



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

# SPOLEHLIVOST VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

RELIABILITY OF POWER OIL TRANSFORMERS

DIZERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. JAKUB ERTL

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. MILOŠ HAMMER, CSc.

BRNO 2012



## ABSTRAKT

Předkládaná disertační práce se zabývá návrhem neinvazivních postupů pro rozbor odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů. Uvedené postupy řeší dvoustavovou i vícestavovou spolehlivost a jsou doplněny návrhem, jak získané spolehlivostní charakteristiky uplatnit v plánování dalšího provozu těchto netočivých elektrických strojů. V závěru práce je navržen spolehlivostní modul pro diagnostický systém, který je vyvíjen na školícím pracovišti. Všechny zde uvedené postupy byly verifikovány na datech získaných z diagnostických měření deseti výkonových olejových transformátorů pracujících v různých elektrárnách na území České republiky.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Výkonový olejový transformátor, diagnostické veličiny, rozbor dvoustavové a vícestavové odhadované spolehlivosti, optimalizace dalšího provozu, spolehlivostní modul diagnostického systému.

## ABSTRACT

The doctoral thesis deals with design of non-invasive methods for estimated reliability analysis of power oil transformers. Such procedures also solve two-state and multistate reliability problems together with applying of gained reliability characteristics in planning further operation of these non-rotating electrical machines. Reliability module for diagnostic system, which is developed at the training workplace, is designed in conclusion of this thesis. All the above procedures were verified on data obtained from diagnostic measurements of ten power oil transformers operating in different power plants in the Czech Republic.

## KEYWORDS

Power oil transformer, diagnostic quantities, analysis of two-state and multistate estimated reliability, optimization of further operation, reliability module for diagnostic system.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ERTL, J. *Spolehlivost výkonových olejových transformátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 157 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Miloše Hammera a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 12. listopadu 2012

.....

Jméno a přímení

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji školiteli doc. Ing. Miloši Hammerovi, CSc. za jeho cenné rady a připomínky, které přispěly k napsání této disertační práce.

**OBSAH**

Úvod .....	7
Stav řešené problematiky.....	9
Cíle práce.....	11
1 Teoretická část.....	12
1.1 Výkonový olejový transformátor .....	12
1.2 Rozdělení výkonových olejových transformátorů .....	13
1.3 Zjišťování aktuálního stavu výkonových olejových transformátorů .....	14
1.3.1 Technická diagnostika výkonových olejových transformátorů .....	14
1.3.2 Diagnostické veličiny .....	15
1.3.3 Vyhodnocení dat získaných z diagnostických měření .....	22
1.3.4 Diagnostické postupy doplňující DGA metody .....	30
1.4 Diagnostický systém výkonových olejových transformátorů .....	32
2 Praktická část.....	32
2.1 Popis datového souboru .....	35
2.2 Analýza časových řad vybraných diagnostických veličin.....	37
2.2.1 Odstranění odlehlých hodnot .....	38
2.2.2 Odhady vybraných momentových funkcí .....	40
2.2.3 Stabilizace rozptylu .....	44
2.2.4 Identifikace periodických komponent.....	45
2.2.5 Zjednodušený aditivní dekompoziční model .....	46
2.2.6 Odhad trendové složky zkoumaných časových řad .....	47
2.2.7 Vyšetření chybové složky časových řad diagnostických veličin .....	50
2.3 Neinvazivní postupy pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů.....	51
2.3.1 Obecná metoda vycházející z teorie časových řad.....	51
2.3.2 Metoda vycházející z teorie časových řad a DGA .....	53
2.3.3 Reliab_dga_transformer 1.0 .....	62
2.3.4 Metoda distribučních funkcí.....	70
2.3.5 RL 1.0.....	80
2.3.6 Spolehlivostní modely.....	82
2.3.7 RChE 1.0 .....	100
2.4 Neinvazivní postup pro rozbor vícecestavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů.....	101
2.4.1 Identifikace více stavů výkonového olejového transformátoru .....	102
2.4.2 Určení způsobu dalšího provozu výkonového olejového transformátoru.....	103

2.4.3	Postup predikce pravděpodobnosti poruch výkonového olejového transformátoru pro více možných stavů .....	104
2.4.4	Porovnání výsledků dvoustavové a více stavové odhadované spolehlivosti zkoumaných výkonových olejových transformátorů.....	106
2.4.5	Reliab_dga_transformer 2.0 .....	108
2.5	Optimalizace dalšího provozu výkonových olejových transformátorů .....	111
2.5.1	Obscný model.....	111
2.5.2	Model 1 .....	112
2.5.3	Model 2 .....	114
2.5.4	Model 3.....	114
2.5.5	Optimization 1.0 .....	115
2.6	Návrh spolehlivostního modulu diagnostického systému pro výkonové olejové transformátory .....	117
2.6.1	Princíp činnosti spolehlivostního modulu .....	117
2.6.2	Použití spolehlivostního modulu na zkoumané výkonové olejové transformátory.....	119
	Závěr .....	122
	Přínos a původnost práce .....	125
	Použité informační zdroje .....	127
	Přehled tvůrčí činnosti autora .....	129
	Seznam projektů autora.....	132
	Pedagogická činnost autora.....	133
	Seznam příloh .....	134
	Příloha 1 - Pravděpodobnost, náhodná veličina, distribuční funkce.....	135
	Příloha 2 - Teorie časových řad .....	139
	Příloha 3 - Matematické modely ve spolehlivosti.....	145
	Příloha 4 - Faktorová analýza .....	150
	Příloha 5 - Lineární optimalizace.....	154

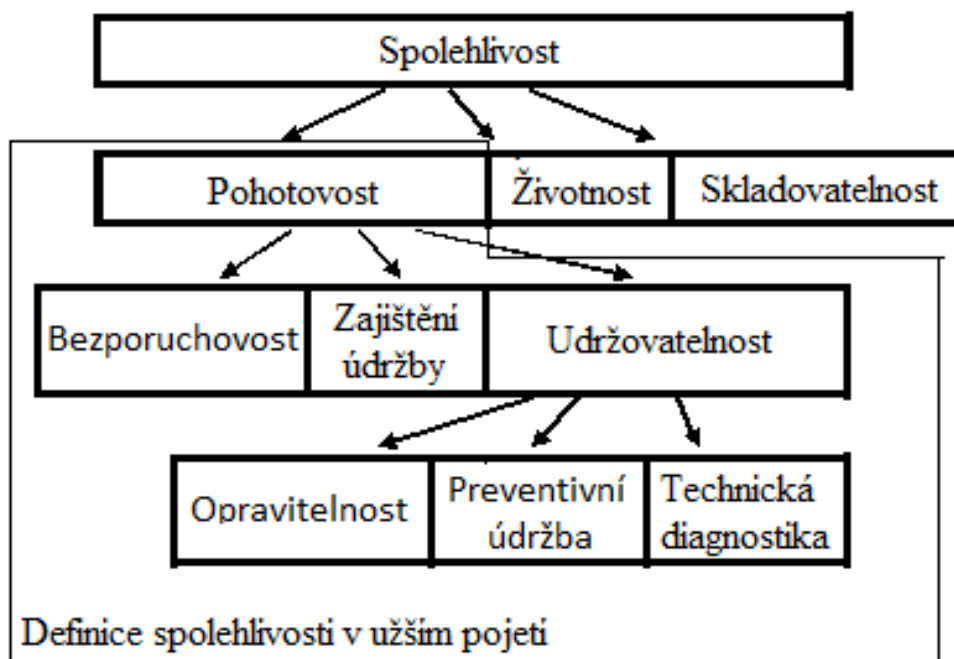
## ÚVOD

Problematika spolehlivosti je nedílnou a důležitou součástí péče o kvalitu. **Kvalita** se definuje jako stupeň splnění požadavků souborem vlastních znaků a znakem se rozumí jakákoliv rozlišující vlastnost. Existují dva druhy znaků:

- **znak kvalitativní** – je rozlišitelný srovnáním,
- **znak kvantitativní** – je rozlišitelný měřením.

Kvalita se vztahuje na objekty, procesy a organizace. Kvalita objektů je obecně určována ekonomickými složkami (náklady a přínosy výrobce i zákazníka) a užitnými vlastnostmi. Spolehlivost spolu s funkčností, bezpečností a ekologií patří mezi užitné vlastnosti při určování kvality objektu.

Podle [1] lze pojem **spolehlivosti** definovat v širším nebo užším pojetí. Spolehlivost v širším pojetí je chápána jako komplexní vlastnost vyjadřující obecnou schopnost objektu zachovávat funkční a další vlastnosti v čase a za stanovených podmínek. Zahrnuje tak dílčí vlastnosti objektu jako životnost, skladovatelnost, pohotovost. Spolehlivost v užším pojetí se definuje jako souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují. Mezi tyto činitele patří bezporuchovost, udržitelnost a zajištění údržby. V angličtině byla dříve takto definovaná spolehlivost označována pojmem reliability, v současné době je však více známá pod pojmem dependability. Vztah mezi uvedenými definicemi vyjadřuje Obr. 1. Definice pojmů zachycených na Obr. 1 lze nalézt například v [2].



Obr. 1 Definice spolehlivosti s důrazem na spolehlivost v užším pojetí

V souvislosti s určováním spolehlivosti v technické praxi se rozlišují tři různé druhy:

- **Inherentní spolehlivost** – jedná se o spolehlivost objektu navrženou během jeho vývoje a výroby. Podmínky provozu, vlivy okolního prostředí, druhy prováděné údržby zde nejsou uvažovány.
- **Provozní spolehlivost** – takto je nazývána spolehlivost, která zahrnuje okolní vlivy a další podmínky spojené s provozem daného objektu.
- **Odhadovaná spolehlivost** – jde o spolehlivost, která je výsledkem aplikace matematických postupů a analýzy provozu objektu.

Předkládaná disertační práce se zabývá návrhem nových postupů, které lze použít při rozboru odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů. Tyto netočivé elektrické stroje jsou jedním z nejdůležitějších zařízení v distribuci elektrické energie od výrobce směrem ke spotřebiteli. Různé poruchy transformátorů mohou způsobit přerušení 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. Často je havárie transformátorů spojena s výbuchem, požárem a jinými možnými ekologickými škodami. V případě jaderných elektráren to může vést až k porušení radiační bezpečnosti. Ve světě jsou známé různé havárie transformátorů, kde číselné vyjádření škod a důsledků dosáhlo v jednotlivých případech až stovek miliónů korun. Z těchto důvodů je nutné provádět rozbor spolehlivosti výkonových olejových transformátorů, na jehož základě je pak možné naplánovat odstávky stroje, údržbu a další provoz.

V této práci jsou prezentovány postupy pro rozbor odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů neinvazivními metodami. Jedná se o postupy, při kterých nevzniká potřeba stroj rozebrat a studovat jednotlivé jeho části (především papírovou izolaci). Myšlenka neinvazivních metod klade důraz na změření určitých fyzikálních a chemických veličin, jejichž hodnoty určují stav transformátoru a příslušné spolehlivostní charakteristiky. Výhoda těchto postupů spočívá ve skutečnosti, že transformátor nepoškodí a neovlivní tak jeho spolehlivost na rozdíl od invazivních metod.

Každý umělý zásah do provozu stroje zásadně změní jeho aktuální stav a naruší tak přirozené stárnutí. Výkonové olejové transformátory jsou během svého provozu přemísťovány na různé pracovní pozice, které se liší v působení vnějších vlivů (různá provozní teplota, různá okolní vlhkost, různý obsluhující personál atd.) nebo v míře jejich využití (pozice plného provozu, pozice zálohy atd.).

## STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Výkonové olejové transformátory mají od výrobce deklarovanou dlouhou dobu dožití, proto se dříve jejich spolehlivost téměř neřešila. V současné době se však spousta transformátorů pracujících na území České republiky nachází na konci své plánované životnosti a uvedená problematika se dostává do popředí zájmu. Provozovatel těchto strojů potřebuje postupy pro stanovení rozhodovacích kritérií, podle kterých je možné určit jak stroje dále provozovat a udržovat. Je zřejmé, že vhodně stanovená rozhodovací kritéria mohou ušetřit mnoho finančních prostředků.

Uvedené problematice je v zahraničí přikládán velký význam, proto se spolehlivost výkonových olejových transformátorů řeší na mnoha pracovištích po celém světě. Tyto pracoviště spolu často spolupracují a vyměňují si získané poznatky. Na Fakultě elektrického inženýrství a automatizace Technické univerzity v Opole v Polsku je prováděn výzkum elektrostatických vlastností tekutých dielektrických směsí. Výsledky výzkumu ukazují na možné následky působení elektrostatického náboje ve vybraných směsích čistě izolujících tekutin a mohou být využity při hledání procesů stárnutí izolačních olejů výkonových olejových transformátorů.

Na Univerzitě ve Waterloo v Kanadě se zabývají rozbořem manažerských technik pro provoz transformátorů. Studují především monitorování stavu transformátoru, způsoby určování tohoto stavu, tvorbu plánů údržby, stárnutí, provozuschopnost a určení zbytkové životnosti. Stav transformátoru určují pomocí termální analýzy, vibrační analýzy, částečných výbojů, analýzy rozpuštěných plynů (DGA) a analýzy frekvenční citlivosti. Ve spolupráci švédské Školy elektrického inženýrství a finské Laboratoře energetických systémů je zavedeno Ph.D. studium zaměřené na spolehlivost výkonových olejových transformátorů. Těžiště studia spočívá především v rozboru poruch způsobených v sítích středního napětí, ve spolehlivostním inženýrství a v modelování spolehlivosti rozvodny vysokého napětí.

V Nizozemí predikují pravděpodobnost poruchy výkonových olejových transformátorů na základě fyzikálních degradačních procesů. Za ukazatel stavu uvažují průměrný stupeň polymerizace (PPS), který má danou svoji kritickou hodnotu a lze vyjádřit jako funkce času. Australští odborníci působící na Curtin University of Technology vyzdvihují online monitoring výkonových olejových transformátorů a k hodnocení aktuálního stavu používají především částečné výboje, obsah vody v oleji, stupeň polymerizace, frekvenční analýzu a DGA analýzu. Předpokládají, že transformátor havaruje tehdy, pokud jeho izolace podlehne elektrickým, termálním, mechanickým a chemickým vlivům. K určení spolehlivosti a zvýšení doby provozu zde používají tzv. kritické diagnostiky.

V roce 1921 byla ve Francii založena nevládní a nezisková mezinárodní asociace CIGRE s původním názvem Mezinárodní konference o velkých elektrizačních soustavách velmi vysokého napětí (Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques a Haute Tension). Asociace se zabývá rozvojem technických znalostí o výrobě a přenosu elektřiny a zprostředkovává výměnu informací mezi řešitelskými týmy jednotlivých členských zemí. Členská základna má více než 80 zemí a zahrnuje všechny klíčové partnery, výzkumné pracovníky, akademiky, výrobce, systémové operátory, obchodníky a regulátory. CIGRE shromažďuje technické inovace, požadavky a zkušenosti provozovatelů sítí a zabývá se všemi hlavními tématy na poli elektrické energie, tj. organizací společností, rozvojem a úpravami sítí, optimalizací údržby, dobou životnosti elektrických zařízení, ale také analýzami vlivu na životní prostředí. Činnost českých odborníků a členů CIGRE je zprostředkována Národním komitétém České republiky. CIGRE se skládá z poradních a pracovních skupin, výkonovými olejovými transformátory se zabývá výbor s označením SC A2.

V České republice není tato problematika řešena na úrovni, která by odpovídala významu transformátoru pro dodávky elektrické energie. Rozborem spolehlivosti výkonových olejových transformátorů se zabývají na FEL ČVUT v Praze Ing. Igor Chemišinec a Ing. Radek Procházka. Životnost transformátorů vyjadřují Arrheniovou teorií elektrolytického rozkladu. Určují tak rizikové skupiny na základě pravděpodobnosti výskytu neočekávané události (zahrnuje analýzu historie na základě statistických dat a posudků expertů) a vypočítávají následky (náklady vyplývající z výpadku transformátoru). Aktuální stav transformátoru zjišťují pomocí diagnostických nástrojů jako je analýza plynů rozpuštěných v oleji (DGA), fyzická kontrola oleje, stanovení furfuralu a jemu příbuzných sloučenin, měření ztrátového činitele, kapacity a izolačního odporu, pomocí metody frekvenčních charakteristik (MFCH).

V Plzni se spolehlivostí výkonových olejových transformátorů zabývá Ing. Jan Hrůza, který vypracoval dvě hodnotící zprávy pro provoz výkonových olejových transformátorů v přečerpávací elektrárně Dalešice. Ve zprávách vychází z určování průměrného polymerizačního stupně izolačního papíru (PPS) a z plynů rozpuštěných v izolačním oleji (DGA). Pomocí těchto dvou diagnostických postupů predikuje pravděpodobný rok dožití jednotlivých transformátorů.

Dalším pracovištěm řešícím problematiku spolehlivosti výkonových olejových transformátorů je pracoviště zřízené na FSI VUT v Brně na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky. Pracoviště má k dispozici databázi diagnostických měření několika transformátorů z různých elektráren v České republice. Z těchto dat se vyvozuje pravděpodobnost poruchy, typ pravděpodobné poruchy, pravděpodobný rok dožití, diskutují se tu otázky řízení životnosti či managementu spolehlivosti. Vyvíjí se zde expertní systémy sloužící k určování stavu výkonových olejových transformátorů. Jedná se především o pravidlové systémy a systémy využívající fuzzy logiku nebo neuronové sítě. Řeší se tu také problematika vhodného použití diagnostických metod a správné interpretace jejich výsledků. Protože je na pracovišti značně rozvinuta spolupráce s technickou praxí, lze tak dosažené výsledky vhodně porovnávat a aplikovat.

Z počtu zaznamenaných pracovišť je zřejmé, že se tato problematika u nás řeší v daleko menší míře než v ostatních zemích po celém světě, a proto je nutné ji dále rozvíjet a podporovat nově vznikající řešitelské týmy. I z tohoto důvodu vznikla předkládaná disertační práce.

### CÍLE PRÁCE

Na základě analýzy současného stavu řešené problematiky v České republice a ve světě lze cíle předkládané disertační práce shrnout do následujících bodů:

- **Provést podrobnou matematickou analýzu časových řad obsažených ve zkoumané databázi a stanovit závěry charakteristické pro data získaná z diagnostických měření.**
- **Navrhnout a verifikovat neinvazivní postupy pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti vycházející z měření diagnostických veličin.**
- **Navrhnout a verifikovat neinvazivní postup pro rozbor víceustavové odhadované spolehlivosti vycházející z měření diagnostických veličin.**
- **Navrhnout postup využití různých spolehlivostních charakteristik při optimalizaci dalšího provozu výkonových olejových transformátorů.**
- **Na základě všech navržených postupů vytvořit odpovídající softwary.**
- **Vytvořit software, který bude představovat návrh spolehlivostního modulu pro diagnostický systém výkonových olejových transformátorů.**

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 VÝKONOVÝ OLEJOVÝ TRANSFORMÁTOR

V [3] je transformátor definován jako statický předmět se dvěma nebo více vinutími, který pomocí elektromagnetické indukce transformuje jeden systém střídavého napětí a proudu na jiný systém napětí a proudu. Výstupní systém je stejného kmitočtu, ale rozdílných hodnot napětí a proudů. Účelem těchto transformací je přenos elektrického výkonu.

Transformátor se označuje jako výkonový v případě, že slouží k převodu elektrické energie do elektrických sítí a technických zařízení určených pro příjem a využití elektrické energie. Je-li jako chladivo transformátoru použit olej, nazývá se transformátor olejový. Příklad výkonového olejového transformátoru je zachycen na Obr. 2.



Obr. 2 Výkonový olejový transformátor [4]

Výkonový olejový transformátor lze považovat za systém, jehož podstatné části ovlivňující výslednou funkčnost včetně spolehlivosti celého stroje jsou:

- **izolační systém** – olej a papír,
- **magnetický obvod** – plechy,
- **elektrický obvod** – primární a sekundární vinutí,
- **chladicí nádoba s příslušenstvím,**
- **průchodky,**
- **mechanické části konstrukce.**

Pro potřeby této disertační práce se rozbor odhadované spolehlivosti výkonového olejového transformátoru omezí pouze na rozbor odhadované spolehlivosti jeho izolačního systému. Protože nejčastější příčinou havárie výkonových olejových transformátorů je právě

porucha jejich izolačního systému, není uvedené omezení příliš svazující. Olej ve výkonových olejových transformátorech slouží jako izolace a současně odvádí teplo z povrchu vinutí a magnetického obvodu. Podle [5] jsou nejběžnější používané oleje pro tyto netočivé elektrické stroje minerální oleje s označením Technol, ITO 100 a BTSi. V předkládané disertační práci se pod pojmem papír rozumí papírová izolace a izolační válce v transformátoru. Jedná se především o transformátorovou lepenku, jejíž různé typy lze nalézt například v [6].

Magnetický obvod je tvořen izolovanými transformátorovými plechy s minimálním magnetickým odporem a bez vzduchové mezery. Na magnetickém obvodu je umístěno vinutí, které se vyrábí z izolovaných měděných nebo hliníkových vodičů navinutých na izolačních válkách z tvrdého papíru. Je definováno jako sestava závitů tvořící elektrický obvod připojená na jedno z napětí předepsaných pro transformátor.

Transformátor je obklopen chladicí nádobou s příslušenstvím. Pro zvětšení účinnosti chlazení se nádoba upravuje podle výkonu stroje. Do výkonu 20 MVA stačí nádoba hladká. Do 25 MVA se její chladicí povrch zvětšuje zvlněním, do 30 MVA se používají trubky přivařené na nádobu nebo radiátory a od 60 MVA se používá ofukování trubek a radiátorů. Od 60 MVA je nejvýhodnější chlazení s nuceným oběhem oleje. Teplý olej se odvádí z nádoby do chladičů a ochlazený se vstříkává zpět do nádoby.

Průchodka je vlastně izolátor, kterým prochází vodivý svorník, na jehož jeden konec se připojí vinutí a na druhý konec přívod. Přivádí i odvádí z vinutí elektrický proud tak, aby nedošlo vodičem ke spojení mezi fází a nádobou. Každé fázi přísluší dvě průchodky, které jsou zabudované ve víku transformátoru. Mezi mechanické části konstrukce patří například konzervátor, odbočky a radiátory. Detailnější rozbor jednotlivých částí lze nalézt v [2].

## 1.2 ROZDĚLENÍ VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Transformátory se dělí podle různých hledisek [7]. Pro účely předkládané disertační práce jsou nejdůležitější následující hlediska:

- **Podle použití transformátoru**

- **transformátory pro přenos energie** - jedná se o transformátory, které jsou součástí přenosových a rozvodných soustav, přeměňují střídavé napětí z nízkého na vysoké nebo naopak,
- **transformátory pro speciální účely** - tyto stroje jsou určeny pro speciální účely, patří sem autotransformátory, svařovací a měřicí transformátory atd.

- **Podle počtu fází**

- **jednofázové** - většinou s malým výkonem,
- **trojfázové** - většinou s velkým výkonem,
- **vícefázové** - používají se pro speciální účely.

- **Podle chlazení aktivních částí**

- **suché** - mají plynné chladicí medium (většinou vzduch), jedná se o transformátory napětíové hladiny 38 kV a výkonu 10 MVA,
- **zalévané** - tyto stroje mají vinutí zalito pryskyřicí, tento typ chlazení se uplatňuje u transformátorů napětíové hladiny 35 kV a výkonu 20 MVA,

- **olejové** - magnetický obvod a vinutí jsou ponořeny do nádoby s olejem, uplatňuje se u transformátorů vysokých napětí a výkonů.
- **Podle počtu vinutí**
  - **dvouvinutové** - obsahuje vinutí vyššího a vinutí nižšího napětí,
  - **třívinutové** - obsahuje vinutí vyššího, vinutí nižšího a vinutí středního napětí.

### 1.3 ZJIŠŤOVÁNÍ AKTUÁLNÍHO STAVU VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Z důvodu vysoké pořizovací ceny nového výkonového olejového transformátoru a dalších ekonomických vlivů nejsou ve většině případů k dispozici soubory dob do poruchy a nelze tak k rozboru spolehlivosti těchto netočivých elektrických strojů použít klasické metody matematické statistiky. Nelze tedy spočítat funkční (distribuční funkce dob do poruchy, funkce spolehlivosti, intenzita poruch atd.) ani číselné (střední doba do poruchy, kvantily atd.) charakteristiky spolehlivosti definované v **Příloha 3 - Matematické modely ve spolehlivosti**. Z důvodu výrobcem deklarované dlouhé doby provozu bez poruchy nelze potřebná data získat ani ze zkoušek spolehlivosti, musí se tak provádět diagnostika aktuálního stavu transformátoru.

Rozbor spolehlivosti výkonových olejových transformátorů je tedy nutné provádět na základě vyhodnocování dat z diagnostických měření. Pomocí moderních matematických metod lze z těchto dat určit pravděpodobný rok dožití, pravděpodobnost poruchy a další spolehlivostní charakteristiky.

#### 1.3.1 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Podle [8] 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:

- **off-line diagnostiku,**
- **on-line diagnostiku.**

Provádí-li se na technickém zařízení off-line diagnostika, zařízení se nejdříve odstaví z provozu a poté se změří všechna potřebná data. Naopak u on-line diagnostiky se získávají data během provozu pomocí senzorů umístěných na diagnostikovaném zařízení. Výhodou on-line diagnostiky je skutečnost, že se sledovaný objekt neustále nachází pod kontrolou, podléhá automatickému vyhodnocení údajů a včasnému rozpoznání nežádoucího stavu. Nevýhodou je pak vyšší technická i finanční náročnost a potřeba zpracování většího množství dat. V rámci řešení této disertační práce byly navrženy některé neinvazivní postupy pro rozbor odhadované spolehlivosti vycházející z dat off-line diagnostiky výkonových olejových transformátorů.

V energetice se podle [3] transformátory pro diagnostické účely rozdělují na:

- **Transformátory napět'ové hladiny 400 a 220 kV.**
- **Transformátory napět'ové hladiny 110 kV.**
- **Transformátory napět'ové hladiny vn a výkonu  $\geq 1,6$  MVA – distribuční.**
- **Transformátory napět'ové hladiny vn a výkonu  $\geq 1,6$  MVA – vlastní spotřeby.**

Z hlediska aplikace diagnostických metod je také rozhodující, o jaký transformátor se jedná. Uplatňuje se následující rozdělení:

- **nový stroj,**
- **stroj po podrobné kontrole,**
- **stroj v provozu,**
- **náhradní stroj.**

U nového stroje se rozlišují dva případy:

- **stroj před uvedením do provozu - s novou náplní,**
- **stroj na konci záručního období.**

U stroje po podrobné kontrole se rozlišuje:

- **stroj s původní olejovou náplní,**
- **stroj s vyměněnou olejovou náplní,**
- **stroj s regenerovanou olejovou náplní.**

Pro jednotlivé skupiny elektrických strojů netočivých jsou předepsány příslušné diagnostické metody. Použití jednotlivých metod se řídí typem stroje a je uvedeno v příslušných normách a předpisech.

### 1.3.2 DIAGNOSTICKÉ VELIČINY

K vyhodnocování fyzikálních procesů, které probíhají uvnitř sledovaných objektů, používá elektrotechnická diagnostika různých fyzikálních zákonitostí. Parametry těchto zákonitostí se sledují jako diagnostické veličiny, které se dělí na stacionární (jejich střední hodnota je konstantní v čase a nezáleží na části vzorku pro měření) a nestacionární. Také lze tyto veličiny rozdělit na deterministické (jsou určeny známou závislostí na čase) a stochastické (mají náhodný charakter). Při off-line měření výkonových olejových transformátorů se získává velké množství diagnostických veličin, které charakterizují jeho současný stav. Tyto veličiny lze podle [9] rozdělit na tři typy:

- **veličiny charakterizující stav olejové náplně** - jejich výčet zachycuje Tab. 1,
- **veličiny stavu izolace vinutí** - jejich výčet zachycuje Tab. 2,
- **plyny rozpuštěné v izolačním oleji transformátoru** - jejich výčet zachycuje Tab. 3.

Pokud není u některé veličiny uvedena jednotka, jedná se o bezrozměrnou veličinu. Uvedené veličiny jsou sledovány v čase v průběhu celého života transformátoru. Jejich naměřené hodnoty se porovnávají s kritériálními hodnotami, které jsou uvedeny například v [3]. Zde se rozlišují kritériální hodnoty pro transformátory o různých napěťových hladinách, dále pro nové stroje, stroje po podrobné kontrole, stroje v provozu a náhradní stroje.

Tab. 1 Veličiny charakterizující stav olejové náplně

Označení	Jednotka	Název
$U_p$	[kV]	průrazné napětí
ČK	[mgKOH/g]	číslo kyselosti
$\text{tg } \delta_x$		ztrátový činitel (X značí teplotu oleje)
$\epsilon_{rx}$		relativní permitivita (X značí teplotu oleje)
$\rho_x$	[ $\Omega\text{cm} \cdot 10^{12}$ ]	vnitřní rezistivita (X značí teplotu oleje)
$\sigma$	[N/m]	povrchové napětí
$Q_v$	[g/t]	obsah vody
$\rho_v$	[ $\text{kg/m}^3$ ]	hustota
s	[kV]	směrodatná odchylka (při stanovení $U_p$ )
v	[%]	variační koeficient (při stanovení $U_p$ )

Tab. 2 Veličiny stavu izolace vinutí

Označení	Jednotka	Název
$\tau$	[s]	časová konstanta
$R_x$	[M $\Omega$ ]	odpor (X značí čas po přiložení napětí)
$p_i$		polarizační index
$C_x$	[pF]	kapacita (X značí frekvenci přiloženého napětí)
$\text{tg } \delta$	[%]	ztrátový činitel

Tab. 3 Plyny rozpuštěné v izolačním oleji transformátoru

Označení	Jednotka	Název
$C_2H_2$	[ $\mu\text{l/l}$ ]	acetylen
$CH_4$	[ $\mu\text{l/l}$ ]	metan
$C_2H_4$	[ $\mu\text{l/l}$ ]	etylen
$C_2H_6$	[ $\mu\text{l/l}$ ]	etan
$C_4H_{10}$	[ $\mu\text{l/l}$ ]	1buten
$C_3H_8$	[ $\mu\text{l/l}$ ]	propan
$\sum C_xH_x$	[ $\mu\text{l/l}$ ]	součet uhlovodíků
$H_2$	[ $\mu\text{l/l}$ ]	vodík
CO	[ $\mu\text{l/l}$ ]	oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	[ $\mu\text{l/l}$ ]	oxid uhličitý
O <sub>2</sub>	[ $\mu\text{l/l}$ ]	kyslík
N <sub>2</sub>	[ $\mu\text{l/l}$ ]	dusík
$Q_p$	[%]	celkový obsah plynů

**VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ STAV OLEJOVÉ NÁPLNĚ [8]**

V případě, že je elektrické zařízení plněno izolačním olejem, je diagnostika tohoto oleje součástí celkové diagnostiky stroje. Ucelenou informaci o stavu izolačního oleje lze získat především měřením veličin zaznamenaných v Tab. 1.

Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta_x$  vyjadřuje dielektrické ztráty, které se přemění na teplo působením střídavého elektrického pole. U čistých izolačních olejů, které neobsahují nečistoty a příměsi polárního charakteru, jsou vodivostní ztráty způsobeny pouze vodivostí dielektrika, ta je malá, je tedy malá i hodnota  $\text{tg } \delta_x$ . Ztrátový činitel tak může upozornit na výskyt polárních a iontových složek v izolaci.

Vliv prostředí na intenzitu elektrického pole je charakterizován relativní permitivitou  $\epsilon_{rx}$ . Hodnoty  $\epsilon_{rx}$  se u olejů pohybují v rozmezí 2 až 3. Bylo prokázáno, že relativní permitivita izolačního oleje je přímo úměrná stupni jeho zestárnutí. Pro lepší efektivnost analýzy jsou veličiny  $\text{tg } \delta_x$  a  $\epsilon_{rx}$  měřeny pro různé teploty, nejčastěji 20°C, 70°C a 90°C. Ačkoliv patří hustota  $\rho_v$  mezi základní fyzikální charakteristiky látky, nevypovídá o stárnutí oleje přímo. Značný vliv na zhoršení parametrů izolace má voda, měří se proto veličina  $Q_v$  - obsah vody v oleji. Vlhkost se do izolace může dostat především z ovzduší. Stupeň zestárnutí oleje lze odvozovat také podle přítomnosti kyselých látek. Další diagnostickou veličinou je tak číslo kyselosti – ČK. Jedná se o množství KOH potřebné k neutralizaci organických a anorganických kyselých reagujících složek v 1g oleje v nevodném alkoholickém prostředí.

Vnitřní rezistivita  $\rho_x$  je definována jako převrácená hodnota elektrické vodivosti. Její hodnoty jsou ovlivněny především vlhkostí a různými cizími složkami. Pokud je vnitřní rezistivita měřená při teplotě 90°C uspokojivá, avšak při teplotě okolí nikoliv, svědčí to o přítomnosti vody a cizích látek v izolačním oleji. Na počátek stárnutí oleje poukazuje mezipovrchové napětí na rozhraní voda – kapalina  $\sigma$ . Jedná se o sílu, která působí na jednotku délky povrchu v kolmém směru k této délce a tečném směru k ploše povrchu. Mezi nejčastěji stanovované parametry patří elektrická pevnost, což je poměr průrazného napětí  $U_p$  vztaženého na vzdálenost elektrod. Při zkoušce se provádí šest průrazů v pětiminutových odstupech. Určí se tak hodnoty  $U_{p1}, U_{p2}, \dots, U_{p6}$ . Výsledná hodnota  $U_p$  se pak spočítá jako aritmetický průměr:

$$U_p = \frac{\sum_{i=1}^6 U_{p_i}}{6}.$$

Vyhodnocují se také hodnoty směrodatné odchylky

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (U_p - U_{p_i})^2}{5}}$$

a variačního koeficientu

$$v = \frac{s}{U_p} \cdot 100\%.$$

Vzorky olejů se odebírají dvěma způsoby:

- **odběr bez styku oleje s ovzduším,**
- **odběr do skleněných zabroušených lahví – za přístupu vzduchu.**

**VELIČINY URČUJÍCÍ STAV IZOLACE VINUTÍ [8]**

Velkou vypovídající hodnotu mají veličiny, které charakterizují stav izolačního systému diagnostikovaného zařízení. Izolační odpor  $R_X$  je poměr stejnosměrného napětí přivedeného na zkoušený objekt a celkového proudu v definovaném čase po připojení napětí. Nejčastěji se používají hodnoty  $R_{15}$ , resp.  $R_{60}$ , což je izolační odpor v 15. sekundě, resp. 60. sekundě po přiložení napětí. Pomocí veličin  $R_{15}$  a  $R_{60}$  lze určit polarizační index  $p_{i1}$ , jenž využívá pro popis stavu materiálu časovou proměnnost absorpčního proudu. Určí se podle vztahu:

$$p_{i1} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}},$$

kde  $i_{15}$  a  $i_{60}$  jsou absorpční proudy v 15. a v 60. sekundě. Podobně lze určit desetiminutový polarizační index  $p_{i10}$  z absorpčních proudů v 1. a v 10. minutě. Polarizační indexy jsou bezrozměrná čísla. Obecně lze říci, že  $p_i \approx 1$  ukazuje na navlhlou případně znečištěnou izolaci diagnostikovaného zařízení. Naopak pokud je izolace v pořádku, je  $p_i > 1$ .

Pro kontrolu vinutí elektrického zařízení lze užít měření kapacity  $C_X$  [pF],  $X$  má význam teploty v °C, pro kterou byla daná hodnota kapacity měřena. Metoda je založena na zjištění, že pokud se kapacita vinutí nemění pro různé teploty a frekvence, je toto vinutí v pořádku. Jako hlavní důvod havárie transformátoru se v technické praxi udává proražení izolace vinutí.

Časová konstanta  $\tau$  se určí jako součin izolačního odporu  $R_{60}$  a kapacity  $C_{50}$ . Její absolutní velikost nezávisí na geometrických rozměrech vinutí, což v praxi umožňuje objektivní hodnocení izolačních systémů bez ohledu na jejich napětí, výkon a typ.

Ztrátový činitel  $\tan \delta$  patří mezi hlavní ukazatele elektrické pevnosti izolace, protože charakterizuje činné ztráty polarizací v izolaci. S rostoucí teplotou se izolace vinutí více zahřívá a rychleji tak stárne. Důvodem je skutečnost, že izolace obsahuje polární látky jako vodu, reakční produkty stárnutí a mechanické nečistoty.  $\tan \delta$  velice dobře indikuje celkový stav izolace stroje a vyjadřuje tzv. dielektrické ztráty. Ztrátový činitel tedy vypovídá o celkovém stavu izolace a z jeho velikosti lze indikovat, zda je izolační systém zestárlý nebo navlhlý.

Izolační odpor, kapacita i ztrátový činitel jsou měřeny při různých zapojeních příslušných měřicích přístrojů. U dvouvinutových transformátorů se jedná celkem o 6 možných zapojení a u třívinutových transformátorů dokonce o 21 možných zapojení. Jednotlivá zapojení jsou zaznamenána v Tab. 4. Například zápisem V:N+K se myslí zapojení měřicího přístroje ve smyslu, že se jeho záporný pól připojí na vinutí vyššího napětí a kladný na kostru (nádobu transformátoru). S kostrou se spojí rovněž vinutí nižšího napětí. Ostatní zápisy lze vysvětlit analogicky.

**PLYNY ROZPUŠTĚNÉ V IZOLAČNÍM OLEJI TRANSFORMÁTORU [10]**

Minerální izolační oleje výkonových olejových transformátorů jsou tvořeny směsí rozdílných molekul uhlovodíků obsahujících  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  a  $\text{CH}$  skupiny svázaných kovalentní vazbou C-C. Poruchy izolace těchto netočivých elektrických strojů mají za následek uvolnění energie, což zapříčiní štěpení vazeb C-H a C-C za vzniku radikálů jako jsou  $\text{H}\cdot$ ,  $\text{CH}_3\cdot$ ,  $\text{CH}_2\cdot$ ,  $\text{CH}\cdot$ , nebo  $\text{C}\cdot$ , které přes složité reakce znovu tvoří molekuly, jako jsou vodík (H-H), metan ( $\text{CH}_3\text{-H}$ ), etan ( $\text{CH}_3\text{-CH}_3$ ), etylen ( $\text{CH}_2\text{=CH}_2$ ), nebo acetylen ( $\text{CH}\equiv\text{CH}$ ). Takto produkované plyny jsou buď rozpuštěné v oleji, nebo ve formě volných plynů. Volně se vyskytují pouze v případě, kdy jsou produkovány velmi rychle a v takovém množství, že se nestačí rozpustit v oleji.

Tab. 4 Zapojení měřicích přístrojů pro měření veličin určujících stav izolace vinutí

Transformátory			
Dvouvinut'ové	Třívínut'ové		
V:N	V:S	S:V	N:V
V:N+K	V:N	S:N	N:S
V:K	V:S+N	S:V+N	N:V+S
N:V	V:S+N+K	S:V+N+K	N:V+S+K
N:V+K	V:N+K	S:N+K	N:S+K
N:K	V:S+K	S:V+K	N:V+K
-	V:K	S:K	N:K
V-vinutí vyššího napětí	N-vinutí nižšího napětí	S-vinutí středního napětí	K-kostra, nádoba

Nejslabší vazby C-H (338 kJ/mol) s hlavním plynem vodíkem vznikají při poruchách zapříčiněných nízkou energií, jako jsou částečné výboje. Pro štěpení vazeb C-C a jejich rekombinace do plynů s jednoduchou (C-C 607 kJ/mol), dvojnou (C=C 720 kJ/mol), či trojnou (C≡C 960 kJ/mol) vazbou jsou potřeba jak vyšší energie přítomných poruch, tak vyšší teploty. Při teplotách nad 500 °C proto vzniká etylen namísto etanu či metanu. Acetylen zase vyžaduje teploty 800 – 1200 °C a rychlé ochlazení, aby se dále vyskytoval jako stabilní produkt rekombinace. Olej též může oxidovat za vzniku CO a CO<sub>2</sub>, kterých se po delší době může nahromadit velké množství.

Podle [6] obsahuje neupravená papírová izolace jen celulózu a je velmi savá. Proto se do ní přidávají různé polymery, pojiva a plnidla pro dosažení požadovaných vlastností. Celulóza je základní stavební hmota rostlinných tkání. Technická celulóza se také nazývá buničina. Jedná se o přirozenou makromolekulární látku, glukózový neredukující polysacharid složený z monosacharidů-glukózy spojených vazbou. Sumární vzorec glukózy je (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>. Tuhá papírová izolace tak obsahuje méně stabilní vazby, než jsou uhlovodíkové vazby v oleji a rozkládá se při nižších teplotách. Významná rychlost štěpení polymerových řetězců nastává při teplotách nad 105 °C, následovaná, při teplotách okolo 300 °C, již kompletním rozkladem a karbonizací. CO a CO<sub>2</sub> jsou tvořeny v podstatně větším množství než při oxidaci oleje za stejné teploty. Ovšem i při rozkladu papírové izolace se tvoří menší množství uhlovodíkových plynů.

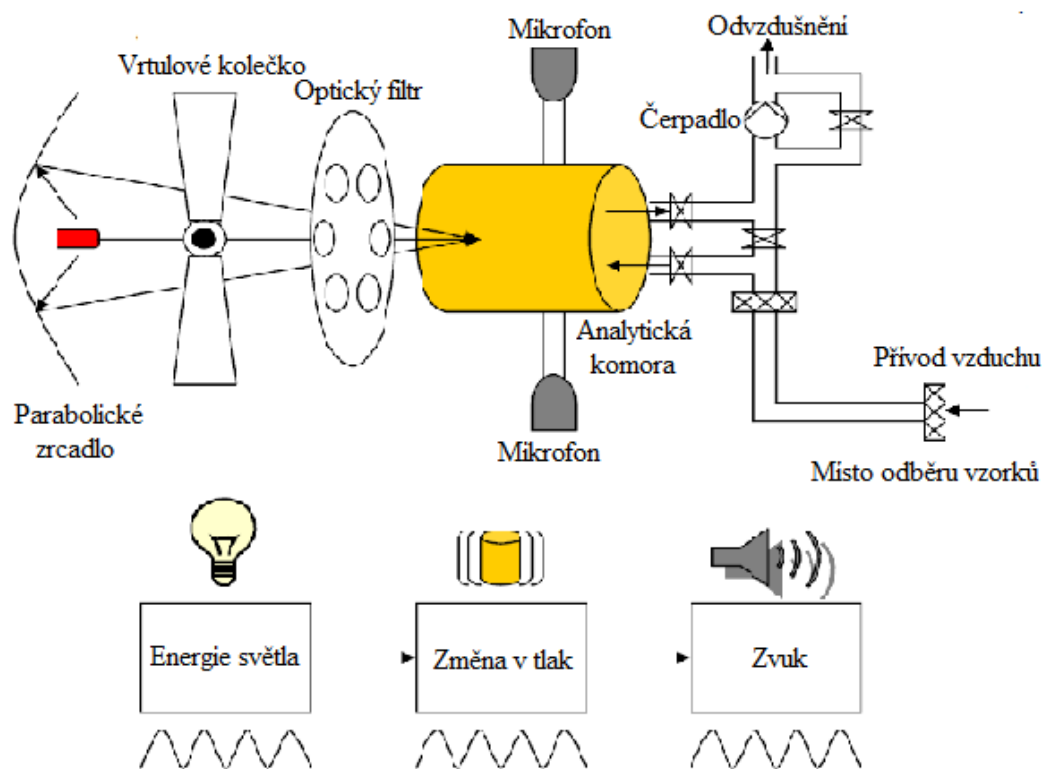
Plyny v transformátorovém oleji mohou být také generovány jako výsledek koroze nebo jiných chemických reakcí jak na nechráněných plochách, tak plochách s ochrannými nátěry. V případě přítomnosti kyslíku v olejové izolaci může být vodík produktem reakce oceli s vodou, ale i reakce volné vody se speciálními povlaky na površích kovů. Vodík v oleji může být také jako následek postupného uvolňování vodíku pohlceného během výrobního procesu z ocelových konstrukcí. Produkci plynů též ovlivňuje případné vystavení oleje slunečnímu světlu, prováděné opravy, přítomnost alkydové pryskyřice či modifikovaných polyuretanů obsahujících mastné kyseliny.

Detekované plyny se v základu dělí na dvě skupiny, na plyny chybové a na plyny nechybové [11]. Chybové plyny vznikají pouze za přítomnosti poruchy uvnitř transformátoru, vznik nechybových plynů není vázán na žádný poruchový stav. Chybové plyny jsou plyny na bázi uhlovodíků a vodíku, konkrétně to jsou vodík (H<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), acetylen (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), etylen

(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) a etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), nebo na bázi oxidů uhlíku, mezi které patří oxid uhelnatý (CO) a oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>). Za nechybové plyny se považují kyslík (O<sub>2</sub>) a dusík (N<sub>2</sub>). Odběr plynů z výkonového olejového transformátoru je prováděn dvěma základními způsoby:

- odběrem vzorku volných plynů,
- odběrem vzorku oleje obsahujícího plyny.

K zjištění koncentrací plynů rozpuštěných v izolačním oleji se podle [10] používá foto-akustická spektroskopie nebo plynová chromatografie. Foto-akustická spektroskopie (Photo-Acoustic Spectroscopy) vychází z foto-akustického efektu, který je založen na přeměně energie infračerveného světla na energii zvuku za pomoci plynu, pevné látky či kapaliny. Plynový vzorek je vystaven světlu o konkrétní frekvenci, která odpovídá rezonanční frekvenci zjišťovaného plynu. Pokud je tento plyn v testovaném vzorku obsažen, dochází k absorpci světla, která má za následek nárůst tepelné energie molekul vzorku plynu včetně nárůstu teploty a tlaku. Jestliže použité světlo pulsuje s určitou frekvencí, teplota a tlak vzorku plynu bude pulzovat se stejnou frekvencí. Tímto vznikne tlaková vlna, která následně generuje vlnu akustickou, kterou lze detekovat prostřednictvím citlivého mikrofону. Schéma foto-akustické spektroskopie je zachyceno na Obr. 3.

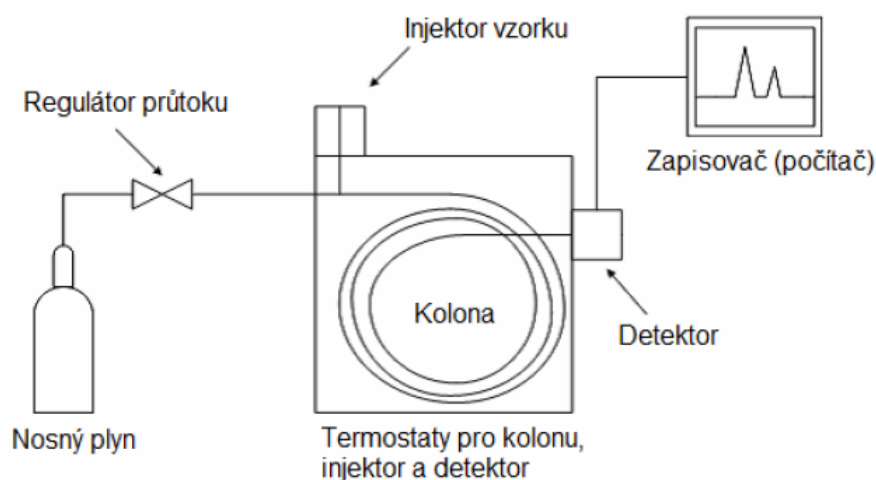


Obr. 3 Schéma foto-akustické spektroskopie [10]

Plynová chromatografie (gas chromatography) je tradiční metoda analýzy plynových vzorků. Její počátky jsou datovány na 40. a 50. léta v Anglii, od 70. let začala být široce používána v celém světě. Princip metody spočívá v ohřátí kolony chromatografu na určitou teplotu, na které je dále udržována. Do kolony je poté vpravován konstantní rychlostí nosný plyn se vzorkem. Jednotlivé složky vzorku jsou zpomalovány stacionární fází kolony a

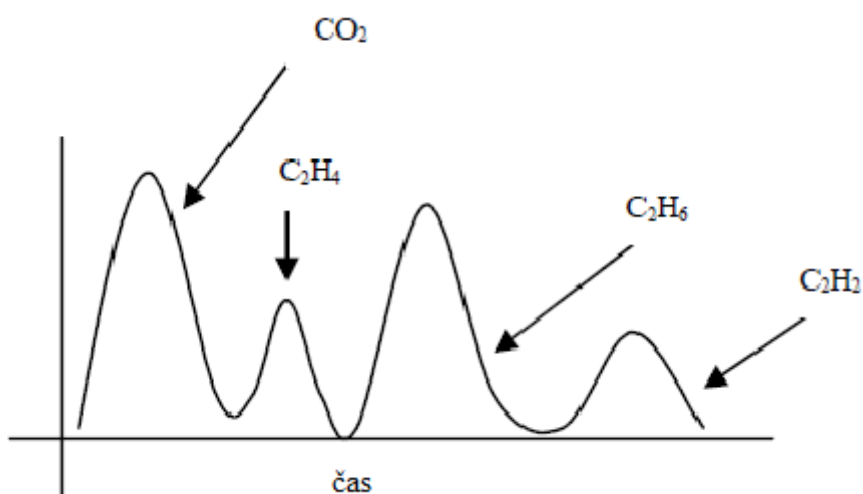
následně na výstupu detekovány. Pomocí velikosti tohoto zpomalení lze určit, o jakou složku vzorku se jednalo.

Na Obr. 4 je znázorněno zjednodušené schéma plynového chromatografu. Regulátor průtoku redukuje množství nosného plynu vpravovaného do kolony. Ještě před kolonou je do nosného plynu pomocí injektoru vpraven vzorek. Samotná kolona se skládá z trubice obsahující velmi jemný, tuhý materiál – stacionární fázi. Stacionární fáze, jejíž teplota je obvykle držena na dané hodnotě s přesností 0,1 °C, má za úkol absorbovat a s určitým časovým zpožděním opět uvolňovat vzorek plynu. Na výstupu z kolony je umístěn detektor, jehož teplota by pro zamezení kondenzace vzorku v jeho útrokách měla být vyšší než teplota vzorku. Detektor v závislosti na složkách vycházejících z kolony vysílá signál, který je zaznamenáván v nějakém zapisovači (například počítači) a následně vytisknut ve formě chromatogramu.



Obr. 4 Schéma plynového chromatografu [10]

Obr. 5 zachycuje příklad chromatogramu, kde jednotlivé extrémy představují zjišťované plyny.



Obr. 5 Příklad chromatogramu [10]

### 1.3.3 VYHODNOCENÍ DAT ZÍSKANÝCH Z DIAGNOSTICKÝCH MĚŘENÍ

Diagnostické veličiny měřené u výkonových olejových transformátorů se v technické praxi vyhodnocují podle [3]. V této normě jsou stanoveny kritériální hodnoty, které nesmí zkoumaná diagnostická veličina překročit. Kritériální hodnoty pro nový transformátor se liší od kritériálních hodnot transformátoru v provozu apod. Předkládaná disertační práce se zabývá návrhem neinvazivních postupů rozboru odhadované spolehlivosti pro výkonové olejové transformátory v provozu a o napěťové hladině 110 kV. Kritériální hodnoty vybraných diagnostických veličin těchto strojů jsou zaznamenány v Tab. 5 a Tab. 6. Norma také předepisuje časové intervaly, ve kterých se musí diagnostická měření provádět. Pro zde řešené dvouvinuťové výkonové olejové transformátory se jedná o dvouleté intervaly a pro třívinuťové výkonové olejové transformátory o jednoleté intervaly.

Tab. 5 Kritériální hodnoty pro veličiny charakterizující stav olejové náplně a plyny rozpuštěné v izolačním oleji transformátoru [3]

Zkouška (označení)	Kritériální hodnota	Celý název zkoušky
$Q_V$	$\leq 25$ g/t (ppm)	obsah vody rozpuštěné v izolačním oleji.
$U_P$	$\geq 60$ kV/2,5 mm	průrazné napětí
$Q_P$	herm. stroje $< 3\%_{obj.}$ neherm. stroje $< 9\%_{obj.}$	celkový obsah plynů rozpuštěných v izolačním oleji
ČK	$< 0,08$ mg KOH/g	číslo kyselosti
$tg \delta_{90}$	$< 8 \cdot 10^{-2}$	ztrátový činitel při teplotě 90 °C
$\rho_{20}$	$> 50$ GΩm	vnitřní rezistivita při laboratorní teplotě
$\sigma$	inhib. $> 35$ mN/m neinhib. $> 30$ mN/m	relativní mezipovrchové napětí na rozhraní olej-voda
$H_2$ $\sum C_1 - C_3$ $C_2H_2$	$< 150$ μl/l $< 800$ μl/l $< 30$ μl/l	Plynová chromatografie - obsah plynů v oleji  obsah vodíku suma obsahů uhlovodíků obsah acetylénu  Vyhodnocení naměřených hodnot provede renomované pracoviště podle IEC 60 599.

Tab. 6 Kriteriaální hodnoty pro veličiny určující stav izolace vinutí [3]

Zkouška (označení)	Kriteriaální hodnota	Celý název zkoušky
<b>R (MΩ)</b>	$R_{iz} > U_n$ (kV)	izolační odpor
<b>R = f(t)</b>	< 50% při dvou po sobě následujících měření	pokles (zhoršení) izolačního odporu mezi jednotlivými měřeními ve stanoveném intervalu
<b>P<sub>i60</sub> (-)</b>	$\geq 1,2$	polarizační jednominutový index V případě, že bylo před měřením provedeno vysoušení stroje, nemusí být tato hodnota splněna.
<b>C (pF)</b>	< 1,1 C <sub>nového stroje</sub>	kapacita po celou dobu provozu stroje
<b>tg δ (-)</b>	< $4 \cdot 10^{-2}$	ztrátový činitel
<b>tg δ = f(t)</b>	< 25% při dvou po sobě následujících měření	nárůst (zhoršení) ztrátového činitele mezi jednotlivými měřeními ve stanoveném intervalu
<b>τ (s)</b>	> 0,1	časová konstanta

Při vyhodnocování plynů rozpuštěných v izolačním oleji transformátorů se technická norma [3] doplňuje o závěry DGA (Dissolved Gas Analysis) metod. Jedná se o diagnostické metody, které na základě poměrů určitých plynů stanoví typ poruchy, která se v transformátoru vyskytuje. DGA metody podle [12] rozlišují poruchy:

- **částečné výboje s označením PD** - vedou k rozkladu papírové izolace nebo k jiskření, které vytváří v papíru dírky a karbonizované perforace (propichování), jsou doprovázeny výboji v plynu plněných dutinách vznikajících neúplnou impregnací, vysokou vlhkostí papíru a olejovým přesycením,
- **výboje nízké energie s označením D1** - projevují se velkými karbonizovanými perforacemi papíru, karbonizací povrchu papíru nebo detekcí uhlíku v izolačním oleji, mají za následek výboje mezi staženými částmi, mezi průchodkou a nádrží nebo na stěnách nádrže, způsobují průraz oleje a proudové přerušování rozvodu,
- **výboje vysoké energie s označením D2** - mohou vyvolat značnou destrukci a karbonizaci papíru, značnou karbonizaci v oleji a v některých případech dokonce vypínání transformátoru, vedou ke zkratu mezi nízkým napětím a zemí, mezi vodiči, mezi průchodkami a nádrží, poškozují izolační šrouby jádra,
- **tepelné poruchy s teplotou pod 300°C s označením T1** - papír v transformátoru hnědne, vzniká bludný proud ve vlhkém trámu stahovacího rámu a v nouzových případech způsobují přetížení transformátoru,
- **tepelné poruchy s teplotou v rozsahu 300-700°C s označením T2** - papír v transformátoru karbonizuje, poškozují se kontakty mezi sešroubovanými spoji, kluzné kontakty a kontakty uvnitř několikapólového přepínače, vznikají oběžné proudy mezi stáhnutým rámem a šrouby, mezi svěracími čelistmi a laminací, v uzemňovacím vodiči,

- **tepelné poruchy s teplotou nad 700°C s označením T3** - vyvolávají karbonizaci v oleji, zbarvení kovu, velké oběžné proudy v nádrži a jádře, menší proudy ve stěnách nádrže nebo zkratování spojů v laminátech kovového jádra,
- **normální stárnutí s označením NS** - porucha způsobená přirozeným stárnutím jednotlivých částí transformátoru,
- **kombinace jiskření a tepelných poruch s označením DT** - v transformátoru se vyskytuje jiskření a současně jedna z tepelných poruch.

Mezi nejpoužívanější DGA metody patří:

- **ČSN metoda** (někdy také nazývána jako ČSN norma),
- **Duvalova metoda** (někdy také nazývána jako Duvalův trojúhelník),
- **Rogersova metoda**,
- **Dornenburgova metoda**.

### ČSN METODA

Identifikace poruchy výkonového olejového transformátoru podle ČSN metody se zahájí v případě, kdy aspoň jedna koncentrace chybových plynů  $C_2H_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  překročí rozsah 90% typických koncentračních hodnot pozorovaných ve výkonových olejových transformátorech (v  $\mu l/l$ ). Tyto typické koncentrace jsou zachyceny v Tab. 7.

