

Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů - 3. část

Time Series Application in Diagnostic of Power Oil Transformers - 3. Part

Miloš Hammer, Jakub Ertl, Oldřich Barvenčík, Davik Kutálek

*hammer@fme.vutbr.cz, yertl00@stud.fme.vutbr.cz, ybarve00@stud.fme.vutbr.cz,
ykutal01@stud.fme.vutbr.cz*

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.

Abstrakt: Článek navazuje na příspěvky Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů - 1. část a Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů - 2. část. Je zde popsán počítačový program pro predikci pravděpodobností poruch výkonových olejových transformátorů.

Abstract: This article follows on the contributions Time Series Application in Diagnostic of Power Oil Transformers - 1. Part and Time Series Application in Diagnostic of Power Oil Transformers - 2. Part. This article deals with failure probability prediction and with DGA methods. The computer programme which predicts failure probabilities of power oil transformers.

Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů - 3. část

Miloš Hammer¹, Jakub Ertl², Oldřich Barvenčík³, David Kutálek⁴

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

Email: ¹hammer@fme.vutbr.cz, ²yertl00@stud.fme.vutbr.cz, ³ybarve00@stud.fme.vutbr.cz, ⁴ykatal01@stud.fme.vutbr.cz

Abstrakt – Článek navazuje na práci publikovanou v [1] a [2]. Je zde popsán počítačový program pro výpočet pravděpodobnosti možných poruch vyskytujících se u výkonových olejových transformátorů, který vychází především z teorie popsané v [2]. Tento program byl použit pro rozbor spolehlivosti na reálných datech. V závěru jsou zhodnoceny výsledky.

1 Úvod

V článku [2] byl popsán postup predikce pravděpodobnosti poruchy výkonových olejových transformátorů na základě aplikace čtyř diagnostických metod:

- ČSN metoda - vychází z [3],
- Duvalova metoda,
- Rogersova metoda,
- Dornenburgova metoda.

Pro testování programu byly k dispozici protokoly o diagnostických měřeních šesti výkonových olejových transformátorů. Měření probíhala v nepravidelných časových intervalech během provozu strojů v elektrárnách. Jedná se konkrétně o:

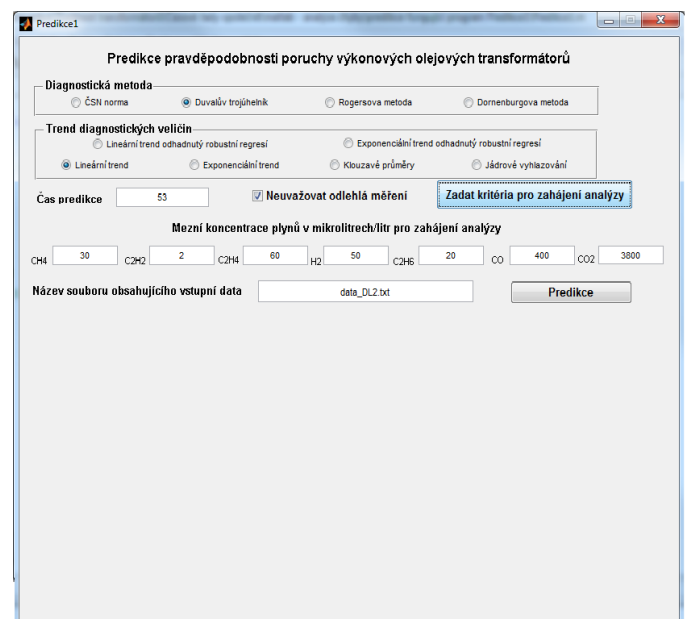
- transformátor z vodní elektrárny Slapy (v dalším textu označeno SL1),
- transformátor z vodní elektrárny Kamýk (K1),
- transformátory z přečerpávací elektrárny Dlouhé Stráně (DS1, DS2),
- transformátory z přečerpávací elektrárny Dalešice (DL2, DL6).

