VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 691

ISSN 1213-4198

Ing. Jakub Ertl

Spolehlivost výkonových olejových transformátorů

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

Ing. JAKUB ERTL

SPOLEHLIVOST VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

RELIABILITY OF POWER OIL TRANSFORMERS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

OBOR	KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ
VEDOUCÍ PRÁCE	doc. Ing. MILOŠ HAMMER, CSc.
OPONENTI	Ing. Radek Szabó, Ph.D. Ing. Petr Kratochvíl, Ph. D.
DATUM OBHAJOBY	17. 1. 2013

Klíčová slova

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

Keywords

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

Místo uložení disertační práce

Oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno.

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

© Jakub Ertl, 2013

ISBN 978-80-214-4678-6
ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD 5
2 STAV PROBLEMATIKY 5
3 CÍLE PRÁCE 5
4 ZJIŠŤOVÁNÍ AKTUÁLNÍHO STAVU VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ 6
5 POPIS ZKOUMANÉHO DATOVÉHO SOUBORU 7
6 ANALÝZA ČASOVÝCH ŘAD 7
6.1 Odstranění odlehlých hodnot 7
6.2 Odhady vybraných momentových funkcí 7
6.3 Stabilizace rozptylu 8
6.4 Identifikace periodických komponent 8
6.5 Zjednodušený aditivní dekompoziční model 8
6.6 Odhad trendové složky zkoumaných časových řad 8
6.7 Vyšetření chybové složky časových řad diagnostických veličin 9
7 NEINVAZIVNÍ POSTUPY PRO ROZBOR DVOUSTAVOVÉ ODHADOVANÉ SPOLEHLIVOSTI VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ 9
7.1 Obecná metoda vycházející z teorie časových řad 9
7.2 Metoda vycházející z teorie časových řad a DGA 9
7.3 Metoda distribučních funkcí 10
7.4 Spolehlivostní modely 11
8 NEINVAZIVNÍ POSTUP PRO ROZBOR VÍCESTAVOVÉ ODHADOVANÉ SPOLEHLIVOSTI VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ 11
9 OPTIMALIZACE DALŠÍHO PROVOZU VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ 13
10 NÁVRH SPOLEHLIVOSTNÍHO MODULU DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU PRO VÝKONOVÉ OLEJOVÉ TRANSFORMÁTORY 13
ZÁVĚR 14
PŘÍNOS A PŮVODNOST PRÁCE 14
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 16
ŽIVOTOPIS A TVŮRČÍ ČINNOST AUTORA 16
ABSTRACT 20
ABSTRAKT 20

1 ÚVOD

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. Spolehlivost v užším pojetí se definuje jako souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují.

V předkládané disertační práci jsou prezentovány postupy pro rozbor odhadované spolehlivosti (spolehlivosti, která je výsledkem aplikace matematických postupů a analýzy provozu objektu) 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.

2 STAV PROBLEMATIKY

Výkonové olejové transformátory mají od výrobce deklarovanou dlouhou dobu života, proto se dříve jejich spolehlivost téměř neřešila. V současné době se však mnoho 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.

Z výše uvedených důvodů je této problematice v zahraničí přikládán velký význam, proto se spolehlivost výkonových olejových transformátorů řeší na mnoha pracovištích po celém světě. Řešitelské týmy spolu často spolupracují a vyměňují si získané poznatky.

V České republice není tato problematika řešena na úrovni, která by odpovídala významu transformátoru pro dodávky elektrické energie. Spolehlivosti výkonových olejových transformátorů je u nás věnována daleko menší pozornost 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.

3 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 vícestavové 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.

4 ZJIŠŤOVÁNÍ AKTUÁLNÍHO STAVU VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

V [1] je transformátor definován jako statický předmět se dvěma nebo více vinutími, který pomocí elektromagnetické indukce transformuje jeden systém střídavého napětí a proudu na jiný. Při řešení jejich spolehlivosti nejsou z důvodu vysoké pořizovací ceny nového stroje ve většině případů k dispozici soubory dob do poruchy. Nelze tak použít klasické metody matematické statistiky pro odhad funkčních (distribuční funkce dob do poruchy, funkce spolehlivosti, intenzita poruch atd.) a číselných (střední doba do poruchy, kvantily atd.) charakteristik spolehlivosti. Na základě výrobcem deklarované dlouhé doby provozu bez poruchy nelze u těchto strojů potřebná data získat ani ze zkoušek spolehlivosti.