Tab. 7 90% typických koncentračních hodnot pozorovaných ve výkonových olejových transformátorech (v  $\mu l/l$ ) [12]

$C_2H_2$	$H_2$	$CH_4$	$C_2H_4$	$C_2H_6$	$CO$	$CO_2$
2-20	50-150	30-130	60-280	20-90	400-600	3800-14000

ČSN metoda používá k určení typu poruchy následující tři poměry plynů:

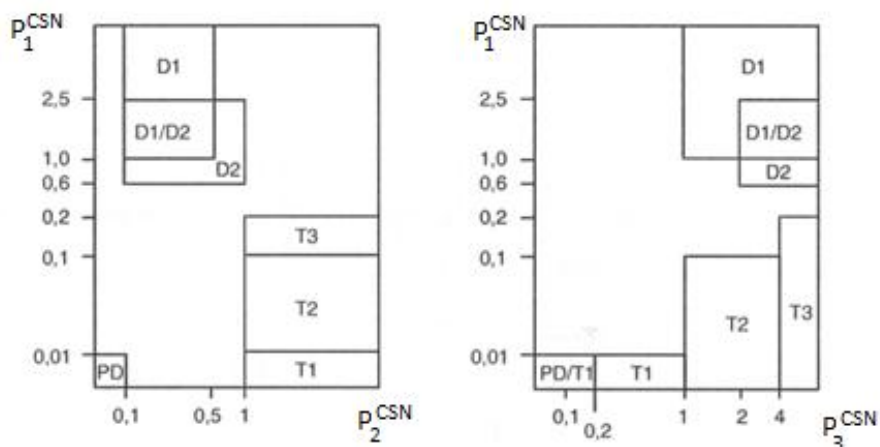
- $P_1^{CSN} = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ ,
- $P_2^{CSN} = \frac{CH_4}{H_2}$ ,
- $P_3^{CSN} = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ .

Podle hodnot poměrů  $P_1^{CSN}$ ,  $P_2^{CSN}$  a  $P_3^{CSN}$  lze na základě Tab. 8 identifikovat poruchu, která se vyskytuje uvnitř zkoumaného výkonového olejového transformátoru. Na Obr. 6 je zachyceno grafické znázornění plynových poměrů dle ČSN EN 60599 v rovině, Obr. 7 prezentuje grafické znázornění plynových poměrů dle ČSN EN 60599 v prostoru.

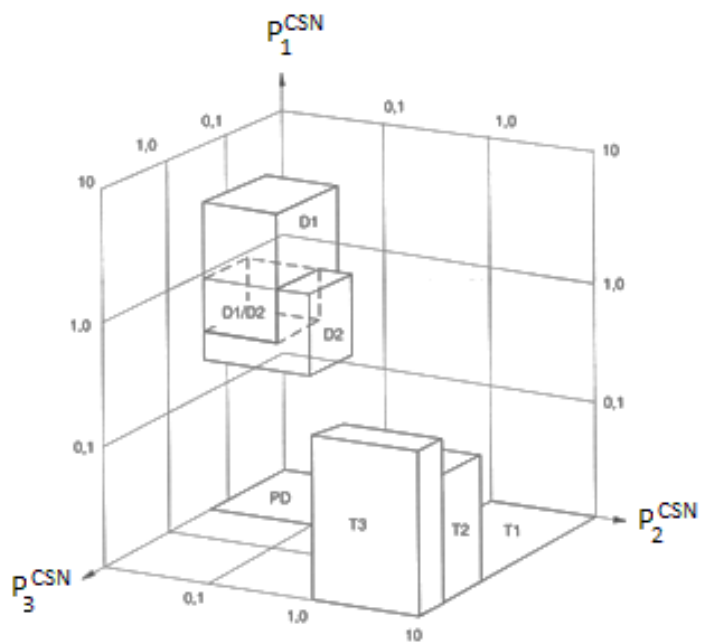
Je zřejmé, že může nastat kombinace poměrů, která neidentifikuje žádnou poruchu v transformátoru. V takovém případě je vhodné použít k analýze poruchovosti i další diagnostické metody.

Tab. 8 Interpretační tabulka dle ČSN EN 60599 [12]

Porucha	$P_1^{CSN}$	$P_2^{CSN}$	$P_3^{CSN}$
PD	<0,01	< 0,1	< 0,2
D1	> 1	0,1 – 0,5	> 1
D2	0,6 – 2,5	0,1 – 1	> 2
T1	<0,01	> 1	< 1
T2	< 0,1	> 1	1 – 4
T3	< 0,2	> 1	> 4



Obr. 6 Grafické znázornění plynových poměrů dle ČSN EN 60599 v rovině



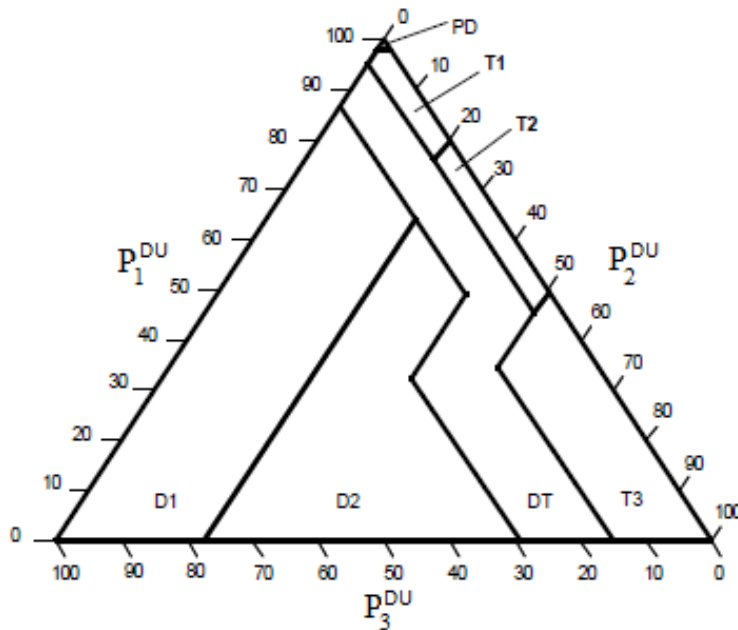
Obr. 7 Grafické znázornění plynových poměrů dle ČSN EN 60599 v prostoru

## DUVALOVA METODA

Identifikace poruchy výkonového olejového transformátoru se zahájí opět v případě, kdy aspoň jedna koncentrace chybových plynů  $C_2H_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  překročí rozsah 90% typických koncentračních hodnot pozorovaných ve výkonových olejových transformátorech (v  $\mu\text{l/l}$ ). Tyto typické koncentrace jsou zachyceny v Tab. 7. Metoda využívá tři poměry výše uvedených plynů:

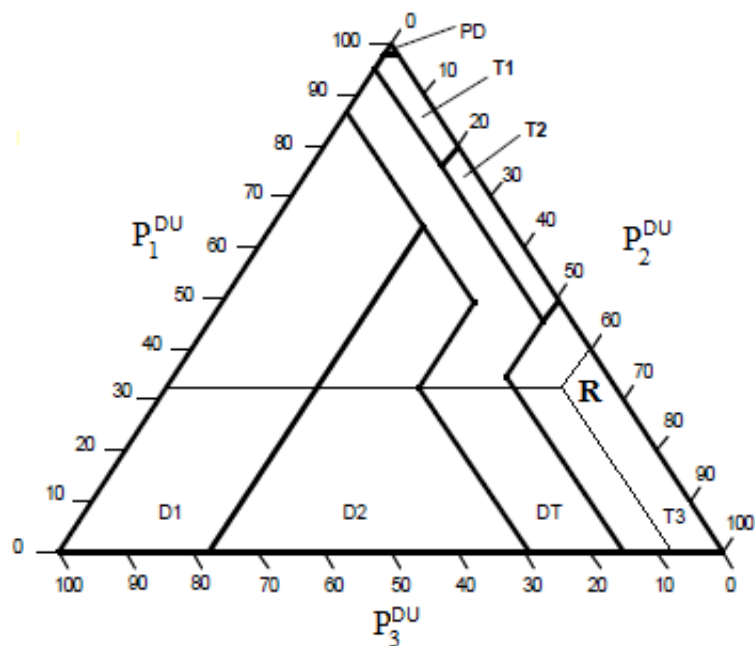
- $P_1^{DU} = \frac{100 \cdot CH_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}$ ,
- $P_2^{DU} = \frac{100 \cdot C_2H_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}$ ,
- $P_3^{DU} = \frac{100 \cdot C_2H_2}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}$ .

Uvedené poměry se vynášejí do Duvalova trojúhelníku, který je rozdělen na sedm oblastí. Každá z nich představuje možnou poruchu vyskytující se uvnitř transformátoru. Duvalův trojúhelník je zachycen na Obr. 8.



Obr. 8 Duvalův trojúhelník

Princip vynášení souřadnic v Duvalově trojúhelníku ilustruje Obr. 9. Poměry plynů  $P_1^{DU}$ ,  $P_2^{DU}$ ,  $P_3^{DU}$  určují v Duvalově trojúhelníku souřadnice bodu R a podle oblasti, ve které se bod R nachází, se určí porucha uvnitř transformátoru. Tab. 9 zaznamenává limity jednotlivých oblastí Duvalova trojúhelníku.



Obr. 9 Vynášení souřadnic do Duvalova trojúhelníku

Tab. 9 Limity oblastí v Duvalově trojúhelníku [13]

Limity oblastí				
<b>PD</b>	98 % $P_1^{DU}$			
<b>D1</b>	23 % $P_2^{DU}$	13 % $P_3^{DU}$		
<b>D2</b>	23 % $P_2^{DU}$	13 % $P_3^{DU}$	38 % $P_2^{DU}$	29 % $P_3^{DU}$
<b>T1</b>	4 % $P_3^{DU}$	10 % $P_2^{DU}$		
<b>T2</b>	4 % $P_3^{DU}$	10 % $P_2^{DU}$	50 % $P_2^{DU}$	
<b>T3</b>	15 % $P_3^{DU}$	50 % $P_2^{DU}$		

### ROZDÍLOVÁ DUVALOVA METODA

Z poznatků získaných v technické praxi vyplývá skutečnost, že okamžité zvýšení koncentrací jednotlivých chybových plynů vypovídá více o aktuálním stavu transformátoru než vyhodnocení stavu pomocí koncentrací nahromaděných za celý provoz stroje. Na základě tohoto zjištění vyplývá logický požadavek aplikovat Duvalovu metodu pouze na rozdíly těchto koncentrací. V praxi se takto použitá Duvalova metoda nazývá Rozdílová Duvalova metoda a uplatňuje se většinou při snaze identifikovat více různých stavů výkonových olejových transformátorů. Postup rozdílové Duvalovy metody lze podle [14] rozdělit do následujících bodů:

- Přírůstek metanu v čase  $t_i$   $CH_{4t_i}^p$  se získá odečtením koncentrace metanu v předcházejícím čase  $t_{(i-1)}$   $CH_{4t_{(i-1)}}$  od koncentrace metanu v čase  $t_i$   $CH_{4t_i}$ :

$$CH_{4t_i}^p = CH_{4t_i} - CH_{4t_{(i-1)}}$$

- Analogicky se spočítají přírůstky zbylých dvou plynů  $C_2H_{4t_i}^p$  a  $C_2H_{2t_i}^p$ .
- Celkový rozdíl plynů se spočítá jako součet rozdílů jednotlivých plynů získaných v předešlých dvou krocích:

$$C_xH_{y_{t_i}}^p = CH_{4t_i}^p + C_2H_{4t_i}^p + C_2H_{2t_i}^p.$$

- Obdobně jako u klasické Duvalovy metody se pro čas  $t_i$  spočítají souřadnice bodu  $R_{t_i}^p [P_{1t_i}^p, P_{2t_i}^p, P_{3t_i}^p]$ , jehož pozice v Duvalově trojúhelníku určí typ poruchy, která v daném čase  $t_i$  postihne izolační systém transformátoru:

$$P_{1t_i}^p = \frac{100 \cdot CH_{4t_i}^p}{C_xH_{y_{t_i}}^p},$$

$$P_{2t_i}^p = \frac{100 \cdot C_2H_{4t_i}^p}{C_xH_{y_{t_i}}^p},$$

$$P_{3t_i}^p = \frac{100 \cdot C_2H_{2t_i}^p}{C_xH_{y_{t_i}}^p}.$$

Pro provedení komplexní analýzy plynů rozpuštěných v izolačním oleji transformátorů je vhodné aplikovat klasickou Duvalovu metodu a do stejného trojúhelníku potom vykreslit bod  $R_{t_i}^p [P_{1t_i}^p, P_{2t_i}^p, P_{3t_i}^p]$ . Pokud se porucha u stroje skutečně vyskytuje, body z obou analýz se budou nacházet ve stejné oblasti. Pokud se body nenachází ve stejné oblasti, uvažuje se jako více vypovídající Rozdílová Duvalova metoda a závěr zní, že se v transformátoru pravděpodobně bude vyskytovat porucha, kterou identifikuje bod  $R_{t_i}^p$ . Bod  $R_{t_i}^p$  se také někdy označuje jako bod S.

### ROGERSOVA METODA

U této metody nejsou dána kritéria pro zahájení identifikace poruchy výkonového olejového transformátoru. Metodu tak lze použít k vyhodnocení stavu stroje kdykoliv během jeho provozu. Podobně jako u předchozích metod se zde používají následující tři poměry plynů:

- $P_1^{RO} = \frac{CH_4}{H_2},$
- $P_2^{RO} = \frac{C_2H_2}{C_2H_4},$
- $P_3^{RO} = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}.$

Následující Tab. 10 zaznamenává hodnoty poměrů plynů a následné kódové označení, podle kterého se identifikuje porucha transformátoru. Typ vyskytující se poruchy je určen kombinací jednotlivých poměrů. Tyto kombinace zaznamenává Tab. 11. Na rozdíl od předchozích metod se zde nerozlišuje porucha PD a naopak lze identifikovat poruchu normální stárnutí NS.

Tab. 10 Kódové označení pro hodnoty poměrů jednotlivých plynů [15]

Poměr	Rozsah	Kód
$P_1^{RO}$	<0,1	1
	0,1-1	0
	1-3	2
	>3	2
$P_2^{RO}$	<0,1	0
	0,1-1	1
	1-3	1
	>3	2
$P_3^{RO}$	<0,1	0
	0,1-1	0
	1-3	1
	>3	2

Tab. 11 Typy poruch a jejich odpovídající kombinace kódů [15]

Porucha	$P_1^{RO}$	$P_2^{RO}$	$P_3^{RO}$
NS	0	0	0
D1	1	0	0
D2	0	1	2
T1	0	0	1
T2	2	0	1
T3	2	0	2

Je zřejmé, že opět může nastat kombinace poměrů, která neidentifikuje žádnou poruchu v transformátoru. V takovém případě je tedy opět vhodné použít k analýze poruchovosti i další diagnostické metody.

#### DORNENBURGOVA METODA

Pravidla pro zahájení identifikace poruchy pomocí této DGA metody se liší od předchozích postupů. Pro započítání analýzy podle Dornenburgovy metody musí být splněno následující:

- **porucha musí existovat,**
  - koncentrace aspoň jednoho plynu ( $C_2H_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ) je větší než dvojnásobek minimální úrovně koncentrace pro daný plyn, minimální úroveň koncentrace jednotlivých plynů jsou zachyceny v Tab. 12,
  - jeden ze zbylých plynů má koncentraci větší než je minimální úroveň koncentrace pro daný plyn,
- **v každém poměru má aspoň jeden plyn koncentraci nad limitem,**
- **výsledky poměrů jsou v rozmezí jen pro jednu diagnózu.**

Tab. 12 Minimální úroveň koncentrace plynů ve výkonových olejových transformátorech (v  $\mu\text{l/l}$ ) [16]

$\text{C}_2\text{H}_2$	$\text{H}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{CO}$
35	100	120	50	65	350

Opět se zde používají poměry některých plynů, v tomto případě se jedná o následující čtyři poměry:

- $P_1^{DO} = \frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2}$ ,
- $P_2^{DO} = \frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4}$ ,
- $P_3^{DO} = \frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{CH}_4}$ ,
- $P_4^{DO} = \frac{\text{C}_2\text{H}_6}{\text{C}_2\text{H}_2}$ .

Tab. 13 zaznamenává hodnoty poměrů plynů a přiřazuje k nim příslušnou poruchu transformátoru. V tomto případě se rozlišují pouze 3 druhy poruch:

- **T** - tepelná porucha, jedna z poruch T1, T2 nebo T3,
- **D1** - výboje nízké energie,
- **D2** - výboje vysoké energie.

Tab. 13 Poruchy transformátoru identifikované pomocí Dornenburgovy metody [16]

Porucha	$P_1^{DO}$	$P_2^{DO}$	$P_3^{DO}$	$P_4^{DO}$
<b>T</b>	>1	<0,75	<0,3	>0,4
<b>D1</b>	<0,1	-	<0,3	>0,4
<b>D2</b>	>0,1 a <1	>0,75	>0,3	<0,4

### 1.3.4 DIAGNOSTICKÉ POSTUPY DOPLŇUJÍCÍ DGA METODY

Ze zkušeností odborníků, kteří se technickou diagnostikou výkonových olejových transformátorů zabývají, vyplývá, že při rozlišování více různých stavů těchto strojů musí být DGA metody doplněny dalšími diagnostickými postupy. Tyto postupy hodnotí, v jaké míře ovlivňuje identifikovaná porucha izolační systém transformátorů. Patří mezi ně následující:

#### POMĚR PLYNŮ $\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}}$

Hodnota tohoto poměru určuje, do jaké míry predikovaná porucha v daném stavu postihuje papírovou izolaci výkonového olejového transformátoru. Princip vyhodnocení poměru těchto dvou plynů zachycuje Tab. 14.

Tab. 14 Repräsentace poměru  $\frac{CO_2}{CO}$ 

Hodnota poměru	Míra zasažení papírové izolace
7-20	Papírová izolace nezasazena
5-7	Pozor! Nutné provést podrobnější vyšetření stavu papírové izolace
3-5	Pozor! Papírová izolace pravděpodobně zasažena důsledky nejpravděpodobnější poruchy
0-3	Pozor! Papírová izolace je výrazně poškozena vlivem důsledků nejpravděpodobnější poruchy

**POMĚR PLYNŮ  $\frac{O_2}{N_2}$** 

V bezporuchovém stavu transformátoru se poměr  $\frac{O_2}{N_2}$  pohybuje kolem hodnoty 0,5. V průběhu stárnutí transformátoru tento poměr může klesat. Příčinou může být oxidace oleje nebo stárnutí papíru. Způsob zatěžování stroje a použitý systém konzervace mají sice na hodnotu poměru značný vliv, ale hodnota poměru menší než 0,3 je obecně považována za začátek indikování nadměrné spotřeby kyslíku v důsledku výskytu některé z tepelných poruch nebo jiskření uvnitř transformátoru.

**OBSAH VODY V IZOLAČNÍM OLEJI  $Q_v$** 

Obsah vody v izolačním oleji má značný vliv především na zhoršení izolační pevnosti oleje. Voda se do izolačního oleje dostává z okolního ovzduší nebo jako produkt oxidačního stárnutí. Předpokládá se, že výkonový olejový transformátor je tak spolehlivý, jak je spolehlivá jeho papírová izolace a vlhkost značně snižuje právě spolehlivost papírové izolace. V [3] je uvedena kritická hodnota pro obsah vody v izolačním oleji 25 ppm. Při hodnotách větších, než je tato kritická hodnota, lze předpokládat, že bude papírová izolace značně navlhla.

**ZTRÁTOVÝ ČINITEL  $tg \delta$** 

Ztrátový činitel vypovídá o celkovém stavu izolace a z jeho velikosti lze usuzovat, zda je izolační systém zestárlý nebo navlhlý. Měří se pro několik různých zapojení měřících přístrojů. V omezené míře reaguje ztrátový činitel také na vznik částečných výbojů. V [3] je uvedena kritická hodnota změny ztrátového činitele 0,25 pro dvouvinuťové a 0,2 pro třívinuťové transformátory. Změna ztrátového činitele v čase  $t_i$   $\Delta tg \delta_{t_i}$  se spočítá podle vztahu:

$$\Delta tg \delta_{t_i} = \frac{tg \delta_{t_i} - tg \delta_{t_{i-1}}}{tg \delta_{t_{i-1}}},$$

kde  $tg \delta_{t_i}$  je hodnota ztrátového činitele v čase  $t_i$  a  $tg \delta_{t_{i-1}}$  je hodnota ztrátového činitele v čase  $t_{i-1}$ . Pokud hodnota  $\Delta tg \delta_{t_i}$  překročí hodnotu 0,25, lze usuzovat, že papírová izolace je buď navlhla, nebo značně zestárlá. V případě, že je k dispozici časová řada měření ztrátového

činitele, lze tuto řadu převést na řadu změn ztrátového činitele a z vhodně odhadnuté trendové složky potom predikovat velikost změny ztrátového činitele v libovolném budoucím čase.

### IZOLAČNÍ ODPOR $R_{60}$

Měření izolačního odporu  $R_{60}$  je jedna z metod sloužících k ověřování stavu izolačního systému elektrických strojů. Měří se proud protékajícího izolací při určitém přiloženém stejnosměrném napětí a odpor se pak spočítá pomocí Ohmova zákona. Podobně jako ztrátový činitel se měří při několika možných zapojení měřících přístrojů.

Stejně jako u ztrátového činitele je v [3] uvedena kritická hodnota změny izolačního odporu, v tomto případě se jedná o hodnotu 0,5. Změna izolačního odporu v čase  $t_i$   $\Delta R_{60t_i}$  se spočítá podle vztahu:

$$\Delta R_{60t_i} = \frac{R_{60t_{i-1}} - R_{60t_i}}{R_{60t_{i-1}}},$$

kde  $R_{t_i}$  je hodnota izolačního odporu v čase  $t_i$  a  $R_{t_{i-1}}$  je hodnota izolačního odporu v čase  $t_{i-1}$ . Výše uvedený vztah se od vztahu uvedeného u ztrátového činitele ideově liší pouze v čitateli zlomku, kde jsou prohozeny izolační odpory v jednotlivých časech. Je to dáno skutečností, že na rozdíl od ztrátového činitele hodnota izolačního odporu s rostoucím časem klesá. Pokud hodnota  $\Delta R_{t_i}$  překročí hodnotu 0,5, lze usuzovat, že hrozí vážná porucha transformátoru. V případě, že je k dispozici časová řada měření izolačního odporu, lze podobně jako u ztrátového činitele tuto řadu převést na řadu změn izolačního odporu a z vhodně odhadnuté trendové složky potom predikovat velikost změny izolačního odporu v libovolném budoucím čase. Více informací o všech diagnostických postupech doplňujících DGA metody lze nalézt v [14].

## 1.4 DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Jedním z cílů předkládané disertační práce je navrhnout spolehlivostní modul diagnostického systému pro výkonové olejové transformátory. Tento diagnostický systém je vyvíjen na školícím pracovišti Fakulty strojního inženýrství na VUT v Brně, má podobu expertního systému a jeho strukturu lze nalézt například v [17]. Podle [6] je expertní systém jednou z praktických aplikací metod umělé inteligence a je založen na implementaci znalostí z řešené problematiky do programu tak, aby expertní systém mohl tyto znalosti využívat podobně jako odborníci v dané oblasti.

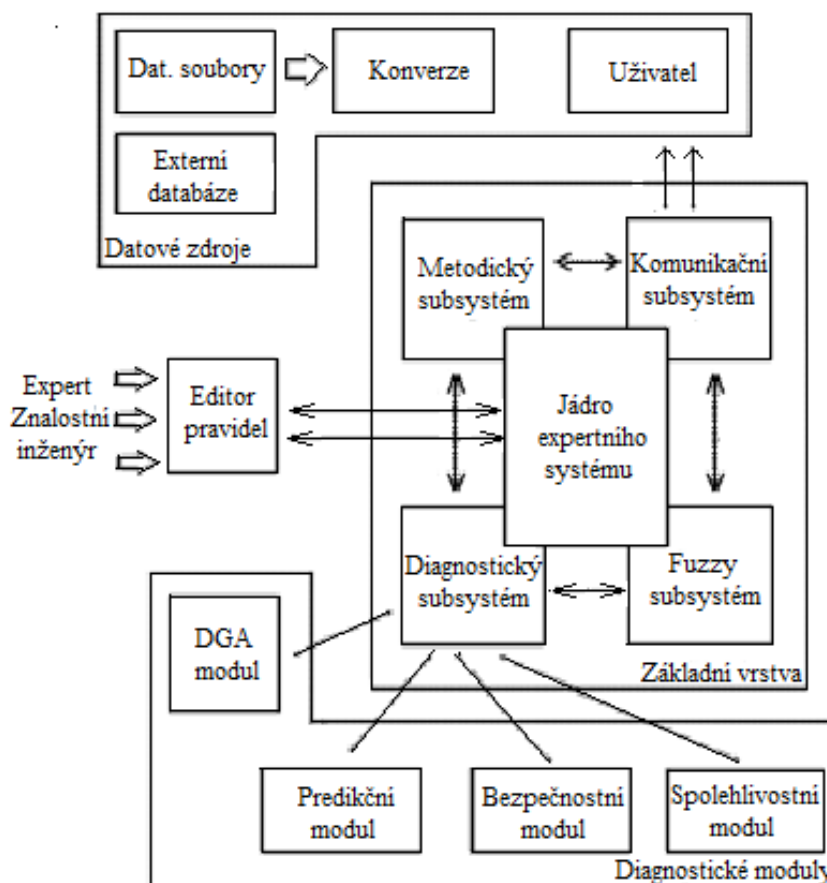
Schéma vyvíjeného diagnostického systému je zachyceno na Obr. 10, z něhož je patrné, že všechny části systému lze rozdělit do tří základních skupin, kterými jsou:

- **základní vrstva,**
- **datové zdroje,**
- **diagnostické moduly.**

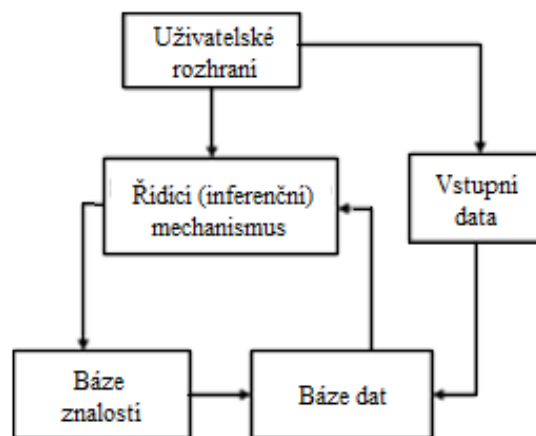
Základní vrstva se skládá z pěti subsystémů, jedná se o:

- **jádro expertního systému** - je zachyceno na Obr. 11 a obsahuje všechny základní stavební prvky expertního systému:
  - **bázi znalostí** - je to soubor explicitně vyjádřených znalostí experta, který musí být přehledný a musí v něm být vytvořena hierarchie obsažených pojmů,

- **bázi dat** - jsou v ní uložena data týkající se problematiky, kterou expertní systém řeší, data poskytuje uživatel,
  - **inferenční mechanismus** - jedná se o výkonnou část expertního systému, která využívá dostupné znalosti, získává potřebná data a poskytuje odpovídající závěry, většinou ho tvoří techniky prohledávání stavového prostoru,
  - **uživatelské rozhraní** - zprostředkovává komunikaci mezi expertním systémem a uživatelem, která probíhá vkládáním dat v dialogovém režimu, načítáním dat z datového souboru nebo ze vstupního formuláře, zajišťuje spouštění a ukončení systému, dialog během odvozování a obsluhu příkazů uživatele,
- **komunikační subsystém** - zprostředkovává spojení mezi datovými zdroji a zbytkem systému, obsahuje metody a prostředky pro komunikaci s databázemi, konverzi různých typů souborů a například tvorbu časových řad využívaných jinými moduly systému,
  - **metodický subsystém** - jedná se o základnu metodik využívaných v jiných částech diagnostického systému,
  - **fuzzy subsystém** - umožňuje příslušným odborníkům lingvisticky kódovat svoje znalosti do formy pravidel,
  - **diagnostický subsystém** - obsahuje moduly zastupující různé možnosti a pohledy na diagnostiku výkonových olejových transformátorů. Mezi ně patří také spolehlivostní modul, jehož návrh je jedním z cílů této disertační práce.



Obr. 10 Schéma vyvíjeného diagnostického systému [17]



*Obr. 11 Jádro expertního systému [17]*

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

### 2.1 POPIS DATOVÉHO SOUBORU

Pro potřeby vývoje a testování neinvazivních metod rozboru odhadované spolehlivosti byla vytvořena databáze obsahující diagnostická měření deseti výkonových olejových transformátorů. Tvoří ji sedm transformátorů pracujících v různých vodních elektrárnách a tři transformátory umístěné v jedné uhelné elektrárně. Všechny zmíněné elektrárny se nachází na území České republiky. Informace obsažené v databázi byly získány ze dvou zdrojů:

- **fotografie papírových protokolů z diagnostických zkoušek** – jsou zdrojem informací o diagnostických měření starších transformátorů umístěných především v této práci zkoumaných vodních elektrárnách. Na Obr. 13 je zachycen příklad takového papírového protokolu. Protože dříve nebyla spolehlivost výkonových olejových transformátorů v popředí zájmu, informace získané touto cestou jsou zatíženy velkým počtem chyb, nepřesností a nejsou úplné. Spousta údajů v protokolech chybí.
- **data v digitální podobě** – jsou zdrojem informací o diagnostických měřeních transformátorů, které jsou v provozu kratší dobu. V této práci poskytují údaje především o transformátorech z uhelné elektrárny. V posledních letech se dostala problematika spolehlivosti těchto netočivých elektrických strojů do popředí zájmu jejich provozovatelů, informace získané touto cestou tak mají větší vypovídající hodnotu než informace získané z papírových protokolů. Příklad takového digitálního protokolu zachycuje Obr. 12.

	A	D	E
1			
2	Místo odběru	Nádoba stroje	Nádoba stroje
3	Teplota oleje při odběru	44	41
4	Izolační kapalina	minerální izolační olej	minerální izolační olej
5	Datum odběru vzorku		
6	Doba provozu	38.9	39.4
7	Datum příjmu vzorku	13.11.2006	9.5.2007
8	Analýza provedena	13.11.2006	10.5.2007
9	Teplota okolí v laboratoři		
10	Absolutní atmosferický tlak v laboratoři		
11	Metoda extrakce	metoda částečné evakuace	metoda částečné evakuace
12			
13	Vodík [ul / l]	0.9	0
14	Oxid uhelnatý [ul / l]	760	670
15	Metan [ul / l]	10	7.3
16	Étan [ul / l]	2.1	1.4
17	Etylen [ul / l]	2	0.7
18	Acetylen [ul / l]	0.1	0
19	Propan, propen [ul / l]	0	0
20	1-Buten [ul / l]	0	0
21	Dusík [ul / l]	23000	21000
22	Kyslík [ul / l]	3900	3300

Obr. 12 Data v digitální podobě

**Plynově-chromatografická analýza plynů  
rozpuštěných v oleji**  
metoda vícenásobné extrakce Toeplerovou vývěvou

Protokol o měření: 22/2004-O  
Datum odběru vzorku: 09.01.2004  
Místo odběru: Nádoba stroje, dole  
Teplota oleje při odběru: 34°C / 21°C - horní / dolní vrstva oleje  
Datum příjmu vzorku: 12.01.2004  
Analýza provedena: 12.01.2004

Podmínky při měření v laboratoři:  
Teplota: 23°C Absolutní atmosférický tlak: 984 hPa

Detekovaný plyn	Jednotka	Koncentrace	Detekovaný plyn	Jednotka	Koncentrace
Vodík	μl/l	77,2	Propan, propen	μl/l	6,1
Oxid uhelnatý	μl/l	218,7	i-Buten	μl/l	29,3
Metan	μl/l	10,0	Dusík	μl/l	55 902,0
Etan	μl/l	3,7	Kyslík	μl/l	19 252,5
Etylen	μl/l	20,3	Oxid uhličitý	μl/l	2 065,1
Acetylen	μl/l	6,8			
Součet uhlovodíků	μl/l	40,8	Q <sub>p</sub>	% obj.	8,25

ND - plyn nedetekován.

Plynově-chromatografická analýza provedena dle ČSN EN 60567, ČSN EN 61181.  
Celkový obsah plynů rozpuštěných v oleji stanoven dle ČSN EN 60567.

Poměr plynů	Hodnota
Acetylen/Etylen	0,33
Etylen/Etan	—
Metan/Vodík	—
Etan/Metan	—
Oxid uhličitý/Oxid uhelnatý	9,44
Dusík/Kyslík	2,90

Obr. 13 Papírový protokol o diagnostickém měření

Oba zdroje informací byly použity k vytvoření výše zmíněné databáze, jejíž část je vidět na Obr. 14. Měření jednotlivých diagnostických veličin jsou zde uložena ve formě časových řad, jejichž časovým indexem je doba provozu v čase každého měření. U každého transformátoru je zobrazen také jeho štítek, který udává typ stroje, výrobce, rok výroby, počet vinutí, převod, typ transformace, výkon, olej, napětí nakrátko a hmotnost oleje. Souhrn řešených výkonových olejových transformátorů je zachycen v Tab. 15, kde je vidět, že tři transformátory byly již odstaveny z provozu. Podle protokolů z diagnostických šetření byl důvodem odstavení ve všech třech případech špatný stav stroje a vzrůstající obava obsluhujícího personálu z fatální poruchy, která by zapříčinila celkovou destrukci transformátoru. Nedostatky vytvořené databáze jsou shrnuty v následujících bodech:

- **neúplné údaje** - chybí měření z nějaké etapy provozu transformátoru,
- **různé časové intervaly** - měření se neprovádí ve stejných časových intervalech,
- **malý počet měření** - malý rozsah dat pro matematické zpracování.
- **chyby měření** - chyby způsobené lidským faktorem, nepřesností měřicích přístrojů apod.

	A	B	C	D	E	F	G	AC	AD	AE
1	Název			Technické údaje						
2	ESL T1			Typ		75.5T160/147.5				
3	Výrobní číslo		178156	Výrobce		ČKD Praha				
4	plynová chromatografie (pch)			Rok výroby		1954				
5	elektrické měření (em)			Počet vinutí		2				
6	analýza oleje (ao)			Převod		110/10.5 kV				
7	průměrný polymerizační stupeň (pps)			Typ transformace		VVN/VN				
8	nešlo zkontrolovat (nz)			Výkon		63000 kVA				
9				Olej		BTSi				
10				Napětí nakrátko		10.3%				
11				Hmotnost oleje		24 t				
12								hustota	směr. odch.	var. koef.
13	Číslo protokolu	Číslo 1. fotky	Typ měření	Datum měření Datum odběru		Doba provozu	Datum analýzy	$\rho_v$ [kg m <sup>3</sup> ]	$s$ [kV]	$V$ [%]
83	64/3-97	P1010082	ao	03.03.1997	43.2	43	03.03.1997		0.9	1.11
84	87/3-97	P1010084	ao	05.03.1997	43.21	43	11.3.1997		13.5	23.56
85	86/3-97	P1010083	ao	05.03.1997	43.22	43	11.3.-24.3.1997	0.865	6	7.86
86	0019/97T	P1010085	em	05.03.1997	43.23	43	5.3.1997			
87	248/97-O	P1010078	ao.pch	21.04.1997	43.3	43	24.04.1997		5.8	7.3
88	555/97-O	P1010073	ao.pch	07.08.1997	43.7	43	7.8.1997		7.5	13.0
89	89/3-98	P1010071	ao	26.03.1998	44.2	44	30.3.-9.4.1998	0.871	4.3	5.48

Obr. 14 Vytvořená databáze výkonových olejových transformátorů

Tab. 15 Seznam transformátorů obsažených v databázi

Elektrárna	Označení	Rok výroby	Rok ukončení provozu	Počet vinutí
Elektrárna 1	Transformátor 1	1954	2008	2
	Transformátor 2	1953	2008	2
	Transformátor 3	1956	2008	2
Elektrárna 2	Transformátor 4	1978	stále v provozu	3
	Transformátor 5	1978	stále v provozu	3
Elektrárna 3	Transformátor 6	1993	stále v provozu	2
	Transformátor 7	1993	stále v provozu	2
Elektrárna 4	Transformátor 8	1969	stále v provozu	2
	Transformátor 9	1969	stále v provozu	2
	Transformátor 10	1969	stále v provozu	2

Elektrárna 1, Elektrárna 2 a Elektrárna 3 představují 3 různé vodní elektrárny a Elektrárna 4 představuje uhelnou elektrárnu (označení elektráren a transformátorů bylo takto zvoleno z důvodu ochrany dat). Na základě rozdělení transformátorů uvedeném v kapitole 1.2 předkládané disertační práce lze označit všechny zkoumané transformátory jako trojfázové transformátory určené pro přenos energie s olejovým chlazením a se dvěma nebo třemi vinutími.

## 2.2 ANALÝZA ČASOVÝCH ŘAD VYBRANÝCH DIAGNOSTICKÝCH VELIČIN

V praktické části práce budou navrženy neinvazivní postupy pro rozbor odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů, které jsou založeny na teorii týkající se časových řad. Tato teorie je popsána v **Příloha 2 - Teorie časových řad**. Navržené postupy

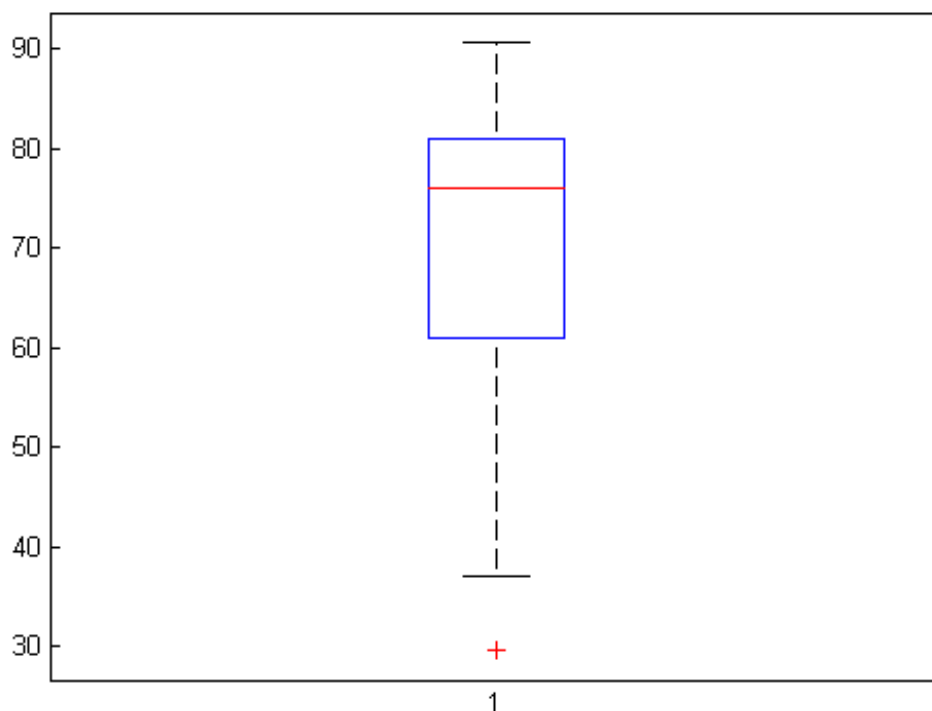
nevyužívají všechny diagnostické veličiny měřené u výkonových olejových transformátorů, vychází pouze z následujících veličin:

- **metan** -  $\text{CH}_4$ ,
- **acetylen** -  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,
- **etylen** -  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,
- **vodík** -  $\text{H}_2$ ,
- **etan** -  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,
- **oxid uhelnatý** -  $\text{CO}$ ,
- **oxid uhličitý** -  $\text{CO}_2$ ,
- **kyslík** -  $\text{O}_2$ ,
- **dusík** -  $\text{N}_2$ ,
- **obsah vody v izolačním oleji** -  $Q_V$ ,
- **číslo kyselosti** -  $\text{ČK}$ ,
- **průrazné napětí** -  $U_P$ ,
- **povrchové napětí** -  $\sigma$ ,
- **ztrátový činitel oleje při 70 °C** -  $\text{tg } \delta_{70}$ ,
- **vnitřní rezistivita oleje při 70 °C** -  $\rho_{70}$ ,
- **ztrátový činitel při zapojení V:x** -  $\text{tg } \delta \text{ V:x}$ ,
- **ztrátový činitel při zapojení N:x** -  $\text{tg } \delta \text{ N:x}$ ,
- **izolační odpor při zapojení V:x** -  $R_{60} \text{ V:x}$ ,
- **izolační odpor při zapojení N:x** -  $R_{60} \text{ N:x}$ ,

kde x u veličin určujících stav izolace vinutí značí zbylá vinutí a kostru. V:x tedy znamená u dvouvinutových transformátorů V:N+K a u třívinutových transformátorů V:N+S+K. Následující text bude věnován analýze časových řad výše uvedených diagnostických veličin.

### 2.2.1 ODSTRANĚNÍ ODLEHLÝCH HODNOT

V prvním kroku analýzy výše zmíněných časových řad bylo pomocí krabicových grafů provedeno odstranění odlehlých hodnot. Příklad krabicového grafu pro časovou řadu průrazného napětí  $U_p$  u Transformátoru 1 je zachycen na Obr. 15. Červený bod mimo oblast grafu značí právě odlehlou hodnotu  $U_p = 30 \text{ kV}/2,5\text{mm}$ . Krabicové grafy řešených časových řad diagnostických veličin měřených u zkoumaných výkonových olejových transformátorů jsou obsaženy v **Příloha 1 - Krabicové grafy**.



Obr. 15 Krabicový graf veličiny  $U_p$  Transformátoru 1

Tab. 16 zachycuje rozsahy časových řad před a po odstranění odlehlých hodnot u transformátorů pracujících v Elektrárně 1. N značí rozsah časové řady před odstraněním odlehlých hodnot a  $N_0$  rozsah po odstranění odlehlých hodnot. Tabulky pro transformátory pracující v ostatních elektrárnách lze nalézt v **Příloha 2 - Odstranění odlehlých hodnot**. Ze získaných výsledků je patrné, že více odlehlých hodnot bylo odstraněno u řad transformátorů pracujících ve vodních elektrárnách. Je to dáno charakterem dat, které vznikly přepisováním papírových protokolů a vyskytovaly se u nich časté chyby v jednotkách jednotlivých veličin nebo překlepy. Protože většina těchto protokolů již není dále k dispozici, nebylo možné tyto chyby opravit a chybná měření se musela z další analýzy vyřadit. Nejvíce bylo odstraněno 7 odlehlých hodnot a to u veličiny  $Q_V$  Transformátoru 1. U transformátorů pracujících v Elektrárně 4 byly odstraněny maximálně tři odlehlé hodnoty. Jednalo se však pouze o výjimečné situace, většinou se mimo krabicový graf vyskytovala jedna nebo žádná hodnota. Opět je důvodem charakter dat, která byla v tomto případě získána již v digitální podobě. Je zřejmé, že nejrozsáhlejší časové řady poskytují transformátory z Elektrárny 2, naopak u transformátorů z Elektrárny 3 a Elektrárny 1 jsou řady některých veličin příliš krátké, což může ovlivnit výsledky dalších analýz. Tato skutečnost se pak musí zohlednit při jejich prezentování.

Tab. 16 Rozsahy časových řad diagnostických veličin transformátorů z Elektrárny 1

Veličina	Transformátor 1		Transformátor 2		Transformátor 3	
	N	No	N	No	N	No
CH <sub>4</sub> [μl/l]	14	12	4	4	10	9
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> [μl/l]	13	13	4	4	10	10
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [μl/l]	11	11	4	4	10	9
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> [μl/l]	8	8	4	4	9	9
H <sub>2</sub> [μl/l]	12	11	4	4	10	10
CO <sub>2</sub> [μl/l]	14	14	4	4	10	10
CO [μl/l]	14	13	4	4	9	9
O <sub>2</sub> [μl/l]	13	13	4	4	10	8
N <sub>2</sub> [μl/l]	13	13	4	4	10	10
V:N+K R <sub>60</sub> [MΩ]	19	19	15	13	14	14
V:N+K tg δ [%]	19	18	9	8	14	12
N:V+K R <sub>60</sub> [MΩ]	18	16	17	15	14	14
N:V+K tg δ [%]	18	16	10	9	13	14
U <sub>p</sub> [kV/2,5mm]	33	32	15	13	20	16
ČK [mgKOH/g]	29	24	10	10	20	20
tg δ <sub>70</sub> [-]	18	23	10	10	20	17
ρ <sub>70</sub> [Ωcm 10 <sup>12</sup> ]	20	23	9	9	19	19
σ [N/m]	26	28	8	7	19	18
Q <sub>v</sub> [g/t]	68	61	17	17	22	22

### 2.2.2 ODHADY VYBRANÝCH MOMENTOVÝCH FUNKCÍ

Po vyřazení odlehlých hodnot byly u časových řad odhadnuty momentové charakteristiky:

- střední hodnota,
- rozptyl,
- směrodatná odchylka.

Výsledky pro transformátory umístěné v Elektrárně 1 a Elektrárně 4 jsou zaznamenány v následujících tabulkách, kde Tab. 17 zachycuje veličiny charakterizující stav olejové náplně, Tab. 18 veličiny určující stav izolace vinutí a Tab. 19 plyny rozpuštěné v izolačním oleji transformátorů. Výsledky pro transformátory pracující v Elektrárně 2 a Elektrárně 3 lze nalézt v **Příloha 3 - Odhady vybraných momentových funkcí**. Je zřejmé, že výsledky zaznamenané ve zmíněné příloze plně korespondují s výsledky uvedenými v souvislosti s Elektrárnou 1 a Elektrárnou 4.

Tab. 17 Odhady momentových funkcí pro veličiny charakterizující stav olejové náplně u transformátorů pracujících v Elektrárně 1 a Elektrárně 4

Veličina	Střední hodnota	Rozptyl	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Rozptyl	Směrodatná odchylka
	Transformátor 1			Transformátor 8		
$U_p$ [kV/2,5mm]	71,90	178,83	13,37	86,24	58,93	7,68
ČK [mgKOH/g]	0,03	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00
$\text{tg } \delta_{70}$ [-]	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
$\rho_{70}$ [ $\Omega\text{cm } 10^{12}$ ]	2,77	2,94	1,71	255,56	8513,60	92,27
$\sigma$ [N/m]	0,04	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
$Q_v$ [g/t]	17,03	49,13	7,01	4,61	4,46	2,11
	Transformátor 2			Transformátor 9		
$U_p$ [kV/2,5mm]	73,10	133,90	11,57	90,77	12,91	3,59
ČK [mgKOH/g]	0,07	0,00	0,04	0,03	0,00	0,01
$\text{tg } \delta_{70}$ [-]	0,06	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00
$\rho_{70}$ [ $\Omega\text{cm } 10^{12}$ ]	0,78	0,16	0,40	262,44	13097,00	114,44
$\sigma$ [N/m]	0,04	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
$Q_v$ [g/t]	19,09	110,77	10,52	5,50	2,63	1,62
	Transformátor 3			Transformátor 10		
$U_p$ [kV/2,5mm]	80,20	40,13	6,34	86,81	30,90	5,56
ČK [mgKOH/g]	0,04	0,00	0,04	0,03	0,00	0,00
$\text{tg } \delta_{70}$ [-]	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
$\rho_{70}$ [ $\Omega\text{cm } 10^{12}$ ]	13,12	195,21	13,97	147,50	4143,80	64,37
$\sigma$ [N/m]	0,04	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
$Q_v$ [g/t]	16,06	136,48	11,68	7,00	6,67	2,58

V Tab. 17 je vidět, že s výjimkou veličiny  $\rho_{70}$  jsou odhady momentových funkcí u všech zkoumaných transformátorů podobné.  $\rho_{70}$  má několikanásobně větší odhad rozptylu než ostatní veličiny charakterizující stav olejové náplně a u strojů umístěných v Elektrárně 4 je také odhad střední hodnoty této veličiny několikanásobně větší než u ostatních transformátorů. Oba zmíněné poznatky jsou způsobeny metodou měření této veličiny, která je zřejmě značně nepřesná a dává tak u zkoumaných strojů odlišné hodnoty.

U Transformátoru 1 a Transformátoru 2 má veličina  $U_p$  velký odhad rozptylu, což opět znamená značné rozdíly mezi jednotlivými měřeními. Odhad střední hodnoty této veličiny je však u všech transformátorů téměř stejný a pohybuje se okolo 80 kV/2,5mm. Číslo kyselosti a  $\text{tg } \delta_{70}$  má všude nulový odhad rozptylu, z čehož vyplývá, že se po celou dobu provozu všech zkoumaných transformátorů hodnoty těchto dvou veličin neměnily. Odhad střední hodnoty povrchového napětí u Transformátoru 5 vyšel nezvykle velký. Tato skutečnost je zřejmě způsobena několika odlehlými hodnotami, které krabicový graf neodhalil. Veličiny charakterizující stav olejové náplně tedy vykazují společné rysy pro všechny zkoumané transformátory, které jsou však provozovány rozdílně dlouho. Lze tedy usoudit, že na hodnoty tohoto druhu veličin nebude mít stáří výkonového olejového transformátoru zásadní vliv. Výsledky získané na základě těchto veličin tak zřejmě nemají význam pro posuzování spolehlivosti výkonových olejových transformátorů z hlediska jejich stárnutí. Nelze však usuzovat, že by se tyto veličiny neměly měřit. Jejich hodnoty totiž mohou ukazovat na poruchy způsobené jinými faktory než je stárnutí izolačního systému.

Podle Tab. 18 se odhady rozptylů izolačních odporů na rozdíl od ztrátového činitele vyznačují velkými hodnotami. Lze tedy usuzovat, že se izolační odpor během provozu transformátoru mění ve větší míře než hodnoty ztrátového činitele. U transformátorů v Elektrárně 3 a Elektrárně 4 je odhad rozptylu ztrátového činitele nulový. Důvodem může být skutečnost, že se jedná o transformátory, které jsou v porovnání s transformátory v Elektrárně 1 v provozu kratší dobu. U strojů, které se nenachází na pokraji své životnosti, se hodnoty ztrátového činitele příliš nemění. Odhady středních hodnot i rozptylů těchto veličin jsou u každého transformátoru podobné pro různá zapojení. Lze tak usuzovat, že hodnoty měření těchto veličin nezáleží na druhu zapojení měřících přístrojů. Odhady středních hodnot obou veličin jsou sice podobné pro zapojení, ale liší se pro každý zkoumaný stroj. Protože transformátory jsou v provozu různě dlouho, může být měření těchto veličin užitečné při posuzování jejich spolehlivosti z hlediska stárnutí.

Podle Tab. 19 má z uhlovodíků největší odhad rozptylu etylen pro všechny zkoumané transformátory. U oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého, kyslíku a dusíku vycházel odhad střední hodnoty i rozptylu mnohem vyšší než u ostatních plynů. Nejmenší odhad střední hodnoty vyšel pokaždé u acetyleny, největším odhadem střední hodnoty se ve všech případech vyznačoval dusík. Lze tedy říci, že obecně během provozu zkoumaných transformátorů vznikal nejméně acetylen a naopak nejvíce se vyvíjel dusík.

Tab. 18 Odhady momentových funkcí pro veličiny určující stav izolace vinutí u transformátorů v Elektrárně 1 a Elektrárně 4

Veličina	Střední hodnota	Rozptyl	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Rozptyl	Směrodatná odchylka
	Transformátor 1			Transformátor 8		
V:N+K $R_{60}$ [M $\Omega$ ]	1167,60	543540	737,25	9603,10	16237000	4029,50
V:N+K tg $\delta$ [%]	0,68	0,20	0,45	0,18	0	0,01
N:V+K $R_{60}$ [M $\Omega$ ]	571,06	111990	334,65	12614	30495000	5522,30
N:V+K tg $\delta$ [%]	0,59	0,08	0,28	0,18	0	0,02
	Transformátor 2			Transformátor 9		
V:N+K $R_{60}$ [M $\Omega$ ]	756,15	127070	356,47	7641,40	8248600	2872
V:N+K tg $\delta$ [%]	1,77	4,77	2,19	0,18	0	0,01
N:V+K $R_{60}$ [M $\Omega$ ]	147,47	18152	134,73	10082	15262000	3906,60
N:V+K tg $\delta$ [%]	1,22	1	1	0,19	0	0,01
	Transformátor 3			Transformátor 10		
V:N+K $R_{60}$ [M $\Omega$ ]	2075	1328500	1152,60	6390,30	6974700	2641
V:N+K tg $\delta$ [%]	0,35	0,03	0,17	0,18	0	0,01
N:V+K $R_{60}$ [M $\Omega$ ]	1033,60	358190,00	598,49	8145	11787000	3433,30
N:V+K tg $\delta$ [%]	0,38	0,06	0,25	0,22	0	0,02

Všechny zde zkoumané časové řady se dále budou předpokládat v aditivním dekompozičním modelu. V Příloha 2 - Teorie časových řad je zaveden model ADM, který analyzuje pouze řady s konstantním rozptylem. Je tedy nutné v dalším kroku provést stabilizaci rozptylu.

Tab. 19 Odhady momentových funkcí pro plyny rozpuštěné v izolačním oleji u transformátorů v Elektrárně 1 a Elektrárně 4

Veličina [μl/l]	Střední hodnota	Rozptyl	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Rozptyl	Směrodatná odchylka
	<b>Transformátor 1</b>			<b>Transformátor 8</b>		
CH <sub>4</sub>	4,31	16,97	4,12	8,19	5,79	2,41
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3,38	11,01	3,32	1,69	0,30	0,55
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	14,60	130,46	11,42	1,17	0,40	0,63
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2,78	4,24	2,06	0	0	0
H <sub>2</sub>	31,05	718,38	26,80	0,19	0,24	0,49
CO <sub>2</sub>	1348,20	1409100	1187	2768,80	500900	707,74
CO	100,18	19164	138,44	665,33	24265	155,77
O <sub>2</sub>	8054,10	26809000	5177,70	3361,10	1722400	1312,40
N <sub>2</sub>	30561,00	521670000	22840	22938	32434000	5695
	<b>Transformátor 2</b>			<b>Transformátor 9</b>		
CH <sub>4</sub>	6,03	6,62	2,57	10,76	24,74	4,97
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,80	0,46	0,67	2,48	1,22	1,10
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	20,28	125,28	11,19	1,66	0,66	0,82
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,45	0,44	0,67	0	0	0
H <sub>2</sub>	28,03	80,35	8,96	0	0	0
CO <sub>2</sub>	2206,20	1042400	1021	3235,30	599930	774,55
CO	223,60	16521	128,53	878,94	61336	247,66
O <sub>2</sub>	5740,40	7389300	2718,30	4011,10	1861000	1364,20
N <sub>2</sub>	38738	166240000	12893	26417	52951000	7276,80
	<b>Transformátor 3</b>			<b>Transformátor 10</b>		
CH <sub>4</sub>	6,60	8,41	2,90	15,96	41,80	6,47
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4,15	5,57	2,36	3,45	2,44	1,56
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	24,52	49,35	7,02	1,79	0,56	0,75
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2,76	5,09	2,26	0	0	0
H <sub>2</sub>	34,59	418,96	20,47	0,01	0	0,03
CO <sub>2</sub>	2407	1033100	1016,40	2929,40	555020	744,99
CO	366,70	49329	222,10	684,44	54291	233,01
O <sub>2</sub>	16945	4889000	2211,10	3211,80	1350400	1162,10
N <sub>2</sub>	52009	121830000	11038	23972,00	43902000	6625,90

### 2.2.3 STABILIZACE ROZPTYLU

Stabilizace rozptylu byla provedena podle teorie uvedené v **Příloha 2 - Teorie časových řad**. Výsledky pro Elektrárnu 1 a Elektrárnu 2 zachycuje Tab. 20, pro Elektrárnu 3 a Elektrárnu 4 jsou výsledky zachyceny v **Příloha 4 - Stabilizace rozptylu**. M značí v tabulce

mocninou, LN logaritmicou transformací a N symbolizuje skutečnost, že zkoumaná časová řada měla konstantní rozptyl a žádná transformace neproběhla.

Tab. 20 Výsledky stabilizace rozptylu časových řad diagnostických veličin měřených u transformátorů v Elektrárně 1 a Elektrárně 2

Veličina	Transformátor 1	Transformátor 2	Transformátor 3	Transformátor 4	Transformátor 5
CH <sub>4</sub> [μl/l]	LN	N	N	N	N
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> [μl/l]	N	N	N	N	M
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [μl/l]	N	N	N	N	N
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> [μl/l]	N	N	N	N	N
H <sub>2</sub> [μl/l]	N	N	N	M	N
CO <sub>2</sub> [μl/l]	N	N	LN	N	N
CO [μl/l]	N	N	M	N	N
O <sub>2</sub> [μl/l]	N	N	N	N	LN
N <sub>2</sub> [μl/l]	N	N	N	N	N
V:N+K R <sub>60</sub> [MΩ]	N	N	N	N	N
V:N+K tg δ [%]	N	LN	LN	N	N
N:V+K R <sub>60</sub> [MΩ]	N	N	N	N	N
N:V+K tg δ [%]	N	N	N	N	LN
U <sub>p</sub> [kV/2,5mm]	N	N	N	N	N
ČK [mgKOH/g]	N	N	N	N	N
tg δ <sub>70</sub> [-]	N	N	N	LN	N
ρ <sub>70</sub> [Ωcm 10 <sup>12</sup> ]	N	N	N	N	N
σ [N/m]	N	N	N	N	M
Q <sub>v</sub> [g/t]	N	N	N	N	N

Z Tab. 20 je vidět, že většina zkoumaných časových řad diagnostických veličin měla konstantní rozptyl. Transformace byla prováděna jen v ojedinělých případech. Nebyly odhaleny žádné společné charakteristické rysy spojené s analýzou konstantnosti rozptylu. Neexistovala veličina, která by se vyznačovala nekonstantním rozptylem a musela by se tak transformovat u všech testovaných výkonových olejových transformátorů.