Při aplikaci off-line diagnostických metod je nutné se vypořádat s řadou problémů. Patří mezi ně například skutečnost, že chybí měření z nějaké etapy provozu stroje, diagnostická šetření se neprovádí při stejných okolních podmínkách (různá teplota, různá vlhkost, atd.), data jsou zatížena chybami (lidský faktor, nepřesnost měřících přístrojů, atd.). Presentovaný software je navrhován tak, aby uvedené problémy co nejméně zkreslily výsledek.

V první části článku je popis aplikace programu, jsou zmíněny především vstupující a vystupující parametry. Dále již následuje analýza vlivu různých kombinací vstupních parametrů na konečný výsledek (volba trendu pro modelování časových řad a volba různých diagnostických metod).

2 Popis softwaru pro rozbor spolehlivosti

Pomocí prostředí Matlab R2009b byl navržen software Reliab_dga.transformer 1.0 pro predikci pravděpodobnosti možných poruch vyskytujících se u výkonových olejových transformátorů. Titulní okno zachycuje obrázek 1.



Obrázek 1: Titulní okno navrženého softwaru.

2.1 Zadání vstupních parametrů softwaru

Nejdříve si uživatel zvolí diagnostickou metodu, podle které chce 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 τ [2], ve kterém se mají spočítat jednotlivé výstupy softwaru. Dále lze zadat, zda se budou ve výpočtech uvažovat i odlehlá měření (tj. měření, která se nápadně odchylují od předešlých, tyto výchyly mohou být způsobeny chybami měření a program je schopen na základě teorie uvedené v [2] je identifikovat). V dalším kroku se zadávají prostřednictvím tlačítka *Zadat kritéria pro zahájení analýzy* kritické hodnoty pro zahájení analýzy. Defaultně jsou zde nastaveny hodnoty podle [3]. Tyto hodnoty se mění v závislosti na použitých diagnostických metodách a uživatel si je může přizpůsobit svým potřebám jejich přepsáním v titulním okně softwaru. Nakonec se zadává název souboru ve formátu *.txt*, který obsahuje diagnostická měření koncentrací jednotlivých plynů rozpuštěných v oleji během celé historie provozu transformátoru. Hodnoty plynů se zadávají pod sebe a jednotlivé plyny jsou vždy odděleny prázdným řádkem. Pořadí plynů v souboru je následující:

čas t ,

CH_4 ,

C_2H_2 ,

C_2H_4 ,

H_2 ,

C_2H_6 ,

CO ,

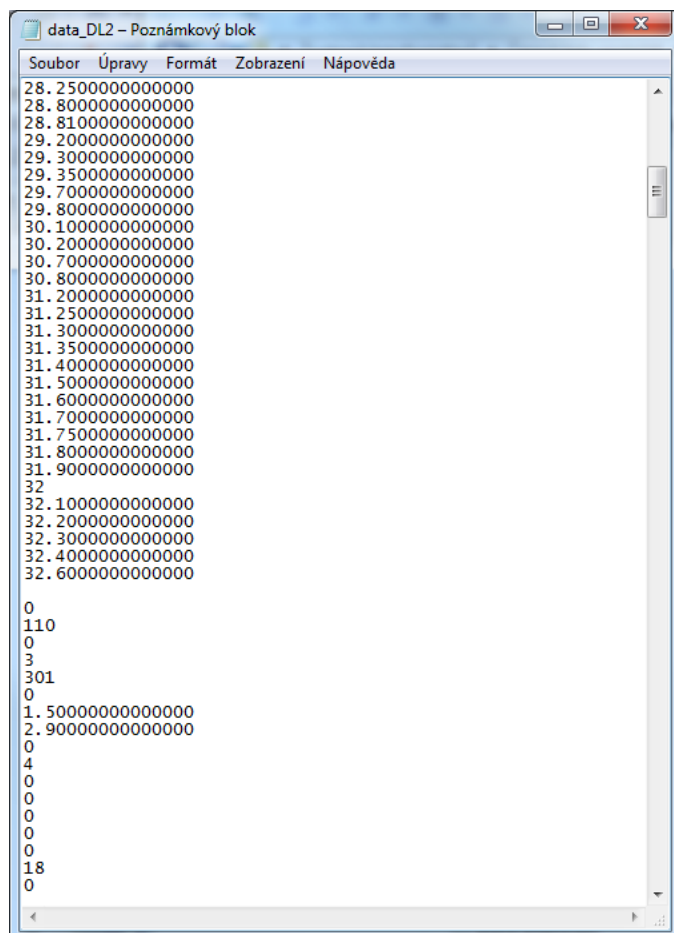
CO_2 .

