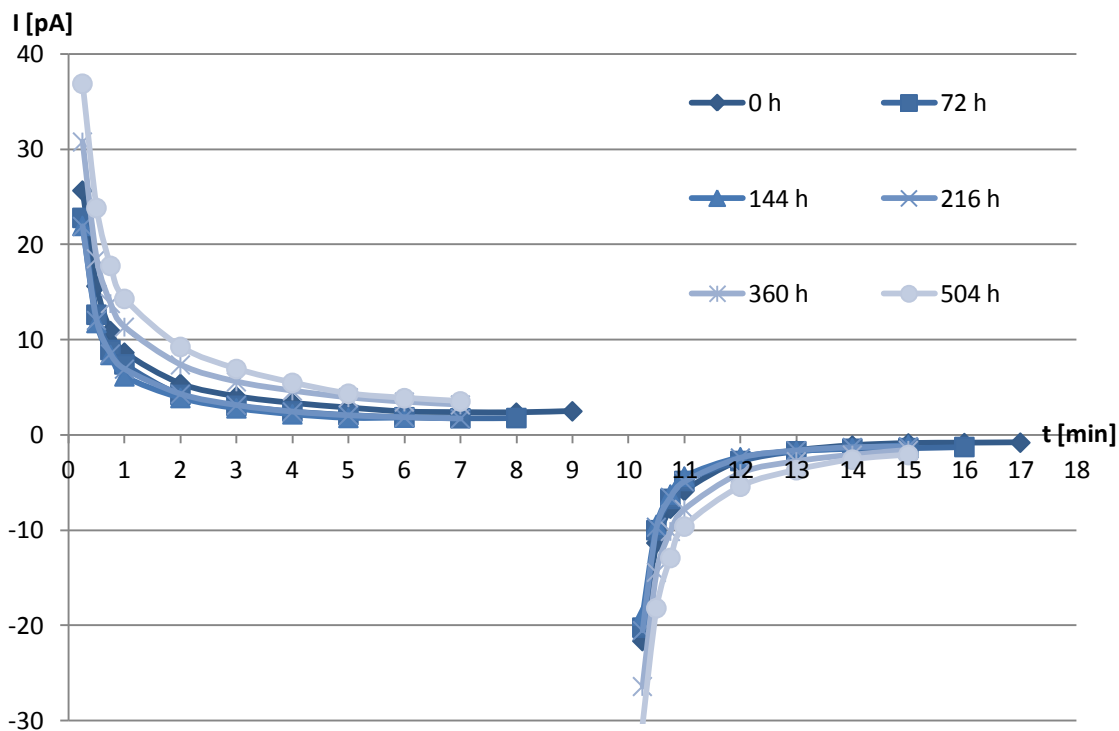
tkaninu jsou teploty, při kterých je stroj provozován, neškodné. Jediný prvek, který při těchto teplotách může vykazovat znaky stárnutí, je použitá pryskyřice.

S ohledem na náročnost experimentu byly zvoleny 3 hodnoty parametru, a sice 190 °C, 200 °C a 210 °C. Pro každou hodnotu bylo použito 5 vzorků. Byly zvoleny intervaly, ve kterých byl materiál testován – 72 hodin pro sadu 1 stárnutou při teplotě 190 °C, dále 48 hodin pro sadu 2 stárnutou při 200 °C a 24 hodin pro sadu 3 stárnutou při teplotě 210 °C.

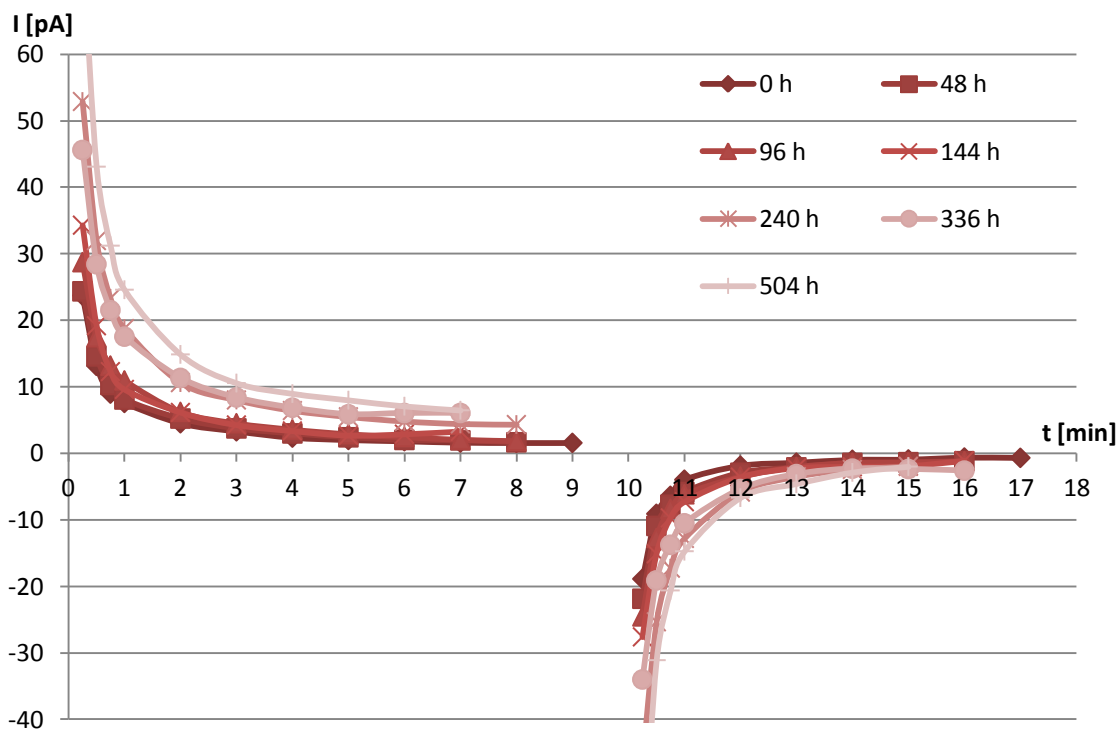
Vzorky byly stárnuty v sušárně Venticell s odvodem vzduchu, čili nebyly vystaveny vlivům degradačních zplodin, které by mohly stárnutí urychlovat. Po výše zmíněném intervalu byly vzorky vyjmuty, uloženy do zkratovací knížky a min. 24 hodin kondicionovány. Následně byly provedeny stejnosměrné zkoušky (absorpční a resorpční proudy) a pak střídavé zkoušky (závislost ztrátového činitele  $\tan\delta$  na napětí a na teplotě). Při experimentu bylo postupováno v souladu s normou ČSN EN 60216 [28], která se zabývá teplotní odolností elektroizolačních materiálů.

### 3.5 Výsledky zkoušek stejnosměrným napětím

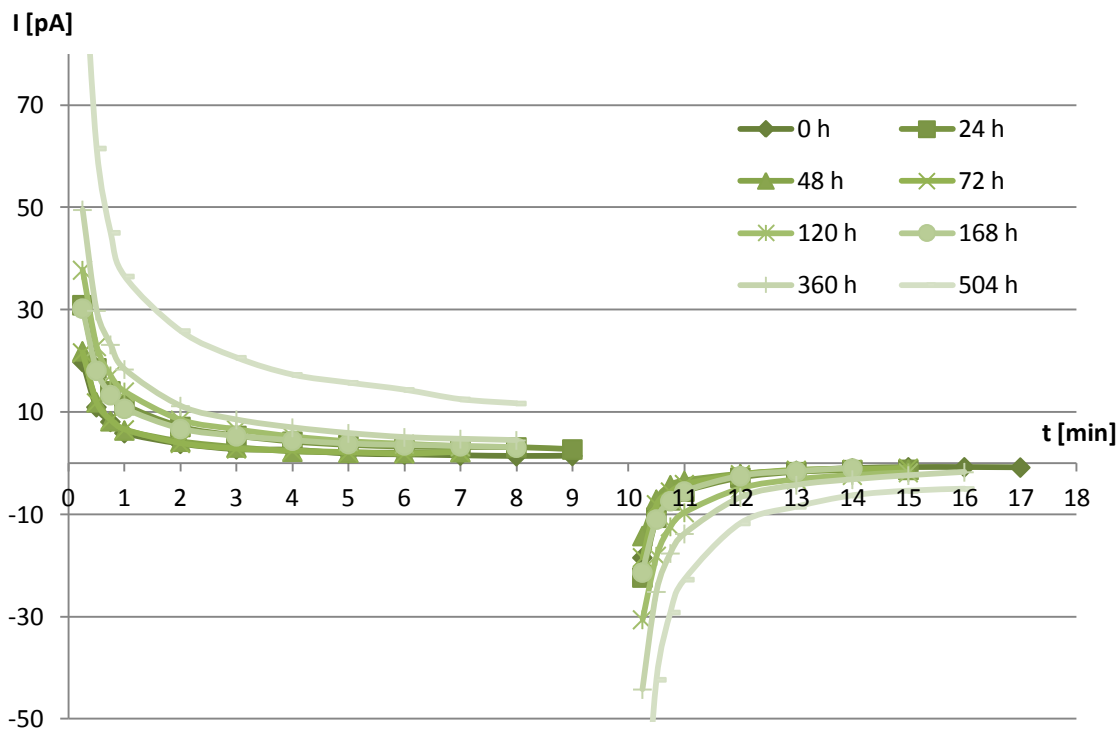
Absorpční a resorpční charakteristiky sady 1 (viz obr. 12), která byla stárnutá při teplotě 190 °C, vykazovaly nejprve mírné zlepšení a následně postupné zhoršování. Tento jev je možné pozorovat ve strojích i v provozu, kdy pryskyřice v izolačním systému nově vyrobeného stroje není zcela zesíťována. V průběhu provozu dojde k úplnému zesíťování a následně pryskyřice už degraduje. Sada 2 (viz obr. 13) vykazuje pouze zhoršování parametrů. Lze tedy usuzovat, že dotvrzovací fáze proběhla mezi prvním a druhým měřením, tedy mezi 0 a 48 hodinami stárnutí. Sada 3 (viz obr. 14) opět vykazovala pouze zhoršování, avšak s velkým rozptylem hodnot.