#### 2.2.4 IDENTIFIKACE PERIODICKÝCH KOMPONENT

Po stabilizaci rozptylu byla provedena identifikace periodických komponent zde zkoumaných časových řad. Opět se postupovalo podle teorie uvedené v **Příloha 2 - Teorie časových řad**. Výsledky této analýzy jsou pro transformátory pracující v Elektrárně 1 zaznamenány v Tab. 21. Tabulky týkající se ostatních zkoumaných transformátorů lze nalézt v **Příloha 5 - Identifikace periodických komponent**. V tabulkách je vždy uvedeno číslo, které značí počet opakování periody obsažené v řadě. Například číslo 2 u řady C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> představuje dvě opakování periody, což znamená, že řada má periodu o délce právě jedné poloviny z rozsahu této řady. Symbol x zastupuje situaci, kdy nešlo identifikaci periodických komponent provést. Důvodem byl příliš malý rozsah časových řad. K vytvoření periodogramu

je totiž nutné, aby zkoumaná řada měla minimálně 11 pozorování. 1-by-0 je zápis užívaný softwarem Matlab pro prázdnou matici, která v tomto případě odpovídá nulové periodě. Je tedy zřejmé, že pro případy prázdné matice a 1 řady nevykazovaly žádnou periodickou komponentu.

Tab. 21 Výsledky identifikace periodických komponent časových řad diagnostických veličin měřených u transformátorů v Elektrárně 1

Veličina	Transformátor 1		Transformátor 2		Transformátor 3	
	Fisherův test	Sieglův test	Fisherův test	Sieglův test	Fisherův test	Sieglův test
CH <sub>4</sub> [μl/l]	1-by-0	1-by-0	x	x	x	x
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> [μl/l]	2	2	x	x	x	x
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [μl/l]	1-by-0	1-by-0	x	x	x	x
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> [μl/l]	x	x	x	x	x	x
H <sub>2</sub> [μl/l]	1-by-0	1-by-0	x	x	x	x
CO <sub>2</sub> [μl/l]	1-by-0	1-by-0	x	x	x	x
CO [μl/l]	1-by-0	1-by-0	x	x	x	x
O <sub>2</sub> [μl/l]	4	4	x	x	x	x
N <sub>2</sub> [μl/l]	1-by-0	1-by-0	x	x	x	x
V:N+K R <sub>60</sub> [MΩ]	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0
V:N+K tg δ [%]	1-by-0	1-by-0	x	x	1-by-0	1-by-0
N:V+K R <sub>60</sub> [MΩ]	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0
N:V+K tg δ [%]	1-by-0	1-by-0	x	x	1-by-0	1-by-0
U <sub>p</sub> [kV/2,5mm]	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0	1-by-0
ČK [mgKOH/g]	2	2	x	x	1-by-0	1-by-0
tg δ <sub>70</sub> [-]	1-by-0	1-by-0	x	x	1-by-0	1-by-0
ρ <sub>70</sub> [Ωcm 10 <sup>12</sup> ]	1	1	x	x	1	1
σ [N/m]	1-by-0	1-by-0	x	x	1-by-0	1-by-0
Q <sub>v</sub> [g/t]	3	3	1-by-0	1-by-0	1	1

Podle získaných výsledků lze usuzovat, že obecně časové řady diagnostických veličin měřených u výkonových olejových transformátorů neobsahují periodickou složku. Periodická složka byla podle Fisherova a Sieglůva testu významná jen v ojedinělých případech, které lze dále zanedbat. Vytvořené periodogramy jednotlivých časových řad je možné nalézt v **Příloha 6 - Periodogramy**. Předpoklad absence periodické složky je velice důležitý pro postup predikce poruch založený právě na teorii časových řad, který bude uveden v jedné z následujících kapitol této práce.

### 2.2.5 ZJEDNODUŠENÝ ADITIVNÍ DEKOMPOZIČNÍ MODEL

V předchozí kapitole bylo ukázáno, že časové řady diagnostických veličin měřených u výkonových olejových transformátorů většinou nemají žádnou periodickou komponentu. Na základě tohoto předpokladu budou časové řady dále uvažovány pouze v tzv. zjednodušeném aditivním dekompozičním modelu, který má tvar

$$Y_t = Tr_t + E_t,$$

kde  $Tr_t$  představuje dlouhodobý trend a  $E_t$  náhodnou složku. Na rozdíl od klasického aditivního dekompozičního modelu prezentovaného v **Příloha 2 - Teorie časových řad** této disertační práce zde chybí celková periodická složka. Další text se tedy bude zabývat analýzou časových řad, které mají konstantní rozptyl a lze je modelovat pouze jako součet trendové a náhodné složky.

### 2.2.6 ODHAD TRENDOVÉ SLOŽKY ZKOUMANÝCH ČASOVÝCH ŘAD

Trendová složka zkoumaných časových řad byla s výjimkou metody malého trendu odhadována pomocí metod uvedených v **Příloha 2 - Teorie časových řad**. Metoda malého trendu předpokládá v každé periodě přibližně konstantní trend. V předchozím textu bylo ukázáno, že zkoumané časové řady neobsahují periodickou složku. Nemá smysl tedy zmíněnou metodu používat k analýze časových řad diagnostických veličin výkonových olejových transformátorů. Trendová složka zkoumaných řad byla tedy odhadována metodami:

- **Lineární regrese pro  $p = 1$**  – jednalo se o klasickou regresní přímku s rovnicí

$$Tr_t = b_1 t + b_2.$$

- **Exponenciální regresní model** – rovnice trendu byla v tomto případě tvaru

$$Tr_t = b_1 e^{b_2 t}.$$

- **Mocninný regresní model** – zde byl trend odhadován podle rovnice

$$Tr_t = b_1 t^{b_2}.$$

Protože platí

$$\ln(Tr_t) = \ln(b_1) + b_2 \ln(t),$$

odhadnou se koeficienty  $b_1$  a  $b_2$  po zlogaritmování rovnice mocninného trendu stejně jako v případě regresní přímky. U exponenciálního regresního modelu se postupuje zcela analogicky opět zlogaritmováním rovnice exponenciálního trendu.

- **Jádrové vyhlazování** – časová řada se nejdříve podrobila neparametrické regresi s gaussovským jádrem, které mělo optimalizovanou šířku vyhlazovacího okna. Výsledkem tohoto procesu byla nová časová řada, na kterou se použila parametrická lineární regrese, a to proložení polynomem druhého stupně:

$$Tr_t = b_1 t^2 + b_2 t + b_3.$$

- **Metoda klouzavých průměrů** – podle vhodně zvoleného okna se nejdříve spočítaly klouzavé průměry. Vznikla tak nová řada, na kterou se opět použila parametrická lineární regrese v podobě proložení polynomem druhého stupně:

$$Tr_t = b_1 t^2 + b_2 t + b_3.$$

Čísla  $b_1$ ,  $b_2$ , a  $b_3$  jsou odhady koeficientů  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  a  $\beta_3$  z rovnic trendů uvedených v **Příloha 2 - Teorie časových řad**. Je zřejmé, že pro každou metodu lze jednoduše odhadnout koeficient determinace  $R^2$ , který napovídá o přesnosti odhadu trendové složky.  $R^2$  pro jednotlivé trendy a Transformátor 1 zachycuje Tab. 22. Výsledky pro ostatní transformátory lze nalézt v **Příloha 7 - Koeficienty determinace**. Symbol x v tabulkách značí případ, kdy nebylo možné danou metodu pro odhad trendu použít.

Tab. 22 Koeficient determinace pro Transformátor 1

Diagnostická veličina	Mocninný trend	Lineární trend	Exponenciální trend	Jádrové vyhlazování	Kumulativní průměry
CH <sub>4</sub> [μl/l]	0,0034	0,1557	0,0987	0,6663	0,3425
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> [μl/l]	0,0029	0,1457	0,1626	0,7655	0,4689
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [μl/l]	0,1024	1,4083.10 <sup>-5</sup>	1,1951.10 <sup>-5</sup>	0,9503	0,1871
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> [μl/l]	0,2420	0,0316	0,0235	0,8976	0,8225
H <sub>2</sub> [μl/l]	0,2206	6,8829.10 <sup>-5</sup>	8,2833.10 <sup>-5</sup>	0,9598	0,2360
CO <sub>2</sub> [μl/l]	0,0032	0,0255	0,0214	1,0000	0,1990
CO [μl/l]	0,0200	0,1412	0,1409	0,9999	0,4766
O <sub>2</sub> [μl/l]	0,0298	0,0388	0,0384	1,0000	1,0000
N <sub>2</sub> [μl/l]	0,0786	0,0990	0,1288	1,0000	0,5161
V:N+K R <sub>60</sub> [MΩ]	0,3599	0,3512	0,3497	1,0000	0,5095
V:N+K tg δ [%]	0,6310	0,6556	0,7291	0,8450	0,8981
N:V+K R <sub>60</sub> [MΩ]	0,2643	0,1800	0,1647	1,0000	0,3985
N:V+K tg δ [%]	0,4292	0,4996	0,5180	0,5764	0,7557
U <sub>p</sub> [kV/2,5mm]	6,4878.10 <sup>-4</sup>	6,8619.10 <sup>-4</sup>	7,2030.10 <sup>-4</sup>	0,7407	0,2099
ČK [mgKOH/g]	0,0971	0,1254	0,1162	0,1627	0,1904
tg δ <sub>70</sub> [-]	0,2376	0,2568	0,2350	0,2820	0,4165
ρ <sub>70</sub> [Ωcm 10 <sup>12</sup> ]	0,7544	0,7399	0,7419	0,8511	0,8429
σ [N/m]	0,0545	0,0260	0,0247	0,3098	0,4364
Q <sub>v</sub> [g/t]	0,0974	0,1436	0,1454	0,8804	0,3086

Ze získaných výsledků vyplývá, že nejvhodnější metodou pro odhad trendu časových řad diagnostických veličin měřených u výkonových olejových transformátorů je neparametrická regresní metoda jádrového vyhlazování v kombinaci s následným proložením polynomem druhého stupně. Tento poznatek také dokazují následující tabulky.

Tab. 23 zaznamenává průměrný koeficient determinace pro jednotlivé transformátory bez ohledu na diagnostické veličiny a Tab. 24 naopak zachycuje průměrné hodnoty koeficientu determinace pro jednotlivé diagnostické veličiny bez ohledu na testované transformátory.

Kromě Transformátoru 8 vyšel průměrný koeficient determinace nejvyšší pro neparametrickou regresní metodu jádrového vyhlazování v kombinaci s následným proložením polynomem druhého stupně. Ze zbylých metod vynikala metoda kumulativních průměrů, průměrný koeficient determinace pro parametrické regresní metody vycházel ve všech třech případech téměř stejně malý.

S výjimkou veličin V:N+K tg δ, N:V+K tg δ, ČK a σ vyšel průměrný koeficient determinace nejvyšší pro neparametrickou regresní metodu jádrového vyhlazování

v kombinaci s následným proložením polynomem druhého stupně. Ze zbylých metod opět vynikala metoda kumulativních průměrů a průměrný koeficient determinace pro parametrické regresní metody vycházel podobně jako u Tab. 23.

Tab. 23 Průměrný koeficient determinace pro jednotlivé transformátory

Transformátor	Mocninný trend	Lineární trend	Exponenciální trend	Jádrové vyhlazování	Kumulativní průměry
Transformátor 1	0,1910	0,1903	0,1916	0,7836	0,4850
Transformátor 2	0,3869	0,3506	0,3700	0,8589	0,8520
Transformátor 3	0,3530	0,3025	0,2942	0,6970	0,5207
Transformátor 4	0,1179	0,1046	0,1104	0,5397	0,3433
Transformátor 5	0,1905	0,2100	0,2277	0,6842	0,4534
Transformátor 6	0,2181	0,2187	0,1986	0,5961	0,4631
Transformátor 7	0,1662	0,1568	0,1591	0,5928	0,3696
Transformátor 8	0,1940	0,1936	0,2256	0,5682	0,6251
Transformátor 9	0,1631	0,1781	0,1649	0,6754	0,4528
Transformátor 10	0,1548	0,1808	0,1659	0,6785	0,5359

Tab. 24 Průměrný koeficient determinace pro jednotlivé diagnostické veličiny

Diagnostická veličina	Mocninný trend	Lineární trend	Exponenciální trend	Jádrové vyhlazování	Kumulativní průměry
CH <sub>4</sub> [μl/l]	0,1380	0,1762	0,1634	0,6533	0,4093
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> [μl/l]	0,1252	0,1656	0,1709	0,6591	0,4686
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [μl/l]	0,1205	0,1104	0,1019	0,7385	0,4045
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> [μl/l]	0,3917	0,1749	0,2572	0,7265	0,4583
H <sub>2</sub> [μl/l]	0,2083	0,1993	0,1903	0,8226	0,4986
CO <sub>2</sub> [μl/l]	0,1391	0,1517	0,1472	0,8069	0,4407
CO [μl/l]	0,1766	0,1930	0,1918	0,8126	0,5297
O <sub>2</sub> [μl/l]	0,1750	0,1476	0,1313	0,8991	0,4554
N <sub>2</sub> [μl/l]	0,1555	0,2043	0,2053	1,0000	0,4983
V:N+K R <sub>60</sub> [MΩ]	0,2023	0,1962	0,1384	0,9599	0,3973
V:N+K tg δ [%]	0,2141	0,2178	0,2477	0,4269	0,5963
N:V+K R <sub>60</sub> [MΩ]	0,2283	0,2087	0,1955	0,8443	0,4004
N:V+K tg δ [%]	0,2838	0,3247	0,3629	0,5126	0,6382
U <sub>p</sub> [kV/2,5mm]	0,2225	0,2211	0,2221	0,8793	0,4644
ČK [mgKOH/g]	0,2317	0,2275	0,2376	0,3496	0,5855
tg δ <sub>70</sub> [-]	0,4263	0,3885	0,4020	0,6450	0,7201
ρ <sub>70</sub> [Ωcm 10 <sup>12</sup> ]	0,2998	0,2501	0,2531	0,8401	0,7433
σ [N/m]	0,1860	0,1865	0,1900	0,3492	0,5477
Q <sub>v</sub> [g/t]	0,1867	0,2053	0,2044	0,7516	0,4241

Podle získaných výsledků lze tedy usoudit, že nejpřesnější metodou pro odhad trendu časových řad diagnostických veličin měřených u výkonových olejových transformátorů je neparametrická regresní metoda jádrového vyhlazování spojená s následným proložením „vyhlazených bodů“ polynomem druhého stupně. Průměrný koeficient determinace v tomto případě výrazně převyšoval průměrné koeficienty determinace získané u ostatních metod a ve většině případů se pohyboval mezi 0,7 a 1. Odhady koeficientů  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  a  $\beta_3$  metodou jádrového vyhlazování jsou pro jednotlivé diagnostické veličiny a transformátory uvedeny v **Příloha 8 - Odhady koeficientů  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  a  $\beta_3$  polynomu druhého stupně u metody jádrové vyhlazování**. Odhadem koeficientu  $\beta_1$  je číslo  $b_1$ , koeficientu  $\beta_2$  číslo  $b_2$  a koeficientu  $\beta_3$  číslo  $b_3$ .

### 2.2.7 VYŠETŘENÍ CHYBOVÉ SLOŽKY ČASOVÝCH ŘAD DIAGNOSTICKÝCH VELIČIN

Zkoumané časové řady byly podle teorie uvedené v **Příloha 2 - Teorie časových řad** podrobeny pěti různým testům náhodnosti chybové složky. Výsledky této analýzy pro Transformátor 1 zachycuje Tab. 25. Výsledky pro ostatní zkoumané výkonové olejové transformátory lze nalézt v **Příloha 9 - Testy náhodnosti chybové složky**. Číslo 1 u jednotlivých testů představuje nezamítnutí hypotézy o náhodnosti chybové složky, číslo 0 naopak symbolizuje zamítnutí hypotézy o náhodnosti chybové složky a symbol x značí případ, kdy nešlo chybovou složku vyšetřit.

Tab. 25 Výsledky testování hypotézy o náhodnosti chybové složky pro Transformátor 1

Veličina	ZN	RK	KK	SK	MED
CH <sub>4</sub> [μl/l]	1	1	1	1	1
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> [μl/l]	1	1	1	1	1
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [μl/l]	1	1	1	1	1
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> [μl/l]	1	1	1	1	1
H <sub>2</sub> [μl/l]	0	1	1	1	1
CO <sub>2</sub> [μl/l]	1	1	1	1	1
CO [μl/l]	1	1	1	1	1
O <sub>2</sub> [μl/l]	1	1	1	1	1
N <sub>2</sub> [μl/l]	1	1	1	1	1
V:N+K R <sub>60</sub> [MΩ]	1	1	0	0	0
V:N+K tg δ [%]	1	1	1	1	1
N:V+K R <sub>60</sub> [MΩ]	1	1	1	1	1
N:V+K tg δ [%]	0	1	1	1	1
U <sub>p</sub> [kV/2,5mm]	1	1	1	1	1
ČK [mgKOH/g]	1	1	1	1	0
tg δ <sub>70</sub> [-]	1	1	1	1	1
ρ <sub>70</sub> [Ωcm 10 <sup>12</sup> ]	1	1	1	1	1
σ [N/m]	1	1	1	1	1
Q <sub>v</sub> [g/t]	1	0	1	1	1

Ve výše uvedených tabulkách jednoznačně převažuje číslo 1, číslo 0 se vyskytuje pouze ojediněle a neexistuje ani v jedné tabulce řádek, který tvoří pouze nuly. Lze tedy konstatovat, že chybová složka má náhodný charakter a modelování zkoumaných časových řad zjednodušeným ADM je tak zcela oprávněné a korektní.

## 2.3 NEINVAZIVNÍ POSTUPY PRO ROZBOR DVOUSTAVOVÉ ODHADOVANÉ SPOLEHLIVOSTI VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Postupy prezentované v této kapitole předpokládají pouze dva stavy, ve kterých se mohou výkonové olejové transformátory nacházet. Jedná se o poruchový stav, kdy stroj nepracuje a o bezporuchový stav, kdy stroj plní funkci, ke které je předurčen. V předkládané disertační práci budou navrženy čtyři následující neinvazivní metody pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti:

- **Obecná metoda vycházející z teorie časových řad,**
- **Metoda vycházející z teorie časových řad a DGA,**
- **Metoda distribučních funkcí,**
- **Spolehlivostní modely.**

### 2.3.1 OBECNÁ METODA VYCHÁZEJÍCÍ Z TEORIE ČASOVÝCH ŘAD

Tato metoda představuje první náhled na problematiku rozboru odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů. Vychází z analýzy zkoumaných časových řad, která byla prezentovaná v kapitole 2.2 předkládané disertační práce. V předcházejícím textu bylo dokázáno, že časové řady diagnostických veličin výkonových olejových transformátorů neobsahují periodickou složku. Časové řady jsou modelovány pomocí zjednodušeného ADM. V prvním kroku se odhadne trend časové řady a následně se určí, kdy tento odhadnutý trend překročí kritériální hodnotu sledované diagnostické veličiny. Kritériální hodnoty jednotlivých veličin jsou uvedeny v kapitole 1.3.3. V předcházející analýze se jako nejpřesnější metoda pro odhad trendu časových řad diagnostických veličin ukázala metoda jádrového vyhlazování v kombinaci s proložením polynomem druhého stupně. Z tohoto důvodu metoda používá pro odhad trendu zmíněnou metodu jádrového vyhlazování. Čas, kdy odhadnutý trend překročí kritériální hodnotu diagnostické veličiny  $V$ , se nazývá pravděpodobný rok dožití podle diagnostické veličiny  $V$  a dále se bude značit symbolem  $PRD_V$ . Pro kritériální hodnotu  $Kr_V$  diagnostické veličiny  $V$  se  $PRD_V$  spočítá podle vztahu:

$$PRD_V = \min(PRD_{V1}, PRD_{V2}),$$

kde

$$PRD_{V1} = \frac{-b_2 + \sqrt{D}}{2b_1},$$

$$PRD_{V2} = \frac{-b_2 - \sqrt{D}}{2b_1}$$

a

$$D = b_2^2 - 4b_1(b_3 - Kr_V).$$

Je zřejmé, že předešlé vztahy řeší kvadratickou rovnicí:

$$Kr_V = b_1 t^2 + b_2 t + b_3,$$

kde čísla  $b_1$ ,  $b_2$  a  $b_3$  jsou odhady koeficientů  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  a  $\beta_3$  metodou jádrového vyhlazování v kombinaci s následným proložením polynomem druhého stupně.

V případě, že jedno z čísel  $PRD_{V1}$  nebo  $PRD_{V2}$  je imaginární číslo, za  $PRD_V$  se považuje číslo neimaginární. Pro obě imaginární čísla  $PRD_{V1}$  a  $PRD_{V2}$  tento neinvazivní postup selhává a  $PRD_V$  nelze určit. Hodnoty čísel  $b_1$ ,  $b_2$  a  $b_3$  lze pro jednotlivé diagnostické veličiny a transformátory nalézt v **Příloha 8 - Odhady koeficientů  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  a  $\beta_3$  polynomu druhého stupně u metody jádrové vyhlazování**. Odhadem koeficientu  $\beta_1$  je číslo  $b_1$ , koeficientu  $\beta_2$  číslo  $b_2$  a koeficientu  $\beta_3$  číslo  $b_3$ .  $PRD_V$  pro Transformátor 1 a Transformátor 2 zachycuje Tab. 26. Výsledky pro ostatní zkoumané výkonové olejové transformátory lze nalézt v **Příloha 10 - Pravděpodobný rok dožití podle diagnostických veličin**. Symbol x zde značí skutečnost, že nešlo  $PRD_V$  pomocí této neinvazivní metody určit a zkratka im je vyhrazena pro imaginární kořeny výše uvedené kvadratické rovnice. Záporná čísla  $PRD_{V1}$  a  $PRD_{V2}$  se ve výpočtu  $PRD_V$  neuvažují.

Tab. 26 PRD podle jednotlivých veličin u Transformátoru 1 a Transformátoru 2

Veličina	Transformátor 1			Transformátor 2		
	PRD <sub>V1</sub>	PRD <sub>V2</sub>	PRD <sub>V</sub>	PRD <sub>V1</sub>	PRD <sub>V2</sub>	PRD <sub>V</sub>
CH <sub>4</sub> [μl/l]	im	im	x	im	im	x
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> [μl/l]	110,9225	-16,9665	<b>110,9225</b>	im	im	x
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [μl/l]	im	im	x	im	im	x
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> [μl/l]	im	im	x	im	im	x
H <sub>2</sub> [μl/l]	106,636	-18,0293	<b>106,636</b>	116,7036	-9,6488	<b>116,7036</b>
CO <sub>2</sub> [μl/l]	im	im	x	709,153	-602,098	<b>709,153</b>
CO [μl/l]	253,1694	-71,5795	<b>253,1694</b>	187,0476	-79,9928	<b>187,0476</b>
O <sub>2</sub> [μl/l]	x	x	x	x	x	x
N <sub>2</sub> [μl/l]	x	x	x	x	x	x
V:N+K R <sub>60</sub> [MΩ]	x	x	x	x	x	x
V:N+K tg δ [%]	92,1111	8,8654	<b>8,8654</b>	1,3510.10 <sup>21</sup>	0	<b>0</b>
N:V+K R <sub>60</sub> [MΩ]	x	x	x	x	x	x
N:V+K tg δ [%]	133,1909	-13,404	<b>133,1909</b>	48,3049	21,8352	<b>21,8352</b>
U <sub>p</sub> [kV/2,5mm]	im	im	x	-6,6665	59,8705	<b>59,8705</b>
ČK [mgKOH/g]	im	im	x	63,9288	30,0575	<b>30,0575</b>
tg δ <sub>70</sub> [-]	-22,0202	50,3509	<b>50,3509</b>	35,2296	31,372	<b>31,372</b>
ρ <sub>70</sub> [Ωcm 10 <sup>12</sup> ]	im	im	x	im	im	x
σ [N/m]	25,9034	52,2307	<b>25,9034</b>	28,2	-1381,2	<b>28,2</b>
Q <sub>v</sub> [g/t]	83,7584	28,2007	<b>28,2007</b>	71,235	29,6801	<b>29,6801</b>

Na základě zkušeností získaných z technické praxe se pravděpodobný rok dožití výkonových olejových transformátorů pohybuje v rozmezí 30 až 40 let. Podle výsledků získaných v rámci řešení předkládané disertační práce je zřejmé, že  $PRD_V$  se u některých diagnostických veličin nacházel přesně v uvedeném rozmezí nebo aspoň v jeho těsné blízkosti. Nicméně u většiny diagnostických veličin nabýval  $PRD_V$  nesmyslných hodnot. Jednalo se především o veličiny, kde  $PRD_V$  vycházel v podobě imaginárních čísel nebo v podobě záporných čísel. Některé  $PRD_V$  také vyšly nápadně velké jako například 876,7971 podle veličiny CO u Transformátoru 5 nebo naopak nápadně malé jako například 0 podle veličiny  $\text{tg } \delta$  v zapojení V:x u Transformátoru 2. Nebyla nalezena žádná shoda u zkoumaných transformátorů, která by určila nejvhodnější diagnostickou veličinu pro predikování pravděpodobného roku dožití výkonových olejových transformátorů. Je tedy nutné predikovat  $PRD_V$  pomocí všech dostupných diagnostických veličin a ze získaných výsledků potom stanovit korektní závěry. Korektní závěry je nutné vyvodit v kolektivu odborníků, kteří se diagnostikou výkonových olejových transformátorů zabývají. Tito odborníci mají dostatek informací o tom, na které poruchy jednotlivé diagnostické veličiny ukazují a jaké mohou mít tyto poruchy následky. Je zřejmé, že Obecná metoda vycházející z teorie časových řad skutečně zastupuje pouze prvotní náhled na vyhodnocení dat z off-line diagnostických měření výkonových olejových transformátorů a pro kvalitní rozbor spolehlivosti ji lze použít jen jako doplňující postup v kombinaci s dalšími neinvazivními metodami.

### 2.3.2 METODA VYCHÁZEJÍCÍ Z TEORIE ČASOVÝCH ŘAD A DGA

Podobně jako předcházející neinvazivní metoda rozboru dvoustavové odhadované spolehlivosti předpokládá také tato metoda časové řady diagnostických veličin ve zjednodušeném ADM. Metoda vycházející z teorie časových řad a DGA však neodhaduje pravděpodobný rok dožití výkonového olejového transformátoru, ale predikuje typ poruchy, která stroj postihne v daném budoucím čase. Rozlišují se typy poruchy definované v kapitole 1.3.3 této disertační práce. Jedná se o poruchy:

- **částečné výboje – PD,**
- **výboje nízké energie – D1,**
- **výboje vysoké energie – D2,**
- **tepelné chyby s teplotou pod 300°C – T1,**
- **tepelné chyby s teplotou v rozsahu 300-700°C – T2,**
- **tepelné chyby s teplotou nad 700°C – T3,**
- **normální stárnutí – NS,**
- **kombinace jiskření a tepelných poruch – DT.**

#### POSTUP PREDIKCE

Pro predikci typu poruchy výkonového olejového transformátoru je třeba určit nejen hodnotu diagnostické veličiny v budoucím časovém okamžiku (obecně v čase  $\tau$ ), ale také pravděpodobnost, s jakou se bude hodnota dané veličiny nacházet v daném intervalu ( $a; b$ ). V případě, že bude mít tento interval tvar ( $a; \infty$ ), jedná se o pravděpodobnost, že předpovídaná veličina překročí v čase  $\tau$  hodnotu  $a$ . Uvedené má zřejmě význam, pokud je třeba určit pravděpodobnost, s jakou veličina překročí svou kritériální hodnotu. Tyto úvahy potom vedou k určení nejpravděpodobnější poruchy, která se bude v transformátoru nacházet v čase  $\tau$ .

Při predikování se nejprve odhadne trendová složka zkoumané diagnostické veličiny. Bez újmny na obecnosti a pro lepší názornost předpokládejme, že se trend odhadne třeba metodou

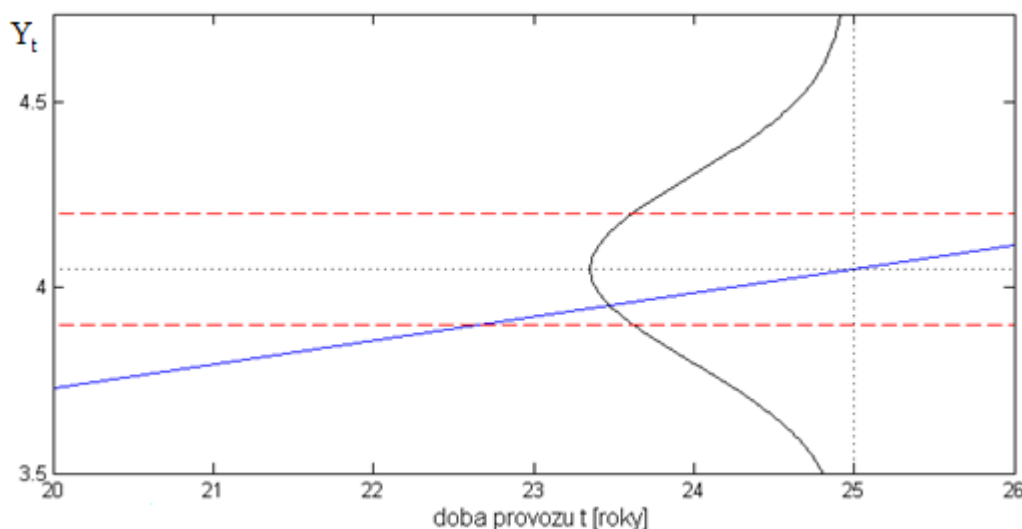
lineární regrese. V dalším kroku se od původní časové řady odečte trendová složka  $Tr_t$ . Protože jsou časové řady modelovány zjednodušeným ADM, zbude tak pouze chybová složka  $E_t$ . Ta se nyní vyšetří jako samostatná náhodná veličina  $E$ . Sestaví se její histogram a otestuje se, zda  $E$  může mít normální rozdělení pravděpodobnosti. Pro tyto účely slouží  $\chi^2$ -test dobré shody, který je možné nalézt například v [18]. Nulová hypotéza, že náhodná veličina  $E$  má normální rozdělení pravděpodobnosti o parametrech  $\mu$  a  $\sigma^2$  ( $E \sim N(\mu, \sigma^2)$ ), není zamítnuta na hladině významnosti testu  $\alpha = 0,05$ . Pro náhodnou veličinu  $E$  je tak známá hustota pravděpodobnosti:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

Parametry rozdělení  $\mu$ , resp.  $\sigma^2$  se odhadnou jako aritmetický průměr, resp. rozptyl chybové složky  $E_t$ . Pro další postup je žádoucí, aby  $E$  měla nulovou střední hodnotu. Pokud má náhodná veličina  $E$  normální rozdělení pravděpodobnosti, pak  $E(E) = \mu$ . Nulovou hypotézu, že  $\mu = 0$ , lze prověřit  $t$ -testem, o kterém se lze více dočíst například v [18]. Ten ji v žádném případě (vybrané diagnostické veličiny zkoumaných výkonových olejových transformátorů) nezamítl na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Především vztah tak lze zjednodušit na:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}.$$

Hodnota diagnostické veličiny v čase  $\tau$   $Y_\tau$  se předpoví dosazením  $\tau$  do funkčního předpisu pro trend. Je však patrné, že chybovou složku  $E_t$  určenou dekompozičním modelem nelze zanedbat. Zohlední se při výpočtu zmíněné pravděpodobnosti  $p(Y_\tau \in (a, b))$ , s jakou bude hodnota pozorování časové řady  $Y_t$  v čase  $\tau$  v intervalu  $(a, b)$ . Na Obr. 16 je znázorněn modře lineární trend časové řady, červeně meze intervalu  $(a, b)$ , černou přerušovanou čarou pak čas  $\tau$  s hodnotou  $Y_\tau$  a konečně černou plnou čarou schématicky hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení.

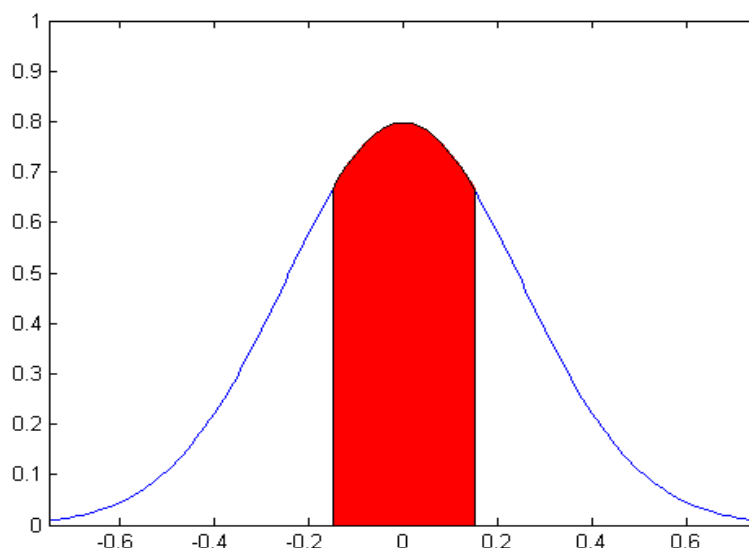


Obr. 16 Určování  $p(Y_\tau \in (a, b))$

Z uvedeného a z teorie matematické statistiky plyne, že

$$p(Y_\tau \in (a, b)) = \int_a^b \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{Y}_\tau)^2}{2\sigma^2}} dx.$$

Jedná se tedy o plochu pod křivkou hustoty pravděpodobnosti  $f(x)$  chybové složky  $E_t$ , kde  $\mu = Y_\tau$ , na daném intervalu. Situace je schematicky ilustrována na Obr. 17. Parametr  $\sigma$  se odhadne jako směrodatná odchylka chybové složky  $E_t$ .



Obr. 17 Znáznornění pravděpodobnosti  $p(Y_\tau \in (a, b))$

Pro jednoduchost bude v dalším textu ztotožněno označení jednotlivých diagnostických veličin s označením jejich časových řad, které vzniknou z diagnostických měření v průběhu provozu transformátoru. Uvedený způsob predikce pravděpodobnosti lze uplatnit v kombinaci se všemi DGA metodami uvedenými v kapitole 1.3.3 této disertační práce.

### PREDIKCE PRAVDĚPODOBNOСТИ PORUCHY PODLE METODY ČSN

Podle teorie popsané v kapitole 1.3.3 je nutné nejdříve určit pravděpodobnost inicializace metody v čase predikce  $\tau$ . Pro každý z plynů se stanoví pravděpodobnost, s jakou překročí svou danou mez v čase  $\tau$ . Postupně platí:

$$p_{1_\tau} = p(C_2H_{2_\tau} \in (m_{C_2H_2}, \infty)),$$

$$p_{2_\tau} = p(H_{2_\tau} \in (m_{H_2}, \infty)),$$

$$p_{3_\tau} = p(CH_{4_\tau} \in (m_{CH_4}, \infty)),$$

$$p_{4_\tau} = p(C_2H_{4_\tau} \in (m_{C_2H_4}, \infty)),$$

$$p_{5_\tau} = p(C_2H_{6_\tau} \in (m_{C_2H_6}, \infty)),$$

$$p_{6\tau} = p(CO_{\tau} \in (m_{CO}, \infty)),$$

$$p_{7\tau} = p(CO_{2\tau} \in (m_{CO_2}, \infty)),$$

kde  $m_{C_2H_2}$ ,  $m_{H_2}$ ,  $m_{CH_4}$ ,  $m_{C_2H_4}$ ,  $m_{C_2H_6}$ ,  $m_{CO}$  a  $m_{CO_2}$  jsou horní mezní hodnoty plynů uvedené v Tab. 7.

Následně se použije vztah pro výpočet pravděpodobnosti sjednocení  $n$  náhodných jevů  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , které nejsou neslučitelné:

$$\begin{aligned} p\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) &= \sum_{i=1}^n p(A_i) \\ &\quad - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n p(A_i \cap A_j) \\ &\quad + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n p(A_i \cap A_j \cap A_k) + \dots + (-1)^{n-1} p\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right). \end{aligned}$$

V dalším se předpokládá nezávislost jevů, že plyny překročí své mezní hodnoty. Po dosažení pravděpodobností  $p_1, p_2, \dots, p_7$  do předešlého vztahu se získá pravděpodobnost

$$p_{p\tau} = \sum_{i=1}^7 p_{i\tau} - \sum_{i=1}^6 \sum_{j=i+1}^7 p_{i\tau} p_{j\tau} + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i+1}^6 \sum_{k=j+1}^7 p_{i\tau} p_{j\tau} p_{k\tau} - \dots + \prod_{i=1}^7 p_{i\tau},$$

kde  $p_{p\tau}$  značí pravděpodobnost inicializace metody, tj. skutečnost, že alespoň jeden ze sledovaných plynů překročí svou mezní hodnotu.

K určení pravděpodobnosti, s jakou nastanou jednotlivé poruchy transformátoru v čase  $\tau$ , je nutné vyšetřovat poměry plynů

- $P_{1\tau}^{CSN}$  - jedná se o hodnotu poměru  $P_1^{CSN}$  v čase  $\tau$ ,
- $P_{2\tau}^{CSN}$  - jedná se o hodnotu poměru  $P_2^{CSN}$  v čase  $\tau$ ,
- $P_{3\tau}^{CSN}$  - jedná se o hodnotu poměru  $P_3^{CSN}$  v čase  $\tau$ .

Pravděpodobnosti jednotlivých poruch se pak určí podle následujících vztahů, které vychází z údajů uvedených v Tab. 8.

Pravděpodobnost výskytu poruchy PD v čase  $\tau$ :

$$p_{PD\tau} = p_{p\tau} p(P_{1\tau}^{CSN} \in (0; 0,01)) p(P_{2\tau}^{CSN} \in (0; 0,1)) p(P_{3\tau}^{CSN} \in (0; 0,2)).$$

Pravděpodobnost výskytu poruchy D1 v čase  $\tau$ :

$$p_{D1\tau} = p_{p\tau} p(P_{1\tau}^{CSN} \in (1; \infty)) p(P_{2\tau}^{CSN} \in (0,1; 0,5)) p(P_{3\tau}^{CSN} \in (1; \infty)).$$

Pravděpodobnost výskytu poruchy D2 v čase  $\tau$ :

$$p_{D2\tau} = p_{p\tau} p(P_{1\tau}^{CSN} \in (0,6; 2,5)) p(P_{2\tau}^{CSN} \in (0,1; 1)) p(P_{3\tau}^{CSN} \in (2; \infty)).$$

Pravděpodobnost výskytu poruchy T1 v čase  $\tau$ :

$$p_{T1\tau} = p_{p\tau} p(P_{1\tau}^{CSN} \in (0; 0,01)) p(P_{2\tau}^{CSN} \in (1; \infty)) p(P_{3\tau}^{CSN} \in (0; 1)).$$

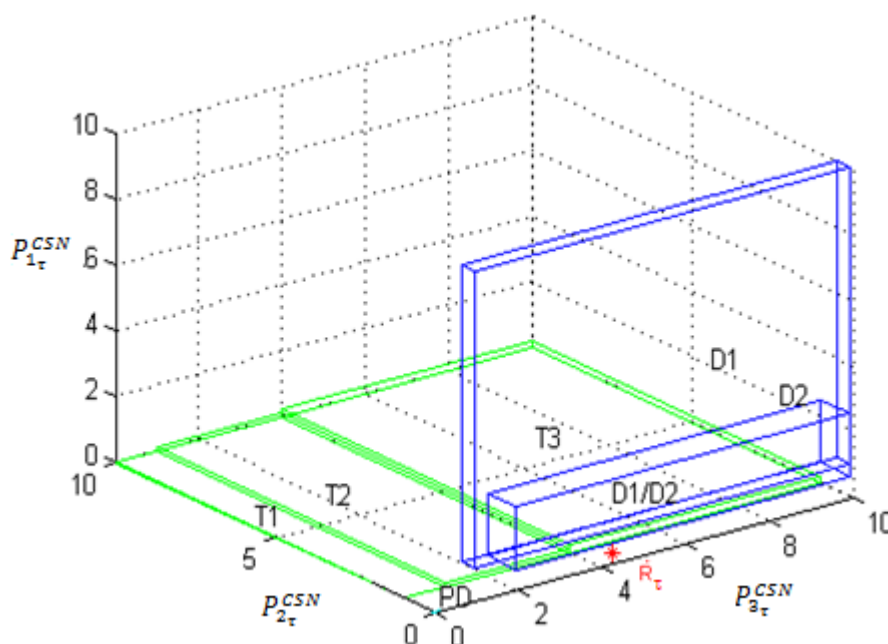
Pravděpodobnost výskytu poruchy T2 v čase  $\tau$ :

$$p_{T2\tau} = p_{p\tau} p(P_{1\tau}^{CSN} \in (0; 0,1)) p(P_{2\tau}^{CSN} \in (1; \infty)) p(P_{3\tau}^{CSN} \in (1; 4)).$$

Pravděpodobnost výskytu poruchy T3 v čase  $\tau$ :

$$p_{T3\tau} = p_{p\tau} p(P_{1\tau}^{CSN} \in (0; 0,2)) p(P_{2\tau}^{CSN} \in (1; \infty)) p(P_{3\tau}^{CSN} \in (4; \infty)).$$

Každý výraz je násoben pravděpodobností  $p_{p\tau}$ , protože porucha transformátoru je předpovídána, jakmile jeden ze sledovaných plynů překročí svou kritériální hodnotu. Výstupem aplikace metody jsou tedy pravděpodobnosti, s jakými nastanou jednotlivé poruchy v čase  $\tau$  a také nejpravděpodobnější stav, v jakém se bude transformátor v časovém okamžiku  $\tau$  nacházet. Z Obr. 18 je patrné, že stav stroje je určen červeným bodem  $R_\tau$  o souřadnicích  $(P_{1\tau}^{CSN}, P_{2\tau}^{CSN}, P_{3\tau}^{CSN})$ .



Obr. 18 Znárodnění bodu  $R_\tau = (P_{1\tau}^{CSN}, P_{2\tau}^{CSN}, P_{3\tau}^{CSN})$

### PREDIKCE PRAVDĚPODOBNOTI PORUCHY PODLE DUVALOVY METODY

Způsob predikce opět vychází z teorie popsané v kapitole 1.3.3. Nejdříve je nutné určit pravděpodobnost inicializace metody  $p_{p\tau}$  v čase predikce  $\tau$ . Tato pravděpodobnost se spočítá stejně jako v případě ČSN metody. K určení pravděpodobnosti, s jakou nastanou jednotlivé poruchy transformátoru v čase  $\tau$ , je nutné predikovat tři následující poměry plynů:

- $P_{1\tau}^{DU}$  - jedná se o hodnotu poměru  $P_1^{DU}$  v čase  $\tau$ ,
- $P_{2\tau}^{DU}$  - jedná se o hodnotu poměru  $P_2^{DU}$  v čase  $\tau$ ,
- $P_{3\tau}^{DU}$  - jedná se o hodnotu poměru  $P_3^{DU}$  v čase  $\tau$ .

Uvedené poměry se vynáší do Duvalova trojúhelníku, který je rozdělen na sedm oblastí. Podle oblasti, ve které se bude nacházet bod  $R_\tau$  o souřadnicích  $(P_{1\tau}^{DU}, P_{2\tau}^{DU}, P_{3\tau}^{DU})$ , se určí typ poruchy, která transformátor postihne v čase  $\tau$ . Bod  $R_\tau$  představuje bod R z kapitoly 1.3.3 této disertační práce v čase  $\tau$ .

Pravděpodobnosti jednotlivých poruch se určí podobně jako u metody ČSN podle následujících vztahů:

Pravděpodobnost výskytu poruchy D1 v čase  $\tau$ :

$$p_{D1\tau} = p_{p\tau} p\left(P_{2\tau}^{DU} \in (0; 0,23)\right) p\left(P_{3\tau}^{DU} \in (0,13; 1)\right) p\left(P_{1\tau}^{DU} \in (0; 0,87)\right),$$

Pravděpodobnost výskytu poruchy D2 v čase  $\tau$ :

$$p_{D2\tau} = p_{D2A\tau} + p_{D2B\tau}, \text{ kde}$$

$$p_{D2A\tau} = p_{p\tau} p\left(P_{2\tau}^{DU} \in (0,23; 0,4)\right) p\left(P_{3\tau}^{DU} \in (0,13; 0,77)\right) p\left(P_{1\tau}^{DU} \in (0; 0,64)\right),$$

$$p_{D2B\tau} = p_{p\tau} p\left(P_{2\tau}^{DU} \in (0,4; 0,71)\right) p\left(P_{3\tau}^{DU} \in (0,29; 0,6)\right) p\left(P_{1\tau}^{DU} \in (0; 0,31)\right).$$

Pravděpodobnost výskytu poruchy DT v čase  $\tau$ :

$$p_{DT\tau} = p_{DTA\tau} + p_{DTB\tau} + p_{DTC\tau}, \text{ kde}$$

$$p_{DTA\tau} = p_{p\tau} p\left(P_{2\tau}^{DU} \in (0,4; 0,85)\right) p\left(P_{3\tau}^{DU} \in (0,15; 0,29)\right) p\left(P_{1\tau}^{DU} \in (0; 0,45)\right),$$

$$p_{DTB\tau} = p_{p\tau} p\left(P_{2\tau}^{DU} \in (0,4; 0,5)\right) p\left(P_{3\tau}^{DU} \in (0,13; 0,15)\right),$$

$$p_{DTC\tau} = p_{p\tau} p\left(P_{2\tau}^{DU} \in (0; 0,5)\right) p\left(P_{3\tau}^{DU} \in (0,04; 0,13)\right).$$

Pravděpodobnost výskytu poruchy T3 v čase  $\tau$ :

$$p_{T3\tau} = p_{p\tau} p\left(P_{2\tau}^{DU} \in (0,5; 1)\right) p\left(P_{3\tau}^{DU} \in (0; 0,15)\right) p\left(P_{1\tau}^{DU} \in (0; 0,5)\right).$$

Pravděpodobnost výskytu poruchy T2 v čase  $\tau$ :

$$p_{T2\tau} = p_{p\tau} p\left(P_{2\tau}^{DU} \in (0,2; 0,5)\right) p\left(P_{3\tau}^{DU} \in (0; 0,04)\right).$$

Pravděpodobnost výskytu poruchy T1 v čase  $\tau$ :

$$p_{T1\tau} = p_{T1A\tau} + p_{T1B\tau}, \text{ kde}$$

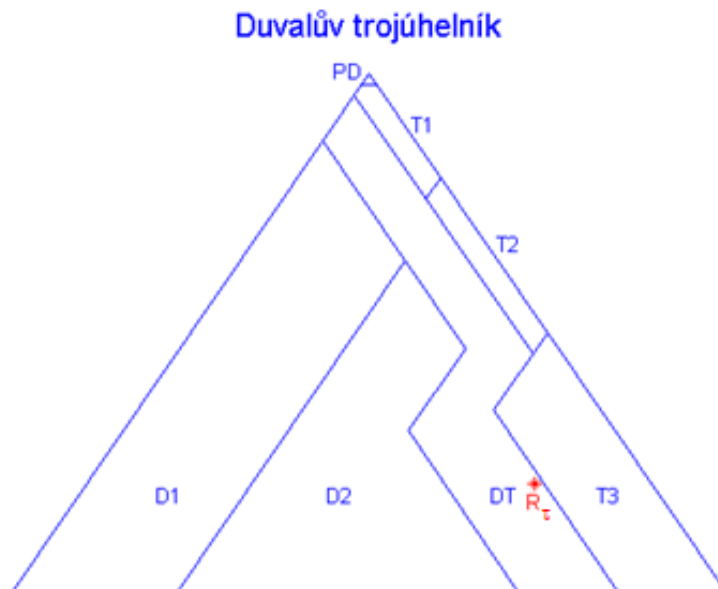
$$p_{T1A\tau} = p_{p\tau} p \left( P_{2\tau}^{DU} \in (0,02; 0,2) \right) p \left( P_{3\tau}^{DU} \in (0; 0,04) \right),$$

$$p_{T1B\tau} = p_{p\tau} p \left( P_{2\tau}^{DU} \in (0; 0,02) \right) p \left( P_{3\tau}^{DU} \in (0; 0,04) \right) p \left( P_{1\tau}^{DU} \in (0,94; 0,98) \right).$$

Pravděpodobnost výskytu poruchy PD v čase  $\tau$ :

$$p_{PD\tau} = p_{p\tau} p \left( P_{1\tau}^{DU} \in (0,98; 1) \right) p \left( P_{2\tau}^{DU} \in (0; 0,02) \right) p \left( P_{3\tau}^{DU} \in (0; 0,02) \right).$$

Intervaly v předešlých vztazích pro jednotlivé poměry jsou určeny Tab. 9. Každý výraz je zde opět násoben pravděpodobností  $p_{p\tau}$ , protože porucha transformátoru je předpovídána, jakmile jeden ze sledovaných plynů překročí svou kritériální hodnotu. Výstupem predikce podle Duvalovy metody jsou opět pravděpodobnosti, s jakými nastanou jednotlivé poruchy v čase  $\tau$  a také nejpravděpodobnější stav, v jakém se bude transformátor v časovém okamžiku  $\tau$  nacházet. Na Obr. 19 je zachycen bod  $R_\tau = (P_{1\tau}^{DU}, P_{2\tau}^{DU}, P_{3\tau}^{DU})$ , který zde určuje poruchu typu DT.



Obr. 19 Predikce typu poruchy podle Duvalovy metody

### PREDIKCE PRAVDĚPODOBNOSTI PORUCHY PODLE ROGERSOVY METODY

Podobně jako u předchozích predikcí se zde vychází z teorie popsané v kapitole 1.3.3. V tomto případě však není nutné počítat pravděpodobnost inicializace metody  $p_{p\tau}$  v čase predikce  $\tau$ . K určení pravděpodobnosti, s jakou nastanou jednotlivé poruchy transformátoru v čase  $\tau$ , je nutné predikovat tři následující poměry plynů:

- $P_{1\tau}^{RO}$  - jedná se o hodnotu poměru  $P_1^{RO}$  v čase  $\tau$ ,
- $P_{2\tau}^{RO}$  - jedná se o hodnotu poměru  $P_2^{RO}$  v čase  $\tau$ ,
- $P_{3\tau}^{RO}$  - jedná se o hodnotu poměru  $P_3^{RO}$  v čase  $\tau$ .

Podle Tab. 10 se ke každému poměru spočítají pravděpodobnosti, s jakými jim bude v daném čase  $\tau$  přiřazen příslušný kód. Kód poměru  $P_{i\tau}^{RO}$  bude dále označován symbolem  $k(P_{i\tau}^{RO})$ , kde  $i = 1,2,3$ . Platí tedy:

$$p(k(P_{1\tau}^{RO}) = 1) = p(P_{1\tau}^{RO} \in (0; 0,1)),$$

$$p(k(P_{1\tau}^{RO}) = 0) = p(P_{1\tau}^{RO} \in (0,1; 1)),$$

$$p(k(P_{1\tau}^{RO}) = 2) = p(P_{1\tau}^{RO} \in (1; \infty)),$$

$$p(k(P_{2\tau}^{RO}) = 1) = p(P_{2\tau}^{RO} \in (0,1; 3)),$$

$$p(k(P_{2\tau}^{RO}) = 0) = p(P_{2\tau}^{RO} \in (0; 0,1)),$$

$$p(k(P_{2\tau}^{RO}) = 2) = p(P_{2\tau}^{RO} \in (3; \infty)),$$

$$p(k(P_{3\tau}^{RO}) = 1) = p(P_{3\tau}^{RO} \in (1; 3)),$$

$$p(k(P_{3\tau}^{RO}) = 0) = p(P_{3\tau}^{RO} \in (0; 1)),$$

$$p(k(P_{3\tau}^{RO}) = 2) = p(P_{3\tau}^{RO} \in (3; \infty)).$$

Nyní se stanoví podle Tab. 11 pravděpodobnosti, s jakými nastanou v čase  $\tau$  jednotlivé poruchy:

$$p_{NS\tau} = p(k(P_{1\tau}^{RO} = 0)) p(k(P_{2\tau}^{RO} = 0)) p(k(P_{3\tau}^{RO} = 0)),$$

$$p_{D1\tau} = p(k(P_{1\tau}^{RO} = 1)) p(k(P_{2\tau}^{RO} = 0)) p(k(P_{3\tau}^{RO} = 0)),$$

$$p_{D2\tau} = p(k(P_{1\tau}^{RO} = 0)) p(k(P_{2\tau}^{RO} = 1)) p(k(P_{3\tau}^{RO} = 2)),$$

$$p_{T1\tau} = p(k(P_{1\tau}^{RO} = 0)) p(k(P_{2\tau}^{RO} = 0)) p(k(P_{3\tau}^{RO} = 1)),$$

$$p_{T2\tau} = p(k(P_{1\tau}^{RO} = 2)) p(k(P_{2\tau}^{RO} = 0)) p(k(P_{3\tau}^{RO} = 1)),$$

$$p_{T3\tau} = p(k(P_{1\tau}^{RO} = 2)) p(k(P_{2\tau}^{RO} = 0)) p(k(P_{3\tau}^{RO} = 2)).$$

### PREDIKCE PRAVDĚPODOBNOTI PORUCHY PODLE DORNENBURGOVY METODY

Podobně jako u předchozích predikcí se zde vychází z teorie popsané v kapitole 1.3.3. K určení pravděpodobnosti, s jakou nastanou jednotlivé poruchy transformátoru v čase  $\tau$ , je nutné predikovat čtyři následující poměry plynů:

- $P_{1\tau}^{DO}$  - jedná se o hodnotu poměru  $P_1^{DO}$  v čase  $\tau$ ,
- $P_{2\tau}^{DO}$  - jedná se o hodnotu poměru  $P_2^{DO}$  v čase  $\tau$ ,
- $P_{3\tau}^{DO}$  - jedná se o hodnotu poměru  $P_3^{DO}$  v čase  $\tau$ ,
- $P_{4\tau}^{DO}$  - jedná se o hodnotu poměru  $P_4^{DO}$  v čase  $\tau$ .

Také při predikování pomocí této metody je třeba nejprve určit pravděpodobnost  $p_{p\tau}$ , že v čase  $\tau$  jsou splněny předpoklady pro její použití. V tomto případě je podmínek více než u předchozích metod. Proto se nyní tato pravděpodobnost spočítá jiným způsobem, než tomu bylo u ČSN a Duvalovy metody. Všechny podmínky pro inicializaci Dornenburgovy metody je možné nalézt v kapitole 1.3.3 této disertační práce.