Pokud nebyl některý plyn v daném čase měřen, nahradí se jeho koncentrace nulou. Obrázek 2 zachycuje příklad vstupního souboru, kde je znázorněno oddělení času a koncentrací CH_4 . Výpočty se zahájí aktivací tlačítka *Predikce*.

2.2 Výstupní parametry softwaru

Výstupní parametry z Reliab_dga_transformer 1.0 se vypisují do titulního okna (obrázek 3). První skupina výstupů se nazývá *Pravděpodobnosti*. Skládá se z pravděpodobnosti oprávněnosti aplikace diagnostické metody, což je pravděpodobnost, že budou v čase τ splněny všechny podmínky nutné pro aplikaci zvolené diagnostické metody. Dále následují pravděpodobnosti, s jakými budou v transformátoru jednotlivé poruchy v čase τ [2].

Další skupina výstupů má název *Výsledky testu, že chybová složka časových řad jednotlivých plynů má normální rozdělení*, 1 znamená, že software tuto hypotézu pro čas τ nezamítá, což se předpokládá v teorii uvedené v [2]. Další skupina výstupu 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 τ . Nakonec se vypíše, jaké budou nejpravděpodobnější poměry analyzovaných plynů v čase τ . Pokud jsou diagnostické metody doplněny grafickým výs-

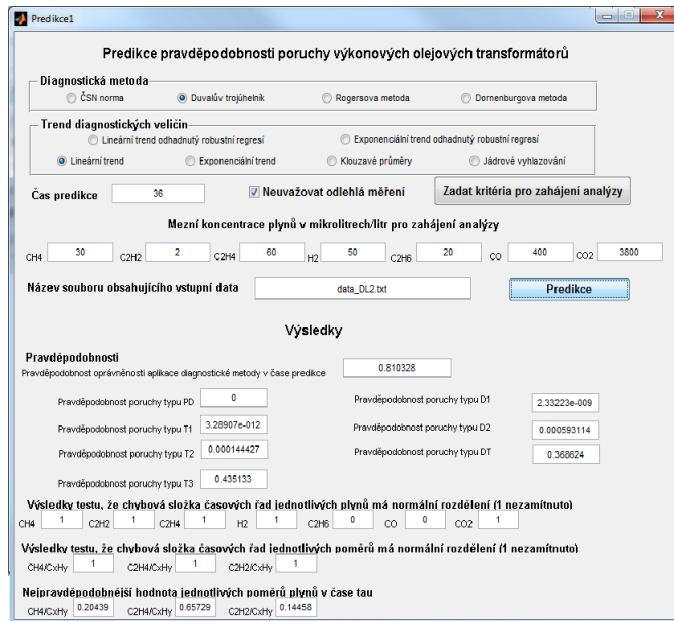


Obrázek 2: Soubor měřených koncentrací plynu vstupující do softwaru.

tupem, zde popisovaný software tyto obrázky také vykreslí. Graf spojený s ČSN metodou je na obrázku 4, Duvalův trojúhelník znázorňuje obrázek 5. Bod R zde vystihuje poslední zmíněný výstup a to nejpravděpodobnější souřadnice poměrů plynů v čase τ .

