



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

PŘÍSPĚVEK K HODNOCENÍ PLYNŮ ROZPUŠTĚNÝCH V OLEJI PŘI DIAGNOSTICE VÝKONOVÝCH OLEJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

CONTRIBUTION TO THE EVALUATION OF DISSOLVED GAS ANALYSIS IN POWER OIL
TRANSFORMER DIAGNOSIS

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MARTIN MINISTR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MILOŠ HAMMER, CSc.

ABSTRAKT

Disertační práce je zaměřena na hodnocení plynů rozpuštěných v oleji při diagnostice výkonových olejových transformátorů. Vychází ze známých, v normách, předpisech a literatuře uvedených skutečností a tyto doplňuje o nové poznatky. Jedná se především o stanovení plynů, které stačí znát pro hodnocení stavu transformátoru, stanovení přesnosti stávajících metod a vyšetření změny přesnosti metod pro interpretaci plynů rozpuštěných v oleji. Součástí práce je také použití matematických metod pro bližší popis jednotlivých možných poruch v transformátoru se vyskytujících a rovněž stanovení dominantního plynu generujícího se ve výkonovém olejovém transformátoru. Získané závěry budou přínosem pro diagnostiku transformátorů a jsou využitelné v průmyslové praxi, které budou nabídnuty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Diagnostika, analýza rozpuštěných plynů, výkonový olejový transformátor, Rogers, Duval, ČSN EN 60599, Doernenburg

ABSTRACT

This dissertation thesis is focused on the evaluation of the dissolved gas analysis in the power oil transformer diagnosis. This thesis derives from known, in standards, directives and literature shows realities which are fill in new pieces of knowledge as determining of gases important for evaluation of the transformer condition, specifying of current methods accuracy and investigating of accuracy change for interpretation of dissolved gases. The part of this thesis is the application of mathematic methods for detailed description of individual transformer failures and determining of dominant gas which are generating in power oil transformer. Obtain conclusion will be contribution for transformer diagnostics and will be applicable in industrial practice.

KEYWORDS

Diagnostics, dissolved gas analysis, power oil transformer, Rogers, Duval, ČSN EN 60599, Doernenburg

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ministr, M. *Příspěvek k hodnocení plynů rozpuštěných v oleji při diagnostice výkonových olejových transformátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 142 s. Vedoucí diplomové 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, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 20. června 2012

.....

Martin Ministr

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	1
Úvod	8
Stav problematiky a cíle práce.....	9
Stav problematiky v zahraničí	9
Stav problematiky u nás	9
Cíle práce.....	9
1 Diagnostika transformátorů	11
1.1 Transformátor	11
1.2 Diagnostické metody	12
1.3 Analýza plynů rozpuštěných v oleji.....	14
1.4 Typy sledovaných poruch.....	16
2 Metody odhalování plynů rozpuštěných v oleji	18
2.1 Foto-akustická spektroskopie	18
2.2 Plynová chromatografie	19
3 Metody pro interpretaci plynů rozpuštěných v oleji.....	21
3.1 ČSN EN 60599	21
3.2 Duvalova trojúhelníková metoda.....	24
3.3 Doernenburgova metoda.....	25
3.4 Rogersova metoda.....	26
3.5 Metoda C. E. G. B.....	27
3.6 Metoda klíčových plynů	29
3.7 Metoda C. S. U. S.	31
4 Databáze IEC TC 10.....	32
4.1 Částečné výboje (PD)	32
4.2 Elektrické výboje nízké energie (D1)	33
4.3 Elektrické výboje vysoké energie (D2).....	34
4.4 Tepelná porucha s teplotou $T < 700\text{ °C}$ (T12).....	35
4.5 Tepelná porucha s teplotou $T > 700\text{ °C}$ (T3).....	37
5 Shodné rysy metod pro interpretaci plynů rozpuštěných v oleji	39
5.1 Tepelná porucha (TF)	39
5.2 Elektrické výboje (ED)	43
5.3 Částečné výboje (PD)	47
5.4 Celkový pohled	50
5.5 Vyšetření omezení počtu plynů na 4.....	51
6 Přesnost stávajících interpretačních metod šetřená v databázi IEC TC 10	58

6.1	ČSN EN 60599	58
6.2	Duvalova trojúhelníková metoda.....	60
6.3	Doernenburgova metoda.....	62
6.4	Rogersova metoda.....	63
6.5	Metoda C. E. G. B.....	65
6.6	Metoda klíčových plynů	67
6.7	Metoda C. S. U. S.	68
6.8	Shodné rysy metod.....	69
6.9	Celkový souhrn	70
7	Matematické metody vhodné k interpretaci plynů rozpuštěných v oleji.....	72
7.1	Rozdělení poruch 1. krok.....	74
7.2	Rozdělení poruch 2. krok.....	88
7.3	Rozdělení poruch 3. krok.....	104
7.4	Použité plynové poměry	105
8	Vyšetření dominantního plynu	116
8.1	Dominantní plyn pro veškeré poruchy.....	116
8.2	Dominantní plyn pro částečné výboje.....	118
8.3	Dominantní plyn pro elektrické výboje nízké energie.....	119
8.4	Dominantní plyn pro elektrické výboje vysoké energie	121
8.5	Dominantní plyn pro tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ °C}$	123
8.6	Dominantní plyn pro tepelnou poruchu s teplotou $T > 700\text{ °C}$	125
8.7	Celkový pohled	128
	Závěr.....	129
	Přínos práce	131
	Původnost práce.....	132
	Použité informační zdroje.....	133
	Seznam publikací autora.....	136
	Seznam projektů autora	137
	Pedagogická činnost autora	138
	Seznam použitých zkratk a symbolů	139
	Seznam příloh.....	142

ÚVOD

Předkládaná práce se zabývá diagnostikou výkonových olejových transformátorů. Diagnostika transformátoru je obecně zaměřena na různé části transformátorů a podle toho jsou vypracovány i v normách [6], [7] a předpisech [16] různé metody a postupy. Jednou z těchto metod je analýza plynů rozpuštěných v oleji. Tyto plyny vznikají přirozeně stárnutím materiálů i nestandardními ději odehrávajícími se uvnitř transformátoru. Analýza plynů rozpuštěných v oleji je tedy jeden z postupů, pomocí něhož lze včas rozpoznat děje odehrávající se uvnitř transformátoru. Pomocí včasného rozpoznání těchto dějů lze v kombinaci s plánovanou údržbou prodloužit životnost sledovaného zařízení, popřípadě přesněji stanovit nejvhodnější období pro jeho renovaci či náhradu. To má velký význam především v dnešní době, kdy většina výkonových olejových transformátorů je v České republice i ve světě na pokraji své plánované životnosti a jejich hromadné nahrazení by přineslo provozovateli značné finanční náklady. Zároveň nepředvídaná havárie transformátoru může způsobit výpadky elektrické rozvodné sítě s nemalými finančními náklady, nese s sebou rizika ohrožení zdraví obsluhy vlivem požáru či exploze a v neposlední řadě může způsobit další společenské problémy s těmito výpadky spojené (problémy ve veřejné dopravě, v řízení dopravy, ve zdravotnictví, apod.). Tedy včasné rozpoznání stavu transformátoru a každé oddálení jeho případné výměny přináší nemalé úspory.

Z výše uvedeného vyplývá, že každá činnost přispívající ke zlepšení této problematiky je přínosem.

Diagnostikou transformátorů, zlepšováním stávajících diagnostických metod a vyvíjením nových se zabývají mnohé firmy u nás i v zahraničí. Kromě firem jsou v této problematice zainteresovány i mezinárodní poradní sbory jako CIGRE, či EPRI. Ve spojitosti s diagnostikou výkonových olejových transformátorů je též k dohledání obsáhlá publikační činnost.

V dnešní době existuje mnoho diagnostických metod a přístupů. Následující text se soustřeďuje na doposud neřešené problémy a snaží se zpřehlednit, zpřesnit a doplnit diagnostické metody týkající se analýzy plynů rozpuštěných v oleji a určit, kdy je nejlepší použít kterou z těchto metod a ukázat další možné přístupy. Z toho vyplývají i cíle této práce uvedené a řešené v následujícím textu.

STAV PROBLEMATIKY A CÍLE PRÁCE

V této kapitole je popsán stav řešené problematiky v zahraničí a u nás a dále jsou zde popsány cíle práce.

STAV PROBLEMATIKY V ZAHRANIČÍ

V zahraničí se touto problematikou zabývá mnoho firem a poradních sborů, jak je již naznačeno v úvodu. Diagnostice transformátorů je tedy v zahraničí věnována velká pozornost. Firmy se zabývají především měřením diagnostických veličin a vývojem nových měřících zařízení. Zařízeními určenými ke sledování plynů rozpuštěných v oleji se zabývají firmy Morgan Schafffer, GE Energy, Siemens a další. Poradní sbory se zabývají především vývojem nových diagnostických metod a postupů, spolehlivostí a údržbou transformátorů. Novým metodám a postupům se věnují hlavně CIGRE (the International Council on Large Electric Systems) a EPRI (Electric Power Research Institute). Na akademické půdě je diagnostice transformátorů věnována pozornost především na Slovensku, v Rakousku, Švýcarsku, Švédsku a Číně. V zahraničí též existují mnohé konference zaměřené na výše uvedené, jako jsou například GIC (Global Insulating Conference), DEIS (IEEE Dielectrics & Electrical Insulation Society), nebo CEIDP (Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena).

STAV PROBLEMATIKY U NÁS

V České republice je diagnostice transformátorů věnována poměrně malá pozornost, tyto snahy nejsou nijak jednotně koordinovány. Proto je každý příspěvek k této problematice přínosem. Hlavní úloha by měla spočívat na akademických institucích a firmy by se měly věnovat verifikaci poznatků universit. Z firem se diagnostice věnují především ČEZ, a. s., ELDIAG, s. r. o. a EGÚ Brno, a. s., které se zabývají zvláště měřením diagnostických veličin a jejich interpretací. Na akademické půdě se diagnostikou transformátorů zabývají např. ČVUT v Praze, ZČU Plzeň a naše pracoviště. Z konferencí, které se u nás věnují i diagnostice transformátorů, to jsou hlavně DIAGNOSTIKA (pořádá ZČU Plzeň), DIAGO (pořádá TU Ostrava) a DIAGON (pořádá UTB ve Zlíně). Většina institucí se snaží zlepšovat tento stav také podáváním projektů. Na našem pracovišti se řešily projekty v rámci specifického výzkumu FSI „Rozbor spolehlivosti výkonových olejových transformátorů“, v rámci GAČR „Inteligentní diagnostika elektrických strojů“ a pro firmu ČEZ, a. s. „Vypracování metodik výpočtů nejistot pro diagnostiku energetických zařízení“. Řešením problematiky diagnostiky transformátorů se obecně dotýkal také projekt MPO „Metodika stanovení životnosti vysokonapěťových izolačních systémů točivých strojů“.

CÍLE PRÁCE

- Popis nejběžnějších metod pro odhalení plynů rozpuštěných v transformátorovém oleji
- Popis metod pro interpretaci plynů rozpuštěných v oleji
- Porovnání stávajících metod pro interpretaci plynů rozpuštěných v oleji
- Stanovení shodných rysů metod pro interpretaci plynů rozpuštěných v oleji

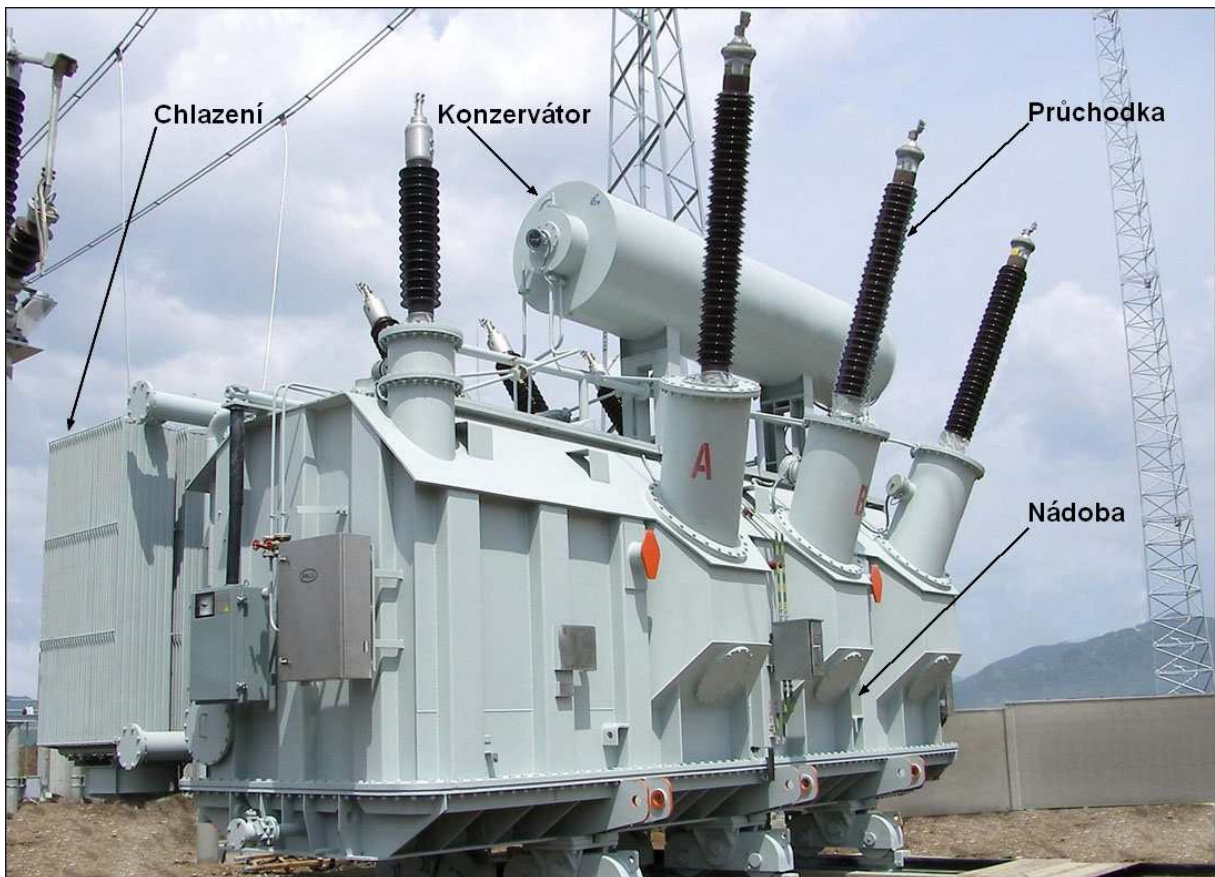
- Stanovení přesnosti metod pro interpretaci plynů rozpuštěných v oleji
- Vyšetření změny přesnosti metod pro interpretaci plynů rozpuštěných v oleji v závislosti na požadavcích na zjišťované poruchy
- Určení vhodných matematických metod využitelných pro hodnocení plynů rozpuštěných v oleji
- Stanovení dominantního plynu rozpouštěného v oleji sloužícího ke sledování stavu transformátoru

1 DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORŮ

Ve výkonovém olejovém transformátoru lze provádět diagnostiku pomocí více přístupů. Tato práce se dále podrobně zabývá hlavně analýzou plynů rozpuštěných v oleji, ale kromě ní existuje mnoho dalších diagnostických metod. Některé lze vykonat za provozu sledovaného zařízení – pak se mluví o on-line diagnostických metodách (monitoringu), některé z těchto metod vyžadují odpojení sledovaného zařízení od sítě – v tomto případě se mluví o off-line diagnostických metodách.