Nechť platí:

$$p_{1\tau} = p\left(C_2H_{2\tau} \in (m_{C_2H_2}, \infty)\right),$$

$$p_{2\tau} = p\left(H_{2\tau} \in (m_{H_2}, \infty)\right),$$

$$p_{3\tau} = p\left(CH_{4\tau} \in (m_{CH_4}, \infty)\right),$$

$$p_{4\tau} = p\left(C_2H_{4\tau} \in (m_{C_2H_4}, \infty)\right),$$

kde  $m_{C_2H_2}, \dots, m_{C_2H_4}$  jsou minimální úrovně koncentrace plynů zaznamenané v Tab. 12. Pak pravděpodobnost  $p_{p1\tau}$ , že alespoň jeden z plynů  $C_2H_2, H_2, CH_4, C_2H_4$  překročí v čase  $\tau$  dvojnásobek minimální úrovně své koncentrace, je dána vztahem:

$$p_{p1\tau} = \sum_{i=1}^4 p_{i\tau} - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 p_{i\tau} p_{j\tau} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \sum_{k=j+1}^4 p_{i\tau} p_{j\tau} p_{k\tau} - \prod_{i=1}^4 p_{i\tau}.$$

Dále pak symbol  $p_{p2\tau}$ , značí pravděpodobnost, že alespoň jeden z dalších plynů přesáhne svou minimální koncentraci. Tuto pravděpodobnost lze spočítat podle vztahu:

$$p_{p2\tau} = p\left(C_2H_{6\tau} \in (m_{C_2H_6}, \infty)\right) + p\left(CO_{\tau} \in (m_{CO}, \infty)\right) \\ - p\left(C_2H_{6\tau} \in (m_{C_2H_6}, \infty)\right) \cdot p\left(CO_{\tau} \in (m_{CO}, \infty)\right).$$

Nyní se určí pravděpodobnost, s jakou bude mít (opět v čase  $\tau$ ) v každém poměru alespoň jeden plyn koncentraci nad limitem. Postupně se spočítá:

$$p_{p_{P_1}^{DO}} = p\left(CH_{4\tau} \in (m_{CH_4}, \infty)\right) + p\left(H_{2\tau} \in (m_{H_2}, \infty)\right) \\ - p\left(CH_{4\tau} \in (m_{CH_4}, \infty)\right) \cdot p\left(H_{2\tau} \in (m_{H_2}, \infty)\right),$$

$$p_{p_{P_2}^{DO}} = p\left(C_2H_{2\tau} \in (m_{C_2H_2}, \infty)\right) + p\left(C_2H_{4\tau} \in (m_{C_2H_4}, \infty)\right) \\ - p\left(C_2H_{2\tau} \in (m_{C_2H_2}, \infty)\right) \cdot p\left(C_2H_{4\tau} \in (m_{C_2H_4}, \infty)\right),$$

$$p_{p_{P_{3\tau}^{DO}}} = p\left(C_2H_{2\tau} \in (m_{C_2H_2}, \infty)\right) + p\left(CH_{4\tau} \in (m_{CH_4}, \infty)\right) \\ - p\left(C_2H_{2\tau} \in (m_{C_2H_2}, \infty)\right) \cdot p\left(CH_{4\tau} \in (m_{CH_4}, \infty)\right),$$

$$p_{p_{P_{4\tau}^{DO}}} = p\left(C_2H_{6\tau} \in (m_{C_2H_6}, \infty)\right) + p\left(C_2H_{2\tau} \in (m_{C_2H_2}, \infty)\right) \\ - p\left(C_2H_{2\tau} \in (m_{C_2H_6}, \infty)\right) \cdot p\left(CH_{4\tau} \in (m_{C_2H_2}, \infty)\right),$$

Pravděpodobnost  $p_{p_\tau}$ , že jsou splněny všechny uvedené podmínky zároveň lze určit ze vztahu:

$$p_{p_\tau} = p_{p_{1\tau}} p_{p_{2\tau}} p_{p_{P_{1\tau}^{DO}}} p_{p_{P_{2\tau}^{DO}}} p_{p_{P_{3\tau}^{DO}}} p_{p_{P_{4\tau}^{DO}}}.$$

Pravděpodobnosti, že v čase  $\tau$  bude v transformátoru porucha daného typu, vychází z určení pravděpodobnosti, že pro  $i = 1,2,3,4$  budou v čase  $\tau$  jednotlivé poměry plynů  $P_{i\tau}^{DO}$  v intervalech vymezenými Tab. 13. Platí tedy:

Pravděpodobnost výskytu poruchy  $T$  v čase  $\tau$ :

$$p_{T_\tau} = p_{p_\tau} p\left(P_{1\tau}^{DO} \in (1; \infty)\right) p\left(P_{2\tau}^{DO} \in (0; 0,75)\right) p\left(P_{3\tau}^{DO} \in (0; 0,3)\right) p\left(P_{4\tau}^{DO} \in (0,4; \infty)\right),$$

Pravděpodobnost výskytu poruchy  $DI$  v čase  $\tau$ :

$$p_{D1_\tau} = p_{p_\tau} p\left(P_{1\tau}^{DO} \in (0; 0,1)\right) p\left(P_{3\tau}^{DO} \in (0; 0,3)\right) p\left(P_{4\tau}^{DO} \in (0,4; \infty)\right),$$

Pravděpodobnost výskytu poruchy  $D2$  v čase  $\tau$ :

$$p_{D2_\tau} = p_{p_\tau} p\left(P_{1\tau}^{DO} \in (0,1; 1)\right) p\left(P_{2\tau}^{DO} \in (0,75; \infty)\right) p\left(P_{3\tau}^{DO} \in (0,3; \infty)\right) p\left(P_{4\tau}^{DO} \in (0; 0,4)\right).$$

### 2.3.3 RELIAB\_DGA\_TRANSFORMER 1.0

Podle předcházející teorie byl v prostředí Matlab R2009b navržen software Reliab\_dga\_transformer 1.0 pro predikci pravděpodobností poruch vyskytujících se u výkonových olejových transformátorů. Titulní okno zmíněného softwaru zachycuje Obr. 20. Software Reliab\_dga\_transformer 1.0 lze nalézt v **Příloha 19 - Vytvořené softwary a spolehlivostní modul Transformer Reliability Assessment.**

Obr. 20 Titulní okno softwaru Reliab\_dga\_transformer 1.0

### VSTUPNÍ PARAMETRY SOFTWARE

V softwaru se nejdříve volí diagnostická metoda, podle které se budou predikovat pravděpodobnosti jednotlivých poruch. V dalším kroku se vybírá trend časové řady, kterým se nejlépe odhadne vývoj příslušných poměrů plynů rozpuštěných v izolačním oleji. Vždy lze zvolit pouze jednu metodu a jeden trend časové řady. Poté se zadává čas predikce  $\tau$ , ve kterém se mají spočítat jednotlivé výstupy navrženého softwaru. Dále lze zadat, zda se budou ve výpočtech uvažovat i odlehlá měření (tj. měření, která se nápadně odchyľují od předcházejících měření). V dalším kroku se zadávají prostřednictvím tlačítka *Zadat kritéria pro zahájení analýzy* kritické hodnoty pro inicializaci jednotlivých metod. Standardně jsou zde nastaveny hodnoty podle [12]. Tyto hodnoty se mění v závislosti na použitých diagnostických metodách a lze je změnit jejich prostým přepsáním v titulním okně. Nakonec se zadává název souboru ve formátu *název.txt*, který obsahuje diagnostická měření koncentrací jednotlivých plynů rozpuštěných v oleji během celé historie provozu transformátoru. Hodnoty plynů se zadávají pod sebe a plyny jsou vždy odděleny prázdným řádkem. Pořadí plynů v souboru je následující: čas  $t$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ . Pokud nebyl některý plyn v daném čase měřen, nahradí se jeho koncentrace nulou. Obr. 21 zachycuje příklad vstupního souboru, kde je znázorněno oddělení času a koncentrací metanu. Výpočty se zahájí aktivací tlačítka *Predikce*.

```

Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
28. 2500000000000
28. 8000000000000
28. 8100000000000
29. 2000000000000
29. 3000000000000
29. 3500000000000
29. 7000000000000
29. 8000000000000
30. 1000000000000
30. 2000000000000
30. 7000000000000
30. 8000000000000
31. 2000000000000
31. 2500000000000
31. 3000000000000
31. 3500000000000
31. 4000000000000
31. 5000000000000
31. 6000000000000
31. 7000000000000
31. 7500000000000
31. 8000000000000
31. 9000000000000
32
32. 1000000000000
32. 2000000000000
32. 3000000000000
32. 4000000000000
32. 6000000000000
0
110
0
3
301
0
1. 5000000000000
2. 9000000000000
0
4
0
0
0
0
0
18
0

```

Obr. 21 Příklad vstupního souboru do softwaru Reliab\_dga\_transformer 1.0

## VÝSTUPNÍ PARAMETRY SOFTWARE

Na Obr. 22 je možné vidět, že výstupní parametry ze softwaru Reliab\_dga\_transformer 1.0 se vypisují do titulního okna. První skupinu výstupů lze nazvat *Pravděpodobnosti*. Tato skupina se skládá z pravděpodobnosti oprávněnosti aplikace diagnostické metody  $p_{p_\tau}$ , což je pravděpodobnost, že budou v čase  $\tau$  splněny všechny podmínky nutné pro inicializaci zvolené diagnostické metody. Dále následují pravděpodobnosti, s jakými se ve zkoumaném výkonovém olejovém transformátoru vyskytnou jednotlivé poruchy v čase  $\tau$ . Další skupina výstupů má název *Výsledky testu, že chybová složka časových řad jednotlivých plynů má normální rozdělení*. Symbol 1 reprezentuje skutečnost, že software tuto hypotézu pro čas  $\tau$  nezamítne. Nezamítnutí této hypotézy se předpokládá ve výše navrženém postupu predikce pravděpodobností. Další skupina výstupu má stejný význam jako předchozí (testování, zda se jedná o normální rozdělení), nyní se však jedná o poměry plynů, které identifikují typ poruchy v čase  $\tau$ . Nakonec software určí nejpravděpodobnější poměry analyzovaných plynů v čase  $\tau$ . Pokud jsou diagnostické metody doplněny grafickým výstupem, program příslušné obrázky také vykreslí. Grafický výstup spojený s ČSN metodou zachycuje Obr. 18, Duvalův trojúhelník znázorňuje Obr. 19. Bod  $R_\tau$  v těchto obrázcích vystihuje poslední zmíněný výstup a to nejpravděpodobnější souřadnice poměrů plynů v čase  $\tau$ .

**Predikce1**

**Predikce pravděpodobnosti poruchy výkonových olejových transformátorů**

**Diagnostická metoda**

ČSN norma  Duvalův trojúhelník  Rogersova metoda  Dornenburgova metoda

**Trend diagnostických veličin**

Lineární trend  Exponenciální trend  Klouzavé průměry  Jádrové vyhlazování

Čas predikce   Neuvažovat odlehlá měření

**Mezní koncentrace plynů v mikrolitrech/litr pro zahájení analýzy**

CH4  C2H2  C2H4  H2  C2H6  CO  CO2

Název souboru obsahujícího vstupní data

**Výsledky**

**Pravděpodobnosti**

Pravděpodobnost oprávněnosti aplikace diagnostické metody v čase predikce

Pravděpodobnost poruchy typu PD  Pravděpodobnost poruchy typu D1

Pravděpodobnost poruchy typu T1  Pravděpodobnost poruchy typu D2

Pravděpodobnost poruchy typu T2  Pravděpodobnost poruchy typu DT

Pravděpodobnost poruchy typu T3

**Výsledky testu, že chybová složka časových řad jednotlivých plynů má normální rozdělení (1 nezamítnuto)**

CH4  C2H2  C2H4  H2  C2H6  CO  CO2

**Výsledky testu, že chybová složka časových řad jednotlivých poměrů má normální rozdělení (1 nezamítnuto)**

CH4/CxHy  C2H4/CxHy  C2H2/CxHy

**Nejpravděpodobnější hodnota jednotlivých poměrů plynů v čase tau**

CH4/CxHy  C2H4/CxHy  C2H2/CxHy

Obr. 22 Výstupy ze softwaru Reliab\_dga\_transformer 1.0

## POROVNÁNÍ TRENDŮ POMOCÍ SOFTWARU RELIAB\_DGA\_TRANSFORMER 1.0

S využitím dříve popsané databáze diagnostických měření výkonových olejových transformátorů byly simulovány situace, kdy je třeba dopředu předpovídat poruchu transformátoru i s pravděpodobností jejího výskytu. Softwarem Reliab\_dga\_transformer 1.0 byly postupně predikovány stavy všech zkoumaných strojů ve třech posledních časech, ze kterých jsou k dispozici naměřená data. Postupovalo se tak, že se při predikování zanedbaly tři poslední diagnostická měření. Tato vynechaná měření pak byla samostatně vyhodnocena a konfrontována s provedenými predikcemi. Úkolem bylo porovnat vhodnost jednotlivých trendů časových řad při predikování typů poruch transformátorů. K danému účelu byla využita Duvalova metoda a porovnávaly se následující trendy:

- **lineární trend** (lin),
- **mocninný trend** (moc),
- **exponenciální trend** (exp),
- **trend určený jádrovým vyhlazováním** (ksr),
- **trend určený klouzavými průměry** (klp).

Tab. 27 a Tab. 28 zachycují poruchy a poměry jednotlivých plynů, které byly skutečně vyhodnoceny v posledních třech diagnostických měřeních všech deseti zkoumaných výkonových olejových transformátorů.

Tab. 27 Vyhodnocení posledních tří diagnostických měření výkonových olejových transformátorů pracujících v Elektrárně 1 a Elektrárně 2

Transformátor	Čas	Porucha	$P_{1\tau}^{DU}$	$P_{2\tau}^{DU}$	$P_{3\tau}^{DU}$	Opr.
Transformátor 1	52,9	T3	0,1596	0,7340	0,1064	0
	53,5	DT	0,1519	0,6076	0,2405	1
	54,7	DT	0,2778	0,5000	0,2222	1
Transformátor 2	40,1	T3	0,2092	0,7880	0,0027	0
	40,2	T3	0,2141	0,7833	0,0026	0
	44,7	D2	0,3148	0,3889	0,2963	0
Transformátor 3	50,2	T3	0,2734	0,6901	0,0365	1
	51,4	T3	0,1822	0,7681	0,0497	1
	52,6	T3	0,1471	0,7426	0,1103	1
Transformátor 4	32,2	T3	0,2259	0,7029	0,0711	0
	32,4	T3	0,2390	0,6346	0,1264	1
	32,6	T3	0,2311	0,6499	0,1190	1
Transformátor 5	31,2	T3	0,2500	0,6771	0,0729	1
	31,4	T3	0,2278	0,6684	0,1038	1
	31,6	T3	0,2471	0,6536	0,0993	1

Tab. 28 Vyhodnocení posledních tří diagnostických měření výkonových olejových transformátorů pracujících v Elektrárně 3 a Elektrárně 4

Transformátor	Čas	Porucha	$P_{1\tau}^{DU}$	$P_{2\tau}^{DU}$	$P_{3\tau}^{DU}$	Opr.
Transformátor 6	16,7	DT	0,1818	0,5341	0,2841	1
	16,8	DT	0,2088	0,6044	0,1868	0
	17,3	D2	0,2149	0,4132	0,3719	1
Transformátor 7	16,7	T3	0,184	0,691	0,125	1
	16,8	T3	0,1871	0,7347	0,0782	1
	17,7	T3	0,1987	0,6921	0,1093	1
Transformátor 8	42,3	T1	0,8455	0,1537	0,0008	1
	43,3	T1	0,8904	0,1027	0,0068	1
	43,8	DT	0,7895	0,1316	0,0789	0
Transformátor 9	42,3	T1	0,7996	0,1976	0,0028	1
	43,3	T1	0,8625	0,137	0,0005	1
	43,8	T2	0,7254	0,2591	0,0155	0
Transformátor 10	42,3	T1	0,8799	0,1186	0,0015	1
	43,3	T1	0,9237	0,0729	0,0034	1
	43,8	T1	0,885	0,0885	0,0265	0

Zkratka Opr. v tabulkách značí oprávněnost použití Duvalovy metody. Symbol 1 zastupuje situaci, kdy byla splněna podmínka pro použití Duvalovy metody, symbol 0 naopak představuje skutečnost, že tato podmínka splněna nebyla. Připomeňme, že vyhodnocení koncentrací plynů rozpuštěných v izolačním oleji lze podle Duvalovy metody použít v případě, kdy aspoň jedna koncentrace plynů  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  překročí rozsah 90% typických koncentračních hodnot pozorovaných ve výkonových olejových transformátorech (v  $\mu\text{l/l}$ ).

Podle údajů uvedených v Tab. 27 a Tab. 28 lze konstatovat, že ve většině případů byla Duvalova metoda použita oprávněně a zjištěná porucha se tak v transformátoru zřejmě skutečně vyskytovala.

Tab. 29 zachycuje výsledky predikce pravděpodobností poruch Transformátoru 1 v čase  $\tau = 52,9$  let provozu. Symbol  $\overline{\text{POR}}$  zastupuje v této tabulce nejpravděpodobnější poruchu, tj. poruchu, která se bude v transformátoru vyskytovat s největší pravděpodobností. Z této tabulky je vidět, že všechny trendy s výjimkou mocninného predikovaly poruchu T3, která se podle Tab. 27 v transformátoru skutečně vyskytovala. Mocninný trend predikoval poruchu DT, která se v Duvalově trojúhelníku nachází vedle oblasti vymezené pro poruchu T3. Lze tedy usuzovat, že všechny predikce se nachází na hranici obou těchto oblastí a protože mocninný trend v tomto případě vystihuje trend zkoumaných časových řad nejméně, liší se jeho předpověď od ostatních. Tabulky predikcí pro zbylé dva časy a ostatní transformátory lze nalézt v Příloha 11 - Pravděpodobnosti poruch a predikce nejpravděpodobnější poruchy zkoumaných výkonových olejových transformátorů.

Tab. 29 Pravděpodobnosti jednotlivých poruch a predikce nejpravděpodobnější poruchy Transformátoru 1 v čase  $\tau = 52,9$  let provozu

$\tau = 52,9$	moc	lin	exp	ksr	klp
$P_{p\tau}$	1,00	0,04	0,04	0,03	0,04
$P_{PD\tau}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$P_{T1\tau}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$P_{T2\tau}$	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
$P_{T3\tau}$	0,00	0,02	0,02	0,02	0,03
$P_{D1\tau}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$P_{D2\tau}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$P_{DT\tau}$	0,09	0,02	0,02	0,00	0,01
$P_{1\tau}^{DU}$	278498,01	0,21	0,22	0,15	0,16
$P_{2\tau}^{DU}$	0,00	0,65	0,66	0,78	0,76
$P_{3\tau}^{DU}$	0,00	0,13	0,13	0,07	0,08
$\overline{\text{POR}}$	DT	T3	T3	T3	T3

Bylo tedy predikováno celkem 30 stavů zde zkoumaných výkonových olejových transformátorů. Tab. 30 porovnává úspěšnosti jednotlivých trendů při predikování nejpravděpodobnější poruchy  $\overline{\text{POR}}$ . Symbol POR v této tabulce představuje poruchu, která se v transformátoru podle Duvalovy metody skutečně nacházela. Nejvyšší úspěšnosti 73% bylo

dosaženo při predikování pomocí jádrového vyhlazování ve spojení s proložením polynomem druhého stupně a pomocí exponenciálního trendu. Tento závěr koresponduje s výsledky dosaženými v kapitole 2.2 této disertační práce, kde rovněž podle průměrného koeficientu determinace vycházela nejlépe pro odhad trendu metoda jádrového vyhlazování spojená s proložením polynomem druhého stupně.

Tab. 30 Úspěšnost předpovědi jednotlivých trendů

Trend	$\widehat{POR} = POR$	$\widehat{POR} \neq POR$	Úspěšnost
<b>moc</b>	17	13	0,57
<b>lin</b>	21	9	0,70
<b>exp</b>	22	8	0,73
<b>ksr</b>	22	8	0,73
<b>klp</b>	20	10	0,67

Tab. 31 srovnává skutečné poruchy POR a predikce nejpravděpodobnějších poruch  $\widehat{POR}$  provedených pomocí metody jádrového vyhlazování spojené s proložením polynomem druhého stupně. V této tabulce se vyskytují pouze poruchy T1, T2, T3, D2 a DT. Jiné poruchy nebyly Duvalovou metodou predikovány a ani vyhodnoceny. Symbol x je v tabulce opět vyhrazen pro situaci, kdy se nepodařilo z důvodu malého počtu dat predikci provést. Jednalo se celkem o 3 případy. Z tabulky je vidět, že ve 13 případech byla správně předpovězena porucha T3. Dvakrát byla tato porucha chybně predikována v případě, kdy transformátor postihla porucha DT. Jednou byla správně předpovězena porucha T2 a D2. Porucha DT nebyla predikována ani jednou, přestože byla diagnostikována v 5 případech. Porucha T1 byla správně v sedmi případech a pouze v jednom případě byla zaměněna za poruchu DT. Pokud byla některá porucha chybně predikována, byla tato porucha zaměněna za poruchu, která se v Duvalově trojúhelníku nachází v těsné blízkosti této predikované poruchy.

Na základě výpočtů provedených pomocí **Reliab\_dga\_transformer 1.0** lze usoudit, že při predikování pravděpodobností poruch a nejpravděpodobnější poruchy vykazovala nejlepší výsledky metoda jádrového vyhlazování spojená s proložením polynomem druhého stupně.

Tab. 31 Porovnání predikcí nejpravděpodobnějších poruch se skutečnými poruchami

	<b>POR = T3</b>	<b>POR = D2</b>	<b>POR = DT</b>	<b>POR = T1</b>	<b>POR = T2</b>
$\widehat{POR} = T3$	13	0	2	0	0
$\widehat{POR} = D2$	0	1	2	0	0
$\widehat{POR} = DT$	0	0	0	0	0
$\widehat{POR} = T1$	0	0	1	7	0
$\widehat{POR} = T2$	0	0	0	0	1
$\widehat{POR} = x$	2	1	0	0	0

### SROVNÁNÍ DIAGNOSTICKÝCH METOD POMOCÍ RELIAB\_DGA\_TRANSFORMER 1.0

V navrženém softwaru Reliab\_dga\_transformer 1.0 jsou implementovány uznávané a běžně využívané postupy hodnocení stavu izolačního systému dle ČSN, Duvalovy, Rogersovy a Dornenburgovy metody. V rámci předkládané disertační práce byla rovněž provedena studie predikcí pravděpodobností jednotlivých typů poruch v závislosti na použité diagnostické metodě. Pro zajištění co největší vypovídací hodnoty byl v souladu s předchozími závěry

trend časových řad odhadován metodou jádrového vyhlazování společně s proložením polynommem druhého stupně.

Tab. 32 zaznamenává pravděpodobnosti poruch a nejpravděpodobnější poruchu Transformátoru 1 v čase  $\tau =$  dva roky od posledního diagnostického měření. Symbol  $p_{PD_\tau}/p_{NS_\tau}$  v tabulce značí řádek pro pravděpodobnosti poruchy PD u ČSN a Duvalovy metody a poruchy NS u Rogersovy metody. Pravděpodobnost  $p_{NR_\tau}$  je pravděpodobnost, že nelze o typu poruchy rozhodnout, symbol x zastupuje situaci, kdy nešlo predikci z důvodu nedostatku vstupních dat provést a  $\overline{POR}$  opět značí nejpravděpodobnější poruchu, která zkoumaný stroj v čase  $\tau$  postihne.

Je zřejmé, že pravděpodobnost překročení inicializačních mezí  $p_{p_\tau}$  se shoduje u ČSN a Duvalovy metody. Tento závěr je očekávaný a je výsledkem vlastního nastavení inicializačních mezí v obou případech. Pravděpodobnost inicializace Rogersovy metody  $p_{p_\tau} = 1$  je také očekávaným výsledkem z důvodu, že zmíněnou metodu lze použít k vyhodnocení stavu transformátoru kdykoliv během jeho provozu. Naproti tomu, pravděpodobnost inicializace Dornenburgovy metody je nulová. Tato skutečnost vyplývá z nastavení několikanásobně vyšších inicializačních mezí pro tuto DGA metodu.

Duvalova a ČSN metoda predikovala v daném čase malé pravděpodobnosti jednotlivých poruch na rozdíl od Rogersovy metody, kde pravděpodobnost poruchy D2 vyšla 72,4%. Tato skutečnost byla zapříčiněna malou pravděpodobností  $p_{p_\tau}$  u ČSN a Duvalovy metody. Dornenburgova metoda v tomto případě nepredikovala žádnou poruchu, protože pravděpodobnost její inicializace byla nulová. Tabulky zachycující pravděpodobnosti poruch a nejpravděpodobnější poruchu zbylých zkoumaných výkonových olejových transformátorů v čase  $\tau =$  dva roky od posledního diagnostického měření lze nalézt v **Příloha 12 - Pravděpodobnosti poruch a nejpravděpodobnější porucha zkoumaných transformátorů predikované různými DGA metodami.**

Tab. 33 shrnuje nejpravděpodobnější poruchy zkoumaných výkonových olejových transformátorů predikované různými DGA metodami v čase  $\tau =$  dva roky od posledního diagnostického měření. Zkratka n.r. zde představuje situaci, kdy nešlo pomocí dané DGA metody o nejpravděpodobnější poruše rozhodnout a symbol x opět značí, že predikci nebylo možné z důvodu nedostatku vstupních dat provést.

Tab. 32 Pravděpodobnosti poruch a nejpravděpodobnější porucha Transformátoru 1 predikované různými DGA metodami v čase  $\tau =$  dva roky od posledního diagnostického měření

$\tau = 56,7$	ČSN metoda	Duvalova metoda	Rogersova metoda	Dornenburgova metoda
$p_{p_\tau}$	$7,72621 \cdot 10^{-5}$	$7,72621 \cdot 10^{-5}$	1	0
$p_{PD_\tau}/p_{NS_\tau}$	$2,33434 \cdot 10^{-14}$	0	$3,05936 \cdot 10^{-6}$	x
$p_{T1_\tau}$	0	$1,47196 \cdot 10^{-10}$	0,00200491	0
$p_{T2_\tau}$	0	$1,22619 \cdot 10^{-7}$	0	0
$p_{T3_\tau}$	0	$2,38969 \cdot 10^{-5}$	0	0
$p_{D1_\tau}$	$1,15105 \cdot 10^{-12}$	$1,13956 \cdot 10^{-8}$	$4,06426 \cdot 10^{-7}$	0
$p_{D2_\tau}$	$2,21763 \cdot 10^{-6}$	$3,27633 \cdot 10^{-6}$	0,72447	0
$p_{DT_\tau}$	x	$3,98933 \cdot 10^{-5}$	x	x
$p_{NR_\tau}$	$7,50429 \cdot 10^{-5}$	x	0,273521	0
$\overline{POR}$	n.r.	DT	n.r.	x

Z výše uvedených důvodů neidentifikovala Dornenburgova metoda ani u jednoho transformátoru nejpravděpodobnější poruchu. ČSN a Rogersova metoda většinou predikovaly stav, kdy nelze o poruše stroje rozhodnout. Tento fakt vyplývá ze skutečnosti, že oblast, pro kterou nelze rozhodnout o typu pravděpodobnosti poruchy je daleko větší než ostatní oblasti. Tuto situaci vhodně ilustruje například Obr. 18. Uvedený problém lze odstranit fuzziifikací obou metod. Postup, jak tyto metody včetně predikcí nejpravděpodobnější poruchy fuzziifikovat, lze nalézt například v [10]. Ukázalo se, že výhodou predikce nejpravděpodobnější poruchy pomocí Duvalovy metody je získání nejpravděpodobnější poruchy pokaždé, když je nenulová pravděpodobnost inicializace  $p_{p_t}$ . Z celkového počtu deseti výkonových olejových transformátorů byl určen stejný typ poruchy pouze v jednom případě Transformátoru 9. Pro kvalitní rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů je tedy nutné predikovat nejpravděpodobnější poruchu pomocí všech čtyř DGA metod a získané výsledky potom konzultovat s odborníky v dané oblasti.

Tab. 33 Nejpravděpodobnější poruchy zkoumaných výkonových olejových transformátorů predikované různými DGA metodami v čase  $\tau =$  dva roky od posledního diagnostického měření

Transformátor	ČSN metoda	Duvalova metoda	Rogersova metoda	Dornenburgova metoda
Transformátor 1	n.r.	DT	n.r.	x
Transformátor 2	x	x	x	x
Transformátor 3	n.r.	T3	n.r.	x
Transformátor 4	n.r.	T3	D2	x
Transformátor 5	n.r.	T3	D2	x
Transformátor 6	x	x	n.r.	x
Transformátor 7	x	x	n.r.	x
Transformátor 8	n.r.	T1	n.r.	x
Transformátor 9	T2	T2	T2	x
Transformátor 10	n.r.	T1	n.r.	x

#### 2.3.4 METODA DISTRIBUČNÍCH FUNKCÍ

Tato neinvazivní metoda rozboru dvoustavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů vychází z teorie prezentované v **Příloha 2 - Teorie časových řad**. Metoda distribučních funkcí predikuje pravděpodobný rok dožití (PRD) zkoumaných strojů. Za vstupní parametry této metody lze zvolit hodnoty kterékoliv veličiny určující stav izolace vinutí. Důvodem volby tohoto typu vstupních parametrů je skutečnost, že hodnoty veličin určujících stav izolace vinutí se zjišťují při jednom diagnostickém šetření pro různá zapojení měřících přístrojů. Pro jeden časový okamžik je tak k dispozici několik měření stejné veličiny.

Diagnostická měření veličin určujících stav izolace vinutí jsou prováděna při různých podmínkách a jejich hodnoty jsou tak ovlivněny několika faktory. Mezi tyto faktory patří například používání různých měřících přístrojů, rozdílná vlhkost okolního vzduchu, různé skupiny obsluhujících pracovníků. Největší vliv na hodnoty těchto diagnostických veličin má teplota, při které se měření provádí. Z tohoto důvodu byl jako vstupní veličina pro metodu distribučních funkcí vybrán ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$ , jehož hodnoty teplota neovlivňuje v takové míře jako hodnoty ostatních veličin určujících stav izolace vinutí. Dalším kritériem pro volbu ztrátového činitele je skutečnost, že ve většině jeho diagnostických měřeních jsou data

nejpočetnější a úplná. Měření ostatních diagnostických veličin tohoto typu jsou charakteristická neúplnými záznamy a zkrácenými údaji. Velikost ztrátového činitele je ovlivněna pevnou i kapalnou částí dielektrika a proto lze z jeho hodnot usuzovat, zda je izolační soustava zestárlá nebo navlhlá. Pokud není pevná izolace vinutí navlhlá, průběh ztrátového činitele dobře popisuje degradační procesy probíhající v izolaci.

### ZÁKLADNÍ POJMY

**Čas  $t_i$**  – doba provozu transformátoru, ve které byl stroj odstaven a bylo provedeno měření ztrátového činitele.

**Pravděpodobný rok dožití  $PRD$**  – predikovaný pravděpodobný rok dožití, jedná se o dobu provozu, po jejíž uplynutí není transformátor schopen plnit požadovanou funkci.

**Počet zapojení  $m$**  – počet různých variant zapojení měřicích přístrojů, při kterých se měří ztrátový činitel.

**Změna hodnoty ztrátového činitele  $z_{ij}$**  – vyjadřuje změnu hodnoty ztrátového činitele v čase  $t_i$  proti hodnotě ztrátového činitele v čase  $t_{i-1}$  pro zapojení měřicích přístrojů  $j$ .

**Kritická hodnota změny ztrátového činitele  $z_{kr}$**  – kritická hodnota změny ztrátového činitele stanovená pomocí technických norem pro diagnostiku transformátorů. Tato kritická hodnota je stejná pro všechna zapojení měřicích přístrojů.

**Pravděpodobnost poruchy  $P_f(t_i)$  v čase  $t_i$**  – pravděpodobnost, s jakou přestane transformátor plnit požadovanou funkci v čase  $t_i$ .

**Směrná hodnota pravděpodobnosti poruchy  $P'_f$**  – pravděpodobnost poruchy určující nepřijatelný provozní stav transformátoru. Jedná se o hodnotu pravděpodobnosti poruchy, při které už uživatel nechce transformátor dále provozovat. Na základě diskuse s odborníky na diagnostiku výkonových olejových transformátorů byla stanovena směrná hodnota pravděpodobnosti poruchy na 30%. V třiceti případech ze sta možných už tedy nelze poruchu transformátoru tolerovat.

**Distribuční funkce  $F_i(z_{kr})$**  – pravděpodobnost, s jakou bude změna hodnoty ztrátového činitele v čase  $t_i$  proti hodnotě ztrátového činitele v čase  $t_{i-1}$  menší nebo rovna kritické hodnotě změny ztrátového činitele  $z_{kr}$ .

### PRINCIP METODY DISTRIBUČNÍCH FUNKCÍ

V prvním kroku této metody je nutné převést vstupní data do podoby vhodné pro jejich další zpracování. Hodnoty ztrátového činitele tvoří pro jednotlivá zapojení měřicích přístrojů časové řady. Z důvodu nízkého počtu měření ztrátového činitele je nutné odhadnout trend těchto časových řad a na základě rovnice trendu je pak transformovat na časové řady s většími rozsahy. Podle [3] se ztrátový činitel u dvouvinutových transformátorů musí měřit každé dva roky provozu a u třívínutových každý rok provozu. Do rovnice trendu se tedy dosadí u dvouvinutových transformátorů postupně časy  $t_1 = 2, t_2 = 4, t_3 = 6, \dots$  a do rovnice trendu třívínutových transformátorů časy  $t_1 = 1 = 2, t_2 = 3, \dots$ . Tímto způsobem lze tak pro každé zapojení měřicích přístrojů získat časové řady ztrátového činitele, které mají dostatečný počet hodnot.

Dále se podle [3] určí kritická hodnota změny ztrátového činitele  $z_{kr}$  a na základě charakteru této změny se převedou měření v jednotlivých letech do podoby  $z_{ij}$  tak, aby se mohlo provést srovnání s  $z_{kr}$ . Poměr  $z_{ij}$  má následující tvar:

$$z_{ij} = \frac{z_{ij} - z_{(i-1)j}}{z_{(i-1)j}}$$

kde  $i = 1, \dots, n$  a  $j = 1, \dots, m$ .  $n$  je počet časových okamžiků, ve kterých byl ztrátový činitel měřen a  $m$  značí počet různých zapojení měřicích přístrojů. Každé zařízení je tedy v daném časovém okamžiku  $t_i$  charakterizováno uspořádanou  $(m + 1)$ -ticí  $(t_i, z_{i1}, \dots, z_{im})$ .

Pravděpodobný rok dožití  $PRD$  lze přibližně určit porovnáním  $(t_i, z_{i1}, \dots, z_{im})$  s  $(PRD, z_{kr1}, \dots, z_{krm})$ , kde  $z_{kr1} = \dots = z_{krm} = z_{kr}$ . Je nutné zdůraznit, že takto získaný pravděpodobný rok dožití je pouze první aproximace skutečnosti. Přesnější odhad pravděpodobného roku dožití se získá pomocí směrné hodnoty pravděpodobnosti poruchy  $P_f'$ . Spočítá se časově závislá pravděpodobnost poruchy  $P_f(t_i)$  a pravděpodobný rok dožití  $PRD$  se určí ze vztahu

$$P_f(PR D) \geq P_f'$$

Pravděpodobnost poruchy  $P_f(t_i)$  v čase  $t_i$  se získá analýzou souboru hodnot  $(z_{i1}, \dots, z_{im})$  tak, že se stanoví rozdělení pravděpodobnosti tohoto souboru a odhadnou se parametry příslušného rozdělení. Pro potřeby Metody distribučních funkcí se soubor hodnot  $(z_{i1}, \dots, z_{im})$  odhaduje rozděleními pravděpodobnosti uvedenými v **Příloha 1 - Pravděpodobnost, náhodná veličina, distribuční funkce**. Pomocí získaných informací se pak spočítá hodnota distribuční funkce  $F_i(z_{kr})$ . Pravděpodobnost poruchy v čase  $t_i$  je potom řešením rovnice

$$P_f(t_i) = 1 - F_i(z_{kr}).$$

#### APLIKACE METODY DISTRIBUČNÍCH FUNKCÍ NA TRANSFORMÁTORY PRACUJÍCÍ V ELEKTRÁRNĚ 1

Metoda distribučních funkcí byla použita pro rozbor spolehlivosti tří transformátorů umístěných v Elektrárně 1. Off-line diagnostické zkoušky se u těchto transformátorů začaly provádět po 30 letech provozu, kdy se vyměnil olej a vysušila se pevná izolace. Teoreticky byla tedy izolace zbavena vlhkosti a hodnoty ztrátového činitele v následujících letech vhodné popisovaly degradační procesy pevné izolace. Jednotlivé transformátory již nejsou v provozu, nicméně jsou k dispozici jejich diagnostická měření a přesný rok dožití. Z protokolů o diagnostických měřeních byla vytvořena Tab. 34, která zachycuje skutečné roky dožití výkonových olejových transformátorů pracujících v Elektrárně 1.

Tab. 34 Skutečný rok dožití transformátorů pracujících v Elektrárně 1

Transformátor	Skutečný rok dožití
Transformátor 1	54
Transformátor 2	45
Transformátor 3	52

Tab. 35 zaznamenává predikce pravděpodobného roku dožití Transformátoru 1. Predikce byly provedeny pro různé trendy časových řad ztrátového činitele a pro různá rozdělení pravděpodobnosti uvedená v **Příloha 1 - Pravděpodobnost, náhodná veličina, distribuční funkce**. Metody pro odhad trendové složky časových řad byly použity stejné jako u Obecné metody vycházející z teorie časových řad a Metody vycházející z časových řad a DGA.

Tab. 35 Pravděpodobný rok dožití Transformátoru 1

Rozdělení pravděpodobnosti	Mocninný trend	Lineární trend	Exponenciální trend	Jádrové vyhlazování	Klouzavé průměry
Normální rozdělení	x	54	x	x	x
Lognormální rozdělení	x	0	0	0	0
Rozdělení extrémních hodnot	x	52	x	x	x
Rovnoměrné rozdělení	x	54	x	x	x

Z Tab. 35 je vidět, že lineární trend jako jediný u Transformátoru 1 odhadoval pravděpodobný rok dožití. Z rozdělení pravděpodobnosti naopak jako jediné neuspělo lognormální rozdělení. Z hodnot uvedených v Tab. 34 a Tab. 35 je zřejmé, že PRD tohoto zkoumaného stroje byl predikován s uspokojivou přesností. Symbol x je v tabulce opět vyhrazen pro situaci, kdy nebylo možné metodu použít z důvodu nevhodného charakteru dat.

V Tab. 36 a Tab. 37 platí, že PRD u Transformátoru 2 a Transformátoru 3 predikovali kromě lineárního trendu i jádrové vyhlazování a klouzavé průměry. V porovnání s Tab. 34 je však patrné, že nejlepší predikce poskytoval lineární trend v kombinaci se všemi testovanými rozděleními pravděpodobnosti kromě lognormálního.

Tab. 36 Pravděpodobný rok dožití Transformátoru 2

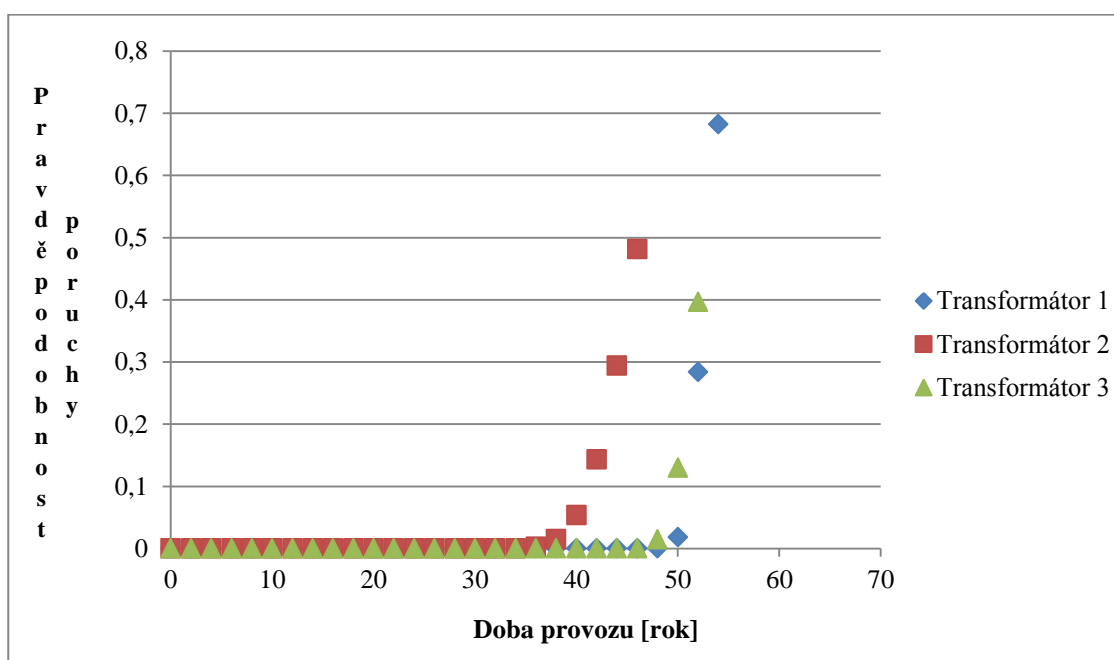
Rozdělení pravděpodobnosti	Mocninný trend	Lineární trend	Exponenciální trend	Jádrové vyhlazování	Klouzavé průměry
Normální rozdělení	x	46	x	18	18
Lognormální rozdělení	x	0	0	0	0
Rozdělení extrémních hodnot	x	44	x	18	18
Rovnoměrné rozdělení	x	46	x	18	20

Drobné rozdíly v predikovaných a skutečných rocích dožití zkoumaných transformátorů jsou zapříčiněny skutečností, že se doba provozu udává v letech. Nezohledňuje se tak rozdíl mezi začátkem a koncem roku. Rok 52 může znamenat 52 let provozu, ale i 53 let provozu bez jednoho dne.

Je zřejmé, že pravděpodobný rok dožití transformátorů v Elektrárně 1 byl určen s celkem uspokojivou přesností. Jeho hodnota se pohybovala kolem 50 let. Na Obr. 23 je pro jednotlivé transformátory znázorněna závislost pravděpodobnosti poruchy na době provozu pro lineární trend a normální rozdělení.

Tab. 37 Pravděpodobný rok dožití Transformátoru 3

Rozdělení pravděpodobnosti	Mocninný trend	Lineární trend	Exponenciální trend	Jádrové vyhlazování	Klouzavé průměry
Normální rozdělení	x	52	x	62	64
Lognormální rozdělení	x	0	0	0	0
Rozdělení extrémních hodnot	x	52	x	66	x
Rovnoměrné rozdělení	x	52	x	62	62



Obr. 23 Vývoj pravděpodobnosti poruchy v závislosti na době provozu u transformátorů pracujících v Elektrárně 1

Pravděpodobnost poruchy byla nejdříve nulová, s blížícím se rokem dožití začala však tato pravděpodobnost prudce stoupat. Z grafu je patrné, že nejdříve se začal zhoršovat stav Transformátoru 2. Stav Transformátoru 1 a Transformátoru 3 se začal zhoršovat ve stejnou dobu, nicméně pravděpodobnost poruchy Transformátoru 3 stoupala rychleji než pravděpodobnost poruchy Transformátoru 1.

### APLIKACE METODY DISTRIBUČNÍCH FUNKCÍ NA TRANSFORMÁTORY PRACUJÍCÍ V ELEKTRÁRNĚ 2 A ELEKTRÁRNĚ 3

Podobně jako u transformátorů pracujících v Elektrárně 1 byla Metoda distribučních funkcí použita pro predikci pravděpodobného roku dožití výkonových olejových transformátorů umístěných v Elektrárně 2 a Elektrárně 3. Jedná se o stroje, které jsou stále v provozu. Není tedy k dispozici jejich skutečný rok dožití a nelze tak porovnat přesnost zde provedených predikcí pravděpodobného roku dožití. Rovněž nejsou k dispozici protokoly o

jejich diagnostických měřeních, není tedy zřejmé, co se s těmito stroji dělo během provozu. Jediným kritériem pro posouzení přesnosti predikcí je informace získaná od obsluhy, že stroje pracující v Elektrárně 2 se nachází na pokraji své plánované životnosti a rok dožití běžného výkonového olejového transformátoru se nachází mezi 30-40 lety provozu. Doba provozu jednotlivých transformátorů v roce 2012 je zachycena v Tab. 38.

Tab. 38 Doba provozu zkoumaných výkonových olejových transformátorů v roce 2012

Transformátor	Doba provozu v roce 2012 [roky provozu]
Transformátor 4	34
Transformátor 5	34
Transformátor 6	19
Transformátor 7	19

Uváží-li se, že zkoumaný Transformátor 4 je v provozu 34 let a nachází se na pokraji své plánované životnosti, měly by se predikce pravděpodobného roku dožití pohybovat někde v rozmezí 30 až 40 let. Z údajů zaznamenaných v Tab. 39 je zřejmé, že za nejlepší predikci pravděpodobného roku dožití lze opět považovat predikci provedenou lineárním trendem v kombinaci s normálním nebo rovnoměrným rozdělením.

Tab. 39 Pravděpodobný rok dožití Transformátoru 4

Rozdělení pravděpodobnosti	Mocninový trend	Lineární trend	Exponenciální trend	Jádrové vyhlazování	Klouzavé průměry
Normální rozdělení	x	40	x	29	1
Lognormální rozdělení	x	x	1	1	1
Rozdělení extrémních hodnot	x	x	x	33	31
Rovnoměrné rozdělení	x	38	x	1	1

Tab. 40 zachycuje predikce pravděpodobného roku dožití Transformátoru 5. Situace je v tomto případě obdobná jako u Transformátoru 4. Jediný smysluplný výsledek byl získán pomocí lineárního trendu a rovnoměrného rozdělení. Nicméně  $PRD=50$  nelze považovat za korektní predikci vzhledem ke skutečnosti, že stroj je v provozu 34 let a nachází se na pokraji své plánované životnosti. U tohoto výkonového olejového transformátoru se tedy nepodařilo úspěšně predikovat pravděpodobný rok dožití. Důvodem byl zřejmě málo početný datový soubor měření ztrátového činitele, který navíc obsahoval spoustu chyb.

Tab. 40 Pravděpodobný rok dožití Transformátoru 5

Rozdělení pravděpodobnosti	Mocninný trend	Lineární trend	Exponenciální trend	Jádrové vyhlazování	Klouzavé průměry
Normální rozdělení	x	x	x	x	x
Lognormální rozdělení	x	x	x	x	x
Rozdělení extrémních hodnot	x	x	x	x	x
Rovnoměrné rozdělení	x	50	x	x	30

Z Tab. 41 je zřejmé, že u Transformátoru 6 se nepodařilo úspěšně predikovat pravděpodobný rok dožití ani v jednom případě. Důvodem byl opět málo početný datový soubor měření ztrátového činitele, který také obsahoval spoustu chyb a překlepů. Malý rozsah souboru měření ztrátového činitele vyplývá ze skutečnosti, že zkoumaný stroj je v provozu teprve 19 let a nachází se tak v plně provozuschopném stavu.

Tab. 41 Pravděpodobný rok dožití Transformátoru 6

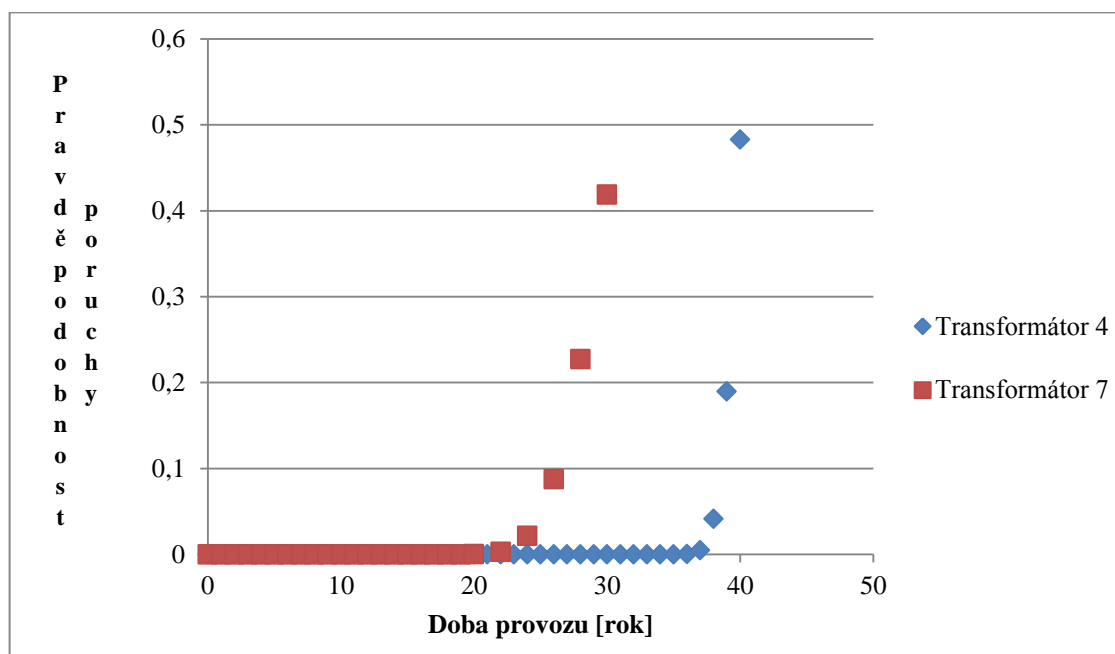
Rozdělení pravděpodobnosti	Mocninný trend	Lineární trend	Exponenciální trend	Jádrové vyhlazování	Klouzavé průměry
Normální rozdělení	0	0	x	0	0
Lognormální rozdělení	0	0	0	0	0
Rozdělení extrémních hodnot	0	0	x	0	0
Rovnoměrné rozdělení	0	0	x	0	0

V Tab. 42 jsou zachyceny predikce pravděpodobného roku dožití Transformátoru 7. Jedná se o stroj, který je stejně jako Transformátor 6 v provozu teprve 19 let. Nicméně některé predikce pravděpodobného roku dožití byly značně úspěšné. Důvodem úspěšných predikcí je zřejmě skutečnost, že i když jsou transformátory v Elektrárně 3 stejně dlouho v provozu, byl Transformátor 7 méně udržován a nebo byl u něj ztrátový činitel měřen přesněji. Nejlepší výsledky opět poskytoval lineární trend v kombinaci s normálním a rovnoměrným rozdělením a rozdělením extrémních hodnot. Lze konstatovat, že pravděpodobný rok dožití Transformátoru 7 se pohybuje kolem hodnoty  $PRD = 30$  let.

Tab. 42 Pravděpodobný rok dožití Transformátoru 7

Rozdělení pravděpodobnosti	Mocninový trend	Lineární trend	Exponenciální trend	Jádrové vyhlazování	Klouzavé průměry
Normální rozdělení	2	30	x	0	0
Lognormální rozdělení	2	0	0	0	0
Rozdělení extrémních hodnot	2	30	x	0	0
Rovnoměrné rozdělení	0	28	x	0	0

Je zřejmé, že pravděpodobný rok dožití Transformátoru 4 a Transformátoru 7 byl určen s celkem uspokojivou přesností. Jeho hodnota se pohybovala v rozmezí 30-40 let. Pravděpodobný rok dožití Transformátoru 5 a Transformátoru 6 se nepodařilo predikovat. Na Obr. 24 je pro Transformátor 4 a Transformátor 7 znázorněna závislost pravděpodobnosti poruchy na době provozu pro lineární trend a normální rozdělení. Pravděpodobnost poruchy byla nejdříve nulová a s blížícím se rokem dožití začala opět prudce stoupat. Z toho lze usuzovat, že pokud nebudou uskutečněna příslušná opatření na provoz Transformátoru 7, bude tento transformátor pracovat bez poruchy kratší dobu než Transformátor 4. Podobně jako u transformátorů pracujících v Elektrárně 1 se pro predikci pravděpodobného roku dožití uplatnil výhradně lineární trend v kombinaci s normálním a rovnoměrným rozdělením a rozdělením extrémních hodnot.



Obr. 24 Vývoj pravděpodobnosti poruchy v závislosti na době provozu u Transformátoru 4 a Transformátoru 7

## APLIKACE METODY DISTRIBUČNÍCH FUNKCÍ NA TRANSFORMÁTORY PRACUJÍCÍ V ELEKTRÁRNĚ 4

Metoda distribučních funkcí byla použita také pro predikci pravděpodobného roku dožití výkonových olejových transformátorů pracujících v Elektrárně 4. Podobně jako u Elektrárny 2 a Elektrárny 3 se jedná o stroje, které jsou stále v provozu. Opět tedy není k dispozici jejich skutečný rok dožití a nelze tak porovnat přesnost zde provedených predikcí pravděpodobného roku dožití. Rovněž nejsou k dispozici protokoly o jejich diagnostických měřeních a není ani znám jejich aktuální stav, popřípadě v jaké fázi plánované životnosti se nachází. Doba provozu jednotlivých transformátorů v roce 2012 je zachycena v Tab. 43. Zde je doba všech tří transformátorů 43 let. Tedy ani skutečnost, že rok dožití běžného výkonového olejového transformátoru se nachází mezi 30 a 40 lety provozu, v tomto případě není vhodné kritérium pro posouzení kvality predikcí pravděpodobného roku dožití.

Tab. 43 Doba provozu výkonových olejových transformátorů pracujících v Elektrárně 4 v roce 2012

Transformátor	Doba provozu v roce 2012 [roky provozu]
Transformátor 8	43
Transformátor 9	43
Transformátor 10	43

V Tab. 44 jsou zaznamenány predikce pravděpodobného roku dožití Transformátoru 8. Z porovnání s hodnotami uvedenými v Tab. 43 je zřejmé, že tyto predikce nebyly úspěšné a pro kvalitní rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti tohoto výkonového olejového transformátoru je nelze použít. Pravděpodobný rok dožití byl predikován až za dalších 30 let provozu, což je značně nepravděpodobné.

Tab. 44 Pravděpodobný rok dožití Transformátoru 8

Rozdělení pravděpodobnosti	Mocninový trend	Lineární trend	Exponenciální trend	Jádrové vyhlazování	Kluzavé průměry
Normální rozdělení	x	74	x	0	0
Lognormální rozdělení	x	0	2	0	0
Rozdělení extrémních hodnot	x	76	x	2	0
Rovnoměrné rozdělení	x	72	x	0	0

Z údajů zachycených v Tab. 45 a Tab. 46 je vidět, že pravděpodobný rok dožití zbylých dvou transformátorů pracujících v Elektrárně 4 byl predikován stejně jako v prvním případě v době někdy po sedmdesáti letech provozu. Ani tyto predikce tedy nelze uvažovat při rozboru dvoustavové odhadované spolehlivosti. Důvodem tak časově vzdálené predikce pravděpodobného roku dožití všech tří zkoumaných strojů je zřejmě jejich dobrý stav. Hodnoty ztrátového činitele zatím nepoukazují na skutečnost, že by se stroje mohly v blízké

době dostat do poruchového stavu. Dalším důvodem může být skutečnost, že se u těchto strojů rozvíjí porucha, kterou nelze pomocí hodnot ztrátového činitele odhalit.

Tab. 45 Pravděpodobný rok dožití Transformátoru 9

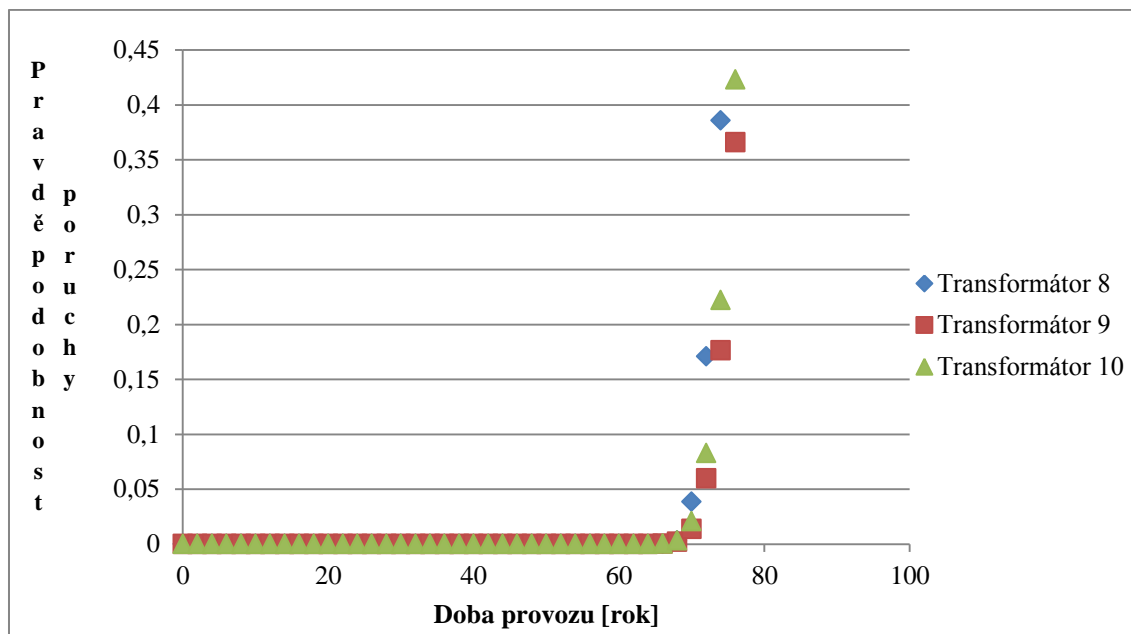
Rozdělení pravděpodobnosti	Mocninný trend	Lineární trend	Exponenciální trend	Jádrové vyhlazování	Klouzavé průměry
Normální rozdělení	x	74	x	x	4
Lognormální rozdělení	x	0	0	x	0
Rozdělení extrémních hodnot	x	x	x	x	8
Rovnoměrné rozdělení	x	72	x	x	4

Je zřejmé, že pravděpodobný rok dožití transformátorů pracujících v Elektrárně 4 se nepodařilo určit s uspokojivou přesností. Jeho hodnota se pohybovala v rozmezí 72-78 let provozu. Podobně jako v předešlých případech u transformátorů pracujících ve vodních elektrárnách se však pro predikci pravděpodobného roku dožití uplatnil výhradně lineární trend v kombinaci s normálním a rovnoměrným rozdělením a rozdělením extrémních hodnot.

Tab. 46 Pravděpodobný rok dožití Transformátoru 10

Rozdělení pravděpodobnosti	Mocninný trend	Lineární trend	Exponenciální trend	Jádrové vyhlazování	Klouzavé průměry
Normální rozdělení	x	76	x	x	10
Lognormální rozdělení	x	0	0	x	0
Rozdělení extrémních hodnot	x	78	x	x	10
Rovnoměrné rozdělení	x	74	x	x	0

Na Obr. 25 je pro zde zkoumané transformátory opět znázorněna závislost pravděpodobnosti poruchy na době provozu pro lineární trend a normální rozdělení. Pravděpodobnost poruchy byla opět nejdříve nulová a po určité době provozu začala prudce stoupat. Nejdříve se zřejmě začne zhoršovat stav Transformátoru 8. Stav Transformátoru 9 a Transformátoru 10 se začne zhoršovat ve stejnou dobu, nicméně u Transformátoru 10 bude toto zhoršení výraznější než u Transformátoru 9.



Obr. 25 Vývoj pravděpodobnosti poruchy v závislosti na době provozu u transformátorů pracujících v Elektrárně 4

Provedené predikce pravděpodobného roku dožití celkem 10 zkoumaných výkonových olejových transformátorů byly úspěšně provedeny v pěti případech (Transformátor 1, Transformátor 2, Transformátor 3, Transformátor 4 a Transformátor 7). Ve třech dalších případech (Transformátor 8, Transformátor 9, Transformátor 10) o přesnosti predikce nelze rozhodnout, protože nejsou k dispozici žádné informace o stavu ani historii provozu zkoumaných strojů. Pouze ve dvou případech (Transformátor 5 a Transformátor 6) se nepodařilo pravděpodobný rok dožití predikovat. Důvodem byl nedostatečný počet vstupních dat, která navíc obsahovala spoustu chyb a nepřesností. Nejvhodnější metodou pro odhad trendové složky hodnot ztrátového činitele se pro Metodu distribučních funkcí ukázal lineární trend. Naopak jako nevhodné rozdělení pravděpodobnosti používané pro potřeby Metody distribučních funkcí se projevilo lognormální rozdělení. Zbylá tři rozdělení jsou v rámci této neinvazivní metody rozboru dvoustavové odhadované spolehlivosti téměř rovnocenná.

