



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY
KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS
DESIGN AND PROCESS ENGINEERING

PŘÍSPĚVEK K DIAGNOSTICE VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

CONTRIBUTION TO THE DIAGNOSIS OF POWER OIL TRANSFORMERS

ZKRÁCENÁ VERZE PhD Tesis

AUTOR PRÁCE

Ing. MARTINA ŠIMKOVÁ

ŠKOLITEL

Doc. Ing. MILOŠ HAMMER, CSc.

OPONENTI

DATUM OBHAJOBY

Klíčová slova: výkonový olejový transformátor, diagnostika, papír, olej, plynová chromatografie

Key words: power oil transformer, diagnostics, paper, oil, gas-liquid chromatography

NÁZEV PRACOVNÍŠTĚ KDE JE ULOŽEN RUKOPIS

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY – ODBOR
ELEKTROTECHNIKY

© Martina Šimková, 2010

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů..

ISBN 80-214-
ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 CÍLE PRÁCE	7
3 TEORETICKÁ ČÁST.....	8
3.1 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA	8
3.2 EXPERTNÍ SYSTÉMY	10
4 PRAKTICKÁ ČÁST	10
4.1 POPIS DATOVÉHO SOUBORU	10
4.2 VÝSLEDKY PLYNOVÉ CHROMATOGRFIE	10
4.3 VYBRANÉ OSTATNÍ VÝSLEDKY	13
4.4 EXPERTNÍ SYSTÉM.....	15
5 PŘÍNOS PRÁCE	15
6 ZÁVĚR.....	17
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	18
ŽIVOTOPIS-CV	19
VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST	20
VYTVOŘENÉ PRODUKTY	21
ABSTRACT	21

1 ÚVOD

Pro fungování a rozvoj společnosti je důležitá **bezporuchová distribuce a využívání elektrické energie**. Uvedená skutečnost je závislá ve značné míře na **výkonových olejových transformátorech**, které tvoří na cestě od výroby elektrické energie směrem ke spotřebiteli a u spotřebitele jeden z nejdůležitějších prvků.

V technickém životě transformátorů může dojít k různým **poruchám a haváriím**, rovněž transformátor přirozeně **stárne**. V případě poruchy nebo havárie transformátorů dojde k přerušení dodávky elektrické energie, což má celou řadu důsledků, jako např. značné škody v průmyslové výrobě, nefunkčnost infrastruktury, apod. Tyto škody mohou být i dlouhodobého charakteru. Často je havárie transformátorů spojena s výbuchem, požárem a i jinými možnými ekologickými škodami. V případě jaderných elektráren to může vést až k porušení radiační bezpečnosti. Rovněž je to i otázka ohrožení obyvatel v místě havárie nebo blízkém okolí. Ve světě jsou známé různé havárie transformátorů, kde číselné vyjádření škod a důsledků dosáhlo v jednotlivých případech i stovek miliónů korun.

V technickém životě transformátorů dochází k poruchám a haváriím z různých **příčin**. V tab. 1 jsou uvedeny příčiny poruch a procentuální podíl jejich výskytu [2].

Tab. 1 Příčiny poruch

Příčina	Zasažený systém	Procentuální podíl
Chyba izolace	Izolační systém	26 %
Chyba výroby	Není specifikováno	24 %
Neznámá	Není specifikováno	16 %
Zkrat	Izolační systém /Elektrický obvod	7 %
Nesprávná údržba	Není specifikováno	5 %
Přetížení	Izolační systém	5 %
Kontaminace oleje	Izolační systém	4 %
Přetížení	Izolační systém /Mechanické části konstrukce	4 %
Požár/exploze	Izolační systém /Chladicí nádoba s příslušenstvím	3 %
Blesk	Izolační systém	3 %
Povodeň	Chladicí nádoba s příslušenstvím	2 %
Vlhkost	Chladicí nádoba s příslušenstvím	1 %

Z údajů vyplývá, že většina poruch a havárií vzniká v **izolačním systému**. V případě výkonových olejových transformátorů je izolační systém tvořen především **olejem a papírem (celulózou)**.

Izolační systém je tedy z **hlediska bezpečnosti a spolehlivosti** velmi významný. Současně jej nelze s rozumnými náklady vyměnit a je tedy vhodnější oprava (výměna) celého stroje.

Proces stárnutí riziko poruch a havárií transformátorů samozřejmě zvyšuje. Z výše uvedeného vyplývá, že ze **společenského hlediska** je důležité se problematikou **stavu** transformátorů zabývat. Jakékoliv přerušení distribuce elektrické energie totiž přináší **značné i druhotné ztráty**.

V průmyslové praxi se jedná o velké množství transformátorů. Jak bylo uvedeno výše, je důležité **sledovat** jejich **stav**. Je tedy nutné se zabývat **životností i stárnutím** transformátorů a toto umět **řídit a vyhodnocovat**. Důležitá je také otázka **provozu a údržby transformátorů**, její plánování, **dále investiční rozhodování** o výměně transformátoru za nový stroj, a tedy celkové **ekonomické využití finančních prostředků**.

Současní provozovatelé výkonových transformátorů v České republice mají obvykle k dispozici transformátory starší než **30 let** a jejich štítková životnost je tedy již vyčerpána nebo bude vyčerpána v relativně krátkém časovém období. Transformátory by tedy měly být vyměněny, ale provozovatel obvykle nemá potřebné finanční prostředky k dispozici.

Rozhodovací problém manažera provozovatele transformátorů je obsažen v této formulaci:

má smysl koupit nový transformátor s lepšími technickými parametry nebo je výhodnější oddálit nákup s tím, že budeme investovat do technologií, které zvýší spolehlivost a životnost stávajícího transformátoru.

Bylo výše také konstatováno, že je důležité umět skutečnosti spojené se spolehlivostí transformátorů vyhodnocovat. V současné době se k tomuto účelu používá vhodných **diagnostických systémů**. Tyto jsou ve světě na různé kvalitativní úrovni. Je skutečností, že v České republice je této problematice věnována až poslední dobou zvýšená pozornost. To se odráží i v úrovni stavu těchto systémů, která však není příliš vysoká. Obecně každý diagnostický systém je více či méně založen na využití umělé inteligence. Jedná se především o využití různých **expertních systémů**.