1.1 TRANSFORMÁTOR

Transformátor [1] (Obr. 1 a Obr. 2) je netočivý elektrický stroj, sloužící ke změně napětí střídavého proudu při stejné frekvenci. Skládá se z magnetického obvodu složeného z transformátorových plechů, elektrického obvodu tvořeného vstupním a výstupním vinutím, chlazení, které tvoří chladicí nádoba s médiem a mechanických částí konstrukce, které vše výše popsané fyzicky zajišťují.

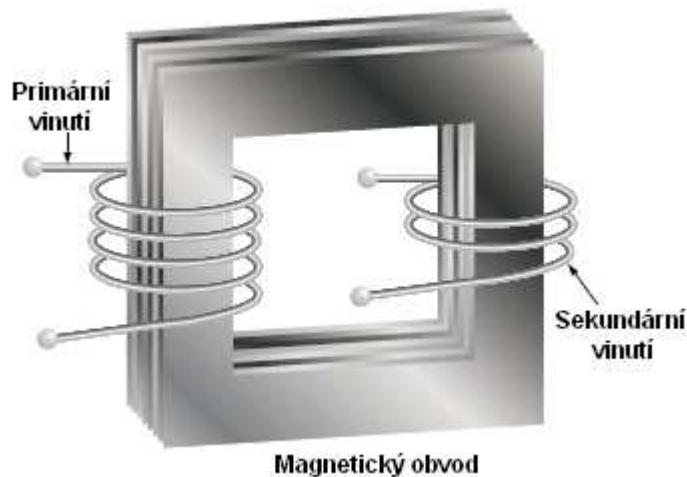


Obr. 1 Výkonový olejový transformátor [2]

Na vstupní (primární) vinutí je připojen zdroj dodávající napětí U_1 a proud I_1 o frekvenci f . To vyvolá v magnetickém obvodu magnetický tok Φ stejné frekvence f . Magnetický tok Φ následně indukuje ve výstupním (sekundárním) vinutí napětí U_2 a proud I_2 při stále konstantní frekvenci f . Převod transformátoru pak udává poměr závitů na vstupním a výstupním vinutí, resp. vstupního a výstupního napětí (1), nebo výstupního a vstupního proudu (2).

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (1)$$

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2)$$



Obr. 2 Ideové schéma vnitřní části transformátoru [3]

1.2 DIAGNOSTICKÉ METODY

Transformátor se skládá z několika životně důležitých částí a pro každou z těchto částí jsou vyvinuty určité diagnostické metody a postupy. V dalším textu budou uvedeny některé z nich, podrobněji popsané především v [4], [5].

1.2.1 VINUTÍ, JÁDRO

V elektrickém a magnetickém obvodu se sledují především poškozené kontakty, fyzické posunutí a deformace sledovaného obvodu, zkratky mezi závity nebo poškození izolace.

Je-li podezření na špatný kontakt uvnitř vinutí, provádí se měření jeho odporu. Odpor vinutí se změří ve všech fázích a ty se potom porovnají mezi sebou. Jestliže rozdílnost mezi každou z dvojic je nižší než 5 %, jsou výsledky pokládány za uspokojivé. Odpor vinutí lze také porovnat s výrobními hodnotami.

Dále se kontroluje převodový poměr transformátoru. Na vstupní vinutí se přivede nízké napětí známé velikosti a měří se napětí na výstupním vinutí. Z těchto čísel se určí převod transformátoru, který by se neměl lišit od výrobních hodnot o více než 0,5 %. Nový transformátor by se neměl lišit od výrobní hodnoty o více než 0,1 %.

K odhalení zkratů mezi závity, špatných kontaktů, problémům v přepínači odboček a jiných problémů se provádí test budícího proudu. Při tomto testu se měří proud potřebný k vyvolání zmagnetizování jádra a magnetického pole ve vinutí. Rozdíl proudů v jednotlivých fázích by neměl být vyšší než 10 %.

K ověření vlhkosti/suchosti izolace vinutí a jádra a zjištění ukrytých závad v průchodkách se provádí test izolačního odporu a následného vypočítání polarizačního indexu. Při tomto testu

je sledované zařízení odpojeno od sítě. Izolační odpor se obvykle měří při napětí 5 000 V. Je velmi důležité dát při tomto testu pozor na teplotu, izolační odpor je na ni silně závislý. Izolační odpor bývá korigován na standardní teplotu, obvykle 20 °C.

V případě podezření na deformaci vinutí nebo konstrukční problémy, se provádí test kapacitance. Při tomto testu se měří a zaznamenává kapacitance mezi primárním a sekundárním vinutím, mezi primárním vinutím a nádrží a mezi sekundárním vinutím a nádrží.

Dielektrické ztráty rostou spolu s přirozeným stárnutím izolačních materiálů transformátoru. Jsou ale zároveň ovlivněny vlhkostí nebo jinými chemickými látkami v izolaci. Dielektrické ztráty se získají z naměřeného účinníku.

1.2.2 PRŮCHODKY

Průchodky jsou vzhledem k ceně transformátoru poměrně levné, ale jejich poškození může vést k celkové destrukci transformátoru. Sleduje se tedy celkové zhoršení jejich stavu.

Přítomnost vlhkosti a jiných znečištění je obvykle provázena změnou účinníku, zatímco zkrat na kondenzátoru lze odhalit měřením kapacitance. V průchodkách by měla být zároveň kontrolována hladina oleje a jeho teplota. Dále lze pomocí vizuální inspekce odhalit poškozené porcelánové části, poškozené těsnění nebo praskliny.

1.2.3 CHLADICÍ SYSTÉM

Chladicí systém se skládá z chladících těles, pump a větráků. U chladících těles se kontroluje zejména proudění vzduchu skrz tyto tělesa a jejich čistota. Větráky a pumpy jsou ověřovány vizuálně, kdy je kontrolována schopnost jejich rotace.

1.2.4 IZOLAČNÍ OLEJ

U izolačního oleje se sleduje několik ukazatelů.

Kyselost izolačního oleje je množství KOH (mg) potřebného k neutralizaci 1 gramu tohoto oleje. Nové transformátory obvykle neobsahují kyseliny, ty jsou vytvářeny během stárnutí transformátoru. Tyto kyseliny nejen, že dávají informace o stárnutí zařízení, ale dále poškozují kovy uvnitř nádoby, celulózovou izolaci a urychlují její degradaci.

Barva izolačního oleje je obvykle porovnávána s barevnými standardy. Podle toho, kterému ze standardů pro daný olej má barva sledovaného oleje nejbližší, lze ohodnotit stav izolačního oleje.

Při testu dielektrické pevnosti se měří napětí, při kterém dojde k průrazu izolačního oleje. Z výsledku lze odvodit množství nečistot v oleji.

Povrchové napětí se vyjadřuje jako povrchové napětí mezi vzorkem oleje a destilovanou vodou. Výsledné povrchové napětí je síla, která je potřebná k posunutí malého drátěného kroužku o 1 centimetr ve styčné ploše destilované vody a olejového vzorku.

Vlhkost v transformátoru bývá obsažena jak v oleji, tak v celulózové izolaci. Tato vlhkost má na transformátor destruktivní vliv. Voda se může v zařízení vyskytovat jako voda rozpuštěná, či voda volná. Olej s vlhkostí více než 30 % je považován za extrémně vlhký, celulózová izolace s obsahem vody více než 4,5 % je považována za nadměrně vlhkou.

Furany jsou organické složky tvořené degradací celulózové izolace. Pokud furany narostou nad 250 ppb (parts per billion), měl by být olej vyměněn.

Také je potřeba kontrolovat, aby množství oleje v konzervátoru nepokleslo pod stanovenou mez.

Dále se sledují plyny rozpuštěné v oleji, které jsou prošetřeny na databázi IEC TC 10 [14]. O analýze plynů rozpuštěných v izolačním oleji je dále podrobně pojednáno v následující kapitole.

1.3 ANALÝZA PLYNŮ ROZPUŠTĚNÝCH V OLEJI

Analýza plynů rozpuštěných v oleji (DGA – dissolved gas analysis) odhaluje možné poruchy uvnitř transformátoru pomocí plynů rozpuštěných v izolačním oleji. Přirozená degradace izolačního systému olej-celulóza je způsobena stárnutím jednotlivých materiálů, ale mohou ji ovlivňovat (zejména urychlovat) i jiné vlivy. Jde zejména o zvýšenou teplotu, přítomnost vlhkosti, výboje a jiné. Během této degradace se z izolačního systému uvolňují plyny na bázi uhlíku, vodíku a kyslíku. Pomocí analýzy těchto plynů, spolu s určením jejich množství, lze odhalit děj uvnitř sledovaného zařízení se odehrávající.

Takto vznikající plyny lze dělit do dvou skupin – na plyny poruchové (vznikají uvnitř sledovaného zařízení pouze za přítomnosti nějakého nestandardního stavu) jako jsou vodík (H_2), metan (CH_4), acetylen (C_2H_2), etylen (C_2H_4), etan (C_2H_6), oxid uhelnatý (CO) a oxid uhličitý (CO_2) nebo na plyny neporuchové (jejich vznik a výskyt není vázán na žádný z nestandardních stavů) jako jsou kyslík (O_2) či dusík (N_2).

Každý nestandardní děj odehrávající se uvnitř transformátoru je náchylný ke zvýšené tvorbě určitých poruchových plynů v porovnání s ostatními plyny. Tyto, pro danou poruchu významné plyny, se nazývají klíčové plyny (key gases).

Samotný postup odběru vzorků a nezbytných podmínek při odběru se řídí normou ČSN EN 60567 [6].

1.3.1 MECHANISMUS TVOŘENÍ PLYNŮ

Mechanismus tvoření plynů je podrobně popsán v normě ČSN EN 60599 [7].

TVORBA PLYNŮ ROZKLADEM OLEJE

Minerální izolační oleje jsou tvořeny směsí rozdílných molekul uhlovodíků obsahujících CH_3 , CH_2 a CH skupiny, které jsou svázány kovalentní vazbou C-C. Výsledkem elektrických nebo tepelných poruch je štěpení vazeb C-H a C-C za vzniku radikálů jako jsou H^\bullet , CH_3^\bullet , CH_2^\bullet , CH^\bullet , nebo C^\bullet , které přes složité reakce znovu tvoří molekuly, jako jsou vodík (H-H), metan (CH_3 -H), etan (CH_3 - CH_3), etylen ($CH_2=CH_2$) nebo acetylen ($CH\equiv CH$). Vznikají také další uhlovodíkové plyny řad C_3 a C_4 , stejně jako pevné složky uhlíkových a uhlovodíkových polymerů (X vosky). Takto produkované plyny jsou buď rozpuštěné v oleji, nebo, jsou-li produkovány rychle a ve značném množství, že se nestačí rozpustit, ve formě volných plynů.

Nejslabší vazby C-H (338 kJ/mol), s hlavním plynem vodíkem, vznikají při poruchách zapříčiněných nízkou energií, jako jsou částečné nebo koronární 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 ($C\equiv C$ 960 kJ/mol) vazbou je potřeba vyšší energie přítomných poruch i vyšší teplota.

Při teplotách nad 500 °C se proto tvoří spíše etylen, než etan, či metan. Acetylen zase vyžaduje teploty 800 – 1 200 °C a rychlé ochlazení, aby se dále vyskytoval jako stabilní produkt rekombinace (tvořen tedy hlavně v obloucích a následných teplotách až několik tisíc stupňů).

Olej též může oxidovat s tvořením menších množství CO a CO₂, kterých se ovšem po delší době může nahromadit značné množství.

TVORBA PLYNŮ ROZKLADEM CELULÓZOVÉ IZOLACE

Tuhá celulózová izolace 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 CO₂ jsou tvořeny v podstatně větším množství než při oxidaci oleje za stejné teploty. Ale i zde se tvoří menší množství uhlovodíkových plynů a furanických sloučenin. Produkce CO a CO₂ je kromě jiného závislá jak na teplotě, tak na obsahu kyslíku v oleji a obsahu vlhkosti obsažené v celulózové izolaci.

OSTATNÍ ZDROJE PLYNŮ

Plyny v transformátorovém oleji mohou být též generovány jako výsledek koroze nebo jiných chemických reakcí na nechráněných plochách, ale i na 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 z ocelových konstrukcí pohlčeného během výrobního procesu.

Tab. 1 Klíčové plyny a jejich význam [8], [9], [10]

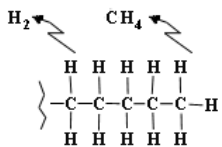
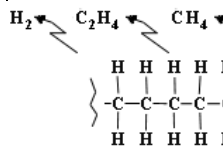
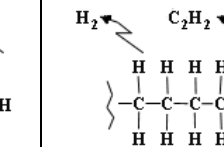
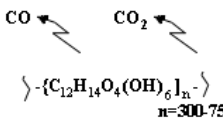
Klíčový plyn	Vzorec	Spojitost s nestandardním dějem
Vodík	H ₂	Degradace oleje, částečné výboje, jiskření, koróna, přehřátý olej
Metan	CH ₄	Degradace oleje, jiskření, koróna, přehřátý olej
Oxid uhelnatý	CO	Degradace celulózy
Oxid uhličitý	CO ₂	Degradace celulózy, degradace oleje
Kyslík	O ₂	Degradace celulózy, degradace oleje
Acetylen	C ₂ H ₂	Degradace oleje, jiskření
Etylen	C ₂ H ₄	Degradace oleje, hot-spot body (nejteplejší místa) mezi 150 a 1 000 °C, jiskření, koróna
Etan	C ₂ H ₆	Degradace oleje, koróna, přehřátý olej

Produkcí plynů též ovlivňuje případné vystavení oleje slunečnímu světlu, prováděné opravy, přítomnost alkydové pryskyřice či modifikovaných polyuretanů obsahujících mastné kyseliny.

