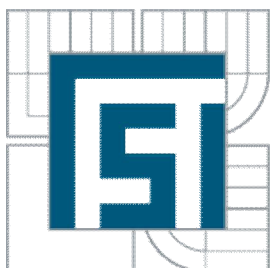




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

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

PREDIKCE VÝVOJE DIAGNOSTICKÝCH VELIČIN
PROGRESS PREDICTION OF DIAGNOSTIC QUANTITIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ALINA AKHMADISHINA

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAKUB ERTL

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Alina Akhmadishina

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Metrologie a řízení jakosti (3911T032)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Predikce vývoje diagnostických veličin

v anglickém jazyce:

Progress Prediction of Diagnostic Quantities

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá analýzou časových řad jednotlivých diagnostických veličin měřených u výkonových olejových transformátorů.

Cíle diplomové práce:

- 1)Nastudovat teorii zabývající se analýzou časových řad.
- 2)Provést analýzu časových řad na reálných datových souborech.
- 3)Odhadnout a porovnat trendy časových řad jednotlivých diagnostických veličin.
- 4)Aplikovat a porovnat různé postupy predikce dalšího vývoje časových řad.


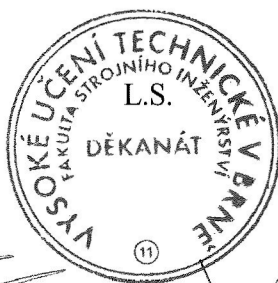
Seznam odborné literatury:

- 1) BROCKWELL, P., DAVIS, R. Introduction to Time Series and Forecasting. New York: Springer-Verlag, 2002. 434 s. ISBN: 0-387-95351-5.
- 2) SMITH, P. Analysis of Failure and Survival Data. Chapman and Hall/CRC, 2002. 264 s. ISBN-13: 978-1584880752.
- 3) ADAMEC, V. Applied statistics. Statistics I: descriptive statistics: linear regression and correlation: categorical data: time series: statistical indices. Brno: Mendelova univerzita, 2010. 119 s. ISBN: 978-80-7375-455-6.
- 4) ANDĚL, J. Matematická statistika. Praha: SNTL, 1985. 346 s. ISBN: 04-003-85.
- 5) MENTLÍK, V. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN-technická literatura, 2008. 439 s. ISBN: 78-80-7300-232-9

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jakub Ertl

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

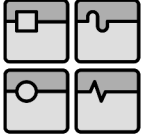
V Brně, dne 21.11.2011



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

ABSTRAKT

Práce se zabývá analýzou časových řad diagnostických veličin měřených u výkonových olejových transformátorů. První část práce je věnována výkonovým olejovým transformátorům a popisu diagnostických veličin, které se u těchto netočivých elektrických strojů měří. V další části je zaveden aditivní dekompoziční model časových řad včetně analýzy všech jeho složek. Poslední část práce se zabývá predikcemi pravděpodobného času dožití vybraných výkonových olejových transformátorů pracujících v různých elektrárnách na území České republiky.

KLÍČOVÁ SLOVA

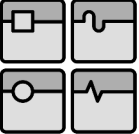
Výkonový olejový transformátor, diagnostické veličiny, časové řady, aditivní dekompoziční model, pravděpodobný čas dožití.

ABSTRACT

The work deals with the analysis of time series of diagnostic quantities measured in power oil transformers. The first part includes power oil transformers and the description of diagnostic variables that are measured inside these non-rotating electrical machines. The next section introduces the decomposition model of time series including analysis of all its components. The last part deals with the predictions of the likely survival time of power oil transformers operating in different power plants in the Czech Republic.

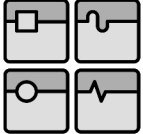
KEY WORDS

Power oil transformers, diagnostic quantities, time series, additive decomposition model, likely survival time.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

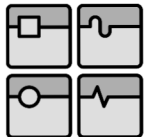
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

AKHMADISHINA, A. *Predikce vývoje diagnostických veličin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. XY s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Ertl.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

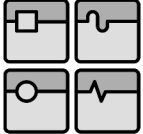
PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat všem, kteří mi jakýmkoliv způsobem pomohli na vzniku této diplomové práce. Zejména bych chtěla poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Jakubovi Ertlovi, za cenné připomínky a odborné rady.

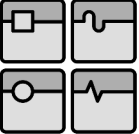


OBSAH

ÚVOD	10
1 VÝKONNÝ OLEJOVÝ TRANSFORMÁTOR	12
1.1 Základní pojmy a schéma transformátoru.....	13
1.2 Rozdělení transformátorů.....	16
1.3 Princip činnosti transformátoru.....	18
2 DIAGNOSTICKÉ VELIČINY VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	20
3 TEORIE ČASOVÝCH ŘAD	23
3.1 Obecná teorie časových řad.....	23
3.2 Klasifikace časových řad.....	24
3.3 Dekompozice časových řad.....	26
3.4 Vývoj časových řad.....	26
3.5 Momentové charakteristiky.....	28
3.6 Analýza časových řad.....	29
3.6.1 Stabilizace rozptylu.....	29
3.6.2 Identifikace periodických komponent.....	30
3.6.3 Odhad trendové složky.....	31
3.6.4 Vyšetření chybové složky.....	33
4 ANALÝZA ČASOVÝCH ŘAD NĚKTERÝCH DIAGNOSTICKÝCH VELIČIN MĚŘENÝCH U VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	34
4.1 Popis zkoumaných dat.....	34
4.2 Odstranění odlehlých hodnot.....	36
4.3 Momentové charakteristiky.....	37
4.4 Stabilizace rozptylu.....	39
4.5 Identifikace periodických komponent.....	41

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 9
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

4.6	Odhad trendové složky	Vyšetření chybové složky.....	43
4.7	Vyšetření chybové složky.....		47
5	PREDIKCE PRAVDĚPODOBNÉHO ČASA DOŽITÍ		51
	VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ.....		51
	ZÁVĚR.....		56
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....		58
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....		60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		61

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 10
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

ÚVOD

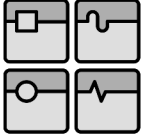
Podle [1] je technická diagnostika obor zabývající se rozpoznáním obvykle nežádoucích stavů a zkoumáním příčin jejich vzniku. Jejím výsledkem bývá vyhodnocení provozuschopnosti testovaného zařízení, detekce i lokalizace závad a také předpokládaný vývoj stavu zařízení při dalším provozu včetně pokynů pro údržbu. Z hlediska způsobu získávání dat lze rozdělit diagnostiku na:

- 1. offline diagnostiku;**
- 2. online diagnostiku.**

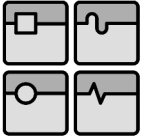
Při offline diagnostice se zařízení nejdříve odstaví z provozu a poté se změří všechna potřebná data. Naopak u online diagnostiky se získávají data pomocí senzorů a to za provozu. Tato metoda přináší řadu výhod. Sledovaný objekt se neustále nachází pod kontrolou, podléhá automatickému vyhodnocení údajů a včasnému rozpoznání nežádoucího stavu. Nevýhodou je pak vyšší technická náročnost a potřeba zpracování většího množství dat. V rámci této diplomové práce byla zkoumána data z offline diagnostiky výkonových olejových transformátorů. Na základě vyhodnocení těchto dat pak lze provést rozbor spolehlivosti a plán dalšího provozu těchto netočivých elektrických strojů.

Výkonové olejové transformátory jsou jedním z nejdůležitějších prvků v distribuci elektrické energie od výrobce směrem ke spotřebiteli. U transformátorů se vyskytují různé druhy poruch, které mohou způsobit přerušování dodávek elektrické energie, újmu na zdraví obsluhy, ztráty na lidských životech, poruchy dalších technických zařízení a v neposlední řadě škody v průmyslové výrobě nebo nemalé ekonomické ztráty. Z těchto důvodů je nutné provádět pravidelná diagnostická šetření a získaná data vhodně vyhodnocovat. Na získaná data lze nahlížet jako na časové řady jednotlivých diagnostických veličin a tyto řady pak vyšetřovat podle matematické teorie zabývající se právě analýzou časových řad. To nám umožní predikovat například pravděpodobný čas dožití stroje.

Výkonové olejové transformátory mají od výrobce deklarovanou dlouhou dobu dožití. Z tohoto důvodu se dříve jejich spolehlivost a určování pravděpodobného času

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 11
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

dožití téměř neřešily. V současné době se však velké množství transformátorů pracujících na území České republiky nachází na konci své plánované životnosti a uvedená problematika se dostává do popředí zájmu. Provozovatel těchto transformátorů potřebuje rozhodovací kritéria, podle kterých by byl schopen rozhodnout, zda, popřípadě jak, stroje dále provozovat a udržovat. Vhodně stanovená rozhodovací kritéria mu tak mohou ušetřit spoustu finančních prostředků.



1 VÝKONNÝ OLEJOVÝ TRANSFORMÁTOR

1.1 Základní pojmy a schéma transformátoru

Transformátor je elektrický netočivý stroj s dvěma nebo více indukčně vázanými cívkami, které umožňují přenášet elektrickou energii z jednoho obvodu do jiného pomocí vzájemné elektromagnetické indukce. Transformátor se většinou používá pro přeměnu střídavého napětí (např. z nízkého napětí na vysoké) nebo pro galvanické oddělení obvodů.

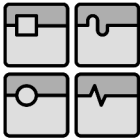
Výkonový transformátor - transformátor slouží k převodu elektrické energie do elektrických sítí a zařízení pro příjem a využití elektrické energie.

Olejový transformátor – izolační systém transformátoru se skládá z izolačního oleje a papíru.

Uvedené definice lze nalézt v [2].



Obrázek 1. Výkonový olejoý transformátor

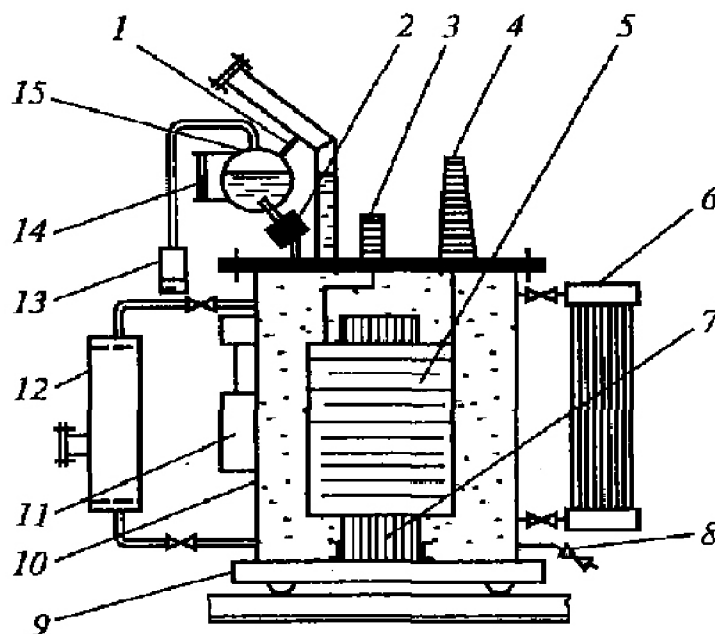


DIPLOMOVÁ PRÁCE

Výkonový olejový transformátor je zobrazen na Obr. 1. Jedná se o komplexní zařízení, které se skládá z velkého počtu konstrukčních prvků. Mezi hlavní patří:

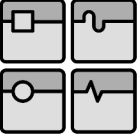
- magnetický systém (magnetické jádro),
- vinutí,
- výstupy vinutí,
- nádoba,
- chladič zařízení,
- mechanismus regulace napětí,
- ochranné a měřicí zařízení.

Návrh koncepce olejového transformátoru podle [3] je znázorněn na Obr. 2.



Obrázek 2. Koncepce výkonového olejového transformátoru:

- 1 – propojovací potrubí;
- 2 – plynové relé (Buchholzovo relé);
- 3 – vstup NN;
- 4 – vstup VN;
- 5 – vinuti vyššího a nižšího napětí;
- 6 – chladič systém;
- 7 – magnetický obvod;
- 8 - olejový vypouštěcí ventil;

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 14
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- 9 - vozík s kolečky;
- 10 – nádoba;
- 11 – mechanismus regulace napětí;
- 12 - termosifonový filtr;
- 13 – vysoušeč vzduchu;
- 14 - indikátor oleje;
- 15 – konzervátor.

V magnetickém obvodu transformátoru probíhá magnetický tok. Magnetický obvod tvoří konstrukční a mechanický základ transformátoru. Je vyroben z jednotlivých plechů elektrotechnické oceli navzájem od sebe izolovaných. V současné době se používají za studena válcované oceli 3405, 3406, tj. ocel se specifickou orientací zrn, což umožňuje indukci až 1,7 tesla.

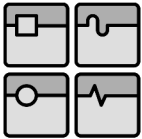
Vinutí transformátoru jsou navinuta z měděných vodičů s papírovou izolací. Vinutí jsou uspořádána koncentricky vzhledem k jádru.

Izolace transformátoru je velmi důležitá. Spolehlivost transformátoru se určuje především ze spolehlivosti jeho izolace.

- V olejovém transformátoru je hlavní izolací olej v kombinaci s pevnými dielektriky: papír, elektrokarton, umakart.
- V suchém transformátoru jsou široce používány nové typy izolačních materiálů s vysokou tepelnou stabilitou.