Předkládaná **disertační práce** vychází z výše uvedených skutečností a je **příspěvkem** ke snahám řešit **spolehlivost transformátorů**. Protože je obecně naznačená problematika značně široká, není možné tuto postihnout komplexně v jedné práci. Proto byly vybrány a řešeny jen některé **dílčí problémy**, které souvisí vzhledem k zaměření školícího pracoviště s **diagnostikou transformátorů**. V České republice je na několika pracovištích věnována pozornost teorii diagnostických metod, proto předkládaná disertační práce si již této problematiky nevšímá. Spíše **byl zvolen netradiční, málo používaný a ne mnoho publikovaný přístup**. Disertační práce vychází z popisu obecného transformátoru se zaměřením na vlastnosti nejdůležitějších částí, které ovlivňují spolehlivost a životnost, tedy na **izolační systém olej-papír**. Dále práce podrobně rozebírá a hodnotí veličiny

plynové chromatografie, poměry plynů v diagnostice transformátorů, veličiny stavu oleje a veličiny stavu izolace vodičů. Právě posledně jmenované je řešeno v práci jen okrajově, neboť i této problematice je u nás a ve světě věnována značná pozornost. Velký důraz je také kladen v práci na **tvorbu základů diagnostického systému** ve formě **diagnostického expertního systému**. Je to rovněž způsobeno zaměřením školícího pracoviště, kde se uvedené zvláště v poslední době intenzivně rozvíjí.

Důraz v celé práci je kladen na využití dat z diagnostických šetření na **konkrétních transformátorech**, které pracují v **energetickém provozu** v České republice.

2 CÍLE PRÁCE

Na základě **analýzy současného stavu** řešené problematiky v České republice a ve světě [2], [3], [4], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14] lze **cíle předkládané disertační práce** shrnout do následujících bodů:

- **Specifikovat příčiny poruch a zasažený systém u výkonových olejových transformátorů**
- **Podrobně popsat základní vlastnosti izolačního systému olej-papír u transformátorů**
- **Vytvořit seznam současně v průmyslové praxi používaných diagnostických metod**
- **Rozdělit diagnostické veličiny dle vhodnosti pro diagnostiku izolačního systému olej-papír**
- **Podrobně popsat veličiny používané v současné době v plynové chromatografii**
- **Rozebrat poměry plynů a jejich vhodnost pro diagnostiku transformátorů**
- **Popsat veličiny, které by byly vhodné pro diagnostiku stavu oleje transformátorů**
- **Popsat veličiny, které by byly vhodné pro diagnostiku stavu izolace vodičů transformátorů**
- **Teoreticky popsat expertní systémy**
- **Prakticky vyhodnotit a rozebrat výsledky plynové chromatografie na souboru dat z diagnostických šetření na konkrétních transformátorech**
- **U vybraných transformátorů popsat časové průběhy plynů na základě chemických reakcí**

- Prakticky vyhodnotit a rozebrat výsledky diagnostických veličin pro diagnostiku stavu oleje na souboru dat z diagnostických šetření na konkrétních transformátorech
- Zaměřit se na výsledky korelací diagnostických veličin na souboru dat z diagnostických šetření na konkrétních transformátorech
- Vytvořit diagnostický expertní systém, který by byl i vhodný pro samostatnou diagnostiku stavu transformátorů
- Ověřit vytvořený diagnostický expertní systém, který by byl i vhodný pro samostatnou diagnostiku stavu transformátorů
- V disertační práci uvést konkrétní konzultaci expertního systému

3 TEORETICKÁ ČÁST

Transformátor je obecně **komplexní zařízení**, které **integruje do jednoho celku** několik **specializovaných funkčních systémů**. Jedná se především o tyto:

- Elektrický obvod (vinutí)
- Magnetický obvod (plechy – jádro)
- Izolační systém; olej, celulóza
- Chladicí nádoba s příslušenstvím
- Průchodky
- Přepínače odboček
- Mechanické části konstrukce
-

Každý z těchto funkčních systémů je ohrožen možností vzniku jemu vlastních **specifických poruch**.

Pro potřeby předkládané disertační práce je uvažován trojfázový **výkonový olejový transformátor** (dále jen transformátor), neboť jsou studovány vlastnosti transformátorů z **energetického provozu**.

3.1 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Diagnostika se zabývá metodami a prostředky pro zjišťování stavu zkoumaného zařízení a snaží se o včasné odhalení počínajících změn, které by mohli způsobit poruchy zařízení a narušit tak provoz celé soustavy. Získané informace mohou vést jednak k detekci poruchy tj. k identifikaci poruchy zařízení nebo jeho části, a také k lokalizaci poruchy, tj. k určení místa poruchy zařízení.

Pro zjištění **stavu transformátorů** se obecně používají především tyto **diagnostické metody** [1], [5], [6]:

- 1) Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu
- 2) Měření ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí
- 3) Zjišťování veličiny C_2/C_{50}
- 4) Měření částečných výbojů
- 5) Měření izolační vlastností oleje:
 - Měření průrazného napětí
 - Měření obsahu vody rozpuštěného v izolačním oleji
- 6) Měření jakostních parametrů oleje:
 - Měření čísla kyselosti
 - Měření ztrátového činitele při laboratorní teplotě 90 °C
 - Měření relativního mezipovrchové napětí na rozhraní olej-voda
 - Měření vnitřní rezistivity při laboratorní teplotě 20 °C
 - Měření obsahu inhibitorů
- 7) Měření plynové chromatografie oleje
- 8) Měření celkového obsahu plynů rozpuštěného v izolačním oleji
- 9) Měření a analýza polarizačního spektra
- 10) Metody frekvenčních charakteristik

Pomocí diagnostických metod se získají **veličiny**, které pro potřeby této disertační práce jsou **rozděleny** na:

- **veličiny plynové chromatografie:** vodík, kyslík, dusík, oxid uhličitý, oxid uhelnatý, ethan, ethen, ethyn, butan, methan, propan, součet uhlovodíků, celkový obsah plynů rozpuštěných v izolačním oleji. Plynová chromatografie slouží k indikaci stárnutí kapalných izolantů a především soustavy olej-papír. Plyny jsou **produktem rozpadu řetězců celulózy**, proto jejich studium může být důležité pro sledování stavu izolačních systémů transformátorů. K posouzení vlastností transformátorů se používají i různé poměry výše uvedených plynů. Tyto poměry jsou získávány různými způsoby a mají také svůj typický název. K těmto způsobům patří:
 - Duvalův trojúhelník
 - Rogersova metoda (1) a (2)
 - Dörnenburgova metoda
 - Metody podle normy např. IEC 60 599.
- **veličiny stavu oleje:** průrazné napětí, číslo kyselosti, ztrátový činitel při laboratorní teplotě 20 °C, 70 °C, 90 °C, relativní permitivita při laboratorní teplotě 20 °C, 70 °C, 90 °C, vnitřní rezistivita při laboratorní teplotě 20 °C, 70 °C, 90 °C, relativní mezipovrchové napětí na rozhraní olej-voda, obsah vody rozpuštěné v izolačním oleji, obsah inhibitoru, hustota.

- **veličiny stavu izolace vodičů:** izolační odpor v 15 s, izolační odpor v 60 s, ztrátový činitel, kapacita, časová konstanta, polarizační index, atd.

3.2 EXPERTNÍ SYSTÉMY

Další část disertační práce je věnována **expertním systémům**. Tyto byly zvoleny především proto, že jsou základem některých jednoduchých doposud existujících diagnostických systémů. Pro účely předkládané disertační práce byl navržen a následně realizován **originální diagnostický expertní systém**, pomocí kterého lze ohodnotit stav zkoumaných transformátorů na různé úrovni. Bylo také sledováno i samostatné možné použití tohoto systému, tedy bez následné implementace do nějakého pokročilého **systému diagnostického**.

Expertní systém je praktická aplikace metod umělé inteligence. Jedná se o program pro řešení takových úloh, které jsou všeobecně považovány za obtížné a jejich uspokojivé řešení může provést pouze specialista v dané oblasti. Tyto systémy jsou založeny na myšlence převzetí znalostí od specialisty-experta a jejich vhodné reprezentaci tak, aby je program mohl využívat podobným způsobem jako expert. Tedy především, aby dosáhl co nejlepších odezev systému na reálná data.

Součástí expertního systému je schopnost vysvětlit a zdůvodnit své postupy na základě použitých znalostí. Většina komunikace s expertním systémem probíhá pomocí dialogového režimu.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 POPIS DATOVÉHO SOUBORU

V předkládané disertační práci jsou využity hodnoty veličin **plynové chromatografie, poměrů plynů, stavu oleje a stavu izolace vodičů**. Uvedené soubory dat (jejich popis a specifikace je uveden v disertační práci) byly získány na základě spolupráce se spol. ČEZ, a.s v rámci projektu MPO, jehož školící pracoviště je spoluřešitelem. Následně je pozornost soustředěna na vývoj a tvorbu **expertního systému** a jeho ověření na základě datového souboru.

4.2 VÝSLEDKY PLYNOVÉ CHROMATOGRAFIE

Posouzení **výsledků plynové chromatografie** bylo v disertační práci rozděleno na tři části. Nejprve byla pozornost soustředěna na **rozbory vybraných vlastností časových řad**, dále na rozbory **teplotních závislostí plynů** a nakonec na **vybrané metody poměrů plynů**.

Pro jednotlivé plyny byly v souvislosti s rozбором vybraných vlastností časových řad získány **rovnice proložení přímkou, polynomem 2. a 3. stupně**. Kvalita proložení byla hodnocena **koeficientem korelace**. Tento byl v podstatné většině případů nejvyšší u proložení polynomem 3. stupně, a to u všech plynů. U některých plynů lze však sledovat skutečnost, že je také vhodné proložení i polynomem 2. stupně.

V souvislosti s rozбором vybraných vlastností časových řad byl proveden **rozbor trendů vývoje plynů**. Lze konstatovat v případě lineárního proložení, že např. u plynu CH_4 je u 2 transformátorů trend rostoucí (u 7 transformátorů klesající), u plynu C_2H_6 je u 4 transformátorů trend rostoucí (u 5 transformátorů klesající), u plynu C_2H_4 je u 5 transformátorů trend rostoucí (u 4 transformátorů klesající), u plynu C_2H_2 je u 8 transformátorů trend rostoucí (u 1 transformátoru klesající), u plynu C_3H_8 je u 8 transformátorů trend rostoucí (u 1 transformátoru klesající), u plynu $\sum \text{C}_x\text{H}_y$ je u 3 transformátorů trend rostoucí (u 6 transformátorů klesající), u plynu C_4H_{10} nejsou k dispozici kompletní data, atd. Stejný postup byl opakován po vyřazení extrémních hodnot.

Po **vyřazení extrémních hodnot** je také v souvislosti s rozбором vybraných vlastností časových řad pro všechny plyny nejvhodnější **proložení polynomem 3. stupně**, a to pro všechny sledované transformátory, kromě transformátoru 4, kde stačí proložení polynomem 2. stupně. U některých plynů lze však sledovat skutečnost, že je také vhodné proložení i polynomem 2. stupně. Pro ostatní plyny lze konstatovat v případě lineárního proložení, že vývoj plynů má ve čtyřech případech rostoucí charakter, ve třech klesající a v šesti je polovina případů klesající a zbývající polovina rostoucí.

Obecně lze konstatovat, že v souvislosti s rozбором vybraných vlastností časových řad **má vyřazení extrémních hodnot vliv na hodnocení výsledků**. Ovlivněny byly rovnice proložení grafů a jejich koeficienty korelace. Po vyřazení extrémních hodnot se zmenšila hodnota koeficientů korelace ve 14 případech a zvětšila v 11 případech. Rovněž výsledky rozboru trendů plynů byly ovlivněny. Obecně se průběh změnil u pěti plynů. Úpravou souborů vyřazením extrémních hodnot nemá vliv na skutečnost, že nejvhodnější proložení průběhů hodnot je polynomem 3. stupně.