V Tab. 1 jsou uvedeny jednotlivé plyny s jejich nejčastější spojitostí k jednotlivým poruchám.

Tab. 2 znázorňuje nejčastější dominantní procesy vyskytující se při koróně a jiskření v oleji a při tepelném rozkladu celulózy a oleje.

Tab. 2 Chemické procesy nastalé vinou koróny, tepelného rozkladu, jiskření v oleji a tepelným rozkladem celulózy [11]

	Koróna v oleji	Tepelný rozklad oleje	Jiskření v oleji	Tepelný rozklad celulózy
Chemický proces				
H ₂	88 %	16 %	39 %	9 %
CO ₂	1 %	Nepatrné množství	2 %	25 %
CO	1 %	Nepatrné množství	4 %	50 %
CH ₄	6 %	16 %	10 %	8 %
C ₂ H ₆	1 %	6 %		
C ₂ H ₄	0,1 %	41 %	6 %	4 %
C ₂ H ₂	0,2 %	Nepatrné množství	35 %	0,3 %

1.4 TYPY SLEDOVANÝCH PORUCH

Norma ČSN EN 60599 z června 2000 popisuje zejména poruchy uvedené v této kapitole [7]. Veškeré poruchy se většinou vyvíjejí z poruch menší energie do poruch o vyšší energii. Dále budou přiblíženy jednotlivé poruchy a jejich příčiny.

1.4.1 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE – PD

Výboje v kavitách naplněných plynem zapříčiněné špatnou impregnací, vysokou vlhkostí celulózy nebo přesycením oleje vedoucím k tvorbě X vosků a zvýšeným dielektrickým ztrátám.

1.4.2 VÝBOJE O NÍZKÉ ENERGII – D1

Jiskření nebo vznik oblouku mezi špatně propojenými kontakty rozdílných plovoucích potenciálů, toroidů, přerušeno pájení nebo uzavřených smyček v jádře.

Výboje mezi upínacími elementy, průchodkami a nádobou, vysokým napětím a zemí uvnitř vinutí, na stěnách nádoby.

Vodivé stopy v dřevěných konstrukcích, lepidle izolačních výztuží, distančních vložkách vinutí, průraz oleje.

1.4.3 VÝBOJE O VYSOKÉ ENERGII – D2

Přeskok, vodivé stopy nebo oblouky o vysoké místní energii.

Zkrat mezi vinutím nízkého napětí a zemí, vodiči a jádrem, v olejovém kanálku. Uzavřené smyčky mezi dvěma sousedními vodiči kolem hlavního magnetického toku, izolované šrouby jádra, kovové kroužky zajišťující základnu jádra.

1.4.4 TEPELNÁ PORUCHA S TEPLOTOU $T < 300\text{ °C}$ – T1

Přetížení transformátoru v nouzových případech.

Omezení proudění oleje ve vinutí.

1.4.5 TEPELNÁ PORUCHA S TEPLOTOU $300\text{ °C} < T < 700\text{ °C}$ – T2

Vadné kontakty mezi sešroubovanými spoji (zvláště mezi hliníkovými sběrnici), prokluzující kontakty, kontakty uvnitř voliče (utváření pyrolytického karbonu).

Cirkulační proudy mezi stáhnutým rámem a šrouby, svorkami a plechy, vadnými sváry nebo svorkami v magnetickém stínění.

Opotřebením izolace mezi sousedními paralelními vodiči vinutí.

1.4.6 TEPELNÁ PORUCHA S TEPLOTOU $T > 700\text{ °C}$ – T3

Velké cirkulační proudy v nádobě a jádře.

Menší proudy na stěnách nádoby zapříčiněné velkým nekompensovaným magnetickým polem.

Zkratování spojů v jádře z ocelových plechů.

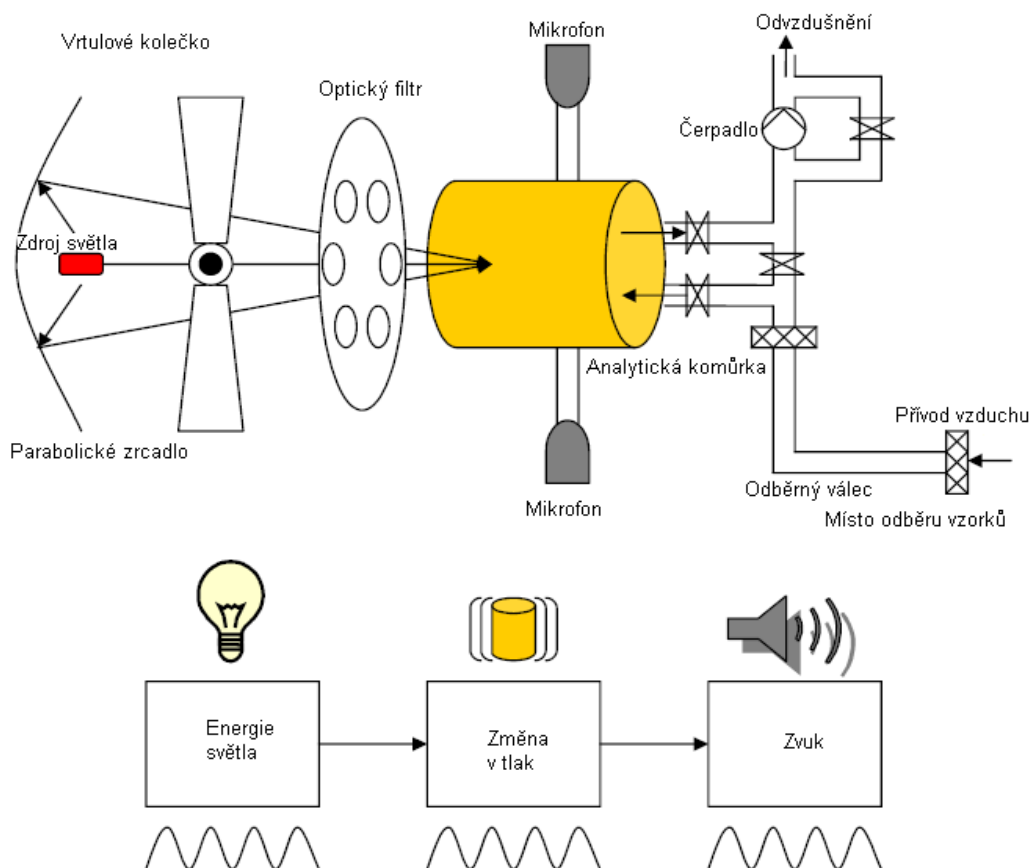
2 METODY ODHALOVÁNÍ PLYNŮ ROZPUŠTĚNÝCH V OLEJI

V této kapitole bude ve zkratce pojednáno o dvou nejběžnějších metodách pro zjišťování plynů rozpuštěných v oleji: foto-akustické spektroskopii a plynové chromatografii.

2.1 FOTO-AKUSTICKÁ SPEKTROSKOPIE

Foto-akustická spektroskopie (Photo-Acoustic Spectroscopy) spoléhá na foto-akustický efekt, který je založen na přeměně energie infračerveného světla na energii zvuku za pomoci plynu, pevné látky, či kapaliny.

Je-li plynový vzorek vystaven světlu o konkrétní frekvenci, která odpovídá rezonanční frekvenci zjišťovaného plynu, může nějaké světlo absorbovat. Tato absorpce má za následek nárůst tepelné energie molekul vzorku plynu a následující nárůst jeho teploty a tlaku. Jestliže navíc použité světlo pulsuje s určitou frekvencí, teplota a tlak vzorku plynu bude pulsovat se stejnou frekvencí. Tímto vznikne tlaková vlna, která následně generuje vlnu akustickou, kterou lze detekovat prostřednictvím citlivého mikrofonu.



Obr. 3 Zjednodušené schéma foto-akustické spektroskopie [12]

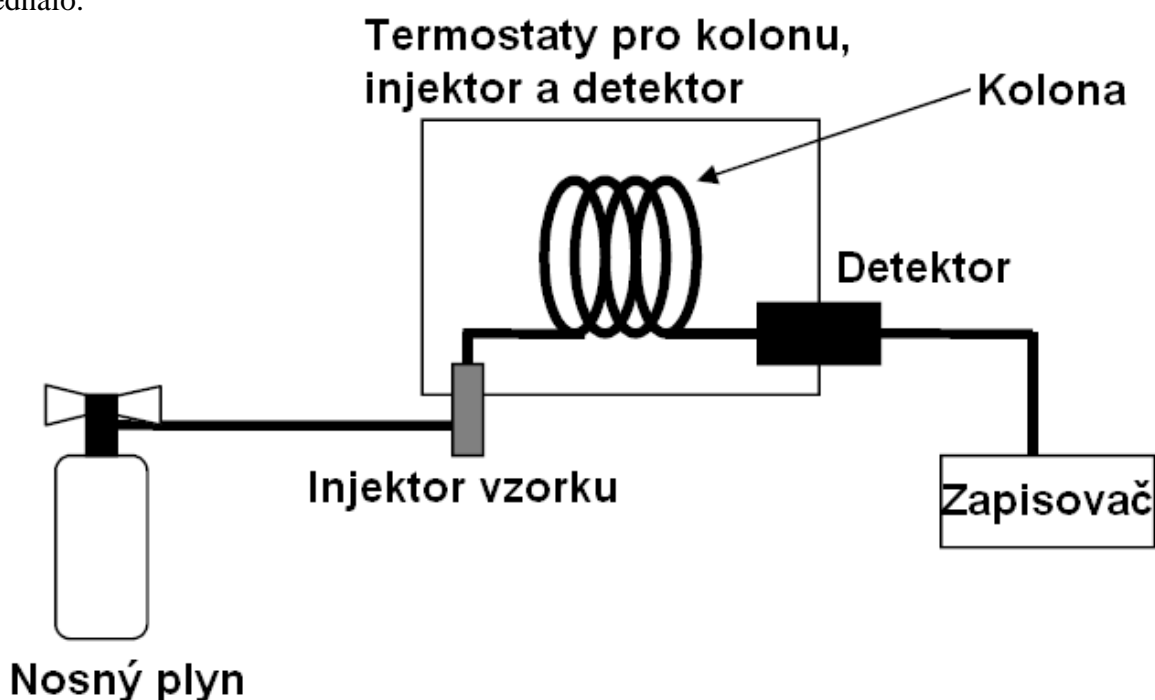
Schéma na Obr. 3 znázorňuje výše popsaný princip foto-akustické spektroskopie tak, jak je používán v praxi. Ve schématu je infračervené světlo dodáváno pomocí širokospektrálního infračerveného zdroje a je odraženo parabolickým zrcadlem. Vrtulové kolečko a optický filtr dovolují ozařování vzorku plynu v měřicím prostoru s přesnou vlnovou délkou o dané frekvenci, která je nejlépe absorbována. Jako výsledek této absorpce jsou produkovány zvukové vlny, které následně vzrůstají s teplotou a tlakem. K detekci těchto zvukových vln

slouží citlivé mikrofony. Následně se počítají přesné koncentrace konkrétního měřeného plynu, kdy se využívá toho, že amplituda zvukové vlny souvisí s množstvím absorbovaného světla [12], [13].

2.2 PLYNOVÁ CHROMATOGRRAFIE

Plynová chromatografie (GC – z anglického gas chromatography) je tradiční metoda analýzy plynových vzorků. Její počátky jsou datovány na 40. a 50. léta v Anglii, široce používána začala být od 70. let minulého století.

Kolona chromatografu je ohřata na určitou pro prováděnou analýzu vhodnou teplotu, na které je dále udržována. Do kolony je vpravován konstantní rychlostí nosný plyn se vzorkem. Jednotlivé složky vzorku plynu jsou různě zpomalovány stacionární fází kolony a následně na výstupu detekovány. Pomocí velikosti tohoto zpomalení lze určit, o jakou složku vzorku se jednalo.

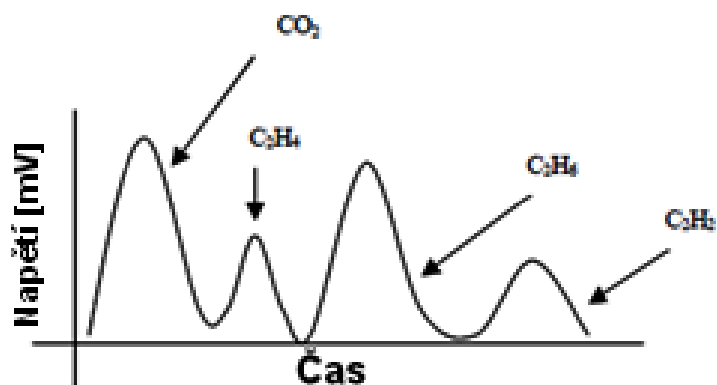


Obr. 4 Zjednodušené schéma plynového chromatografu [6]

Na Obr. 4 je znázorněno zjednodušené schéma plynového chromatografu. Regulátor průtoku redukuje množství nosného plynu – mobilní fáze, 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 zaznamenávám v nějakém zapisovači (např. počítači) a následně vytisknut ve formě chromatogramu.

V nezjednodušeném provedení plynového chromatografu, dle normy ČSN EN 60567 ed. 2, se přepíná detektor nejprve na plamenový ionizační a poté na detektor tepelně vodivostní.

V případě přepnutí detektoru na plamenově ionizační značí píky tyto plyny (přesně v tomto pořadí) – CO, CH₄, CO₂, C₂H₄, C₂H₆ a C₂H₂. Po přepnutí na detektor tepelně vodivostní vycházejí složky vzorku v tomto pořadí – H₂, O₂ a N₂. Příklad možného výsledného chromatografu lze vidět na Obr. 5. Plocha každého ze získaných píků je přímo úměrná množství dané složky plynů v testovaném vzorku. Přesné množství jednotlivých složek rozpuštěného plynu se vypočítá pomocí těchto ploch [6], [12].



Obr. 5 Příklad chromatogramu [6]

3 METODY PRO INTERPRETACI PLYNŮ ROZPUŠTĚNÝCH V OLEJI

K interpretaci plynů zjištěných v izolačním oleji slouží různé diagnostické metody. V následujícím textu budou blíže přiblíženy ty nejběžnější z nich.