Musí se tak provádět diagnostika aktuálního stavu výkonových olejových transformátorů, která používá k vyhodnocování fyzikálních procesů probíhajících uvnitř sledovaných objektů různé fyzikální zákonitosti. Parametry těchto zákonitostí se sledují jako diagnostické veličiny, které se v předkládané disertační práci dělí na tři typy:

- veličiny charakterizující stav olejové náplně,
- veličiny stavu izolace vinutí,
- plyny rozpuštěné v izolačním oleji transformátoru.

Z hlediska způsobu získávání dat lze podle [2] rozdělit diagnostiku na off-line a 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. Diagnostické veličiny měřené u výkonových olejových transformátorů se v technické praxi vyhodnocují podle [3]. V této normě jsou stanoveny kriteriální hodnoty, které nesmí zkoumaná diagnostická veličina překročit.

V předkládané disertační práci je ukázáno, jak lze z dat získaných při provádění off-line diagnostiky určit pravděpodobný rok dožití, pravděpodobnost poruchy a další spolehlivostní charakteristiky.

5 POPIS ZKOUMANÉHO DATOVÉHO SOUBORU

Pro potřeby vývoje a testování neinvazivních metod rozboru odhadované spolehlivosti a návrhu spolehlivostního modulu diagnostického systému 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. Elektrárna 1, Elektrárna 2 a Elektrárna 3 představují 3 různé vodní elektrárny a Elektrárna 4 představuje uhelnou elektrárnu (označení elektráren a zkoumaných transformátorů bylo zvoleno v souladu s požadavky na ochranu dat). Diagnostická měření jsou v databázi zaznamenána v podobě časových řad jednotlivých diagnostických veličin.

6 ANALÝZA ČASOVÝCH ŘAD

V praktické části předkládané disertační práce jsou navrženy neinvazivní postupy pro rozbor odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů, které jsou založeny na teorii týkající se časových řad. Navržené postupy nevyužívají k získání patřičných výstupů všechny časové řady diagnostických veličin obsažených ve zkoumané databázi, vychází pouze z následujících: metan - CH_4, acetylen - C_2H_2, etylen - C_2H_4, vodík - H_2, etan - C_2H_6, oxid uhelnatý - CO, oxid uhličitý - CO_2, kyslík - O_2, dusík - N_2, obsah vody v izolačním oleji - Q_V, číslo kyselosti - ČK, průrazné napětí - U_P, povrchové napětí - σ, ztrátový činitel oleje při 70 °C - $\mathrm{tg}\,\delta_{70}$, vnitřní rezistivita oleje při 70 °C - ρ_{70}, ztrátový činitel při zapojení V:x - $\mathrm{tg}\,\delta$ V:x, ztrátový činitel při zapojení N:x - $\mathrm{tg}\,\delta$ N:x, izolační odpor při zapojení V:x - R_{60} V:x, izolační odpor při zapojení N:x - R_{60} N:x. Symbol x u veličin určujících stav izolace vinutí značí zbylá vinutí a kostru. V:x tedy znamená u dvouvinuťových transformátorů V:N+K a u třívinuťových transformátorů V:N+S+K. Všechny výše zmíněné časové řady byly v rámci řešení předkládané disertační práce podrobeny následujícím postupům.

6.1 ODSTRANĚNÍ ODLEHLÝCH HODNOT

Více odlehlých hodnot bylo odstraněno u řad transformátorů pracujících ve vodních elektrárnách. Je to dáno charakterem dat, která vznikla přepisováním papírových protokolů a vyskytovaly se u nich časté chyby v jednotkách jednotlivých veličin nebo dokonce překlepy. Protože většina těchto protokolů již není dále k dispozici, nebylo možné tyto chyby opravit a chybná měření se musela z další analýzy vyřadit. 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.