obr. 12: absorpční a resorpční charakteristiky sady 1, teplota stárnutí 190 °C

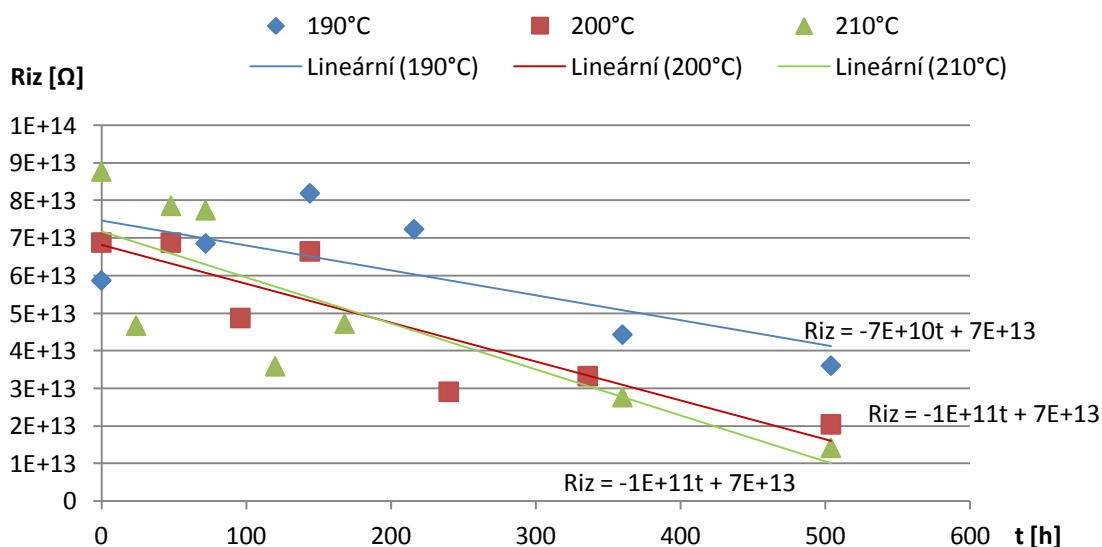


obr. 13: absorpční a resorpční charakteristiky sady 2, teplota stárnutí 200 °C



obr. 14: absorpční a resorpční charakteristiky sady 3, teplota stárnutí 210 °C

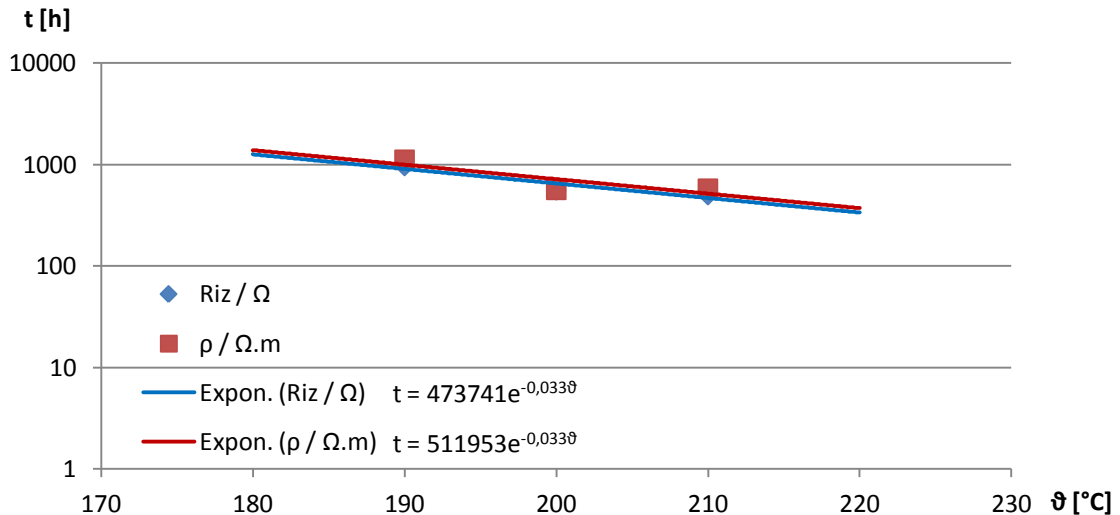
Z hodnot absorpčního proudu byly dále dopočítány izolační odpory, vnitřní rezistivita a minutové polarizační indexy stejným způsobem jako pro nové vzorky. Průměrné hodnoty izolačního odporu pro jednotlivé sady a dobu stárnutí jsou uvedeny na obr. 15.



obr. 15: vývoj průměrné hodnoty izolačního odporu jednotlivých sad vzorků vlivem stárnutí

Tyto hodnoty byly proloženy L2 aproximací v obecném tvaru přímky  $y = k \cdot x + q$ . Následně bylo zvoleno kritérium zestárnutí  $R_{iz} = 10^{13} \Omega$ . Časy, kdy aproximace protne

hranici tohoto kritéria, jsou použity pro sestavení křivky odolnosti materiálu. Stejným způsobem byla sestavena křivka odolnosti pro parametr vnitřní rezistivita a kritérium  $\rho = 10^{13} \Omega \cdot m$ . Tento graf je na obr. 16.

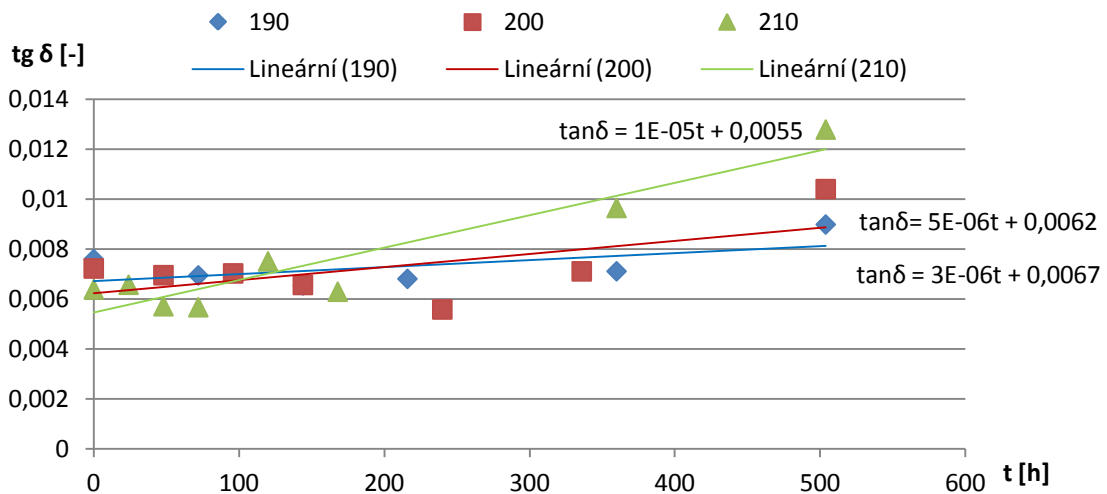


obr. 16: křivka odolnosti materiálu vůči teplotní degradaci získaná stejnosměrnými metodami

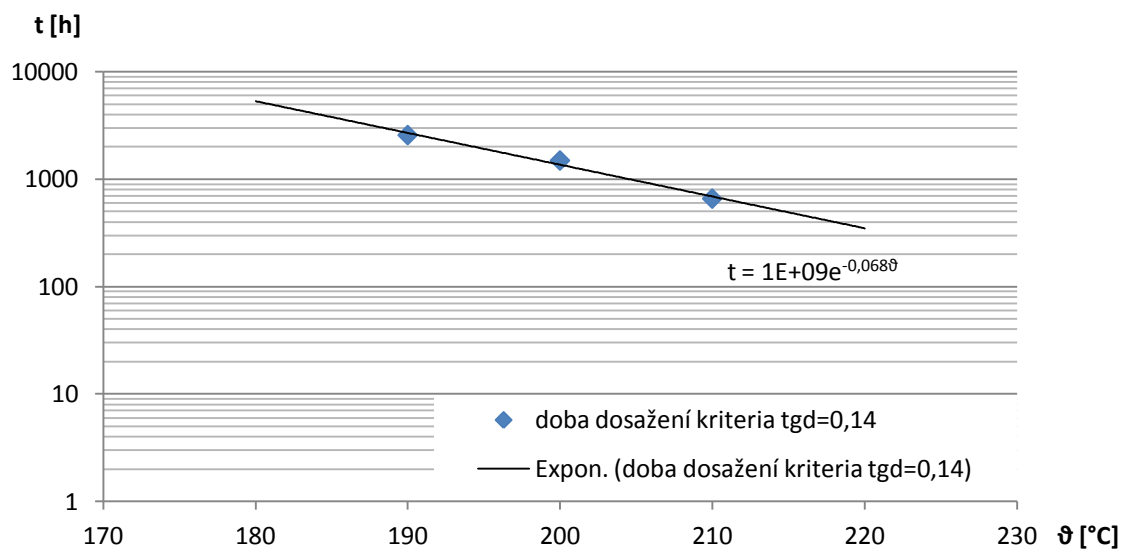
Pro sestavení křivky odolnosti vůči tepelnému namáhání jsou nezbytné minimálně 2 body, avšak více bodů poskytuje přesnější popis. Tato křivka je získána pomocí 3 bodů na vysokých hodnotách zatížení. K zajištění lepší vypovídací schopnosti výsledků by bylo vhodné provést stárnutí na nižších teplotách. Bohužel jsou tyto experimenty příliš časově náročné, a tak bylo nutné zvolit vysoké teploty.

### 3.6 Výsledky zkoušek střídavým napětím

Ze zkoušek střídavým napětím byly měřeny závislosti ztrátového činitele na napětí a na teplotě. Napěťová závislost nevykazovala žádný trend. Trend se objevil pouze v teplotní závislosti, nejzřetelněji při teplotě 90 °C. Vývoj průměrné hodnoty ztrátového činitele jednotlivých sad v závislosti na době stárnutí je zobrazen na obr. 17. Jednotlivé body odpovídají průměru z pěti vzorků měřených při napětí 500 V při teplotě 90 °C.



obr. 17: vývoj ztrátového činitele v závislosti na době stárnutí, měření probíhalo při teplotě 90 °C a napětí 500 V



obr. 18: křivka odolnosti získaná z časového vývoje ztrátového činitele. Měření probíhalo při teplotě 90 °C a napětí 500 V, kritériem zestárnutí je  $\text{tg } \delta = 0,14$ .

Během experimentu byly všechny sady vzorků stárnutý na konečnou dobu 504 hodin. Dále byla vytvořena ještě jedna sada vzorků, aby bylo možné provést porovnání nového a stárnutého materiálu. Následně byla provedena zkouška elektrické pevnosti. Tato zkouška je destruktivní a vyžaduje velké množství experimentálního materiálu. Nevýhodou je obvykle velký rozptyl hodnot. Naopak výhodou této zkoušky je velká vypovídací schopnost, jelikož testovací signál je možno přímo srovnat s provozním

zatížením materiálu ve stroji. Průměr, výběrová směrodatná odchylka a variační koeficient z naměřených hodnot jednotlivých sad jsou zobrazeny v tab. 1. Je zde uvedena též elektrická pevnost  $E_p$  [V/m] vypočítaná podle vztahu (8). V technické praxi se používá jednotka [kV/mm].

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (8)$$

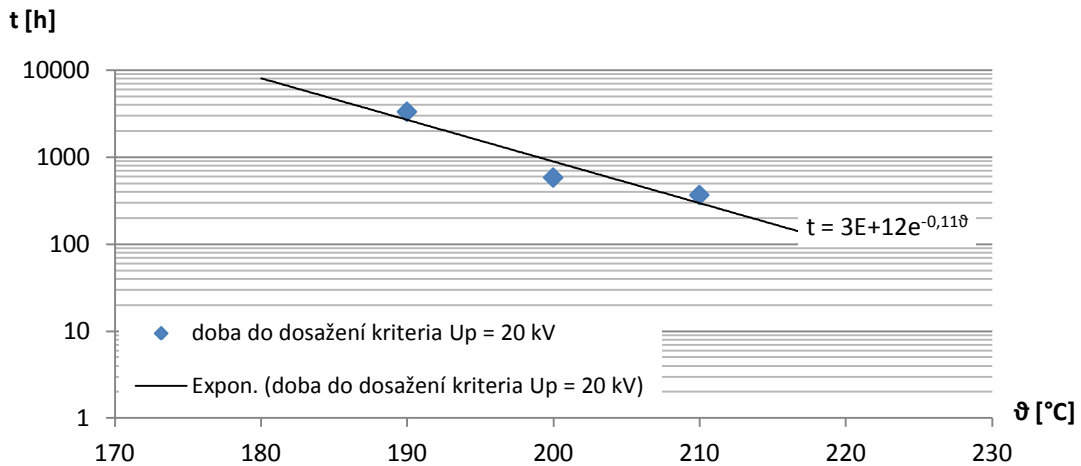
kde:  $U_p$  je průrazné napětí [V],  
 $d$  je tloušťka vzorku [m].