### 2.3.5 RL 1.0

Na základě metody distribučních funkcí byl v rámci této disertační práce vytvořen software RL 1.0. Software byl navržen v prostředí Matlab R2009b a je určen pro predikci pravděpodobného roku dožití výkonových olejových transformátorů. Software RL 1.0 používá k odhadu trendové složky hodnot ztrátového činitele metodu lineárního trendu. Tato metoda byla vybrána na základě testů provedených v předešlé kapitole této disertační práce. Pracovní okno navrženého softwaru je zachyceno na Obr. 26 a celý software lze opět nalézt v **Příloha 19 - Vytvořené softwary a spolehlivostní modul Transformer Reliability Assessment.**

Obr. 26 Pracovní okno softwaru RL 1.0

### VSTUPNÍ PARAMETRY SOFTWARE

Do softwaru se zadává počet vinutí transformátoru, číslo 2 reprezentuje dvouvinutové a číslo 3 třívinutové transformátory. Dále je nutné zadat kritický poměr ztrátového činitele, který by měl být zadán podle technických norem určených pro diagnostiku výkonových olejových transformátorů. Musí se zadat také směrná hodnota pravděpodobnosti poruchy, jejíž hodnotu je vhodné konzultovat s provozovatelem zkoumaného stroje a s odborníky, kteří se zabývají diagnostikou výkonových olejových transformátorů. Do názvu vstupního souboru se zadává název textového souboru vytvořeného v poznámkovém bloku ve formátu *název.txt*. V tomto souboru je jeden sloupec hodnot složený z časů diagnostických šetření zkoumaného stroje a pak sloupce měření ztrátového činitele pro různá zapojení měřicích přístrojů. Každý sloupec představuje jedno zapojení měřicích přístrojů. Jednotlivá zapojení včetně sloupce časů jsou oddělena mezerou. Tento soubor musí být uložen ve stejné složce jako spouštěcí soubor RL.m. Dále je nutné zadat počet měřených zapojení. Tento počet musí odpovídat počtu zapojení uložených do vstupního textového souboru. U dvouvinutových transformátorů se měří většinou 6 zapojení (V:K, V:N+K,...) a na pořadí těchto zapojení nezáleží. V posledním kroku se volí typ rozdělení pravděpodobnosti, kterým se odhadnou hodnoty ztrátového činitele v jednom roce měření pro různá zapojení.

### VÝSTUPNÍ PARAMETRY SOFTWARE

Výstupem programu jsou pravděpodobné roky dožití a pravděpodobnosti poruchy pro jednotlivá rozdělení, které se vypíší do pracovního okna softwaru Matlab R2009b.

### PREDIKCE PRAVDĚPODOBNEHO ROKU DOŽITÍ ZKOUMANÝCH VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ SOFTWAREM RL 1.0

Software RL 1.0 byl použit k predikování pravděpodobného roku dožití všech deseti výkonových olejových transformátorů prezentovaných v kapitole 2.1 předkládané disertační práce. Výsledky této analýzy korespondují s výsledky uvedenými v souvislosti s Metodou distribučních funkcí a jsou zaznamenány v Tab. 47.

Tab. 47 Predikce pravděpodobného roku dožití pomocí softwaru RL 1.0

Transformátor	Normální rozdělení	Lognormální rozdělení	Rozdělení extrémních hodnot	Rovnoměrné rozdělení
Transformátor 1	54	0	52	54
Transformátor 2	46	0	44	46
Transformátor 3	52	0	52	52
Transformátor 4	40	x	x	38
Transformátor 5	x	x	x	50
Transformátor 6	0	0	0	0
Transformátor 7	30	0	30	28
Transformátor 8	74	0	76	72
Transformátor 9	74	0	x	72
Transformátor 10	76	0	78	74

#### 2.3.6 SPOLEHLIVOSTNÍ MODELY

Tato neinvazivní metoda rozboru dvoustavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů vychází z teorie prezentované v **Příloha 3 - Matematické modely ve spolehlivosti** a **Příloha 4 - Faktorová analýza** předkládané disertační práce. U zde zkoumaných transformátorů byly funkční spolehlivostní charakteristiky odhadovány následujícími sedmi modely:

- Empirický spolehlivostní model,
- Model MIT,
- Model KIT,
- Coxův model pro necenzorovaná data,
- Coxův model pro cenzorovaná data,
- Coxův model v kombinaci s faktorovou analýzou pro necenzorovaná data,
- Coxův model v kombinaci s faktorovou analýzou pro cenzorovaná data.

#### PŘÍZPUSOBNÍ DAT ZÍSKANÝCH Z OFF-LINE DIAGNOSTICKÝCH MĚŘENÍ VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Vstupní data spolehlivostních modelů používaných v této části disertační práce mají charakter souborů dob do poruchy výkonových olejových transformátorů. Protože data uvedeného typu nejsou k dispozici, je nutné za tímto účelem přizpůsobit off-line diagnostická měření deseti zde zkoumaných výkonových olejových transformátorů. K tomu se využívají všechny měřené diagnostické veličiny tak, že se nejdříve odhadne jejich trend. Za tímto účelem se použije metoda klouzavých průměrů v kombinaci s proložením polynomem

druhého stupně, která v kapitole 2.2 předkládané disertační práce dosahovala nejlepších výsledků. Lze tak předpokládat, že trend bude odhadnut s uspokojivou přesností a nedojde ke ztrátě ani zkreslení informací obsažených ve zkoumaných časových řadách.

V kapitole 2.2 bylo rovněž ukázáno, že časové řady diagnostických veličin výkonových olejových transformátorů lze předpokládat ve zjednodušeném aditivním dekompozičním modelu. Necht' časová řada diagnostické veličiny DV se označí symbolem  $Y_t^{DV}$ , její trendová složka symbolem  $Tr_t^{DV}$  a chybová složka symbolem  $E_t^{DV}$ . V dalším kroku transformace dat do podoby vhodné pro spolehlivostní modely se odhadne chybová složka jednotlivých časových řad podle vztahu:

$$E_t^{DV} = Y_t^{DV} - Tr_t^{DV}.$$

Chybová složka  $E_t^{DV}$  je vlastně náhodná veličina. Dále je tedy nutné odhadnout její rozdělení pravděpodobnosti včetně příslušných parametrů. K tomu lze použít  $\chi^2$ -test dobré shody, který je možné nalézt například v [18]. U výkonových olejových transformátorů řešených v předkládané disertační práci vycházelo pouze normální nebo rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti. Platí tedy, že

$$E_t^{DV} \sim N(\mu, \sigma^2) \text{ nebo } E_t^{DV} \sim Ro(a, b).$$

V dalším se bude předpokládat, že chybová složka má normální rozdělení s parametry  $\mu$  a  $\sigma^2$ . Pro rovnoměrné rozdělení je postup zcela analogický. Nyní se použije generátor náhodných čísel pro normální rozdělení  $N(\mu, \sigma^2)$  a vygeneruje se dostatečný počet čísel  $e_1^{DV}, e_2^{DV}, e_3^{DV}, \dots$ . Do rovnice trendu se dosadí časy  $t_1 = 2, t_2 = 4, t_3 = 6, \dots$  pro dvouvinuťové transformátory a časy  $t_1 = 1, t_2 = 2, t_3 = 3, \dots$  pro třívinuťové transformátory. Získají se tak časové řady diagnostických veličin, které přesně kopírují jejich trend:

$$Tr_t^{DV}(t_1), Tr_t^{DV}(t_2), Tr_t^{DV}(t_3), \dots$$

K těmto časovým řadám se potom přičtou příslušné chyby  $e_1^{DV}, e_2^{DV}, e_3^{DV}, \dots$  a vznikne tak nová časová řada, jejíž realizaci tvoří posloupnost hodnot příslušné diagnostické veličiny DV měřené po dvou letech pro dvouvinuťové a po jednom roce pro třívinuťové výkonové olejové transformátory. Takto nasimulované diagnostické veličiny DV tvoří novou databázi, na základě které se odhadnou doby do poruchy výkonových olejových transformátorů stejného typu, jako byl původní stroj.

Doby do poruchy se odhadují pomocí hodnot plynů rozpuštěných v izolačním oleji transformátorů. Podle vztahu uvedeného v kapitole 2.3 této práce se spočítá pravděpodobnost, že aspoň jeden z plynů uvedených v Tab. 7 překročí svou kritickou hodnotu zaznamenanou v téže tabulce. Jedná se vlastně o pravděpodobnost zahájení vyhodnocení stavu stroje podle ČSN a Duvalovy metody, kdy se uvnitř transformátoru blíže nespecifikovaná porucha vyskytuje. Pokud je tato pravděpodobnost větší než 0,8, tak se čas měření těchto plynů zaznamená a považuje se za dobu do poruchy. Tímto způsobem se nasimuluje celkem 30 dob do poruchy, které se potom analyzují příslušnými spolehlivostními modely.

Protože Coxův model lze aplikovat na cenzorovaná i necenzorovaná data, je z uvedených třiceti hodnot dvacet necenzorovaných a deset cenzorovaných. Cenzuruje se počtem a to tak, že 20 měření v době poruchy se nasimuluje zde uvedeným postupem a první cenzorované měření se získá nasimulováním nové databáze, z níž se vezme měření v čase poslední necenzorované poruchy bez ohledu na hodnotu pravděpodobnosti zahájení vyhodnocení stavu

transformátoru. Nelze tak říci, jestli se porucha v transformátoru vyskytovala nebo nevyskytovala. Tento postup se opakuje ještě devětkrát pro zbylá cenzorovaná měření.

Uvedeným postupem bylo simulováno celkem deset souborů dob do poruchy včetně měření všech diagnostických veličin v čase jednotlivých dob do poruchy. Vycházelo se z off-line diagnostických měření výkonových olejových transformátorů zkoumaných v této disertační práci. Podařilo se však vytvořit pouze 7 z nich. Z měření Transformátoru 2, Transformátoru 5 a Transformátoru 7 nešlo příslušné soubory nasimulovat. Z důvodu nízké variability hodnot některých diagnostických veličin, nebylo možné u všech strojů k odhadu trendu dat získaných z off-line měření použít metodu jádrového vyhlazování v kombinaci s proložením polynomem druhého stupně. U Transformátoru 4, Transformátoru 7, Transformátoru 8, Transformátoru 9 a Transformátoru 10 byla trendová složka časových řad odhadována metodou lineárního trendu. Každý vytvořený soubor měl podobu následující matice:

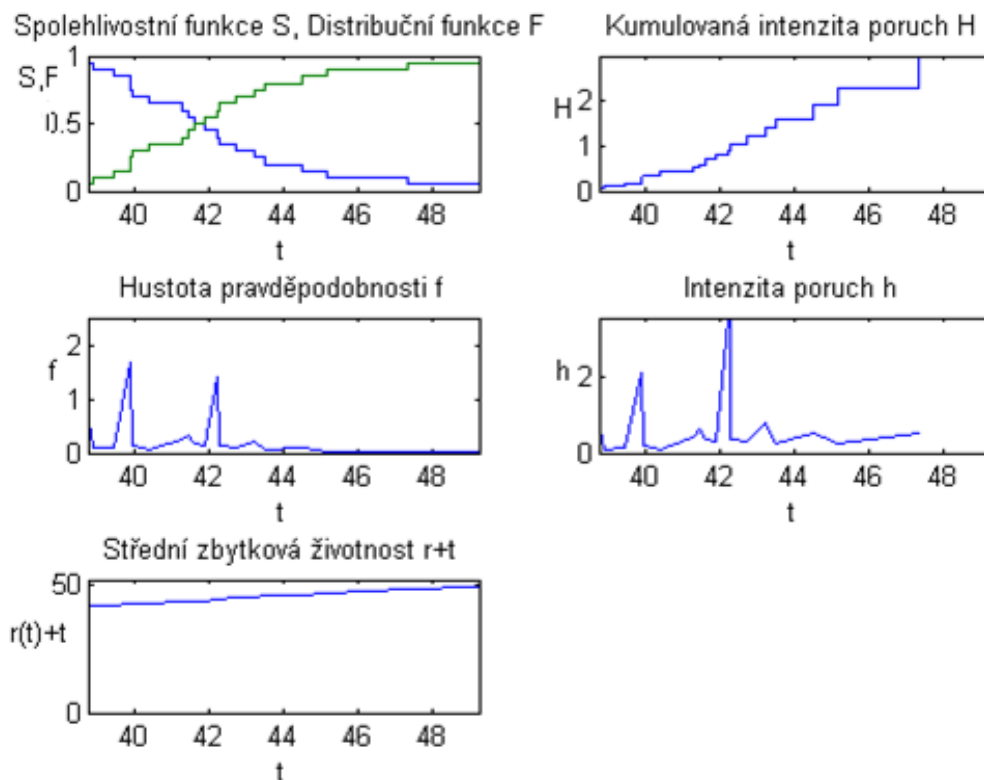
$$\begin{pmatrix} T_1 & 0 & DV_{1,1} & \cdots & DV_{1,p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{30} & 1 & DV_{30,1} & \cdots & DV_{30,p} \end{pmatrix},$$

kde první sloupec tvořily doby do poruchy, druhý sloupec obsahoval informace, zda se jednalo o cenzorované nebo necenzorované pozorování,  $DV_{i,j}$  představoval hodnotu diagnostické veličiny  $j$  při  $i$ -té poruše a  $p$  značil počet diagnostických veličin. Všechny časy odhadované v následujících kapitolách byly odečteny z vytvořených grafů, a tudíž se jednalo pouze o orientační hodnoty, nikoliv o přesné odhady.

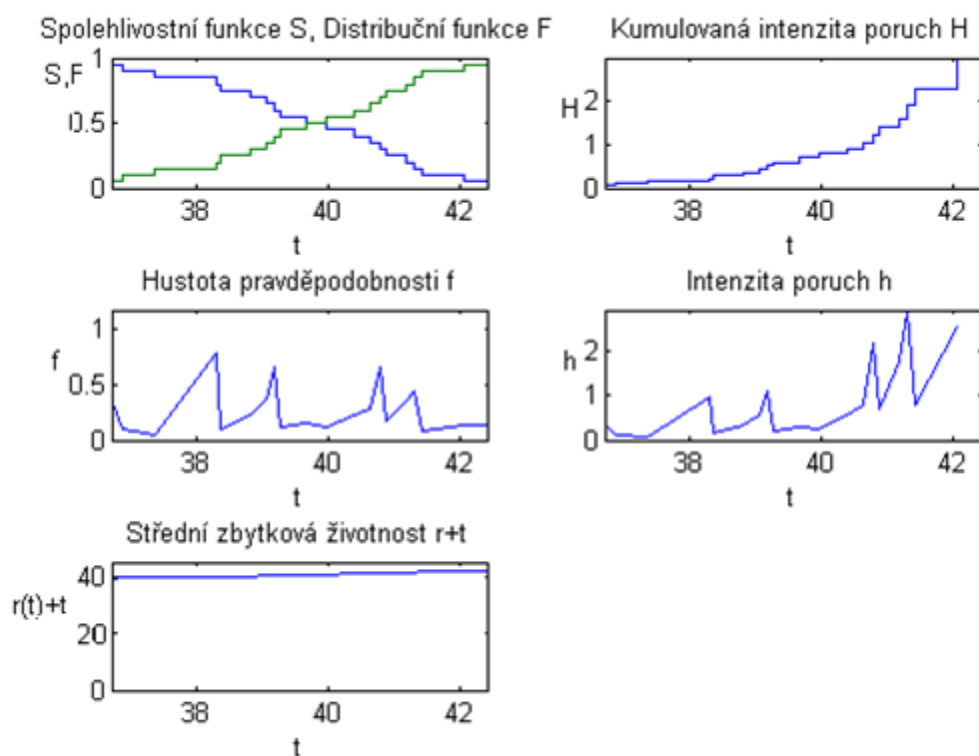
### EMPIRICKÉ SPOLEHLIVOSTNÍ CHARAKTERISTIKY ZKOUMANÝCH VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

U datových souborů popsaných v předcházející části byly spočítány empirické funkční spolehlivostní charakteristiky. V souladu s teorií, která je uvedena v **Příloha 3 - Matematické modely ve spolehlivosti**, byly tyto charakteristiky odhadovány pouze z necenzorovaných dob do poruchy. Získané výsledky shrnují následující obrázky.

Na Obr. 27 a Obr. 28 jsou zachyceny empirické spolehlivostní charakteristiky výkonových olejových transformátorů pracujících v Elektrárně 1. V Tab. 34 je zaznamenán skutečný rok dožití Transformátoru 1 54 let a Transformátoru 3 52 let. Z grafů střední zbytkové životnosti je zřejmé, že u Transformátoru 1 se střední zbytková životnost v čase  $t = 48$  let pohybuje kolem hodnoty 50 let. Lze tedy říci, že po 48 letech provozu je predikován pravděpodobný rok dožití tohoto stroje kolem roku 50. Od této doby graf střední zbytkové životnosti téměř nestoupá, stroj tedy od 48 let provozu pracoval na pokraji své plánované životnosti. Je zřejmé, že Transformátor 3 byl provozován na pokraji své plánované životnosti od 40 let provozu, protože podle grafu střední zbytkové životnosti tohoto stroje je ve 40 letech provozu predikován pravděpodobný rok dožití právě na 40 let provozu. Z grafů spolehlivostních funkcí vyplývá následující skutečnost. Pravděpodobnost, že se stroj porouchá, je vyšší než pravděpodobnost, že se neporouchá od času  $t = 42$  let provozu pro Transformátor 1 a od času  $t = 40$  let provozu pro Transformátor 3. Intenzita poruch Transformátoru 1 vykazuje extrémní hodnoty v časech kolem  $t = 40$  a  $t = 42$  let provozu, kdy byl tedy Transformátor 1 provozován se značným rizikem. Analogicky lze odvodit, že Transformátor 3 byl se značným rizikem provozován v časech  $t = 38$ ,  $t = 39$ ,  $t = 41$  a  $t = 42$  let provozu.

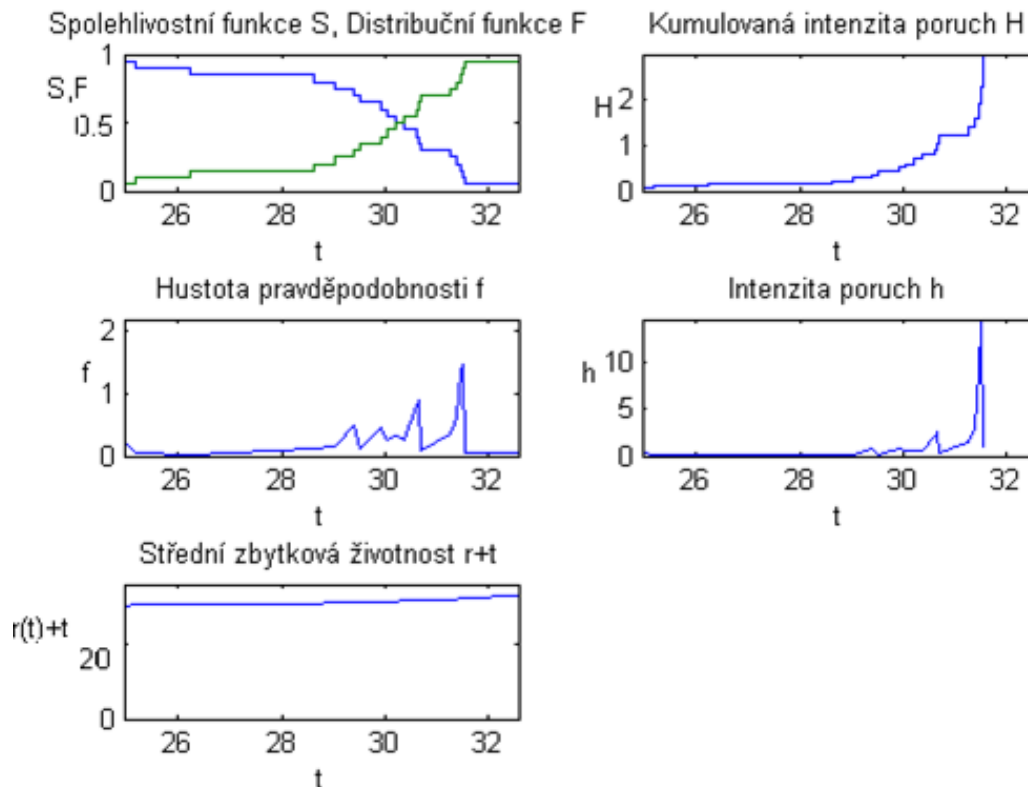


Obr. 27 Empirické spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 1

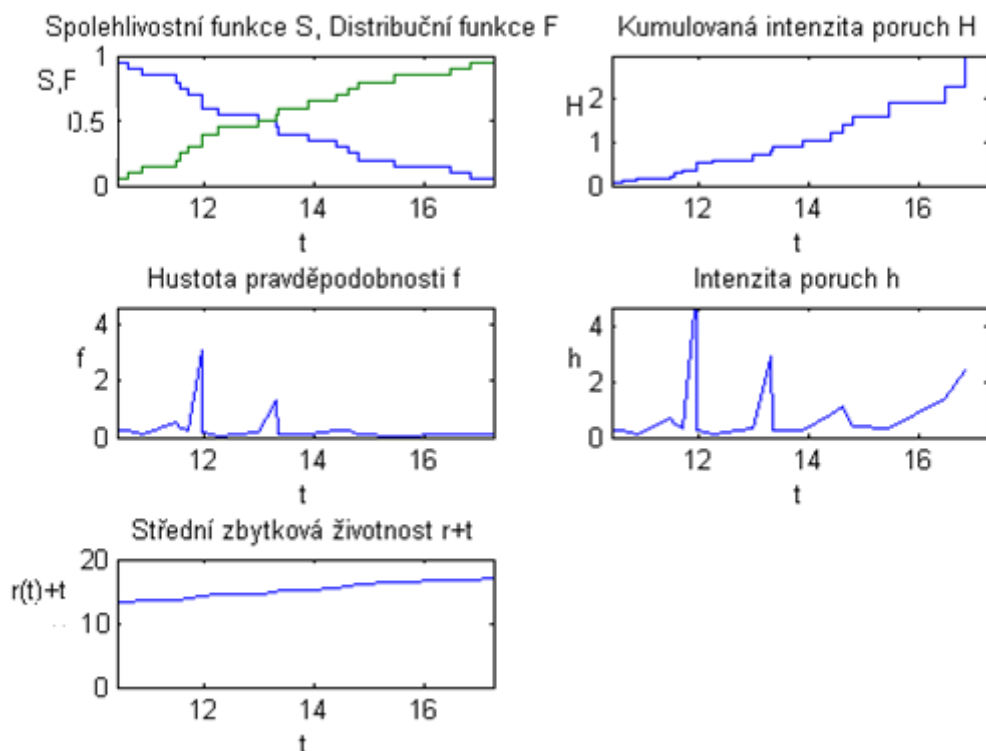


Obr. 28 Empirické spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 3

Na Obr. 29 a Obr. 30 jsou zachyceny empirické spolehlivostní charakteristiky výkonových olejových transformátorů pracujících v Elektrárně 2 a Elektrárně 3. Transformátor 4 je v provozu již 34 let a Transformátor 7 19 let. O stavu prvně zmíněného transformátoru je známo, že se v současné době nachází na pokraji své plánované životnosti. Z grafů střední zbytkové životnosti je zřejmé, že u Transformátoru 4 se střední zbytková životnost v čase  $t = 32$  let pohybuje kolem hodnoty 32 let. Toto zjištění přímo koresponduje právě s výše zmíněnou skutečností, že je tento stroj v současné době provozován na pokraji své plánované životnosti. Lze tedy říci, že pravděpodobný rok dožití je v tomto případě predikován na rok 2012. Sklon křivky v grafu střední zbytkové životnosti Transformátoru 7 je daleko strmější, než tomu bylo v případě Transformátoru 4. Transformátor 7 se tedy v současné době nenachází na pokraji své plánované životnosti. Nicméně v roce  $t = 16$  let provozu je hodnota střední zbytkové životnosti 18 let. Na základě tohoto ukazatele by bylo vhodné stroj odstavit z provozu a podrobit ho důkladné kontrole. Z grafů spolehlivostních funkcí vyplývá následující skutečnost. Pravděpodobnost, že se stroj porouchá, je vyšší než pravděpodobnost, že se neporouchá od času  $t = 30$  let provozu pro Transformátor 4 a od času  $t = 13$  let provozu pro Transformátor 7. Intenzita poruch Transformátoru 4 vykazuje extrémní hodnotu v čase kolem  $t = 31$  a podobně pro Transformátor 7 v časech  $t = 12$  a  $t = 13$  let provozu. V těchto časech byly tedy zmíněné stroje provozovány se značným rizikem.



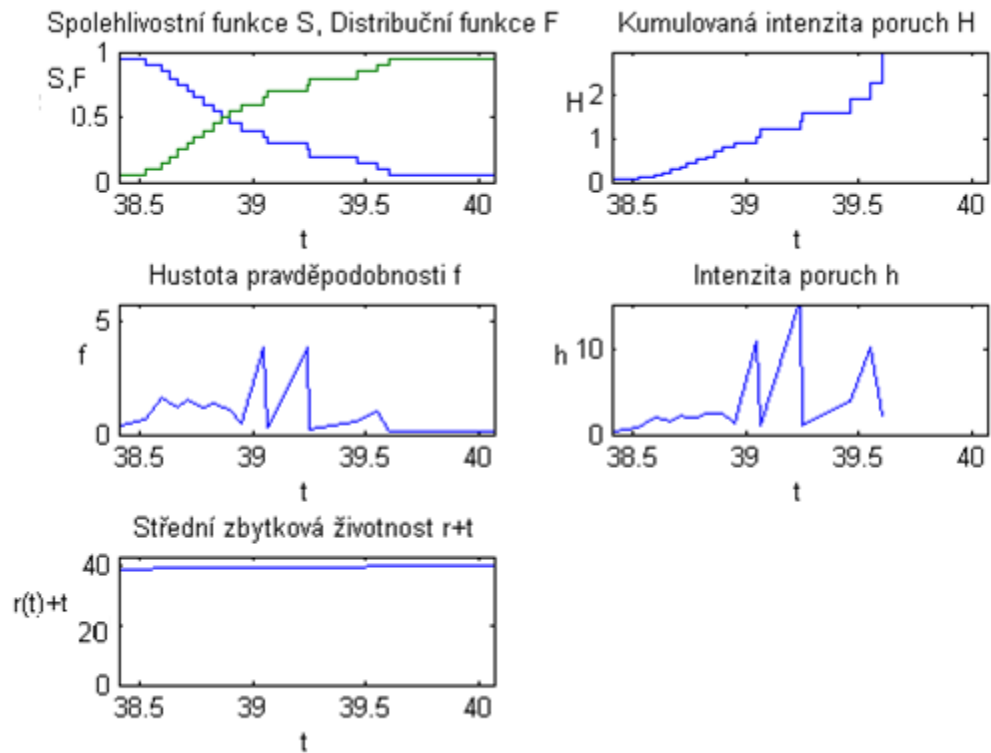
Obr. 29 Empirické spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 4



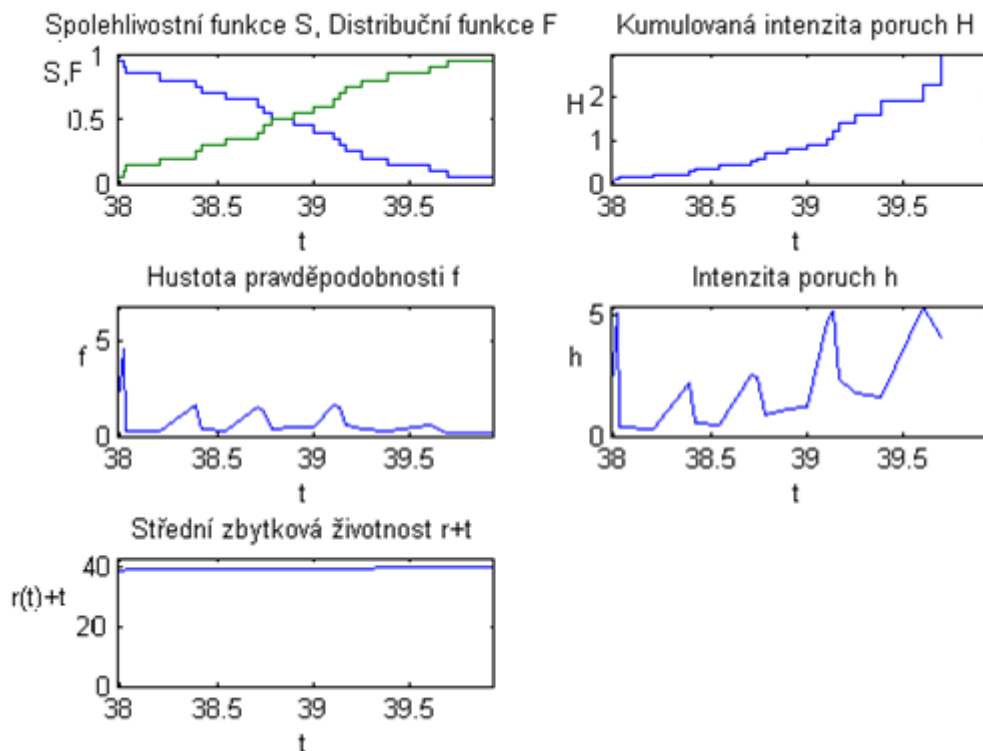
Obr. 30 Empirické spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 7

Na Obr. 31, Obr. 32 a Obr. 33 jsou zachyceny empirické spolehlivostní charakteristiky výkonových olejových transformátorů pracujících v Elektrárně 4. Transformátory zde pracují již 43 let a o jejich stavu není v současné době k dispozici žádná informace. Ze sklonů křivek v grafech středních zbytkových životností je zřejmé, že všechny tři transformátory jsou provozovány na pokraji své plánované životnosti. Zmíněné křivky jsou téměř rovnoběžné s časovou osou. Lze tedy podobně jako v předešlém případě konstatovat, že pravděpodobný rok dožití zkoumaných transformátorů je predikován na rok 2012. Na základě tohoto zjištění je vhodné stroje odstavit z provozu a podrobit je důkladné kontrole. Podle spolehlivostních funkcí je pravděpodobnost, že se stroj porouchá vyšší než pravděpodobnost, že se neporouchá od času  $t = 39$  let provozu pro všechny transformátory. Intenzita poruch pro Transformátor 8 vykazuje extrémní hodnoty od času kolem  $t = 39$  a pro Transformátor 9 a Transformátor 10 od času  $t = 38$  let provozu. Je tedy zřejmé, že od těchto časů byly zmíněné stroje provozovány se značným rizikem.

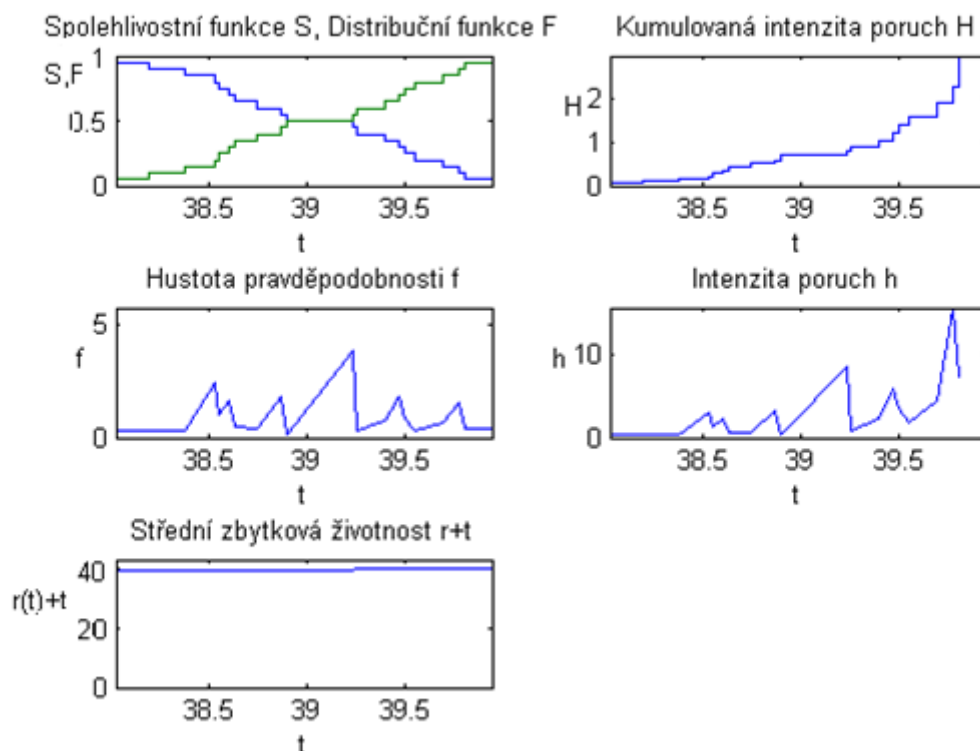
Podle empirických spolehlivostních charakteristik se všech sedm zkoumaných výkonových olejových transformátorů nachází na pokraji své plánované životnosti. V nejhorsím stavu se nachází zřejmě transformátory pracující v Elektrárně 4. Tuto skutečnost dokládá nízký sklon křivky střední zbytkové životnosti a velký počet extrémních hodnot v grafu intenzity poruch zmíněných strojů. U transformátorů umístěných v Elektrárně 1 odpovídaly odhadnuté empirické spolehlivostní charakteristiky skutečnému roku dožití zkoumaných strojů.



Obr. 31 Empirické spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 8



Obr. 32 Empirické spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 9



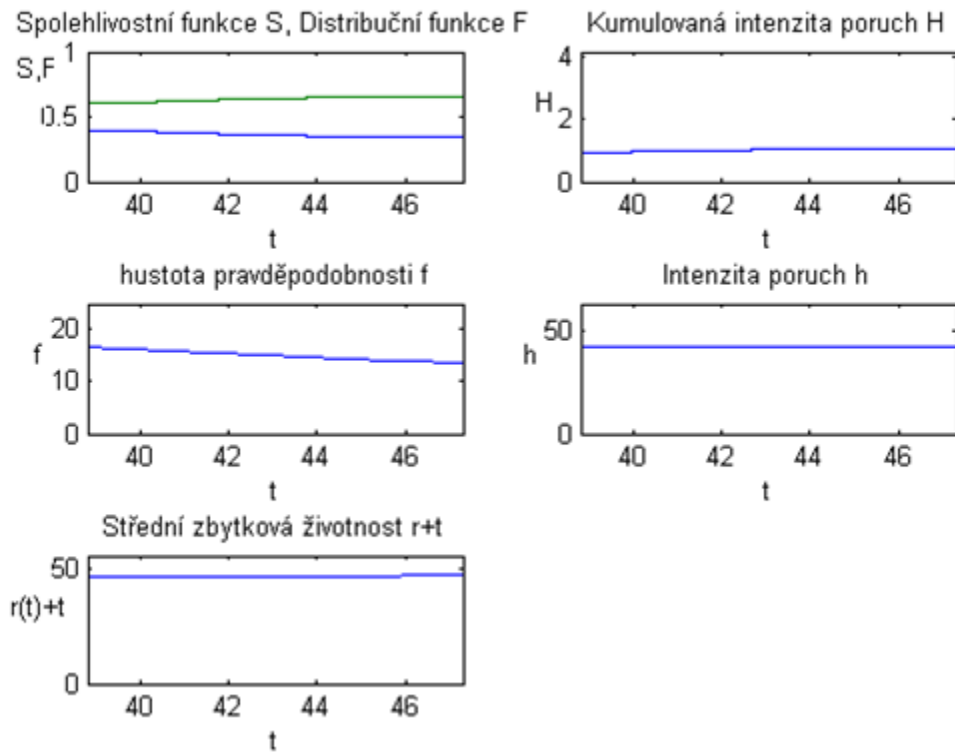
Obr. 33 Empirické spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 10

### SPOLEHLIVOSTNÍ CHARAKTERISTIKY ZKOUMANÝCH VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ ODHADNUTÉ MODELEM KIT

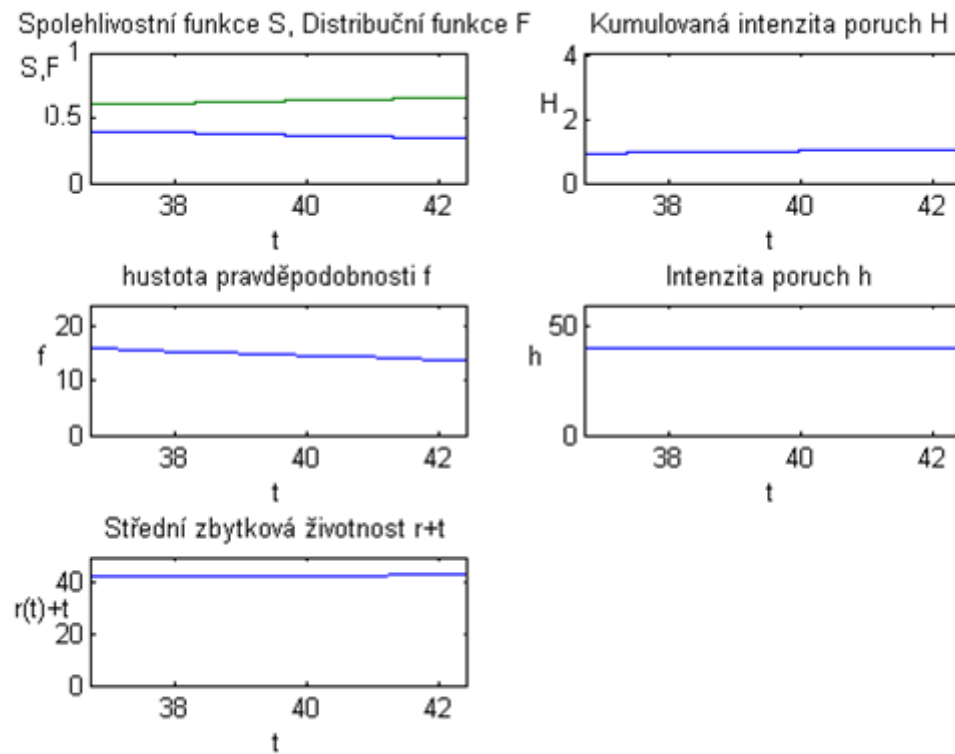
Funkční spolehlivostní charakteristiky byly u nasimulovaných datových souborů spočítány také prostřednictvím modelu KIT. V souladu s teorií, která je uvedena v **Příloha 3 - Matematické modely ve spolehlivosti**, byly tyto charakteristiky odhadovány pouze z necenzorovaných dob do poruchy. Výsledky opět shrnují následující obrázky.

Na Obr. 34 a Obr. 35 jsou zachyceny funkční spolehlivostní charakteristiky výkonových olejových transformátorů pracujících v Elektrárně 1. Z grafů spolehlivostních funkcí vyplývá následující skutečnost. Pravděpodobnost, že se oba stroje porouchají, je vyšší než pravděpodobnost, že se neporouchají od počátku provozu až do času  $t = 40$  let provozu. Spolehlivostní funkce měly v obou případech téměř konstantní průběh, což je v zásadním rozporu s výsledky empirického modelu. Je zřejmé, že model KIT je pro odhad spolehlivostních charakteristik těchto strojů nevhodný. Tento závěr je zcela logický a vyplývá ze skutečnosti, že oba transformátory se nachází na pokraji své plánované životnosti a model KIT charakterizuje především stroje ve střední oblasti vanové křivky. V této oblasti se nachází stroje, které pracují daleko před koncem své plánované životnosti a jejichž intenzita poruch je konstantní. I když grafy střední zbytkové životnosti mají podobný průběh jako u empirického modelu, nelze je v tomto případě při rozboru dvoustavové odhadované spolehlivosti uvažovat.

Uvedené závěry jsou totožné pro všechny zbývající zkoumané výkonové olejové transformátory. Grafy jejich funkčních spolehlivostních charakteristik lze nalézt v **Příloha 13 - Grafy funkčních spolehlivostních charakteristik zkoumaných výkonových olejových transformátorů vytvořené modelem KIT**.



Obr. 34 Spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 1 odhadnuté modelem KIT



Obr. 35 Spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 3 odhadnuté modelem KIT

**SPOLEHLIVOSTNÍ CHARAKTERISTIKY ZKOUMANÝCH VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ ODHADNUTÉ MODELEM MIT**

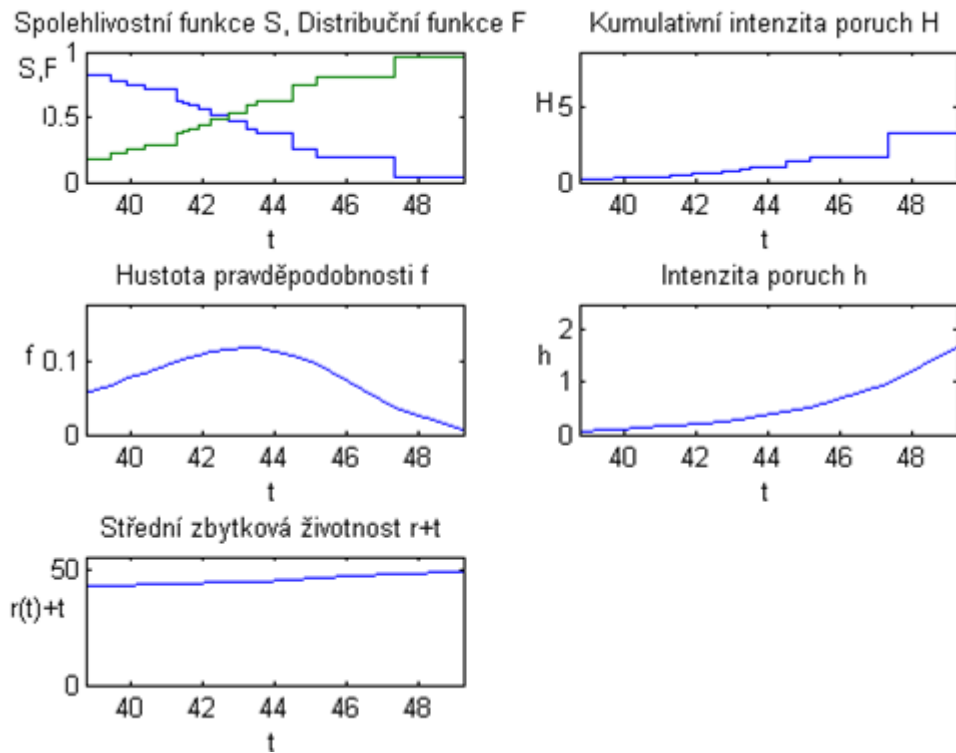
Funkční spolehlivostní charakteristiky byly u nasimulovaných datových souborů spočítány také prostřednictvím modelu MIT. Podobně jako v předcházejících případech byly tyto charakteristiky odhadovány pouze z necenzorovaných dob do poruchy a výsledky opět shrnují následující obrázky.

Na Obr. 36 a Obr. 37 jsou zachyceny spolehlivostní charakteristiky výkonových olejových transformátorů pracujících v Elektrárně 1. Spolehlivostní charakteristiky byly nyní odhadnuty modelem MIT. Tento model je vhodné aplikovat na stroje, které se nachází ve třetím úseku vanové křivky. Jedná se o stroje pracující na pokraji své plánované životnosti. Lze tedy předpokládat, že modelem MIT budou funkční spolehlivostní charakteristiky zde zkoumaných výkonových olejových transformátorů odhadnuty s uspokojivou přesností. Z grafů střední zbytkové životnosti je zřejmé, že u Transformátoru 1 se střední zbytková životnost v čase  $t = 48$  let pohybuje kolem hodnoty 50 let. Lze tedy říci, že po 48 letech provozu je predikován pravděpodobný rok dožití tohoto stroje kolem roku 50. Od této doby graf střední zbytkové životnosti téměř nestoupá, stroj tedy od 48 let provozu pracoval na pokraji své plánované životnosti. Dále je zřejmé, že Transformátor 3 byl provozován na pokraji své plánované životnosti od 40 let provozu, protože podle grafu střední zbytkové životnosti tohoto stroje je ve 40 letech provozu predikován pravděpodobný rok dožití právě na 40 let provozu. Z grafů spolehlivostních funkcí vyplývá následující skutečnost. Pravděpodobnost, že se stroj porouchá, je vyšší než pravděpodobnost, že se neporouchá od času  $t = 42$  let provozu pro Transformátor 1 a od času  $t = 40$  let provozu pro Transformátor 3. Intenzita poruch prudce stoupá od času  $t = 44$  let provozu pro Transformátor 1 a od času  $t = 40$  let provozu pro Transformátor 3. Od těchto časů byly tedy oba stroje provozovány se značným rizikem.

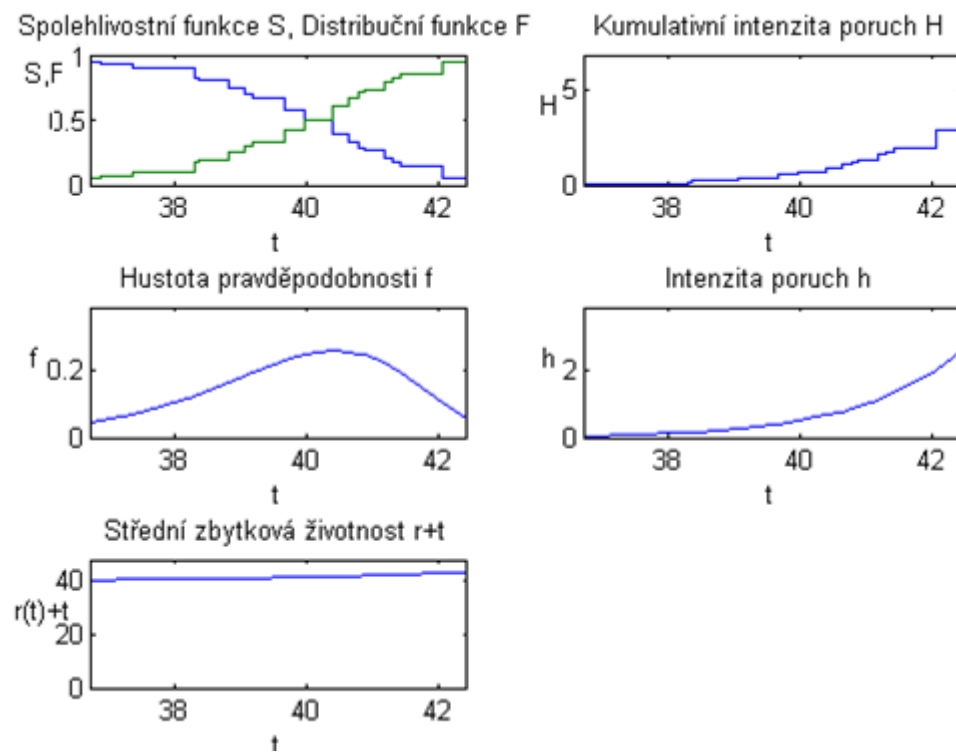
Z předchozího textu a ze závěrů uvedených u empirického modelu je zřejmé, že model MIT a empirický model poskytovaly shodné výsledky pro výkonové olejové transformátory pracující v Elektrárně 1. Z porovnání Obr. 27 a Obr. 36 vyplývá skutečnost, že oba obrázky se liší v průběhu grafů hustoty pravděpodobnosti, intenzity poruch a kumulované intenzity poruch. Nicméně průběh dvou nejvíce vypovídajících spolehlivostních charakteristik (spolehlivostní funkce a střední zbytkové životnosti) je téměř totožný. Naprosto stejná situace se projevila při porovnávání Obr. 28 a Obr. 37.

Při odhadování spolehlivostních charakteristik zbylých zkoumaných výkonových olejových transformátorů modelem MIT byly odhaleny stejné závěry jako u transformátorů pracujících v Elektrárně 1. Odhady spolehlivostních funkcí a středních zbytkových životností těchto strojů byly shodné jako odhady stanovené empirickým modelem a lze je nalézt v **Příloha 14 - Grafy funkčních spolehlivostních charakteristik zkoumaných výkonových olejových transformátorů vytvořené modelem MIT.**

Stejně jako u empirického modelu se podle spolehlivostních charakteristik odhadnutých modelem MIT nachází všech sedm zkoumaných výkonových olejových transformátorů na pokraji své plánované životnosti. V nejhorším stavu pracují zřejmě transformátory umístěné v Elektrárně 4. Tuto skutečnost dokládá nízký sklon křivky střední zbytkové životnosti a velký počet extrémních hodnot v grafu intenzity poruch zmíněných strojů. U transformátorů umístěných v Elektrárně 1 odpovídaly spolehlivostní charakteristiky odhadnuté modelem MIT skutečnému roku dožití zkoumaných strojů.



Obr. 36 Spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 1 odhadnuté modelem MIT



Obr. 37 Spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 3 odhadnuté modelem MIT

### COXŮV MODEL ZKOUMANÝCH VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Teoretický základ Coxova modelu je uveden v **Příloha 3 - Matematické modely ve spolehlivosti**. Coxův model používá k odhadu funkčních spolehlivostních charakteristik kromě dob do poruchy také vektor doprovodných proměnných  $\mathbf{x}^T$ . V případě rozboru dvoustavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů lze za tento vektor považovat diagnostická měření v čase poruchy. Vstupní data mají tedy tvar matice

$$\begin{pmatrix} T_1 & 0 & DV_{1,1} & \cdots & DV_{1,p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{30} & 1 & DV_{30,1} & \cdots & DV_{30,p} \end{pmatrix},$$

kteřá byla popsána v úvodu této kapitoly. Coxův model pracuje jak s necenzorovanými daty, tak s daty cenzorovanými.

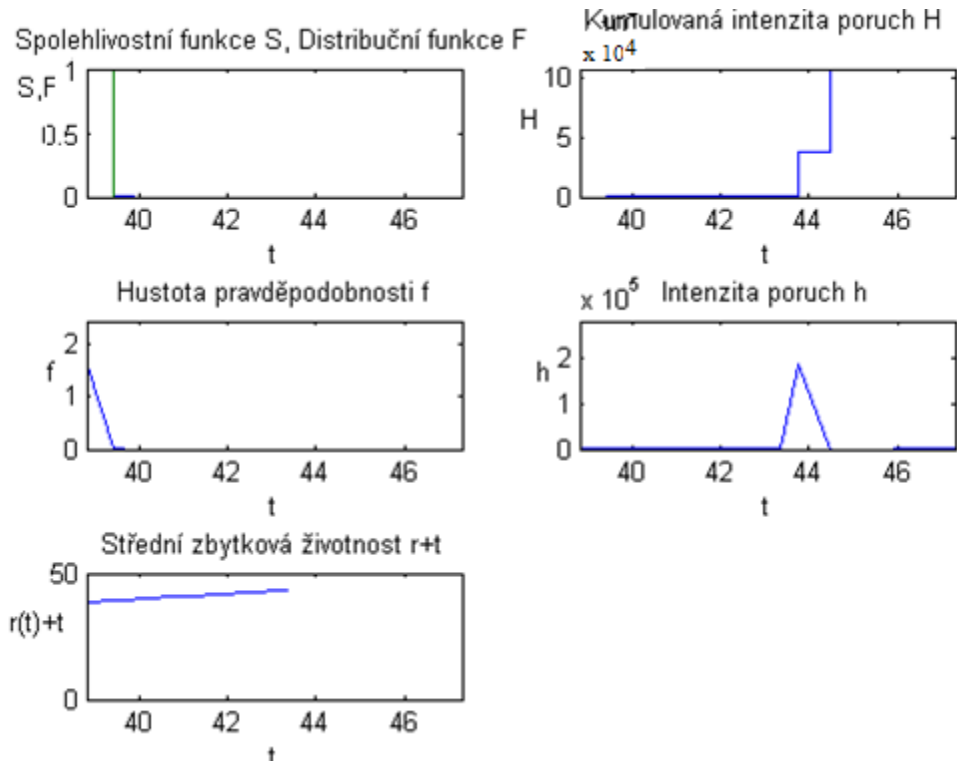
### COXŮV MODEL UVAŽUJÍCÍ POUZE NECENZOROVANÁ DATA ZKOUMANÝCH VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Na Obr. 38 a Obr. 39 jsou zachyceny spolehlivostní charakteristiky výkonových olejových transformátorů pracujících v Elektrárně 1. Tyto charakteristiky byly odhadnuty Coxovým modelem uvažujícím pouze necenzorovaná data. Z grafů střední zbytkové životnosti je zřejmé, že tato charakteristika nebyla správně odhadnuta. U Transformátoru 1 končí její průběh těsně po roce 43, i když byl stroj v provozu ještě dalších 11 let. U Transformátoru 3 se dokonce tuto charakteristiku nepodařilo odhadnout vůbec. Z grafů spolehlivostních funkcí rovněž nelze stanovit žádné korektní závěry. Podobné závěry lze vyvodit rovněž z charakteru odhadnutých spolehlivostních charakteristik ostatních zkoumaných výkonových olejových transformátorů. Obrázky zachycující tyto charakteristiky lze nalézt v **Příloha 15 - Grafy funkčních spolehlivostních charakteristik zkoumaných výkonových olejových transformátorů vytvořené Coxovým modelem pro necenzorovaná data**.

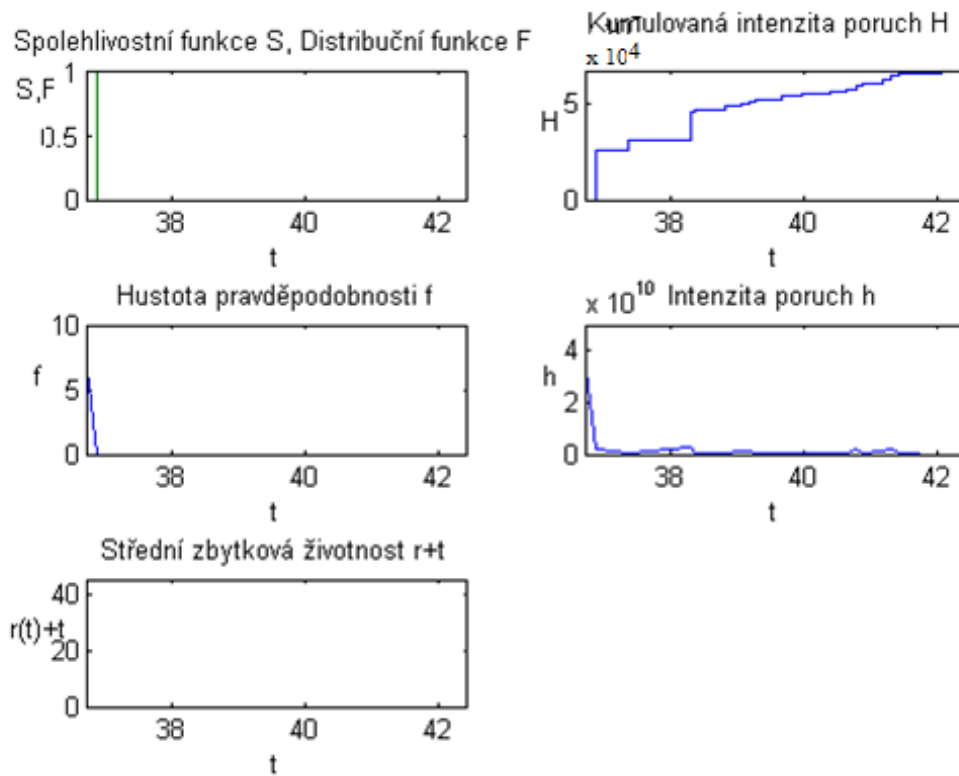
Skutečnost, že Coxův model pro necenzorovaná data dával zkreslené výsledky, je zapříčiněna velkým množstvím vstupujících diagnostických veličin. Do modelu tak vstupuje příliš rozsáhlý vektor  $\mathbf{x}^T$  (u dvouvinutových transformátorů se jednalo až o 60 hodnot pro jedno měření). Model havaruje a hlásí případy dělení nulou v jednotlivých výpočetních krocích.

### COXŮV MODEL UVAŽUJÍCÍ TAKÉ CENZOROVANÁ DATA ZKOUMANÝCH VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Funkční spolehlivostní charakteristiky transformátorů pracujících v Elektrárně 1 v tomto případě téměř odpovídaly empirickým spolehlivostním charakteristikám a charakteristikám odhadnutých modelem MIT. Závěry týkající se rozboru spolehlivosti těchto strojů jsou tedy totožné se závěry uvedenými v kapitolách s názvem Empirické spolehlivostní charakteristiky zkoumaných výkonových olejových transformátorů a Spolehlivostní charakteristiky zkoumaných výkonových olejových transformátorů odhadnuté modelem MIT. Jejich grafy je možné nalézt v **Příloha 16 - Grafy funkčních spolehlivostních charakteristik zkoumaných výkonových olejových transformátorů vytvořené Coxovým modelem uvažujícím také cenzorovaná data**.



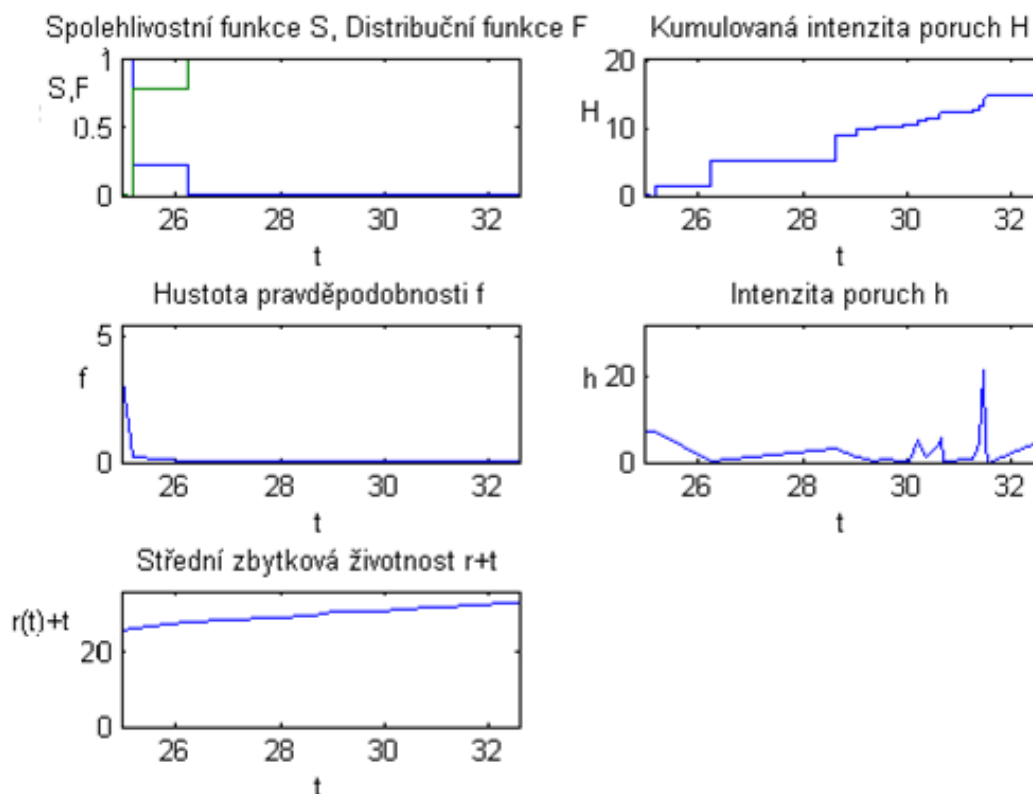
Obr. 38 Spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 1 odhadnuté Coxovým modelem uvažujícím pouze necenzorovaná data



Obr. 39 Spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 3 odhadnuté Coxovým modelem uvažujícím pouze necenzorovaná data

Na Obr. 40 jsou zachyceny spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 4. Tyto charakteristiky byly odhadnuty Coxovým modelem uvažujícím také cenzorovaná data. Z grafů střední zbytkové životnosti je zřejmé, že tato charakteristika nebyla správně odhadnuta. V čase  $t = 26$  let provozu byl podle této charakteristiky transformátor dávno v poruchovém stavu, zatímco stroj je v provozu již 34 let a dále pracuje. Podobná situace nastala u odhadu spolehlivostní funkce, podle kterého je tato funkce nulová od času  $t = 26$  let provozu. Na základě této skutečnosti by tedy transformátor od 26 let provozu neměl pracovat a měl by se nacházet v poruchovém stavu.