3 Porovnání trendů pomocí navrhovaného softwaru Reliab_dga_transformer 1.0

S využitím naměřených dat popsaných výše 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 transformátorů DL2, DL6, DS1, DS2, SL1 a K1 v pěti posledních časech (u transformátorů SL1 a K1 pouze ve třech z důvodu menšího rozsahu datového souboru), ze kterých jsou k dispozici naměřená data, máme tak možnost porovnání předpovědi se skutečností. Úkolem bylo porovnat vhodnost jednotlivých trendů pro modelování časových řad při predikci poruch transformátoru, využita k tomu byla metoda Duvalova trojúhelníku. Srovnávali jsme tyto trendy:

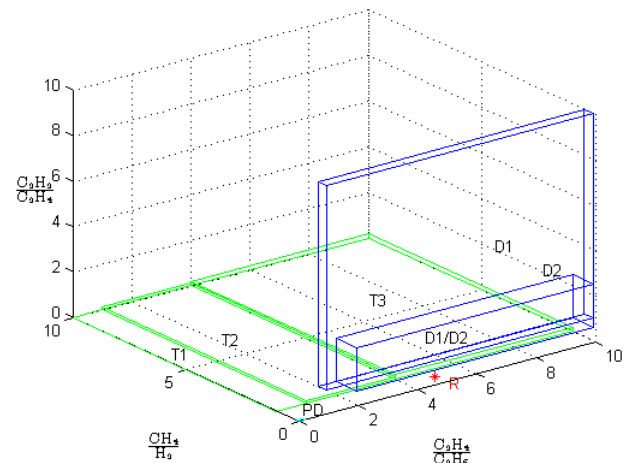


Obrázek 3: Titulní okno s vypsanými výstupy.

- lineární trend odhadnutý robustní regresí (v tabulkách zkratka r. lin.)
- mocninný trend odhadnutý robustní regresí (r. moc.)
- lineární trend proložený metodou nejmenších čtverců (lin.)
- exponenciální trend proložený metodou nejmenších čtverců (exp.)
- trend určený jádrovým vyhlazováním (ksr.)
- trend určený kluzovými průměry (klp.)

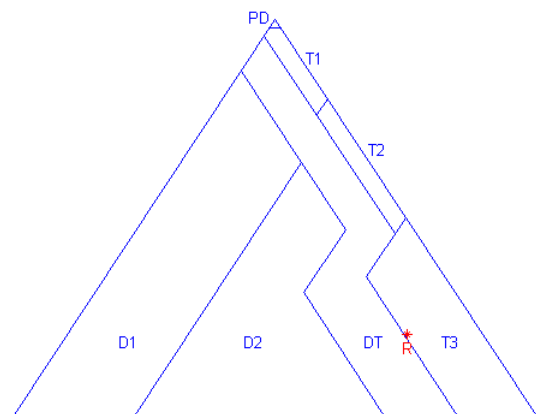
Bližší informace k uvedenému modelování časových řad lze nalézt v [1]. Pro každý z transformátorů a pro každý trend jsme obdrželi výsledky ilustrované tabulkou 1 (zde jsou uvedeny pro DL2 a pro lineární trend). V záhlaví tabulky jsou časy, v kterých bylo predikováno. Ve sloupcích jsou pak postupně pravděpodobnosti překročení p_p , pravděpodobnosti jednotlivých poruch p_{PD} , p_{T1} , p_{T2} , p_{T3} , p_{D1} , p_{D2} , p_{DT} , následují souřadnice bodu R : P_1 , P_2 a P_3 . V posledních dvou řádcích tabulky jsou uvedeny skutečné stavy transformátoru, které jsou nám známy, je to nejprve Opr. – oprávněnost použití diagnostické metody, tedy zda některý ze sledovaných plynů překročil svou kritickou hodnotu (1 značí ano), a POR – porucha. V popisované tabulce 1 tak například vidíme, že poruše T3, která byla diagnostikována v časech 32,4 a 32,6 let provozu, byla v těchto časech předpovídána nejvyšší pravděpodobnost.