Zatímco průrazné napětí je u stárnutých vzorků nižší než u nových, elektrická pevnost sady 1, stárnuté při 190 °C, je vyšší než elektrická pevnost nových vzorků. Tento jev lze vysvětlit úbytkem materiálu vzorku během stárnutí. Pojivo, tedy pryskyřice, která v materiálu slouží zejména ke spojení plniva s nosnou složkou, je teplotně nejméně odolná a během stárnutí docházelo k její degradaci. Tyto projevy je možno sledovat vizuálně, ale též například měřením tloušťky. Úbytky tloušťky vzorků činí průměrně 5 % a jsou zobrazeny na obr. A 1 v příloze. Tloušťky jednotlivých sad vzorků byly porovnány metodou ANOVA, z níž vyplývá, že rozdíly středních hodnot jednotlivých sad nejsou statisticky významné na hladině významnosti 95 %. Tloušťku vzorků je tedy možné zanedbat a porovnávat hodnoty průrazného napětí.

tab. 1: průměrné hodnoty průrazného napětí jednotlivých sad a dopočítané parametry

sada	teplota stárnutí	$E_p$ [kV/mm]	$U_p$ [kV]		
			$\bar{x}$	$\sigma$	$v$
<b>nové vzorky</b>	-	63,51	29,37	3,84	6,05 %
<b>1</b>	190 °C	64,67	27,95	3,57	12,78 %
<b>2</b>	200 °C	47,63	21,24	1,60	7,52 %
<b>3</b>	210 °C	36,93	16,47	0,89	5,42 %

Křivka tepelné odolnosti získaná pomocí průrazného napětí je na obr. 19. Z výše uvedených křivek odolnosti je tato položena nejvýše a má nejvyšší směrnici.



obr. 19: křivka teplotní odolnosti materiálu získaná z průrazného napětí, kritériem je  $U_p = 20$  kV

Pro výpočet zbytkové životnosti zařízení s elektroizolačním systémem Relanex 45.033A je možné použít jednu z výše uvedených křivek odolnosti. Srovnání všech výše uvedených křivek odolnosti je provedeno na obr. A 2 v příloze. Výběr křivky závisí na požadované „přísnosti“ odhadu. Je možné vycházet z nejpřísnější křivky, nebo použít kombinaci. Dále je nezbytné zvolit vhodné mezní kritérium, pro které nastává konec života materiálu, resp. elektroizolačního systému. Výhodné je použití křivky sestavené z takového parametru, který je možno měřit on-line. Z hlediska přesnosti výpočtu je nejvhodnější křivka, která vychází z parametru s malým rozptylem hodnot a kde se hodnoty co nejméně vzdalují od trendu.

Pro matematický model výpočtu zbytkové životnosti byla použita křivka odolnosti, která vychází z parametru průrazné napětí. Tato křivka má nejsnáze definovatelné mezní kritérium, které může být dáno provozním napětím materiálu v konkrétní aplikaci.

### 3.7 Automatizace měření a zpracování dat

Pro vytváření vzorků a následné tepelné stárnutí bylo využito měřicího systému Compact DAQ výrobce National Instruments. Tento systém se skládá z šasi a měřicích modulů. Bylo použito šasi cDAQ-9181, které má 1 slot pro měřicí modul a ethernetový výstup, pomocí kterého je možné naměřená data odesílat po lokální síti, ale i přes



internet. Měřicí modul NI9207 disponuje 24-bitovým převodníkem, 8 napěťovými a 8 proudovými vstupy a umožňuje měření s frekvencí 500 S/s. Modul zpracovává napětí v rozsahu  $\pm 10$  V a proudy v rozsahu  $\pm 21,5$  mA. Pro měření teploty byly použity termočlánky. Výstupní napětí termočlánku je v jednotkách mV, čili pro přesnější měření je vhodné použít zesilovač. Pro vytvrzovací proces a stárnutí byla použita sušárna s automatickou regulací teploty, systém Compaq DAQ byl využit pouze pro orientační měření a kontrolu vytvrzovacího procesu, a tak zesilovač nebyl potřeba.

Naměřené hodnoty byly zpracovávány programem ve vývojovém prostředí LabView, hodnoty byly ukládány do TDMS (Technical Data Management Streaming) databáze. Tento datový formát byl vyvinut společností National Instruments a je vhodný pro zpracovávání velkých objemů dat. TDMS soubory lze otevřít i v tabulkovém procesoru MS Excel, čili práce s těmito soubory je pro uživatele komfortní.

## 4 Systém pro monitoring stavu elektrických zařízení

Metody on-line diagnostiky zmíněné v kap. 2 jsou stále dostupnější a jsou proto v praxi nasazovány. Při práci s velkým množstvím dat, čímž tyto diagnostické metody jsou, je nezbytné data přehledně uspořádat. Z tohoto důvodu je vhodné centralizovat sběr dat a též data centrálně vyhodnocovat. V praxi na každé zařízení působí současně několik deterioračních procesů, kterými jsou elektrické pole, teplota, mechanické otřesy, vlhkost a další. Potom pro získání komplexního přehledu o stavu sledovaného zařízení je nezbytné chápat tyto degradační činitele v souběhu a též stárnutí stroje modelovat s respektováním této skutečnosti.

Při centrálním zpracování je však nutné řešit problematiku různých datových formátů jednotlivých diagnostických metod. Zcela jiné požadavky budou na měření teploty (dlouhé časové konstanty tepelných dějů) a na měření vibrací (široké datové toky a velké množství zaznamenávaných dat). Z tohoto důvodu je nezbytné, aby monitorovací systém byl navržen multiplatformně. Taktéž výstupy z měřících zařízení jsou řešeny různým způsobem. Často se jedná o sběrnice USB, GPIB, CAN, RS 232 a jiné. Dnes již většina složitějších měřících přístrojů obsahuje též ethernetový výstup pro připojení do lokální sítě.

Tyto problémy s různými způsoby přenosu dat lze řešit pomocí dataloggerů, které data sbírají a odesílají například pomocí ethernetu centrálnímu serveru, který je zpracovává. Nevýhodou je zpoždění dané zpracováním dat.

Problematika životnosti elektroizolačních systémů je v současné době intenzivně řešena na Západočeské univerzitě v Plzni v rámci projektů MPO TIP, Nadace ČEZ za spolupráce se společnostmi ČEZ a ORGREZ [1], [3], [29], [30].

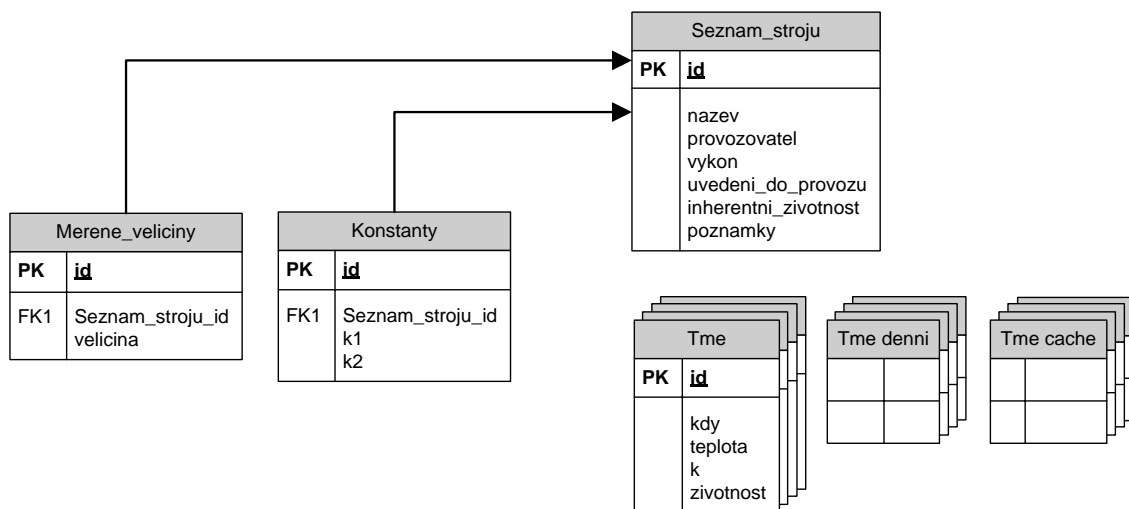
### 4.1 Program Elmon

Jedním z možných přístupů k řešení této problematiky je vytvořit program na základě jazyků pro tvorbu webových aplikací. Výhodou jsou nulové náklady na software, jelikož postačující vývojová prostředí existují i ve freeware verzi. Pro tvorbu tohoto programu byl využit textový editor PSPad [31], který je pro WWW stránky často využíván. Hotový program je složen z jednotlivých skriptů a zobrazen ve formě webových stránek, dostupných na [www.elmon.fel.zcu.cz](http://www.elmon.fel.zcu.cz). Jedinou podmínkou pro běh je tedy hosting, nebo webový server. V tomto případě bylo využito hostingu na serveru

Eryx, který poskytuje CIV ZČU, je však možné použít kterýkoliv jiný dostupný hosting s podporou php v.5.

#### 4.1.1 Struktura programu

Základem systému je databáze naměřených hodnot. Ta je zpracována pomocí databázového jazyka MySQL. Tento jazyk má širokou podporu u provozovatelů webových serverů. Struktura databáze je zobrazena na obr. 20. Jako primární klíč (PK - primary key) je zpravidla používáno id, s ohledem na jednoznačnost při vyhledávání. Postupem doby nastávají v záznamech poruchy, a tak je tabulka nekonzistentní, což ovšem ničemu nevádí. Použití časového razítka jako primárního klíče není vhodné v případě, že by systém obdržel více záznamů za sekundu. Pak by klíč nebyl jednoznačný a při výpočtech by vznikaly chyby vedoucí k ohrožení stability programu.



obr. 20: struktura databáze

Hlavní tabulkou databáze je tabulka seznam strojů, která uchovává informace o sledovaném stroji. Na ni jsou napojeny tabulky s měřenými veličinami a konstantami pomocí cizích klíčů (FK - foreign key). Provázání tabulek umožňuje zachování referenční integrity, například při mazání nebo editaci dat nadřazené tabulky.

Tabulky s naměřenými a vypočítanými hodnotami takto navázány nejsou. Jejich účel má jiný charakter. Jsou do nich zaznamenávány naměřené a vypočítané hodnoty, které jsou pak programem čteny.