U vybraných transformátorů byly posuzovány výsledky průběhů plynů i z **hlediska chemických dějů**. Tento postup byl zvolen i na základě vyhodnocení trendů plynů pro jednotlivé transformátory, neboť **nebyla nalezena odpovídající a dostatečná souvislost** např. mezi dobou provozu transformátoru a plyny, které jsou projevem dějů v celulóze a oleji. Je rozebrána oxidace, polymerace a polykondenzace, a to v souvislosti se vznikem výsledných produktů při průběhu naznačených chemických reakcí. Dále byly analyzovány konkrétní plyny, a to z hlediska průběhů u jednotlivých transformátorů v návaznosti na možné probíhající chemické reakce.

Pro jednotlivé plyny byly v souvislosti s rozбором **teplotní závislosti** plynů získány **rovnice proložení přímkou, polynomem 2. a 3. stupně**. Kvalita proložení byla hodnocena **koeficientem korelace**. Tento nejvyšší u proložení polynomem 3.

stupně, a to u všech plynů. U některých plynů lze však sledovat skutečnost, že je také vhodné proložení i polynomem 2. stupně.

V souvislosti s rozбором **teplotní závislosti** plynů byl proveden **rozbor trendů vývoje plynů**. Tedy např. u plynu CH_4 je u 4 transformátorů trend rostoucí (u 2 transformátorů klesající), u plynu C_2H_6 je u 2 transformátorů trend rostoucí (u 4 transformátorů klesající), u plynu C_2H_4 je u 3 transformátorů trend rostoucí (u 3 transformátorů klesající), u plynu C_2H_2 je u 4 transformátorů trend rostoucí (u 3 transformátorů klesající), u plynu C_3H_8 je u 1 transformátoru trend rostoucí (u 5 transformátorů klesající), u plynu $\sum \text{C}_x\text{H}_y$ je u 2 transformátorů trend rostoucí (u 4 transformátorů klesající), u plynu C_4H_{10} je u 2 transformátorů trend rostoucí (u 4 transformátorů klesající), u plynu H_2 je u 2 transformátorů trend rostoucí (u 4 transformátorů klesající), u plynu O_2 je u 2 transformátorů trend rostoucí (u 4 transformátorů klesající), u plynu N_2 je u 4 transformátorů trend rostoucí (u 2 transformátorů klesající), atd. Stejný postup byl i v tomto případě opakován po vyřazení extrémních hodnot.

Obecně lze konstatovat, že **vyřazení extrémních hodnot u rozboru trendů vývoje plynů má vliv na hodnocení výsledků**. Ovlivněny byly u upravených souborů rovnice proložení grafů a jejich koeficienty korelace. Po vyřazení extrémních hodnot se zmenšila v 9 případech hodnota koeficientů korelace a v 6 případech se tato hodnota zvětšila. Rovněž výsledky rozboru trendů plynů byly ovlivněny. Obecně se průběh změnil u čtyř plynů, projevilo se to v největší míře u transformátoru 3. Úpravou souborů vyřazením extrémních hodnot nemá vliv na skutečnost, že nejvhodnější proložení průběhů hodnot je polynomem 3. stupně. Získané výsledky jsou však logické, protože rozsahy sledovaných souborů jsou malé a každá změna může soubor značně ovlivnit.

Z hlediska **vlivu teploty** na plyny je důležité zjištění, že plyny H_2 a CH_4 se v malém množství začínají tvořit při teplotě $150\text{ }^\circ\text{C}$, C_2H_6 vzniká již při teplotě $250\text{ }^\circ\text{C}$, C_2H_4 začíná vznikat při teplotě nad $350\text{ }^\circ\text{C}$, při teplotě $500\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ se objevuje uhlík (C). Ten vzniká při dohořívání oblouku a v okolí velmi teplých míst. Mezi teplotou $750\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$ dochází k nárůstu C_2H_2 , tato teplota je spojena s elektrickým obloukem.

Podstatné je konstatování, že při analýze poruch se musí brát v úvahu také **rozpuštěnost plynů v oleji**, která je značně ovlivněna teplotou. Rozpuštěnost vodíku v oleji s teplotou stoupá až o 79%, kdežto u ethanu rozpuštěnost klesá až o 66%.

Dále jsou uvedeny **výsledky vybraných metod poměrů plynů**. Jsou diskutovány tyto metody: metoda Duvalova trojúhelníku, Rogersova metoda (1), Rogersova metoda (2), Dörnenburgova metoda a metoda podle IEC 60599. Je možné konstatovat, že metoda Duvalova trojúhelníku podrobněji rozebírá tepelné poruchy, na ostatní poukazuje v míře menší. Další používané metody zase spíše signalizují ostatní poruchy. Je tedy patrné, že obdržené závěry se liší. To také zdůvodňuje skutečnost, že jednotlivá diagnostická pracoviště používají pouze některé metody a výsledky konfrontují se závěry z dalších na transformátoru provedených diagnostických šetření. Vychází se ze zjištění, že se v transformátoru děje nějaká změna, kterou je třeba na základě komplexního posouzení odhalit a popsat.

V práci byly také sledovány **koeficienty korelace jednotlivých plynů mezi sebou**. Ze získaných výsledků vyplývá, že by v praxi bylo možné uvažovat o **měření jen některých plynů**. Konkrétně v daných případech by bylo možné měřit pouze $\sum C_X H_Y$ nebo Q_p . Protože v předcházejících kapitolách byly studovány i soubory upravené, byly předmětem zájmu i koeficienty korelace těchto souborů. Lze však konstatovat, že se získané závěry statisticky příliš neliší. Není tedy významný rozdíl mezi soubory upravenými a původními. Uvedená zjištění v tomto bodě jsou z hlediska průmyslové praxe značně významná.

Je nutné konstatovat, že v práci **provedená analýza plynů** dokázala a potvrdila, že diagnostiku plynů je třeba **vyhodnocovat komplexně** (viz i závěry v této disertační práci) a také v **návaznosti** na další diagnostické metody (rozbory veličin stavu oleje, rozbor veličin stavu izolace vodičů). Izolovaným posouzením analýzy plynů získáme jen dílčí výsledky, které mohou vést k nesprávným závěrům. Je však samozřejmé, že např. správně změřená extrémní hodnota určitého plynu může signalizovat nějaký vážný problém v transformátoru. Proto jsou stanoveny i **kritériální hodnoty** všech měřených a vyhodnocovaných plynů, jak lze sledovat např. v [6].