6.2 ODHADY VYBRANÝCH MOMENTOVÝCH FUNKCÍ

Po vyřazení odlehlých hodnot byly u časových řad odhadnuty vybrané momentové charakteristiky. Na základě těchto odhadů bylo odvozeno, že metoda

měření vnitřní rezistivity při teplotě oleje 70°C byla u zkoumaných výkonových olejových transformátorů značně nepřesná, číslo kyselosti a ztrátový činitel oleje při teplotě oleje 70°C se během provozu téměř neměnil, na hodnoty veličin stavu izolace vinutí neměl zásadní vliv druh zapojení měřicích přístrojů, stáří zkoumaných strojů neovlivňovalo hodnoty veličin charakterizující stav olejové náplně a během provozu vznikal nejméně acetylen a naopak nejvíce se vyvíjel dusík.

6.3 STABILIZACE ROZPTYLU

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.

6.4 IDENTIFIKACE PERIODICKÝCH KOMPONENT

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 Sieglova testu významná jen v ojedinělých případech, které lze dále zanedbat. Předpoklad absence periodické složky je velice důležitý pro postup predikce pravděpodobností určitých poruch založený právě na teorii časových řad.

6.5 ZJEDNODUŠENÝ ADITIVNÍ DEKOMPOZIČNÍ MODEL

V předchozí kapitole bylo ukázáno, že časové řady diagnostických veličin měřených u výkonových olejových transformátorů většinou neobsahují žádnou periodickou komponentu. Na základě tohoto předpokladu se časové řady dále zkoumané v předkládané disertační práci uvažují 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.

6.6 ODHAD TRENDOVÉ SLOŽKY ZKOUMANÝCH ČASOVÝCH ŘAD

Trendová složka zkoumaných časových řad byla s výjimkou metody malého trendu odhadována pomocí metod uvedených v předkládané disertační práci. Metoda malého trendu předpokládá v každé periodě přibližně konstantní trend. V předchozím textu bylo ukázáno, že zkoumané časové řady neobsahují periodickou složku, nemá tedy smysl zmíněnou metodu používat k jejich analýze.

Podle získaných výsledků lze 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.

6.7 VYŠETŘENÍ CHYBOVÉ SLOŽKY ČASOVÝCH ŘAD DIAGNOSTICKÝCH VELIČIN

Zkoumané časové řady byly v disertační práci podrobeny pěti různým testům náhodnosti chybové složky. Chybová složka měla ve všech případech náhodný charakter a modelování časových řad vybraných diagnostických veličin zjednodušeným aditivním dekompozičním modelem tak bylo zcela oprávněné a korektní.

7 NEINVAZIVNÍ POSTUPY PRO ROZBOR DVOUSTAVOVÉ ODHADOVANÉ SPOLEHLIVOSTI VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Postupy pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti prezentované níže 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 jsou navrženy čtyři následující neinvazivní postupy.

7.1 OBECNÁ METODA VYCHÁZEJÍCÍ Z TEORIE ČASOVÝCH ŘAD

Tato metoda vychází z předešlé analýzy zkoumaných časových řad a predikuje pravděpodobný rok dožití podle diagnostické veličiny V, který je v práci zastoupen symbolem PRD_V. Obecná metoda vycházející z teorie časových řad 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. Korektní závěry je potom nutné vyvodit v kolektivu odborníků, kteří se diagnostikou výkonových olejových transformátorů zabývají a mají tak dostatek informací o tom, na které poruchy jednotlivé diagnostické veličiny ukazují a jaké mohou mít tyto poruchy následky.

7.2 METODA VYCHÁZEJÍCÍ Z TEORIE ČASOVÝCH ŘAD A DGA

Metoda vycházející z teorie časových řad a DGA neodhaduje pravděpodobný rok dožití, ale predikuje pravděpodobnosti poruch, které postihují izolační systém výkonových olejových transformátorů. Predikce jsou prováděny na základě následujících DGA metod (metod analyzujících plyny rozpuštěné v izolačním oleji transformátoru - jsou blíže popsány v předkládané disertační práci):

- ČSN metody (někdy také nazývána jako ČSN norma),
- Duvalovy metody (někdy také nazývána jako Duvalův trojúhelník),
- Rogersovy metody,
- Dornenburgovy metody.