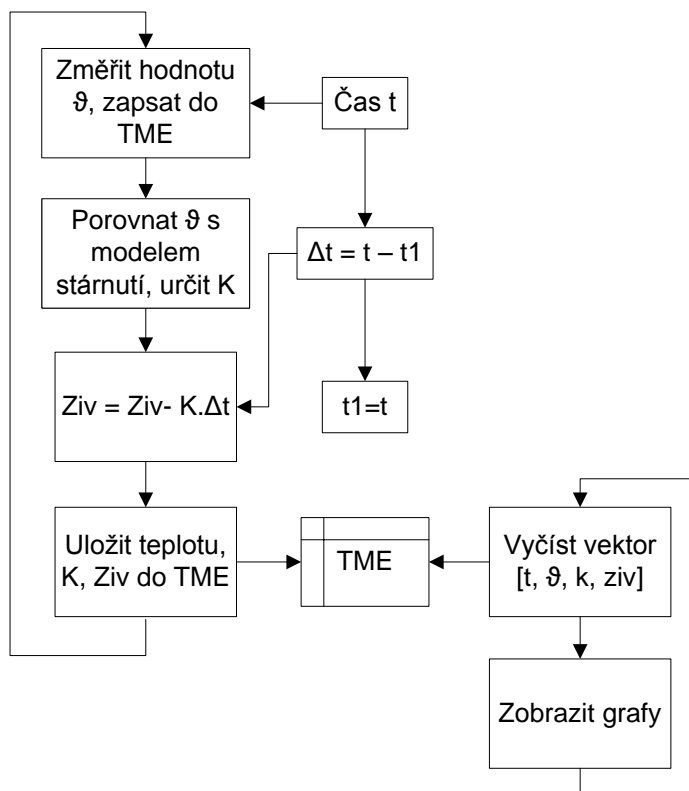
Databáze je obsluhována pomocí jazyka php, který se používá též pro tvorbu webových aplikací. Skripty jsou prováděny na straně serveru a nikoliv na straně

uživatele, jako je tomu např. u jazyka Java. To je nezbytné pro tuto aplikaci s ohledem na velký počet výpočetních operací. Veškeré výpočty jsou provedeny na straně serveru a uživateli se přenáší pouze odpověď na dotaz, respektive zobrazení výsledků.

#### 4.1.2 Výpočtová část

Skripty jsou dvojího druhu. První skupina slouží k záznamu naměřených hodnot a k výpočtu zbytkové životnosti. Pro záznam teploty je použita funkce GET, která je podporována čidlem a předává parametr zpracujícímu skriptu. Program umožňuje filtrovat IP adresu, čímž zamezí falešnému zápisu dat neoprávněným uživatelem. Do databáze se teplota ukládá spolu s časovým razítkem pro další zpracování. Následují skripty, které obsahují matematický model stárnutí pro předpokládané degradační mechanismy. S tímto modelem je porovnávána naměřená teplota a vypočítávána relativní rychlost stárnutí příslušná danému zatížení. Tímto způsobem lze program modulárně rozšířit o další měřené parametry a tím zpřesňovat informaci o stavu stroje.

Pokud jsou známy a popsány všechny degradační procesy působící na stroj, které jsou následně kvantifikovány pomocí naměřených veličin, lze postoupit k výpočtu zbytkové životnosti například dle schématu na obr. 21.



obr. 21: vývojový diagram výpočtu zbytkové životnosti zařízení

Čím větší množství veličin popisujících degradační procesy měříme, tím přesnější je výpočet zbytkové životnosti. Některé degradační procesy se ovlivňují, například teplota a elektrické pole. To je nutné respektovat při stanovení koeficientu relativní rychlosti stárnutí.

### 4.1.3 Koeficient relativní rychlosti stárnutí

Výše uvedený výpočetní algoritmus v nekonečné smyčce odečítá spotřebovaný život od inherentní životnosti sledovaného objektu. Spotřebovaný život je dán vztahem (9):

$$Z_s = k \cdot \Delta t, \quad (9)$$

kde:  $k$  je koeficient relativní rychlosti stárnutí [-],  
 $\Delta t$  je interval mezi jednotlivými měřeními [h].

Výsledný koeficient relativní rychlosti stárnutí lze obecně pro  $n$  degradačních faktorů počítat ze vztahu (10)

$$k = \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot k_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\beta_{ij} \cdot \sqrt{k_i \cdot k_j}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n (\gamma_{ijk} \cdot \sqrt[3]{k_i \cdot k_j \cdot k_k}) \quad (10)$$

+ ... ,  $i \neq j \neq k$

kde:  $k$  je výsledný koeficient relativní rychlosti stárnutí [-],  
 $k_i$  jsou dílčí koeficienty pro jednotlivé degradační mechanismy [-],  
 $\alpha_i$  jsou váhové koeficienty jednotlivých degradačních mechanismů [-],  
 $\beta_{ij}$  jsou váhové koeficienty interakcí prvního řádu [-],  
 $\gamma_{ijk}$  jsou váhové koeficienty interakcí druhého řádu [-].

Jednotlivé koeficienty  $k_i$  jsou podílem inherentní životnosti a známé křivky odolnosti působícímu degradačnímu mechanismu. Výpočet je obecně dán vztahem (11):

$$k = \frac{Z_i}{f_x}, \quad (11)$$

kde:  $Z_i$  je inherentní životnost objektu [h],

$f_x$  je funkce popisující křivku odolnosti vůči sledovanému degradačnímu mechanismu [h].

V uvedených programech je respektováno pouze teplotní stárnutí, a tak lze předchozí vztahy zjednodušit. Výsledný koeficient  $k$  je počítán ze vztahu (12).

$$k = \frac{2,6 \cdot 10^5}{3 \cdot 10^{12} \cdot e^{(-0,11 \cdot \theta)}} \quad (12)$$

V čitateli je hodnota inherentní životnosti v hodinách odpovídající 30 letům. Tato hodnota byla zvolena orientačně, pro potřeby výpočtu. Pro konkrétní aplikaci musí být tato hodnota určena exaktně. Obvykle jsou v praxi konstruovány stroje velkých výkonů s inherentní životností v řádu desítek let.

Ve jmenovateli vztahu (12) je funkce popisující křivku odolnosti získanou z měření průrazného napětí, kde kritérium zestárnutí bylo zvoleno 20kV.

Přesnost stanovení zbytkové životnosti je omezena několika faktory. Velikost chyby měření ovlivňuje i chybu stanovení jednotlivých koeficientů  $k_I$  až  $k_n$  a tím i výsledného koeficientu relativní rychlosti stárnutí  $k$ . To samozřejmě ovlivňuje přesnost stanovení konce života stroje.

Dále je třeba respektovat stochastický charakter degradačních procesů. Obdobně jako při zkoušce elektrické pevnosti jsou vzorky téhož materiálu proraženy při různých hodnotách velikosti napětí, tak i zde vykazuje životnost sledovaného objektu střední hodnotu a rozptyl.

Stanovení zbytkové životnosti tedy bude vždy pouze více či méně přesnou aproximací, ačkoliv je k němu využito exaktní numerické řešení a program vypisuje jako výsledek konkrétní číslo.

#### 4.1.4 Zobrazení výstupů

Druhá část skriptů slouží ke komunikaci s uživatelem. Výstupy jsou zobrazeny formou dynamické HTML stránky s použitím kaskádních stylů pro úpravu a rozvržení. Pomocí HTML tagů je možné tvořit webové stránky, které jsou snadno přenositelné a lze je zobrazit kdekoliv bez nároků na software. Provozovatel je tak schopen monitorovat stav všech strojů centrálně z jednoho dispečinku, ale též lokálně přímo u jednotlivých strojů. Stránky jsou pozicovány pomocí kaskádních stylů CSS, jak je v dnešní době běžné. Byla zvolena standardní struktura s nabídkou ve formě řádku

na horním okraji. Jednotlivé záložky umožňují přepínat různá zobrazení jak měřených, tak vypočítaných parametrů.

Veškerý text je volán pomocí php proměnných ze skriptů s jazykovým nastavením, čili je možné stránky zobrazit v českém jazyce, ale též v anglickém a německém. Překlad do jiného jazyka je pak možné dopsat velmi jednoduše.

V první části hlavní stránky se nacházejí dvě tabulky. V první jsou zobrazeny informace o stroji – název, provozovatel, výkon, uvedení do provozu, inherentní životnost a poznámky. Druhá tabulka obsahuje výčet monitorovaných parametrů. Dále je zde obrázek stroje. Pod tím je řádek záložek. Implicitně se otvírá první záložka se zbytkovou životností. Zde je uvedena zbytková životnost ve tvaru roky, měsíce, dny, hodiny, minuty, sekundy. Tento údaj je při každém zápisu naměřených hodnot přepočítáván a aktualizován. Dále je zde uveden koeficient  $k$  – relativní rychlost stárnutí v aktuálním okamžiku. Po stranách jsou šipky, které ukazují trend této veličiny. Pokud  $k$  roste, šipky ukazují vzhůru apod.

Po těchto údajích následují grafy zbytkové životnosti a působícího zatížení. Grafy jsou zde uvedeny proto, aby bylo možné sledovat tyto parametry společně, čímž je možné sledovat pro stroj nebezpečné stavy a případně diskutovat jejich omezení. Zbytková životnost je zobrazena v různých časových jednotkách (roky až sekundy), v závislosti na rozsahu časové osy. Náhled webové stránky je na obr. C 1 v příloze.

Další záložky obsahují grafy působícího zatížení za poslední 4 hodiny, den a pak v libovolný den, který je možno vybrat pomocí formuláře. Dále jsou zde počítány a uvedeny statistiky měřených parametrů – denní, týdenní, měsíční a roční.

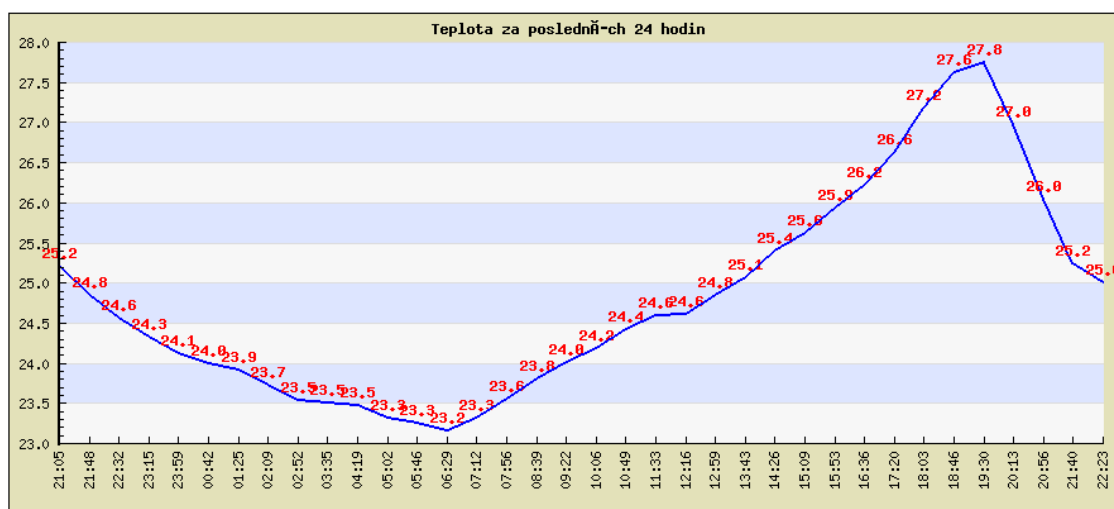
Pro přehledné zobrazení měřených hodnot a výsledků byly zvoleny grafy. Tvorba grafů není v php standardně zahrnuta, a tak je třeba vytvořit vlastní skripty pro vykreslování grafů, nebo použít již hotových knihoven. Zde byly využity dvě knihovny – OFCH a JP graph. Obě tyto knihovny jsou open-source. OFCH umožňuje tvořit různé typy grafů (čárové, bodové, sloupcové, výsečové, ...) ve formátu flash, verzi 8. Ukázka takového grafu je na obr. 22. Knihovna nabízí široké možnosti nastavení, které jsou snadno dostupné a i pro nezkušeného programátora poměrně intuitivní. Jednotlivé body grafu jsou spojeny úsečkami. Žádné možnosti interpolace, L-2 aproximace, ani vyhlazení křivek knihovna sama neumí. V případě potřeby je nezbytné danou funkci naprogramovat a výsledek vykreslit jako druhou křivku. Grafy jsou volány pomocí funkce, která má jako vstupní parametry vektory obsahující souřadnice vykreslovaných bodů.