Tabulka 2 již nabízí přímý pohled na porovnání trendů při predikování. Jsou zde uvedeny výsledky pro transformátor DL2 v čase $\tau = 32,6$, v záhlaví jsou nyní vybrané trendy. Připomeňme, že ve zmíněném čase τ byla



Obrázek 4: Graf podle ČSN metody.

Duvalův trojúhelník



Obrázek 5: Duvalův trojúhelník.

u transformátoru DL2 diagnostikována metodou Duvalova trojúhelníku porucha T3. Vidíme, že tato porucha byla správně předpovídána pomocí všech uvedených trendů (pravděpodobnost p_{T3} byla vyšší než ostatní) s výjimkou mocninného trendu odhadnutého pomocí robustní regrese, ten predikoval nesprávně poruchu DT. Situaci ilustruje obrázek 6, červeně je v Duvalově trojúhelníku znázorněn skutečný stav transformátoru, lineární trend odhadnutý robustní regresí, lineární trend, exponenciální trend a trend určený pomocí jádrového vyhlazování jsou vyznačeny postupně modrou, černou, modrozelenou a fialovou barvou. Mocninný trend odhadnutý pomocí robustní regrese, který jako jediný předpověděl nesprávnou poruchu je znázorněn zeleně.

3.1 Predikování v poruchových stavech

V úvodu kapitoly 3 bylo zmíněno, v kterých časech a u kterých transformátorů jsme jejich stavy předpově-

Tabulka 1: Výsledky pro transformátor DL2, lineární trend.

	32	32,1	32,2	32,4	32,6
p_p	0,7850	0,7526	0,7355	0,7252	0,7556
p_{PD}	0	0	0	0	0
p_{T1}	0	0	0	0	0
p_{T2}	0	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002
p_{T3}	0,3677	0,3834	0,4019	0,4153	0,4340
p_{D1}	0	0	0	0	0
p_{D2}	0,0006	0,0005	0,0006	0,0005	0,0005
p_{DT}	0,4113	0,3630	0,3262	0,3031	0,3151
P_1	0,2	0,1981	0,1981	0,1997	0,2020
P_2	0,6630	0,6690	0,6616	0,6634	0,6614
P_3	0,1527	0,1482	0,1432	0,1400	0,1400
Opr.	0	0	0	1	1
POR	–	–	–	T3	T3

Tabulka 2: Porovnání trendů, transformátor DL2, $\tau = 32,6$.

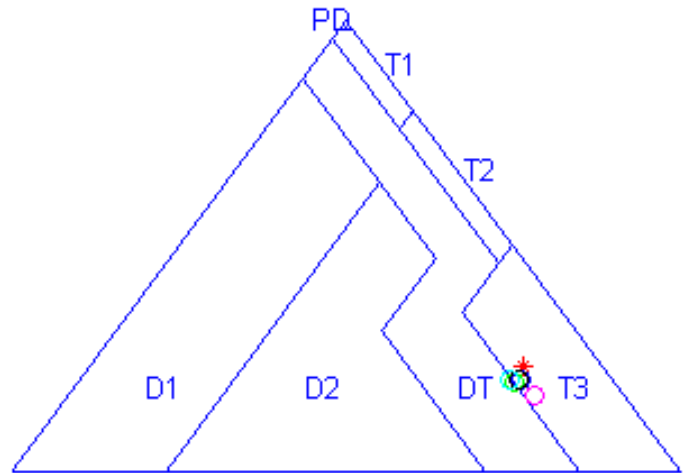
	r. lin.	r. moc.	lin.	exp.	ksr.
p_p	0,7448	0,8427	0,7556	0,9162	0,8674
p_{PD}	0	0	0	0	0
p_{T1}	0	0	0	0	0
p_{T2}	0,0005	0,0002	0,0002	0,0001	0,0006
p_{T3}	0,4163	0,3438	0,4340	0,4472	0,5370
p_{D1}	0	0	0	0	0
p_{D2}	0,0011	0,0032	0,0005	0,0014	0,006
p_{DT}	0,3167	0,4813	0,3151	0,4598	0,3203
P_1	0,2018	0,1999	0,2020	0,2018	0,1663
P_2	0,6444	0,6608	0,6614	0,6626	0,6350
P_3	0,1380	0,1489	0,1400	0,1519	0,1331