4.3 VYBRANÉ OSTATNÍ VÝSLEDKY

V této kapitole je pozornost soustředěna především na **veličiny stavu oleje**. Jsou rozebrány problémy **časové závislosti veličin** stavu oleje. Dále je popsána **časová závislost čísla kyselosti, závislost průrazného napětí a teplotní závislost obsahu vody rozpuštěné v oleji**. Veličiny stavu izolace vodičů, jsou použity jen pro popis a rozbor **výsledků vybraných korelací**.

Pro jednotlivé veličiny byly získány v souvislosti s rozбором **časové závislosti** veličin stavu oleje **rovnice proložení přímkou, polynomem 2. a 3. stupně**. Kvalita proložení byla hodnocena **koeficientem korelace**. Tento byl v podstatné většině případů největší u proložení polynomem 3. stupně. U některých veličin lze však sledovat skutečnost, že je také vhodné proložení polynomem 2. stupně. Stejný postup byl opakován po vyřazení extrémních hodnot.

Obecně lze konstatovat, že **vyřazení extrémních hodnot** v rozboru **časové závislosti** veličin stavu oleje **má vliv na hodnocení výsledků**. Ovlivněny byly rovnice proložení grafů a jejich koeficienty korelace. Po vyřazení extrémních hodnot se zmenšila v 18 případech hodnota koeficientů korelace a v 18 případech se tato hodnota zvětšila.

Byly také studovány **závislosti veličin stavu oleje mezi sebou**. Byla zjištěna např. závislost ε_{r20} na ρ_v , což lze považovat za významné. Při rozboru výsledků lze také sledovat, že na sobě závisí **stejné veličiny při různých teplotách**. Tento fakt se dá očekávat a získané výsledky ho jenom potvrzují. Z praktického hlediska uvedené a potvrzené zjištění má značný význam, neboť umožňuje měřit **méně veličin**. Podobné závěry byly získány pro soubory upravené.

V souvislosti s rozбором časové závislosti **čísla kyselosti (ČK)** pro **naměřená data** je opět nejvhodnější proložení polynomem 3. stupně. Je však také možné

konstatovat, že i ostatní proložení vykazují vyšší hodnotu koeficientu korelace, např. v případě polynomu 2. stupně u transformátorů 1, 2, 3, 6, 8 a 9. Podobné lze sledovat i v případě lineárního proložení (toto je významný rozdíl oproti zatím doposud uvedeným výsledkům). Podobné závěry platí i pro **upravené soubory**.

V souvislosti s rozbořem časové závislosti **průrazného napětí** (U_p) pro **naměřená data** je opět nejvhodnější proložení polynomem 3. stupně. Je však také možné konstatovat, že např. v případě polynomu 2. stupně u některých transformátorů lze vypočítat vysokou hodnotu koeficientu korelace, což je stejná hodnota jako v případě proložení polynomem 3. stupně.

I u časové závislosti **průrazného napětí** (U_p) **upravených souborů** lze konstatovat, že byly ovlivněny rovnice proložení grafů a jejich koeficienty korelace. Úpravou souborů vyřazením extrémních hodnot nemá vliv na skutečnost, že nejvhodnější proložení průběhů hodnot je polynomem 3. stupně. Je však také možné sledovat, že např. v případě polynomu 2. stupně u některých transformátorů lze vypočítat vysokou hodnotu koeficientu korelace.

Pro **průrazné napětí** (U_p) a **naměřená data v závislosti na jednotlivých plynech** je opět nejvhodnější proložení polynomem 3. stupně.

Vyřazení extrémních hodnot pro **průrazné napětí** (U_p) a **naměřená data v závislosti na jednotlivých plynech** má vliv na hodnocení výsledků. U upravených souborů byly ovlivněny rovnice proložení grafů a jejich koeficienty korelace, a to tak, že v 18 případech koeficient korelace stoupl a v 7 klesl. Tato úprava nemá vliv na skutečnost, že nejvhodnější proložení průběhů hodnot je polynomem 3. stupně.

Z výsledků rozboru závislosti **průrazného napětí** (U_p) **na obsahu vody rozpuštěné v izolačním oleji** (Q_v) vyplývá, že nejvhodnější proložení průběhů závislostí je polynom 3. stupně.

Z rozboru závislosti **průrazného napětí na obsahu vody rozpuštěné v izolačním oleji** pro upravené soubory vyplývá, že nejvhodnější proložení průběhů je opět polynomem 3. stupně. Odstraněním extrémních hodnot se změnila rovnice proložení i koeficienty korelace (převážně klesla jejich hodnota).

Dále je rozebrána **teplotní závislost obsahu vody rozpuštěné v oleji**. Jsou vysvětleny některé pojmy, např. voda **rozpuštěná, volná, emulgovaná** a voda **reakční**. Je konstatováno, že **obsah vody rozpuštěné v oleji je dáno množstvím vody emulgované a rozpuštěné**. Právě emulgovaná voda silně **ovlivňuje** průrazné napětí. Je také rozebráno **rozložení vody v izolaci transformátoru** a dále také **souvislost obsahu vody s teplotou v transformátoru**.

Rozbořem výsledků korelací **veličin stavu oleje a veličin stavu izolace vodičů** bylo zjištěno, že existuje korelace veličin:

$$\rho_{20} \text{ a } \tau \text{ v zapojení V:N a N:V nebo } \sigma \text{ a } P_i \text{ v zapojení V:N a N:V.}$$

Jedná se o zjištění nové a původní.

I v případě vybraných **ostatních výsledků** je nutné konstatovat, že v diagnostice transformátorů je nutné vycházet z **komplexního hodnocení jednotlivých veličin**.

Jak dokazují i výsledky této disertační práce, izolované posouzení jen jedné nebo několika veličin by mohlo vést k nesprávným závěrům. Proto jsou stanoveny i **kritériální hodnoty** všech měřených a vyhodnocovaných veličin, jak lze sledovat např. v [6].