Flashové grafy jsou interaktivní, při přejezdu myši se zvýrazní bod, nad kterým je ukazatel, a zobrazí se jeho souřadnice ve vyskakovací bublině. Po oddálení kurzoru bublina postupně zmizí. Tato funkce je již uvnitř deklaračních souborů, což programátorovi usnadňuje práci.



obr. 22: flashový graf vykreslený pomocí knihovny OFCH

Druhou variantou vykreslování grafů je knihovna JP graph na obr. 23. Tato knihovna má omezené možnosti nastavení a pracuje se s ní hůře. Grafy jsou statické, ve formě obrázku. Vzhled není tak propracovaný jako v případě flashe, avšak odpadá potíž s kompatibilitou. K zobrazení není třeba žádných dalších aplikací, stačí pouze internetový prohlížeč. Z tohoto důvodu byla použita též tato knihovna. Mezi knihovnami je možno přepínat na stránce, avšak implicitně jsou grafy vykreslovány technologií flash.



obr. 23: graf vytvořený pomocí knihovny JP Graph



## 4.2 Program v prostředí LabView

Výhodou programu Elmon jsou nulové náklady na software. Php ovšem není jazykem určeným k takovému použití. Výše popsané řešení je funkční pouze pro omezené množství dat. Je to tedy vhodné řešení pro systémy měření teploty, kde jsou dlouhé časové konstanty a není proto třeba měřit teplotu velmi často. Naopak například při měření vibrací pomocí skupiny akcelerometrů, kde je třeba zpracovávat široký datový tok a ještě velmi rychle, je takovéto řešení nevhodné.

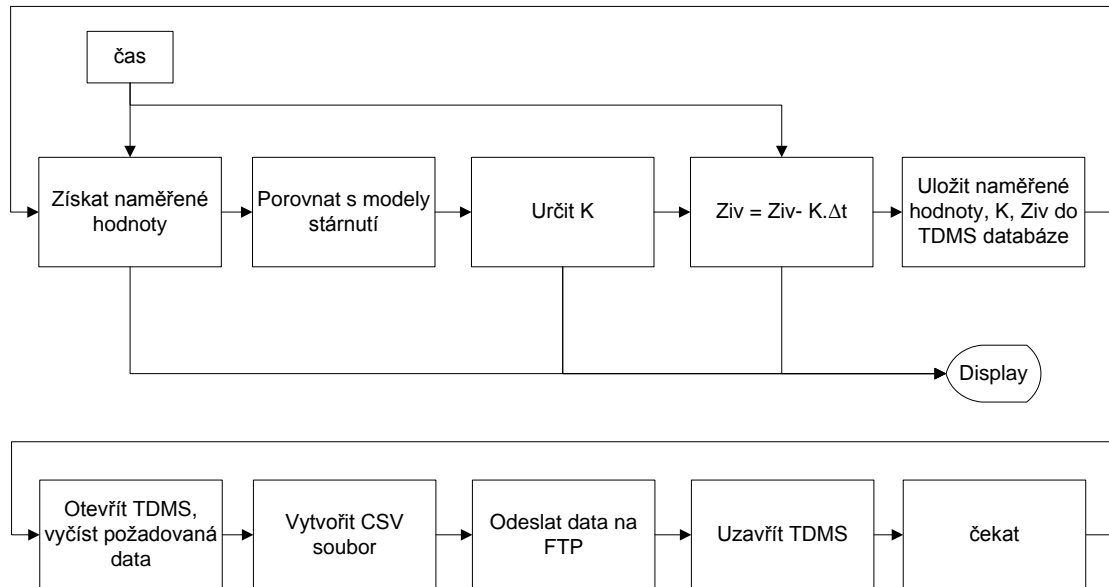
V takovém případě se tedy neobejdeme bez specializovaného software pro toto použití. Jednou z možností je využít grafické programovací prostředí, například SW LabView od National Instruments [32]. Tento SW umožňuje technikům konfigurovat a vyvíjet simulační, měřicí, řídicí a automatizační systémy a používat při tvorbě aplikačního programu ikony namísto řádků zdrojového kódu. Na rozdíl od textových jazyků se v grafickém prostředí využívá programování na principu datového toku, kde tok dat procházející uzly v blokovém diagramu určuje posloupnost provádění funkcí (tzv. data flow model).

Pro techniky je grafické programování přínosné zejména díky jednoduchému a přehlednému kódu. Z částí kódu je možné tvořit podprogramy a mezi nimi předávat parametry, tak jako u klasických programovacích jazyků. Hotové programy jsou snadno čitelné, často nevyžadují další komentář a odpadá nutnost hlídání syntaxe. Další výhodou je jednoduché naučení základů grafického programování. Bohužel má grafické programování i nevýhody, z nichž lze zmínit např. obtížnou optimalizovatelnost kódu.

### 4.2.1 Struktura programu

Programy v LabView se nazývají „Virtual Instruments“ (VI). Jsou tvořeny dvěma okny. První se nazývá „Front Panel“ (obr. D 1), jsou zde indikátory a ovládací prvky. Toto okno slouží ke komunikaci s uživatelem VI. Druhé okno se nazývá „Block Diagram“ (obr. D 2) a slouží k zápisu kódu pomocí grafických ikon a jejich propojení. Toto druhé okno může být uživateli skryto, aby omylem nezměnil program.

Struktura programu, která je zobrazená na obr. 24, vychází z předchozího případu. Výstupní data jsou dostupná pouze na počítači, na kterém program běží. Proto byl doplněn ještě o odesílání hodnot na FTP server, odkud je možné data číst a zobrazit na libovolném počítači.



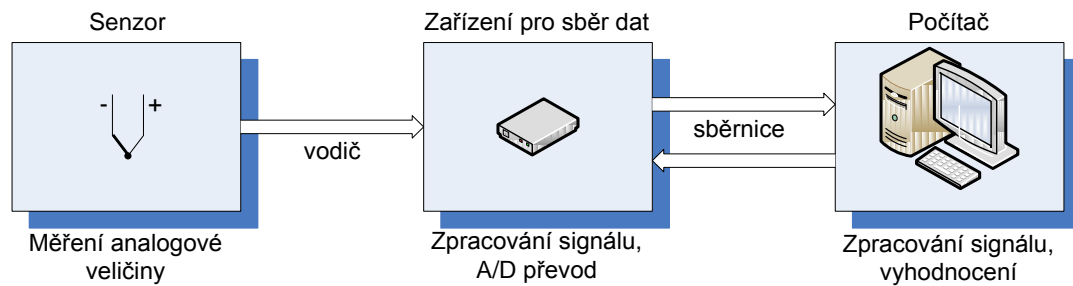
obr. 24: vývojový diagram programu v prostředí LabView

#### 4.2.2 Získávání dat

Pro nasazení programu pro výpočet zbytkové životnosti v praxi je zásadní, aby byl kompatibilní se všemi dosud použitými diagnostickými systémy a aby umožnil zpracovávat jejich signály. Vývojové prostředí LabView podporuje nejvýznamnější počítačové a průmyslové sběrnice (RS 232, GPIB, Modbus, USB, PCI, PCI Express, PXI, PXI Express, bezdrátové sítě a sítě Ethernet, ...). Pokud nějaký typ komunikačního protokolu není implementován v LabView, pak jej lze doprogramovat. Teoreticky je tedy možná spolupráce s jakýmkoliv aktuálně provozovaným diagnostickým zařízením, které je vybaveno výstupem dat.

Společnost National Instruments vyvíjí a nabízí vlastní zařízení pro získávání a sběr dat (angl. Data Acquisition, DAQ), od velmi jednoduchých až po velmi výkonné komplexní systémy. Samozřejmostí je plná kompatibilita s prostředím LabView a tím ulehčení práce pro programátora.

Měřicí řetězec se skládá ze senzorů, které mohou být různého charakteru a mohou měřit různé veličiny. Signál je dále vodiči přiváděn do zařízení pro sběr dat, které signál zpracuje. Zpracování může být různé v závislosti na charakteru sledované veličiny. Jedná se především o zesílení, odfiltrování rušení, galvanické oddělení a převod na digitální signál. Zařízení pro sběr dat je spojeno některým typem sběrnice s počítačem, kde probíhá konečné zpracování signálu. Schéma měřicího řetězce je na obr. 25.



obr. 25: schéma měřicího řetězce

V tomto případě byl pro měření použit termočlánek, následovalo zpracování signálu pomocí zařízení NI CompactDAQ a přenos dat pomocí lokální sítě na PC.

### 4.2.3 Zobrazení výstupů

LabView umožňuje velmi přehledně nakonfigurovat „Front Panel“ s indikátory a ovladači. Indikátory jsou trojího typu (obr. 26):

- buňka s číslem, resp. textem, popř. dioda pro binární informaci
- hladinoměr, ručkový přístroj, posuvník
- graf



obr. 26: indikátory, které LabView používá k zobrazení výstupů

Tyto prvky umožňují velmi přehledně zobrazovat velké množství informací na malém prostoru. Nevýhodou je, že jsou informace dostupné pouze na počítači, kde program běží. Aby byla data dostupná i na jiném zařízení, byl program doplněn o odesílání dat pomocí FTP protokolu. Takto jsou data odesílána na webový server, kde jsou zobrazena stejným způsobem jako v případě programu Elmon.

## 5 Závěr

Finanční úspory a zvyšování efektivity jsou trvalou snahou provozovatelů elektrických zařízení vysokých výkonů. Jedním z možných nástrojů k tomuto účelu je condition based management. V předkládané práci je popsán současný režim údržby elektrických strojů a jeho nevýhody. Nutností při přechodu na CBM je přesný popis stavu sledovaného zařízení, zejména jeho elektroizolačního systému. Aktuální popis stavu je možný na základě on-line diagnostiky, která je v současnosti dostupná a v praxi nasazovaná. V této práci je navržen systém pro monitoring stavu elektrických zařízení včetně metodiky výpočtu zbytkové životnosti. S ohledem na šíři této problematiky byly vytvořeny dva programy pro výpočet zbytkové životnosti na základě on-line monitoringu.