Odhady funkčních spolehlivostních charakteristik zbylých čtyř transformátorů vykazovaly stejné rysy jako odhady provedené u Transformátoru 4. Nelze tedy tyto charakteristiky uvažovat v rozboru dvoustavové odhadované spolehlivosti. Jejich grafy je možné nalézt opět v Příloha 16 - **Grafy funkčních spolehlivostních charakteristik zkoumaných výkonových olejových transformátorů vytvořené Coxovým modelem uvažujícím také cenzorovaná data**. Skutečnost, že Coxův model uvažující také cenzorovaná data dával zkreslené výsledky, je zapříčiněna opět velkým množstvím vstupujících diagnostických veličin.



Obr. 40 Spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 4 odhadnuté Coxovým modelem uvažujícím také cenzorovaná data

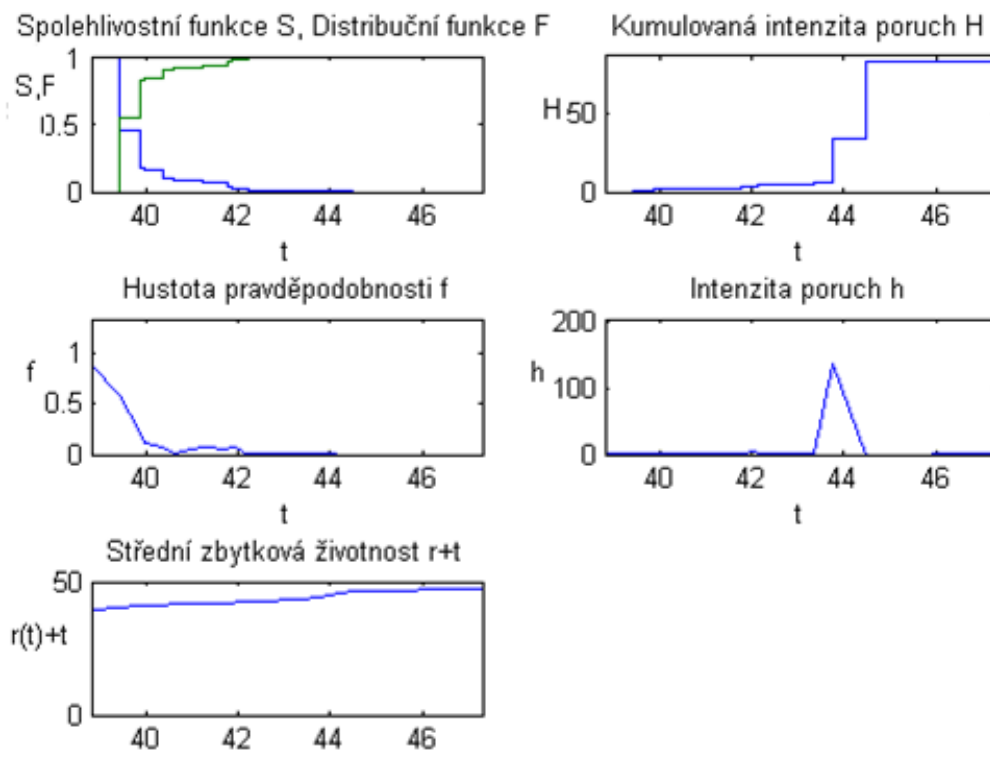
**COXŮV MODEL UVAŽUJÍCÍ POUZE NECENZOROVANÁ DATA V KOMBINACI S FAKTOROVOU ANALÝZOU APLIKOVANÝ NA ZKOUMANÉ VÝKONOVÉ OLEJOVÉ TRANSFORMÁTORY**

V předchozích kapitolách Coxův model neúspěšně odhadoval funkční spolehlivostní charakteristiky z důvodu velkého počtu doplňujících veličin reprezentovaných vektorem  $x^T$ . Na základě této skutečnosti byla na doplňující veličiny aplikována faktorová analýza, jejíž teoretický základ je uveden v **Příloha 4 - Faktorová analýza**. Cílem byla především redukce dat, která zpřesní odhady spolehlivostních charakteristik.

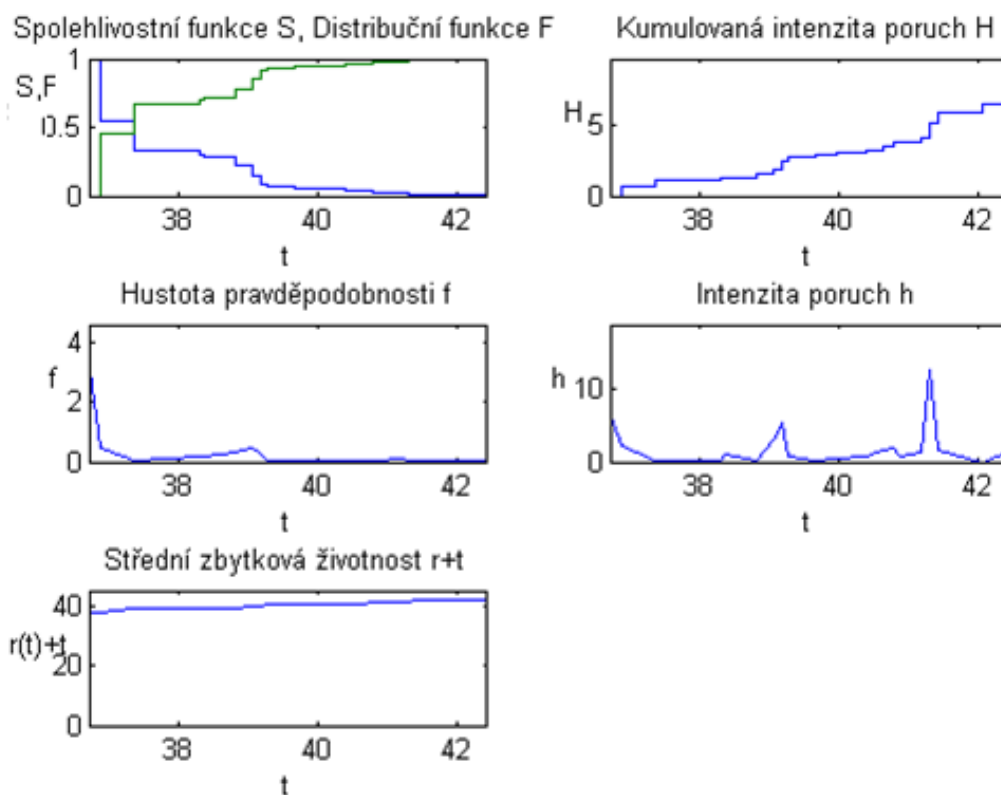
Získaná faktorová skóre byla použita jako vstup do Coxova modelu na místo změřených diagnostických veličin. Byl tedy proveden stejný rozbor spolehlivosti pomocí Coxova modelu jako v předcházejících dvou kapitolách. Jediný rozdíl spočíval ve skutečnosti, že byla použita faktorová skóre místo změřených diagnostických veličin. K extrakci faktorů a k odhadům faktorových skóre byl využit software Matlab R2009b, který obsahuje algoritmus pro určení faktorů. Bylo zde ponecháno defaultní nastavení, parametry faktorového modelu se odhadovaly metodou hlavních komponent a faktory byly rotovány prostou metodou varimax. Bližší informace o obou metodách lze nalézt v **Příloha 4 - Faktorová analýza**.

Na Obr. 41 a Obr. 42 jsou zachyceny spolehlivostní charakteristiky výkonových olejových transformátorů pracujících v Elektrárně 1. Z grafů střední zbytkové životnosti je zřejmé, že u Transformátoru 1 se střední zbytková životnost v čase  $t = 46$  let pohybuje kolem hodnoty 50 let. Lze tedy říci, že po 46 letech provozu je predikován pravděpodobný rok dožití tohoto stroje kolem roku 50. Od této doby graf střední zbytkové životnosti téměř nestoupá, stroj tedy od 46 let provozu podle této charakteristiky pracoval na pokraji své plánované životnosti. Je zřejmé, že Transformátor 3 byl provozován na pokraji své plánované životnosti od 40 let provozu, protože podle grafu střední zbytkové životnosti tohoto stroje je ve 40 letech provozu predikován pravděpodobný rok dožití právě na 40 let provozu. Z grafů spolehlivostních funkcí vyplývá následující skutečnost. Pravděpodobnost, že se stroj porouchá, je vyšší než pravděpodobnost, že se neporouchá od času  $t = 39$  let provozu pro Transformátor 1 a od času  $t = 37$  let provozu pro Transformátor 3. Intenzita poruch Transformátoru 1 vykazuje extrémní hodnoty v čase  $t = 44$  let provozu, kdy byl tedy tento stroj provozován se značným rizikem. Intenzita poruch Transformátoru 3 vykazuje extrémní hodnoty v časech kolem  $t = 39$  a  $t = 41$  let provozu.

Je zřejmé, že tyto závěry téměř korespondují se závěry uvedenými u empirického modelu a modelu MIT. Jediným rozdílem je, že všechny časy významné pro rozbor spolehlivosti jsou nižší než v předešlých případech. Coxův model neuvažující cenzorovaná data tak v tomto případě není zcela přesný. Nicméně použití faktorové analýzy na databázi diagnostických měření řešených strojů umožnilo vhodně odhadnout všechny funkční spolehlivostní charakteristiky včetně střední zbytkové životnosti. Podobné závěry lze stanovit u ostatních zkoumaných výkonových olejových transformátorů, jejichž funkční spolehlivostní charakteristiky lze nalézt v **Příloha 17 - Grafy funkčních spolehlivostních charakteristik zkoumaných výkonových olejových transformátorů vytvořené Coxovým modelem neuvažujícím cenzorovaná data po aplikaci faktorové analýzy**.



Obr. 41 Spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 1 odhadnuté Coxovým modelem neuvažujícím cenzorovaná data po aplikaci faktorové analýzy



Obr. 42 Spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 3 odhadnuté Coxovým modelem neuvažujícím cenzorovaná data po aplikaci faktorové analýzy

**COXŮV MODEL UVAŽUJÍCÍ TAKÉ CENZOROVANÁ DATA V KOMBINACI S FAKTOROVOU ANALÝZOU APLIKOVANÝ NA ZKOUMANÉ VÝKONOVÉ OLEJOVÉ TRANSFORMÁTORY**

Podobně jako v předcházejícím případě byl na faktorová skóre použit Coxův model. Tentokrát ovšem model pracoval také s cenzorovanými daty. Na Obr. 43 a Obr. 44 jsou zachyceny spolehlivostní charakteristiky výkonových olejových transformátorů pracujících v Elektrárně 1. Z grafů střední zbytkové životnosti je zřejmé, že u Transformátoru 1 se střední zbytková životnost v čase  $t = 45$  let pohybuje kolem hodnoty 50 let. Lze tedy říci, že po 48 letech provozu je predikován pravděpodobný rok dožití tohoto stroje kolem roku 50. Od této doby je graf střední zbytkové životnosti téměř konstantní, stroj tedy od 48 let provozu pracoval podle tohoto modelu na pokraji své plánované životnosti.

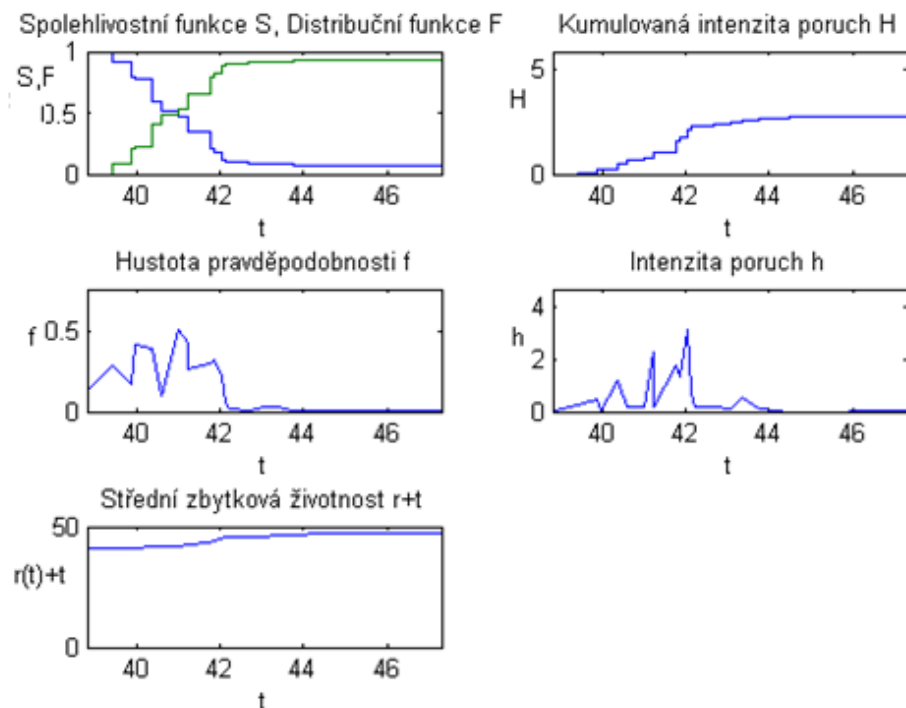
Je zřejmé, že Transformátor 3 byl provozován na pokraji své plánované životnosti od 41 let provozu, protože podle grafu střední zbytkové životnosti tohoto stroje je ve 41 letech provozu predikován pravděpodobný rok dožití právě na 41 let provozu. Pravděpodobnost, že se stroj porouchá, je vyšší než pravděpodobnost, že se neporouchá od času  $t = 41$  let provozu pro Transformátor 1 a od času  $t = 40$  let provozu pro Transformátor 3. Tuto skutečnost lze odečíst z grafů spolehlivostních funkcí obou strojů. Intenzita poruch Transformátoru 1 vykazuje extrémní hodnoty mezi 40. a 42. rokem provozu, kdy byl tedy Transformátor 1 provozován se značným rizikem. Intenzita poruch Transformátoru 3 vykazuje extrémní hodnoty mezi 39. a 42. rokem provozu.

Zjištěné poznatky korespondují se závěry uvedenými u empirického modelu a modelu MIT. Použití faktorové analýzy na databázi diagnostických měření řešených strojů opět umožnilo vhodně odhadnout všechny funkční spolehlivostní charakteristiky včetně střední zbytkové životnosti. Podobné závěry byly získány také u ostatních zkoumaných výkonových olejových transformátorů, jejichž funkční spolehlivostní charakteristiky lze nalézt v **Příloha 18 - Grafy funkčních spolehlivostních charakteristik zkoumaných výkonových olejových transformátorů vytvořené Coxovým modelem uvažujícím cenzorovaná data po aplikaci faktorové analýzy.**

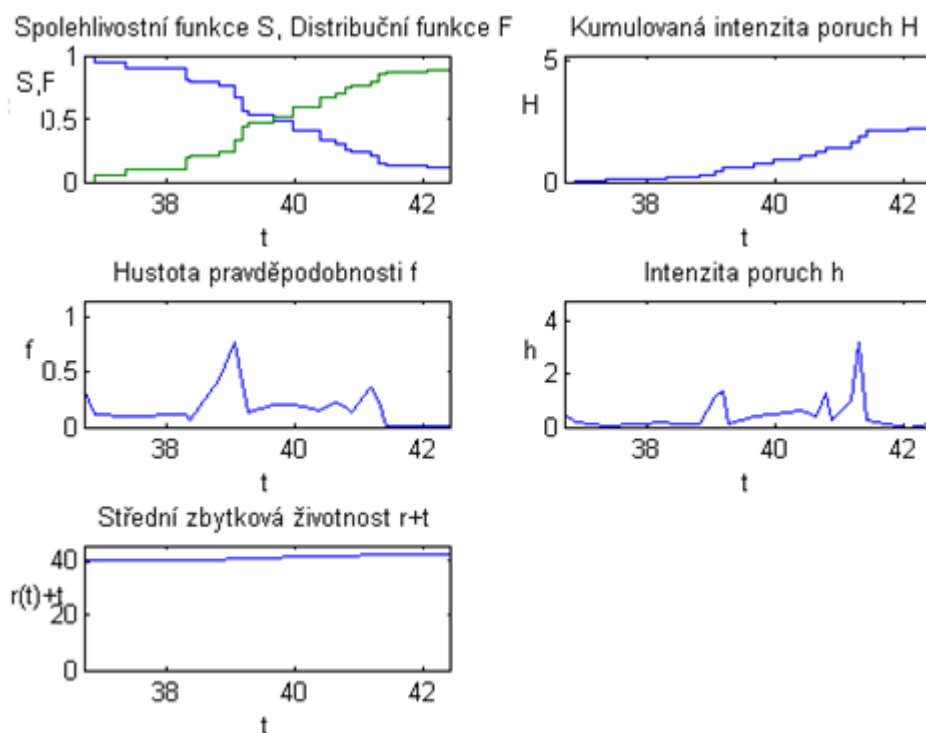
Nejpřesnější odhady funkčních spolehlivostních charakteristik byly tedy v souhrnu získány prostřednictvím následujících tří modelů:

- **Empirický spolehlivostní model,**
- **Model MIT,**
- **Coxův model v kombinaci s faktorovou analýzou pro cenzorovaná data.**

Vzhledem ke skutečnosti, že posledně jmenovaný model umožňuje při odhadování funkčních spolehlivostních charakteristik zahrnout také vliv hodnot diagnostických veličin měřených při poruše stroje, lze považovat Coxův model v kombinaci s faktorovou analýzou pro cenzorovaná data za model nejvhodnější pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů.



Obr. 43 Spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 1 odhadnuté Coxovým modelem uvažujícím také cenzorovaná data po aplikaci faktorové analýzy



Obr. 44 Spolehlivostní charakteristiky Transformátoru 3 odhadnuté Coxovým modelem uvažujícím také cenzorovaná data po aplikaci faktorové analýzy

### 2.3.7 RChE 1.0

Na základě výše řešených spolehlivostních modelů byl v rámci předkládané disertační práce vytvořen software RChE 1.0. Software byl navržen v prostředí Matlab R2009b a slouží k odhadování funkčních spolehlivostních charakteristik. Skládá ze dvou podprogramů. První podle vstupních dat z off-line diagnostických měření nasimuluje potřebná data. Postup této simulace je uveden v kapitole 2.3.6 této disertační práce. Druhý podprogram slouží k odhadování funkčních spolehlivostních charakteristik. Software RChE 1.0 lze opět nalézt v **Příloha 19 - Vytvořené softwary a spolehlivostní modul Transformer Reliability Assessment**. Pracovní okno navrženého softwaru je zachyceno na Obr. 45.

#### VSTUPNÍ PARAMETRY SOFTWARE

Do programu se nejdříve zadává název vstupního textového souboru vytvořeného v poznámkovém bloku. V tomto souboru je první opět čas jednotlivých diagnostických měření, pak následují plyny v pořadí: CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CO, CO<sub>2</sub> a nakonec ostatní veličiny v libovolném pořadí. Dále se zadává počet pozorování, což je vlastně počet časů v časovém vektoru (počet časů, které jsou ve vstupním textovém souboru). Po kliknutí na tlačítko *Načíst data* je nutné počkat, než se vhodná data nasimulují. Po úspěšném nasimulování se změní text u *Průběhu* na tvar *Data úspěšně načtena*. V dalším kroku se zvolí, jakým modelem se spolehlivostní charakteristiky budou odhadovat. K dispozici jsou všechny modely uvedené v kapitole 2.3.6 této disertační práce. Nakonec se rozhoduje, zda se bude požadovat grafický výstup a čas, ve kterém se mají spočítat hodnoty odhadnutých funkčních spolehlivostních charakteristik. Grafickým výstupem se rozumí grafy příslušných charakteristik. Pokud se používá Coxův model, musí se zvolit také jeho parametry:

- **zda uvažovat cenzorovaná pozorování,**
- **zda normovat doprovodné proměnné,**
- **zda redukovat počet diagnostických veličin pomocí faktorové analýzy,**
- **počet faktorů, které je uživatel ochoten přijmout.**

#### VÝSTUPNÍ PARAMETRY SOFTWARE

Výstupem softwaru RChE 1.0 je výsledek testu, zda je pro daný model splněn předpoklad o statistickém rozdělení nasimulovaných dat (1 značí, že předpoklad je splněn, 0 značí, že předpoklad splněn není). Například model MIT podle teorie uvedené v **Příloha 3 - Matematické modely ve spolehlivosti** totiž předpokládá Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti dob do poruchy. Výsledek testu je doplněn také o p-hodnotu, podle které se rozhoduje. Dalším výstupem je skutečný čas, ve kterém jsou spolehlivostní charakteristiky spočítány. Software odhaduje charakteristiky v diskrétních časech a tohle je čas nejbližší času zadanému, ve kterém se mají číselně vyjádřit odhadnuté charakteristiky. Poslední výstupy jsou hodnoty jednotlivých funkčních spolehlivostních charakteristik včetně jejich grafického znázornění. Tyto grafy jsou zachyceny například na Obr. 44. Software RChE 1.0 byl použit k analýze jednotlivých spolehlivostních modelů uvedených v kapitole 2.3.6 předkládané disertační práce.



- poměr  $\frac{CO_2}{CO}$ ,
- poměr  $\frac{O_2}{N_2}$ ,
- obsah vody v izolačním oleji  $Q_v$ ,
- ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$ ,
- izolační odpor  $R_{60}$ .

Pokud se k identifikaci poruchy použije Duvalova metoda, je vhodné vykreslit do stejného trojúhelníku také bod získaný z Rozdílové Duvalovy metody. Princip této metody byl uveden v kapitole 1.3.3 této disertační práce.

V kapitole 2.3.2 předkládané disertační práce byl prezentován postup pro predikování pravděpodobností poruch výkonových olejových transformátorů. Tento postup je založen na spojení teorie časových řad a analýzy koncentrací plynů rozpuštěných v izolačním oleji (DGA metod). Z hlediska plánování dalšího provozu stroje jsou ovšem tyto predikce nedostačující. Hlavním důvodem je poznatek, že podle uvedeného postupu lze predikovat jen dva možné stavy, a to poruchový stav nebo bezporuchový stav.

Dále se bude předpokládat, že výkonový olejový transformátor během svého provozu prochází čtyřmi nejdůležitějšími kvalitativně odlišnými stavy. Jedná se o:

- **Stav S1** – transformátor pracuje uspokojivě a zcela plní svoji funkci. Tento stav se nazývá bezporuchový stav.
- **Stav S2** – v izolačním oleji transformátoru se vyskytují koncentrace chybových plynů vyšší než ve stavu bezporuchovém. Není však jisté, zda jsou tyto vyšší koncentrace způsobeny přímo nějakou poruchou. Je vhodné provádět častější diagnostická měření a kontrolovat tak stav výkonového olejového transformátoru.
- **Stav S3** – nastává rozsáhlý rozklad papírové i olejové izolace. Transformátor je pravděpodobně zasažen jednou poruchou nebo více poruchami ve stejný okamžik. Podobně jako u stavu S2 je vhodné provádět častější diagnostická měření.
- **Stav S4** – vyznačuje se nadměrným rozkladem izolačního systému papír-olej. Transformátor se nachází v poruchovém stavu a jeho další provoz může vést ke zničení celého stroje.

Dále bude ukázán způsob, pomocí kterého lze dříve publikovaný postup pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti rozšířit na více stavů.

#### 2.4.1 IDENTIFIKACE VÍCE STAVŮ VÝKONOVÉHO OLEJOVÉHO TRANSFORMÁTORU

Podle kritérií uvedených v [14] lze identifikaci stavů S1 až S4 u výkonových olejových transformátorů provést na základě úrovní koncentrací chybových plynů a veličiny SKP. SKP se získá součtem koncentrací chybových plynů:

$$SKP = CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4 + H_2 + C_2H_6 + CO + CO_2.$$

Tab. 48 zachycuje kritériální hodnoty chybových plynů, které lze použít pro identifikaci výše uvedených stavů. Splňuje-li SKP nebo aspoň jeden z chybových plynů podmínku odpovídající jednomu ze stavů, předpokládá se, že se právě v tomto stavu transformátor nachází.

Tab. 48 Kriteriaální hodnoty chybových plynů v  $\mu\text{l/l}$  pro identifikaci stavů S1, S2, S3 a S4

Plyn	Stav			
	S1	S2	S3	S4
CH <sub>4</sub>	0-120	121-400	401-1000	>1000
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0-35	36-50	51-80	>80
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0-50	51-100	101-200	>200
H <sub>2</sub>	0-100	101-700	701-1800	>1800
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0-65	66-100	101-150	>150
CO	0-350	351-570	571-1400	>1400
CO <sub>2</sub>	0-2500	2500-4000	4001-10000	>10000
SKP	0-720	721-1920	1921-4630	>4630

#### 2.4.2 URČENÍ ZPŮSOBU DALŠÍHO PROVOZU VÝKONOVÉHO OLEJOVÉHO TRANSFORMÁTORU

Po identifikaci stavu stroje následuje výpočet rychlosti změny SKP za 1 den, která je v zahraniční literatuře označována jako TDCG poměr a spočítá se podle vztahu:

$$\text{Rychlost změny SKP za 1 den} = \frac{SKP2 - SKP1}{\text{počet dní}},$$

kde SKP2 značí součet chybových plynů při posledním měření, SKP1 značí součet chybových plynů při předposledním měření a počet dní značí počet dní, které uběhly mezi posledním a předposledním měřením. Podle rychlosti změny SKP za 1 den se určí interval pro další měření a způsob dalšího provozu výkonového olejového transformátoru. Nastavení intervalu měření a základní principy dalšího provozu transformátoru lze určit na základě údajů uvedených v Tab. 49. Další provoz je v této tabulce rozdělen do šesti operací, které jsou identifikovatelné pomocí stavu stroje a pomocí rychlosti změny SKP za 1 den. Jedná se o operace:

- **OP1** - značí pokračování v normálním provozu transformátoru.
- **OP2** - v rámci provádění této operace je vhodné uskutečnit další měření. Především se jedná o měření chybových plynů a jejich následnou analýzu. Nakonec se musí určit závislost zhoršování stavu stroje na jeho zatížení.
- **OP3** - provádí se stejné úkony jako v případě OP2.
- **OP4** - při této operaci se bezpodmínečně musí provést další měření, opět se jedná především o měření chybových plynů včetně jejich následné analýzy. Musí se naplánovat odstávka stroje, požádat o konzultaci výrobce a další odborníky na diagnostiku výkonových olejových transformátorů.
- **OP5** - obsahuje stejné úkony jako v případě OP4.
- **OP6** - v rámci této operace je nutné uvážit okamžité odstavení stroje z provozu a požádat o konzultaci výrobce a další odborníky na diagnostiku výkonových olejových transformátorů.

Tab. 49 Kritéria pro určení způsobu dalšího provozu výkonových olejových transformátorů

Stav	Identifikační podmínka	Rychlost změny SKP za 1 den (v $\mu\text{l/l}$ )	Interval dalšího vzorkování	Další provoz
S1	SKP nebo jeden z chybových plynů s koncentrací odpovídající stavu S1	<10	ročně	OP1
		10-30	čtvrtletně	
		>30	měsíčně	OP2
S2	SKP nebo jeden z chybových plynů s koncentrací odpovídající stavu S2	<10	čtvrtletně	OP3
		10-30	měsíčně	
		>30	měsíčně	
S3	SKP nebo jeden z chybových plynů s koncentrací odpovídající stavu S3	<10	měsíčně	OP4
		10-30	týdně	
		>30	týdně	
S4	SKP nebo jeden z chybových plynů s koncentrací odpovídající stavu S4	<10	týdně	OP5
		10-30	denně	
		>30	denně	OP6

#### 2.4.3 POSTUP PREDIKCE PRAVDĚPODOBNOTI PORUCH VÝKONOVÉHO OLEJOVÉHO TRANSFORMÁTORU PRO VÍCE MOŽNÝCH STAVŮ

Rozšíření postupu predikce pravděpodobnosti poruch výkonového olejového transformátoru pro dva stavy na více možných stavů (S1, S2, S3, S4) bude naznačeno pro případ použití Duvalovy metody a pro predikci pravděpodobnosti poruchy D1. Pro ostatní DGA metody a ostatní typy poruch se jedná o postup zcela analogický.

Vztah pro predikci pravděpodobnosti poruchy D1 v čase  $\tau$  pro případ dvou stavů má podobu:

$$p_{D1\tau} = p_{p\tau} p \left( P_{2\tau}^{DU} \in (0; 0,23) \right) p \left( P_{3\tau}^{DU} \in (0,13; 1) \right) p \left( P_{1\tau}^{DU} \in (0; 0,87) \right),$$

kde  $\tau$  značí čas, ve kterém má porucha stroj postihnout,  $P_{i\tau}^{DU}$  zastupuje hodnotu *i-tého* poměru plynů v čase  $\tau$ ,  $p$  je symbol vyhrazený pro pravděpodobnost a  $p_{p\tau}$  je pravděpodobnost, že aspoň jeden z chybových plynů překročí svou mezní hodnotu. V případě určování čtyřstavové spolehlivosti se výše uvedený vztah využije ke vzniku podobných vztahů, které se liší pouze výpočtem pravděpodobnosti  $p_{p\tau}$ . Vznikne tak:

- **Pravděpodobnost  $p_{D1\tau}(S1)$ , že se transformátor nachází v čase  $\tau$  ve stavu S1 a zároveň s poruchou D1:**

$$p_{D1\tau}(S1) = p_{p\tau}(S1) p \left( P_{2\tau}^{DU} \in (0; 0,23) \right) p \left( P_{3\tau}^{DU} \in (0,13; 1) \right) p \left( P_{1\tau}^{DU} \in (0; 0,87) \right),$$

kde  $p_{p_\tau}(S1)$  značí pravděpodobnost, že v čase  $\tau$  bude SKP v rozmezí 0-720  $\mu\text{l/l}$  nebo aspoň jeden z chybových plynů bude mít koncentraci, která splňuje podmínku pro stav S1 popsany v Tab. 48.

- **Pravděpodobnost  $p_{D1_\tau}(S2)$ , že se transformátor nachází v čase  $\tau$  ve stavu S2 a zároveň s poruchou D1:**

$$p_{D1_\tau}(S2) = p_{p_\tau}(S2) p\left(P_{2_\tau}^{DU} \in (0; 0,23)\right) p\left(P_{3_\tau}^{DU} \in (0,13; 1)\right) p\left(P_{1_\tau}^{DU} \in (0; 0,87)\right),$$

kde  $p_{p_\tau}(S2)$  značí pravděpodobnost, že v čase  $\tau$  bude SKP v rozmezí 721-1920  $\mu\text{l/l}$  nebo aspoň jeden z chybových plynů bude mít koncentraci, která splňuje podmínku pro stav S2 popsany v Tab. 48.

- **Pravděpodobnost  $p_{D1_\tau}(S3)$ , že se transformátor nachází v čase  $\tau$  ve stavu S3 a zároveň s poruchou D1:**

$$p_{D1_\tau}(S3) = p_{p_\tau}(S3) p\left(P_{2_\tau}^{DU} \in (0; 0,23)\right) p\left(P_{3_\tau}^{DU} \in (0,13; 1)\right) p\left(P_{1_\tau}^{DU} \in (0; 0,87)\right),$$

kde  $p_{p_\tau}(S3)$  značí pravděpodobnost, že v čase  $\tau$  bude SKP v rozmezí 1921-4630  $\mu\text{l/l}$  nebo aspoň jeden z chybových plynů bude mít koncentraci, která splňuje podmínku pro stav S3 popsany v Tab. 48.

- **Pravděpodobnost  $p_{D1_\tau}(S4)$ , že se transformátor nachází v čase  $\tau$  ve stavu S4 a zároveň s poruchou D1:**

$$p_{D1_\tau}(S4) = p_{p_\tau}(S4) p\left(P_{2_\tau}^{DU} \in (0; 0,23)\right) p\left(P_{3_\tau}^{DU} \in (0,13; 1)\right) p\left(P_{1_\tau}^{DU} \in (0; 0,87)\right),$$

kde  $p_{p_\tau}(S4)$  značí pravděpodobnost, že v čase  $\tau$  bude SKP větší jak 4630  $\mu\text{l/l}$  nebo aspoň jeden z chybových plynů bude mít koncentraci, která splňuje podmínku pro stav S4 popsany v Tab. 48.

Je zřejmé, že vztahy pro predikování pravděpodobnosti poruchy D1 se pro jednotlivé stavy liší pouze výpočtem pravděpodobnosti  $p_{p_\tau}$ , která má zásadní vliv na určení stavu, v němž se bude transformátor nacházet v čase  $\tau$ . Metody pro odhad trendové složky časových řad plynů rozpuštěných v izolačním oleji výkonových olejových transformátorů a postup predikce jsou shodné jako v případě dvoustavových predikcí.

#### 2.4.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ DVOUSTAVOVÉ A VÍCESTAVOVÉ ODHADOVANÉ SPOLEHLIVOSTI ZKOUMANÝCH VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Postup predikování pravděpodobností poruch pro vícestavovou spolehlivost byl aplikován na data z diagnostických měření všech deseti zkoumaných výkonových olejových transformátorů. K vyhodnocení pravděpodobností poruch byl nejdříve použit software Reliab\_dga\_transformer 1.0. Tento software rozlišuje pouze dva možné stavy těchto strojů, a to stav bezporuchový a poruchový. Následně na to byl na vyhodnocení stejných dat použit software Reliab\_dga\_transformer 2.0, který pracuje na základě teorie vícestavové spolehlivosti a který bude blíže specifikován v následující kapitole této disertační práce. Pravděpodobnosti poruch byly predikovány pro rok 2013.

Tab. 50 zachycuje získané výsledky. Jedná se o pravděpodobnosti nejpravděpodobnější poruchy pro jednotlivé stavy u analýzy vícestavové spolehlivosti, o pravděpodobnost nejpravděpodobnější poruchy u dvoustavové spolehlivosti a o typ nejpravděpodobnější poruchy pro obě analýzy. K získání jednotlivých výpočtů byla použita Duvalova metoda a trend časových řad se odhadoval metodou jádrového vyhlazování v kombinaci s proložením polynomem druhého stupně.

Typ poruchy byl predikován v devíti případech z deseti u vícestavové spolehlivosti, zatímco u dvoustavové spolehlivosti pouze v sedmi případech z deseti. Ze zmíněných sedmi případů se navíc typ poruchy u obou postupů shodoval. Lze tedy říci, že obě analýzy poskytovaly stejné výsledky s rozdílem, že rozбором vícestavové spolehlivosti byly získány podrobnější informace o budoucím stavu zkoumaných strojů. Tyto informace se týkaly určení konkrétního stavu, který byl pak podle Tab. 49 spojen s určitým způsobem dalšího provozování těchto strojů. Kdyby se prováděl pouze rozbor dvoustavové spolehlivosti, ztratily by se informace týkající se zbylých stavů, jejichž pravděpodobnosti byly zejména u transformátorů pracujících v Elektrárně 4 značně vysoké a v žádném případě je tak nelze zanedbat.

Pravděpodobnosti poruchy vycházely u transformátorů pracujících ve vodních elektrárnách nápadně malé, i když předešlé analýzy ukázaly, že se tyto stroje nachází v současné době na pokraji své plánované životnosti. V tomto případě je ovšem nutné si uvědomit, že se nejedná o pravděpodobnosti, že se zkoumaný transformátor bude nacházet v poruchovém stavu, ale o pravděpodobnosti, že stroj postihne predikovaný typ poruchy.

Tab. 50 Porovnání predikcí dvoustavové a vícestavové spolehlivosti

Transformátor	Vícestavová spolehlivost			Dvoustavová spolehlivost	
	Stav	Pst. poruchy	Typ poruchy	Pst. poruchy	Typ poruchy
Transformátor 1	S1	0,58	DT	$3 \cdot 10^{-5}$	DT
	S2	0,03			
	S3	0,00			
	S4	0,00			
Transformátor 2	S1	x	x	x	x
	S2	x			
	S3	x			
	S4	x			
Transformátor 3	S1	$4,25 \cdot 10^{-8}$	T3	$7,45 \cdot 10^{-244}$	T2
	S2	$3,86 \cdot 10^{-8}$			
	S3	$3,3 \cdot 10^{-9}$			
	S4	$2,97 \cdot 10^{-18}$			
Transformátor 4	S1	0,64	T3	$1,91 \cdot 10^{-10}$	T3
	S2	0,18			
	S3	0,00			
	S4	0,00			
Transformátor 5	S1	0,84	T3	$3,48 \cdot 10^{-10}$	T3
	S2	0,12			
	S3	0,00			
	S4	0,00			
Transformátor 6	S1	0,94	D2	x	x
	S2	0,00			
	S3	0,00			
	S4	0,00			
Transformátor 7	S1	0,80	T3	x	x
	S2	0,00			
	S3	0,00			
	S4	0,00			
Transformátor 8	S1	0,76	T1	0,76	T1
	S2	0,70			
	S3	0,76			
	S4	$7,3 \cdot 10^{-7}$			
Transformátor 9	S1	0,75	T1	0,75	T1
	S2	0,27			
	S3	0,75			
	S4	0,10			
Transformátor 10	S1	0,79	T1	0,78	T1
	S2	0,66			
	S3	0,76			
	S4	0,02			

### 2.4.5 RELIAB\_DGA\_TRANSFORMER 2.0

Podle předcházející teorie pro rozbor vícestavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů byl v prostředí Matlab R2009b navržen software Reliab\_dga\_transformer 2.0. Software slouží k predikci pravděpodobností možných poruch vyskytujících se u těchto strojů podobně jako Reliab\_dga\_transformer 1.0 a rovněž ho lze nalézt v **Příloha 19 - Vytvořené softwary a spolehlivostní modul Transformer Reliability Assessment**. Titulní okno softwaru je zachyceno na Obr. 46.

Obr. 46 Titulní okno softwaru Reliab\_dga\_transformer 2.0

#### VSTUPNÍ PARAMETRY SOFTWARE

Nejdříve se zvolí diagnostická metoda, pro predikování pravděpodobností jednotlivých poruch. Poté následuje výběr trendu časové řady, kterým se nejlépe odhadne vývoj příslušných poměrů plynů rozpuštěných v izolačním oleji. Vždy lze zvolit pouze jednu metodu a jeden trend časové řady. V dalším kroku se zadává čas predikce  $\tau$ , v němž se mají spočítat jednotlivé výstupy. Poté se volí, zda se budou ve výpočtech uvažovat i odlehlá měření (měření, která se nápadně odchylojí od předešlých, tyto výchylky mohou být způsobeny chybami měření) a prostřednictvím tlačítka *Zadat kritéria pro zahájení analýzy* se načtou kritické hodnoty pro inicializaci vícestavové analýzy. Standardně jsou zde nastaveny hodnoty podle [14]. Tyto hodnoty se mění v závislosti na použitých diagnostických metodách a lze je přizpůsobit přepsáním v titulním okně. Nakonec se zadává název souboru ve formátu *název.txt*, který obsahuje měření jednotlivých diagnostických veličin během celé historie provozu transformátoru. Tento soubor musí být uložen ve stejné složce jako spouštěcí soubor Predikce1.m. Hodnoty diagnostických veličin se zadávají pod sebe a jsou odděleny prázdným řádkem. Jejich pořadí ve vstupním souboru softwaru je následující: čas  $t$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $Q_V$ ,  $\text{tg } \delta V$ : x,  $\text{tg } \delta N$ : x,  $R_{60} V$ : x,  $R_{60} N$ : x, kde x značí zbylá vinutí a kostru. Pokud nebyla veličina v daném čase měřena, nahradí se její hodnota nulou. Vstupní soubor je stejný jako na Obr. 21, kde je znázorněno oddělení času a

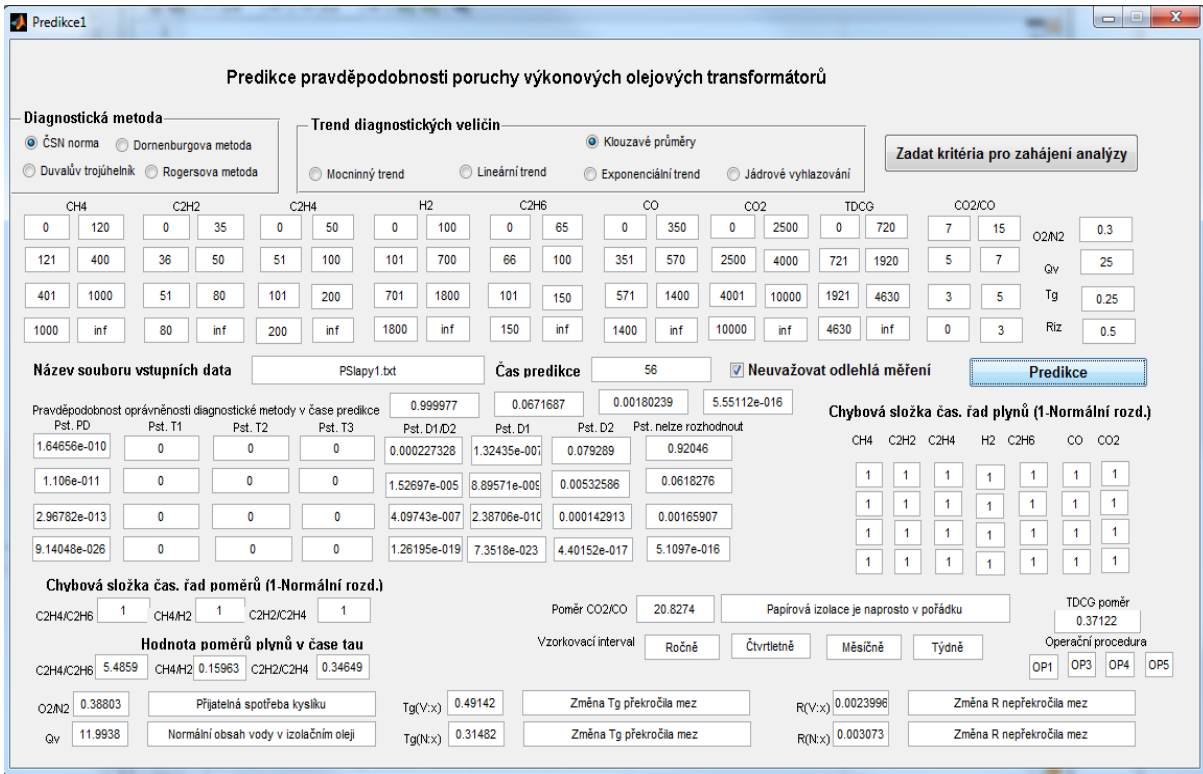
koncentrací metanu u vstupního souboru softwaru Reliab\_dga\_transformer 1.0. Výpočty se zahájí aktivací tlačítka *Predikce*.

### VÝSTUPNÍ PARAMETRY SOFTWARE

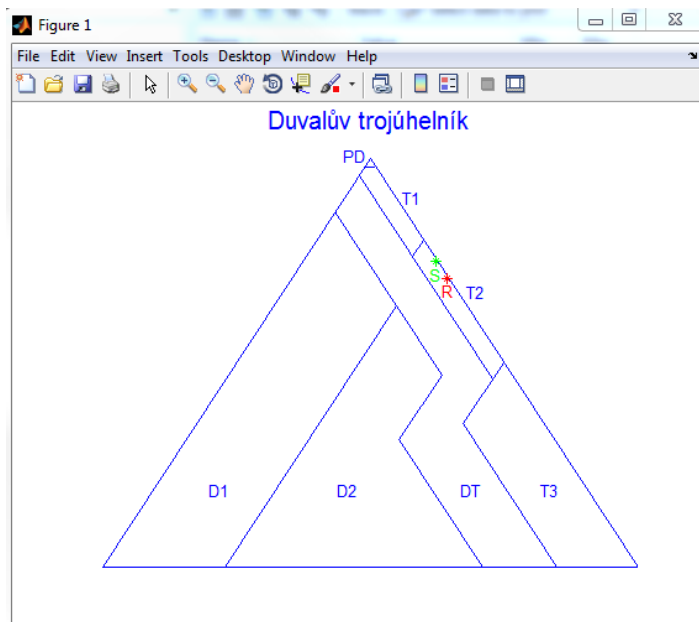
Výstupní hodnoty z Reliab\_dga\_transformer 2.0 se vypisují do titulního okna. Uvedenou situaci zachycuje Obr. 47. První skupina výstupů se nazývá *Pravděpodobnosti*. Skládá se z pravděpodobnosti oprávněnosti aplikace diagnostické metody  $p_{p\tau}$ , což je pravděpodobnost, že budou v čase  $\tau$  splněny všechny podmínky nutné pro aplikaci zvolené diagnostické metody. Dále následují pravděpodobnosti, s jakými budou v transformátoru jednotlivé poruchy v čase  $\tau$ . Druhá skupina výstupů má název *Výsledky testu, že chybová složka časových řad jednotlivých plynů má normální rozdělení*. 1 znamená, že software tuto hypotézu pro čas  $\tau$  nezamítá, což se předpokládá v postupu, podle kterého se predikuje. Tento postup je možné najít v kapitole 2.3.2 této disertační práce. Třetí skupina výstupů má stejný význam jako předchozí (testování, zda se jedná o normální rozdělení), nyní se však jedná o poměry plynů, které identifikují druh poruchy v čase  $\tau$ . Dále se určí nejpravděpodobnější poměry analyzovaných plynů v čase  $\tau$  a pokud jsou diagnostické metody doplněny grafickým výstupem, program tyto obrázky také vykreslí.

Pravděpodobnost OT představuje pravděpodobnost, že nelze o typu poruchy rozhodnout. Všechny výstupy jsou počítány pro 4 různé kvalitativní stavy (každý stav odpovídá jednomu řádku u pravděpodobností jednotlivých poruch), ve kterých se výkonový olejový transformátor může nacházet a stavy jsou seřazeny od nejlepšího k nejhoršímu v pořadí odshora dolů. Pro každý stav je zde rovněž specifikován typ operace, kterou je nutné provést, pro zajištění dalšího provozu stroje. Typ této operace je doplněn časovým intervalem, ve kterém se mají uskutečnit další diagnostická měření. Software používá také diagnostické postupy doplňující DGA metody popsané v kapitole 1.3.4 této disertační práce. Poslední výstupy hodnotí obsah vody v izolačním oleji či stav papírové izolace určený pomocí ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  nebo pomocí izolačního odporu  $R_{60}$ .

V kapitole 1.3.3 předkládané disertační práce byla prezentována Rozdílová Duvalova metoda, která se používá právě v kombinaci s rozlišováním více možných stavů výkonových olejových transformátorů. Pokud se v softwaru Reliab\_dga\_transformer 2.0 zvolí za diagnostickou metodu Duvalova metoda, vykreslí se do Duvalova trojúhelníku dva body. Bod R reprezentuje výsledek klasické Duvalovy metody a bod S výsledek Rozdílové Duvalovy metody. Uvedená situace je zachycena na Obr. 48.



Obr. 47 Titulní okno s výstupy softwaru Reliab\_dga\_transformer 2.0



Obr. 48 Grafický výstup Duvalovy metody u softwaru Reliab\_dga\_transformer 2.0

## 2.5 OPTIMALIZACE DALŠÍHO PROVOZU VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

V rámci předkládané disertační práce byly vytvořeny tři různé matematické modely pro provádění optimalizace dalšího provozu výkonových olejových transformátorů za účelem maximálního finančního zisku. Tyto modely využijí především společnosti, které provádí opravy výkonových olejových transformátorů a jejichž cílem je maximalizovat své zisky. Vychází se z teorie uvedené v **Příloha 5 - Lineární optimalizace**. Všechny modely využívají pravděpodobnosti odhadnuté v rozboru vícestavové odhadované spolehlivosti. Jedná se o modely:

- **Model 1** – využívá pravděpodobnosti, které určují, v jakém stavu se bude transformátor nacházet.
- **Model 2** – rovněž využívá pravděpodobnosti, které určují, v jakém stavu se bude transformátor nacházet.
- **Model 3** – využívá pravděpodobnosti různých druhů poruch, které se mohou u transformátoru vyskytnout. Tyto poruchy jsou vztaženy na nejpravděpodobnější stav transformátoru.

Všechny tři modely vychází z obecného modelu, který je blíže specifikován v následující kapitole.

### 2.5.1 OBECNÝ MODEL

Všechny výše uvedené modely jsou založeny na obecném modelu, který se skládá z účelové funkce a omezení. Účelová funkce má lineární charakter a je tvořena součtem členů reprezentovaných jako součin pravděpodobnosti nastoupení určité události s náklady spojenými na odstranění následků této události. Za volné proměnné účelové funkce  $x_1, x_2, \dots, x_n$  jsou voleny proměnné, pomocí kterých se vypočítají náklady na odstranění následků jednotlivých událostí. Ve všech dále prezentovaných modelech se rozlišují dva typy účelových funkcí:

- **Účelová funkce pro stavy** – tento typ účelové funkce je tvořen čtyřmi členy. Důvodem je skutečnost, že se u rozboru vícestavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů rozlišují čtyři různé stavy. Jednotlivé členy představují součin pravděpodobnosti nastoupení daného stavu stroje a funkčního předpisu pro výpočet finančních následků

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^4 P_i \cdot g_i(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

$i = 1, 2, 3, 4.$

$P_i$  představuje pravděpodobnost, že se bude transformátor nacházet v  $i$ -tém stavu a  $g_i$  je funkce pro výpočet nákladů nutných k vynaložení, pokud se transformátor nachází ve stavu  $i$ . Stavy jsou řazeny vzestupně od stavu nejlepšího (S1) až ke stavu poruchovému (S4).

- **Účelová funkce pro poruchy** – funkce je reprezentována součtem sedmi členů, které tvoří součin pravděpodobnosti určitého typu poruchy a funkčního předpisu pro výpočet nákladů na opravy spojené právě s touto poruchou. Analogicky jako v předešlém případě platí skutečnost, že těchto členů je sedm z důvodu, že se u rozboru vícestavové

odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů rozlišuje sedm různých poruch. Účelová funkce pro poruchy má tedy tvar:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^7 P_i \cdot g_i(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

$$i = 1, 2, \dots, 7.$$

kde  $P_i$  je pravděpodobnost, že se u transformátoru vyskytne  $i$ -tá porucha a  $g_i$  je funkční předpis pro výpočet nákladů nutných k vynaložení na opravu poruchy  $i$ . Tab. 51 přiřazuje index  $i$  poruchám uvažovaným v kapitole 1.3.3 této disertační práce.

Tab. 51 Typy poruch výkonových olejových transformátorů a jejich indexy

Index $i$	Typ poruchy
1	PD
2	T1
3	T2
4	T3
5	D1
6	D2
7	DT

Omezení každého modelu jsou ve tvaru:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{g} \leq \mathbf{b},$$

kde  $\mathbf{A}$  je matice složená pouze z 0 a 1. Pozice jedniček v matici jsou určeny podle charakteru omezení. Vektor  $\mathbf{g}$  je vektor složený z funkcí  $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$  a vektor  $\mathbf{b}$  je vektor omezení.

Základní úloha zde uvedeného obecného modelu má pak následující tvar:

$$\max f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

za podmínek

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{g} \leq \mathbf{b}$$

$$x_i \geq 0.$$

### 2.5.2 MODEL 1

V Modelu 1 se hledá maximum následující účelové funkce pro stavy:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_5) = P_1 x_1 c_1 + P_2 (x_2 c_2 + x_3 c_3) + P_3 (x_4 c_4 + x_5 c_5) + P_4 (x_1 c_1 + x_2 c_2 + x_3 c_3 + x_4 c_4 + x_5 c_5),$$

kde  $P_i$  je pravděpodobnost, že se bude transformátor nacházet ve stavu  $i$ ,  $x_j$  značí počet pracovníků  $j$ -tého druhu a  $c_j$  je finanční ohodnocení pracovníka  $j$ -tého druhu. V Modelu 1 se rozlišuje celkem pět druhů pracovníků:

- **Pracovník 1** – činnost tohoto pracovníka se uplatňuje především ve stavu S1, kdy se na stroji nevyskytuje žádná porucha, nebo vykonává práce spojené s uvedením stroje zpět do provozu, nacházel-li se před tím ve stavu S4 (stavu poruchovém).
- **Pracovník 2** – tento pracovník vykonává opravy týkající se strojní části výkonových olejových transformátorů. Provádí drobné mechanické opravy, které se netýkají části elektro. Jeho činnost je potřeba především ve stavech S2 a S4.
- **Pracovník 3** – jedná se o specialistu na strojní část výkonových olejových transformátorů. Jeho nasazení je třeba v situaci, kdy se transformátor nachází ve stavech S2 a S4.
- **Pracovník 4** – vykonává opravy spojené s elektro částí výkonových olejových transformátorů, jeho činnost je potřeba především ve stavech S3 a S4.
- **Pracovník 5** – jedná se o specialistu určeného k provádění oprav elektro části výkonových olejových transformátorů. Jeho nasazení je nutné podobně jako u předcházejícího pracovníka především tehdy, pokud se stroj dostane do stavu S3 nebo S4.

Je zřejmé, že odbornost pracovníka roste s jeho číslem. Za největšího odborníka je považován Pracovník 5 a za nejmenšího naopak Pracovník 1. Tomu odpovídá také úroveň stavů stroje, při kterých jsou tito pracovníci nasazováni včetně jejich finančního ohodnocení  $c_j$ . Podle hlediska odbornosti má nejvyšší finanční ohodnocení Pracovník 5 a naopak nejnižší Pracovník 1. Hodnota finančního ohodnocení se počítá podle vztahu:

$$c_j = h_j \cdot o_j,$$

kde  $h_j$  je počet hodin nutných k výkonu práce, ke které je  $j$ -tý pracovník předurčen a  $o_j$  je jeho průměrná hodinová mzda. Omezení Modelu 1 lze rozdělit na čtyři části:

$$x_2 c_2 + x_3 c_3 \leq C_{strojn\u00ed}$$

$$x_4 c_4 + x_5 c_5 \leq C_{elektro}$$

$$x_1 c_1 + x_2 c_2 + x_3 c_3 + x_4 c_4 + x_5 c_5 \leq C_{celkov\u00e9}$$

$$x_j \geq 0 \text{ pro } j = 1, \dots, 5.$$

První nerovnice se týká omezení financí na opravy spojené se strojní částí, kde  $C_{strojn\u00ed}$  značí maximální finance, které mohou být investovány do oprav strojní části transformátoru. Druhá nerovnice analogicky určuje finanční omezení pro část elektro a třetí nerovnice potom reprezentuje finanční omezení dohromady pro obě části. Posledních pět nerovnic vyplývá z požadavku, že počet pracovníků jednotlivých typů nemůže nabývat záporných hodnot.

Model 1 nalezne uplatnění především u společností zajišťujících opravy výkonových olejových transformátorů. Tyto společnosti potřebují učinit rozhodnutí o počtu pracovníků a jejich kvalifikaci, které je nutné nasadit na opravy stroje za účelem získání maximálního výdělku týkajícího se uhrazení nákladů na pracovníky. Jedná se vlastně o rozhodnutí, kolik a

jaké pracovníky nasadit, aby provozovatel transformátoru zaplatil maximální výdaje. Omezení modelu jsou dána cenami, které je ochoten provozovatel vynaložit na opravu části strojní, elektro a celkově.

### 2.5.3 MODEL 2

V Modelu 2 se opět hledá maximum účelové funkce pro stavy, která má však nyní tvar:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = P_1x_1c_1 + P_2x_2c_2 + P_3x_3c_3 + P_4x_4c_4,$$

kde  $P_i$  je pravděpodobnost, že se bude transformátor nacházet ve stavu  $i$ ,  $x_j$  značí počet pracovníků  $j$ -tého druhu a  $c_j$  je opět finanční ohodnocení pracovníka  $j$ -tého druhu. Na rozdíl od Modelu 1 se nyní pracovníci člení pouze do čtyř skupin. Číslo skupiny odpovídá stavu, ve kterém se transformátor nachází.

První skupina pracovníků bude tedy nasazena na opravy stroje v případě, že se bude stroj nacházet ve stavu S1, druhá skupina pracovníků bude nasazena na stav S2 atd. Jednotlivé skupiny pracovníků se od sebe opět liší úrovní odbornosti a výší finančního ohodnocení. Nejnižší odbornost a finanční ohodnocení mají opět pracovníci nasazení při stavu S1, nejvyšší odbornost včetně finančního ohodnocení mají pracovníci nasazení do stavu S4. Finanční ohodnocení  $j$ -tého pracovníka se počítá stejně jako u Modelu 1, omezení se však nyní dělí na tři části:

$$x_1c_1 + x_2c_2 \leq C_{1,2}$$

$$x_3c_3 + x_4c_4 \leq C_{3,4}$$

$$x_j \geq 0 \text{ pro } j = 1, \dots, 4.$$

První nerovnice představuje omezení financí na opravy, pokud se transformátor nachází ve svých prvních dvou stavech. Druhá nerovnice reprezentuje omezení financí na opravy spojené se stavem S3 nebo S4. Poslední čtyři nerovnice podobně jako u Modelu 1 vychází z požadavku na nezápornost počtu pracovníků jednotlivých typů.