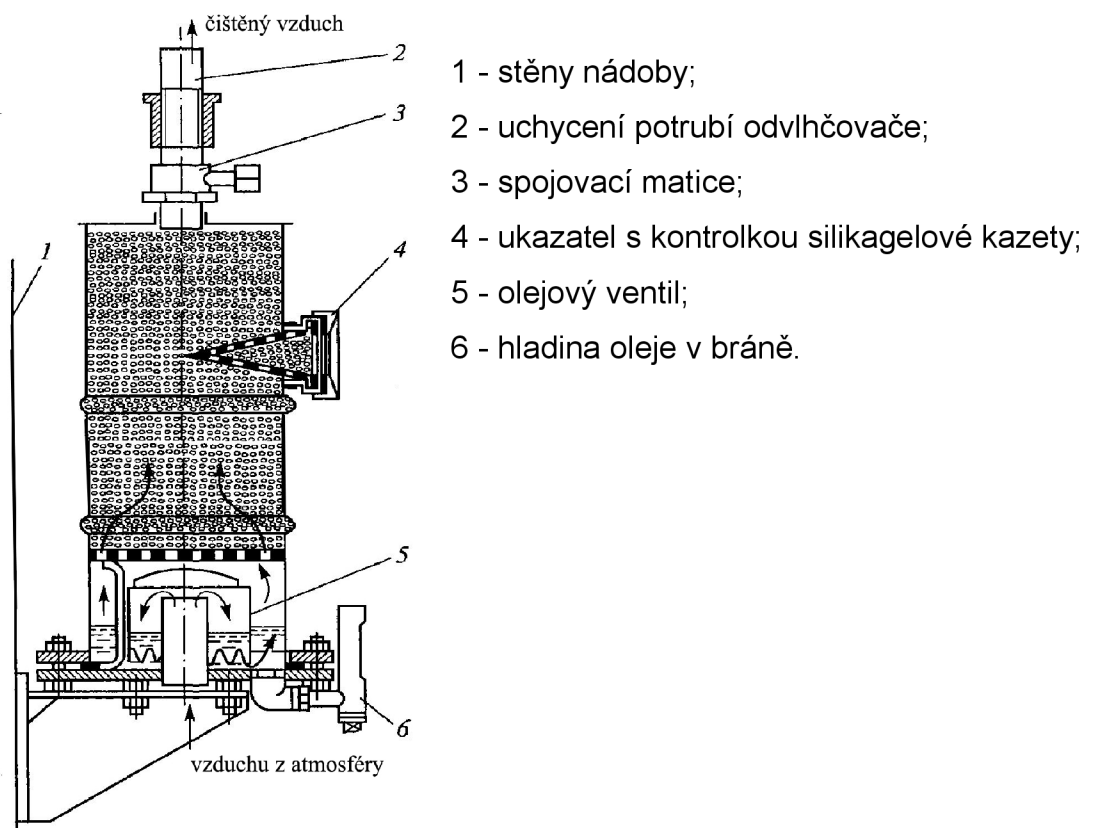
V nádobě je umístěna aktivní část transformátoru spolu s kohouty a spínacím zařízením pro regulaci napětí. Hlavní části nádoby jsou stěny, dno a kryt. Pro snížení ztrát z rozptylových toků jsou na vnitřní straně pakety elektrotechnické oceli nebo desky z nemagnetického materiálu (měď, hliník).

Konzervátor transformátoru je válcový útvar, který je připojen k nádobě. Objem konzervátoru je 9 ... 10% objemu oleje v transformátoru a chladicím systému. Nádoba transformátoru je zcela naplněna olejem. Změna objemu při



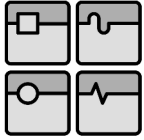
vytápění a chlazení vede ke kolísání úrovně oleje v konzervátoru, a vzduch jej tak vytlačuje z konzervátoru pryč nebo se do oleje vstřebává.

Olej je velmi hygroskopický a je-li konzervátor přímo spojen s atmosférou, vlhkost ze vzduchu vstupuje do oleje a výrazně tak snižuje jeho izolační vlastnosti. Aby se této skutečnosti zabránilo, je konzervátor spojen s okolním prostředím přes silikagelový **vysoušeč vzduchu** (Obr. 3). Silikagel tak absorbuje vlhkost z přívodu vzduchu.



Obrázek 3. Vysoušeč vzduchu [3]

Indikátor oleje se používá ke sledování hladiny oleje v transformátoru. Na stupnici jsou označeny tři kontrolní úrovně. Indikátor oleje má zvláštní uzavřený kontakt (Reed spínač), který signalizuje nepřijatelné snížení hladiny oleje.



Termosifonový filtr je připojen k nádobě a je naplněn silikagelem nebo jinou látkou, která absorbuje produkty oxidace oleje. Při oběhu v důsledku rozdílu hustoty teplého a studeného oleje nastává jeho kontinuální regenerace.

1.2 Rozdělení transformátorů

Transformátory se dělí podle různých hledisek [1]:

1. Podle použití transformátoru

- transformátory pro přenos energie;
- transformátory pro speciální účely.

Transformátory pro přenos energie jsou součástí rozvodných a přenosových soustav, přeměňují střídavé napětí z nízkého na vysoké nebo naopak.

Transformátory pro speciální účely jsou určeny pro konkrétní speciální účel.

Patří sem:

- autotransformátory;
- transformátory svařovací;
- měřicí transformátory, apod.

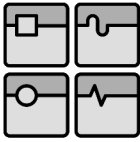
2. Podle počtu fází

- jednofázové (většinou s menším výkonem);
- trojfázové (většinou s velkým výkonem);
- vícefázové (používají se pro speciální účely).

3. Podle chlazení aktivních částí

- vzduchové;
- olejové;
- speciální.

Vzduchové transformátory mají aktivní části chlazeny vzduchem. Tento způsob chlazení je většinou využit u jednofázových transformátorů.



U olejových transformátorů je magnetický obvod a vinutí ponořeno do nádoby s olejem, který odvádí teplo a zlepšuje izolační vlastnosti.

Specialní transformátory používají jako chladicí médium např. fluorid sírový (SF₆).

4. Podle poměru vstupního a výstupního napětí

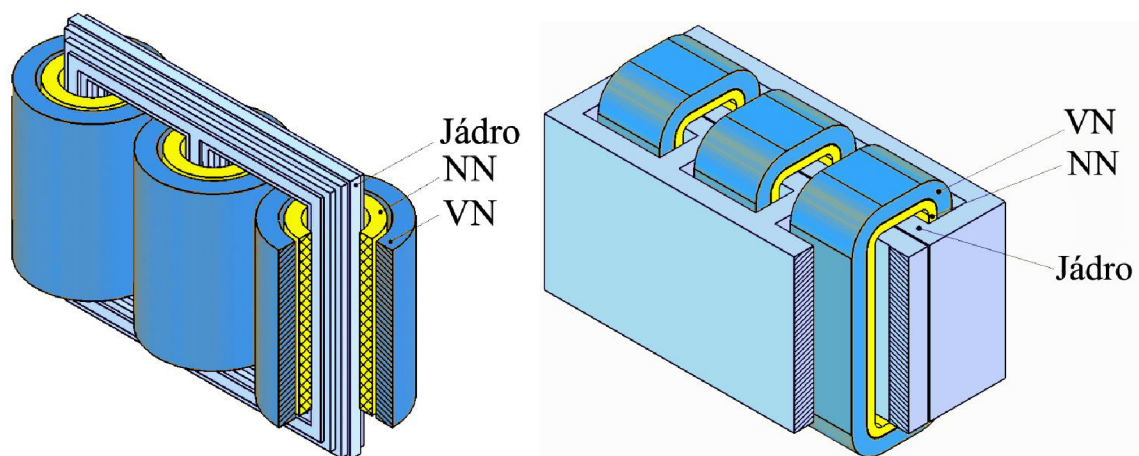
- zvyšovací (transformují napětí směrem nahoru);
- snižovací (transformují napětí směrem dolů);
- oddělovací (používají se k oddělování obvodů, počet závitů na vstupním a výstupním vinutí je stejný).

5. Uspořádání magnetického obvodu

- jádrový;
- plášťový.
-

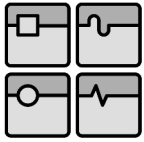
Jádrový trojfázový transformátor má na každém sloupku magnetického obvodu vinutí (vstupní a výstupní) (Obr.4.a).

Plášťový trojfázový transformátor má magnetický obvod, který tvoří „plášť“ a zakrývá vinutí (Obr.4.b).



Obrázek 4. Uspořádání magnetického obvodu u trojfázového transformátoru:

a) typ jádrový, b) typ plášťový



6. Podle smyslu vinutí

- pravotočivé (závitý vinuty ve směru postupu doprava);
- levotočivé (závitý vinuty ve směru postupu doleva).

1.3 Princip činnosti transformátoru.

Výkonový olejový transformátor pracuje na základě jevu elektromagnetické indukce [4]. Principiální schéma transformátoru je na Obr. 5.

Na **Primární vinutí** transformátoru je přivedeno napětí z vnějšího zdroje střídavého napětí U_p . Primárním vinutím transformátoru prochází střídavý proud I_p a v jádře se v důsledku elektromagnetické indukce vytváří střídavý magnetický tok Φ . Tento tok je veden magnetickým jádrem k sekundární cívce.

V sekundárním vinutí se indukuje elektrické napětí podle principu Faradayova indukčního zákona:

$$U_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

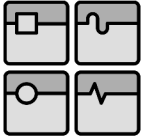
Derivace konstantního toku je nulová, a proto transformátor pracuje jen na střídavý nebo pulsující proud. U stejnosměrného proudu se nemění magnetický tok a na sekundárním vinutí tak nevzniká žádné napětí.

Ideální transformátor je transformátor, který nemá žádné energetické ztráty v důsledku zahřívání vinutí. Takový transformátor veškerou příchozí energii z primárního vinutí přemění na magnetické pole a pak energii v sekundárním vinutí. Rovnice ideálního transformátoru, který pracuje bez ztrát:

$$p = \frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}, \quad (2)$$

kde U_p je napětí na primárním vinutí;

I_p je proud tekoucí primárním vinutím;



DIPLOMOVÁ PRÁCE

N_p je počet závitů primárního vinutí;

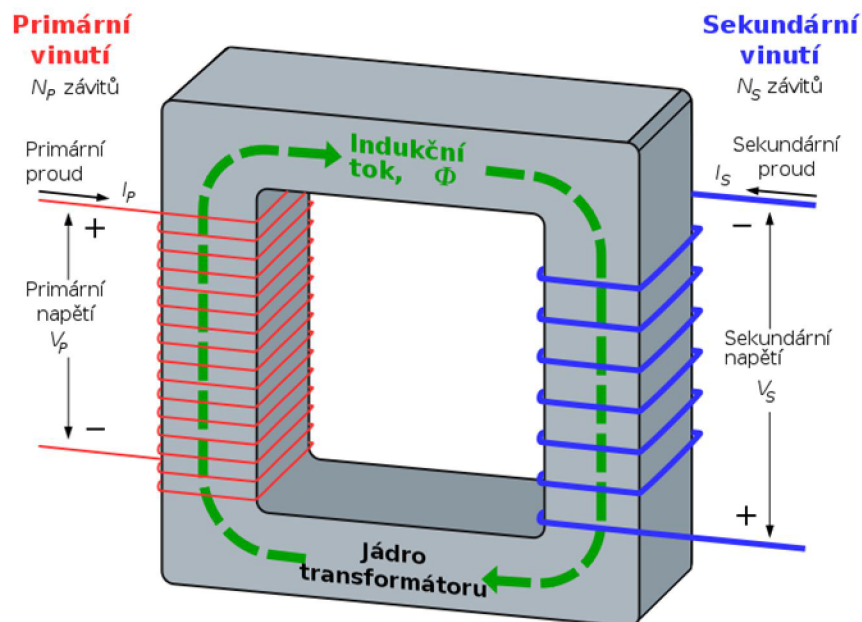
U_s je napětí na sekundárním vinutí;

I_s je proud tekoucí sekundárním vinutím;

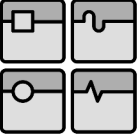
N_s je počet závitů sekundárního vinutí;

p je převod transformátoru.

Při $p > 1$ jde o snižující transformátor (napětí na sekundárním vinutí je nižší) a při $p < 1$ se jedná o zvyšovací transformátor.



Obrázek 5. Principiální schéma transformátoru [10]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 20
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

2 DIAGNOSTICKÉ VELIČINY VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

U výkonových olejových transformátorů se v rámci provádění technické diagnostiky měří následující diagnostické veličiny, jejich bližší popis lze nalézt v [1]:

1. Elektrická pevnost U_p [kV/2,5mm]

Elektrická pevnost je nejčastěji stanovovaný parametr. Je definována jako poměr průrazného napětí vztaženého na vzdálenost testovaných elektrod. Průrazné napětí je nejmenší napětí v průběhu zkoušky při vzniku prvního výboje mezi elektrodami. Velikost elektrické pevnosti ukazuje, jestli olej obsahuje emulgovanou vodu nebo plyny a nečistoty.

2. Číslo kyselosti $\check{C}K$ [mgKOH/g]

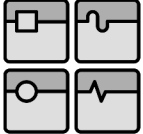
Číslo kyselosti je množství miligramů KOH (hydroxid draselný), které je vyžadováno v nevodném alkoholickém prostředí k neutralizaci všech kyselých složek v 1g oleje. Podle hodnoty $\check{C}K$ může být stanoven stupeň zastárnutí oleje. Čím vyšší množství kyselých látek, tím vyšší je stupeň zastárnutí oleje.

3. Ztrátový činitel $Tg\delta_{70}$ [-]

Ztrátový činitel charakterizuje dielektrické ztráty v izolaci. Faktor 70 ukazuje teplotu měřeného objektu. Růst hodnoty ztrátového činitele odpovídá růstu zahřívání izolace a jejímu rychlému stárnutí. Jeho velikost ukazuje na stav izolace ve smyslu zda je izolační soustava zestárlá nebo navlhla.