dali. Celkem se jedná o 26 případů, v 18 z nich byla metodou Duvalova trojúhelníku diagnostikována některá z poruch. Porovnejme nyní predikce právě v těchto poruchových stavech.

V tabulce 3 je pro ilustraci vybráno pět z nich, k predikování zde bylo užito lineárního trendu. V záhlaví tabulky jsou jednotlivé případy očíslovány. V jednotlivých řádcích jsou pak uvedeny transformátory (Tr.), u kterých se daný případ vyskytl, a časy τ ve kterých k tomu došlo. Dále jsou již pravděpodobnosti překročení p_p , předpovídané poruchy (\widehat{POR}) s příslušnými pravděpodobnostmi výskytu ($p_{\widehat{POR}}$) a konečně poruchy, které byly ve skutečnosti diagnostikovány.

Predikované stavy, v předchozím textu značené R , z tabulky 3 jsou v Duvalově trojúhelníku na obrázku 7 znázorněny červenou barvou, černě jsou zde pak jim příslušné skutečné stavy.

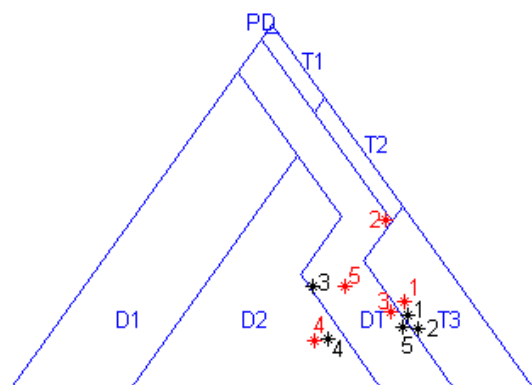
Porovnat můžeme také úspěšnosti jednotlivých trendů při predikování všech 18 poruchových stavů, které byly analyzovány (tabulka 4). Nejvyšší úspěšnosti 83,3% bylo dosaženo užitím lineárního trendu odhadovaného oběma



Obrázek 6: Porovnání trendů pro predikci.

Tabulka 3: Predikce v poruchových stavech.

	1	2	3	4	5
Tr.	DL2	DL6	DS1	K1	SL1
čas τ	32,4	31,1	16,8	11,46	54,7
p_p	0,7252	0,7345	0,3496	0,9996	0,7659
\widehat{POR}	T3	T3	DT	D2	DT
$p_{\widehat{POR}}$	0,4153	0,3189	0,1738	0,6712	0,3761
POR	T3	DT	DT	D2	DT



Obrázek 7: Predikce v poruchových stavech.

Tabulka 4: Úspěšnost předpovědí pomocí jednotlivých trendů.

	$\widehat{POR}=POR$	$\widehat{POR} \neq POR$	úspěšnost
r. lin.	15	3	83,3%
r. moc.	9	9	50%
lin.	15	3	83,3%
exp.	12	6	66,7%
ksr.	15	3	83,3%
klp.	14	4	77,8%
r. lin. od. h.	12	6	66,7%
lin. od. h.	14	4	77,8%

Tabulka 5: Porovnání predikcí se skutečnými stavy.

	$POR=T3$	$POR=D2$	$POR=DT$
$\widehat{POR}=T3$	10	0	2
$\widehat{POR}=D2$	0	4	1
$\widehat{POR}=DT$	0	0	1

uvažovanými metodami a trendu, který byl získán pomocí jádrového vyhlazování. V posledních dvou řádcích se navíc srovnává vliv vyřazení odlehlých pozorování na výsledek pro lineární trendy. Z porovnání procentuálních úspěšností plyne, že má smysl odlehlá měření neuvažovat, protože ani použité metody robustní regrese neodstraní jejich vliv dostatečně.