Ze stejných důvodů jako Model 1 nalezneme i tento model uplatnění především u společností zajišťujících opravy výkonových olejových transformátorů. Omezení modelu jsou dána cenami, které je ochoten provozovatel vynaložit na opravy transformátoru v prvních dvou stavech a na opravy transformátoru ve zbylých dvou stavech.

### 2.5.4 MODEL 3

V Modelu 3 se hledá maximum účelové funkce pro poruchy, která má tvar:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_7) = \sum_{i=1}^7 P_i x_i c_i.$$

kde  $P_i$  je pravděpodobnost, že transformátor postihne porucha  $i$ ,  $x_i$  značí počet pracovníků potřebných k odstranění poruchy  $i$ -tého druhu a  $c_i$  je finanční ohodnocení pracovníka  $i$ -tého druhu. Z tvaru účelové funkce je vidět, že se v tomto modelu dělí pracovníci do sedmi druhů, každý druh je určen k opravě určité poruchy definované Tab. 51. Finanční ohodnocení se počítá stejně jako u předcházejících modelů.

Omezení Modelu 3 lze rozdělit na čtyři části:

$$x_1c_1 + x_5c_5 + x_6c_6 \leq C_D$$

$$x_2c_2 + x_3c_3 + x_4c_4 \leq C_T$$

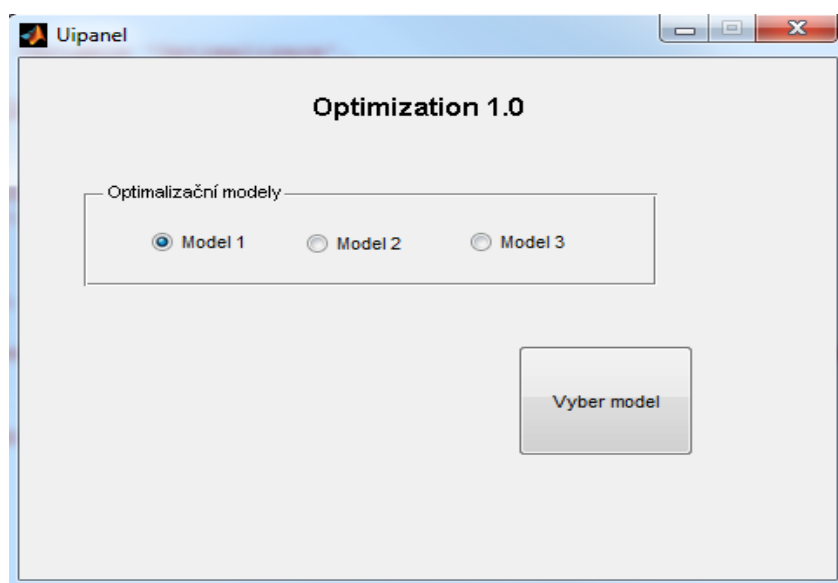
$$x_1c_1 + x_2c_2 + x_3c_3 + x_4c_4 + x_5c_5 + x_6c_6 + x_7c_7 \leq C_{DT}$$

$$x_j \geq 0 \text{ pro } j = 1, \dots, 7.$$

První nerovnice se týká omezení financí na opravy spojené s poruchami jiskření (D1, D2 a PD) a  $C_D$  značí maximální finance, které mohou být investovány do oprav částí stroje poškozených jiskřeními. Druhá nerovnice analogicky určuje finanční omezení pro opravy spojené s tepelnými poruchami a třetí nerovnice potom reprezentuje finanční omezení na opravy spojené jak s tepelnými poruchami, tak s jiskřeními. Posledních 7 nerovnic opět symbolizuje požadavek na nezápornost počtu jednotlivých pracovníků. Stejně jako předchozí modely i Model 3 nalezne uplatnění především u společností zajišťujících opravy výkonových olejových transformátorů. Omezení modelu jsou dána cenami, které je ochoten provozovatel vynaložit na opravy po poruchách tepelných, po jiskření a po jejich kombinaci. Všechny tři následující modely využívají k nalezení optimálního řešení simplexovou metodu, o které pojednává **Příloha 5 - Lineární optimalizace**.

### 2.5.5 OPTIMIZATION 1.0

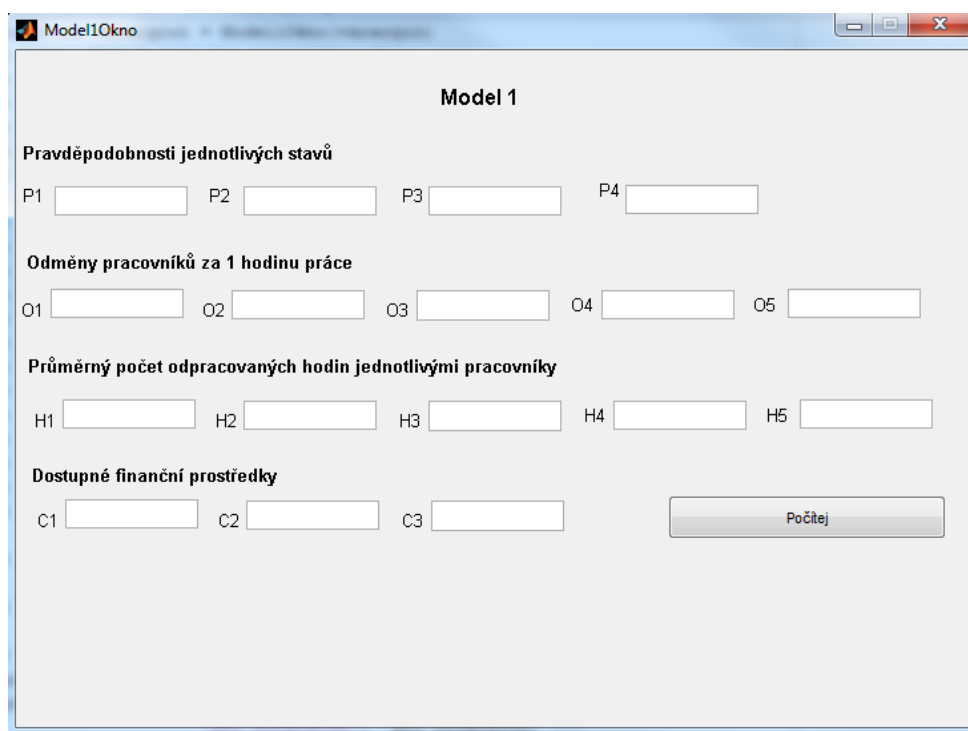
Podle předcházející teorie týkající se optimalizace dalšího provozu výkonových olejových transformátorů byl v prostředí Matlab R2009b navržen software Optimization 1.0. Software slouží k určení optimálního počtu různých druhů pracovníků, kteří mají být nasazeni na opravy strojů za účelem zajištění maximálního zisku společnosti, jenž má za úkol tyto opravy provádět. Optimization 1.0, jehož titulní okno je zachyceno na Obr. 49, lze nalézt v **Příloha 19 - Vytvořené softwary a spolehlivostní modul Transformer Reliability Assessment**.



Obr. 49 Titulní okno softwaru Optimization 1.0

## VSTUPNÍ PARAMETRY SOFTWARE

V prvním kroku se volí model, který se má použít pro optimalizaci počtu pracovníků. Poté se prostřednictvím tlačítka *Vyber model* otevře okno pro zadávání vstupních parametrů zvoleného modelu. Vstupní okno například pro Model 1 je zachyceno na Obr. 50. Jako první se zadávají pravděpodobnosti čtyř různých stavů, ve kterých se výkonový olejový transformátor může nacházet. Tyto pravděpodobnosti je možné získat jako výstup softwaru Reliab\_dga\_transformer 2.0. Dále je nutné zadat odměny pro jednotlivé druhy pracovníků za hodinu práce a rovněž jejich průměrný počet odpracovaných hodin. Nakonec se zadávají dostupné finanční prostředky, jejichž rozdělení do různých skupin je dáno charakterem použitého modelu. U Modelu 1 se například jedná o finanční prostředky na opravu části strojní, elektro a celkově (na Obr. 50 označené postupně symboly C1, C2 a C3).



The screenshot shows a software window titled 'Model1Okno'. Inside, the title 'Model 1' is centered. Below it, there are four sections of input fields:

- Pravděpodobnosti jednotlivých stavů**: Four text boxes labeled P1, P2, P3, and P4.
- Odměny pracovníků za 1 hodinu práce**: Five text boxes labeled O1, O2, O3, O4, and O5.
- Průměrný počet odpracovaných hodin jednotlivými pracovníky**: Five text boxes labeled H1, H2, H3, H4, and H5.
- Dostupné finanční prostředky**: Three text boxes labeled C1, C2, and C3, followed by a 'Počítej' button.

Obr. 50 Vstupní okno Modelu 1

## VÝSTUPNÍ PARAMETRY SOFTWARE

Mezi výstupní parametry softwaru Optimization 1.0 patří optimální počty jednotlivých druhů pracovníků včetně maximálního zisku, který může společnost při nasazení tohoto počtu pracovníků získat. Výstupní parametry softwaru Optimization 1.0 jsou zachyceny pro Model 1 na Obr. 51.

**Model 1**

**Pravděpodobnosti jednotlivých stavů**

P1  P2  P3  P4

**Odměny pracovníků za 1 hodinu práce**

O1  O2  O3  O4  O5

**Průměrný počet odpracovaných hodin jednotlivými pracovníky**

H1  H2  H3  H4  H5

**Dostupné finanční prostředky**

C1  C2  C3

X1  X2  X3  X4  X5

**Zisk**

Obr. 51 Výstupní parametry softwaru Optimization 1.0 pro Model 1

## 2.6 NÁVRH SPOLEHLIVOSTNÍHO MODULU DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU PRO VÝKONOVÉ OLEJOVÉ TRANSFORMÁTORY

V kapitole 1.4 předkládané disertační práce byla prezentována teorie týkající se expertních systémů. Na základě této teorie byl navržen a vytvořen spolehlivostní modul diagnostického systému pro výkonové olejové transformátory, který je vyvíjen na školícím pracovišti FSI VUT v Brně. Uvedený diagnostický systém má podobu expertního systému a jeho schéma je zachyceno na Obr. 10.

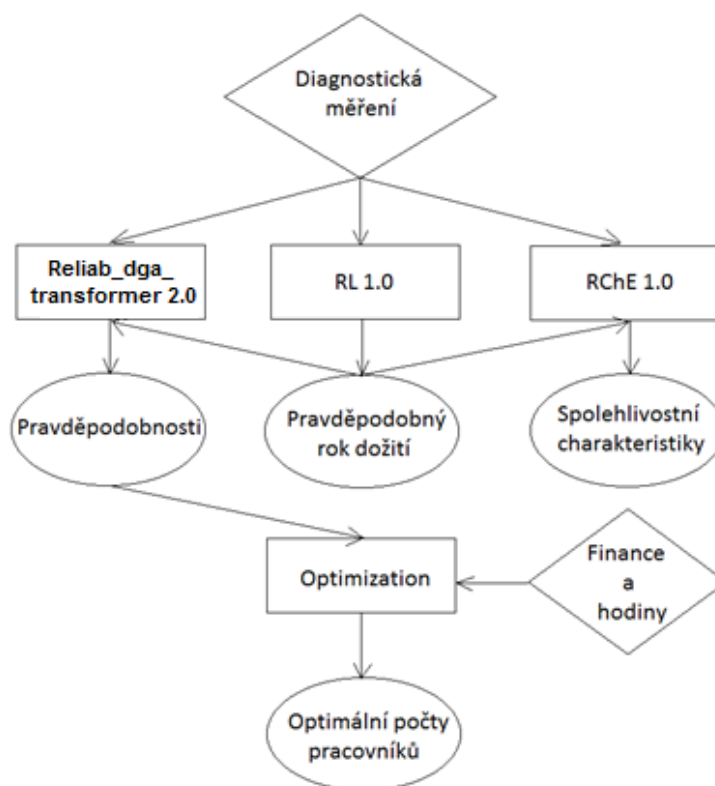
Navržený spolehlivostní modul se skládá ze čtyř podmodulů, které lze považovat za samostatné nebo za jeden komplexní celek, ve kterém se výstupy jedné části používají jako vstupy do části další. Jednotlivé podmoduly tvoří softwary prezentované v této disertační práci. Jedná se o dva softwary pro rozbor dvoustavové spolehlivosti, jeden pro rozbor vícestavové spolehlivosti a jeden pro optimalizaci dalšího provozu stroje. Navržený spolehlivostní modul tvoří softwary:

- **RL 1.0,**
- **Reliab\_dga\_transformer 2.0,**
- **RChE 1.0,**
- **Optimization 1.0.**

### 2.6.1 PRINCIP ČINNOSTI SPOLEHLIVOSTNÍHO MODULU

Princip činnosti spolehlivostního modulu je zachycen na Obr. 52. Obdélníkové značky jsou vyčleněny pro jeho podmoduly, v oválných polích jsou zaznamenány výstupy jednotlivých podmodulů a značky ve tvaru kosočtverce představují vstupy spolehlivostního modulu. Směr šipek určuje návaznost jednotlivých částí navrženého spolehlivostního modulu. Pole *Finance a hodiny* představuje vstupy jednotlivých optimalizačních modelů pro

podmodul Optimization 1.0. Jedná se o počet hodin nutných k výkonu práce jednotlivých pracovníků, o jejich průměrnou hodinovou mzdu a o finanční omezení dané provozovatelem výkonových olejových transformátorů.



Obr. 52 Schéma navrženého spolehlivostního modulu

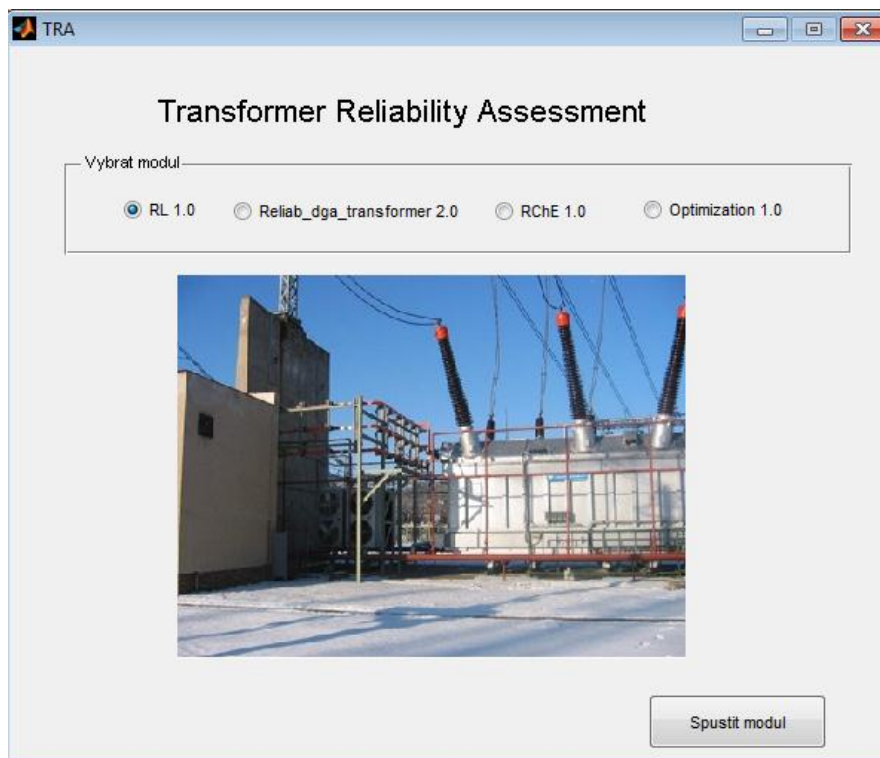
Z Obr. 52 je patrné, že první tři podmoduly mají stejný vstup, a to data získaná z diagnostických měření výkonových olejových transformátorů. Výstup podmodulu RL 1.0 (pravděpodobný rok dožití) se použije jako doplňující vstup do podmodulů Reliab\_dga\_transformer 2.0 a RChE 1.0. Jedná se vlastně o čas, ve kterém se požaduje predikovat výstupy těchto podmodulů. Z podmodulu RChE 1.0 se získají funkční spolehlivostní charakteristiky stroje jako intenzita poruch, spolehlivostní funkce a další. Podmodulem Reliab\_dga\_transformer 2.0 se spočítají pravděpodobnosti jednotlivých poruch a stavů, ve kterých se stroj bude nacházet v predikovaném čase (v pravděpodobném roce dožití). Tyto pravděpodobnosti pak slouží jako vstupy do podmodulu Optimization 1.0, jehož prostřednictvím lze získat optimální počty pracovníků, které je nutné nasadit na opravy řešeného výkonového olejového transformátoru.

Spolehlivostní modul pro navrhovaný diagnostický systém byl vytvořen v softwaru Matlab R2009b a jeho titulní okno je zachyceno na Obr. 53. Modul se nazývá Transformer Reliability Assessment a jeho výstupy lze rozdělit do dvou kategorií:

- **Výstupy charakterizující spolehlivost** – jedná se o výstupy popsané na Obr. 52 jako:
  - **Pravděpodobnosti,**
  - **Pravděpodobný rok dožití,**
  - **Spolehlivostní charakteristiky.**

Charakterizují spolehlivost zkoumaného výkonového olejového transformátoru a mají význam jak pro jeho provozovatele, tak pro společnost zajišťující opravy.

- **Výstupy z optimalizace** – jedná se o výstupy popsané na Obr. 52 jako *Optimální počty pracovníků*. Uplatní se především u společností zajišťujících opravy výkonových olejových transformátorů, které se snaží o maximalizaci svého výtěžku. Výstupem je vlastně rozhodnutí, kolik a jaké pracovníky nasadit, aby se při daných finančních omezeních musela vynaložit co nejvyšší částka. Finanční omezení závisí na typu optimalizačního modelu.



Obr. 53 Titulní okno spolehlivostního modulu Transformer Reliability Assessment

Zhotovený spolehlivostní modul Transformer Reliability Assessment lze nalézt v **Příloha 19 - Vytvořené softwary a spolehlivostní modul Transformer Reliability Assessment**.

## 2.6.2 POUŽITÍ SPOLEHLIVOSTNÍHO MODULU NA ZKOUMANÉ VÝKONOVÉ OLEJOVÉ TRANSFORMÁTORY

Navržený spolehlivostní modul byl testován na datech získaných z diagnostických měření zde zkoumaných výkonových olejových transformátorů. Výstupy charakterizující spolehlivost byly uvedeny v předcházejících kapitolách předkládané disertační práce. Další text je tedy věnován výhradně výstupům z optimalizace dalšího provozu těchto strojů. Následující tabulky zachycují výsledky všech tří optimalizačních modelů, které byly nastaveny pomocí stejných vstupních parametrů, tj. pomocí stejných počtů hodin nutných k výkonu práce jednotlivých pracovníků, stejné průměrné hodinové mzdy a stejných finančních omezení na jednotlivé úkony. Číselné hodnoty v tabulkách představují optimální počty jednotlivých pracovníků.

Tab. 52 zaznamenává výstupy pro Model 1. Je zřejmé, že na výsledky téměř neměl vliv charakter elektrárny. U vodních elektráren byly získány identické výstupy a transformátory v tepelné elektrárně se svými výstupy lišily minimálně. Je zřejmé, že pro zajištění maximálních zisků z provádění oprav je nutné nasadit především pracovníky první skupiny, ve dvou případech je pak žádoucí v menším počtu uplatnit i pracovníky čtvrté a páté skupiny.

Tab. 52 Výstupy podmodulu Optimization 1.0 pro Model 1

Transformátor	Pracovník 1	Pracovník 2	Pracovník 3	Pracovník 4	Pracovník 5
Transformátor 1	20	0	0	0	0
Transformátor 2	20	0	0	0	0
Transformátor 3	20	0	0	0	0
Transformátor 4	20	0	0	0	0
Transformátor 5	20	0	0	0	0
Transformátor 6	20	0	0	0	0
Transformátor 7	20	0	0	0	0
Transformátor 8	10	0	0	3	3
Transformátor 9	10	0	0	3	3
Transformátor 10	20	0	0	0	0

V Tab. 53 jsou zachyceny výsledky pro Model 2. Opět je zde patrná výrazná shoda u všech zkoumaných transformátorů. K zajištění maximálních zisků je nyní potřeba méně pracovníků, než tomu bylo u Modelu 1. Došlo k výraznému snížení počtu pracovníků první skupiny a naopak se zvýšil vliv pracovníků třetí a ve třech případech i čtvrté skupiny.

Tab. 53 Výstupy podmodulu Optimization 1.0 pro Model 2

Transformátor	Pracovník 1	Pracovník 2	Pracovník 3	Pracovník 4
Transformátor 1	9	0	7	0
Transformátor 2	9	0	7	0
Transformátor 3	9	0	7	0
Transformátor 4	9	0	4	4
Transformátor 5	9	0	4	4
Transformátor 6	9	0	4	4
Transformátor 7	9	0	7	0
Transformátor 8	9	0	7	0
Transformátor 9	9	0	7	0
Transformátor 10	9	0	7	0

Výsledky pro Model 3 zaznamenává Tab. 54, která neobsahuje ani jeden sloupec tvořený pouze z nul. To odráží skutečnost, že pouze v tomto modelu se uplatní všechny skupiny pracovníků. Na rozdíl od předcházejících modelů se zde žádná výrazná shoda pro jednotlivé transformátory nevyskytuje a na každý stroj je tedy nutné uplatnit různé počty pracovníků.

Tab. 54 Výstupy podmodulu Optimization 1.0 pro Model 3

<b>Transformátor</b>	<b>Pracovník 1</b>	<b>Pracovník 1</b>	<b>Pracovník 1</b>	<b>Pracovník 1</b>	<b>Pracovník 1</b>	<b>Pracovník 1</b>	<b>Pracovník 1</b>
<b>Transformátor 1</b>	0	0	0	0	0	0	9
<b>Transformátor 2</b>	0	0	0	0	0	13	0
<b>Transformátor 3</b>	0	0	0	7	0	0	4
<b>Transformátor 4</b>	0	0	0	7	0	0	4
<b>Transformátor 5</b>	0	0	0	7	0	0	4
<b>Transformátor 6</b>	0	3	3	3	6	0	0
<b>Transformátor 7</b>	0	0	0	7	0	0	4
<b>Transformátor 8</b>	2	12	0	0	2	1	1
<b>Transformátor 9</b>	3	12	0	0	3	1	1
<b>Transformátor 10</b>	1	12	0	0	2	2	1

## ZÁVĚR

Předkládaná disertační práce navrhuje čtyři neinvazivní postupy pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti a jeden neinvazivní postup pro rozbor víceustavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů. Rovněž je zde naznačena metodika, jak lze získané spolehlivostní charakteristiky využít v optimalizaci dalšího provozu těchto netočivých elektrických strojů. Uvedené teoretické postupy byly uplatněny při vývoji softwaru Transformer Reliability Assessment, který představuje návrh spolehlivostního modulu pro diagnostický systém vyvíjený na školícím pracovišti FSI VUT v Brně.

Navržený spolehlivostní modul byl vyvíjen a verifikován prostřednictvím databáze diagnostických měření deseti výkonových olejových transformátorů. Tuto databázi tvoří časové řady hodnot diagnostických veličin měřených při odstávkách těchto netočivých elektrických strojů. Nejdříve byla tedy provedena důkladná analýza zmíněných časových řad. Pomocí krabicových grafů byly odstraněny odlehlé hodnoty, které zřejmě vznikly nepřesným přepsáním hodnot z papírových protokolů nebo chybami měření a odhadly se momentové funkce.

Odhady momentových funkcí veličin charakterizujících stav olejové náplně vycházely podobně u většiny zkoumaných výkonových olejových transformátorů. Pouze veličina  $\rho_{70}$  vykazovala značně rozdílné odhady u jednotlivých strojů. Důvodem byl zřejmě postup měření této veličiny, který je zřejmě nepřesný. U Transformátoru 1 a Transformátoru 2 byl odhalen velký odhad rozptylu veličiny  $U_p$ , což ukazuje na značné rozdíly mezi jednotlivými měřeními. U ČK a  $\text{tg } \delta_{70}$  vycházel ve všech případech nulový odhad rozptylu, z čehož lze naopak usuzovat, že se po celou dobu provozu zkoumaných transformátorů tyto dvě veličiny téměř neměnily. Bylo zjištěno, že na hodnoty veličin charakterizujících stav olejové náplně nemá stáří výkonového olejového transformátoru zásadní vliv. Podle výsledků získaných na základě analýzy těchto veličin tak zřejmě nelze posuzovat spolehlivost výkonových olejových transformátorů z hlediska jejich stárnutí.

Podle odhadů rozptylu izolačního odporu a ztrátového činitele lze usuzovat, že se hodnoty izolačního odporu během provozu transformátoru mění ve větší míře než hodnoty ztrátového činitele. U strojů, které se nenacházely na pokraji své plánované životnosti, se hodnoty ztrátového činitele příliš neměnily. Odhady středních hodnot i rozptylů těchto veličin byly u všech transformátorů podobné pro různá zapojení, z čehož vyplývá, že nezáleží na druhu zapojení měřicích přístrojů. Odhady středních hodnot obou veličin jsou sice podobné pro zapojení, ale liší se pro každý zkoumaný stroj. Měření těchto veličin je tedy užitečné při posuzování spolehlivosti výkonových olejových transformátorů z hlediska stárnutí.

Všechny zkoumané časové řady se dále podrobily analýze konstantnosti rozptylu. Bylo zjištěno, že časové řady diagnostických veličin jsou řady s konstantním rozptylem a lze je tedy modelovat pomocí ADM. Protože se u zkoumaných řad nevyskytovala periodická složka, předpokládaly se řady v další analýze ve tvaru zjednodušeného ADM. Podle vypočítaných koeficientů determinace byla jako nejlepší metoda pro odhad trendové složky určena metoda jádrového vyhlazování s následným proložením polynomem druhého stupně. Koeficienty determinace se v tomto případě většinou pohybovaly kolem hodnoty 1. Na závěr analýzy časových řad byla chybová složka podrobena testům náhodnosti, kde se ve všech případech tato složka jako náhodná ukázala.

První navržený neinvazivní postup pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti se nazývá Obecná metoda vycházející z časových řad. Výstupem je určení pravděpodobného roku dožití. Metoda ovšem představuje pouze prvotní náhled na vyhodnocení dat z off-line diagnostických měření výkonových olejových transformátorů a pro kvalitní rozbor spolehlivosti ji lze použít jen jako doplňující postup v kombinaci s dalšími neinvazivními

metodami. Nebyla nalezena žádná shoda u zkoumaných transformátorů, která by určila nejvhodnější diagnostickou veličinu pro predikování pravděpodobného roku dožití zkoumaných strojů. Je tedy žádoucí pravděpodobný rok dožití predikovat pomocí všech dostupných diagnostických veličin a ze získaných výsledků potom stanovit korektní závěry. Tyto závěry je nutné vyvodit v kolektivu odborníků, kteří se diagnostikou výkonových olejových transformátorů zabývají a mají dostatek informací o tom, na které poruchy jednotlivé diagnostické veličiny ukazují.

Druhým navrženým neinvazivním postupem pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti je Metoda vycházející z teorie časových řad a DGA. Metoda slouží k predikci pravděpodobností některých poruch, které mohou postihnout izolační systém výkonových olejových transformátorů. Bylo zjištěno, že Dornenburgova metoda ani u jednoho transformátoru nepredikovala nejpravděpodobnější poruchu. ČSN a Rogersova metoda většinou predikovala stav, kdy nelze o poruše stroje rozhodnout. Tento fakt vyplývá ze skutečnosti, že oblast, pro kterou nelze rozhodnout o typu pravděpodobnosti poruchy je daleko větší než ostatní oblasti. Tuto situaci vhodně ilustruje například Obr. 18. Uvedený problém však lze snadno odstranit fuzziifikací obou metod. Ukázalo se, že výhodou predikce nejpravděpodobnější poruchy pomocí Duvalovy metody je získání nejpravděpodobnější poruchy pokaždé, když je nenulová pravděpodobnost inicializace  $p_{p_t}$ . Pro kvalitní rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů je tedy nutné predikovat nejpravděpodobnější poruchu pomocí všech čtyř DGA metod a získané výsledky potom konzultovat s odborníky v dané oblasti. Dále bylo zjištěno, že při predikování pravděpodobností poruch a nejpravděpodobnější poruchy vykazovala pro odhad trendu časových řad nejlepší výsledky metoda jádrového vyhlazování spojená s proložením polynomem druhého stupně.

Třetí navržený neinvazivní postup pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti se nazývá Metoda distribučních funkcí. Metoda poskytuje odhad pravděpodobného roku dožití. Predikce pravděpodobného roku dožití celkem deseti zkoumaných výkonových olejových transformátorů byly úspěšně provedeny v pěti případech (Transformátor 1, Transformátor 2, Transformátor 3, Transformátor 4 a Transformátor 7). Ve třech dalších případech (Transformátor 8, Transformátor 9, Transformátor 10) nebylo možné o přesnosti predikce rozhodnout a pouze ve dvou případech (Transformátor 5 a Transformátor 6) se nepodařilo pravděpodobný rok dožití predikovat. Důvodem byl nedostatečný počet vstupních dat, které navíc obsahovaly spoustu chyb a nepřesností. Nejvhodnější metodou pro odhad trendu časových řad ztrátového činitele se u Metody distribučních funkcí ukázal lineární trend. Naopak jako nevhodné rozdělení pravděpodobnosti používané pro potřeby Metody distribučních funkcí se projevilo lognormální rozdělení.

Čtvrtým navrženým neinvazivním postupem pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti je metoda s názvem Spolehlivostní modely. Prostřednictvím této metody je možné získat odhad funkčních spolehlivostních charakteristik. Na zkoumané výkonové olejové transformátory se použilo celkem sedm spolehlivostních modelů. Nejpřesnější odhady funkčních spolehlivostních charakteristik byly získány Empirickým spolehlivostním modelem, Modelem MIT a Coxovým modelem v kombinaci s faktorovou analýzou pro cenzorovaná data. Vzhledem ke skutečnosti, že posledně jmenovaný model umožňuje při odhadování funkčních spolehlivostních charakteristik zahrnout také vliv hodnot diagnostických veličin měřených při poruše stroje, lze považovat Coxův model v kombinaci s faktorovou analýzou pro cenzorovaná data za model nejvhodnější pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů.

V předkládané disertační práci je rovněž navržen neinvazivní postup pro rozbor vícestavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů. Jedná se o

postup, který rozšiřuje Metodu vycházející z teorie časových řad a DGA na více možných stavů, ve kterých se mohou zkoumané stroje nacházet. Konkrétně se jedná o čtyři kvalitativně odlišné stavy. V rámci řešení této práce byly oba zmíněné postupy porovnány. Typ nejpravděpodobnější poruchy byl predikován v devíti případech z deseti u vícestavové spolehlivosti, zatímco u dvoustavové spolehlivosti pouze v sedmi případech z deseti. Ze zmíněných sedmi případů se navíc typ poruchy u obou postupů shodoval. Obě analýzy tedy poskytovaly stejné výsledky s rozdílem, že rozbořem vícestavové spolehlivosti byly získány podrobnější informace o budoucím stavu zkoumaných strojů. Kdyby se prováděl pouze rozbor dvoustavové spolehlivosti, ztratily by se informace týkající se zbylých stavů, jejichž pravděpodobnosti byly zejména u transformátorů pracujících v Elektrárně 4 značně vysoké a v žádném případě je tak nelze zanedbat.

V závěru předkládané disertační práce byly prezentovány tři modely pro optimalizaci dalšího provozu výkonových olejových transformátorů. Ze získaných výsledků vyplývá, že na optimalizované počty pracovníků neměl vliv charakter elektrárny. U vodních elektráren byly získány identické výstupy a transformátory v tepelné elektrárně se svými výsledky lišily jen minimálně. U prvních dvou modelů se uplatňovali pouze pracovníci prvních dvou skupin. U třetího modelu se uplatnily všechny skupiny pracovníků a na rozdíl od předešlých modelů se zde žádná výrazná shoda pro jednotlivé transformátory nevyskytovala.

Všechny zde prezentované postupy se uplatnily při návrhu spolehlivostního modulu diagnostického systému pro výkonové olejové transformátory, který nalezne široké uplatnění v technické praxi. Princip jeho činnosti je zachycen v posledních kapitolách předkládané disertační práce. Všechny vytvořené softwary včetně spolehlivostního modulu Transformer Reliability Assessment lze nalézt v **Příloha 19 - Vytvořené softwary a spolehlivostní modul Transformer Reliability Assessment**.

## PŘÍNOS A PŮVODNOST PRÁCE

V disertační práci byla nejdříve provedena podrobná analýza časových řad diagnostických veličin měřených při pravidelných odstávkách výkonových olejových transformátorů. Byly zkoumány data získaná z off-line měření celkem deseti strojů umístěných ve třech různých vodních elektrárnách a jedné tepelné elektrárně.

Poznatky získané z analýzy časových řad byly dále využity v návrhu neinvazivních postupů pro rozbor dvoustavové i vícestavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů. Vzhledem k důvodu, že technická praxe neposkytuje data vhodná pro provádění rozboru „klasické“ spolehlivosti vycházející z technických norem a z všeobecně uznávané teorie, vycházejí všechny navržené neinvazivní postupy z hodnot veličin získaných právě při provádění off-line diagnostiky výkonových olejových transformátorů. Všechny navržené neinvazivní postupy byly s uspokojujivou přesností verifikovány na dostupných datech. Byly tak získány odhady spolehlivostních charakteristik zkoumaných strojů jako pravděpodobný rok dožití, pravděpodobnost a typ nejpravděpodobnější poruchy, funkce spolehlivosti, intenzita poruch, distribuční funkce dob do poruchy a další.

Odhadnuté spolehlivostní charakteristiky byly dále využity v návrhu postupu pro optimalizaci dalšího provozu výkonových olejových transformátorů. Zde jsou prezentovány různé modely pro zajištění maximálních zisků v závislosti na počtech pracovníků provádějících opravy těchto strojů. Tento postup byl rovněž uplatněn při optimalizaci dalšího provozu všech deseti zkoumaných výkonových olejových transformátorů.

Každý neinvazivní postup včetně postupu pro optimalizaci dalšího provozu byl v rámci řešení předkládané disertační práce podpořen vytvořením softwaru v prostředí Matlab R2009b. Bylo tak vytvořeno celkem pět softwarů, které jsou hlavními částmi spolehlivostního modulu diagnostického systému výkonových olejových transformátorů, jehož navržení a realizace byly jedním z cílů předkládané disertační práce.

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

- **Na základě analýzy časových řad byly získány tyto výsledky:**
  - metoda měření vnitřní rezistivity při teplotě oleje 70 °C byla značně nepřesná,
  - hodnoty čísla kyselosti a ztrátového činitele oleje při teplotě oleje 70 °C se během provozu zkoumaných strojů téměř neměnily,
  - stáří stroje neovlivňovalo hodnoty veličin charakterizující stav olejové náplně,
  - na hodnoty veličin stavu izolace vinutí neměl zásadní vliv druh zapojení měřicích přístrojů,
  - nebyla identifikována veličina, jejíž časová řada se vyznačuje nekonstantním rozptylem,
  - časové řady diagnostických veličin měřených u výkonových olejových transformátorů neobsahovaly periodickou složku a bylo možné je tak modelovat zjednodušeným aditivním dekompozičním modelem,
  - nejvhodnější metoda pro odhad trendové složky zkoumaných časových řad byla metoda jádrového vyhlazování v kombinaci s následným proložením polynomem druhého stupně,

- chybová složka časových řad zkoumaných diagnostických veličin měla zcela náhodný charakter.
- **Byly navrženy a verifikovány následující neinvazivní postupy pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti:**
  - Obecná metoda vycházející z teorie časových řad,
  - Metoda vycházející z teorie časových řad a DGA,
  - Metoda distribučních funkcí,
  - Spolehlivostní modely.
- **Byl navržen a verifikován neinvazivní postup pro rozbor víceustavové odhadované spolehlivosti.**
- **Byl navržen postup pro využití spolehlivostních charakteristik při optimalizaci dalšího provozu výkonových olejových transformátorů.**
- **Byly vytvořeny softwary:**
  - Reliab\_dga\_Transformer 1.0,
  - RL 1.0,
  - RChE 1.0,
  - Reliab\_dga\_Transformer 2.0,
  - Optimization 1.0.
- **Byl vytvořen software s názvem Transformer Reliability Assessment, který představuje návrh spolehlivostního modulu pro diagnostický systém výkonových olejových transformátorů.**

Získané výsledky a závěry jsou nabízeny průmyslové praxi k dalšímu využití.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů – 1. část*. [PDF soubor]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/prispevek-k-rozboru-spolehlivosti-vykonovych-olejovych-transformatoru---1--cast-1/>>.
- [2] ČSN IEC 50(421): *Mezinárodní elektrotechnický slovník - Kapitola 421: Výkonové transformátory a tlumivky*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 46 s.
- [3] Podniková norma ČEZ, a.s. ev. č. 00/05 : *Profylaktika elektrických strojů netočivých - výkonové transformátory*. Praha: ČEZ,a.s., 2006. 93 s.
- [4] *Tr\_16*. Dostupné z: <[http://www.orgrez-r.cz/images/tr\\_16.jpg](http://www.orgrez-r.cz/images/tr_16.jpg)>.
- [5] POLANSKÝ, R. *Tepelné stárnutí elektroizolačních kapalin*. [PDF soubor]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/tepelne-starnuti-elektroizolacnich-kapalin/>>.
- [6] ŠIMKOVÁ, M. *Příspěvek k diagnostice výkonových olejových transformátorů*. Brno: FSI, VUT v Brně, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. 2010. 155 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Hammer Miloš, CSc.
- [7] HAMMER, M. *Elektrotechnika a elektronika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 134 s. ISBN: 80-214-3334-5.
- [8] MENTLÍK, V. a kol.: *Diagnostika elektrických zařízení*. BEN, 2008, 439 s.
- [9] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů – 1. část*. [PDF soubor]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vyuziti-casovych-rad-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-transformator---1--cast/>>.
- [10] HAMMER, M., MINISTR, M., ERTL, J., JANDA, O., BARVENČÍK, O. *Power Oil Transformer Reliability Assessment based on Fuzzy Inference Systems and Time Series Analysis*. In EnergySpectrum Journal. ISSN 1214-7044.
- [11] SAHA, T. K. Review of modern diagnostic techniques for assesing insulation condition in aged transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Oct. 2003, vol. 10, Issue 5, p. 903 – 917. ISSN 1070-9878.
- [12] ČSN EN 60599 *Elektrická zařízení v provozu plněná izolačním olejem - Pokyn pro interpretaci výsledků analýz rozpuštěných a volných plynů*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 88 s.
- [13] AKBARI, A. et. al.: *A Software Implementation of the Duval Triangle Method*. IEEE Xplore. [online]. [cit. 2011-04-15]. Dostupné z: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4570294&tag=1](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4570294&tag=1)>.
- [14] *Report: FIST 3-31, Transformer Diagnostics*. Bureau of Reclamation, Hydroelectric Research and Technical Services Group. Colorado, 2003. 71p.
- [15] MUHAMAD, N., PHUNG, B., BLACKBURN, T., LAI, K. *Comparative Study and Analysis of DGA Methods for Transformer Mineral Oil*. . [PDF soubor]. Dostupné z: <<http://www.labplan.ufsc.br/congressos/powertech07/papers/506.pdf>>.
- [16] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů – 2. část*. [PDF soubor]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vyuziti-casovych-rad-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-transformatoru---2--cast/>>.

- [17] HAMMER, M., JANDA, O., ERTL, J. *Využití vybraných soft-computingových metod v diagnostice výkonových olejových transformátorů – 3. část*. [PDF soubor]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika-elektrotechnologie/0/vyuziti-vybranych-soft-computingovych-metod-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-transformatoru---3--cast/>>.
- [18] ANDĚL, J.: *Matematická statistika*. Praha: STLN, 1978.
- [19] KARPÍŠEK, Z. *Matematika IV – Statistika a pravděpodobnost*. CERM, Brno, 2003. 170 s. ISBN: 80-214-2522-9.
- [20] KARPÍŠEK, Z. *Popisná statistika ekonomických časových řad*. [PDF soubor]. Dostupné z: <<http://www.math.fme.vutbr.cz/default.aspx?catalog=3&catsrtext=1&catsrfield=38>>
- [21] Box Plot. [online]. 2012. Dostupné z: <[http://www.ipaslovakia.sk/slovník\\_view.aspx?id\\_s=37](http://www.ipaslovakia.sk/slovník_view.aspx?id_s=37)>.
- [22] VESELÝ, V. *Základy analýzy časových řad*. [online]. [cit. 2011-02-16]. Dostupné z: <[www.econ.muni.cz/~vesely/papers/ad10cr.pdf](http://www.econ.muni.cz/~vesely/papers/ad10cr.pdf)>.
- [23] BOWMAN, A. W., AZZALINI, A.: *Applied smoothing techniques for data analysis: the kernel approach with S-Plus illustrations*, Oxford science publications, 1997.
- [24] ČSN EN 61703 *Matematické výrazy pro ukazatele bezporuchovosti, pohotovosti, udržitelnosti a zajištění údržby*. Praha: Český normalizační institut, 2002. 52 s
- [25] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů – 2. část*. [PDF soubor]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika-elektrotechnologie/0/prispevek-k-rozboru-spolehlivosti-vykonovych-olejovych-transformatoru--1--cast/>>.
- [26] KARPÍŠEK, Z. *Teorie spolehlivosti - metody a aplikace*. [PDF soubor]. Brno: Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Dostupný z: <<http://www.math.fme.vutbr.cz/default.aspx?catalog=3&catsrtext=1&catsrfield=38>>.
- [27] SMITH, P., J. *Analysis of Failure and Survival Data*. Chapman and Hall/CRC, 2002. ISBN-13: 978-1584880752.
- [28] HEBÁK, P., et al. *Vícerozměrné statistické metody 3*. Třebíč: Informatorium, 2007. 271 s. ISBN 978-80-7333-001-9.
- [29] ŮBERLA, K. *Faktorová analýza*. Bratislava: ALFA. 1974.
- [30] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů – 3. část*. [PDF soubor]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika-elektrotechnologie/0/prispevek-k-rozboru-spolehlivosti-vykonovych-olejovych-transformatoru---3--cast/>>.
- [31] TURZÍK, D. *Matematika III: Základy optimalizace*. 3rd ed. VŠCHT Praha, 1999. 114s. ISBN: 80-7080-363-0.

## PŘEHLED TVŮRČÍ ČINNOSTI AUTORA

### PUBLIKAČNÍ ČINNOST

- [1] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů – 1. část.* [PDF soubor]. 2011. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vyuziti-casovych-rad-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-transformator---1--cast/>>.
- [2] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů – 2. část.* [PDF soubor]. 2011. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vyuziti-casovych-rad-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-transformatoru---2--cast/>>.
- [3] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů – 3. část.* [PDF soubor]. 2011. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vyuziti-casovych-rad-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-transformatoru---3--cast/>>.
- [4] HAMMER, M., MINISTR, M., ERTL, J., JANDA, O., BARVENČÍK, O. *Power Oil Transformer Reliability Assessment based on Fuzzy Inference Systems and Time Series Analysis.* In EnergySpectrum Journal. pp. 5-16 ISSN 1214-7044.
- [5] ERTL, J., HAMMER, M., MINISTR, M., JANDA, O. *Failure Probability Prediction of Power Oil Transformers.* In MM Science Journal, Special Edition. Brno, MM Publishing, 2011, pp. 237-246. ISSN 1803-1269.
- [6] JANDA, O., HAMMER, M., ERTL, J., MINISTR, M., *Application of Fuzzy Logic in Power Oil Transformers Diagnostics.* In MM Science Journal, Special Edition. Brno, MM Publishing, 2011, pp. 319-324. ISSN 1803-1269.
- [7] JANDA, O., HAMMER, M., MINISTR, M., ERTL, J., *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Power Oil Transformer Diagnostics.* In MM Science Journal, Special Edition. Brno, MM Publishing, 2011, pp. 325-331. ISSN 1803-1269.
- [8] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů – 1. část.* [PDF soubor]. 2011. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/prispevek-k-rozboru-spolehlivosti-vykonovych-olejovych-transformatoru---1--cast-1/>>.
- [9] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů – 2. část.* [PDF soubor]. 2011. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/prispevek-k-rozboru-spolehlivosti-vykonovych-olejovych-transformatoru---1--cast/>>.
- [10] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D. *Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů – 3. část.* [PDF soubor]. 2011. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/prispevek-k-rozboru-spolehlivosti-vykonovych-olejovych-transformatoru---3--cast/>>.

- [11] MINISTR, M., HAMMER, M., ERTL, J., JANDA, O. *Ratio Methods Confrontation of Dissolved Gas Analysis*. In MM Science Journal, Special Edition. Brno, MM Publishing, 2011, pp. 228-236. ISSN 1803-1269.
- [12] HAMMER, M., ERTL, J., JANDA, O., BARVENČÍK, O., MINISTR, M. *Predikce poruch výkonových olejových transformátorů na základě časových řad a fuzzy přístupů*. Technická diagnostika. ATD ČR, 2012, pp. 69-75. ISSN 1210-311X.
- [13] HAMMER, M., ERTL, J. *Metodika určení roku dožití výkonových olejových transformátorů*. Elektro, 2012. FCC Public s.r.o., pp. 62-64, ISSN 1210-0889.
- [14] HAMMER, M., ERTL, J., JANDA, O. *Cox Model in Reliability Theory of Power Oil Transformers*. International Review on Modelling and Simulations. Itálie, 2012, roč. 5, č. 2, pp. 953-958. ISSN: 1974-9821.
- [15] HAMMER, M., ERTL, J., JANDA, O. *Estimation of Reliability Characteristics of Power Oil Transformers*. Engineering Mechanics, 2012, roč. 19, č. 1, s. 61-73. ISSN: 1802-1484.
- [16] HAMMER, M., JANDA, O., ERTL, J. *Využití vybraných soft-computingových metod v diagnostice výkonových olejových transformátorů - 1. část*. [PDF soubor]. 2012. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vyuziti-vybranych-soft-computingovych-metod-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-transformatoru---1--cast/>>.
- [17] HAMMER, M., JANDA, O., ERTL, J. *Využití vybraných soft-computingových metod v diagnostice výkonových olejových transformátorů - 2. část*. [PDF soubor]. 2012. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vyuziti-vybranych-soft-computingovych-metod-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-transformatoru---2--cast/>>.
- [18] HAMMER, M., JANDA, O., ERTL, J. *Využití vybraných soft-computingových metod v diagnostice výkonových olejových transformátorů - 3. část*. [PDF soubor]. 2012. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vyuziti-vybranych-soft-computingovych-metod-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-transformatoru---3--cast/>>.
- [19] HAMMER, M., ERTL, J., JANDA, O. *Predikce vícestavové spolehlivosti výkonových olejových transformátorů*. [PDF soubor]. 2011. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/predikce-vicestavove-spolehlivosti-vykonovych-olejovych-transformatoru/>>.
- [20] HAMMER, M., ERTL, J., JANDA, O. *Návrh spolehlivostního modulu expertního systému pro vyhodnocení stavu výkonových olejových transformátorů*. [PDF soubor]. 2011. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/predikce-vicestavove-spolehlivosti-vykonovych-olejovych-transformatoru/>>.
- [21] HAMMER, M., JANDA, O., ERTL, J. *Model Parameters Optimization for State Assessment of Power Oil Transformers*. In EnergySpectrum Journal. ISSN 1214-7044. (v tisku).

**PRODUKTY**

- [1] ERTL, J., JANDA, O., HAMMER, M. TRA: *Software pro určení spolehlivosti transformátorů*. ÚVSSR, FSI VUT v Brně. URL: <[http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page\\_id=15](http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=15)>. (software).
- [2] ERTL, J., KARPÍŠEK, Z. Soft Spolehlivost víceřadových systémů: *Reliab SMSO 1.0*. Centrum pro jakost a spolehlivost výroby, Odbor statistiky a optimalizace ÚM FSI VUT v Brně. URL: <<http://www.cqr.cz>>. (software).
- [3] HAMMER, M., JANDA, O., ERTL, J. Inteligentní zařízení 2: *Intelligentní zařízení pro posuzování a prognózu stavu transformátorů*. ÚVSSR, FSI VUT v Brně. URL: <[http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page\\_id=685](http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=685)>. (funkční vzorek).
- [4] JANDA, O., ERTL, J., HAMMER, M. PRED 1.0: *Software pro predikci diagnostických veličin*. ÚVSSR, FSI VUT v Brně. URL: <[http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page\\_id=685](http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=685)>. (software).
- [5] JANDA, O., ERTL, J., HAMMER, M. OPTIM 1.0: *Software pro optimalizaci nákladů na provoz výkonových olejových transformátorů*. ÚVSSR, FSI VUT v Brně. URL: <[http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page\\_id=685](http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=685)>. (software).

## SEZNAM PROJEKTŮ AUTORA

- [1] Projekt MPO ČR FI-IM5/173, 2008-2010, název: Metodika stanovení životnosti vysokonapětových izolačních systémů točivých strojů, spoluřešitel.
- [2] Projekt SV (FSI-J-11-10), 2011, název: Rozbor spolehlivosti výkonových olejových transformátorů, řešitel.
- [3] Projekt SV (FSI-S-11-5), 2011-2013, název: Enviromentální a bezpečnostní aspekty vývoje, výroby a provozu strojů, člen řešitelského týmu.
- [4] Projekt SV (FSI-J-12-10), 2012, název: Neinvazivní metody rozboru spolehlivosti a jejich využití v optimalizaci údržby výkonových olejových transformátorů, řešitel.

## PEDAGOGICKÁ ČINNOST AUTORA

- [1] Vedení laboratorních cvičení z předmětu Elektrotechnika a elektronika (cel) pro profesní bakalářské studium.
- [2] Vedení laboratorních cvičení z předmětu Elektrotechnika a elektronika (cel-k) pro kombinované studium.
- [3] Vedení laboratorních cvičení z předmětu Elektrotechnika a elektronika (6ee) pro obecné bakalářské studium.
- [4] Vedení cvičení z předmětu Bezpečnost a spolehlivost technických soustav (xbs).
- [5] Vedení cvičení z předmětu Spolehlivost a diagnostika výrobních strojů (gsd).
- [6] Vedení diplomové práce: AKHMADISHINA, A. *Predikce vývoje diagnostických veličin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Ertl.

## SEZNAM PŘÍLOH

### TIŠTĚNÉ PŘÍLOHY

- I. Příloha 1 - Pravděpodobnost, náhodná veličina, distribuční funkce
- II. Příloha 2 - Teorie časových řad
- III. Příloha 3 - Matematické modely ve spolehlivosti
- IV. Příloha 4 - Faktorová analýza
- V. Příloha 5 - Lineární optimalizace

### PŘÍLOHY UMÍSTĚNÉ NA PŘILOŽENÉM CD

- I. Příloha 1 - Krabicové grafy
- II. Příloha 2 - Odstranění odlehlých hodnot
- III. Příloha 3 - Odhady vybraných momentových funkcí
- IV. Příloha 4 - Stabilizace rozptylu
- V. Příloha 5 - Identifikace periodických komponent
- VI. Příloha 6 - Periodogramy
- VII. Příloha 7 - Koefficienty determinace
- VIII. Příloha 8 - Odhady koeficientů  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  a  $\beta_3$  polynomu druhého stupně u metody jádrové vyhlazování
- IX. Příloha 9 - Testy náhodnosti chybové složky
- X. Příloha 10 - Pravděpodobný rok dožití podle diagnostických veličin
- XI. Příloha 11 - Pravděpodobnosti poruch a predikce nejpravděpodobnější poruchy zkoumaných výkonových olejových transformátorů
- XII. Příloha 12 - Pravděpodobnosti poruch a nejpravděpodobnější porucha zkoumaných transformátorů predikované různými DGA metodami
- XIII. Příloha 13 - Grafy funkčních spolehlivostních charakteristik zkoumaných výkonových olejových transformátorů vytvořené modelem KIT
- XIV. Příloha 14 - Grafy funkčních spolehlivostních charakteristik zkoumaných výkonových olejových transformátorů vytvořené modelem MIT
- XV. Příloha 15 - Grafy funkčních spolehlivostních charakteristik zkoumaných výkonových olejových transformátorů vytvořené Coxovým modelem pro necenzorovaná data
- XVI. Příloha 16 - Grafy funkčních spolehlivostních charakteristik zkoumaných výkonových olejových transformátorů vytvořené Coxovým modelem uvažujícím také cenzorovaná data
- XVII. Příloha 17 - Grafy funkčních spolehlivostních charakteristik zkoumaných výkonových olejových transformátorů vytvořené Coxovým modelem neuvažujícím cenzorovaná data po aplikaci faktorové analýzy
- XVIII. Příloha 18 - Grafy funkčních spolehlivostních charakteristik zkoumaných výkonových olejových transformátorů vytvořené Coxovým modelem uvažujícím cenzorovaná data po aplikaci faktorové analýzy
- XIX. Příloha 19 - Vytvořené softwary a spolehlivostní modul Transformer Reliability Assessment

## PŘÍLOHA 1 - PRAVDĚPODOBNOST, NÁHODNÁ VELIČINA, DISTRIBUČNÍ FUNKCE

### MATEMATICKÁ DEFINICE PRAVDĚPODOBNOSTI

Teorie publikovaná v této části práce vychází z [19], kde se jakýkoliv pokus provedený za určitého systému podmínek, který však může mít různé výsledky, nazývá náhodný pokus. Jednotlivé možné výsledky náhodného pokusu se označují jako elementární náhodné jevy a v literatuře jsou většinou zastoupeny symbolem  $\omega$ . Všechny možné výsledky pokusu pak tvoří základní prostor  $\Omega$ , pro který platí, že  $\omega \in \Omega$ . Za náhodný jev  $A$  se potom pokládá libovolná podmnožina základního prostoru ( $A \in \Sigma$ ). Při náhodném pokusu vždy nastane elementární náhodný jev a s ním současně nastanou všechny náhodné jevy, které jej obsahují a naopak nenastanou všechny náhodné jevy, které jej neobsahují.

Jevové pole  $\Sigma$  na  $\Omega$  je množina náhodných jevů s vlastnostmi:

- Pro každý náhodný jev  $A \in \Sigma$  je opačný jev  $\bar{A} \in \Sigma$ .
- Pro každou posloupnost náhodných jevů  $A_i \in \Sigma, i = 1, 2, \dots$  je  $\bigcap_{i=1}^{\infty} A_i \in \Sigma$ .

Pravděpodobnost  $P(A)$  náhodného jevu  $A \in \Sigma$  je reálná funkce definovaná na jevovém poli  $\Sigma$  s vlastnostmi:

- $P(A) \geq 0$  pro všechny náhodné jevy  $A \in \Sigma$ .
- $P(\Omega) = 1$ .
- Pro každou posloupnost disjunktních náhodných jevů  $A_i \in \Sigma, i = 1, 2, \dots$  je

$$P\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} P(A_i).$$

Uspořádaná trojice  $(\Omega, \Sigma, P)$  se nazývá pravděpodobnostní prostor.

### NÁHODNÁ VELIČINA A JEJÍ DISTRIBUČNÍ FUNKCE

Nechť  $\Sigma$  je jevové pole. Potom zobrazení  $X: \Omega \rightarrow (-\infty, \infty)$ , pro které  $\{\omega \in \Omega: X(\omega) \leq x\} \in \Sigma$  pro každé  $x \in (-\infty, \infty)$ , se nazývá náhodná veličina. Náhodná veličina  $X(\omega)$  se značí zkráceně  $X$  a její realizace písmenem  $x$ . Intuitivně lze pojem náhodné veličiny vymežit formulací, že náhodná veličina  $X$  je reálná proměnná, která nabývá náhodně reálných číselných hodnot  $x$ .

Distribuční funkce náhodné veličiny  $X$  je reálná funkce

$$F(x) = P(X \leq x) \quad \forall x \in (-\infty, \infty).$$

Takto definovaná distribuční funkce se vyznačuje následujícími vlastnostmi:

- $0 \leq F(x) \leq 1$  pro všechna  $x \in (-\infty, \infty)$ ,
- $F(x)$  je neklesající, zprava spojitá a má nejvýše mnoho bodů nespojitosti na  $(-\infty, \infty)$ ,
- $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$  a  $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$ ,
- $P(a < X \leq b) = F(b) - F(a)$ ,
- $P(X = c) = F(c) - \lim_{x \rightarrow c^-} F(x)$ .

Distribuční funkcí je náhodná veličina jednoznačně určena a je tak dáno její rozdělení pravděpodobnosti. Náhodná veličina  $X$  je diskrétní (má diskrétní rozdělení pravděpodobnosti), jestliže nabývá nejvýše spočetně mnoha hodnot  $x$  a její pravděpodobnostní funkce je posloupnost

$$p(x) = P(X = x) > 0.$$

Distribuční funkce diskrétní náhodné veličiny  $X$  má schodovitý tvar a spočítá se podle vztahu

$$F(x) = \sum_{t \leq x} p(t).$$

Náhodná veličina  $X$  je spojitá (má spojitě rozdělení pravděpodobnosti), jestliže má spojitou distribuční funkci  $F(x)$ . Její hustota pravděpodobnosti je taková nezáporná funkce  $f(x)$ , pro kterou platí

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt.$$

Číselné charakteristiky náhodné veličiny  $X$  jsou reálná čísla, která vyjadřují její důležité vlastnosti. Mezi nejvýznamnější charakteristiky polohy patří střední hodnota  $E(X)$  definovaná následně:

- $E(X) = \sum_x xp(x)$  ... pro diskrétní náhodnou veličinu,
- $E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx$  ... pro spojitou náhodnou veličinu.