První program využívá webové programovací jazyky. Toto řešení je vhodné pro malá zařízení. Výhodou jsou velmi nízké ekonomické, softwarové a hardwarové nároky. Nevýhodou je omezený výpočetní výkon, který je postačující pouze pro pomalu se měnící veličiny. Tento program měří a zpracovává teplotu, která je významným degradačním činitelem v elektrických strojích. Výstupem je vypočítaná zbytková životnost a její časový vývoj zobrazený v grafu, dostupný na [www.elmon.fel.zcu.cz](http://www.elmon.fel.zcu.cz).

Druhý program využívá grafického prostředí LabView a je tvořen modulárně, takže jej lze snadno rozšířit o měření dalších parametrů. Toto řešení umožňuje zpracovávat širší datové toky s frekvencí, která je postačující pro všechny současné diagnostické veličiny. Tím odstraňuje hlavní nevýhodu předchozího řešení. Tento program může být využit pro monitoring velmi důležitých zařízení elektrizační soustavy.

Současně s vývojem softwaru byl naplánován a realizován experiment zabývající se sledováním odolnosti elektroizolačního materiálu vůči teplotní degradaci. Byl zabezpečen materiál Relanex 45.033A, výrobce COGEBI a.s. Tábor. Typická oblast použití tohoto materiálu je hlavní izolace statorových tyčí synchronních generátorů. Z tohoto materiálu byly vytvořeny ploché vzorky, které byly podrobeny zrychlenému laboratornímu stárnutí na třech úrovních. V průběhu stárnutí byly postupně měřeny všechny dostupné diagnostické parametry. Podle předpokladů byl nejvhodnějším parametrem pro sestavení křivek odolnosti ztrátový činitel  $\tan \delta$ . Byly tedy měřeny závislosti ztrátového činitele na teplotě a na napětí. Tento předpoklad se nepotvrdil. Stárnutí se na hodnotách ztrátového činitele projevilo, avšak výsledky vykazovaly velký

rozptyl. Z tohoto důvodu nebyly pro modelování odolnosti použitelné. Křivky odolnosti byly sestaveny z ostatních měřených parametrů (izolační odpor, vnitřní rezistivita, elektrická pevnost).

V průběhu experimentu byla dále rozvíjena a zpřesňována metodika výpočtu zbytkové životnosti. Sestavené programy respektují zatím pouze jeden degradační faktor, kterým je teplota. Uvedené matematické modely odolnosti vychází z parametrů, které není možné měřit metodami on-line diagnostiky. Přesnější popis by mohl poskytnout model založený na parametru měřitelném on-line, který se zatím v rámci předloženého experimentu nepodařilo získat.

Úkolem do budoucna je dále zpřesňovat popis deteriorace elektroizolačních systémů zejména s ohledem na interakce mezi jednotlivými degradačními mechanismy. Pro nasazení programů pro výpočet zbytkové životnosti v praxi je nezbytné zajistit komunikaci mezi programem a použitými diagnostickými systémy včetně propojení databází naměřených hodnot.

## Použitá literatura

- [1] Mentlik, V.; Pihera, J.; Polanský, R.; Prosr, P.; Trnka, P., Diagnostika elektrických zařízení, 1. vyd., Praha: BEN – technická literatura, 2008, 439 s., ISBN 978-80-7300-232-9
- [2] Montanari, G.C.; , "A comparative investigation of electrothermal endurance models for insulating materials and systems characterization," Electrical Insulation Magazine, IEEE , vol.13, no.3, pp.13-25, May-June 1997, doi: 10.1109/57.591521, dostupný z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=591521&isnumber=12973>
- [3] Mentlik, V., Dielektrické prvky a systémy, 1. vyd., Praha: BEN – technická literatura, 2006, 235 s., ISBN 80-7300-189-6
- [4] Koutský, J.: Degradací procesy a predikce životnosti, FST, ZČU, Plzeň, 1995, ISBN: 80-7082-177-9, 166s.
- [5] Bartnikas, R.; Morin, R.; , "Multi-stress aging of stator bars with electrical, thermal, and mechanical stresses as simultaneous acceleration factors," Energy Conversion, IEEE transactions on , vol.19, no.4, pp. 702- 714, Dec. 2004, doi: 10.1109/TEC.2004.832060, dostupný z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1359949&isnumber=29826>
- [6] Fortin, T.; Duffeau, F.; , "Large generator vibration monitoring," Electrical Machines and Drives, 1997 Eighth International Conference , 1997, doi: 10.1049/cp:19971058, dostupný z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=677079&isnumber=14907>, cit. dne: 26.12.2011.
- [7] Tůmová, O.; Pirich, D.: Nástroje řízení jakosti a základy technické diagnostiky, 1. vyd., Západočeská univerzita v Plzni, 2003, 153 s., ISBN 80-7043-247-0
- [8] Bastian, P., a kol.: Praktická elektrotechnika, 2. vyd., Praha: Europa Sobotáles, 2006, 303 s., ISBN 80-86706-15-X
- [9] Schmidt, G., Thien, D., Ewert, F., Biesemann, M., Gradinarov, P.: Online and offline diagnostics as a successful interaction for CBM on turbogenerators, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, September 6-11, Tokyo, Japan, 2010.
- [10] Wessels, W.R.; Sautter, F.C.; , "Reliability analysis required to determine CBM condition indicators," Reliability and Maintainability Symposium, 2009. RAMS 2009. Annual , pp.454-459, 26-29 Jan. 2009, dostupný z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4914719&isnumber=4914625>

- [11] Ukhita A.W, N.; Pharmatrisanti, A.; , "Preparation of power transformer's CBM implementation in PLN P3B Jawa Bali," Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference on , vol., no., pp.838-841, 21-24 April 2008, dostupný z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4580414&isnumber=4580203>
- [12] Bennane, A.; Yacout, S.; , "Processing missing and inaccurate data in a condition based maintenance database," Computers and Industrial Engineering (CIE), 2010 40th International Conference on, pp.1-5, 25-28 July 2010, dostupný z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5668354&isnumber=5668158>
- [13] Velasquez, J.L.; Villafafila, R.; Lloret, P.; Molas, L.; Sumper, A.; Galceran, S.; Sudria, A.; "Development and implementation of a condition monitoring system in a substation," Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. EPQU 2007. 9th International Conference on , pp.1-5, 9-11 Oct. 2007, dostupný z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4424192&isnumber=4424073>
- [14] ČSN EN 60270 Technika zkoušek vysokým napětím – Měření částečných výbojů; Praha: Český normalizační institut, 2001, 48 s.
- [15] Intelligent diagnostic device (IDD), katalog Doble Lemke GmbH, dostupný z: [http://www.doble-lemke.eu/en/Products/Continuous\\_Online\\_Diagnostics/IDD.html#](http://www.doble-lemke.eu/en/Products/Continuous_Online_Diagnostics/IDD.html#), cit. dne: 14.1.2012.
- [16] Müllerová E.: Acoustic Measurement in Power Transformer Diagnostics; Komunalna energetika, Maribor, 2007, ISBN: 978-961-248-018-9
- [17] Tenbohlen, S., Pfeffer, A., Coenen, S.: On-site experiences with multi-terminal IEC PD measurements, UHF PD measurements and acoustic PD localisation; Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium, 2010, doi: 10.1109/ELINSL.2010.554973, dostupný z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5549738&isnumber=5549357>, cit. dne:26.12.2011.
- [18] ČSN EN 60599 (34 6726) Elektrická zařízení v provozu plněná izolačním olejem - Pokyn pro interpretaci výsledků analýz rozpuštěných a volných plynů, 2000.
- [19] katalog výrobků Hydran, Měřicí a diagnostická technika pro oblast energetiky a průmyslu, dostupný z: <http://www.tmvss.cz/Aplikace/Monitoring-TRF.html>, cit. dne: 14.1.2012.
- [20] katalog výrobků Calisto, Tectra a.s. – Monitoring a diagnostika transformátorů, dostupný z: <http://tectra.cz/monitoring-transformatoru>, cit. dne: 14.1.2012.

- [21] ČSN IEC 60076-7, Výkonové transformátory- část 7: směrnice pro zatěžování olejových výkonových transformátorů, 2007.
- [22] Rioual, M.; , "Presentation of a system for the improvement of the on-line thermal monitoring on 900 MW turbogenerators for predictive maintenance purposes ," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.12, no.2, pp.157-165, Jun 1997, doi: 10.1109/60.629698, dostupný z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=629698&isnumber=13681>.
- [23] Meško, B., Orešković, O., Husnjak, O.: Monitorování elektráren za pomoci LabVIEW a CompactRIO, Automa – časopis pro automatizační techniku, č.5 – květen 2010, pp 46-47, ISSN 1210-9592, FCC Public.
- [24] GE Energy: Generator monitoring products, dostupný z: [http://www.ge-energy.com/products\\_and\\_services/products/generators/generator\\_monitoring\\_products.jsp](http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/generators/generator_monitoring_products.jsp), cit. dne: 16.1.2012.
- [25] TES – testování energetických systémů: Monitorovací systém MOSAD, dostupný z: <http://www.tesnet.cz/cs/produkty-diagnostika.php>, cit. dne: 16.1.2012.
- [26] ČSN IEC 93 HD 429 (34 6460) Skúšky tuhých elektroizolačných materiálů: Metódy merania vnútornej rezistivity a povrchovej rezistivity tuhých elektroizolačných materiálů, Praha: Český normalizační institut, 1993, 17 s.
- [27] ČSN IEC 250 Doporučené postupy ke stanovení permitivity a ztrátového činitele elektroizolačních materiálů při průmyslových, akustických a rozhlasových kmitočtech včetně metrových vlnových délek, Praha, Český normalizační institut, 1998, 32s.
- [28] ČSN EN 60216 – Vlastnosti tepelné odolnosti, části 1 – 6, Praha, Český normalizační institut
- [29] Mentlík, V. , Trnka, P.: Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách; Srní 2010, ISBN 978-80-7043-931-9.
- [30] Mentlík, V., Trnka, P.: Aspekty zjišťování spolehlivosti elektrických zařízení – generátorů, Elektro odborný časopis pro elektrotechniku, č.1 – leden 2011, pp 6-10, ISSN 1210-0889, FCC Public.
- [31] PSPad – freeware textový editor, dostupný z: <http://www.pspad.com/cz/>, cit. dne:17.9.2011
- [32] LabView – programovací prostředí, dostupný z: <http://www.ni.com/labview/>, cit. dne: 20.11.2011



## **Přílohy**

<b>A. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>1</b>
<b>B. MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE A POMOCNÉ VYBAVENÍ.....</b>	<b>4</b>
<b>C. SCREENSHOT APLIKACE ELMON .....</b>	<b>4</b>
<b>D. PROGRAM V LABVIEW .....</b>	<b>5</b>
<b>E. HARDWARE PRO MĚŘENÍ A PŘENOS DAT PO LOKÁLNÍ SÍTI .....</b>	<b>7</b>

## A. Vyhodnocení měření

tab. A 1: vypočtené hodnoty izolačního odporu, vnitřní rezistivity a polarizačních indexů pro jednotlivé sady vzorků

	sada	$\bar{x}$	$\sigma$	$v$	$Me$
$\rho$ [ $\Omega.m$ ]	1	9,36E+14	1,73E+14	18,5 %	9,15E+14
	2	1,4E+15	2,69E+14	19,2 %	1,38E+15
	3	1,33E+15	8,97E+13	6,8 %	1,33E+15
$R_{iz}$ [ $\Omega$ ]	1	5,87E+13	8,97E+12	15,3 %	5,55E+13
	2	6,88E+13	1,71E+13	24,8 %	6,12E+13
	3	8,77E+13	1,91E+13	21,8 %	7,84E+13
$p_i$ [-]	1	2,97342	0,204781	6,9 %	3,03
	2	3,155124	0,405479	12,9 %	3,20
	3	3,375988	0,245529	7,3 %	3,38