4. Relativní permitivita ϵ_{r70} [-]

Relativní permitivita charakterizuje vliv prostředí na intenzitu elektrického pole, tedy namáhání izolace v tomto poli. U transformátorového oleje se pohybuje relativní permitivita mezi hodnotami 2 a 3. Podle tohoto parametru se posuzuje čistota izolačního oleje, permitivita roste se zvyšujícím se stupněm provozního zastárnutí.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 21
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

5. Vnitřní rezistivita ρ_{70} [$\Omega\text{cm } 10^{12}$]

Vnitřní rezistivita je převrácená hodnota elektrické vodivosti, používá se při vyhodnocování kvality izolačních olejů. Její hodnota ukazuje na obsah vody a cizích složek v izolačním oleji. Vnitřní rezistivita se určuje z proudu protékajícího vzorkem pomocí pikoampérmetru.

6. Povrchové napětí σ [N/m]

Povrchové napětí je síla, která působí na jednotku délky povrchu kolmo k této délce a tangenciálně k ploše povrchu. Tato hodnota indikuje vznik polárních molekul kyslíku v oleji, které jsou produkty stárnutí a ukazují na počátek stárnutí oleje.

7. Obsah vody Q_v [g/t]

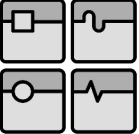
Voda výrazně zhoršuje izolační vlastnosti oleje. Zdrojem vlhkosti je vlhkost z okolního vzduchu transformátoru nebo v podobě produktů oxidačního stárnutí.

8. Celkový obsah plynů Q_p [%]

Při rozkladu oleje a pevné izolace vznikají v důsledku elektrických poruch plyny, které významně ovlivňují vlastnosti oleje. Hlavním zdrojem plynů jsou částečné výboje, kde vodivý ionizovaný kanál dosahuje teplot až několika tisíc stupňů Celsia a dochází tak k uvolňování plynů. Jestliže dojde k elektrické či tepelné poruše, rozštěpí se některé z vazeb C-H a C-C. Tyto nestabilní elementy rekombinují v molekuly plynu. Typické plyny vznikající z minerálních olejů a celulózy jsou:

- **Obsah metánu CH_4 [$\mu\text{l/l}$];**
- **Obsah etánu C_2H_6 [$\mu\text{l/l}$];**
- **Obsah etylenu C_2H_4 [$\mu\text{l/l}$];**
- **Obsah acetylenu C_2H_2 [$\mu\text{l/l}$];**
- **Obsah vodíku H_2 [$\mu\text{l/l}$];**
- **Obsah oxidu uhličitého CO_2 [$\mu\text{l/l}$];**
- **Obsah oxidu uhelnatý CO [$\mu\text{l/l}$];**

Každý plyn se začíná projevovat při různých teplotách.. Z klasifikace a koncentrace plynů lze určit typ poruchy, příčinu a její lokalizaci. Závažnost vznikající poruchy závisí na celkovém obsahu plynů.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 22
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

9. Odpor V:N R_{60} [MΩ]

Izolační odpor ukazuje na nejslabší místo izolačního systému, vlivem vlhkosti se hodnoty odporu snižují. Index 60 ukazuje na čas v sekundách, po který se provádějí odečty absorpčního proudu po přiložení napětí na objekt. V:N ukazuje na zapojení měřicích přístrojů při měření odporu.

- **V** – vinutí vyššího napětí;
- **N** – vinutí nižšího napětí;
- **S** – vinutí středního napětí;
- **K** – kostra, nádoba.

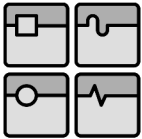
10. Kapacita V:N C_x [pF], V:K C_x [pF]

Stálost kapacity je známkou kvality izolantu. Změna kapacity vinutí ukazuje na poškození izolace. V:N a V:K ukazuje opět na zapojení měřicích přístrojů při měření kapacity.

11. Ztrátový činitel V:N T_g [%], V:K T_g [%]

Ztrátový činitel ukazuje na ztráty polarizací v izolaci v %. V:N a V:K značí zapojení měřicích při měření ztrátového činitele. Růst hodnoty ztrátového činitele odpovídá růstu zahřívání izolace a její rychlému stárnutí.

Popis zkoumaných diagnostických veličin je podle [1].



3 TEORIE ČASOVÝCH ŘAD

3.1 Obecná teorie časových řad

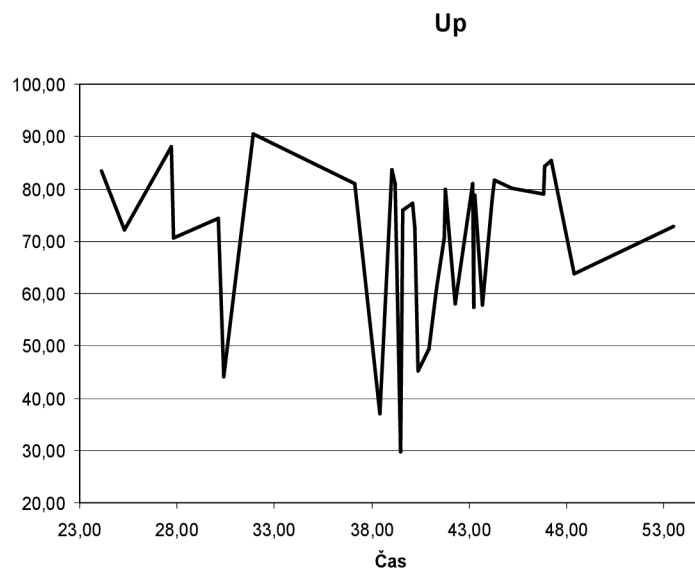
Časová řada podle [5] je posloupnost měřených hodnot, které jsou chronologicky uspořádané v čase:

$$y_1, y_2, y_3, \dots, y_n \quad (3)$$

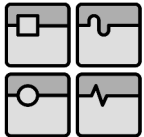
kde y_i ($i = 1, \dots, n$) jsou hodnoty časové řady statistického znaku a index i ukazuje na časový okamžik t_i ($t_i < t_{i+1}$) měření hodnoty. Časové řady se znázorňují pomocí grafu v kartézské souřadné soustavě, kde na ose y jsou hodnoty y_i a na ose x jsou časové okamžiky t_i . Na Obr. 6. je uveden příklad grafu časové řady pro veličinu U_p transformátoru Slapy1.

Časové řady musí splňovat následující podmínky:

- údaje musí být chronologicky uspořádané v čase;
- údaje musí být porovnatelné, tvořeny jednou metodou sběru dat a mít stejné jednotky měření;
- počet údajů musí být dostatečný pro určení parametrů časových řad (7-10 údajů pro každou řadu).



Obrázek 6. Příklad grafu časové řady pro veličinu U_p transformátoru Slapy1.

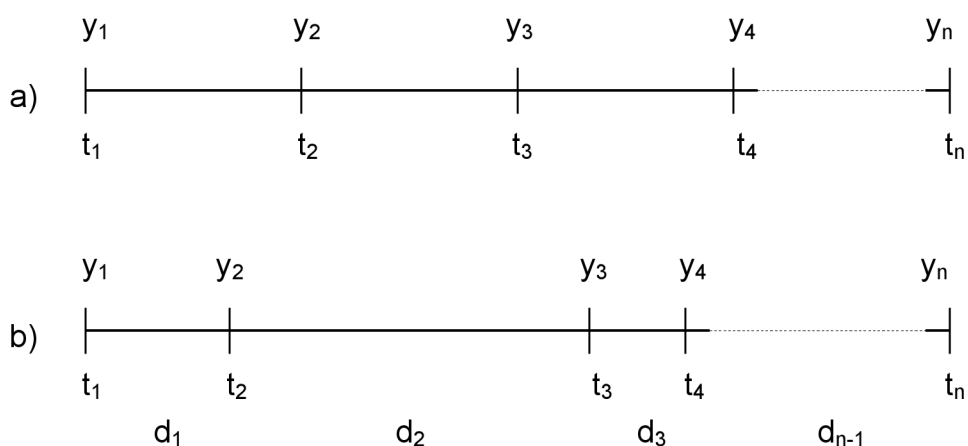


3.2 Klasifikace časových řad

Podle charakteru časového parametru původních veličin se časové řady dělí na:

- intervalové;
- okamžikové.

Příklad intervalové a okamžikové časové řady je na Obr. 7.



Obrázek 7. Příklad časové řady a) intervalové, b) okamžikové.

V intervalových časových řadách se měření hodnot provádí po určité časové intervaly (hodina, den, týden, měsíc, atd.). Její údaje většinou odpovídají množství. Důležitou vlastností intervalové časové řady je možnost součtu údajů a tento součet má určitý význam. V tomto se liší intervalové časové řady od okamžikových časových řad. Základní číselná charakteristika intervalové časové řady je aritmetický průměr:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (4)$$

U okamžikových časových řad jsou údaje spojené s určitými časovými okamžiky a odpovídají stavu pozorovaného jevu. Základní číselná charakteristika je chronologický průměr:

$$\bar{y}_{chr} = \frac{\frac{y_1 + y_2}{2}d_1 + \frac{y_2 + y_3}{3}d_2 + \dots + \frac{y_{n-1} + y_n}{2}d_{n-1}}{d_1 + d_2 + \dots + d_{n-1}}, \quad (5)$$

kde d_i je vzdálenost časových okamžiků:

$$d_1 = t_2 - t_1, \quad d_2 = t_3 - t_2, \quad d_i = t_n - t_{n-1} \quad (6)$$

Předešlé dva typy lze také charakterizovat jako řady původních veličin. Vedle těchto řad dále existují časové řady odvozených veličin, které se dále dělí na

- součtové (kumulativní, klouzavých součtů);
- průměrové (kumulativních průměrů, klouzavých průměrů);
- rozdílové a poměrové.

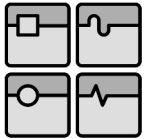
Součtové kumulativní časové řady tvoří načítané hodnoty pozorovaného jevu od počátku do konce. Používají se u intervalových řad a při sledování plnění ukazatelů za určitý časový interval.

Časové řady kumulativních průměrů jsou takové řady, u kterých se kumulativní součet řady dělí počtem období, za které byl nakumulován. Používají se především u intervalových řad. Tento nástroj ukazuje na rozdíl mezi kumulativními průměry a celkovým průměrem za sledované období.

Součtové řady klouzavých součtů jsou tvořeny postupnými součty předem několika po sobě jdoucích hodnot původní řady. Součtové řada klouzavých součtů se používají u intervalové řad a ukazují na vývojové tendence původní řady ve dvou delších obdobích.

Časové řady klouzavých průměrů jsou řady, kdy se klouzavý součet podělí počtem sečtených období.

Uvedenou klasifikace lze nalézt v [5].



3.3 Dekompozice časových řad

Vývoj časové řady podle [6], [7], [8] ovlivňuje několik faktorů, které mají vliv na hodnoty časové řady. Jsou to:

- T_t – trend časové řady;
- P_t – periodické vlivy, podle potřeby se dělí na cyklickou složku C_t a sezonní složku S_t ;
- E_t – nahodilé vlivy;
- D_t – deterministická složka.

Existují dva typy dekompozice časové řady (dva modely):

1. Aditivní dekompoziční model (ADM):

$$y_t = T_t + P_t + E_t \text{ nebo } y_t = T_t + \underbrace{C_t + S_t}_{D_t} + E_t, \quad (7)$$

kdy mají všechny složky stejné jednotky jako y_t .

2. Multiplikativní dekompoziční model (MDM):

$$y_t = T_t P_t E_t \text{ nebo } y_t = T_t \underbrace{C_t S_t}_{D_t} E_t, \quad (8)$$

kdy má pouze trendová složka stejné jednotky jako y_t a ostatní složky jsou bezrozměrné veličiny.

3.4 Vývoj časových řad

K elementárním charakteristikám rozboru časových řad patří absolutní a relativní míry růstu. Rozbor absolutních a relativních měr růstu pomáhá s výběrem funkce na vyrovnání časové řady.

Absolutní charakteristiky představují absolutní porovnání hodnot jednotlivých členů časové řady. Patří mezi ně:

1. Absolutní přírůstek (diference) - nejjednodušší charakteristika dynamiky vývoje časových řad, vyjadřuje rozdíl dvou po sobě jdoucích členů řady. Absolutní přírůstky můžeme vyjádřit řadou prvních (absolutních) diferencí:

$$\Delta_i^1 = y_i - y_{i-1}, \text{ pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

Z prvních diferencí lze snadno odvodit druhé, resp. třetí diference. Pokud jsou první diference blízké konstantě, má časová řada lineární trend a lze ji vyrovnat pomocí přímky. Druhé diference vyjadřují rozdíl dvou po sobě jdoucích prvních diferencí. Jsou-li druhé diference blízké konstantě, trend lze graficky vyjádřit parabolou. Další diference se určí podobným způsobem.

2. Průměrný absolutní přírůstek:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n \Delta_i = \frac{y_n - y_1}{n-1} \quad (10)$$

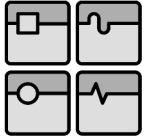
Relativní charakteristiky představují rychlost vývoje časové řady. Patří mezi ně:

1. Koeficient růstu vyjadřuje procentní nárůst hodnoty časové řady v okamžiku t proti předcházejícímu období:

$$k_i = \frac{y_i}{y_{i-1}}, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

2. Koeficient přírůstku vyjadřuje dynamiku absolutního přírůstku porovnávaného s příslušným obdobím:

$$\kappa_i = \frac{\Delta_i^1}{y_{i-1}} = k_i - 1, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (12)$$



3. Průměrný koeficient růstu je úhrnná charakteristika relativních změn pro celou časovou řadu. Počítá se jako geometrický průměr z jednotlivých koeficientů růstu:

$$\bar{k} = \sqrt[n]{k_2 k_3 \cdots k_n} = \sqrt[n]{\frac{y_n}{y_1}} \quad (13)$$

Všechny tyto koeficienty jsou v procentuálním tvaru. Pokud jsou koeficienty růstu k_i přibližně konstantní, je průběh časové řady téměř exponenciální. Podrobnější informace o vývoji časových řad lze nalézt v [5].