3.1 ČSN EN 60599

Norma ČSN EN 60599 [7] popisuje kromě mechanismu tvoření plynů a typů jednotlivých poruch, jak je popsáno v kap. 1.3.1 a 1.4, i možnou interpretaci určitých základních plynových poměrů. Pro interpretaci stavu transformátoru je třeba znalost pěti plynů (metan, acetylen, etylen, etan a vodík). Jedná se konkrétně o tyto poměry:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \quad \frac{CH_4}{H_2}, \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

Pomocí těchto plynových poměrů lze následně interpretovat plyny rozpuštěné v oleji jejich přiřazením do jedné ze šesti kategorií, jak je znázorněno v Tab. 3. Každá z kategorií reprezentuje jednu z poruch, jak jsou popsány v kap. 1.4.

Tab. 3 Interpretací tabulka dle ČSN EN 60599 [7]

Diagnóza	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
PD – Částečné výboje ¹⁾	NS ²⁾	< 0,1	< 0,2
D1 – Výboje nízké energie	> 1	0,1 – 0,5	> 1
D2 – Výboje vysoké energie	0,6 – 2,5	0,1 – 1	> 2
T1 – Tepelná porucha, T < 300 °C	NS ²⁾	> 1, ale NS ²⁾	< 1
T2 – Tepelná porucha, 300 °C < T < 700 °C	< 0,1	> 1	1 – 4
T3 – Tepelná porucha, T > 700 °C	< 0,2 ³⁾	> 1	> 4

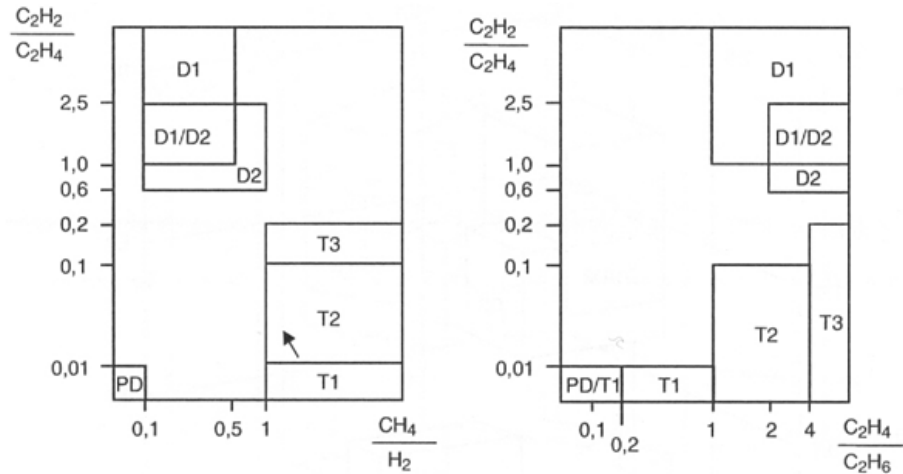
V některých zemích mohou být mírně rozdílné limity na rozdíl od limitů vyskytujících se v Tab. 3, tyto rozdíly je třeba brát v úvahu.

¹⁾ $CH_4/H_2 < 0,2$ pro částečné výboje v zařízení transformátorů. $CH_4/H_2 < 0,07$ pro částečné výboje v průchodkách.

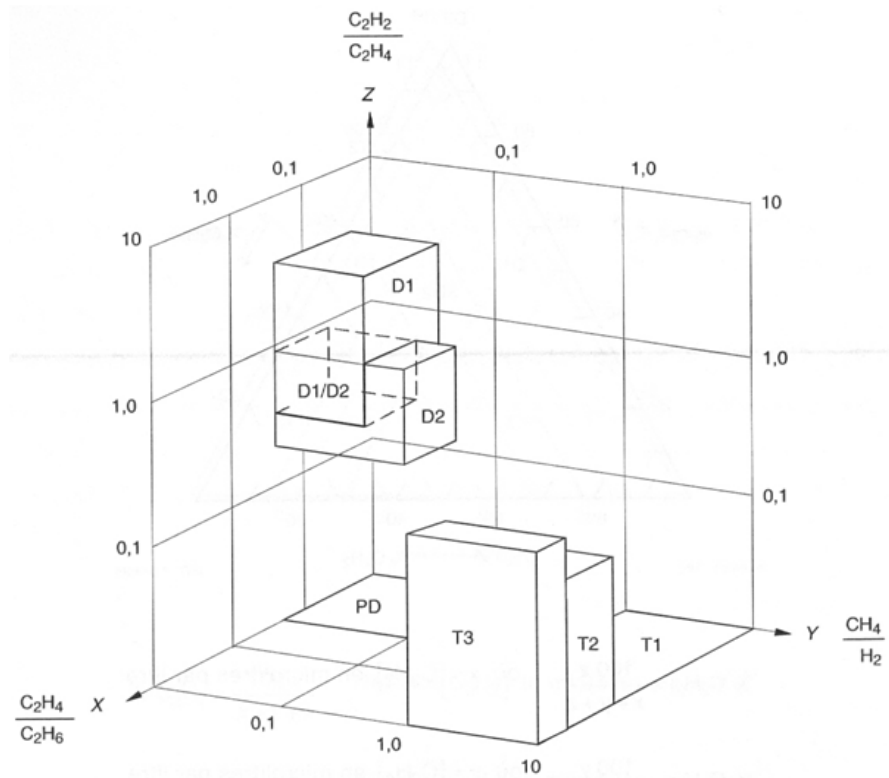
²⁾ NS = nevýznamné

³⁾ Rostoucí hodnota množství C_2H_2 může indikovat hot spot teplotu vyšší než 1 000 °C.

V případě, kdy nelze pomocí Tab. 3 stanovit, do které oblasti spadá daná naměřená koncentrace plynů (tj. v případě, kdy naměřená plynová koncentrace spadá do nedefinované oblasti), lze pomocí Obr. 6, nebo Obr. 7, opatrně stanovit, ke které z oblastí má daný bod nejblíže.



Obr. 6 Grafické znázornění plynových poměrů podle ČSN EN 60599 [7]



Obr. 7 Grafické znázornění plynových poměrů podle ČSN EN 60599 [7]

Výše uvedené limity plynových poměrů mohou být počítány pouze v případě, že je alespoň jedna z koncentrací plynu a rychlosti nárůstu plynu nad typickými hodnotami.

V Tab. 4 jsou uvedeny rozsahy 90 % typických koncentračních hodnot pozorovaných ve výkonových olejových transformátorech dle ČSN EN 60599 [7]. Tyto limity jsou udávány v $\mu\text{l/l}$. Hodnoty v Tab. 4 se týkají jak uzavřených, tak i neuzavřených transformátorů. Je doporučeno, je-li to možné, stanovit vlastní limity. Tyto limity jsou závislé na stáří, typu a výrobci zařízení, na podmínkách zatěžování a klimatických podmínkách. Limity v Tab. 4 jsou pouze doporučené pro případy, kdy nelze stanovit vlastní limity. OLTC v tabulkách znamená on-load tap-changing – přepínač odboček při zátěži.

Tab. 4 Rozsahy 90 % typických koncentračních hodnot pozorovaných ve výkonových olejových transformátorech [7]

	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	C ₂ H ₂
Limity (μl/l)	50 – 150	30 – 130	60 – 280	20 – 90	400 – 600	3 800 – 14 000	
	Není možný styk mezi olejem a/nebo plynem mezi OLTC částí a hlavní nádrží						2 – 20
	Je možný styk mezi olejem a/nebo plynem mezi OLTC částí a hlavní nádrží						60 – 280

V Tab. 5 jsou uvedeny rozsahy 90 % typických rychlostí nárůstu plynů pozorovaných ve výkonových olejových transformátorech dle ČSN EN 60599, jsou udávány v μl/l/rok. Tyto hodnoty jsou platné pro transformátory s obsahem oleje > 5 000 l, v menších transformátorech jsou tyto hodnoty obvykle nižší. Na začátku a konci života dochází k vyšším nárůstům.

Tab. 5 Rozsahy 90 % typických rychlostí nárůstu plynů pozorovaných ve výkonových olejových transformátorech [7]

	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	C ₂ H ₂
Limity (μl/l/rok)	35 – 132	10 – 120	32 – 146	5 – 90	260 – 1 060	1 700 – 10 000	
	Není možný styk mezi olejem a/nebo plynem mezi OLTC částí a hlavní nádrží						0 – 4
	Je možný styk mezi olejem a/nebo plynem mezi OLTC částí a hlavní nádrží						21 – 37

V normě ČSN EN 60599 jsou dále popsány i významy dalších poměrů.

3.1.1 POMĚR CO₂/CO

Poměr CO₂/CO < 3 může naznačovat, že v poruše může být zapletena také celulózová izolace. Pro ověření či vyvrácení tohoto podezření je vhodné, pokud to je možné, vykonat též analýzu furanových složek nebo stanovit průměrný polymerizační stupeň celulózových vzorků.

3.1.2 POMĚR O₂/N₂

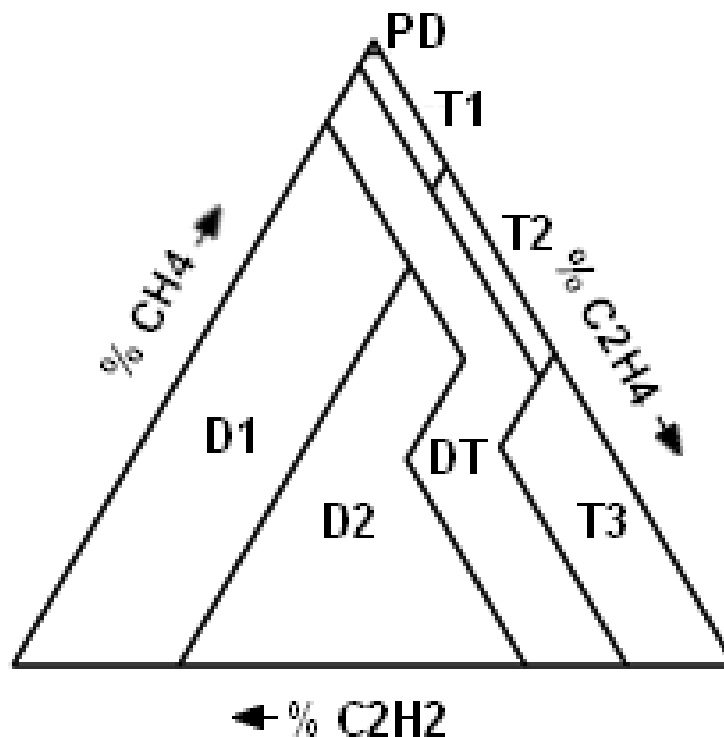
O₂ a N₂ se mohou v oleji rozpouštět jako výsledek kontaminace s atmosférickým vzduchem. Přírozený poměr O₂/N₂ s přihlédnutím k relativní rozpustnosti těchto plynů a složení vzduchu je blízko 0,5. Vlivem oxidace oleje nebo stárnutím celulózy, dochází-li k rychlejšímu spotřebování O₂ než jeho nahrazování difuzí, může tento poměr klesat. Poměr nižší než 0,3 může značit nadměrnou spotřebu kyslíku v zařízení.

3.1.3 POMĚR C_2H_2/H_2

Poměr C_2H_2/H_2 vyšší než 3 může značit, že dochází ke kontaminaci oleje v OLTC a hlavní nádrži transformátoru. Tuto domněnku lze následně potvrdit porovnáním DGA výsledků z hlavní nádrže transformátoru, OLTC a konzervátoru. Hodnoty tohoto poměru závisí jak na počtu operací OLTC, tak na způsobu kontaminace.

3.2 DUVALOVA TROJÚHELNÍKOVÁ METODA

Norma ČSN 60599 [7] popisuje též Duvalovu trojúhelníkovou grafickou metodu. Tato metoda používá ke svému vyhodnocení pouze koncentrace tří plynů – metanu (CH_4), etanu (C_2H_4) a acetylenu (C_2H_2). Duvalova trojúhelníková grafická metoda byla vypracována na základě databáze IEC TC 10 [14] popsané dále. Duvalova trojúhelníková grafická metoda třídí poruchy do stejných kategorií, jak jsou zavedeny v kap. 1.4. K tomuto třídění využívá jejich grafické znázornění v Duvalově trojúhelníku. Podle toho, do které oblasti Duvalova trojúhelníku daná koncentrace plynu padne, lze usoudit, o jakou poruchu se s největší pravděpodobností jedná. Duvalova trojúhelníková metoda neslouží k detekci poruch, ale lze ji použít až v momentě, kdy již existuje podezření na poruchu transformátoru, a to k rozhodnutí, o kterou z nich pravděpodobně jde. V některých grafických závislostech budou dále indexy psány běžnou velikostí písma z důvodu omezených schopností psát indexy v některých programech.



Obr. 8 Duvalův trojúhelník

Koncentrace jednotlivých plynů (ppm) jsou vyjádřeny jako procento z celkového množství těchto plynů a následně vyneseny do Duvalova trojúhelníku ve směru šipek (Obr. 8).

Konkrétní bod se počítá:

$$\%C_2H_2 = \frac{100C_2H_2}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4}, \quad (3)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{100y}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4}, \quad (4)$$

$$\%CH_4 = \frac{100z}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4}. \quad (5)$$

Poruchové zóny Duvalova trojúhelníku jsou jednoznačně určeny v Tab. 6.

Tab. 6 Limity poruchových zón Duvalova trojúhelníku [7]

Limity zón				
PD	98 % CH ₄			
D1	23 % C ₂ H ₄	13 % C ₂ H ₂		
D2	23 % C ₂ H ₄	13 % C ₂ H ₂	38 % C ₂ H ₄	29 % C ₂ H ₂
T1	4 % C ₂ H ₂	10 % C ₂ H ₄		
T2	4 % C ₂ H ₂	10 % C ₂ H ₄	50 % C ₂ H ₄	
T3	15 % C ₂ H ₂	50 % C ₂ H ₄		

Duvalova trojúhelníková metoda je více popsána v [7], [8], [15].

3.3 DOERNENBURGOVA METODA

Doernenburgova metoda (někdy též Dörnenburgova) dělí plyny rozpuštěné v oleji do tří skupin, kterým následně přiřazuje pravděpodobnou poruchu. To je prováděno na základě znalosti pěti plynů (vodík (H₂), metan (CH₄), acetylen (C₂H₂), etylen (C₂H₄) a etan (C₂H₆)) a oxidu uhelnatého (CO), ze kterých jsou sestaveny čtyři plynové poměry:

$$\frac{CH_4}{H_2}, \quad \frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \quad \frac{C_2H_2}{CH_4}, \quad \frac{C_2H_6}{C_2H_2}.$$

Nejprve se porovná vodík, metan, acetylen a etylen s dvojnásobkem hodnot L1 uvedených v Tab. 7, který musí alespoň jeden z těchto plynů překonat. Jeden ze zbylých dvou plynů musí překonat hodnotu L1 přímo rovnou hodnotě v Tab. 7.