4.4 EXPERTNÍ SYSTÉM

V této kapitole je pozornost soustředěna na vývoj, tvorbu a ověření expertního diagnostického systému. Je poukázáno na **zvolené prostředky pro tvorbu expertního systému**, na **popis a vlastnosti** vytvořeného **expertního systému** a nakonec na **ověření expertního systému** na konkrétních diagnostických datech.

Byl vytvořen pravidlový expertní systém pro diagnostiku transformátorů. Vytvořený expertní systém byl ověřen na vybraném datovém souboru. V disertační práci jsou uvedeny některé konkrétní výsledky tohoto ověření.

5 PŘÍNOS PRÁCE

V disertační práci byly **specifikovány příčiny poruch**, které mají vliv na **spolehlivost výkonových olejových transformátorů**. Na základě rozboru poruch z dostupné databáze poruch a studia české i zahraniční literatury a dalších materiálů bylo konstatováno, že nejčastější příčinou poruch je vadná izolace, chyba výroby, zkrat, nesprávná údržba, přetížení, kontaminace oleje, požár a exploze, blesk, povodeň a vlhkost. Nejvíce zasaženou částí transformátoru je **izolační systém**, a proto je nutné sledovat jeho **stav**. Z tohoto důvodu byla pozornost v další činnosti soustředěna na podrobný popis **základních vlastností izolačního systému**, a to především na izolační systém **olej-papír**.

Protože se disertační práce vzhledem k zaměření školícího pracoviště věnuje **diagnostice**, byl dále vytvořen **seznam** v průmyslové praxi používaných diagnostických metod a u každé popsány příslušné **diagnostické veličiny**. Diagnostické veličiny byly pro potřeby této disertační práce a v souladu se stavem vědomostí v dané oblasti **rozděleny** na tři skupiny, a to: **veličiny plynové chromatografie**, **veličiny stavu oleje** a **veličiny stavu izolace vodičů**.

Následně se disertační práce věnuje **popisu** a **rozboru** jednotlivých diagnostických veličin. K rozboru je využívána dostupná databáze z diagnostických šetření na transformátorech, která byla poskytnuta v rámci řešení projektu MPO FI-IM5/173 (řešeno 2008-2010), kde školící pracoviště je spoluřešitelem. Nejprve byla pozornost věnována veličinám plynové chromatografie. Byly popsány a podrobně vyhodnoceny všechny dostupné veličiny **plynové chromatografie**. Jednalo se především o rozbor vybraných vlastností časových řad a rozbor teplotní závislosti plynů. Zvláštní důraz byl soustředěn na **poměry plynů** a jejich využití v diagnostice transformátorů. Cílem bylo shromáždit dostupné skutečnosti a tyto i **vyhodnotit** s využitím konkrétních dat a vzájemně výsledky **porovnat**. Významnou skutečností je v souvislosti s uvedeným **zjištění**, že by bylo pro potřeby průmyslové praxe

možné provést **redukci počtu** měřených a vyhodnocovaných plynů. Rovněž přínosný byl popis vybraných časových závislostí plynů na základě **chemických reakcí**.

Následně činnost v disertační práci směřovala na **popis a rozbor** veličin **stavu oleje** a případně veličin **stavu izolace vinutí**. Pozornost byla soustředěna na některé vybrané problémy a především se jednalo o veličiny stavu oleje, neboť veličinám stavu izolace je především na jiných pracovištích věnována náležitá pozornost, a proto tyto nejsou předmětem našeho většího zájmu. Tedy konkrétně se jednalo o popis a rozbor **časových závislostí veličin stavu oleje, časovou závislost čísla kyselosti, závislost průrazného napětí a teplotní závislost obsahu vody rozpuštěné v oleji**. Významným zjištěním v této oblasti je především skutečnost, že některé veličiny stavu oleje mezi sebou významně korelují, což by mohlo v budoucnu přispět k **redukci počtu** měřených a vyhodnocovaných veličin. Závěr činnosti v souvislosti s diagnostickými veličinami byl věnován popisu a důkladnému rozboru korelací veličin stavu oleje a veličin stavu izolace vinutí. Opět přínosem je zjištění, že existují některé **korelace**, které by se daly vhodným způsobem využít v průmyslové praxi v diagnostických šetřeních.

Značná část disertační práce byla věnována **vytvoření diagnostického expertního systému**, který by byl vhodný pro diagnostiku stavu transformátorů a který by mohla využít průmyslová energetická praxe (např. ČEZ, a.s., Orgrez, a.s., A&C Energo, apod.). Rovněž byla sledována budoucí možnost začlenění tohoto expertního systému do současně vyvíjeného pokročilého diagnostického systému, což však překračuje rámec této disertační práce. Zamýšlený expertní systém byl vytvořen a následně **ověřen** na datovém souboru. V disertační práci jsou uvedeny konkrétní **konzultace** expertního systému.

Na základě navržených a zpracovaných cílů předkládané disertační práce považuje autorka práce za **vlastní a původní tyto výsledky a přínosy**:

- **Provedení podrobného rozboru vlastností veličin plynové chromatografie**
- **Provedení podrobného rozboru vlastností poměru plynů v plynové chromatografii a srovnání dosažených výsledků**
- **Zjištění, že pro potřeby průmyslové praxe by bylo možné provést v plynové chromatografii redukci počtu měřených a vyhodnocovaných plynů**
- **Provedení podrobného rozboru vlastností veličin stavu oleje**
- **Zjištění, že pro potřeby průmyslové praxe by bylo možné provést u veličin stavu oleje redukci počtu měřených a vyhodnocovaných veličin**
- **Zjištění, že pro potřeby průmyslové praxe by bylo možné využít ověřených korelací některých veličin stavu oleje a stavu izolace vinutí**
- **Vytvoření a ověření diagnostického expertního systému**

6 ZÁVĚR

Předkládaná disertační práce se soustřeďuje na řešení problematiky, která není zatím příliš v literatuře uceleně popsána a rozebrána. Tomu odpovídají i stanovené cíle práce. Tyto byly formulovány především proto, aby se získaly odpovědi na otázky, které nejsou zatím příliš jasné a vyvolávají i časté diskuze. Za účelem splnění cílů práce bylo nutné vykonat značné množství výpočtů, z nichž jen část je i v práci podrobněji prezentována.