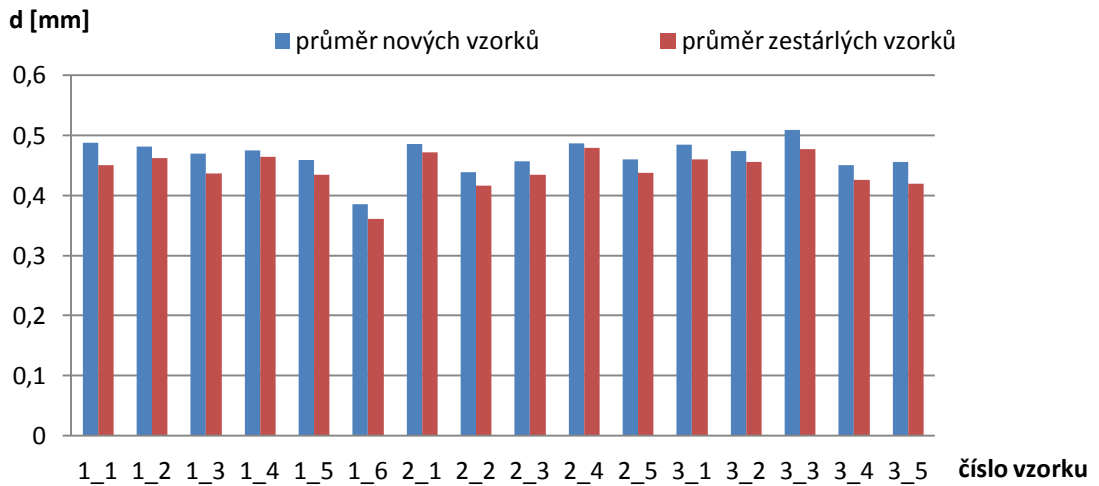
tab. A 2: testování shodnosti střední hodnoty tloušťky jednotlivých sad vzorků metodou ANOVA

### Faktor

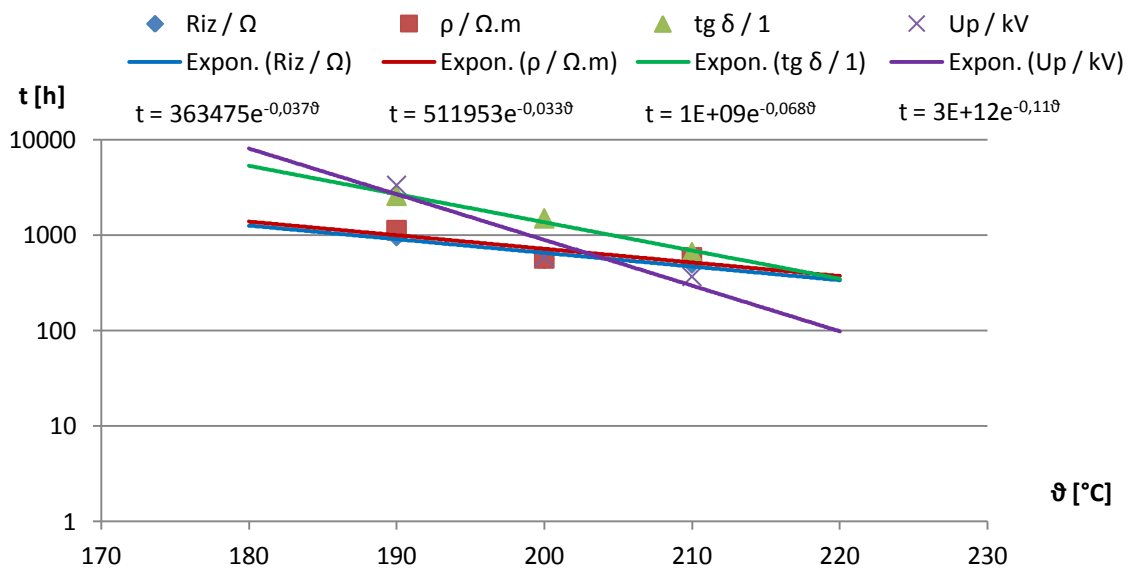
Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
nové vzorky	5	2,312	0,4624	0,000534
sada 1	6	2,6078	0,434633	0,001466
sada 2	5	2,2393	0,44786	0,000698
sada 3	5	2,2375	0,4475	0,000591

### ANOVA

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	0,002104	3	0,000701	0,815136	0,503084	3,196777
Všechny výběry	0,014626	17	0,00086			
Celkem	0,01673	20				



obr. A 1: průměr tloušťky jednotlivých vzorků po vyrobení a po zestárnutí



obr. A 2: porovnání vypočítaných křivek odolnosti pro různé diagnostické veličiny

## B. Měřicí přístroje a pomocné vybavení



obr. B 1: počítačový měřicí systém LDV5 pro střídavé zkoušky (vlevo) a pikoampérmetr Keithley (vpravo) pro stejnosměrné zkoušky

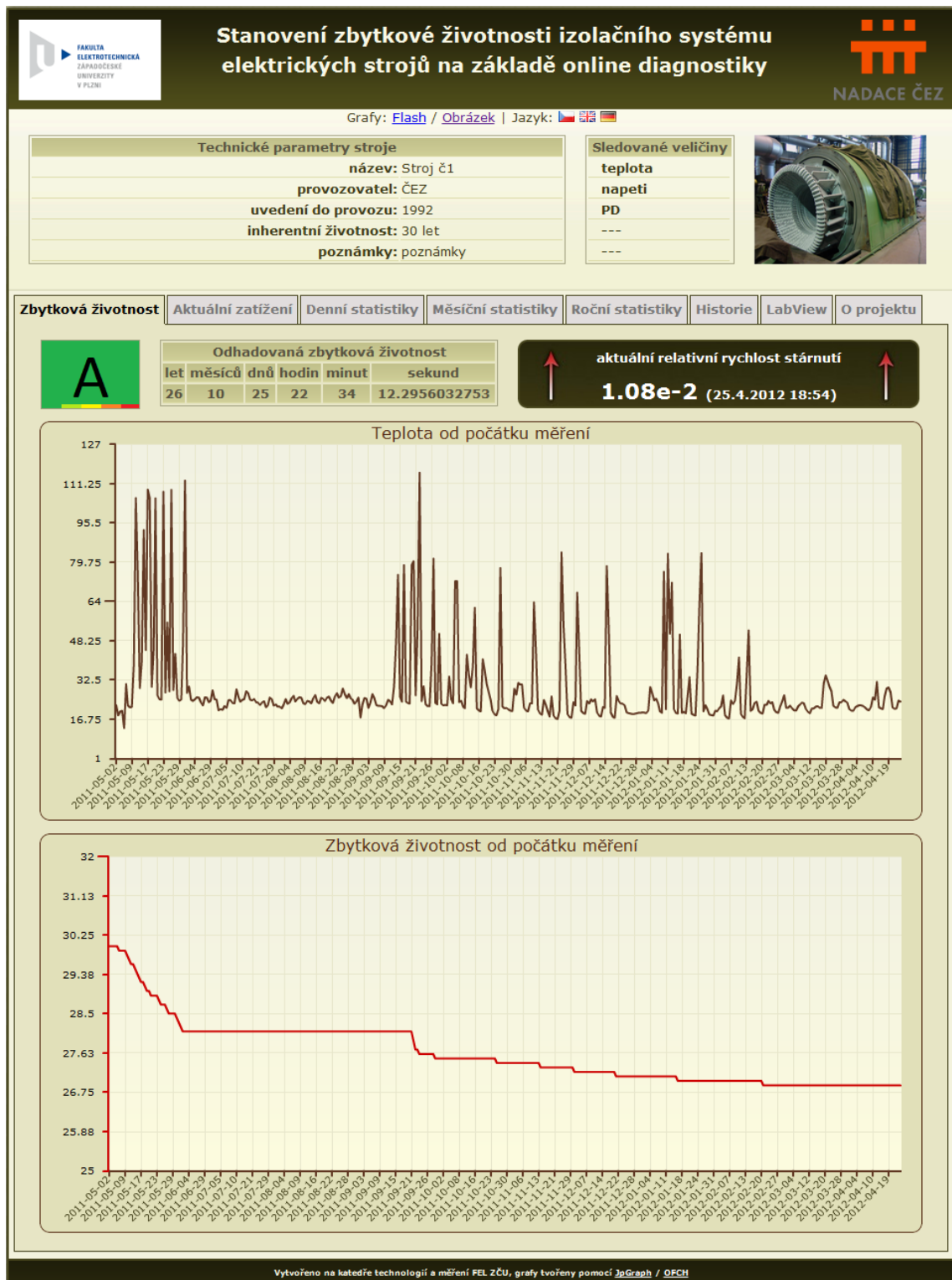


obr. B 2: elektrodový systém použitý pro měření stejnosměrných zkoušek a napěťové závislosti ztrátového činitele  $\tan \delta$



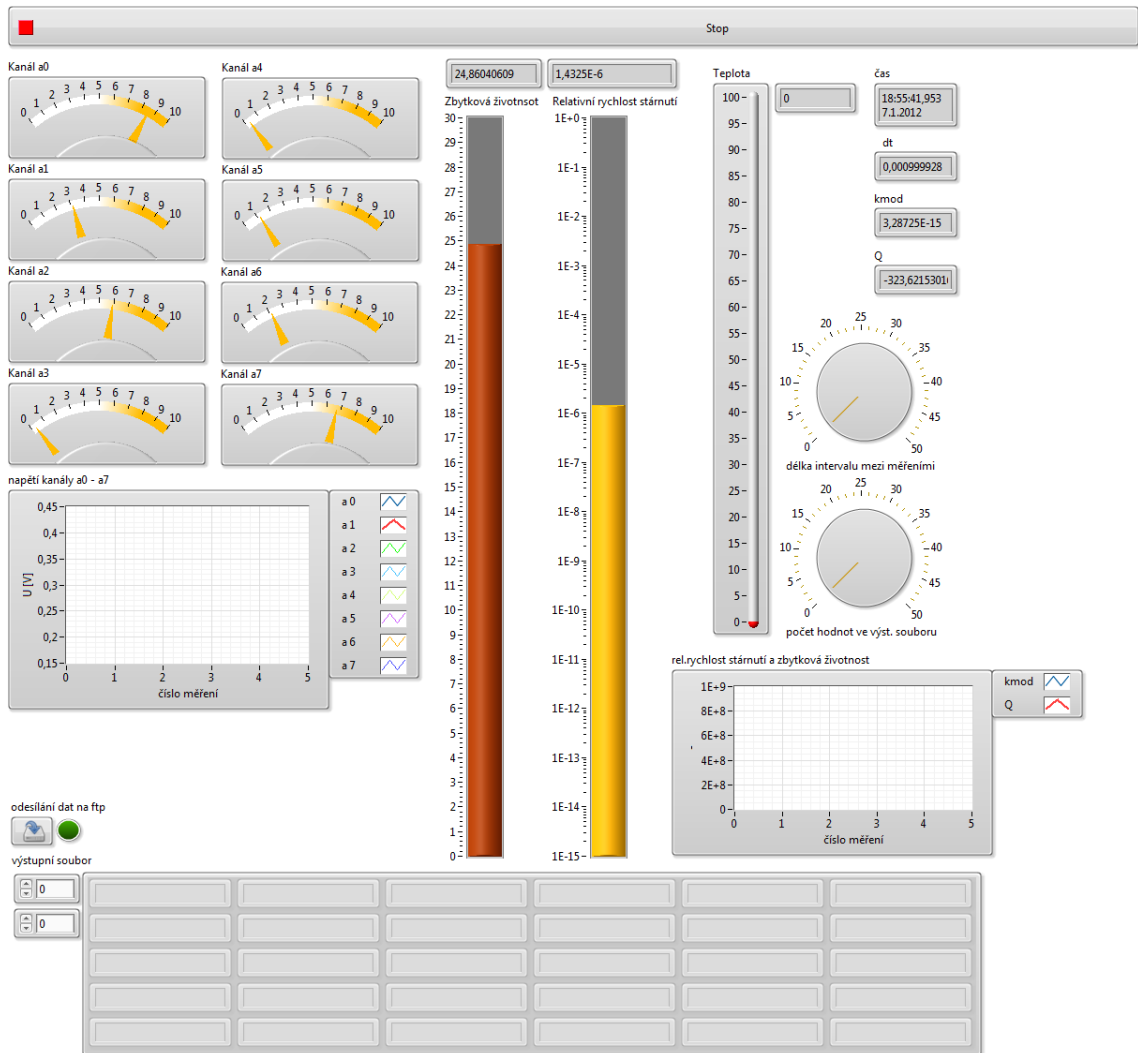
obr. B 3: kondenzátor s vyhřívánými elektrodami (vlevo) a teplotní regulátor (vpravo) pro měření tepelné závislosti ztrátového činitele  $\tan \delta$