Podle Metody vycházející z teorie časových řad a DGA byl v rámci řešení předkládané disertační práce vytvořen software Reliab_dga_transformer 1.0, který umožnil provést predikce pravděpodobností poruch všech deseti zde zkoumaných výkonových olejových transformátorů. Umožnil rovněž porovnat vhodnost jednotlivých metod pro odhad trendu časových řad diagnostických veličin. 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 dříve, kdy podle průměrného koeficientu determinace vycházela nejlépe pro odhad trendu také metoda jádrového vyhlazování spojená s proložením polynomem druhého stupně.

Dornenburgova metoda ani u jednoho transformátoru nepredikovala 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 poruchy je daleko větší než ostatní oblasti. Uvedený problém je však možné odstranit fuzzifikací obou metod. Postup, jak tyto metody včetně predikcí nejpravděpodobnější poruchy fuzzifikovat, lze nalézt například v [4]. Ukázalo se, že výhodou predikce nejpravděpodobnější poruchy pomocí Duvalovy metody je získání nejpravděpodobnější poruchy pokaždé, když je nenulová pravděpodobnost inicializace p_{p_τ}. Pro kvalitní rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti výkonových olejových transformátorů je nutné predikovat nejpravděpodobnější poruchu pomocí všech čtyř DGA metod a získané výsledky potom konzultovat s odborníky v dané oblasti.

7.3 METODA DISTRIBUČNÍCH FUNKCÍ

Metoda distribučních funkcí umožňuje predikovat pravděpodobný rok dožití (PRD) výkonových olejových transformátorů. 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 měřicích přístrojů. Pro jeden časový okamžik je tak k dispozici několik měření stejné veličiny. Metoda distribučních funkcí je v předkládané disertační práci aplikována na hodnoty ztrátového činitele tg δ. Hlavním kritériem pro zvolení této diagnostické veličiny byla skutečnost, že hodnoty ztrátového činitele nejsou ovlivněny teplotou měření v takové míře jako hodnoty ostatních veličin určujících stav izolace vinutí a také, že podle hodnot ztrátového činitele lze usuzovat, zda je izolační soustava zestárlá nebo navlhlá. Pokud není pevná izolace vinutí navlhlá, průběh ztrátového činitele dobře popisuje degradační procesy probíhající v izolaci.

Na základě metody distribučních funkcí byl v rámci této disertační práce vytvořen software RL 1.0, pomocí kterého byl predikován PRD všech zkoumaných výkonových olejových transformátorů. Predikce byly úspěšně provedeny v pěti případech. Ve třech dalších případech o přesnosti predikce nelze rozhodnout, protože nejsou k dispozici žádné informace o stavu ani historii provozu zkoumaných strojů. Pouze ve dvou případech 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.

7.4 SPOLEHLIVOSTNÍ MODELY

Tato neinvazivní metoda rozboru dvoustavové odhadované spolehlivosti umožňuje odhadovat funkční spolehlivostní charakteristiky jako spolehlivostní funkci, intenzitu poruch, kumulovanou intenzitu poruch, hustotu pravděpodobnosti a distribuční funkci dob do poruchy. Na dostupných datech bylo testováno celkem sedm různých spolehlivostních modelů. Nejpřesnější odhady funkčních spolehlivostních charakteristik byly získány prostřednictvím následujících 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. Na základě spolehlivostních modelů byl vytvořen software RChE 1.0, který je rovněž součástí předkládané disertační práce.

8 NEINVAZIVNÍ POSTUP PRO ROZBOR VÍCESTAVOVÉ ODHADOVANÉ SPOLEHLIVOSTI VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Při řešení spolehlivosti výkonových olejových transformátorů je nutné uvažovat více možných stavů, ve kterých se může stroj během svého provozu nacházet. Důvodem je skutečnost, že při použití dvoustavové spolehlivosti se ztratí spousta užitečných informací o budoucím stavu stroje. Vícestavová spolehlivost také umožňuje vhodně rozdělit a naplánovat další provoz stroje. Podle různých stavů, ve

kterých se stroj bude nacházet, lze uplatnit odpovídající operace zaručující další jeho provoz.