3.5 Momentové charakteristiky

Na základě momentových charakteristik časových řad lze charakterizovat centrální tendenci dat [6]. Momentové míry jsou jednoduché číselné charakteristiky, které se vyčíslují ze všech dat časové řady. Některé z těchto momentových charakteristik jsou:

- Aritmetický průměr je maximálně hodnověrný odhad střední hodnoty normálního rozdělení:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (14)$$

- Rozptyl je míra současně rozptýlení všech prvků kolem střední hodnoty:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2; \quad (15)$$

- Smerodatná odchylka je míra statistické disperze:

$$s = \sqrt{\sigma^2}. \quad (16)$$

3.6 Analýza časových řad

Při provádění analýzy časových řad většinou sledujeme dva hlavní cíle, a to určení povahy časové řady nebo předpovídání časové řady (predikci budoucích hodnot na základě zákonitosti minulých a současných hodnot). Oba tyto cíle vyžadují, aby byl přesně definován model časové řady, s jehož pomocí se vhodně interpretují pozorovaná data.

Analýza časových řad se začíná volbou okamžiků pozorování které musí být se stejnými rozestupy [7], [8], [9]. Počet pozorování musí být dostatečný k určení parametrů časových řad. V případě, že časové řady obsahují odlehlé hodnoty, je nutné, je z analýzy odstranit. Taková data jsou způsobena chybným měřením nebo překlepem a proto mohou významně zkreslit výsledky analýzy. Odlehlé hodnoty lze identifikovat například pomocí diagram *Box-and-Whisker Plot* ("krabicový diagram").

Pro analýzu časových řad diagnostických měření výkonových olejových transformátorů bude **dále uvažován pouze aditivní dekompoziční model (ADM)**.

ADM má za podmínku konstantní rozptyl dat, pokud tato podmínka není splněna, provádí se stabilizace rozptylu.

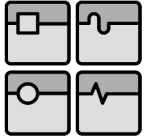
3.6.1 Stabilizace rozptylu

Stabilizace rozptylu podle [7], [8], [9] je transformace časové řady s nekonstantním rozptylem na řadu s konstantním rozptylem. Podstatou této metody je stanovení parametru θ , který se pak použije pro transformaci řad. Parametr θ se odhadne z rovnice závislosti směrodatné odchylky $\sigma_x(t)$ na střední hodnotě $\mu_x(t)$:

$$\sigma_x(t) = \sigma_0 \mu_x(t)^\theta \quad (17)$$

Znalost tohoto parametru umožňuje stanovit parametr λ a poté použít mocninnou nebo logaritmickou transformaci pozorovaných řad:

$$\lambda = 1 - \theta \quad (18)$$



Mocninná transformace:

$$y_t = x_t^\lambda \text{ pro } \lambda \neq 0 \quad (19)$$

Logaritmická transformace:

$$y_t = \ln(x_t) \text{ pro } \lambda = 0 \quad (20)$$

Stabilizaci rozptylu lze provést pomocí Matlabu nebo jiného softwaru.

Dalším krokem analýzy dat je stanovení periodických komponent.

3.6.2 Identifikace periodických komponent

Periodické komponenty se v časových řadách vyskytují v důsledku působení periodických vlivů. Podle délky periody se periodická složka dělí na cyklickou a sezónní komponentu. V praxi je však velmi obtížné tyto složky od sebe odlišit. Proto se většinou nerozlišují a provádí se analýza P_t jako celku.

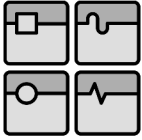
Základem identifikace periodické složky je rozklad T-periodické funkce $x(t)$ do její Fourierovy řady [7], [8], [9]:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{\frac{i2\pi kt}{T}} = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{T} - \varphi_k\right), \quad (21)$$

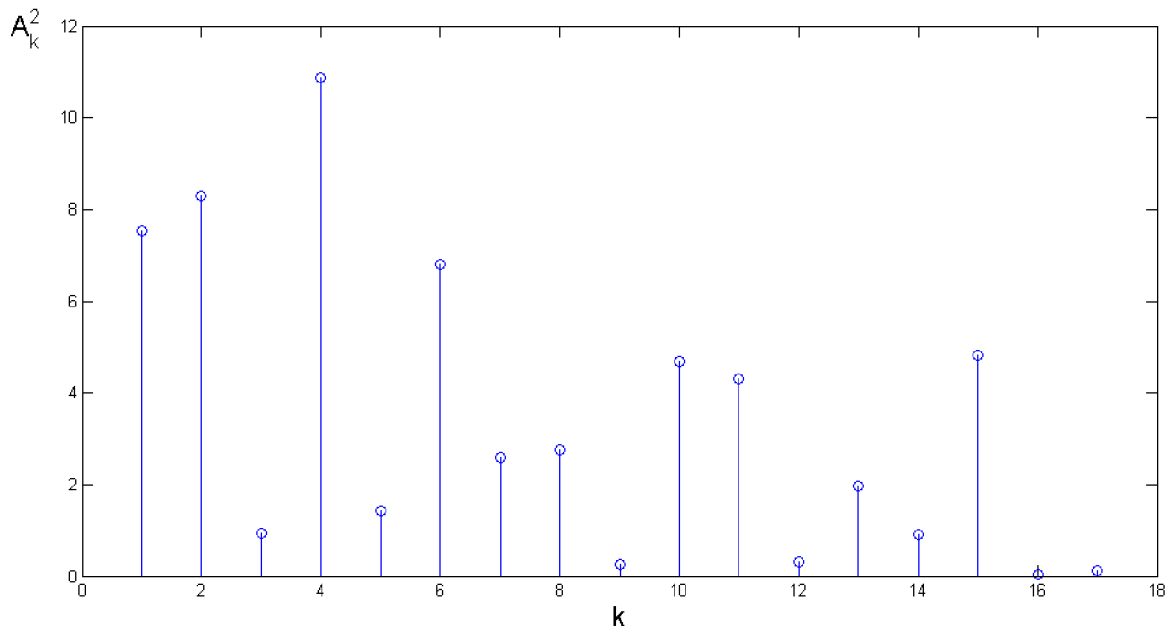
$$A_k = 2|c_k|, \quad (22)$$

Velikost A_k^2 je indikátor harmonických komponent. Energeticky nejsilnější harmonické komponenty mají velkou hodnotu A_k^2 .

Komponenty s nejvyšší hodnotou A_k^2 podrobí statistickým testům periodicity. Mezi tyto testy patří například Fisherův test nebo jeho modifikace - Siegelův test. **Fisherův test** testuje nulovou hypotézu o tom, že pozorovaná časová řada neobsahuje významnou harmonickou komponentu. Alternativní hypotéza potom



předpokládá, že časová řada obsahuje harmonickou komponentu. Grafické znázornění odhadu harmonických komponent časové řady se nazývá periodogram a je to vlastně posloupnost hodnot odhadující energetickou hustotu. Příklad periodogramu časové řady je na Obr. 8.



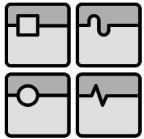
Obrázek 8. Periodogram časové řady

3.6.3 Odhad trendové složky

Trend je velice důležitá komponenta časových řad a představuje tendenci vývoje časových řad a lze podle něj predikovat další vývoj časových řad. Pro odhad trendu časových lze použít celou řadu metod. Některé z nich jsou podle [7], [8], [9]:

- 1. metoda malého trendu** - předpokládá v každé periodě přibližně konstantní trend, který se odhadne jako průměr;
- 2. metoda klouzavých průměrů;**
- 3. regresní model** – je založen na metodě nejmenších čtverců a má různé typy:
 - lineární regresní model:

$$T_t = \beta_1 t^p + \beta_2 t^{p-1} + \dots + \beta_{p+1}; \quad (23)$$



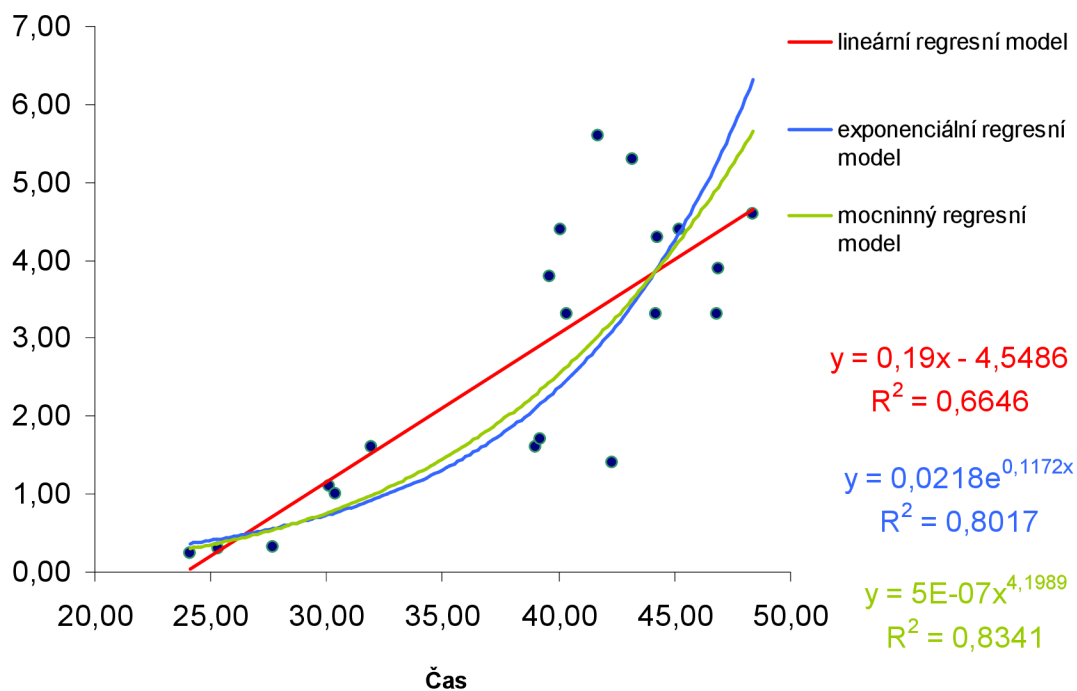
- exponenciální regresní model:

$$T_t = \beta_1 e^{\beta_2 t}; \quad (24)$$

- mocninný regresní model:

$$T_t = \beta_1 t^{\beta_2}. \quad (25)$$

U každého regresního modelu lze stanovit koeficient determinace R^2 , který nabývá hodnot z intervalu $\langle 0,1 \rangle$. Číslo $R^2 \cdot 100\%$ obsahuje procentuální podíl z rozptylu hodnot časové řady „vysvětlený“ zvoleným regresním modelem. Tato hodnota napoví o vhodnosti zvoleného modelu pro odhad trendu příslušné časové řady, číslo blízké 1 značí, že zvolený model je vhodný. Příklad grafického znázornění regresních modelů je na Obr. 9.



Obrázek 9. Grafického znázornění regresních modelů

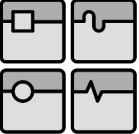
4. robustní regrese – používá ve spojení s regresní diagnostikou na základě metody nejmenších čtverců.

Rovnice získané při odhadování trendové složky umožňují predikovat další vývoj časových řad. V případě analýzy časových řad diagnostických veličin výkonových olejových transformátorů lze tak předpovídat jejich další vývoj, což napovídá o provozním stavu, ve kterém se transformátor bude v budoucím čase nacházet. Pokud jsou k dispozici kritické hodnoty těchto diagnostických veličin, lze tak určit čas možné poruchy transformátoru. Kritické hodnoty diagnostických veličin je možné získat z technických norem zaměřených na provádění diagnostiky výkonových olejových transformátorů.

3.6.4 Vyšetření chybové složky

Na konci analýzy časových řad podle [7], [8], [9] je nutné posoudit kvalitu výše uvedeného aditivního dekompozičního modelu. Po odečtení trendové a periodické složky se zbylá část podrobí testům, zda se skutečně jedná pouze o náhodnou složku. Jde o následující testy:

- znaménkový test (SGN);
- test růstu a klesání (RNP);
- test Kendalových koeficientů (KEN);
- test Spearmanových koeficientů (SP);
- mediánový test (MED).

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 34
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

4 ANALÝZA ČASOVÝCH ŘAD NĚKTERÝCH DIAGNOSTICKÝCH VELIČIN MĚŘENÝCH U VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

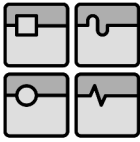
4.1 Popis zkoumaných dat

Tato diplomová práce se zabývá analýzou časových řad diagnostických veličin měřených u výkonových olejových transformátorů a popsanych v 5. kapitoleh této práce. Jedná se o veličiny získané z offline diagnostiky. Data jsou reálná a byla poskytnuta z diagnostických měření transformátorů umístěných v několika vodních elektrárnách na území České republiky. K dispozici bylo původně 11 souborů a v každém z nich 80 diagnostických veličin s výjimkou Dalešice2 a Dalešice6, ve kterých bylo 167 veličin pro každý transformátor.

Počet hodnot pro každou veličinu a pro každý transformátor se pohybuje v rozmezí od nuly do několika desítek. Bylo tedy nutné vyloučit veličiny a celé soubory, které měly nedostatečný počet hodnot. Pro tento účel byla vypracována samostatná tabulka v Excelu, která zaznamenává počet měření jednotlivých veličin pro každý transformátor.

Na základě rozboru dat umístěných v této tabulce bylo rozhodnuto vyřadit některé soubory a veličiny z analýzy. Důvodem pro jejich vyřazení byl malý počet měření, velké nepřesnosti či malá vypovídající skutečnost veličiny vzhledem k určení celkového stavu stroje. Konečný počet transformátorů vstupujících do dále uvedené analýzy časových řad je 5, a to Slapy1, Slapy2, Slapy3, Dalešice2, Dalešice6. V každém souboru se nachází 20 diagnostických veličin s výjimkou souboru Slapy2, ve kterém je pouze 12 veličin (z důvodu nedostatku dat byly vyloučeny plynové charakteristiky).