Na základě získaných výsledků je nutné konstatovat známou skutečnost, že i diagnostika transformátorů nemůže vycházet pouze z měření a hodnocení jen jedné nebo několika málo diagnostických veličin. I analýza veličin plynové chromatografie a veličin stavu oleje je toho důkazem. Při této příležitosti je nutné vzpomenout přesnost diagnostických šetření, neboť tato má své meze a má podstatný vliv na získané výsledky. I přes uvedené je nutné také vyzvednout získané výsledky, které by po důkladném dopracování a uvedení do průmyslové praxe mohly přinést značné ekonomické a organizační výhody a i by usnadnily vlastní diagnostická šetření.

Práce se zaměřuje jednak na popis a rozbor diagnostických veličin plynové chromatografie a veličin stavu oleje, jednak na tvorbu a ověření diagnostického expertního systému. Prvně jmenované je klasická činnost, která patří do diagnostiky transformátorů. Každý získaný a ověřený závěr je značně přínosný a v technické praxi žádaný. Druhá část problematiky je poněkud složitější a směřuje k vytvoření pokročilého diagnostického systému. Tento systém by v budoucnu umožnil odpovědět na poměrně složité otázky, které jsou spojeny se spolehlivostí transformátorů. S tím také souvisí i možnost řízení stárnutí transformátorů, oblast plánované údržby, apod. Jedná se tedy o značně složitý komplex otázek, které samozřejmě nejsou v předkládané disertační práci nijak zmíněny nebo dokonce řešeny. Byl však v disertační práci položen základ tvorby diagnostického systému, který bude určitě v budoucnu využit při tvorbě již zmíněného pokročilého diagnostického systému.

V práci není nijak zdůrazňováno, že obdržené závěry mají platnost za daných podmínek. V této práci však bylo sledováno jediné. Získat výsledky, které by pomohly popsat a třeba i vysvětlit některé ne příliš známé skutečnosti.

V práci řešená problematika zapadá do odborných problémů, které jsou předmětem zájmu školícího pracoviště. Předkládaná disertační práce se snaží přispět k diagnostice výkonových transformátorů, které pracují v energetickém provozu. Ve své podstatě je tedy řešena spolehlivost transformátorů, jak je i zmíněno i v úvodní kapitole disertační práce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BARTÁK, Alexandr; MRAVINÁČ, Luděk; NEUMANN, Jacek. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984. 254 s. 04-523-84.
- [2] *Business Case for Transformer On-line Monitoring EPRI Diagnostic Conference July 2006 - souhrn materiálů*. 2006.
- [3] JANOUŠEK, Vladimír. *Studium hodnocení degradace celulosového materiálu*. Pardubice: Univerzita Pardubice. Fakulta chemicko-technologická. Katedra analytické chemie. 1994. 113 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Kotrlý S., CSc.
- [4] *Materiály ze zasedání mezinárodní odborné organizace a jejich komisí - CIGRE A2, 2004-2009. Transformátory*.
- [5] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [6] ČEZ, a.s., PODNIKOVÁ NORMA evid.č. 00/05. *Profylaktika elektrických strojů netočivých - výkonové transformátory*. Praha: ČEZ, a.s., 2006. 93 s.
- [7] DIGIORGIO, Joseph B. *Dissolved Gas Analysis of Mineral Oil Insulating Fluids* [online]. Poslední revize 25. 12. 2008 [cit.2010-04-17]. Dostupné z: <<http://www.nttworldwide.com/docs/dga2102.pdf>>.
- [8] FIROUZIFAR, S.; MAHMOUDI, J. *Assessment of Power Transformer cooler with FEMLAB* [online]. Poslední revize 21. 12. 2007 [cit.2010-04-17]. Dostupné z: <<http://www.ep.liu.se/ecp/027/019/ecp072719.pdf>>.
- [9] *FIST 3-30 Transformer Maintenance, Facilities – Instructions, Standards, and techniques* [online]. Poslední revize 5. 8. 2009 [cit.2010-04-17]. Dostupné z: <http://www.usbr.gov/power/data/fist/fist3_30/fist3_30.pdf>.
- [10] *Guideline for life management techniques for power transformers* [online]. Poslední revize 30. 10. 2006 [cit.2010-04-17]. Dostupné z: <<http://www.transformerscommittee.org/info/F06/F06-DGA.pdf>>.
- [11] LEWAND, LANCE. *Dissolved gas analysis and the Duval Triangle* [online]. Poslední revize 30. 10. 2006 [cit.2010-04-17]. Dostupné z: <<http://www.transformerscommittee.org/info/F06/F06-DGA.pdf>>.
- [12] PUKEL, G.J.; MUHR, H.M.; LICK, W.: *Transformer diagnostics: Common used and new methods* [online]. [cit.2010-04-17]. Dostupné z: <https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getVollText?pDocumentNr=36607_&pCurrPk=15463>
- [13] SUWARN. *Dissolved Gas Analysis of Transformer Oils: Effects of electric arc* [online]. Poslední revize 12. 9. 2006 [cit.2010-04-17]. Dostupné z: <<http://www.labplan.ufsc.br/congressos/wseas/papers/517-461.pdf>>.
- [14] VLADAŘ, Jaroslav; ZELENKA, Jiří. *Elektrotechnika a silnoproudá elektronika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986. 479 s. 04-545-86.
- [15] HASSDENTEUFEL, Josef; KVĚT, Karel a kolektiv. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1967. 859 s. 04-540-67.