## C. Screenshot aplikace Elmon

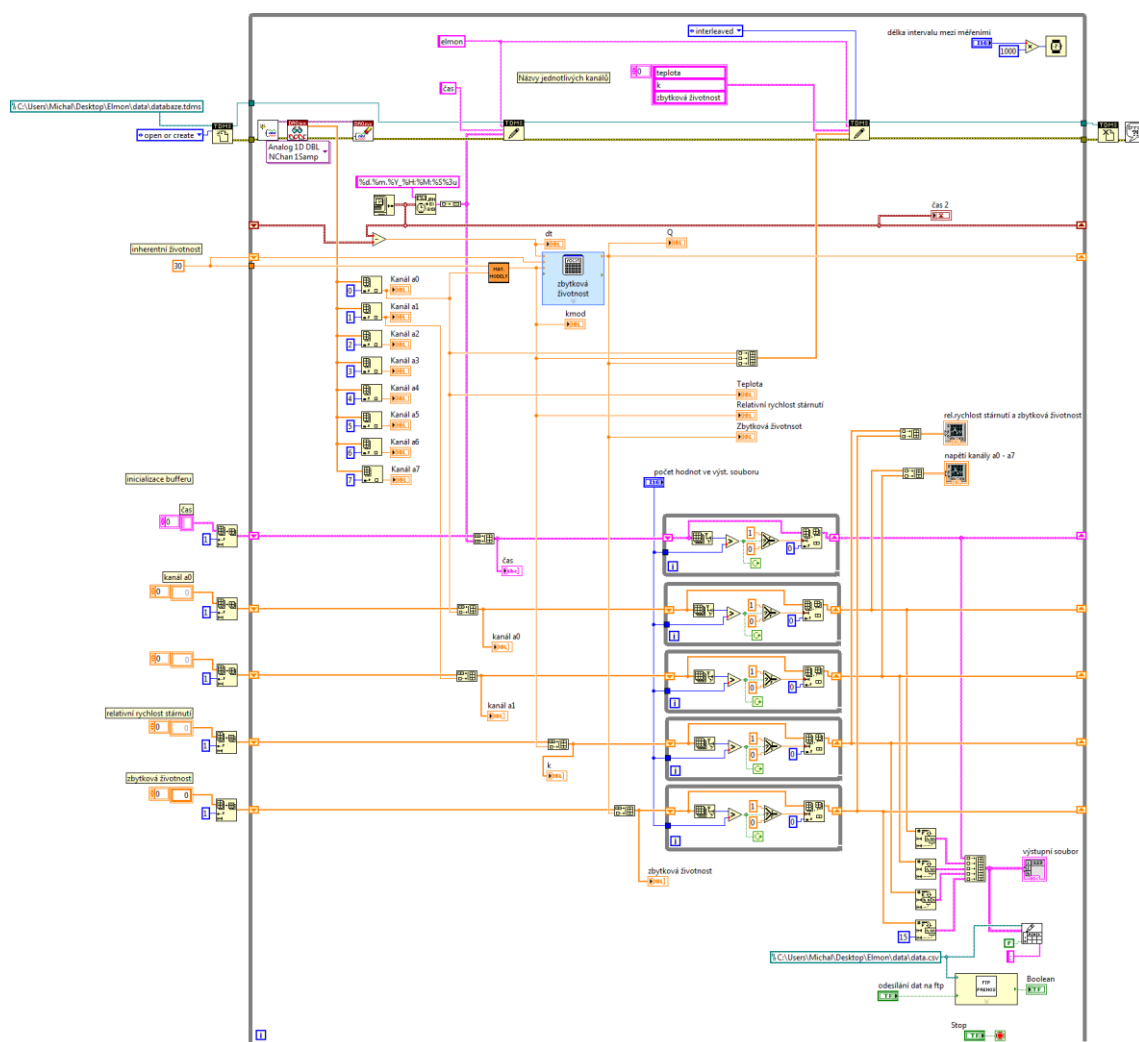


obr. C 1: screenshot aplikace Elmon z [www.elmon.fel.zcu.cz](http://www.elmon.fel.zcu.cz)

## D. Program v LabView



obr. D 1: „Front Panel“ programu pro výpočet zbytkové životnosti v prostředí LabView

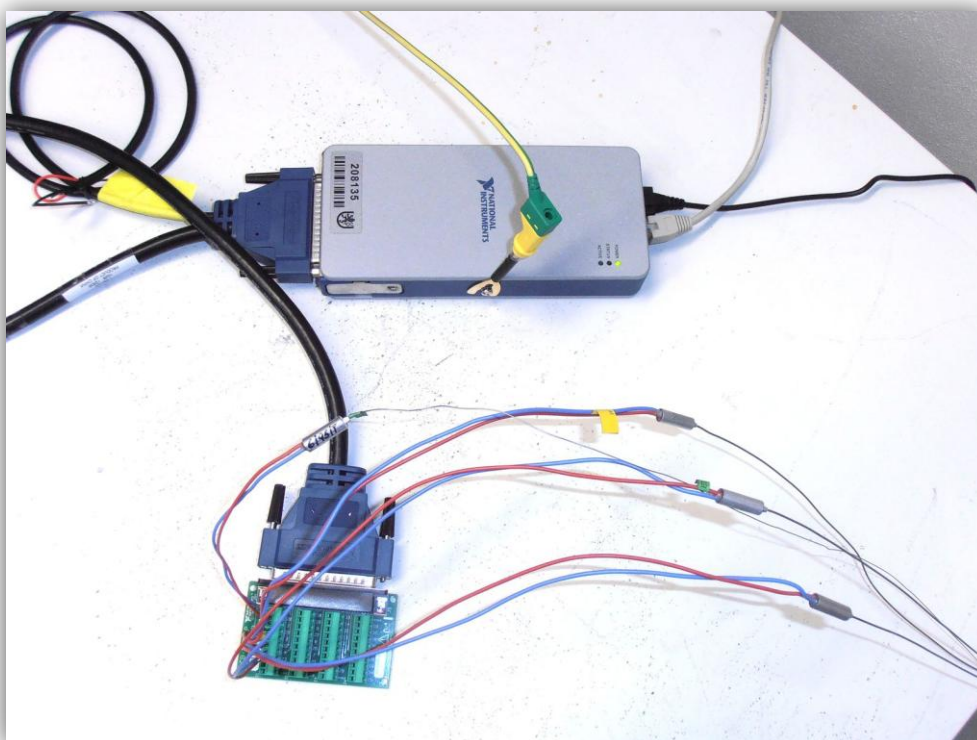


obr. D 2: „Block Diagram“ programu pro výpočet zbytkové životnosti v LabView

## E. Hardware pro měření a přenos dat po lokální síti

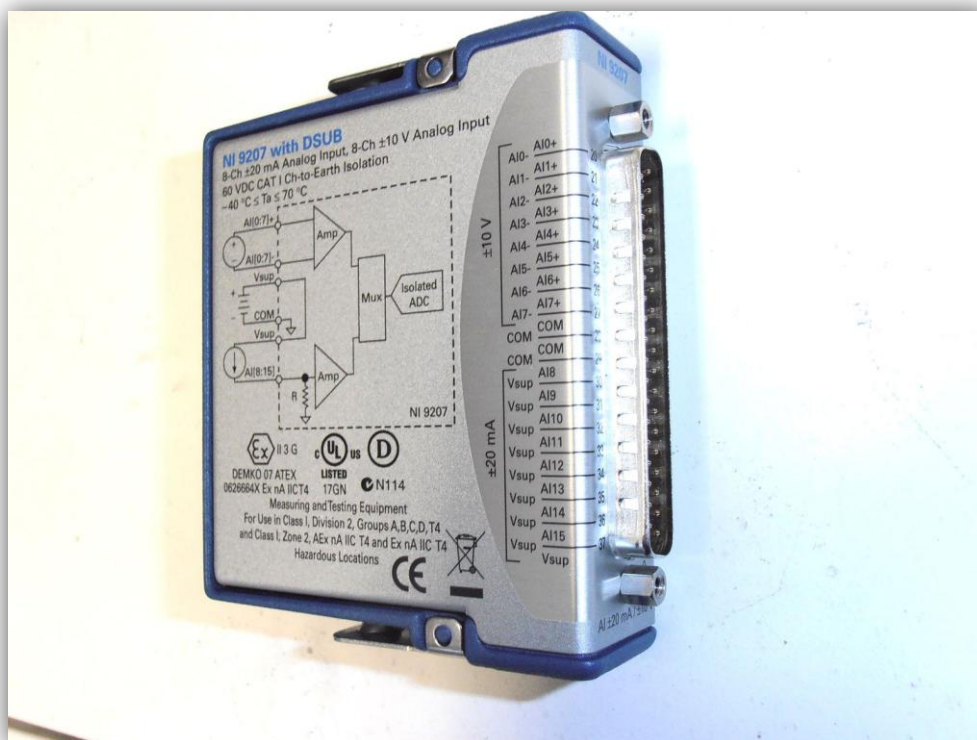


obr. E 1: TME – ethernetový teploměr výrobce Papouch s.r.o.



obr. E 2: sestava CompactDAQ výrobce National Instruments – ethernetové chasis NI 9018 a modul NI 9207 s zapojenými čtyřmi termočlánky





obr. E 3: DAQ modul NI 9207 s 8 napětovými a 8 proudovými vstupy