Při splnění výše uvedených podmínek se přistupuje k vyjádření platnosti poměrové procedury. Jestliže alespoň jeden plyn z každého počítaného poměru je vyšší než hodnota L1 v Tab. 7, pak je teprve poměrová procedura platná a smí se bez obav přistoupit k vyhodnocení pomocí Tab. 8. Pokud ne, daný poměr není významný a měl by být odebraný nový vzorek nebo provedeno vyšetření za pomoci nějaké alternativní metody.

Tab. 7 Limitní koncentrace plynů L1 pro Doernenburgovu metodu [16]

Klíčový plyn	Koncentrace L1 [μl/l (ppm)]
Vodík H ₂	100
Metan CH ₄	120
Oxid uhelnatý CO	350
Acetylen C ₂ H ₂	1
Etylen C ₂ H ₄	50
Etan C ₂ H ₆	65

Tab. 8 Interpretační tabulka pro Doernenburgovu metodu [16]

Diagnóza	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$
Tepelný rozklad	> 1,0	< 0,75	< 0,3	> 0,4
Částečné výboje	< 0,1	NS	< 0,3	> 0,4
Oblouk	0,1 – 1,0	> 0,75	> 0,3	< 0,4

Pokud dané poměry vzorku padnou do oblasti určité poruchy, pokládá se tato porucha za odůvodněnou. Nepodaří-li se z daných poměrů vzorku stanovit touto metodou přesnou diagnózu, aplikuje se nějaká další vhodná metoda [16], [17], [18].

3.4 ROGERSOVA METODA

Rogersova metoda využívá ke svému vyhodnocení stejně jako metoda popsaná v ČSN EN 60599 a Doernenburgova metoda plynové poměry. Rogersova metoda vyžaduje ke svému vykonání znalost pěti plynů: vodík (H₂), metan (CH₄), acetylen (C₂H₂), etylen (C₂H₄) a etan (C₂H₆). V případě Rogersovy metody to jsou konkrétně tyto poměry:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \quad \frac{CH_4}{H_2}, \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

Tyto plynové poměry slouží k roztřídění dané koncentrace plynů do 4 kategorií, kdy je každé z těchto kategorií opět přiřazen pravděpodobný stav transformátoru. Může se jednat o normální stav, částečné výboje v zařízení, oblouk a tepelnou poruchu odehrávající se uvnitř sledovaného transformátoru. Tab. 9 specifikuje toto přiřazení.

Hodnoty poměrů uvedené v Tab. 9 byly určeny z jednotlivých případů, které vyšetřoval právě Rogers. Platnost této metody je založena na korelaci výsledků značného množství vyšetřovaných poruch s analyzovanými plyny pro každý z těchto případů.

Tab. 9 Interpretační tabulka pro Rogersovu metodu [16]

Diagnóza	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Normální stav	< 0,1	0,1 – 1,0	< 1,0
Částečné výboje	< 0,1	< 0,1	< 1,0
Oblouk	0,1 – 3,0	0,1 – 1,0	> 3,0
Nízká teplota	< 0,1	0,1 – 1,0	1,0 – 3,0
Teplota < 700 °C	< 0,1	> 1,0	1,0 – 3,0
Teplota > 700 °C	< 0,1	> 1,0	> 3,0

Nastane-li případ, kdy daný plynový poměr padne do nedefinované oblasti, je doporučeno provést analýzu některou z dalších vhodných metod. Více informací lze nalézt v [16], [17], [18].

3.5 METODA C. E. G. B.

Tab. 10 C. E. G. B. poměry poruchových plynů [11]

Poměr	Rozsah	Kód
$\frac{CH_4}{H_2}$	$\leq 0,1$	5
	0,1 – 1,0	0
	1,0 – 3,0	1
	$\geq 3,0$	2
$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	< 1,0	0
	$\geq 1,0$	1
$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	< 1,0	0
	1,0 – 3,0	1
	$\geq 3,0$	2
$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	< 0,5	0
	0,5 – 3,0	1
	$\geq 3,0$	2

Metoda C. E. G. B. byla vyvinuta ve Velké Británii společností Central Electric Generating Board (C. E. G. B.) a vychází z původní Rogersovy metody. Tato metoda je založena na znalosti pěti plynů, a to vodíku (H₂), metanu (CH₄), acetylenu (C₂H₂), etylenu (C₂H₄) a etanu (C₂H₆). Z těchto plynů jsou sestaveny čtyři plynové poměry:

$$\frac{CH_4}{H_2}, \quad \frac{C_2H_6}{CH_4}, \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6}, \quad \frac{C_2H_2}{C_2H_4}.$$

Těmto poměrům následně Tab. 10 přiřadí čtyřmístný číselný kód, s čísly v pořadí takovém, jak byly získány z Tab. 10 od horního poměru směrem k poměru spodnímu.

Dle vygenerovaného číselného kódu lze následně v Tab. 11 vyhledat pravděpodobnou poruchu. Tyto poruchy jsou rozdílné oproti poruchám, které danému složení plynů přiřazují metody ČSN EN 60599, Duvalova, Doernenburgova, či Rogersova metoda. Metoda C. E. G. B. kromě těchto poměrů používá i poměr CO₂/CO k vyšetření případné vyšší teploty v izolaci.

Tab. 11 Interpretační tabulka pro metodu C. E. G. B. [11]

Diagnóza	Kód			
Normální stav	0	0	0	0
Částečné výboje	5	0	0	0
Přehřátí < 150 °C	1,2	0	0	0
Přehřátí 150 °C – 200 °C	1,2	1	0	0
Přehřátí 200 °C – 300 °C	0	1	0	0
Obecné přehřátí vodiče	0	0	1	0
Bludné proudy ve vinutí	1	0	1	0
Bludné proudy v jádře a nádobě, přehřáté spoje	1	0	2	0
Přeskok bez síly k dokončení	0	0	0	1
Oblouk se silou k dokončení	0	0	1,2	1,2
Nepřerušené jiskření s proměnným potenciálem	0	0	2	2
Částečné výboje se stopou po výboji	5	0	0	1,2
Zvýšená teplota v izolaci	CO ₂ /CO > 11			

Tato metoda je podrobněji popsána v [11], [19].

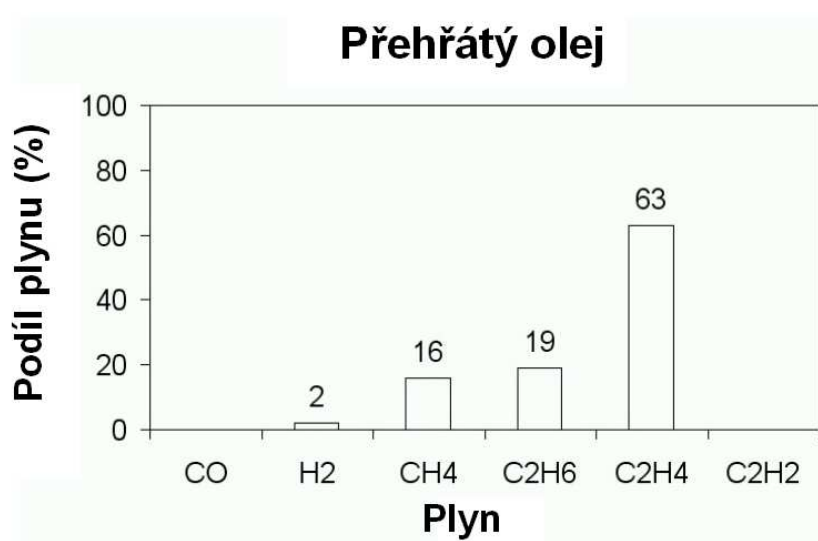
3.6 METODA KLÍČOVÝCH PLYNŮ

Tato metoda se snaží odhalit poruchu pomocí odhalení zvýšeného výskytu určitých pro danou poruchu klíčových plynů. Poruchy popsané v Tab. 2 jen potvrzují závislosti vyplývající z této metody. Více informací k metodě klíčových plynů lze získat v dalším textu [16], [17], [18].

3.6.1 METODA KLÍČOVÝCH PLYNŮ – PŘEHŘÁTÝ OLEJ

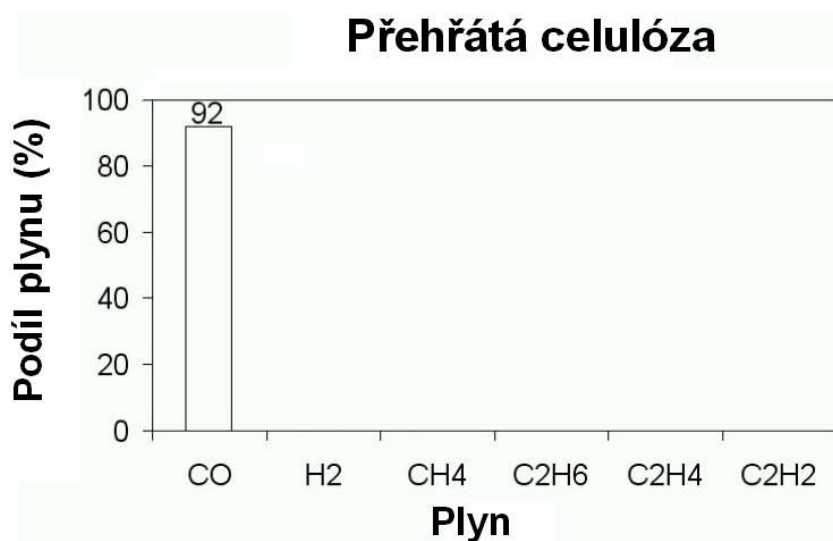
Jedná se o tepelnou poruchu. Přehřátý olej vede ke zvýšenému produkovaní etylenu a metanu spolu s poněkud menším množstvím vodíku a etanu. Jedná-li se o poruchu závažnější, může být spolu s nimi vytvářen i acetylen. Příklad složení generovaných plynů u přehřátého oleje je znázorněn na Obr. 9.

Klíčový plyn: etylen C_2H_4



Obr. 9 Metoda klíčových plynů - přehřátý olej [16]

3.6.2 METODA KLÍČOVÝCH PLYNŮ – PŘEHŘÁTÁ CELULÓZA



Obr. 10 Metoda klíčových plynů - přehřátá celulóza [16]

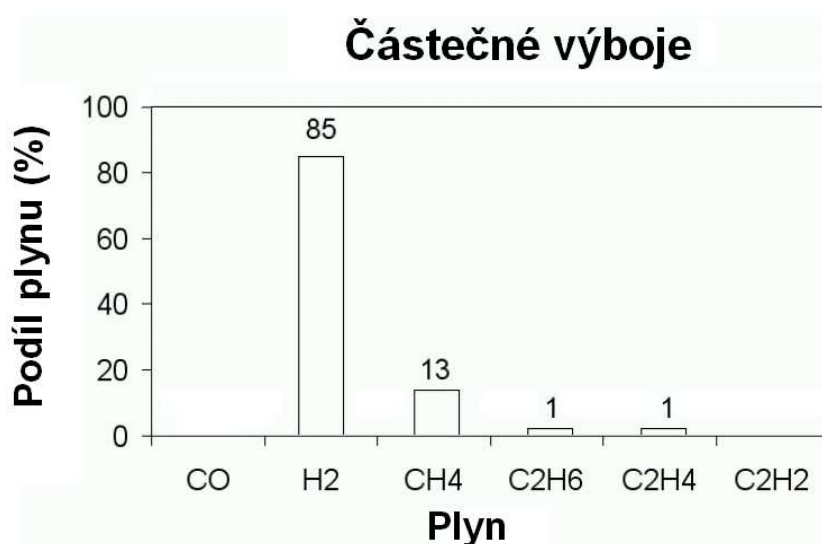
I v tomto případě se jedná o tepelnou poruchu. Přehřátá celulóza produkuje zvýšené množství oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého. V případě, že se na poruše kromě celulózové izolace podílí i olej, mohou být vyvíjeny i ostatní plyny, jako etylen a metan. Jeden z možných případů přehřáté celulózy je uveden na Obr. 10.

Klíčový plyn: oxid uhelnatý CO

3.6.3 METODA KLÍČOVÝCH PLYNŮ – ČÁSTEČNÉ VÝBOJE

Částečné výboje se řadí k poruchám elektrickým. Při částečných výbojích je produkován zejména vodík spolu s metanem a malým množstvím etanu a etylenu. Pokud se ve vzorku vyskytuje též porovnatelné množství oxidu uhelnatého a uhličitého, může jít o následek výbojů v celulózové izolaci. Příklad složení plynového vzorku pro poruchu částečnými výboji je uveden na Obr. 11.

Klíčový plyn: vodík H₂

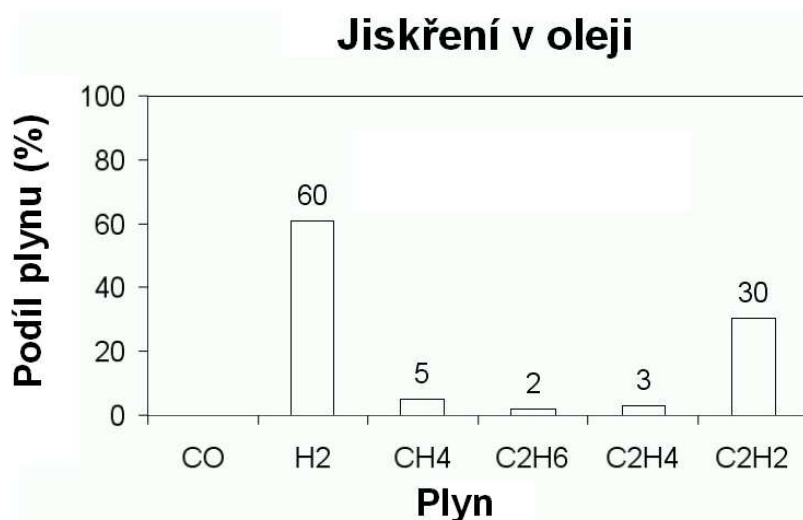


Obr. 11 Metoda klíčových plynů - částečné výboje [16]

3.6.4 METODA KLÍČOVÝCH PLYNŮ – JISKŘENÍ V OLEJI

Jiskření v oleji náleží do skupiny poruch s elektrickou podstatou. Hlavními produkovánými plyny jsou vodík a acetylen spolu s menším množstvím metanu a etylenu. Vyskytuje-li se ve vzorku i určité množství oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého, může jít o následek podílu celulózové izolace na dané poruše. Na Obr. 12 je znázorněn příklad skladby oleje pro jiskření v oleji.