V předkládané disertační práci se předpokládá, že výkonový olejový transformátor během svého provozu prochází čtyřmi kvalitativně odlišnými stavy. Rozšíření postupu predikce pravděpodobnosti poruch výkonového olejového transformátoru pro dva stavy (Metody vycházející z teorie časových řad a DGA) na více možných stavů (S1, S2, S3, S4) je v práci 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. Výsledný vztah pro výpočet pravděpodobnosti $p_{D1_\tau}(S1)$, že se transformátor nachází v čase τ ve stavu S1 a zároveň s poruchou D1, má následující podobu:

$$p_{D1_\tau}(S1) = p_{p_\tau}(S1)p\left(P_{2_\tau}^{DU} \in (0;0{,}23)\right)p\left(P_{3_\tau}^{DU} \in (0{,}13;1)\right) p\left(P_{1_\tau}^{DU} \in (0;0{,}87)\right),$$

kde τ značí čas, ve kterém má porucha stroj postihnout, $P_{i_\tau}^{DU}$ zastupuje hodnotu i-tého poměru plynů v čase τ, p je symbol vyhrazený pro pravděpodobnost a $p_{p_\tau}(S1)$ značí pravděpodobnost, že v čase τ bude veličina SKP definovaná v disertační práci v rozmezí 0-720 μl/l nebo aspoň jeden z chybových plynů bude mít koncentraci, která splňuje podmínku pro stav S1.

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. Následně na to byl na vyhodnocení stejných dat použit software Reliab_dga_transformer 2.0, který pracuje na základě teorie vícestavové spolehlivosti a který je rovněž blíže popsán v předkládané disertační práci. Pravděpodobnosti poruch byly predikovány pro rok 2013.

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 rozborem vícestavové spolehlivosti byly získány podrobnější informace o budoucím stavu zkoumaných strojů. Tyto informace se týkaly určení konkrétního stavu, který byl pak 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.

9 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. Všechny modely využívají pravděpodobnosti odhadnuté v rozboru vícestavové odhadované spolehlivosti. Podle teorie týkající se optimalizace dalšího provozu výkonových olejových transformátorů byl vytvořen software Optimization 1.0, který slouží k určení optimálního počtu různých druhů pracovníků za účelem zajištění maximálního zisku z provádění oprav.

10 NÁVRH SPOLEHLIVOSTNÍHO MODULU DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU PRO VÝKONOVÉ OLEJOVÉ TRANSFORMÁTORY

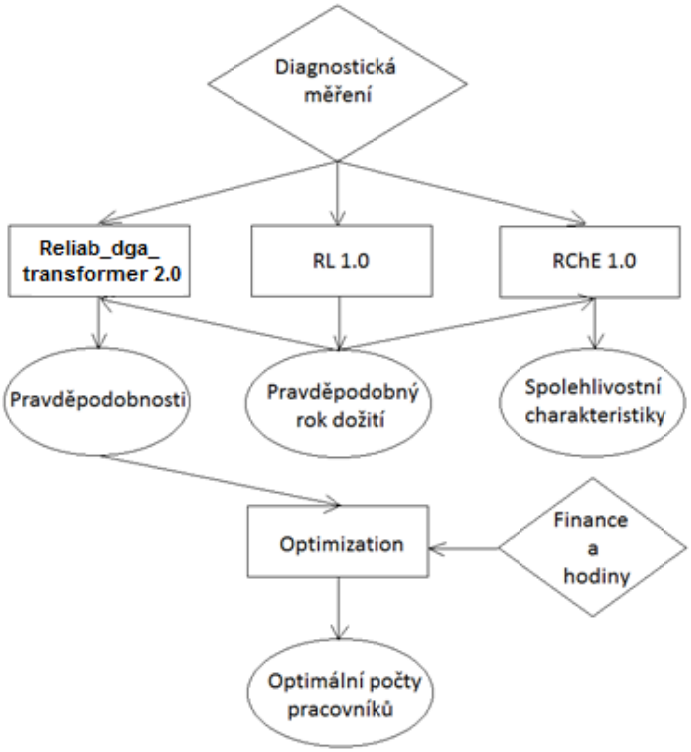
V rámci řešení předkládané disertační práce byl rovněž navržen a vytvořen spolehlivostní modul diagnostického systému pro výkonové olejové transformátory. Tento diagnostický systém je vyvíjen na školícím pracovišti Fakulty strojního inženýrství na VUT v Brně a má podobu expertního systému. Podrobný popis tohoto diagnostického systému lze nalézt například v [5].