V tabulce 5 je srovnání predikovaných poruch (opět značíme \widehat{POR}) a skutečných poruch (POR) v poruchových stavech při predikci pomocí lineárního trendu určeného metodou nejmenších čtverců. Zabýváme se zde pouze poruchami T3, D2 a DT, ostatní totiž nebyly predikovány ani na základě skutečných stavů transformátorů diagnostikovány. Správné predikce jsou v tabulce na „diagonále“. Ve třech zbývajících případech byla skutečná porucha DT (v transformátoru se vyskytuje zároveň jiskření a tepelná porucha, více [2]), přičemž dvakrát byla predikována tepelná porucha T3 a jednou jiskření D2.

Na základě provedených výpočtů pomocí Reliab_dga_transformer 1.0 lze usoudit, že pro modelování diagnostických veličin jako časových řad aditivním dekompozičním modelem se nejlépe jeví lineární trend určený metodou nejmenších čtverců. Pomocí něj bylo dosaženo nejvyšší úspěšnosti (tabulka 4), navíc jsou zde nižší výpočetní nároky ve srovnání s modelováním lineárním trendem odhadnutým pomocí robustní regrese tak i s trendem stanoveným jádrovým vyhlazováním.

4 Srovnání metod

V dalším kroku lze zaměřit pozornost na srovnání jednotlivých diagnostických metod. Jak bylo již výše zmíněno jsou v navrženém softwaru implementovány uznávané a běžně využívané postupy hodnocení stavu izolačního systému dle norem ČSN, Duvalovy, Rogersovy a Dornen-

Tabulka 6: Pravděpodobnost poruchy.

	DL2			DL6		
τ	32,3	32,4	32,6	28,2	28,5	28,7
ČSN	0,701	0,731	0,725	0,675	0,698	0,698
Duv	0,701	0,731	0,725	0,675	0,698	0,698
Rog	0	0	0	0	0	0
Dor	0	0	0	0	0	0
	DS1			DS2		
τ	16,7	16,8	17,3	16,7	16,8	17,7
ČSN	0,378	0,373	0,335	0,789	0,779	0,777
Duv	0,378	0,373	0,335	0,789	0,779	0,777
Rog	0	0	0	0	0	0
Dor	0	0	0	0	0	0
	SL1			K1		
τ	53,5	54,7	–	11,4	11,5	12
ČSN	0,862	0,739	–	1	0,99	0,99
Duv	0,862	0,739	–	1	0,99	0,99
Rog	0	0	–	0	0	0
Dor	0	0	–	0	0	0

burgovy metody. Byla tedy provedena studie predikcí celkové pravděpodobnosti poruchy a pravděpodobností jednotlivých typů poruch. Následně byly vyhodnoceny shody a také rozpory mezi výslednými diagnózami.

Pro zajištění co největší vypovídací hodnoty byl v souladu s předchozími závěry pevně nastaven lineární trend s vyloučením odlehlých hodnot. Celkově byly analyzovány predikce tří stavů šesti transformátorů (DL2, DL6, DS1, DS2, SL1 a K1). V tabulce 6 je uvedeno srovnání celkových pravděpodobností, že alespoň jedna ze sledovaných veličin překročí stanovenou mez.

Je zřejmé, že výsledná pravděpodobnost překročení mezního stavu se shoduje u normy ČSN a Duvalovy metody. Také výsledky podle Rogerse a Dornenburga je možno chápat jako shodné. Tento závěr byl očekávaný a vyplývá z vlastního nastavení kritériálních hodnot v jednotlivých případech. Ovšem fakt, že ČSN a Duval jsou v přímém rozporu s dalšími zkoumanými postupy je zarážející. Příčina tohoto rozdílu je dána tolerováním několikanásobně vyšších koncentrací sledovaných plynů u Rogersovy a Dornenbugovy metody. Pro potřeby predikce je tedy výhodnější zvolit přísnější vstupní kritéria a dále pak vyhodnotit závažnost nenulových výstupů.