Klíčový plyn: acetylen C₂H₂



Obr. 12 Metoda klíčových plynů - jiskření v oleji [16]

3.7 METODA C. S. U. S.

Tato metoda má svůj původ na Kalifornské státní universitě v Sacramentu (Californian State University, Sacramento), kdy vznikla při spolupráci s Pacific Gas & Electric Company. Podstatou této metody je naznačení normálních i abnormálních úrovní jednotlivých plynů, jak je uvedeno v Tab. 12 a lze nalézt v [11].

Tab. 12 Interpretační tabulka pro směrnici C. S. U. S. [11]

Plyn	Normální stav (ppm)	Abnormální stav (ppm)	Diagnóza
H ₂	< 150	> 1 000	Koróna, Oblouk
CH ₄	< 25	> 80	Jiskření
C ₂ H ₆	< 10	> 35	Místní přehřátí
C ₂ H ₄	< 20	> 150	Kritické přehřátí
C ₂ H ₂	< 15	> 70	Oblouk
CO	< 500	> 1 000	Kritické přehřátí
CO ₂	< 10 000	> 15 000	Kritické přehřátí
N ₂	1 – 10 %	Nezjištěné	Nezjištěné
O ₂	0,2 – 3,5 %	Nezjištěné	Nezjištěné
Celkem hořlavých	< 0,03 %	> 1 000	Nezjištěné

4 DATABÁZE IEC TC 10

Databáze IEC TC 10 [14] uvádí množství plynů odhalených uvnitř zařízení plněných transformátorovým olejem spolu se skutečnou poruchou zjištěnou pomocí vizuální inspekce těchto zařízení. Sestává se z transformátorů prošetřených 19-ti autory. Poruchy jsou zde rozděleny do 5 kategorií – částečné výboje (PD), elektrické výboje nízké energie (D1), elektrické výboje vysoké energie (D2), tepelná porucha s teplotou $T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T1 a T2) a tepelná porucha s teplotou $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T3). V následujícím textu bude pro každou poruchu znázorněn jeden reprezentant. Jelikož většina diagnostických metod potřebuje ke svému vykonání jen uhlovodíky a vodík, bude tento reprezentant znázorněn i se zanedbanými oxidy uhlíku. Histogramy jednotlivých poruch pro jednotlivé plyny jsou uvedeny v příloze 2.

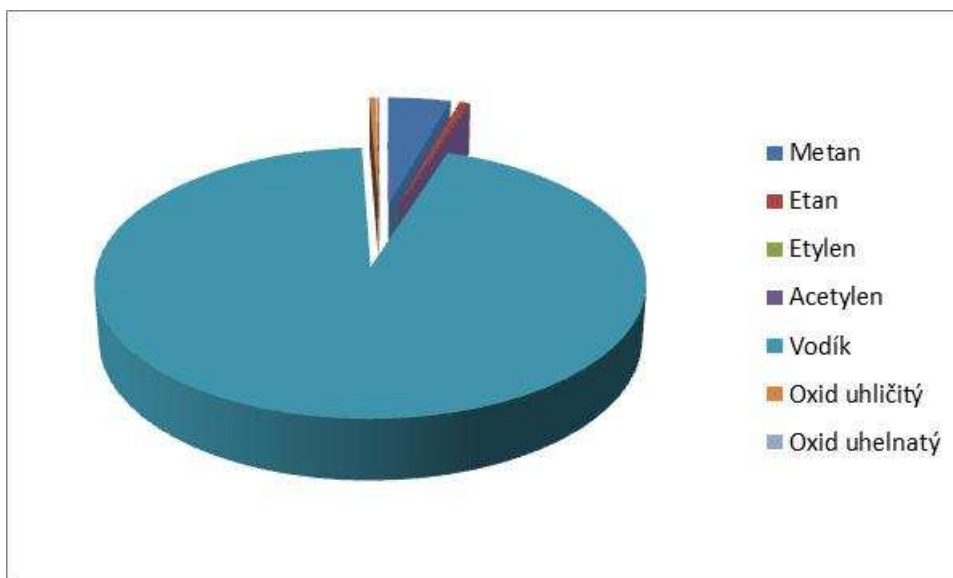
4.1 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE (PD)

U částečných výbojů byly zjištěny především, kromě částečných výbojů, i poruchy spojené s tvorbou X vosků. Pozorování částečných výbojů je v databázi IEC TC 10 celkem 9. Počet pozorování, kdy byly zjišťovány jednotlivé plyny, je v Tab. 13.

Tab. 13 Počet pozorování, kdy byly zjišťovány konkrétní plyny

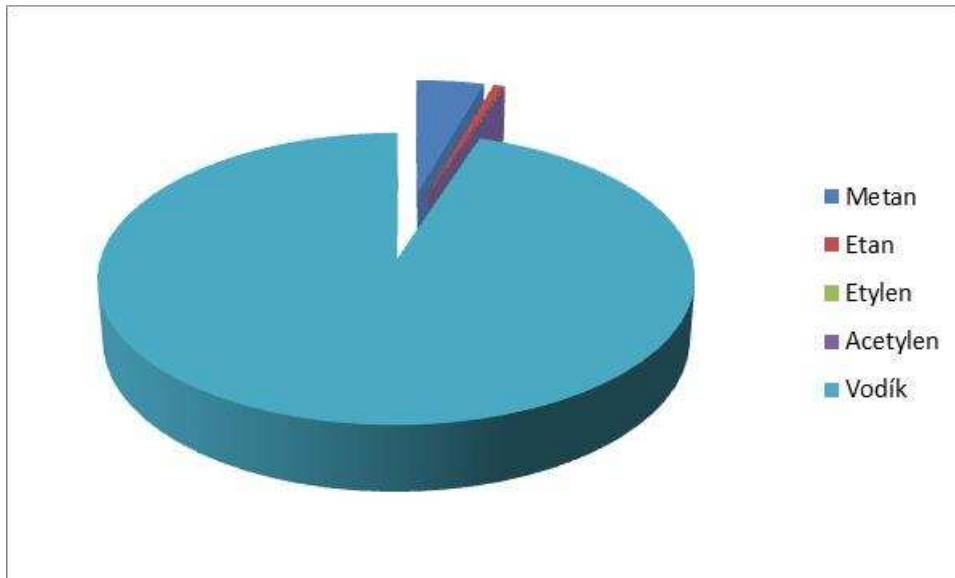
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Počet pozorování	9	9	4	6	8	9	7

Příkladem poruchy částečných výbojů v databázi IEC TC 10 může být porucha, kdy při podrobnější revizi byla uvnitř zařízení zjištěna koróna spojená s tvorbou X vosků. Nejvíce bylo obsaženo vodíku (cca 94 % ze všech obsažených plynů), mnohem méně bylo metanu (4 %), ostatních plynů již bylo zanedbatelné množství (méně než 1 %). Složení lze vidět na Obr. 13.



Obr. 13 Vybraná porucha pro poruchu částečné výboje

Uvažují-li se jen uhlovodíky a vodík, jejich složení, jelikož oxidů uhlíku je minimální množství, se změní jen minimálně. To lze vidět na Obr. 14. Nejvíce je opět vodíku (95 %), mnohem méně bylo metanu (4 %), ostatních plynů již bylo zanedbatelné množství (méně než 1 %).



Obr. 14 Složení uhlovodíků pro vybranou poruchu částečné výboje

4.2 ELEKTRICKÉ VÝBOJE NÍZKÉ ENERGIE (D1)

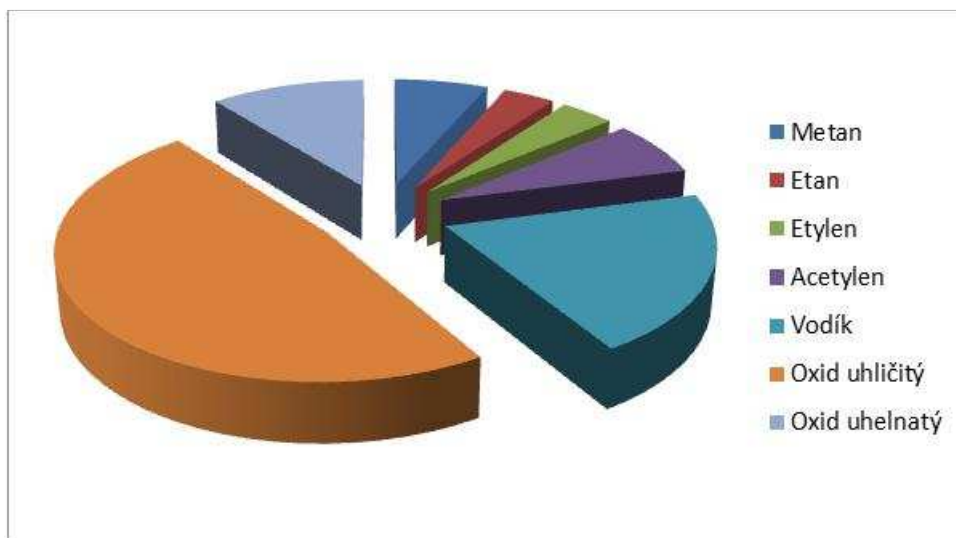
Porucha elektrické výboje nízké energie obsahuje především poruchy, kdy se vyskytovalo jiskření, došlo ke špatnému elektrickému kontaktu, kdy byly objeveny stopy po výbojích či byl zaznamenán problém s OLTC. V databázi IEC TC 10 je uvedeno celkem 26 pozorování poruchy D1. Počet poruch, kdy byly zjišťovány jednotlivé plyny, je uveden v Tab. 14.

Tab. 14 Počet pozorování, kdy byly zjišťovány konkrétní plyny

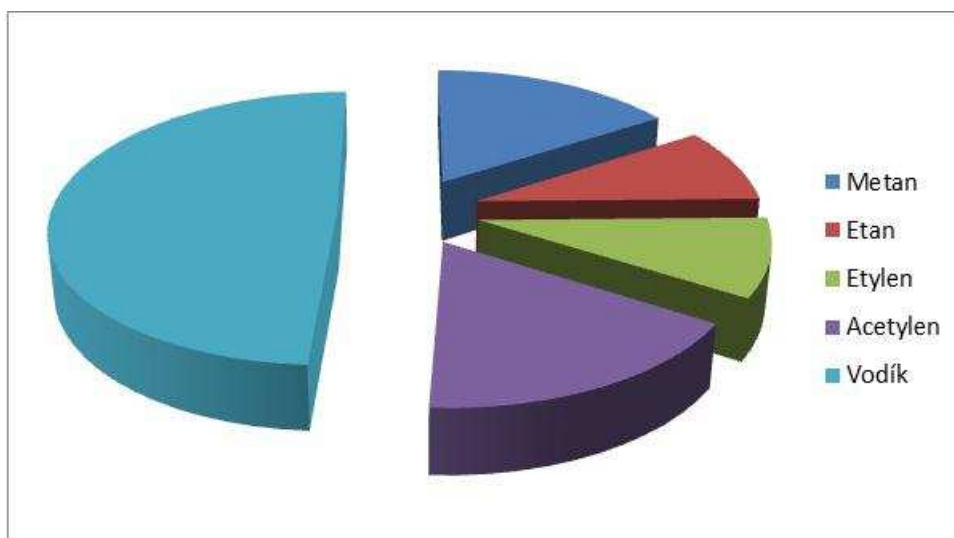
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Počet pozorování	26	25	26	26	24	25	26

Na Obr. 15 lze vidět zástupce poruchy elektrické výboje nízké energie. Vizualní inspekci byla u této poruchy konkrétně zjištěna porucha jiskření se stopou po výboji v izolaci. U této poruchy bylo zjištěno největší množství oxidu uhličitého (48 %), následovaného vodíkem (20 %) a oxidem uhelnatým (10 %). Metanu a acetylenu bylo podobné množství (7 %). Zbylých plynů je již méně (pod 4 %).

Jak lze na Obr. 15 vidět, nejvíce je oxidů uhlíku. Zanedbají-li se tyto oxidy uhlíku, dostaneme složení plynů rozpuštěných v odebraném izolačním oleji, jak znázorňuje Obr. 16. V tomto případě bude největší množství vodíku (49 %), acetylenu (17 %) a metanu (16 %). Etanu a etylenu bylo podobné množství (9 %).



Obr. 15 Vybraná porucha pro poruchu elektrické výboje nízké energie



Obr. 16 Složení uhlovodíků pro vybranou poruchu elektrické výboje nízké energie

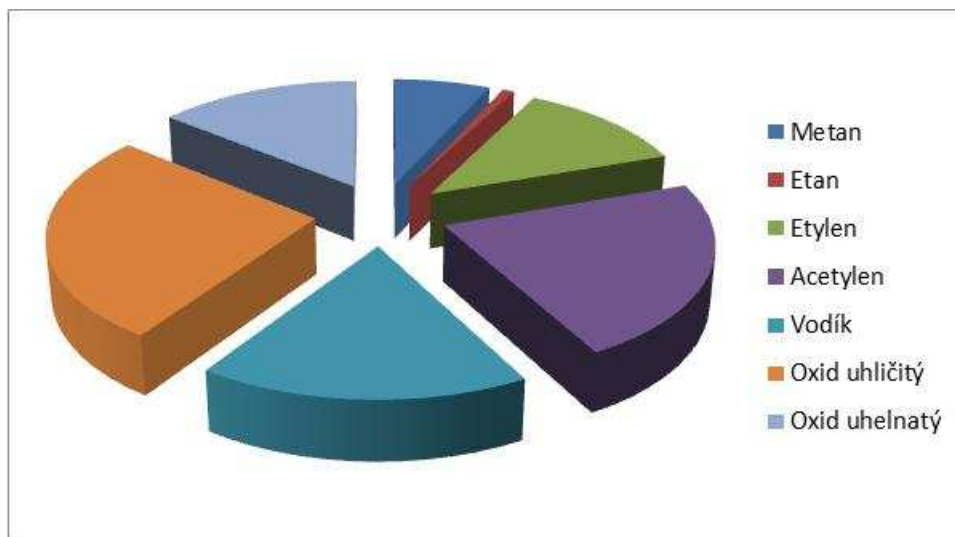
4.3 ELEKTRICKÉ VÝBOJE VYSOKÉ ENERGIE (D2)

Hoření elektrického oblouku, zkrat a výboj vysoké energie byly nejčastější poruchy, které byly následně označeny za elektrické výboje vysoké energie. Těchto poruch bylo v databázi IEC TC 10 konkrétně 48. Množství poruch, při kterých byla zjišťována množství jednotlivých plynů, je uvedeno v Tab. 15.