Navrženy 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 disertační práci. Jedná se o softwary:

- **RL 1.0,**
- **Reliab_dga_transformer 2.0,**
- **RChE 1.0,**
- **Optimization 1.0.**

Princip činnosti spolehlivostního modulu je zachycen na Obr. 1. 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 pracovníků, o jejich průměrnou hodinovou

mzdu a o finanční omezení dané provozovatelem výkonových olejových transformátorů.



Obr. 1 Schéma navrženého spolehlivostního modulu

ZÁVĚR

Předkládaná disertační práce navrhuje čtyři neinvazivní postupy pro rozbor dvoustavové odhadované spolehlivosti a jeden neinvazivní postup pro rozbor vícestavové 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, které byly v práci nejdříve důkladně analyzovány a na základě získaných výsledků potom byly vyvinuty zmíněné neinvazivní postupy včetně odpovídajících softwarů.

PŘÍNOS A PŮVODNOST 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 vícestavové 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.**

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] ČSN IEC 50(421): *Mezinárodní elektrotechnický slovník - Kapitola 421: Výkonové transformátory a tlumivky*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 46 s.

[2] MENTLÍK, V. a kol.: *Diagnostika elektrických zařízení*. BEN, 2008, 439 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] 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.

[5] 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/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vyuziti-vybranych-soft-computingovych-metod-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-transformatoru---3--cast/>.

ŽIVOTOPIS A TVŮRČÍ ČINNOST AUTORA

Osobní informace

Příjmení, jméno	Ertl, Jakub
Datum narození	22. 06. 1985
Stav	svobodný
Adresa	Dukelská 57, 571 01 Moravská Třebová
Telefon	+420 724 156 895
E-mail	jakub.ertl@centrum.cz

Vzdělání

2009 – dosud	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, Ph.D. student, disertační práce: *Spolehlivost výkonových olejových transformátorů*
2007 – 2009	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav matematiky, navazující magisterské studium, diplomová práce: *Spolehlivost technických systémů*
2004 – 2007	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav matematiky, bakalářské studium, bakalářská práce: *Matice v matematice*

Pracovní zkušenosti

2010 – dosud	VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, asistent

Stáže v zahraničí

7/ 2008 – 11/ 2008	Tvorba diplomové práce a studium vybraných předmětů na University of Malta, Malta
8/ 2012 – 9/ 2012	IP Erasmus Seismath, Universita L'Aquila, Itálie

Znalosti a dovednosti

Jazykové znalosti	Anglický jazyk, úroveň B2 (držitel certifikátu FCE) Německý jazyk (maturitní zkouška)
Práce na PC	Vybrané softwary: MS Office, HTML, PHP, Matlab, Delphi, StatGraphics, Minitab
Pedagogická činnost	Vedení laboratorních cvičení z předmětu *Elektrotechnika a elektronika* Vedení cvičení z předmětu *Bezpečnost a spolehlivost technických soustav* Vedení cvičení z předmětu *Spolehlivost a diagnostika výrobních strojů*

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 Dianostics*. 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/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/vyuziti-vybranych-soft-computingovych-metod-v-diagnostice-vykonovych-olejovych-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-elek-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>. (software).

[2] ERTL, J., KARPÍŠEK, Z. Soft Spolehlivost vícestavsyst: *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: *Inteligentní zařízení pro posuzování a prognózu stavu transformátorů*. ÚVSSR, FSI

VUT v Brně. URL: <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>. (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>. (software).

Projekty

[1] Projekt MPO ČR FI-IM5/173, 2008-2010, název: Metodika stanovení životnosti vysokonapěťových 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.

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.

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.