Diagnostické veličiny z 5. kapitoly této práce lze rozdělit na tři typy: veličiny charakterizující stav olejové náplně, veličiny plynové chromatografie a veličiny charakterizující stav izolace vinutí.



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Veličiny charakterizující stav olejové náplně jsou:

- elektrická pevnost U_p ;
- číslo kyselosti $ČK$;
- ztrátový činitel $Tg\delta_{70}$;
- relativní permitivita ϵ_{r70} ;
- vnitřní rezistivita ρ_{70} ;
- povrchové napětí σ ;
- obsah vody Q_v .

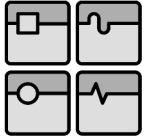
Veličiny plynové chromatografie (koncentrace plynů rozpuštěných v izolačním oleji) jsou:

- celkový obsah plynů Q_p ;
- metan CH_4 ;
- etan C_2H_6 ;
- etylen C_2H_4 ;
- acetylen C_2H_2 ;
- vodík H_2 ;
- oxid uhličitý CO_2 ;
- oxid uhelnatý CO .

Veličiny charakterizující stav izolace vinutí jsou:

- izolační odpor V:N R_{60} ;
- kapacita V:N C_x ;
- kapacita V:K C_x ;
- ztrátový činitel V:N $Tg\delta$;
- ztrátový činitel V:K $Tg\delta$.

Tab.1, Tab.2, Tab.3 zobrazují počet měření diagnostických veličin pro všechny zkoumané transformátory.



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 1. Veličiny charakterizující stav olejové náplně

	U_p	$\check{C}K$	$Tg\delta_{70}$	ϵr_{70}	ρ_{70}	σ	Q_v
Slapy1	34	29	28	28	23	28	68
Slapy2	15	10	10	10	9	8	17
Slapy3	20	20	20	20	19	19	22
Dalešice2	27	25	25	25	23	25	28
Dalešice6	27	25	25	25	24	24	28

Tabulka 2. Veličiny plynové chromatografie

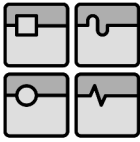
	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	H_2	CO_2	CO	Q_p
Slapy1	13	13	12	11	13	13	13	13
Slapy2	4	4	4	4	4	4	4	4
Slapy3	10	10	10	9	10	10	9	10
Dalešice2	43	45	46	43	42	47	45	47
Dalešice6	47	47	47	47	44	46	47	46

Tabulka 3. Veličiny charakterizující stav izolace vinutí

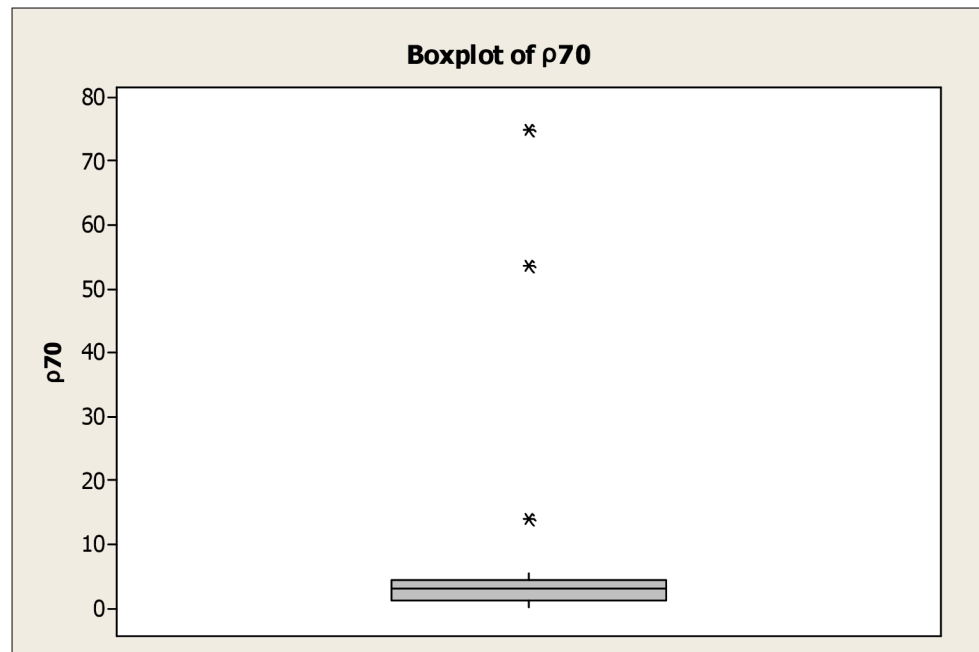
	V:N	V:N	V:K	V:N	V:K
	R_{60}	C_x	C_x	$Tg\delta$	$Tg\delta$
Slapy1	16	20	18	20	18
Slapy2	9	11	11	11	11
Slapy3	8	14	14	14	14
Dalešice2	8	17	21	17	21
Dalešice6	12	12	24	23	25

4.2 Odstranění odlehlých hodnot.

Před provedením podrobné analýzy časových řad je nutné z nich odstranit odlehlé hodnoty, které se v nich často vyskytují. Je to nutné především z důvodu, že taková data mohou významně zkreslit výsledky celé analýzy. Tyto odlehlé hodnoty často vznikají jako výsledek chybných měření nebo z důvodu překlepů.



Odlehlé hodnoty byly v případě analýzy časových řad diagnostických veličin výkonových olejových transformátorů odstraněny pomocí krabicových grafů vytvořených softwarem Minitab. Na Obr. 10. je příklad takového krabicového grafu veličiny p_{70} pro soubor Slapy1. Hvězdičky v diagramu značí odlehlé hodnoty.



Obrázek 10. Krabicový graf veličiny p_{70} pro soubor Slapy1.

Pro časovou řadu p_{70} byly tedy identifikovány tři odlehlé hodnoty: 53,5; 14; 74,8.

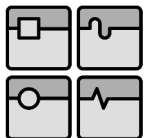
Nakonec byly všechny odlehlé hodnoty vyloučeny z uvažovaných časových řad.

4.3 Momentové charakteristiky

Pro každou časovou řadu pomoci funkce *Display Descriptive Statistics* v softwaru Minitab byly spočítány tři momentové charakteristiky:

- aritmetický průměr;
- směrodatná odchylka;
- rozptyl.

Výsledky jsou shrnuty v Tab. 4, Tab. 5 a Tab. 6.



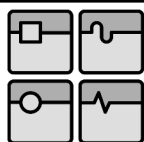
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 4. Momentové charakteristiky pro veličiny charakterizující stav olejové náplně

		U_p	ČK	$Tg\delta_{70}$	ε_{r70}	ρ_{70}	σ	QV
Slapy1	Průměr	69,94	0,0397	0,0141	2,1848	2,77	0,0382	17,03
	Sm.odch	15,38	0,0254	0,0103	0,0351	1,76	0,0043	7,07
	Rozptyl	236,39	0,0007	0,0001	0,0012	3,09	1,8E-05	49,98
Slapy2	Průměr	76,15	0,0676	0,0649	2,2339	0,78	0,0393	19,09
	Sm.odch	5,95	0,0378	0,0607	0,0074	0,43	0,0039	10,85
	Rozptyl	35,34	0,0014	0,0037	0,0001	0,18	0,00002	117,69
Slapy3	Průměr	78,71	0,0394	0,0173	2,1876	13,12	0,0416	16,06
	Sm.odch	8,82	0,0374	0,0224	0,0286	14,43	0,0048	11,96
	Rozptyl	77,79	0,0014	0,0005	0,0008	208,23	0,00002	142,98
Dalešice2	Průměr	81,28	0,0221	0,0121	2,1905	7,31	0,0457	12,37
	Sm.odch	5,45	0,0155	0,0177	0,0088	7,72	0,0064	5,72
	Rozptyl	29,68	0,0002	0,0003	0,0001	59,63	0,00004	32,76
Dalešice6	Průměr	78,21	0,0302	0,0231	2,1834	5,87	12,81	11,59
	Sm.odch	7,15	0,0152	0,0502	0,0178	5,55	20,36	4,53
	Rozptyl	51,09	0,0002	0,0025	0,0003	30,76	414,42	20,56

Tabulka 5. Momentové charakteristiky pro veličiny plynové chromatografie

		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	CO ₂	CO	Q_p
Slapy1	Průměr	5,82	3,136	13,38	2,020	28,46	1348	100,2	4,008
	Sm.odch	6,84	3,438	12,17	2,252	28,26	1232	144,1	2,887
	Rozptyl	46,80	11,821	148,22	5,070	798,70	1517477	20761,5	8,335
Slapy3	Průměr	6,60	4,150	22,17	2,756	34,59	2407	366,7	7,587
	Sm.odch	3,08	2,488	10,23	2,393	21,58	1071	235,6	1,683
	Rozptyl	9,46	6,192	104,68	5,725	465,51	1147885	55494,8	2,833
Dalešice2	Průměr	4,13	3,010	13,95	1,723	18,46	1212	104,3	4,636
	Sm.odch	3,12	2,178	7,30	1,535	13,12	905	81,6	2,677
	Rozptyl	9,72	4,743	53,27	2,355	172,17	819889	6659,4	7,167
Dalešice6	Průměr	2,70	2,383	11,94	1,478	16,76	1414	129,9	5,391
	Sm.odch	1,80	1,973	6,62	1,343	12,47	866	89,6	2,654
	Rozptyl	3,237	3,892	43,81	1,804	155,62	749555	8019,3	7,044



Tabulka 6. Momentové charakteristiky pro veličiny charakterizující stav izolace vinutí

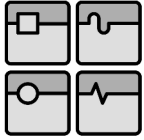
		V:N R_{60}	V:N C_x	V:N $tg\delta$	V:K $tg\delta$	V:K C_x
Slapy1	Průměr	1131	14641	0,5206	1,4110	1969,0
	Sm.odch	644	437	0,3695	0,6220	209,3
	Rozptyl	414235	190622	0,1366	0,3870	43795,3
Slapy2	Průměr	1141	12537	1,4120	1,7610	1609,0
	Sm.odch	807	4696	1,1370	0,6540	638,0
	Rozptyl	651836	22047990	1,2940	0,4270	406611,0
Slapy3	Průměr	2520	14499	0,2832	0,9399	1855,6
	Sm.odch	1894	172	0,1649	0,3696	86,0
	Rozptyl	3586200	29477	0,0272	0,1366	7397,9
Dalešice2	Průměr	15779	2307	0,4500	0,9268	2692,8
	Sm.odch	13743	11	0,1137	0,3759	14,3
	Rozptyl	1,9E+08	113	0,0129	0,1413	204,5
Dalešice6	Průměr	11563	2254	0,2702	0,4131	2610,4
	Sm.odch	11081	20	0,0801	0,1211	27,1
	Rozptyl	1,23E+08	388	0,0064	0,0147	735,6

Výše uvedené tabulky ukazují, že aritmetické průměry veličin jsou přibližně stejné, s výjimkou veličin charakterizující stav izolace vinutí, které se vyznačují velkými rozdíly mezi aritmetickými průměry mezi různými transformátory (soubory).

4.4 Stabilizace rozptylu

Stabilizace rozptylu je vlastně transformace časové řady s nekonstantním rozptylem na časovou řadu s konstantním rozptylem.

Předpokladem pro další práci s daty je konstantní rozptyl časových řad z důvodu modelování časových řad pomocí ADM. K vyšetřování konstantnosti rozptylu byla vytvořena speciální funkce v softwaru Matlab. Tato funkce identifikuje časové řady s nekonstantním rozptylem a tyto řady transformuje.



Pro všechny časové řady bylo provedeno vyšetřování konstantnosti rozptylu s výsledky uvedenými v Tab. 7, Tab. 8, Tab. 9. V případě, že nebyla zamítnuta hypotéza o konstantním rozptylu, je pole v tabulce proškrtnuté. Pokud časová řada byla transformována, v tabulce zkratka ML značí mocninnou transformace a LT značí logaritmičnou transformaci. V případě, že je v poli tabulky NA, nebyl pro danou veličinu a daný transformátor k dispozici dostatek měření pro výpočet.

Tabulka 7. Vyšetřování konstantnosti rozptylu veličiny charakterizující stav olejové náplně

	U_p	ČK	$Tg\delta_{70}$	ε_{r70}	ρ_{70}	σ	Q_V
Slapy1	-	-	-	-	-	-	-
Slapy2	-	-	-	-	-	NA	-
Slapy3	-	-	MT	-	-	-	-
Dalešice2	-	-	LT	-	-	-	MT
Dalešice6	-	-	-	-	-	MT	-

Tabulka 8. Vyšetřování konstantnosti rozptylu pro veličiny plynové chromatografie

	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	CO ₂	CO	Q_p
Slapy1	-	-	-	-	-	-	-	-
Slapy3	-	-	-	NA	-	LT	MT	-
Dalešice2	-	-	-	-	-	-	-	-
Dalešice6	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabulka 9. Vyšetřování konstantnosti rozptylu pro veličiny charakterizující stav izolace vinutí

	V:N	V:N	V:N	V:K	V:K
	R_{60}	C_x	$tg\delta$	$tg\delta$	C_x
Slapy1	-	-	MT	-	-
Slapy2	-	MT	-	LT	-
Slapy3	-	-	MT	-	-
Dalešice2	MT	LT	-	-	-
Dalešice6	-	-	-	-	-

Z těchto výsledků vyplývá, že většina z časových řad měla konstantní rozptyl a nevyžadovala tak žádnou transformaci. Nejčastěji byly transformovány veličiny charakterizující stav izolace vinutí, zatímco veličiny plynové chromatografie byly téměř nedotčené.