Tab. 15 Počet pozorování, kdy byly zjišťovány konkrétní plyny

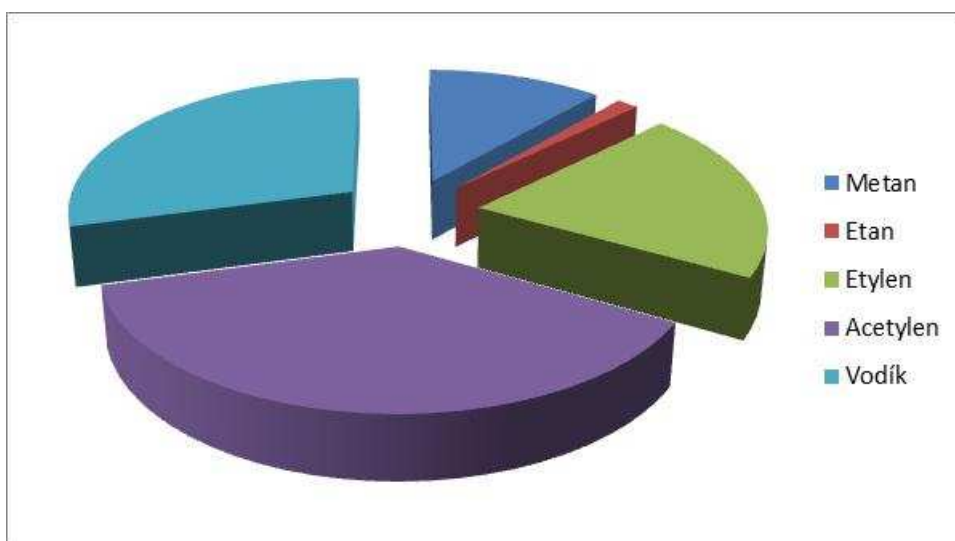
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Počet pozorování	48	48	48	48	45	48	48

Obr. 17 reprezentuje jednu z poruch databáze IEC TC 10, a to poruchu elektrické výboje vysoké energie. Konkrétně byl vizuální inspekci zjištěn zkrat ve vinutí. Izolační olej odebraný při této poruše obsahoval nejvíce oxidu uhličitého (26 %), acetylen (22 %), vodíku (17 %), oxidu uhelnatého (14 %) a etylenu (12 %). Metanu a etanu bylo méně (pod 7 %).



Obr. 17 Vybraná porucha pro poruchu elektrické výboje vysoké energie

I zde bylo podstatné množství oxidů uhlíku. Zanedbají-li se tyto oxidy uhlíku, vznikne složení plynů podle Obr. 18. Vzniklá sloučenina bude obsahovat acetylen (38 %), vodík (30 %), etylen (20 %) a metan (11 %).



Obr. 18 Složení uhlovodíků pro vybranou poruchu elektrické výboje vysoké energie

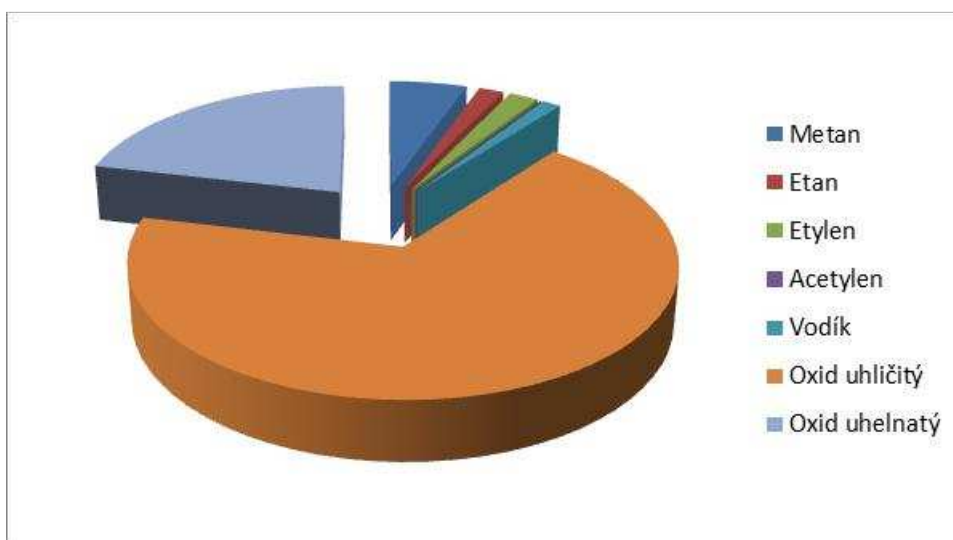
4.4 TEPELNÁ PORUCHA S TEPLOTOU $T < 700\text{ °C}$ (T12)

Za transformátor s tepelnou poruchou s teplotou $T < 700\text{ °C}$ byly považovány zařízení, kde se vyskytovaly poruchy jako hot spot body v celulóзовých částech zařízení, přehřátí či opálení vodičů nebo bludné proudy v aktivních částech. Těchto poruch se v databázi IEC TC 10 vyskytuje 16. Množství pozorování, kdy byly vyšetřovány jednotlivé plyny, je v Tab. 16.

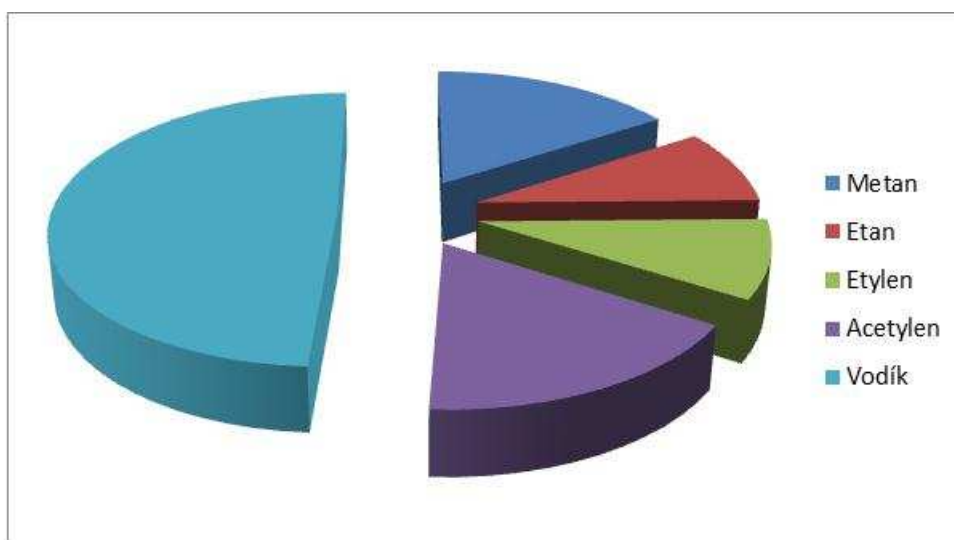
Tab. 16 Počet pozorování, kdy byly zjišťovány konkrétní plyny

	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Počet pozorování	15	16	11	16	16	16	16

Pro poruchu, kdy byla vizuální inspekci zjištěna porucha hot spot bodu v celulózové části zařízení náležící poruše T12, je složení plynů odhalených v izolačním oleji znázorněno na Obr. 19. Nejvíce se vyskytovalo oxidu uhličitého (68 %), oxidu uhelnatého (21 %) a metanu (5 %). Ostatních plynů bylo méně (pod 3 %).



Obr. 19 Vybraná porucha pro tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr. 20 Složení uhlovodíků pro vybranou tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$

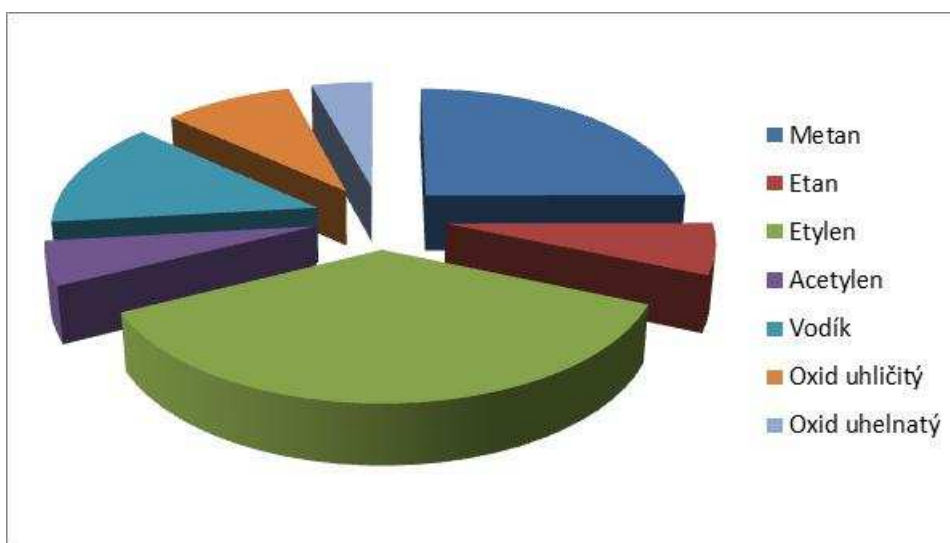
Opět se zde oxidů uhlíku vyskytuje dominantní množství. Při jejich zanedbání vznikne složení plynů podle Obr. 20, které bude obsahovat nejvíce metanu (51 %), etylenu (20 %), etanu (17 %) a vodíku (12 %). Acetylenu bylo méně než 1%.

4.5 TEPELNÁ PORUCHA S TEPLOTOU $T > 700\text{ °C}$ (T3)

Skupina transformátorů, u které bylo prohlášeno, že se v nich vyskytla tepelná porucha s teplotou $T > 700\text{ °C}$, obsahovala především zařízení, na kterých bylo zjištěno poškození zemnicího vinutí, spálené/zlomené kovové části, zvýšený odpor na kontaktech svorek vinutí, bludné proudy v mechanických částech konstrukce zařízení nebo hot spot body v kovových částech zařízení. Databáze IEC TC 10 obsahuje 18 pozorování těchto poruch, kdy je počet pozorování jednotlivých plynů uveden v Tab. 17.

Tab. 17 Počet pozorování, kdy byly zjišťovány konkrétní plyny

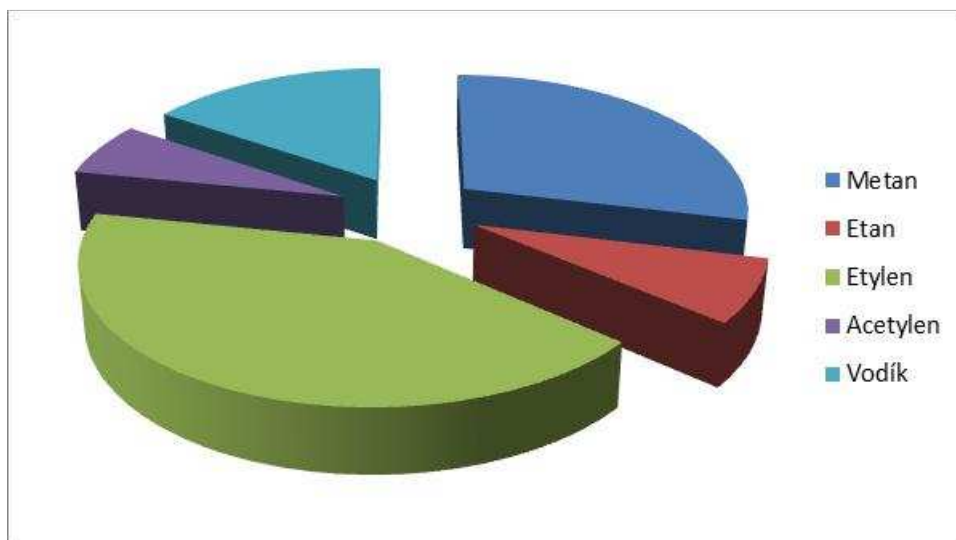
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Počet pozorování	18	18	17	18	17	16	17



Obr. 21 Vybraná porucha pro tepelnou poruchu s teplotou $T > 700\text{ °C}$

Tepelná porucha s teplotou $T > 700\text{ °C}$ má svého reprezentanta na Obr. 21. V tomto případě byla konkrétně objevena porucha hot spot bod v kovových částech. V tomto konkrétním případě se vyskytovalo nejvíce etylenu (36 %), metanu (24 %), vodíku (13 %) a oxidu uhličitého (9 %). Etanu a acetylenu bylo přibližně stejné množství (6 %). Oxidu uhelnatého již bylo méně než 5 %.

Při této poruše se již vyskytuje menší množství oxidů uhlíku, ale i tak se konečné poměry uhlovodíků i vodíku trochu pozmění. Konkrétně bude nejvíce etylenu (42 %), metanu (28 %), vodíku (16 %), etanu (7 %) a acetylenu (6 %).



Obr. 22 Složení uhlovodíků pro vybranou tepelnou poruchu s teplotou $T > 700\text{ °C}$

5 SHODNÉ RYSY METOD PRO INTERPRETACI PLYNŮ ROZPUŠTĚNÝCH V OLEJI

V této kapitole budou porovnány jednotlivé metody uvedené v kap. 3. Bude zde snaha znázornit ty rysy, které mají všechny metody společné, popřípadě upozornit na rozpory mezi jednotlivými metodami.

Nejprve je třeba vyrovnat se s rozdílnými poruchami odhalitelnými jednotlivými metodami. To se provede redukcí poruch do pouhých tří kategorií: TF (Thermal Failure – Tepelná porucha), ED (Electric Discharges – Elektrické výboje) a PD (Partial Discharges – Částečné výboje). Dále budou středem pozornosti pouze plyny, které obsahují jen uhlovodíky.

5.1 TEPELNÁ PORUCHA (TF)

Nejprve se musí stanovit pro každou metodu jednotlivé poruchy, které lze přiřadit do kategorie tepelných poruch (TF). Ty budou uvedeny v tabulkách Tab. 18 až Tab. 23 spolu s jejich kritérii.

Tab. 18 TF dle ČSN EN 60599

Diagnóza	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
T1	NS	> 1, ale NS	< 1
T2	< 0,1	> 1	1 – 4
T3	< 0,2	> 1	> 4

Tab. 19 TF dle Duvalovy trojúhelníkové metody

Diagnóza	C ₂ H ₂ (%)	C ₂ H ₄ (%)
T1	< 4	< 10
T2	< 4	10 – 50
T3	< 15	> 50

Tab. 20 TF dle Doernenburgovy metody

Diagnóza	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$
Tepelný rozklad	> 1,0	< 0,75	< 0,3	> 0,4

Tab. 21 TF dle Rogersovy metody

Diagnóza	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Nízká teplota	< 0,1	0,1 – 1,0	1,0 – 3,0
Teplota < 700 °C	< 0,1	> 1,0	1,0 – 3,0
Teplota > 700 °C	< 0,1	> 1,0	> 3,0

Tab. 22 TF dle metody C. E. G. B.