Míru kolísání hodnot náhodné veličiny  $X$  kolem střední hodnoty  $E(X)$  vyjadřuje rozptyl  $D(X)$ , který se spočítá podle vztahu

$$D(X) = E([X - E(X)]^2).$$

Další charakteristikou variability náhodné veličiny  $X$  je směrodatná odchylka  $\sigma(X)$ , pro kterou platí vztah

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)}.$$

Poslední charakteristikou náhodné veličiny, která je významná z hlediska určování spolehlivosti je  $p$ -kvantil náhodné veličiny  $x_p$ , který se spočítá na základě vztahu

$$x_p = \inf\{x; F(x) > p\}.$$

Kvantil  $x_{0,5}$  je medián náhodné veličiny  $X$  a charakterizuje polohu jejího rozdělení pravděpodobnosti. Mezi další významné kvantily patří horní resp. dolní kvartil statistického souboru, což je kvantil  $x_{0,25}$  resp. kvantil  $x_{0,75}$ . V poslední části této přílohy budou blíže popsány různé typy rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny, které se v předkládané disertační práci využívají.

**ROVNOMĚRNÉ ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOSTI**

Náhodná veličina  $X$  má rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti na intervalu  $\langle a, b \rangle$  právě tehdy když hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny  $X$  má tvar:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{pro } x \in \langle a, b \rangle \\ 0 & \text{pro } x \notin \langle a, b \rangle \end{cases}$$

Uvedená situace se značí  $X \sim Ro(a, b)$  a distribuční funkce se spočítá podle vztahu

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x \in (-\infty, a) \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{pro } x \in \langle a, b \rangle \\ 1 & \text{pro } x \in (b, \infty) \end{cases}$$

**NORMÁLNÍ ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOSTI**

Náhodná veličina  $X$  má normální rozdělení pravděpodobnosti s parametry  $\mu$  a  $\sigma^2 > 0$  právě tehdy když hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny  $X$  má tvar:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \text{ pro } x \in (-\infty, \infty).$$

Uvedená situace se značí  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ . Necht'  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ , pak náhodná veličina  $U = \frac{X-\mu}{\sigma}$  má normované normální rozdělení  $N(0,1)$  s distribuční funkcí  $\Phi(u)$ , pro které platí:

- $\Phi(-u) = 1 - \Phi(u)$ ,
- $u_{1-p} = -u_p$ ,  $0 < p < 1$ ,
- $F(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$ ,
- $x_p = \mu + \sigma u_p$ ,  $0 < p < 1$ .

**LOGNORMÁLNÍ ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOSTI**

Náhodná veličina  $X$  má lognormální rozdělení pravděpodobnosti s parametry  $\mu$  a  $\sigma^2 > 0$  právě tehdy když hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny  $X$  má tvar:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \text{ pro } x \in (0, \infty).$$

Uvedená situace se značí  $X \sim LN(\mu, \sigma^2)$  a distribuční funkce se spočítá podle vztahu

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right).$$

**OBEČNÉ ROZDĚLENÍ EXTRÉMŇNÍCH HODNOT**

Náhodná veličina  $X$  má obecné rozdělení extrémních hodnot s parametry  $\mu$ ,  $\sigma$  a  $\gamma \neq 0$  právě tehdy když hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny  $X$  má tvar:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} e^{-(1+k\frac{x-\mu}{\sigma})^{-\frac{1}{\gamma}}} (1+k\frac{x-\mu}{\sigma})^{-1-\frac{1}{\gamma}} \text{ pro } 1+k\frac{x-\mu}{\sigma} \in (0, \infty).$$

Uvedená situace se značí  $X \sim \text{Gev}(\mu, \sigma, \gamma)$ .

**EXPONENCIÁLNÍ ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBŇNOSTI**

Náhodná veličina  $X$  má exponenciální rozdělení pravděpodobnosti s parametrem  $\lambda > 0$  právě tehdy když hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny  $X$  má tvar:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \text{ pro } x \in (-\infty, \infty).$$

Uvedená situace se značí  $X \sim \text{Exp}(\lambda)$  a distribuční funkce se spočítá podle

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}.$$

**WEIBULLOVO ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBŇNOSTI**

Náhodná veličina  $X$  má Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti s parametry  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$  právě tehdy když hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny  $X$  má tvar:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \text{ pro } x \in (0, \infty).$$

Uvedená situace se značí  $X \sim W(\alpha, \beta)$  a distribuční funkce se spočítá podle

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}.$$

## PŘÍLOHA 2 - TEORIE ČASOVÝCH ŘAD

Teorie publikovaná v této části práce vychází z [9], kde se náhodným stochastickým procesem rozumí neprázdný systém náhodných veličin definovaných na stejném pravděpodobnostním prostoru  $(\Omega, \Sigma, P)$ . Značí se  $Y = \{Y_t, t \in T\}$ , případně stručněji  $Y_t$ . Pro  $T \subseteq \mathbf{R}$  se jedná o časovou řadu. Pro každý náhodný případ  $\omega \in \Omega$  se pak dostane funkce  $y: T \rightarrow \mathbf{R}$  jako výsledek náhodného experimentu  $y_t = Y_t(\omega)$ . Tato funkce se nazývá pozorování (realizace, trajektorie) procesu  $Y_t$ . Pro stochastický proces  $Y_t$  se definují momentové funkce:

- **střední hodnota  $Y_t$ :**  $\mu_Y: T \rightarrow \mathbf{R}$ , kde  $\mu_Y(t) = E(Y_t)$ , pokud tyto střední hodnoty existují pro všechna  $t \in T$ ,
- **autokovarianční funkce  $Y_t$ :**  $\gamma_Y: T \times T \rightarrow \mathbf{R}$ , kde  $\gamma_Y(r, s) = cov(Y_r, Y_s)$ , pokud tyto kovariance existují pro všechna  $r, s \in T$ ,
- **rozptyl  $Y_t$ :**  $\sigma_Y^2: T \rightarrow \mathbf{R}^+$ , kde  $\sigma_Y^2 = var(Y_t) = cov(Y_t, Y_t) = \gamma_Y(t, t)$ , pokud tyto rozptyly existují pro všechna  $t \in T$ ,
- **autokorelační funkce  $Y_t$ :**  $\rho_Y: T \times T \rightarrow \langle -1; 1 \rangle$ , kde

$$\rho_Y(r, s) = \begin{cases} \frac{\gamma_Y(r, s)}{\sqrt{\gamma_Y(r, r)}\sqrt{\gamma_Y(s, s)}} & \text{pro } \sqrt{\gamma_Y(r, r)}\sqrt{\gamma_Y(s, s)} \neq 0 \\ \rho_Y(r, s) = 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

pokud tyto kovariance existují pro všechna  $r, s \in T$ .

Časová řada  $Y = \{Y_t, t \in \mathbf{R}\}$ , se nazve stacionární, jestliže jsou splněny tyto podmínky:

- 1)  $Y_t$  má konečné rozptyly, tedy  $\sigma_Y^2(t) < \infty$  pro všechna  $t \in \mathbf{R}$ ,
- 2)  $\gamma_Y(r, s) = \gamma_Y(r + h, s + h)$  pro všechna  $r, s, h \in \mathbf{R}$ ,
- 3)  $\mu_Y(t) = \mu_Y$  je konstantní funkce.

Jsou-li splněny pouze první dvě podmínky, nazve se řada  $Y = \{Y_t, t \in \mathbf{R}\}$  kovariančně stacionární. Z uvedeného vyplývá, že rozptyl stacionární časové řady je také konstantní funkce, tedy  $\sigma_Y^2(t) = \sigma_Y^2$ . Druhá podmínka je navíc ekvivalentní s podmínkou, že  $\gamma_Y(r, s)$  závisí pouze na rozdílu argumentů  $r - s$ . Proto lze autokorelační i autokovarianční funkci stacionární časové řady zavést jako funkci jedné proměnné:

$$\gamma_Y(h) = \gamma_Y(t + h, t),$$

$$\rho_Y(h) = \rho_Y(t + h, t).$$

Při analýze časových řad nejsou zpravidla známé momentové funkce, proto je třeba stanovit jejich odhady. Jestliže  $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$  je  $n$  pozorování ( $y_t = Y_t(\omega)$  pro  $t = 1, 2, \dots, n$ ) stacionární časové řady se střední hodnotou  $\mu_Y$ , rozptylem  $\sigma_Y^2$ , autokovarianční funkcí  $\gamma_Y$  a autokorelační funkcí  $\rho_Y$ , jejich odhady se pak spočítají pomocí následujících vztahů:

$$\hat{\mu}_Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

$$\hat{\gamma}_Y(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-h} (y_{i+h} - \hat{\mu}_Y)(y_i - \hat{\mu}_Y), 0 \leq h \leq n-1,$$

$$\hat{\gamma}_Y(h) = \hat{\gamma}_Y(-h), -(n-1) \leq h \leq 0,$$

$$\widehat{\sigma^2}_Y = \hat{\gamma}_Y(0),$$

$$\hat{\varrho}_Y(h) = \frac{\hat{\gamma}_Y(h)}{\hat{\gamma}_Y(0)}, -(n-1) \leq h \leq n-1, \text{ pro } \hat{\gamma}_Y(0) \neq 0, \text{ jinak } \hat{\varrho}_Y(h) = 0.$$

Podle [20] lze časové řady rozdělit na:

- **intervalové,**
- **okamžikové.**

V intervalových časových řadách se měření hodnot provádí po určité časové intervaly (hodina, den, týden, měsíc, atd.). Údaje, které tato řada interpretuje, většinou odpovídají množství. Důležitou vlastností intervalové časové řady je možnost součtu údajů, který má určitý význam. Základní číselná charakteristika intervalové časové řady je aritmetický průměr:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

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

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

kde  $d_1 = t_2 - t_1, d_2 = t_3 - t_2, \dots, d_{n-1} = t_n - t_{n-1}$ .

Předešlé dva typy lze také charakterizovat jako řady původních veličin. Vedle těchto řad dále existují časové řady odvozených veličin, mezi které se řadí: [20]

- **časové řady kumulativních součtů** - tvoří je 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. U těchto řad je patrný rozdíl mezi kumulativními průměry a celkovým průměrem za sledované období.

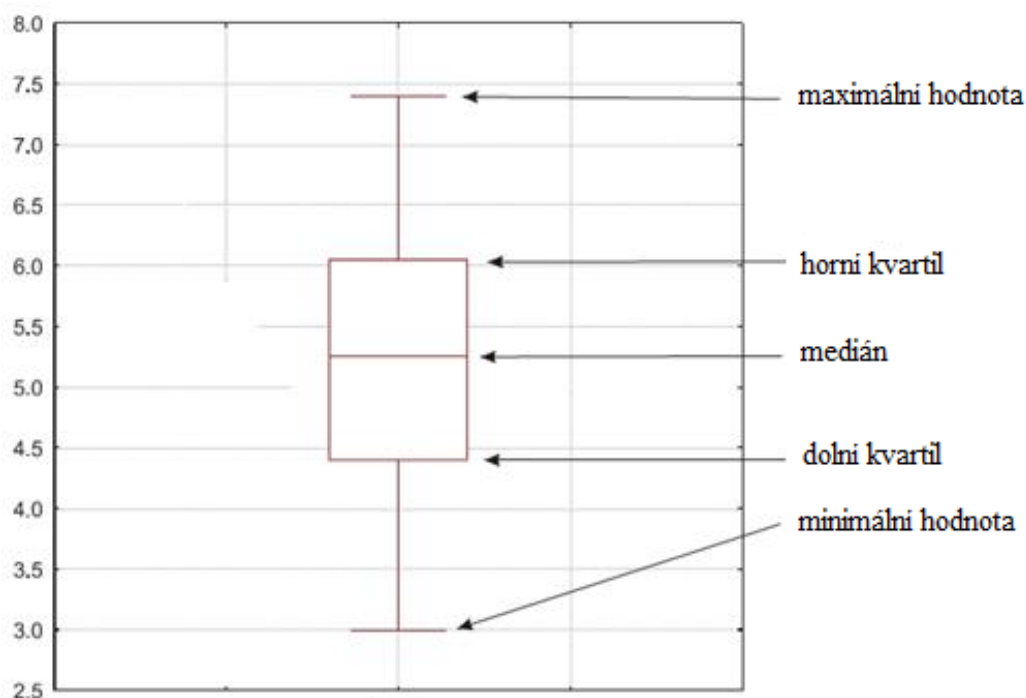
- **časové řady klouzavých součtů** - jsou tvořeny postupnými součty předem několika po sobě jdoucích hodnot původní řady. Používají se především u intervalových časových řad a ukazují na vývojové tendence původní řady ve dvou delších obdobích.
- **časové řady klouzavých průměrů** - jedná se o řady, kdy se klouzavý součet dělí počtem sečtených období.

### PŘEDZPRACOVÁNÍ ČASOVÉ ŘADY

Pokud to lze, začíná analýza časové řady volbou okamžiků pozorování. Časové okamžiky se volí ekvidistantně (se stejnými rozestupy). Pozornost se také musí věnovat počtu pozorování, pokud je příliš málo bodů, může být zanedbán charakteristický rys řady, v opačném případě se zvyšuje výpočetní náročnost. Do analýzy je také vhodné zpracovat různou délku kalendářních měsíců, počty víkendů a pracovních dnů v měsících. Jednotlivá měření navíc nemusí být zcela kompatibilní. V časové řadě se mohou vyskytovat tzv. odlehle hodnoty způsobené například chybou měření, působením nevhodných okolních vlivů, špatným přepsáním desetinné čárky atd. Tyto hodnoty zkreslují výsledky analýzy, proto je vhodné, je z analýzy vyřadit. Lze je identifikovat například pomocí krabicového grafu.

### KRABICOVÝ GRAF [19]

Obrázek 1 zachycuje příklad krabicového grafu včetně popisu jeho význačných hran. Obdélník v grafu představuje střední část zkoumaného uspořádaného souboru (zhruba polovinu všech jeho hodnot) tak, že nalevo a napravo od obdélníku leží vždy zhruba čtvrtina hodnot uspořádaného souboru. Horní resp. dolní hrana obdélníku odpovídá hornímu resp. dolnímu kvartilu statistického souboru a čára uprostřed značí jeho medián. Šířka obdélníku je úměrná rozsahu souboru, úsečky nahoře a dole zakončené krátkými vodorovnými čarami vyjadřují přijatelné obory pro zbývající dolní a horní čtvrtinu souboru. Hodnoty mimo tyto úsečky jsou považovány za odlehle.



Obrázek 1 Krabicový graf [21]

### ADITIVNÍ DEKOMPOZIČNÍ MODEL (ADM)

Aditivní dekompoziční model předpokládá časovou řadu ve tvaru:

$$Y_t = \underbrace{Tr_t + \overbrace{Sz_t + C_t}^{P_t}}_{D_t} + E_t,$$

kde  $Tr_t$  představuje dlouhodobý trend,  $Sz_t$  sezónní složku (perioda předem známá),  $C_t$  cyklickou složku (perioda předem neznámá),  $E_t$  náhodnou složku,  $P_t$  celkovou periodickou složku a  $D_t$  deterministickou složku. ADM se používá pro data s konstantním rozptylem, pokud tato podmínka není splněna, provádí se stabilizace rozptylu.

### STABILIZACE ROZPTYLU

Pokud data nemají konstantní rozptyl, lze časovou řadu transformovat na řadu s konstantním rozptylem. Při tom se předpokládá následující model závislosti směrodatné odchylky na střední hodnotě:

$$\sigma_Y(t) = \sigma_0 \mu_Y(t)^\theta.$$

Parametr  $\theta$  se odhadne z pozorované řady a poté lze použít například mocninnou nebo logaritmickou transformaci (pro řadu  $Y_t > 0$ ), kde  $\lambda = 1 - \theta$ :

$$Z_t = \begin{cases} Y_t^\lambda & \text{pro } \lambda \neq 0, \\ \ln(Y_t) & \text{pro } \lambda = 0. \end{cases}$$

Časová řada  $Z_t$  je potom řada s konstantním rozptylem a lze ji modelovat pomocí ADM. Pro  $\lambda = 1$  má původní časová řada  $Y_t$  rozptyl konstantní a transformace není potřeba.

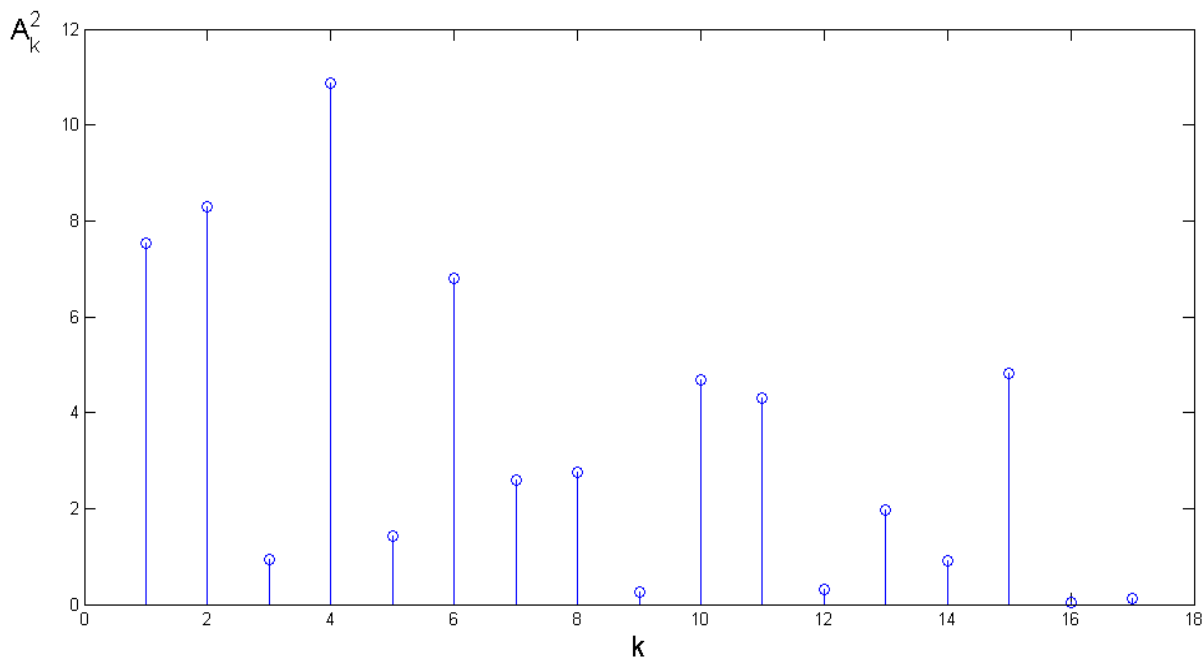
### IDENTIFIKACE PERIODICKÝCH KOMPONENT

Jak již bylo uvedeno výše, periodická složka aditivního dekompozičního modelu se skládá z cyklické a sezónní komponenty. V praxi je ovšem velmi obtížné tyto složky od sebe odlišit. Proto se provádí odhad  $P_t$  jako celku. Její identifikace je založena na rozkladu T-periodické funkce  $y(t)$  do Fourierovy řady:

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

$$A_k = 2|c_k|.$$

Cílem je identifikovat energeticky nejsilnější harmonické komponenty. Ty mají velkou hodnotu  $A_k^2$ . Periodogram je pak posloupnost hodnot odhadující energetickou hustotu. Z jeho grafického znázornění je možné získat komponenty, které se dále podrobí statistickým testům periodicity. Často využívané jsou Fisherův a Siegelův test, jejichž popis lze nalézt například v [22]. Příklad grafického znázornění periodogramu zachycuje Obrázek 2.



Obrázek 2 Grafické znázornění periodogramu

### ODHAD TRENDOVÉ SLOŽKY

K odhadu trendové složky charakterizující dlouhodobý vývoj sledované časové řady lze využít celou řadu metod. Jedná se především o metody:

- **metoda malého trendu** - předpokládá v každé periodě přibližně konstantní trend, který se odhadne jako aritmetický průměr,
- **metoda klouzavých průměrů** - více informací o této metodě lze nalézt v [20],
- **regresní model** - je založený na metodě nejmenších čtverců, existují různé typy:
  - lineární regresní model:  $Tr_t = \beta_1 t^p + \beta_2 t^{p-1} + \dots + \beta_{p+1}$ ,  $p \in \{1,2\}$ ,
  - exponenciální regresní model:  $Tr_t = \beta_1 e^{\beta_2 t}$ ,
  - mocninný regresní model:  $Tr_t = \beta_1 t^{\beta_2}$ .

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

- **jádrové vyhlazování** - zde se využívá gaussovské jádro s optimalizovanou šířkou vyhlazovacího okna. Více o této metodě lze nalézt například v [23].

### VYŠETŘENÍ CHYBOVÉ SLOŽKY

Na závěr analýzy každé časové řady je nutné posoudit kvalitu zvoleného aditivního dekompozičního modelu. Po odečtení trendové složky se zbylá část podrobí testům, zda se skutečně jedná pouze o náhodnou složku. Jde o testy:

- **znaménkový test** - ZN,
- **test růstu a klesání** - RK,
- **test Kendalových koeficientů** - KK,
- **test Spearmanových koeficientů** - SK,
- **mediánový test** - MED.

Bližší informace o těchto testech lze nalézt v [22].

## PŘÍLOHA 3 - MATEMATICKÉ MODELY VE SPOLEHLIVOSTI

Teorie publikovaná v této části práce vychází z [1], [25] a [26], kde každý stochastický model spolehlivosti vychází z předpokladu, že doba do poruchy je spojitá náhodná veličina  $T$ , která nabývá nezáporných hodnot. Pro její popis lze užít zejména následující funkční spolehlivostní charakteristiky.

Funkce spolehlivosti  $S(t)$  náhodné veličiny  $T$  je funkce

$$S(t) = 1 - F(t) = P(T > t)$$

pro všechna  $t \in (-\infty, \infty)$ , kde  $F(t)$  je distribuční funkce náhodné veličiny  $T$ .  $S(t)$  vyjadřuje spolehlivost objektu ve smyslu pravděpodobnosti, že doba do poruchy překročí dobu  $t$ . Je-li k dispozici  $n$  dob do poruchy nějakého zařízení  $t_1, t_2, \dots, t_n$  jako nezávislé realizace veličiny  $T$ . Pak se funkce

$$S_n(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{(t, \infty)}(t_i),$$

kde

$$I_A(t_i) = \begin{cases} 1, & \text{pokud } t_i \in A \\ 0, & \text{jinak,} \end{cases}$$

nazývá empirická spolehlivostní funkce. Hodnota  $S_n(t)$  udává poměr počtu pozorování, jejichž hodnota je větší než  $t$ , k počtu všech pozorování. Lze tak dostat první informaci o tvaru spolehlivostní funkce, kterou lze využít pro vhodnou volbu spolehlivostního modelu.

Další funkční charakteristikou pro popis náhodné veličiny  $T$  je její intenzita poruch  $h(t)$ , kterou lze spočítat podle vztahu

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)}.$$

Kumulovaná intenzita poruch  $H(t)$  náhodné veličiny  $T$  je pak dána předpisem

$$H(t) = \int_0^t h(\tau) d\tau.$$

Střední zbytková životnost  $\hat{r}(t) = r(t) + t$ , poskytuje odpověď na otázku, kolik času zbývá průměrně danému zařízení v čase  $t$  do jeho poruchy. Definována je následovně

$$\hat{r}(t) = r(t) + t = E(T - t | T > t) + t.$$

Jednoduše lze odvodit, že

$$r(t) = \frac{\int_t^\infty S(\tau) d\tau}{S(t)}.$$

Mezi uvedenými charakteristikami platí vzájemně jednoznačné vztahy [26]. Protože  $h(t)$  je výstupem modelů popsaných dále, jsou zde níže uvedeny vztahy pro výpočet funkčních spolehlivostních charakteristik v případě, že je známá pouze intenzita poruch  $h(t)$ :

$$f(t) = h(t) \cdot \exp \left[ - \int_0^t h(\tau) d\tau \right],$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \int_0^t h(\tau) d\tau \right],$$

$$S(t) = \exp \left[ - \int_0^t h(\tau) d\tau \right],$$

Vedle funkčních spolehlivostních charakteristik je nutné při rozboru spolehlivosti technického zařízení také stanovit číselné spolehlivostní charakteristiky, mezi které se řadí střední doba do poruchy, rozptyl, směrodatná odchylka či významný kvantil. Vztahy pro výpočet těchto charakteristik jsou identické jako pro výpočet charakteristik obecné náhodné veličiny. Střední dobu do poruchy lze spočítat také pomocí spolehlivostní funkce na základě vztahu

$$E(T) = \int_0^{\infty} R(t) dt.$$

V následujícím textu jsou popsány postupy, jak modelovat vybrané spolehlivostní charakteristiky.

### MODEL PŘEDPOKLÁDAJÍCÍ KONSTANTNÍ INTENZITU PORUCH (KIT)

Základním předpokladem tohoto modelu je konstantní intenzita poruch  $h(t)$  náhodné veličiny  $T$ , tedy

$$h(t) = \lambda, \quad \lambda > 0.$$

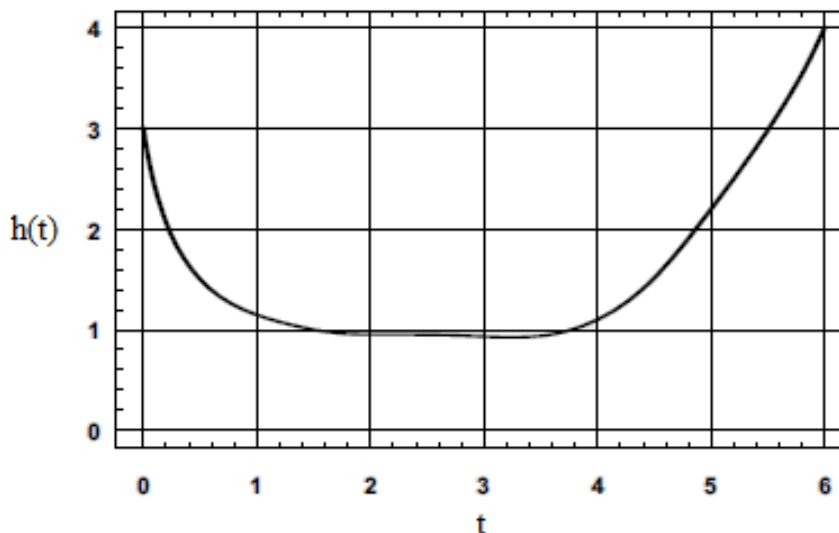
Jednoduše lze odvodit, že

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

což je předpis pro hustotu pravděpodobnosti náhodné veličiny, která má exponenciální rozdělení pravděpodobnosti s parametrem  $\lambda$ . Je tedy zřejmé, že tento model je vhodné užít zejména v případech, kdy se náhodná veličina  $T$  řídí právě tímto rozdělením. Parametr  $\lambda$  lze odhadnout například pomocí funkce `expfit` implementované v systému Matlab R2009b. Model KIT tak dobře popisuje především spolehlivost objektů, u nichž dochází k poruchám ze zcela náhodných příčin, nikoliv z důvodu například opotřebení. Vhodně modeluje střední část vanové křivky, která představuje chování reálného neopravovaného objektu. Vanovou křivku lze rozdělit na tři úseky:

- **období počátečního provozu** – jde o první klesající úsek, poruchovost objektu je zde způsobena poruchami zaviněnými konstrukcí a výrobou,
- **období normálního provozu** – ve vanové křivce ho zastupuje střední konstantní část, porucha je v tomto úseku způsobena náhodně podle exponenciálního rozdělení pravděpodobnosti,
- **období dožití objektu** – jedná se o třetí rostoucí úsek křivky, kdy je porucha objektu způsobena únavou materiálu, stárnutím apod.

Příklad vanové křivky zachycuje Obrázek 3.



Obrázek 3 Vanová křivka [26]

### MODEL PŘEDPOKLÁDAJÍCÍ MOCNINNOU INTENZITU PORUCH (MIT)

Intenzitu poruch pozorované náhodné veličiny  $T$  je možné v souladu s předpokladem, aby byla mocninnou funkcí času, napsat ve tvaru:

$$h(t) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} t^{\alpha-1},$$

kde  $\alpha$  a  $\beta$  jsou kladné konstanty. Jednoduše lze odvodit následující vztah pro hustotu pravděpodobnosti  $f(t)$ :

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right].$$

Je zřejmé, že předcházející vztah koresponduje se vztahem pro výpočet hustoty pravděpodobnosti náhodné veličiny, která má Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti o parametrech  $\alpha$  a  $\beta$ . Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti se podle [27] někdy uvádí jako tříparametrické, v tomto případě se pak považuje třetí parametr za nulový. Parametry  $\alpha$  a  $\beta$  lze odhadnout například užitím softwaru Matlab R2009b (funkce `wblfit`). Model MIT je tak vhodný právě pro situace, kdy má sledovaná náhodná veličina Weibullovo rozdělení, což nastává ve třetím úseku vanové křivky. Je zřejmé, že pokud je  $\alpha = 1$ , z modelu MIT se stává model KIT.

## COXŮV MODEL

Coxův model umožňuje na rozdíl od předcházejících modelů odhadovat spolehlivostní charakteristiky v závislosti na dalších  $p$  měřených veličinách. Tyto veličiny lze sdružit do náhodného vektoru  $\mathbf{X}^T = (X_1, X_2, \dots, X_p)$ . Realizace tohoto náhodného vektoru je potom vektor  $\mathbf{x}^T = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ . Symbol  $T$  v horním indexu u vektoru resp. matice značí nyní transponování vektoru resp. matice. Symbol  $T_{\mathbf{x}}$  bude značit náhodnou veličinu  $T$  pro danou realizaci náhodného vektoru  $\mathbf{X} = \mathbf{x}$ .

Coxův model tedy pracuje s dobou do poruchy stejně jako předcházející modely KIT a MIT. Tvar spolehlivostních charakteristik vystupujících z tohoto modelu je však také ovlivněn hodnotami doplňujících veličin reprezentovaných realizací  $\mathbf{x}^T$  náhodného vektoru  $\mathbf{X}^T$ . Coxův model vychází z tzv. proporční intenzity poruch  $h_{\mathbf{x}}(t)$  náhodné veličiny  $T$ . Jedná se vlastně o intenzitu poruch náhodné veličiny  $T$  při realizaci  $\mathbf{x}^T$ , která se určí podle vztahu

$$h_{\mathbf{x}}(t) = h_0(t)g_1(\mathbf{x}),$$

kde  $g_1(\mathbf{x})$  je kladnou funkcí  $\mathbf{x}$  a  $h_0(t)$  představuje počáteční intenzitu poruch, což je vlastně intenzita poruch pro případ, kdy  $g_1(\mathbf{x}) = 1$ .  $h_0(t)$  se odhadne pouze z dob do poruchy, jedná se vlastně o případ, kdy  $x_1 = x_2 = \dots = x_p = 0$ . V Coxově modelu se volí

$$g_1(\mathbf{x}) = e^{\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{x}},$$

pak

$$h_{\mathbf{x}}(t) = h_0(t)e^{\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{x}}.$$

Tato volba funkce  $g_1(\mathbf{x})$  je oprávněná, protože pro  $\mathbf{x}^T = (0, 0, \dots, 0)$  je

$$g_1(\mathbf{0}) = e^{\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{0}} = e^0 = 1.$$

Parametry modelu, tj. vektor koeficientů  $\boldsymbol{\beta}^T = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p)$  a počáteční intenzita poruch  $h_0(t)$ , jsou odhadovány na základě maximální věrohodnosti, podrobný postup lze nalézt v [27]. Snadno se odvodí, že například spolehlivostní funkce bude tvaru

$$S(t) = [S_0(t)]^{g_1(\mathbf{x})},$$

kde

$$S_0(t) = e^{(-\int_0^t h_0(u) du)}.$$

Coxův model je implementován v systému Matlab R2009b, výstupem je zde především odhad vektoru parametrů  $\boldsymbol{\beta}$  a kumulovaná počáteční intenzita poruch  $H_0(t)$ . Z definičního vztahu pro kumulovanou intenzitu poruch  $H(t)$  plyne, že

$$h_0(t) = \frac{dH_0}{dt}.$$

Pomocí  $h_0(t)$  lze snadno určit proporční intenzitu poruch  $h_{\mathbf{x}}(t)$  a spolehlivostní funkci  $S(t)$ . Snadno se pak spočítají další funkční spolehlivostní charakteristiky jako:

- **distribuční funkce dob do poruchy  $F(t)$ ,**
- **hustota dob do poruchy  $f(t)$ ,**
- **kumulovaná intenzita poruch  $H(t)$ ,**
- **střední zbytková životnost  $\hat{r}(t)$ .**

Coxův model lze použít jak pro cenzorovaná, tak pro necenzorovaná data. Cenzorování se uplatňuje při sledování  $n$  objektů po určitou dobu  $t$ . Rozlišují se dva druhy cenzorování:

- **cenzorování časem  $t_c$**  –  $n$  objektů se sleduje po dobu  $t_c$  a zaznamenávají se doby do poruchy objektů, které se do doby  $t_c$  porouchaly. Za předpokladu, že se do doby  $t_c$  porouchalo právě  $k$  objektů,  $n - k$  objektů potom pracovalo bez poruchy. Do Coxova modelu tedy vstupuje  $k$  dob do poruchy a  $n - k$  časů  $t_c$ .
- **cenzorování počtem  $k$**  – opět se sleduje  $n$  objektů, nyní se však čeká na poruchu právě  $k$  objektů, poté se pozorování ukončí. Lze tedy říci, že  $n - k$  objektů pracovalo bez poruchy. Do Coxova modelu potom vstupuje  $k$  dob do poruchy a  $n - k$  časů poslední poruchy.

Protože Coxův model nepoužívá při odhadu parametrů  $\beta^T$  cenzorovaná data, je tedy nutné v použitém softwaru označit cenzorované a necenzorované doby do poruchy. Zpravidla se k těmto účelům používají jedničky a nuly.

Podle [27] je nutné před použitím Coxova modelu data v podobě doplňujících veličin normovat. Nechť je k dispozici  $n$  dob do poruchy spolu s vektory doplňujících veličin  $\mathbf{x}_j^T = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{pj})$ , kde  $j = 1, 2, \dots, n$ . Do Coxova modelu se potom místo  $x_{ij}$  zadávají hodnoty  $z_{ij}$  ve tvaru:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{s_i},$$

kde

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij},$$

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2},$$

pro  $i = 1, \dots, p$  a  $j = 1, \dots, n$ . Je zřejmé, že normované veličiny  $z_{ij}$  mají nulovou střední hodnotu, jednotkový rozptyl a tvoří normovaný vektor  $\mathbf{z}_j^T = (z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{pj})$ . Algoritmus Coxova modelu je implementován v řadě softwarů včetně softwaru Matlab R2009b v podobě funkce `coxphfit`.

## PŘÍLOHA 4 - FAKTOROVÁ ANALÝZA

Teorie publikovaná v této části práce vychází z [28] a [29], kde se faktorová analýza řadí mezi vícerozměrné statistické metody, které se zabývají průzkumovou analýzou a popisem souborů dat. Používá se především v případech, kdy je nutné analyzovat velký počet vzájemně souvisejících veličin. Z matematického hlediska dochází ke snížení dimenze zkoumaného problému.

Cílem faktorové analýzy je vytvoření nových umělých proměnných (faktorů) tak, aby minimální počet těchto faktorů zachytil maximální množství informací obsažených v původním souboru. Faktorová analýza se tímto způsobem používá k redukci rozsáhlých datových souborů.

### MODEL FAKTOROVÉ ANALÝZY

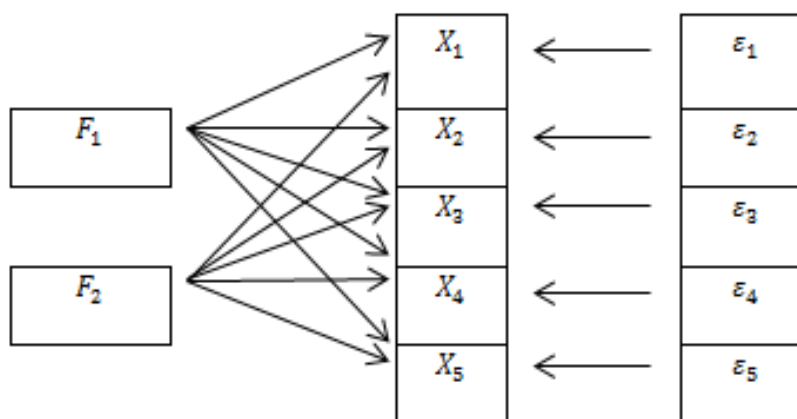
Nechť  $\mathbf{X}$  je  $p$ -rozměrný náhodný vektor veličin, jejichž počet má být redukován,  $\mathbf{x}$  je  $p$ -rozměrný vektor jeho realizací,  $\boldsymbol{\mu}$  vektor středních hodnot,  $C(\mathbf{X}) = \boldsymbol{\Sigma}$  kovarianční matice a  $P(\mathbf{X}) = \mathbf{P}$  korelační matice. Za předpokladu, že existuje  $R$  společných faktorů  $F_1, F_2, \dots, F_R$ , lze  $i$ -tou pozorovanou (měřenou) náhodnou veličinu vyjádřit jako lineární kombinaci

$$X_i = \mu_i + \gamma_{i1}F_1 + \gamma_{i2}F_2 + \dots + \gamma_{iR}F_R + \varepsilon_i,$$

kde  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p$  je  $p$  náhodných chybových složek, které se v obecném modelu faktorové analýzy označují jako specifické faktory. V maticovém zápisu lze předešlý vztah vyjádřit jako

$$\mathbf{X} = \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\Gamma}\mathbf{f} + \boldsymbol{\varepsilon},$$

kde  $\boldsymbol{\Gamma}$  je matice faktorových zátěží typu  $p \times R$ ,  $\mathbf{f}$  je  $R$ -členný vektor společných faktorů. Princip faktorové analýzy pro případ, kdy  $R = 2$  a  $p = 5$ , ilustruje Obrázek 4.



Obrázek 4 Princip faktorové analýzy [30]

Při použití faktorové analýzy na realizaci normovaného vektoru náhodných veličin  $\mathbf{z}_j^T$  ( $z_{ij}$  mají nulové střední hodnoty a jednotkové rozptyly pro  $i = 1, 2, \dots, p$ ), který byl zaveden v Příloha 3 - Matematické modely ve spolehlivosti, lze předešlý model vyjádřit vztahem

$$\mathbf{z}_j^T = \boldsymbol{\Gamma}^* \mathbf{f}^* + \boldsymbol{\varepsilon}^*,$$

kde pro realizaci normovaného náhodného vektoru  $\mathbf{z}_j^T$  jsou prvky  $\gamma_{ir}^*$  matice  $\mathbf{\Gamma}^*$  přímo korelačními koeficienty mezi proměnnými a faktory. Současně se předpokládá, že

- společné faktory  $F_r$ ,  $r = 1, 2, \dots, R$ , jsou nezávislé, stejně rozdělené náhodné veličiny s nulovými středními hodnotami a s jednotkovými rozptyly, vektor středních hodnot  $E(\mathbf{f})$  je tedy nulový a kovarianční matice  $C(\mathbf{f})$  je jednotková matice,
- specifické faktory  $\varepsilon_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$ , jsou nezávislé, stejně rozdělené náhodné veličiny s nulovými středními hodnotami a s rozptyly  $D(\varepsilon_i) = \psi_i$ , tedy  $E(\boldsymbol{\varepsilon})$  je opět nulový vektor a  $C(\boldsymbol{\varepsilon}) = \mathbf{\Psi}$ , což je diagonální matice řádu  $p$ ,
- faktory  $F_r$  a  $\varepsilon_i$  jsou nezávisle rozdělené náhodné veličiny pro každou kombinaci  $r = 1, 2, \dots, R$  a  $i = 1, 2, \dots, p$ . To znamená, že matice kovariancí  $C(\mathbf{f}, \boldsymbol{\varepsilon})$  je nulová.

Z výše uvedených předpokladů plyne, že

$$\boldsymbol{\Sigma} = C(\mathbf{X}) = C(\boldsymbol{\mu} + \mathbf{\Gamma}\mathbf{f} + \boldsymbol{\varepsilon}) = \mathbf{\Gamma}\mathbf{\Gamma}^T + \mathbf{\Psi}.$$

Vztah

$$\boldsymbol{\Sigma} = \mathbf{\Gamma}\mathbf{\Gamma}^T + \mathbf{\Psi}$$

se nazývá rovnice faktorové analýzy. Rovnice faktorové analýzy spolu s výše formulovanými předpoklady indukují skutečnost, že faktory vysvětlují kovariance matice  $\boldsymbol{\Sigma}$  právě tehdy, když existují matice  $\mathbf{\Gamma}$  a  $\mathbf{\Psi}$ , které jsou právě řešením rovnice faktorové analýzy. Rozptyl  $i$ -té veličiny lze vyjádřit následovně

$$D(X_i) = \sigma_i^2 = \sum_{r=1}^R \gamma_{ir}^2 + \psi_i^2.$$

Podíl

$$h_i = \frac{\sum_{r=1}^R \gamma_{ir}^2}{\sigma_i^2},$$

se pak označuje jako komunalita  $i$ -té proměnné. Jedná se o podíl jejího rozptylu, který je vysvětlen společnými faktory.

Při použití realizace normovaného náhodného vektoru  $\mathbf{z}_j^T$  je faktorové řešení založeno na odhadu korelační matice  $\mathbf{P}$ . Příslušné faktorové rovnice jsou pak tvaru

$$\mathbf{P} = \mathbf{\Gamma}^*(\mathbf{\Gamma}^*)^T + \mathbf{\Psi}^*.$$

V následujícím textu se bude vycházet z korelační matice  $\mathbf{P}$  a bude užívána zjednodušená symbolika bez hvězdiček pro řešení získaná na základě korelační matice.

### STANOVENÍ POČTU FAKTORŮ

Přínos každého faktoru je dán jeho rozptylem, tento lze získat jako vlastní číslo kovarianční či korelační matice. V některých případech lze počet faktorů odhadnout předem z podstaty řešené úlohy. V ostatních případech je nutné využít následující metody:

- **Kaiserovo pravidlo** - v analýze se uplatní faktory s rozptylem vyšším než 1.
- **Grafická metoda** - v grafu rozptylů (vlastních čísel) všech faktorů se mez stanoví tam, kde je pokles mezi dvěma faktory nejvyšší.

### ODHAD PARAMETRŮ FAKTOROVÉHO MODELU

Úkolem faktorové analýzy je odhad faktorových zátěží  $\gamma_{ir}$  a specifických rozptylů  $\psi_i$  (psáno již bez hvězdiček). Nejpoužívanější postupy pro odhad parametrů modelu jsou:

- **Metoda hlavních komponent,**
- **Metoda hlavních faktorů.**

Podrobný popis obou metod lze nalézt například v [29].

### NEJEDNOZNAČNOST MODELU, ROTACE FAKTORŮ

Význačnou vlastností faktorového modelu je skutečnost, že rovnice faktorové analýzy nejsou jednoznačné. Nejednoznačnost se logicky projevuje tedy i v určení matic faktorových zátěží. Zřejmým důvodem je například požadavek, aby se odhadem  $p \cdot R$  faktorových zátěží a  $p$  specifických rozptylů vysvětlilo  $p(p + 1)/2$  prvků korelační matice.

Pro danou datovou matici  $Z$  napozorovaných hodnot u  $n$  objektů lze model  $\mathbf{z}_j^T = \mathbf{\Gamma}^* \mathbf{f}^* + \boldsymbol{\varepsilon}^*$  přepsat na tvar

$$\mathbf{Z} = \mathbf{F}\mathbf{\Gamma}^T + \mathbf{E},$$

kde  $\mathbf{F}$  je matice typu  $n \times R$  neznámých hodnot faktorů u  $n$  objektů,  $\mathbf{\Gamma}$  je neznámá matice typu  $p \times R$  faktorových zátěží (ty jsou v tomto případě jednoduchými korelačními koeficienty mezi zkoumanými veličinami a faktory) a  $\mathbf{E}$  je matice typu  $n \times p$  neznámých hodnot specifických faktorů. Je patrné, že pravá strana tohoto modelu je zcela neznámá a nepozorovatelná.

Nechť pro matici  $\mathbf{T}$  platí

$$\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T}^T, \quad \mathbf{T}^T \mathbf{T} = \mathbf{T} \mathbf{T}^T = \mathbf{I}_R,$$

pak lze definovat faktory  $\mathbf{G} = \mathbf{F}\mathbf{T}$ , které taktéž vyhovují modelu. Dále nechť matice faktorových zátěží určují vztahy

$$\mathbf{B} = \mathbf{\Gamma}\mathbf{T}, \quad \mathbf{B}^T = \mathbf{T}^T \mathbf{\Gamma}^T.$$

Snadno se odvodí, že předchozí model přejde na tvar

$$\mathbf{Z} = \mathbf{F}\mathbf{\Gamma}^T + \mathbf{E} = \mathbf{F}\mathbf{T}\mathbf{T}^T \mathbf{\Gamma}^T + \mathbf{E} = \mathbf{G}\mathbf{B}^T + \mathbf{E},$$

což dokazuje nejednoznačnost faktorového modelu. Problémy spojené s nejednoznačností odstraňuje tzv. rotace faktorů.

Rotací faktorů v teorii faktorové analýzy se myslí operace, kterými se z jedné matice faktorových zátěží obdrží jiná. V souvislosti s uvedeným je nutné zmínit pojem jednoduchá struktura, který charakterizuje tvar matice faktorových zátěží. Podle [28] a [29] formuloval L. Thurstone pro jednoduchou strukturu následující pravidla:

- každý řádek matice faktorových zátěží musí obsahovat alespoň jednu nulu,
- každý sloupec matice faktorových zátěží musí obsahovat alespoň  $R$  nul,
- pro každou dvojici sloupců matice faktorových zátěží musí být více proměnných, které s jedním faktorem mají nulovou zátěž, ale s ostatními faktory je mají vysoké,
- pro pět a více faktorů musí v každé dvojici sloupců matice faktorových zátěží být co nejvíce proměnných, které mají nulové zátěže v obou sloupcích,
- pro každou dvojici sloupců matice faktorových zátěží musí být málo proměnných, které mají vysoké zátěže v obou sloupcích.

K uvedeným požadavkům jednoduché struktury se nejvíce přibližuje metoda tzv. normalizované varimax rotace. Zde je transformační matice volena tak, aby hodnota výrazu

$$\sum_{r=1}^R \left[ \frac{p \sum_{i=1}^p (b_{ir}^2)^2 - (\sum_{i=1}^p b_{ir}^2)^2}{p^2} \right]$$

byla co nejvyšší (jedná se o součet rozptylů druhých mocnin faktorových zátěží v jednotlivých sloupcích). Většina počítačových programů, v nichž jsou implementovány metody pro odhad parametrů faktorového modelu, obsahuje i algoritmy pro maximalizaci výše uvedeného výrazu a umožňuje tak normalizovanou varimax rotaci faktorů.

#### ODHAD FAKTOROVÉHO SKÓRE

Faktorové skóre představuje hodnoty společných faktorů pro jednotlivá pozorování a může být vstupem do dalších analýz, zejména pokud je faktorová analýza užita pro redukci dat.

Podle [28] lze pro odhad faktorového skóre použít regresní metodu. Jestliže mají vektory  $\mathbf{f}^*$  a  $\boldsymbol{\varepsilon}^*$  simultánní normální rozdělení pravděpodobnosti a pokud pro ně platí předpoklady faktorového modelu, vektor  $\mathbf{z}_j^T$  má rovněž vícerozměrné normální rozdělení pravděpodobnosti s nulovým vektorem středních hodnot a s korelační maticí, která vyhovuje rovnicím faktorové analýzy. Pro podmíněnou střední hodnotu faktorového skóre při daném  $\mathbf{z}_0^T$  platí podle [28] vztah

$$\hat{\mathbf{f}}_0 = E(\mathbf{f} \mid \mathbf{z} = \mathbf{z}_0^T) = \boldsymbol{\Gamma}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{z}_0^T.$$

Zbývá poznamenat, že pro případ použití rotace faktorů s maticí  $\mathbf{T}$ , vzniká pro odhad faktorového skóre vztah

$$\hat{\mathbf{f}}'_0 = \mathbf{T} \hat{\mathbf{f}}_0.$$

Algoritmus pro odhad faktorového skóre je implementován v řadě softwarů včetně softwaru Matlab R2009b v podobě funkce factoran.

## PŘÍLOHA 5 - LINEÁRNÍ OPTIMALIZACE

### ZÁKLADNÍ ÚLOHY LINEÁRNÍ OPTIMALIZACE

Teorie publikovaná v této části práce vychází z [31], kde se úlohou lineární optimalizace v kanonickém tvaru rozumí úloha určit

$$\max(c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n) \text{ resp. } \min(c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n),$$

pro  $x_1, x_2, \dots, x_n$  splňující podmínky

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m \\ x_1, x_2, \dots, x_n &\geq 0, \end{aligned}$$

kde  $c_j, b_i, a_{ij}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$  jsou daná reálná čísla,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  zde nyní neznají realizaci náhodného vektoru, nýbrž reálné proměnné. Funkce

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

se nazývá účelová funkce a předkládaná disertační práce se v rámci řešení lineární optimalizace zbývá pouze hledáním maxima této funkce. V dalším textu bude vektor  $\mathbf{x}$  značit sloupcový vektor, jehož transponováním  $\mathbf{x}^T$  lze získat vektor řádkový. Zápis  $\mathbf{x}^T \mathbf{y}$  bude dále vyhrazen pro skalární součin vektorů  $\mathbf{x}$  a  $\mathbf{y}$ :

$$\mathbf{x}^T \mathbf{y} = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n.$$

Pro dva libovolné vektory  $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbf{R}^n$  bude dále zápis  $\mathbf{x} \leq \mathbf{y}$  znamenat:

$$x_j \leq y_j \text{ pro } j = 1, 2, \dots, n.$$

Symbol  $\mathbf{0}$  bude vyhrazen pro nulový vektor. Maticově lze úlohu lineární optimalizace v kanonickém tvaru potom vyjádřit následovně:

$$\max \mathbf{c}^T \mathbf{x}$$

$$\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0},$$

kde  $\mathbf{A} = (a_{ij})$  je matice typu  $(m, n)$ ,  $\mathbf{c} \in \mathbf{R}^n$  a  $\mathbf{b} \in \mathbf{R}^m$ .

Úloha lineární optimalizace ve standardním tvaru má podobu:

$$\max(c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n)$$

pro  $x_1, x_2, \dots, x_n$  splňující podmínky

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &= b_m \\ x_1, x_2, \dots, x_n &\geq 0. \end{aligned}$$

V maticovém zápisu má tato úloha podobu

$$\max \mathbf{c}^T \mathbf{x}$$

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0}.$$

Úloha v obecném tvaru kombinuje dvě předcházející úlohy a podmínky omezení tak mohou být ve tvaru rovností i nerovností. Úlohu v obecném tvaru lze zapsat následovně

$$\max(c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n)$$

pro  $x_1, x_2, \dots, x_n$  splňující podmínky

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j &\leq b_i, i = 1, 2, \dots, r \\ \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j &\geq b_i, i = r + 1, 2, \dots, s \\ \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j &= b_i, i = s + 1, 2, \dots, m \\ x_j &\geq 0, j = 1, 2, \dots, k \\ x_j &\text{ neomezené, } j = k + 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

kde  $\mathbf{A} = (a_{ij})$  je matice typu  $(m, n)$ ,  $\mathbf{c} \in \mathbf{R}^n$  a  $\mathbf{b} \in \mathbf{R}^m$  a čísla  $k, r, s$  taková, že  $0 \leq k \leq n$  a  $0 \leq r \leq s \leq m$ . Úloha v kanonickém tvaru je tedy obecná úloha pro  $r = m$  a  $k = n$ , úloha ve standardním tvaru je obecná úloha pro  $r = 0, s = 0$  a  $k = n$ . Vektor  $\mathbf{c}$  se někdy nazývá vektor cen, jeho souřadnice jsou jednotlivé ceny a maximální hodnota účelové funkce se značí  $z_{max}$ .

Nejpoužívanější algoritmus k určení optimálního řešení v lineární optimalizaci se nazývá simplexová metoda, která pracuje převážně s úlohami ve standardním tvaru. Pro řešení úlohy v obecném nebo v kanonickém tvaru je nutné převést tyto úlohy na úlohu ve standardním tvaru. Důvodem je skutečnost, že s rovnicemi se pracuje snadněji než s nerovnicemi.

Nerovnice  $x_j \geq 0$ , které se ve standardní úloze vyskytují, jsou jednoduché a výpočty příliš neomezuji. K převodům na úlohu ve standardním tvaru jsou potřeba následující úpravy:

- převádění hledání minima na maximum a naopak,
- nahrazení neomezených proměnných nezápornými,
- nahrazení podmínek ve tvaru nerovnic rovnicemi.

#### PŘEVÁDĚNÍ HLEDÁNÍ MINIMA NA MAXIMUM

Základní myšlenku tohoto převodu vystihuje následující vztah, který byl dokázán v [31]:

$$\min\{c^T x: Ax \leq b, x \geq 0\} = -\max\{-c^T x: Ax \leq b, x \geq 0\}.$$

#### NAHRAZENÍ NEOMEZENÝCH PROMĚNNÝCH NEZÁPORNÝMI

Vychází se ze skutečnosti, že každé reálné číslo lze napsat jako rozdíl dvou nezáporných čísel  $x^+$  a  $x^-$ . Platí tedy:

$$x = x^+ - x^-, x^+ \geq 0, x^- \geq 0.$$

V obecné úloze lineární optimalizace lze takto nahradit každou neomezenou proměnnou, což přispívá k převodu na úlohu ve standardním tvaru.

#### NAHRAZENÍ PODMÍNEK VE TVARU NEROVNIC ROVNICEMI

Nechť je podmínka omezení ve tvaru

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \leq b.$$

Potom existuje takové  $x_{n+1} \geq 0$ , pro které platí

$$x_{n+1} = b - a_1x_1 - a_2x_2 - \dots - a_nx_n$$

a současně je splněna podmínka omezení ve tvaru rovnice

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + x_{n+1} = b.$$

$x_{n+1}$  se nazývá doplňková proměnná. V případě podmínky omezení, která má tvar

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \geq b,$$

se nejdříve nerovnice vynásobí  $-1$ , tím vznikne

$$-a_1x_1 - a_2x_2 - \dots - a_nx_n \leq -b.$$

Potom existuje takové  $x_{n+1} \geq 0$ , pro které platí

$$x_{n+1} = -b + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$$

a současně je splněna podmínka omezení ve tvaru rovnice

$$-a_1x_1 - a_2x_2 + \dots - a_nx_n + x_{n+1} = -b.$$

## SIMPLEXOVÁ METODA

Jak již bylo uvedeno, simplexová metoda pracuje s úlohami ve standardním tvaru. Necht'  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$  je soustava  $m$  lineárních rovnic o  $n$  neznámých  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a hodnota matice  $\mathbf{A}$   $h(\mathbf{A}) = m$ . Výběr  $m$  různých proměnných  $\mathbf{B} = (x_{i_1}, \dots, x_{i_m})$  z proměnných  $x_1, x_2, \dots, x_n$  se nazývá bází soustavy  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ , jestliže sloupce matice  $\mathbf{A}$ , které odpovídají proměnným  $x_{i_1}, \dots, x_{i_m}$  tvoří regulární matici  $\mathbf{B}$ . Platí tedy, že  $j$ -tý sloupec matice  $\mathbf{B}$  je  $i_j$ -tý sloupec matice  $\mathbf{A}$ ,  $j = 1, \dots, m$ . Proměnné  $x_{i_1}, \dots, x_{i_m}$  se pak nazývají bazickými proměnnými a proměnné  $x_j, j \neq i_1, \dots, i_m$  nebazickými proměnnými.

Bazické řešení soustavy  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$  je takové jediné řešení  $\mathbf{x}^B$ , kdy nebazické proměnné jsou nulové, tedy  $x_j^B = 0$  pro  $j \neq i_1, \dots, i_m$ . Bazické řešení  $\mathbf{x}^B$  se nazývá přípustné bazické řešení, jestliže  $x_j^B \geq 0$  pro  $j = 1, \dots, n$ . Bazické řešení se nazývá degenerované v případě, že některá bazická proměnná je rovna nule, v případě, že jsou všechny bazické proměnné různé od nuly, nazývá se toto bazické řešení nedegenerované. Zjednodušeně lze algoritmus simplexové metody shrnout v následujících bodech:

- k přípustnému bazickému řešení  $\mathbf{x}^B$  určenému bází  $\mathbf{B}$  se sestrojí jiné přípustné bazické řešení  $\mathbf{x}^{B'}$  s bází  $\mathbf{B}'$ ,
- baze  $\mathbf{B}$  a  $\mathbf{B}'$  se liší pouze v jedné proměnné, což znamená, že baze  $\mathbf{B}'$  vznikne z baze  $\mathbf{B}$  tak, že se jedna proměnná z baze  $\mathbf{B}$  odstraní a jiná se přidá,
- hodnota účelové funkce  $\mathbf{c}^T \mathbf{x}$  pro nové bazické řešení  $\mathbf{x}^{B'}$  je větší než hodnota účelové funkce pro řešení  $\mathbf{x}^B$ ,
- v případě, že  $\mathbf{x}^B$  je degenerované řešení, může zůstat hodnota účelové funkce stejná,
- uvedený postup se opakuje s bází  $\mathbf{B}'$  místo baze  $\mathbf{B}$  a pokud již novou bází nelze sestrojít, je nalezené bazické řešení optimální,
- bazických řešení soustavy  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$  je konečný počet, lze tedy po konečném počtu kroků nalézt optimální řešení nebo zjistit, že úloha má neomezené optimum.

Podrobný postup přechodu od jedné baze k druhé včetně algoritmu simplexové metody lze nalézt v [31]. Algoritmus simplexové metody je implementován v řadě softwarů včetně softwaru Matlab R2009b.