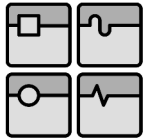
4.5 Identifikace periodických komponent

Periodické komponenty se v časových řadách vyskytují v důsledku působení periodických vlivů. Cílem tohoto kroku je identifikovat energeticky nejsilnější periodické komponenty. Jejich identifikace v případě analýzy časových řad diagnostických veličin výkonových olejových transformátorů byla provedena prostřednictvím periodogramu, který byl počítán pomocí speciálně vytvořené funkce v softwaru Matlab. Tato funkce využívá Fisherův a Siegelův test, kdy se testuje hypotéza o významnosti jednotlivých periodických komponent. Výsledkem je počet period obsažených v jednotlivých časových řadách.

Pro všechny časové řady bylo provedena identifikace periodických komponent s výsledky uvedenými v Tab. 10, Tab. 11, Tab. 12. kF je počet významných period podle Fisherova testu a kS je počet významných period podle Sieglůva testu. Výsledek "1-by-0" znamená, že řada neobsahuje žádnou významnou periodickou složku. V případě výsledku "1" nemá řada také žádnou významnou periodu, v případě "2" je délka významné periody půl řady, v případě "3" je délka významné periody třetina řady. Délka periody se spočítá jako podíl délky řady a počtu významných period. Zda je perioda významná nebo není určí právě Fisherův nebo Sieglův test. V případě nedostatku dat pro analýzu je pole v tabulkách proškrtnuté.

Tabulka 10. Identifikace periodických komponent pro veličiny charakterizující stav olejové náplně.

		U_p	$\check{C}K$	$Tg\delta_{70}$	ϵ_{r70}	ρ_{70}	σ	Q_V
Slapy1	kF	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1	1	1-by-0	3
	kS	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1	1	1-by-0	3



DIPLOMOVÁ PRÁCE

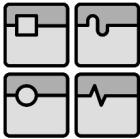
		U_p	ČK	$Tg\delta_{70}$	ε_{r70}	ρ_{70}	σ	Q_V
Slapy2	kF	1-by-0	-	-	-	-	-	1-by-0
	kS	1-by-0	-	-	-	-	-	1-by-0
Slapy3	kF	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1	1	1-by-0	1
	kS	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1	1	1-by-0	1
Dalešice2	kF	1-by-0	1-by-0	1-by-0	2	1-by-0	1-by-0	1-by-0
	kS	1-by-0	1-by-0	1-by-0	2	1-by-0	1-by-0	1-by-0
Dalešice6	kF	1-by-0	1	1-by-0	1	1	1-by-0	1-by-0
	kS	1-by-0	1	1-by-0	1	1	1-by-0	1-by-0

Tabulka 11. Identifikace periodických komponent pro veličiny plynové chromatografie.

		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	CO ₂	CO	Q_p
Slapy1	kF	1-by-0	2	1-by-0	-	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0
	kS	1-by-0	2	1-by-0	-	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0
Slapy3	kF	-	-	-	-	-	-	-	-
	kS	-	-	-	-	-	-	-	-
Dalešice2	kF	1-by-0	1-by-0	1	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0
	kS	1-by-0	1-by-0	1	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0
Dalešice6	kF	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1	1
	kS	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1	1

Tabulka 12. Identifikace periodických komponent pro veličiny charakterizující stav izolace vinutí.

		V:N	V:N	V:N	V:K	V:K
		R_{60}	C_x	$tg\delta$	$tg\delta$	C_x
Slapy1	kF	1-by-0	1	1-by-0	1-by-0	1-by-0
	kS	1-by-0	1	1-by-0	1-by-0	1-by-0
Slapy2	kF	-	1-by-0	-	-	-
	kS	-	1-by-0	-	-	-
Slapy3	kF	-	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1
	kS	-	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1



		V:N	V:N	V:N	V:K	V:K
		R_{60}	C_x	$tg\delta$	$tg\delta$	C_x
Dalešice2	kF	-	1	1-by-0	1-by-0	1-by-0
	kS	-	1	1-by-0	1-by-0	1-by-0
Dalešice6	kF	-	1	1	2	1-by-0
	kS	-	1	1	2	1-by-0

Výsledky ukazují, že naprostá většina časových řad neměla žádnou periodickou složku, zejména veličiny plynové chromatografie a veličiny charakterizující stav izolace vinutí. V případě přítomnosti periodické složky se další analýza časových řad neprováděla. Tím byly vyloučeny z analýzy následující časové řady:

- Q_V pro Slapy1 (kF=3, kS=3);
- εr_{70} pro Dalešice2 (kF=2, kS=2);
- C_2H_6 pro Slapy1 (kF=2, kS=2);
- V:K $tg\delta$ pro Dalešice6 (kF=2, kS=2).

Na základě tohoto zjištění lze tedy zjednodušit aditivní dekompoziční model časové řady bez periodické složky pouze na součet trendové složky a chybové složky:

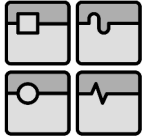
$$y_t = T_t + E_t \quad (26)$$

V dalším textu se tedy bude analyzovat pouze časových řad bez periodické složky, tedy modelované součtem pouze trendové a chybové složky.

4.6 Odhad trendové složky

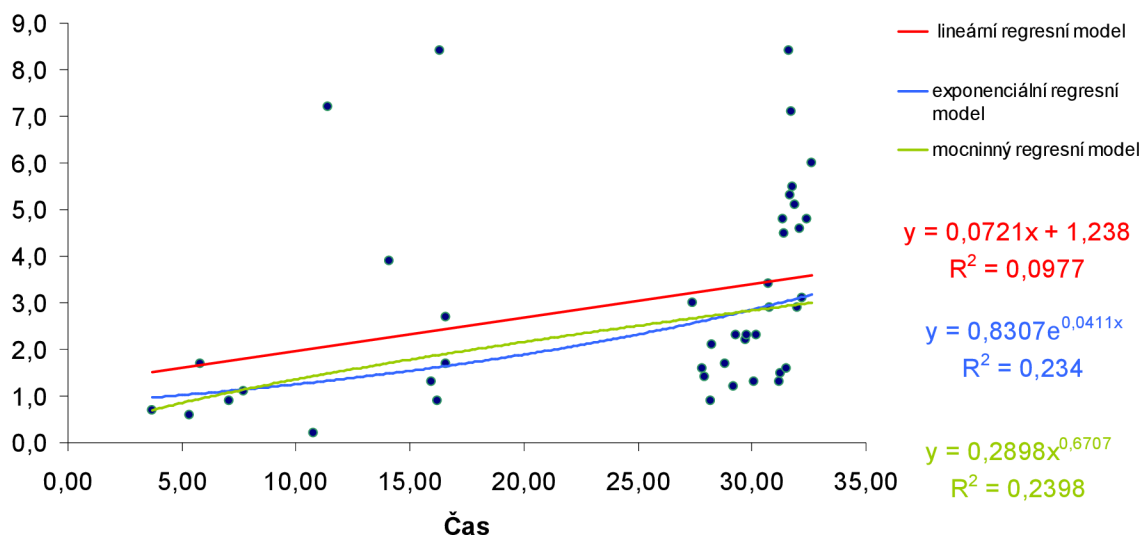
Tento krok je velice důležitý. Trendová komponenta časových řad představuje tendenci vývoje časových řad. Podle něj lze predikovat další vývoj časových řad.

Odhad trendu byl proveden pomocí regresních modelů, které jsou založeny na metodě nejmenších čtverců a byly použity různé typy:



- lineární regresní model;
- exponenciální regresní model;
- mocninný regresní model.

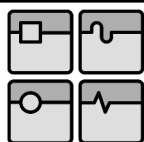
Pro každý regresní model byl stanoven koeficient determinace R^2 . Grafické znázornění regresních modelů pro veličinu C_2H_6 transformátor Dalešice2 je na Obr. 10.



Obrázek 11. Regresní modely pro veličinu C_2H_6 transformátor Dalešice2

Soudě podle Obr. 10 zachycující časovou řadu plynu C_2H_6 exponenciální a mocninný regresní modely měly daleko větší hodnotu R^2 než lineární regresní model. Proto především tyto modely jsou vhodné pro další odhad trendu časové řady C_2H_6 .

Pro všechny časové řady byly zpracovány grafy s regresními modely a hodnoty koeficientu determinace R^2 uvedeny do samostatných tabulek. Tyto hodnoty pak byly analyzovány na vhodnost jednotlivých regresních modelů pro uvažované diagnostické veličiny. Výsledky rozboru jsou uvedeny v Tab. 13, Tab. 14, Tab. 15. Červenou barvou jsou označeny vhodné koeficienty determinace. V případě, že časová řada obsahovala nulu, některé regresní modely nebylo možné provést a kvůli tomu jsou některá pole v tabulkách proškrtnutá. Proškrtnutá jsou také pole u



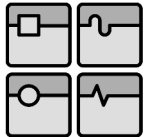
diagnostických veličin, které obsahovaly periodickou složku a tyto řady tak byly z další analýzy vyloučeny.

Tabulka 13. Hodnoty koeficientu determinace R^2 pro veličiny charakterizující stav olejové náplně.

		U_p	ČK	$Tg\delta_{70}$	ε_{r70}	ρ_{70}	σ	Q_V
Slapy1	L	0,0004	0,2702	0,2590	0,5190	0,6646	0,0595	0,1513
	E	2E-05	0,2108	0,2459	0,7488	0,8017	0,0704	0,1039
	M	0,0007	0,2199	0,2460	0,7560	0,8341	0,0935	0,1062
Slapy2	L	0,2122	0,5061	0,0443	0,5116	0,1259	0,7563	0,7004
	E	0,1522	0,4883	0,0029	0,5112	0,2382	0,7627	0,6134
	M	0,1292	0,4824	0,0007	0,5362	0,3052	0,7740	0,6002
Slapy3	L	0,1429	0,3266	0,1438	0,6285	0,2996	0,2175	0,5943
	E	0,1509	0,2832	0,2828	0,6286	0,5408	0,2436	0,5630
	M	0,1195	0,2824	0,2675	0,6102	0,5190	0,2656	0,5525
Dalešice2	L	0,3226	0,0262	0,1385	0,0987	0,1831	0,0031	0,0456
	E	0,3121	0,0702	0,2963	0,0986	0,2417	0,0015	0,0699
	M	0,3545	0,0102	0,2860	0,1553	0,2410	0,0082	0,0396
Dalešice6	L	0,3202	0,0240	0,5154	0,0029	0,7698	0,2589	0,0029
	E	0,3145	0,0010	0,8955	0,0035	0,6632	0,2257	0,0012
	M	0,1836	0,0960	0,6808	0,0627	0,5776	0,1362	0,0162

Tabulka 14. Hodnoty koeficientu determinace R^2 pro veličiny plynové chromatografie.

		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	CO ₂	CO	Q_p
Slapy1	L	0,1210	0,1377	4E-05	0,3230	0,0003	0,0271	0,1462	0,0024
	E	0,0029	-	-	-	-	0,0065	0,0201	0,0053
	M	0,0015	-	-	-	-	0,0036	0,0208	0,0053
Slapy3	L	0,4208	0,2583	0,5912	0,3719	0,5688	0,3700	0,1484	0,1047
	E	0,5333	0,3665	0,6387	-	-	0,5346	0,2440	0,1370
	M	0,5500	0,3241	0,7112	-	-	0,5793	0,2707	0,2707
Dalešice2	L	0,1395	0,0977	0,0204	0,4886	0,3218	0,0674	5E-05	0,0407
	E	-	0,2340	0,0499	-	-	0,0944	-	0,0023
	M	-	0,2398	0,0183	-	-	0,0405	-	0,0385
Dalešice6	L	0,1516	0,4801	0,1085	0,5824	0,4501	0,0009	0,1648	0,1805
	E	-	-	0,1778	-	-	0,0163	0,2005	0,1421
	M	-	-	0,2246	-	-	0,0171	0,1777	0,0816



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 15. Hodnoty koeficientu determinace R^2 pro veličiny charakterizující stav izolace vinutí.

		V:N R_{60}	V:N C_x	V:N $tg\delta$	V:K $tg\delta$	V:K C_x
Slapy1	L	0,2278	0,4276	0,6111	0,3945	0,0020
	E	0,2006	0,4238	0,5835	0,2920	0,0060
	M	0,1958	0,4751	0,6133	0,3012	0,0136
Slapy2	L	0,0355	0,3887	0,0038	0,0671	0,3027
	E	0,0077	0,2383	0,0111	0,0266	0,3680
	M	0,0077	0,2357	0,0194	0,0180	0,3880
Slapy3	L	0,2020	0,0005	0,8254	0,7254	0,6469
	E	0,4608	0,0005	0,7632	0,6924	0,6469
	M	0,4877	0,0039	0,7786	0,6534	0,6358
Dalešice2	L	0,4440	0,1475	0,0040	0,0010	0,4170
	E	0,5976	0,1478	0,0022	0,0026	0,4171
	M	0,5657	0,0308	0,0089	0,0069	0,4807
Dalešice6	L	0,3915	0,4907	0,3048	0,0027	0,5000
	E	0,2255	0,4920	0,3104	0,0018	0,4953
	M	0,2048	0,2431	0,1896	0,0024	0,2550

Podle hodnot R^2 zachycených v předešlých tabulkách je zřejmé, zvolené regresní modely lépe odhadovaly trendovou složku diagnostické veličiny U_p u transformátorů umístěných ve vodní elektrárně Dalešice, zatímco u transformátorů umístěných ve vodní elektrárně Slapy tyto modely trend U_p nevystihovaly. Opačný případ však nastal při odhadování trendových složek veličin $\check{C}K$, ε_{r70} , Q_V , ρ_{70} , CH_4 , C_2H_4 , CO_2 , V:K $tg\delta$. Pro veličinu σ se jeví jako vhodné regresní modely u transformátorů Slapy2, Slapy3 a Dalešice6. U veličin plynové chromatografie byly vhodné všechny zvolené regresní modely pouze u transformátoru Slapy3, zatímco u ostatních transformátorů zvolené regresní modely trend jednotlivých časových řad téměř nevystihovaly. U všech zkoumaných transformátorů se ukázal jako nejvhodnější regresní model pro C_2H_2 lineární regresní model. Dále se ukázalo, že ve vodní elektrárně dalešice ani jeden zvolený regresní model vhodně neodhadoval vývoj trendu plynů CO_2 a CH_4 . Trend veličiny, V:N $tg\delta$ zvolené regresní modely vystihovaly u transformátorů Slapy1, Slapy3 a Dalešice 6. Vývojovou tendenci veličiny V:K C_x zvolené regresní modely nevystihly pouze u transformátoru Slapy1.