Dále byly porovnány pravděpodobnosti výskytu jednotlivých typů chyb. V tabulce 7 je uveden příklad výstupů získaných pro transformátory DS1 a DS2 v době provozu 17 let. Pouze již nejsou zobrazeny výsledky pro Rog. a Dor. metody, které byly opět všechny nulové. Výhodou diagnostiky poruch z Duvalova trojúhelníku je získání nejpravděpodobnějšího typu chyby narozdíl od ČSN normy, kde ve většině provedených studií vychází největší pravděpodobností nelze typ chyby určit.

Tabulka 7: Pravděpodobnost typu poruchy.

	DS1		DS2	
	ČSN	Duval	ČSN	Duval
p_{PD}	0	0	0	0
p_{T1}	0	0	0	0
p_{T2}	0	0	0	0
p_{T3}	0	0	0	0,553
$p_{D1/D2}$	0	–	0	–
p_{D1}	0,082	0	0	0
p_{D2}	0,295	0,185	0,79	0
p_{DT}	–	0,159	–	0,231

5 Závěr

Z předešlých výsledků vyplývá, že navržený program Reliab_dga_transformer 1.0 lze jednoduše použít pro vyhodnocení dat z off-line diagnostických měření výkonových olejových transformátorů. Výhodou je také nízká hardwarová náročnost, snadná obsluha a vysoká rychlost výpočtů.

Pomocí Reliab_dga_transformer 1.0 byly porovnávány trendy pro modelování vývoje koncentrací plynů rozpuštěných v izolačním oleji. Postup analýzy je popsán v kapitole 3. Provedený rozbor ukázal, že nejvhodnějšími trendy pro uvedené modelování jsou lineární trendy odhadované pomocí robustní regrese i metodou nejmenších čtverců a trend určený jádrovým vyhlazováním. Při predikci na základě těchto trendů v 83,3% případů odpovídala předpovídaná porucha skutečné. Z uvedených trendů lze tak doporučit především lineární trend odhadovaný metodou nejmenších čtverců, který má nejnižší výpočetní nároky.

Dále byly softwarem Reliab_dga_transformer 1.0 porovnávány jednotlivé diagnostické metody. Z tabulky 6 vyplývá, že Dornenburgova a Rogersova metoda dávají nulové pravděpodobnosti poruchy. Tento fakt je způsoben příliš benevolentními (vysokými) kritériálními hodnotami, které způsobují, že pravděpodobnosti jejich překročení se blíží nule. Pro potřeby predikce pravděpodobností poruch je tak nejvhodnější Duvalova metoda, která označí jednu poruchu za nejpravděpodobnější. Naproti tomu výsledkem metody ČSN je většinou skutečnost, že o typu poruchy nejde rozhodnout.

Literatura

- [1] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D.: *Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů - 1. část.*
- [2] HAMMER, M., ERTL, J., BARVENČÍK, O., KUTÁLEK, D.: *Využití časových řad v diagnostice výkonových olejových transformátorů - 2. část.*
- [3] 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.

- [4] *Podniková norma ČEZ, a.s. ev. č. 00/05 : Profylaktika elektrických strojů netočivých - výkonové transformátory.* Praha : ČEZ,a.s., 2006. 93 s.
- [5] ANDĚL, J.: *Matematická statistika.* Praha: SNTL, 1978.
- [6] 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>.

Tento příspěvek vznikl za podpory výzkumného záměru MŠMT ČR: MSM 0021630518, název: Simulační modelování mechatronických soustav a za podpory juniorského projektu specifického výzkumu: BD13102005, 2011, název: Rozbor spolehlivosti výkonových olejových transformátorů.