ŽIVOTOPIS-CV

Ing. Martina Šimková
Lidická 191, 798 21 Bedihošť
tel.: 737 743 563
email: ysimko00@stud.fme.vutbr.cz

Dosažené vzdělání

2003-2006	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství Informatika a automatizace, Automatizace, Ing.
2001-2003	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství Aplikovaná informatika a řízení, Bc.
1994-1998	Střední průmyslová škola oděvní

Doplňkové vzdělání

1999	Práce na PC
2007-2008	Jazykový kurz angličtiny pro mírně pokročilé
2008-2009	Jazykový kurz angličtiny pro středně pokročilé

Pracovní zkušenosti

1999-2000	OP-profesion Prostějov, švadlena
2005-2006	FN Olomouc, oddělení informatiky
2006	Spolupráce na řešení komerčního projektu č.021335400020 pro ČEZ, a.s. - Modul výpočtu izolačního odporu
2008-2010	Projekt MPO ČR FI-IM5/173, 2008-2010, název: Metodika stanovení životnosti vysokonapěťových izolačních systémů točivých strojů, člen řešitelského týmu
2008-2010	Projekt GAČR 102/08/1118, název: Inteligentní diagnostika elektrických strojů, člen řešitelského týmu
2007-2010	Výuka laboratorních cvičení předmětu Elektrotechnika a elektronika

Jazykové znalosti

Anglický jazyk - mírně pokročilý
Německý jazyk - základy

Počítačové znalosti

Internet (email, www) - pokročilý
Microsoft Access - základy
Microsoft Excel - pokročilý
Microsoft PowerPoint - pokročilý
Microsoft Word – pokročilý
Minitab – základy

Zkušenosti a dovednosti

Řidičský průkaz - skupina B

VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST

- HAMMER, M.; MINISTR, M.; ŠIMKOVÁ, M.:
Artificial Intelligence in Diagnostics of Electric Machines,
Recent Advances in Mechatronics 2008 - 2009, pp.139-144, ISBN 978-3-642-05021-3,
(2009), Springer-Verlag Berlin Heidelberg
článek ve sborníku
akce: Mechatronics 2009, Luhačovice, 18.11.2009-20.11.2009
- HAMMER, M.; ŠIMKOVÁ, M.:
Databáze zkoušek elektrických strojů točivých
multimédia
- ŠIMKOVÁ, M.; MINISTR, M.; HAMMER, M.:
Diagnostika transformátorů s využitím expertních systémů,
Mezinárodní konference učitelů elektrotechniky SEKEL 2009, pp.167-169, ISBN 978-80-
214-3934-4, (2009), Vysoké učení technické v Brně
článek ve sborníku
*akce: Mezinárodní konference učitelů elektrotechniky SEKEL 2009, Brno - Lednice,
15.09.2009-17.09.2009*
- ŠIMKOVÁ, M.; MINISTR, M.; HAMMER, M.:
Expert Systems in Transformer Diagnostics,
Recent Advances in Mechatronics 2008-2009, pp.145-150, ISBN 978-3-642-05021-3,
(2009), Springer-Verlag Berlin Heidelberg
článek ve sborníku
akce: Mechatronics 2009, Luhačovice, 18.11.2009-20.11.2009
- HAMMER, M.; ŠIMKOVÁ, M.:
Tabulky pro import dat do formátu Visual DTS Pro.
multimédia
- ŠIMKOVÁ, M.; HAMMER, M.:
EXPERTNÍ SYSTÉMY V DIAGNOSTICE TRANSFORMÁTORŮ,
TD 2008 - DIAGON 2008, pp.23-27, ISBN 978-80-7318-707-1, (2008), Academia
centrum UTB
článek ve sborníku
*akce: 31. mezinárodní konference TD 2008 - DIAGON 2008, Academia centrum,
Univerzita Tomáše Bati, Mostní 5139, 760 01,Zlín, 15.05.2008-15.05.2008*
- ŠIMKOVÁ, M.:
Úvod do diagnostiky transformátorů,
Technická diagnostika, Vol.XVII, (2008), No.z1, pp.41-42, ISSN 1210-311X, VŠB-TU
Ostrava
článek v časopise
- ŠIMKOVÁ, M.; HAMMER, M.:
Vybrané metody plynové chromatografie v diagnostice výkonových olejových
transformátorů,
Elektrorevue, (2010), ISSN 1213-1539, Brno
článek v časopise (v tisku)

VYTVOŘENÉ PRODUKTY

- [1] ŠIMKOVÁ, M.; HAMMER, M., *Inteligentní zařízení pro posuzování stavu elektrických strojů točivých*. 2009 (funkční vzorek).
- [2] HAMMER, M.; KOLČABA, J.; LATINA, P.; ŠIMKOVÁ, M.; TOMAN, J.; PAVLÍK, J., *Modul výpočtu izolačního odporu*. 2006 (certifikovaná metodika).
- [3] ŠIMKOVÁ, M.; HAMMER *Tabulky pro import dat do formátu Visual DTS Pro*. Multimédia. 2009 (databáze).
- [4] ŠIMKOVÁ, M.; HAMMER *Databáze zkoušek elektrických strojů točivých*. Multimédia. 2009 (databáze).

ABSTRACT

This dissertation thesis deals with the diagnostics of power oil transformer. It consists of the theoretical and practical part

At its beginning, the theoretical part deals with an general description of the transformer and its connection. Focus is given to aspects of the life of the transformer insulation system (oil-paper). Further, the technical diagnostics is analyzed, with description of quantities of gas-liquid chromatography, the oil condition and condition of conductor insulation. Another important part of the thesis consists of an expert system, which is described generally from the past to the present. Characteristics, types and structure of expert systems are mentioned here, with its advantages and disadvantages.

The practical part starts with a description of the data file, which is further used in the thesis. Main practical part is divided into three parts - the results of gas-liquid chromatography, selected results and expert systems. In the section entitled "Results of gas-liquid chromatography", there is an analysis of selected properties of time series and temperature dependency of gases. Moreover, the methods of the ratios of gases such as Duval Triangle method are described. The second part entitled "Selected other results" shows the time dependency of variables and the neutralization number, along with the breakdown voltage dependency, and time of dependency, gas and moisture content in insulating oils. There is also a temperature dependency of moisture content dissolved in insulating oil discussed, as well as results of selected correlations, such as the correlation values of gas chromatography with state variables insulation of wires. The last part, "Expert systems", provides specific information about developed expert system. It describes the environment chosen for its development, followed by a description, features and verification of the expert system. Examples of the consultation results are included. All achievements of the individual parts are always summarized at the end of each section.

The thesis contains chapters "Objectives of the work" and "Conclusion". The most important chapter is "The contribution of the work." It contains original work results and the results applicable in industry.