Jako nejvhodnější regresní model pro odhad trendové složky všech zkoumaných diagnostických veličin se jeví lineární regresní model. Tento model byl úspěšný v odhadování vývojové tendence časových řad v 53 případech. Zatímco exponenciální model byl úspěšný v 45 případech, a mocninný pouze v 44 případech.

Rovnice získané při odhadování trendové složky umožňují predikovat další vývoj časových řad.

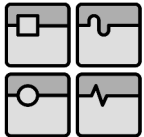
4.7 Vyšetření chybové složky

Na konci analýzy časových řad je nutné posoudit kvalitu výše uvedeného aditivního dekompozičního modelu, který se skládá pouze ze součtu trendové a chybové složky (bylo ukázáno, že periodická složka se u zkoumaných časových řad nevyskytuje). K tomu slouží ověření předpokladu, že chybová složka má náhodný charakter. Proto se od hodnot časové řady odečte trendová složka a zbylá část (chybová složka) se podrobí testům, zda se skutečně jedná pouze o náhodnou složku.

Pomocí speciální vytvořené funkce v softwaru Matlab byla provedená analýza na náhodnost hodnot pro každý vhodný regresní model. Výsledky uvedeny v Tab. 16, Tab. 17, Tab. 18. Hodnota 1 značí, že hypotéza o náhodnosti nebyla zamítnuta, hodnota 0 značí opak, prázdné pole značí skutečnost, že daný test nešlo provést.

Tabulka 16. Výsledky testů náhodnosti veličin charakterizující stav olejové náplně

		U_p			ČK			$Tg\delta_{70}$			ε_{r70}			ρ_{70}			σ			Q_V		
		L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M
Slapy 1	SGN				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				1	1	1
	RNP				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				1	1	1
	KEN				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				1	1	1
	SP				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				1	1	1
	MED				1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1				1	1	0

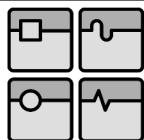


DIPLOMOVÁ PRÁCE

		U_p			ČK			$Tg\delta_{70}$			ϵ_{r70}			ρ_{70}			σ			Q_V					
		L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M			
Slapy 2	SGN				1	1	1				1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RNP				1	1	1				1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1
	KEN				1	1	1				1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1
	SP				1	1	1				1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1
	MED				1	1	1				1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1
Slapy 3	SGN				0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	RNP				1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	KEN				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	SP				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	MED				1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0
Dalešice 2	SGN	1	1	1				1	1	1															
	RNP	1	1	1				1	1	0															
	KEN	1	1	1				1	1	1															
	SP	1	1	1				0	1	1															
	MED	0	0	1				0	1	1															
Dalešice 6	SGN	1	1	1				0	1	1				1	1	1	0	0	0						
	RNP	1	1	1				1	1	1				1	1	1	0	0	0						
	KEN	1	1	1				0	1	1				1	1	1	0	1	1						
	SP	1	1	1				0	1	1				1	1	1	1	1	1						
	MED	1	1	1				0	1	1				1	1	1	0	0	0						

Tabulka 17. Výsledky testů náhodnosti veličin plynové chromatografie

		CH ₄			C ₂ H ₆			C ₂ H ₄			C ₂ H ₂			H ₂			CO ₂			CO			Q_p		
		L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M
Slapy 1	SGN										1									1					
	RNP										1									1					
	KEN										1									1					
	SP										1									1					
	MED										1									1					
Slapy 3	SGN	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RNP	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		1	1	1	1	1	1	1	1	1
	KEN	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		1	1	1	1	1	1	1	1	1
	SP	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		1	1	1	1	1	1	1	1	1
	MED	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		1	1	1	1	1	1	1	1	1

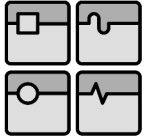


DIPLOMOVÁ PRÁCE

		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	CO ₂	CO	Q _p								
		L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	
Dalešice2	SGN				1	1											
	RNP				1	1											
	KEN				1	1											
	SP				1	1											
	MED				1	1											
Dalešice6	SGN		1		0	1			1	1	0	1	1				
	RNP		1		0	1			1	1	1	1	1				
	KEN		1		1	1			1	1	1	1	1				
	SP		1		1	1			1	1	1	1	1				
	MED		0		1	1			1	1	1	1	1				

Tabulka 18. Výsledky testů náhodnosti veličin charakterizující stav izolace vinutí

		V:N R ₆₀			V:N C _x			V:N tgδ			V:K tgδ			V:K C _x		
		L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M
Slapy 1	SGN	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1			
	RNP	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	KEN	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	SP	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	MED	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1			
Slapy 2	SGN				0	0	0							1	1	1
	RNP				1	0	0							1	1	1
	KEN				1	1	1							1	0	1
	SP				1	1	1							1	0	1
	MED				1	1	1							1	1	1
Slapy 3	SGN	1	1	1				0	1	1	1	0	1	0	0	0
	RNP	1	1	1				0	1	1	1	1	1	0	0	0
	KEN	1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1
	SP	1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1
	MED	1	1	1				0	0	1	1	1	1	1	1	1
Dalešice	SGN	1	1	1										1	1	1
	RNP	1	1	1										1	1	1
	KEN	1	1	1										1	1	1
	SP	1	1	1										1	1	1
	MED	1	1	1										1	1	1



DIPLOMOVÁ PRÁCE

		V:N $R_{\delta 0}$			V:N C_x			V:N $tg\delta$			V:K $tg\delta$			V:K C_x		
		L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M	L	E	M
Dalešice6	SGN	1	1	1	0	0	0	1	1	1				0	0	1
	RNP	1	1	1	0	0	0	1	1	1				1	1	1
	KEN	1	1	1	1	1	1	1	1	1				1	1	1
	SP	1	1	1	1	1	1	1	1	1				1	1	1
	MED	1	1	1	1	1	1	1	1	0				1	1	1

Podle výsledků lze říci, že hypotéza o náhodnosti chybové složky nebyla zamítnuta téměř pro všechny uvedené modely. To je vhodně pro další analýzu a následné predikce.

5 PREDIKCE PRAVDĚPODOBNÉHO ČASU DOŽITÍ VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Během provozu transformátorů se provádí periodické odběry vzorků oleje a měří se různé diagnostické veličiny za účelem získání informací o stavu stroje. Tyto informace však platí pouze v okamžiku odběru vzorků a měření a nepodávají informace o budoucích stavech transformátoru, které mohou vést až ke vzniku poruchy. Proto je nezbytné provádět predikci vývoje získaných diagnostických veličin, charakterizující stav transformátoru v libovolném budoucím čase.

Výše uvedená analýza časových řad podle aditivního dekompozičního modelu slouží k určení času poruchy posuzovaných transformátorů. Provedená analýza ukázala, že periodická složka Pt není významná. Trendové složky Tt zkoumaných řad byla odhadovány různými regresními modely. Po odečtení trendové složky od původní časové řady byla získána chybová složka Et , která se vyšetřovala na náhodnost. Získané výsledky ukázaly, že chybová složka byla téměř ve všech případech náhodná a zvolený ADM tvořený pouze součtem trendové a chybové složky tak vhodně modeluje časové řady diagnostických veličin.

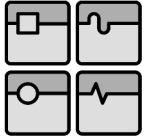
Na základě rovnic trendové složky Tt lze pak tedy snadno odhadovat čas, ve kterém porucha postihne analyzovaný transformátor. Tento čas se pak nazývá **pravděpodobný čas dožití (PČD)**.

Pro predikci pravděpodobného času dožití je nutné znát tzv. kritériální hodnoty diagnostických veličin. Pravděpodobný čas dožití lze totiž odhadovat jako minimum z časů, ve kterých jednotlivé trendy tyto kritériální hodnoty překročí:

$$PČD = \min_j t_j \quad [\text{rok}] \quad (27)$$

kde t_j je čas, ve kterém j -tý trend překročí svoji kritériální hodnotu.

Kritériální hodnoty jednotlivých diagnostických veličin zachycuje Tab. 19.

Tabulka 19. Kriteriační hodnoty y_{kr}

Veličina	Kriteriační hodnota	Celý název zkoušky
U_p	≥ 60 kV/2,5 mm	průrazné napětí
ČK	$< 0,08$ mg KOH/g	číslo kyselosti
$tg\delta_{70}$	$< 8 \cdot 10^{-2}$	ztrátový činitel při 70 °C
ρ_{v70}	$> 5 \cdot 10^{12}$ $\Omega \cdot \text{cm}$	vnitřní rezistivita při 70 °C
σ	> 35 mN/m	relativní mezipovrchové napětí na rozhraní olej-voda
Q_v	≤ 25 g/t (ppm)	obsah vody rozpuštěné v izolačním oleji.
CH ₄	< 130 $\mu\text{l/l}$	obsah metanu
C ₂ H ₆	< 90 $\mu\text{l/l}$	obsah etanu
C ₂ H ₄	< 280 $\mu\text{l/l}$	obsah etylénu
C ₂ H ₂	< 30 $\mu\text{l/l}$	obsah acetylénu
H ₂	< 150 $\mu\text{l/l}$	obsah vodíku
CO ₂	< 14000 $\mu\text{l/l}$	obsah oxida uhličitý
CO	< 600 $\mu\text{l/l}$	obsah oxida uhelnatý
$tg\delta$	$< 4 \cdot 10^{-2}$	ztrátový činitel

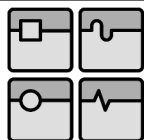
Uvedená tabulka neobsahuje kritické hodnoty některých diagnostických veličin z důvodu nemožnosti jejich použití k výpočtu PČD. Pro všechny ostatní pozorované diagnostické veličiny byl výpočten čas t_j , ve kterém j -tý trend překročí svoji kriteriační hodnotu:

- lineární regresní model $y = at + b$:

$$t_1 = \frac{y_{kr} - b}{a}; \quad (28)$$

- exponenciální regresní model $y = ae^{bt}$:

$$t_2 = \frac{\ln(y_{kr} / a)}{b}; \quad (29)$$



- mocninný regresní model $y = at^b$:

$$t_3 = b \sqrt[b]{\frac{y_{kr}}{a}} \quad (30)$$

kde y_{kr} je kritériální hodnota; a a b jsou parametry trendu.

Výsledky zaznamenávají Tab. 20, Tab. 21, Tab. 22a, Tab. 22b, Tab. 23, Tab. 24.

Tabulka 20. Čas t_j , ve kterém j -tý trend souboru Slapy1 překročí svoji kritériální hodnotu

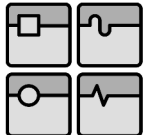
	ČK	$Tg\delta_{70}$	ρ_{70}	Q_V	C_2H_2	V:N $tg\delta$	V:K $tg\delta$
t_1	18,900		50,256	28,833	274,081	56,610	71,275
t_2	18,128	8,897	46,376	28,553		85,300	143,752
t_3	22,055	17,234	46,463	29,690		120,608	501,022

Tabulka 21. Čas t_j , ve kterém j -tý trend souboru Slapy2 překročí svoji kritériální hodnotu

	U_p	ČK	σ	Q_V
t_1	0,118	31,900	8,83E+04	32,456
t_2		29,594	498,773	30,877
t_3		29,095	3,20E+07	30,415

Tabulka 22a. Čas t_j , ve kterém j -tý trend souboru Slapy3 překročí svoji kritériální hodnotu

	ČK	$Tg\delta_{70}$	ρ_{70}	σ	Q_V	CH ₄	C ₂ H ₆
t_1	22,760		28,829	1,17E+05	30,894	689,880	720,453
t_2	21,004	9,811	35,976	1059,734	28,955	131,830	117,326
t_3	22,530	15,257	34,499	8,25E+13	28,578	444,205	353,335



Tabulka 22b. Čas t_j , ve kterém j -tý trend souboru Slapy3 překročí svoji kritériální hodnotu

	C_2H_4	C_2H_2	H_2	CO_2	CO	V:N $tg\delta$	V:K $tg\delta$
t_1	370,546	237,657	114,603	221,197	65,224	55,848	67,599
t_2	77,504			95,994	60,749	80,556	131,017
t_3	99,994			165,107	64,435	118,951	550,267

Tabulka 23. Čas t_j , ve kterém j -tý trend souboru Dalešice2 překročí svoji kritériální hodnotu

	U_p	$Tg\delta_{70}$	C_2H_6	C_2H_2	H_2
t_1	55,772	67,667		283,852	202,512
t_2	62,938	35,828	113,997		
t_3	6885,079	517,622	5196,800		

Tabulka 24. Čas t_j , ve kterém j -tý trend souboru Dalešice6 překročí svoji kritériální hodnotu

	U_p	$Tg\delta_{70}$	ρ_{70}	σ	C_2H_6	C_2H_2	H_2	CO	V:N $tg\delta$
t_1	48,899	24,341	12,102	28,016	722,625	328,778	197,471		61,918
t_2	52,158	26,008	9,278	34,956					96,963
t_3	4996,529	66,617	6,414	405,391				0,214	3,50E+05

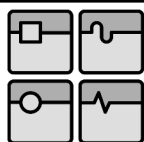
Pak byl pro jednotlivé diagnostické veličiny určen PČD podle vztahu (27) a výsledky byly zpracovány do Tab. 25, Tab. 26, Tab. 27a, Tab. 27b, Tab. 28, Tab. 29.

Tabulka 25. PČD pro diagnostické veličiny souboru Slapy1

	ČK	$Tg\delta_{70}$	ρ_{70}	Q_V	C_2H_2	V:N $tg\delta$	V:K $tg\delta$
PČD	18,128	8,897	46,376	28,553	274,081	56,610	71,275

Tabulka 26. PČD pro diagnostické veličiny souboru Slapy2

	U_p	ČK	σ	Q_V
PČD	0,118	29,095	498,773	30,415



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 27a. PČD pro diagnostické veličiny souboru Slapy3

	\check{K}	$Tg\delta_{70}$	ρ_{70}	σ	Q_V	CH_4	C_2H_6
PČD	21,004	9,811	28,829	1059,734	28,578	131,830	117,326

Tabulka 27b. PČD pro diagnostické veličiny souboru Slapy3

	C_2H_4	C_2H_2	H_2	CO_2	CO	$V:N$ $tg\delta$	$V:K$ $tg\delta$
PČD	77,504	237,657	114,603	95,994	60,749	55,848	67,599

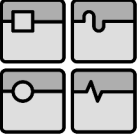
Tabulka 28. PČD pro diagnostické veličiny souboru Dalešice2

	U_p	$Tg\delta_{70}$	C_2H_6	C_2H_2	H_2
PČD	55,772	35,828	5196,800	283,852	202,512

Tabulka 29. PČD pro diagnostické veličiny souboru Dalešice6

	U_p	$Tg\delta_{70}$	ρ_{70}	σ	C_2H_6	C_2H_2	H_2	CO	$V:N$ $tg\delta$
PČD	48,899	24,341	6,414	28,016	722,625	328,778	197,471	0,214	61,918

Na základě zkušeností získaných z technické praxe se PČD pohybuje v rozmezí 30 až 60 let. Podle výsledků zachycených v předešlých tabulkách je zřejmé, že některé PČD se u některých diagnostických veličin nacházel přesně v uvedeném rozmezí. Nicméně PČD u některých diagnostických veličin nabýval nesmyslných hodnot, jako například u veličiny U_p souboru Slapy2 nebo u veličiny CO souboru Dalešice 6. Tyto PČD mají příliš malou hodnotu. Naproti tomu hodnoty PČD u veličiny C_2H_6 u souborů Slapy3, Dalešice2 a Dalešice6 nabývaly nesmyslně velkých hodnot. Nebyla tedy nalezena žádná shoda u zkoumaných transformátorů, která by určila nejvhodnější diagnostickou veličinu pro predikování PČD. Je tedy nutné predikovat PČD pomocí všech dostupných diagnostických veličin a ze získaných výsledků potom stanovit korektní závěry.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 56
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

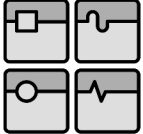
ZÁVĚR

Analýza časových řad popsaná v této diplomové práci byla aplikována původně na data získaná z diagnostických měření 11 výkonových olejových transformátorů. Z důvodu nedostatku dat nebo nevhodného charakteru informací, které dodaná data reprezentovala, byl počet zkoumaných transformátorů postupně redukován na 5. Na data měřená u těchto pěti transformátorů se pak aplikovala zde popsaná teorie včetně odhadu jejich pravděpodobného času dožití PČD. Konkrétně se jednalo o tři transformátory z vodní elektrárny Slapy a o dva transformátory z přečerpávací elektrárny Dalešice.

Nejdříve se u všech časových řad pomocí krabicových grafů odstranily odlehlé hodnoty a spočítaly se odhady momentových funkcí jednotlivých časových řad. Výsledky jsou zaznamenány v Tab. 4, Tab. 5 a Tab. 6. a lze z nich usoudit, že aritmetické průměry veličin jsou přibližně stejné, s výjimkou veličin charakterizující stav izolace vinutí. Všechny časové řady byly předpokládány v aditivním dekompozičním modelu, který vychází z předpokladu, že zkoumaná časová řada má konstantní rozptyl. V dalším kroku tedy bylo nutné provést stabilizaci rozptylu, jejíž výsledky jsou zachyceny v Tab. 7, Tab. 8 a Tab. 9. Z těchto výsledků vyplývá, že většina z časových řad měla konstantní rozptyl a nevyžadovala tak žádnou transformaci. Nejčastěji byly transformovány veličiny charakterizující stav izolace vinutí, zatímco veličiny plynové chromatografie byly téměř nedotčené.

Po stabilizaci rozptylu následovala identifikace periodických komponent založená na Fisherově a Sieglově testu. Její výsledky jsou zaznamenány v Tab. 10, Tab. 11 a Tab. 12. Výsledky ukazovaly, že naprostá většina časových řad neměla periodickou složku, zejména veličiny plynové chromatografie a veličiny charakterizující stav izolace vinutí. V případě přítomnosti periodické složky se další analýza takových časových řad neprováděla. Hlavním důvodem vyloučení tohoto zanedbatelného počtu časových řad z další analýzy bylo zjednodušení aditivního dekompozičního modelu pouze na součet trendové a chybové složky.

Po zjednodušení aditivního dekompozičního modelu bylo nutné vhodně odhadnout trend zkoumaných časových řad. Odhad trendu byl proveden pomocí

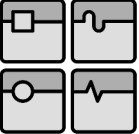
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 57
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

regresních modelů, které jsou založeny na metodě nejmenších čtverců a byly použity různé typy: lineární regresní model, exponenciální regresní model a mocninný regresní model. Výsledky v podobě koeficientů determinace, podle kterých lze posuzovat vhodnost jednotlivých modelů pro odhad trendu, jsou uvedeny v Tab. 13, Tab. 14, Tab. 15.

Jako nejvhodnější regresní model pro odhad trendové složky všech zkoumaných diagnostických veličin se jeví lineární regresní model. Tento model byl úspěšný v odhadování vývojové tendence časových řad v 53 případech. Zatímco exponenciální model byl úspěšný v 45 případech, a mocninný pouze v 44 případech.

Na konci analýzy zkoumaných časových řad bylo nutné posoudit kvalitu zjednodušeného aditivního dekompozičního modelu, který se skládal pouze ze součtu trendové a chybové složky (bylo ukázáno, že periodická složka se u zkoumaných časových řad nevyskytuje). K tomu sloužilo ověření předpokladu, že chybová složka má náhodný charakter. Výsledky uvedené v Tab. 16, Tab. 17, a Tab. 18 odpovídaly skutečnosti, že hypotéza o náhodnosti chybové složky nebyla zamítnuta téměř u všech časových řad.

Na základě rovnic trendové složky byl pak v poslední části této práce odhadován čas, ve kterém analyzovaný transformátor přestane plnit svoji funkci. Tento čas se nazývá **Pravděpodobný čas dožití (PČD)** a je zaznamenán v Tab. 25, Tab. 26, Tab. 27a, Tab. 27b, Tab. 28, Tab. 29. Zde je vidět, že PČD byl u některých diagnostických veličin predikován uspokojivě a u některých diagnostických veličin nabýval nesmyslných hodnot. Nebyla tedy nalezena žádná shoda u zkoumaných transformátorů, která by určila nejvhodnější diagnostickou veličinu pro predikování PČD a je tedy nutné predikovat PČD pomocí všech dostupných diagnostických veličin.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 58
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

BIBLIOGRAFICKÉ CITACE

[1] MENTLÍK, V. a kol.. *Diagnostika elektrických zařízení*, Praha: BEN, 2008, s. 439. ISBN 978-80-7300-232-9.

[2] ČSN IEC 50(411). *Mezinárodní elektrotechnický slovník - Kapitola 411: Točivé stroje*. Český normalizační institut, 1997.

[3] BYSTRISKIJ, G., KUDRIN, B. *Vybor i ekspluataciya silovyx transformatorov*. Moskva: Akademiya, 2003. ISBN 5-7695-1143-5. Kapitola 2, *Konstruktivnye sxemy i naznachenie osnovnyx elementov transformatora*, s. 44-49.

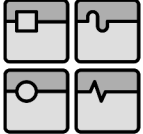
[4] KISLICYN, A., *Transformatory: Uchebnoe posobie po kursu «Elektromexanika»*. Ulyanovsk: UIGTU, 2001, s. 76. ISBN 5-89146-202-8

[5] *Popisná statistika ekonomických časových řad*. In: www.math.fme.vutbr.cz [online]. Brno, [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://www.math.fme.vutbr.cz/default.aspx?catalog=3&catsrtext=1&catsrfield=38>

[6] SADÍLEK, V., DOLEŽEL, J. a VOŘECHOVSKÝ, M., *Řešené úlohy z oblasti spolehlivosti stavebních konstrukcí*. 2011, s. 79. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/STM/sadilek.v/frvs/frvs.pdf>

[7] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů – 1. část*. [PDF soubor]. Available at: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vyuziti-casovych-rad-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-transformator----1--cast/>.

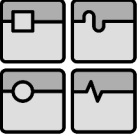
[8] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů – 2. část*. [PDF soubor]. Available

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 59
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

at: < <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vyuziti-casovych-rad-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-transformatoru---2--cast/>>.

[9] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů – 3. část.* [PDF soubor]. Available at: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vyuziti-casovych-rad-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-transformatoru---3--cast/>>.

[10] Jx. Schéma transformátoru [online]. c2007. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Transformer3d_col3_cs.svg >

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 60
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Výkonový olejový transformátor.

Obrázek 2. Koncepce výkonového olejového transformátoru.

Obrázek 3. Vysoušeč vzduchu [3]

Obrázek 4, a) Jádrový typ uspořádání magnetického obvodu u trojfázového transformátoru.

Obrázek 4, b) Plášťový typ uspořádání magnetického obvodu u trojfázového transformátoru.

Obrázek 5. Principiální schéma transformátoru [9]

Obrázek 6. Příklad grafu časové řady pro veličinu U_p transformátoru Slapy1

Obrázek 7, a) Příklad intarvalové časové řad

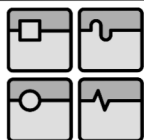
Obrázek 7, b) Příklad okamžikové časové řad

Obrázek 8. Periodogram časové řady

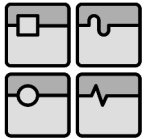
Obrázek 9. Grafického znázornění regresních modelů

Obrázek 10. Krabicový graf veličiny p_{70} pro soubor Slapy1

Obrázek 11. Regresní modely pro veličinu C_2H_6 transformátor Dalešice2

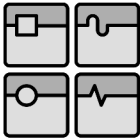
**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

Δ_i^1		Absolutní přírůstek, $i = 2, 3, \dots, n$
$\bar{\Delta}$		Průměrný absolutní přírůstek
A_k^2		Indikátor harmonických komponent
ADM		Aditivní dekompoziční model
C_2H_2	[μ /l]	Obsah acetylénu
C_2H_4	[μ /l]	Obsah etylénu
C_2H_6	[μ /l]	Obsah etanu
CH_4	[μ /l]	Obsah metanu
CO	[μ /l]	Obsah oxida uhelnatý
CO ₂	[μ /l]	Obsah oxida uhličitý
C_t		Cyklická složka
ČK	[mgKOH/g]	Číslo kyselosti
d_i		Vzdálenost časových okamžiků
D_t		Deterministická složka
E		exponenciální regresní model
E_t		Nahodilá složka
H_2	[μ /l]	Obsah vodíku
I_p	[A]	Proud tekoucí primárním vinutím
I_s	[A]	Proud tekoucí primárním vinutím
k_i	[%]	Koeficient růstu, $i = 2, 3, \dots, n$
κ_i	[%]	Koeficient přírůstku, $i = 2, 3, \dots, n$
\bar{k}	[%]	Průměrný koeficient růstu
KEN		Test Kendalových koeficientů
kF		Počet významných period podle Fisherova testu
kS		Počet významných period podle Sieglova testu
L		Lineární regresní model
LT		Logaritmická transformaci
M		Mocninný regresní model
MED		Mediánový test



DIPLOMOVÁ PRÁCE

ML		Mocinná transformace
MDM		Multiplikatívni dekompoziční model
NA		Nebyl pro danou veličinu a daný transformátor k dispozici dostatek měření pro výpočet
NN		Nízké napětí
N_p		Počet závitů primárního vinutí
N_s		Počet závitů sekundárního vinutí
p		Převod transformátoru
PČD	[rok]	Pravděpodobný čas dožití
P_t		Periodická složka
Q_p	[%]	Celkový obsah plynu
Q_v	[g/t]	Obsah vody
R^2		Koeficient determinace
RNP		Test růstu a klesání
SGN		Znaménkový test
SP		Test Spearmanových koeficientů
S_t		Sezonní složka
$Tg\delta_{70}$		Ztrátový činitel
t_i	[čas]	Časový okamžik měření hodnoty ($t_i < t_{i+1}$)
t_j	[čas]	Čas, ve kterém j -tý trend překročí svoji kritériální hodnotu
T_t		Trend časové řady;
U_p	[kV/2,5mm]	Elektrická pevnost
U_p	[V]	Napětí na primárním vinutí
U_s	[V]	Napětí na sekundárním vinutí
V:K C_x	[pF]	Kapacita
V:K Tg	[%]	Ztrátový činitel
V:N C_x	[pF]	Kapacita
V:N R_{60}	[M Ω]	Odpor
V:N Tg	[%]	Ztrátový činitel
VN		Vysoké napětí
\bar{y}		Aritmetický průměr intervalové časové řady
y_{chr}		Chronologický průměr okamžikových časových řad



DIPLOMOVÁ PRÁCE

y_i		Hodnoty časové řady statistického znaku ($i = 1, \dots, n$).
y_{kr}		Kritické hodnoty
ε_{r70}		Relativní permitivita
θ		Parametr pro transformaci řad theta
λ		Parametr pro transformaci řad lambda
$\mu_x(t)$		Střední hodnota
ρ_{70}	[$\Omega\text{cm } 10^{12}$]	Vnitřní rezistivita
σ	[N/m]	Povrchové napětí
$\sigma_x(t)$		Směrodatná odchylka
Φ	[Wb]	střídavý magnetický tok