Diagnóza	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$
Přehřátí < 150 °C	> 1	< 1	< 1	< 0,5
Přehřátí 150 °C – 200 °C	> 1	≥ 1	< 1	< 0,5
Přehřátí 200 °C – 300 °C	0,1 – 1	≥ 1	< 1	< 0,5
Obecné přehřátí vodiče	0,1 – 1	< 1	1 – 3	< 0,5
Bludné proudy ve vinutí	1 – 3	< 1	1 – 3	< 0,5
Bludné proudy v jádře a nádobě, přehřáté spoje	1 – 3	< 1	≥ 3	< 0,5

Tab. 23 TF dle metody C. S. U. S.

Plyn	Normální stav (ppm)	Abnormální stav (ppm)	Diagnóza
C ₂ H ₆	< 10	> 35	Místní přehřátí
C ₂ H ₄	< 20	> 150	Kritické přehřátí

Navíc, kromě rysů uvedených v Tab. 18 až Tab. 23, metoda klíčových plynů říká, že při tepelné poruše se vyskytuje největší množství etylenu a metanu, vodíku a etanu se vyskytuje menší množství.

V dalším budou hledány společné znaky pro výše popsané. Tyto společné znaky budou uvedeny pro každý jeden plyn.

5.1.1 VODÍK H₂

Metoda ČSN EN 60599 a Doernenburgova metoda shodně stanoví množství vodíku, které je menší nebo rovno množství metanu.

Duvalova trojúhelníková metoda, ani směrnice C. S. U. S. nezmiňují žádný vztah mezi tepelnou poruchou a množstvím vodíku v olejovém vzorku při této poruše.

Metody Rogersova a C. E. G. B. stanoví množství vodíku pomocí množství metanu podobně jako metody ČSN EN 60599 a Doernenburgova metoda, jen s tím rozdílem, že pro poruchy nižších teplot může být množství vodíku i větší než množství metanu.

Metoda klíčových plynů se zmiňuje o vodíku jako o plynu zastoupeném při tepelné poruše pouze minoritně.

H_2 je minoritním plynem a zároveň $H_2 < CH_4$.

5.1.2 METAN CH_4

Kromě závěrů plynoucích z předešlé podkapitoly říká Doernenburgova metoda, že množství metanu bude vyšší než 3,3 násobek množství acetyleny.

Z Duvalova trojúhelníku na Obr. 8 je zřejmé, že množství metanu je nepřímo úměrně velikosti přehřátí sledovaného zařízení. Z toho vyplývá, že s rostoucí teplotou nepatrně klesá poměrné množství metanu ve vzorku oleje. Zároveň je maximální množství metanu 98 %.

Metoda klíčových plynů se o metanu zmiňuje jako o pro tepelnou poruchu dominantním plynu, podílí-li se na tepelné poruše kromě celulózové izolace i olej.

CH_4 je majoritním plynem, přičemž platí, že množství $CH_4 > H_2$ a zároveň $CH_4 > 3,3 \times C_2H_2$. Množství CH_4 je nepřímo úměrné úrovni přehřátí.

5.1.3 ACETYLEN C_2H_2

Z předchozí podkapitoly plyne za pomoci Doernenburgovy metody, že množství acetyleny bude menší než třetinové množství metanu. Doernenburgova metoda zároveň omezuje množství acetyleny jako maximálně 2,5 násobek množství metanu. Kromě toho metody ČSN EN 60599, Doernenburgova i Rogersova a C. E. G. B. shodně omezují horní hranici množství acetyleny pomocí etylenu, kdy se ale jednotlivé metody liší konkrétní hranicí.

Metoda ČSN EN 60599 stanovuje množství acetyleny jako maximálně 20 % množství etylenu, kde s klesající teplotou zároveň klesá toto procentuální množství acetyleny. Naproti tomu Doernenburgova metoda množství acetyleny omezuje jako maximálně 75 % množství etylenu, Rogersova metoda jako maximálně 10 % množství etylenu a metoda C. E. G. B. jako maximálně poloviční množství etylenu. Dále se bude předpokládat množství acetyleny jako množství menší nebo rovno polovičnímu množství etylenu.

Duvalova trojúhelníková metoda množství acetyleny omezuje patnácti procenty, přičemž toto množství zároveň s rostoucí teplotou tepelné poruchy klesá.

C_2H_2 je minoritním plynem. Pro jeho množství platí $C_2H_2 < 0,5 \times C_2H_4$, $C_2H_2 < 2,5 \times C_2H_6$ a zároveň $C_2H_2 < 0,3 \times CH_4$. Množství C_2H_2 je nepřímo úměrné úrovni přehřátí.

5.1.4 ETYLEN C_2H_4

Metoda ČSN EN 60599 množství etylenu ve vztahu k jiným plynům než k acetyleny nijak neomezuje, ale je z ní zřejmé, že toto množství je přímo úměrné úrovni přehřátí. Tuto

domněnku potvrzuje i pohled na poruchové zóny v Duvalově trojúhelníku a metody C. E. G. B. a Rogersova. Rogersova metoda ovšem omezuje množství etylenu jako minimálně stejné množství jako množství etanu.

Metoda klíčových plynů i směrnice C. S. U. S. mimo výše uvedeného řadí etylen mezi pro tepelnou poruchu majoritní plyny.

Etylen je majoritním plynem. Množství $C_2H_4 > 2 \times C_2H_2$. Množství C_2H_4 je zároveň přímo úměrné úrovni přehřátí.

5.1.5 ETAN C_2H_6

Z metod ČSN EN 60599, Rogersovy i C. E. G. B. vyplývá, že množství etanu je nepřímo úměrné úrovni přehřátí.

Podle metody klíčových plynů se etylen při tepelné poruše vyvíjí také, ale v menším množství. Obdobně jej směrnice C. S. U. S. řadí k poruše „místní přehřátí“.

Množství $C_2H_6 > 0,4 \times C_2H_2$. Množství C_2H_6 je nepřímo úměrné stupni přehřátí.

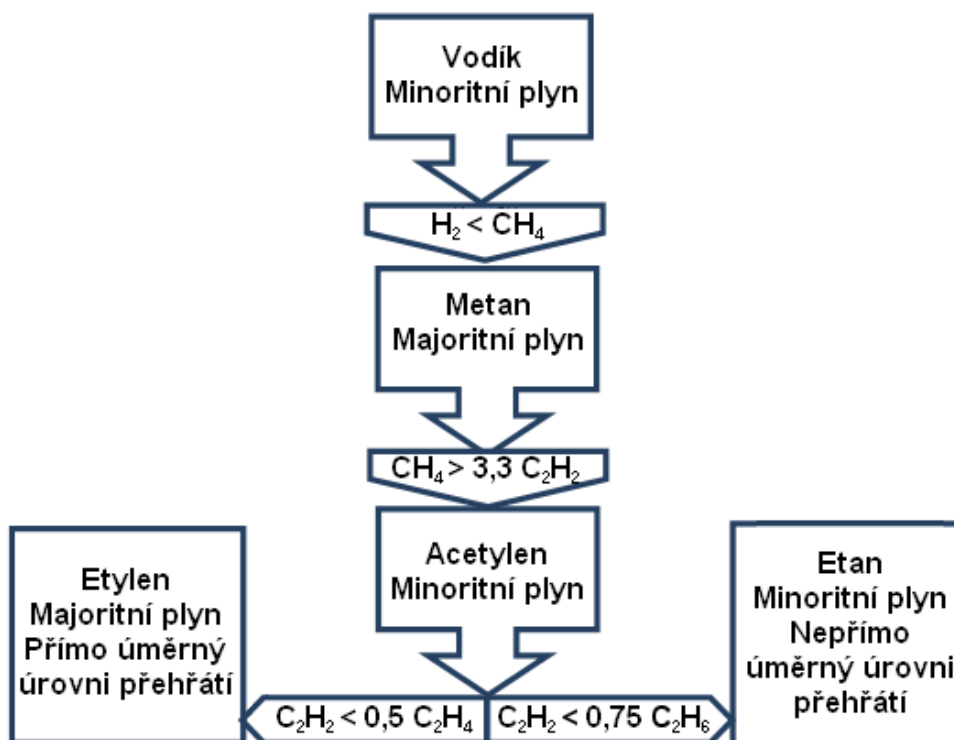
5.1.6 SHRUTÍ TEPELNÉ PORUCHY

Pro lepší znázornění jsou výše uvedené závislosti znázorněny v Tab. 24.

Tab. 24 Vztahy mezi jednotlivými uhlovodíky pro tepelnou poruchu

	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
H ₂		Max			
CH ₄	Min		Min 3,3		
C ₂ H ₂		Max 0,3		Max 0,5	Max 2,5
C ₂ H ₄			Min 2		
C ₂ H ₆			Min 0,4		

Znázornění důležitých výše uvedených závislostí množství jednotlivých uhlovodíků pro tepelnou poruchu je rovněž zobrazeno graficky v Obr. 23.



Obr. 23 Grafické znázornění závislostí uhlovodíků pro tepelnou poruchu

5.2 ELEKTRICKÉ VÝBOJE (ED)

Konkrétní poruchy vztahující se k elektrickým výbojům (ED) jsou uvedeny v Tab. 25 až Tab. 30.

Tab. 25 ED dle ČSN EN 60599

Diagnóza	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
D1	> 1	0,1 – 0,5	> 1
D2	0,6 – 2,5	0,1 – 1	> 2

Tab. 26 ED dle Duvalovy trojúhelníkové metody

Diagnóza	C ₂ H ₂ (%)	C ₂ H ₄ (%)
D1	> 13	< 23
D2	13 – 29	23 – 38
D2	29 – 77	23 – 71

Tab. 27 ED dle Doernenburgovy metody

Diagnóza	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$
Oblouk	0,1 – 1,0	> 0,75	> 0,3	< 0,4

Tab. 28 ED dle Rogersovy metody

Diagnóza	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Oblouk	0,1 – 3,0	0,1 – 1,0	> 3,0

Tab. 29 ED dle metody C. E. G. B.

Diagnóza	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$
Přeskok bez síly k dokončení	0,1 – 1	< 1	< 1	0,5 – 3
Oblouk se silou k dokončení	0,1 – 1	< 1	≥ 1	≥ 0,5
Nepřerušené jiskření s proměnným potenciálem	0,1 – 1	< 1	≥ 3	≥ 3

Tab. 30 ED dle metody C. S. U. S.

Plyn	Normální stav (ppm)	Abnormální stav (ppm)	Diagnóza
H ₂	< 150	> 1 000	Koróna, Oblouk
C ₂ H ₂	< 15	> 70	Oblouk

Metoda klíčových plynů navíc stanoví pro elektrické výboje přítomnost většího množství vodíku a acetylenu a menšího množství metanu a etylenu.

Nyní se budou opět pro každý z plynů identifikovat společné znaky jednotlivých metod pro elektrické výboje.

5.2.1 VODÍK H₂

Metody ČSN EN 60599, Doernenburgova, Rogersova a C. E. G. B. shodně stanoví množství vodíku jako minimálně stejné a maximálně desetinásobek množství metanu.

Metoda klíčových plynů i metoda C. S. U. S. svorně stanovují vodík jako jeden z klíčových plynů při těchto poruchách. Duvalova trojúhelníková metoda se o vodíku nezmiňuje.

H₂ je majoritním plynem. Množství H₂ = (1 - 10) × CH₄.

5.2.2 METAN CH₄

Vedle výše uvedeného je podle Doernenburgovy metody množství metanu zároveň nižší než 3,3 násobek množství acetyleny. Metoda C. E. G. B. zároveň říká, že metanu je více než etanu.

Z Duvalova trojúhelníku Obr. 8 je zřejmé, že množství metanu bude maximálně 87 %.

Metoda klíčových plynů se dále o metanu zmiňuje jako u výbojů o minoritním plynu, zatímco metoda C. S. U. S. v této spojitosti metan vůbec nezmiňuje.

CH₄ je minoritním plynem. Množství CH₄ = (0,1 - 1) × H₂, CH₄ < 3,3 × C₂H₂ a CH₄ > C₂H₆.

5.2.3 ACETYLEN C₂H₂

Metody ČSN EN 60599, Doernenburgova, Rogersova a C. E. G. B. omezují množství acetyleny pomocí množství etylenu, každá z metod ovšem jako jiné procentuální množství. Metoda ČSN EN 60599 stanovuje množství acetyleny jako minimálně 60 %, Rogersova metoda jako 10 % až 300 %, metoda C. E. G. B. jako minimálně 50 % a Doernenburgova metoda jako minimálně 75 % etylenu. Bude se předpokládat množství acetyleny jako minimálně poloviční množství etylenu.

Doernenburgova metoda zároveň omezuje množství acetyleny jako minimálně 2,5 násobek množství etanu.

Duvalova trojúhelníková metoda množství acetyleny omezuje jako minimálně 13 %.

Metody klíčových plynů a C. S. U. S. se o acetyleny ve spojitosti s elektrickými výboji zmiňují jako o majoritním plynu.

C₂H₂ je majoritním plynem. Množství C₂H₂ > 0,3 × CH₄, C₂H₂ > 0,5 × C₂H₄ a C₂H₂ > 2,5 × C₂H₆.

5.2.4 ETYLEN C₂H₄

Metoda ČSN EN 60599 kromě výše uvedeného omezuje množství etylenu jako minimálně stejné množství, jako je množství etanu. Zároveň je dle metody ČSN EN 60599 toto množství přímo úměrné energii daného elektrického výboje. To potvrzuje i pohled na poruchové zóny v Duvalově trojúhelníku i metoda C. E. G. B.. Rogersova poměrová metoda množství etylenu omezuje dokonce jako alespoň trojnásobné množství etanu.

Metoda klíčových plynů řadí etylen mezi minoritní plyny, směrnice C. S. U. S. o tomto množství neříká žádné další informace.

Etylen je minoritní plyn. Množství C₂H₄ < 2 × C₂H₂ a C₂H₄ > C₂H₆. Množství C₂H₄ je zároveň přímo úměrné energii daného elektrického výboje.

5.2.5 ETAN C₂H₆

Z metody ČSN EN 60599 a C. E. G. B. vyplývá, že množství etanu bude nepřímo úměrné úrovni energie elektrických výbojů.

Metody klíčových plynů ani C. S. U. S. se o etanu v tomto případě nijak nezmiňují.

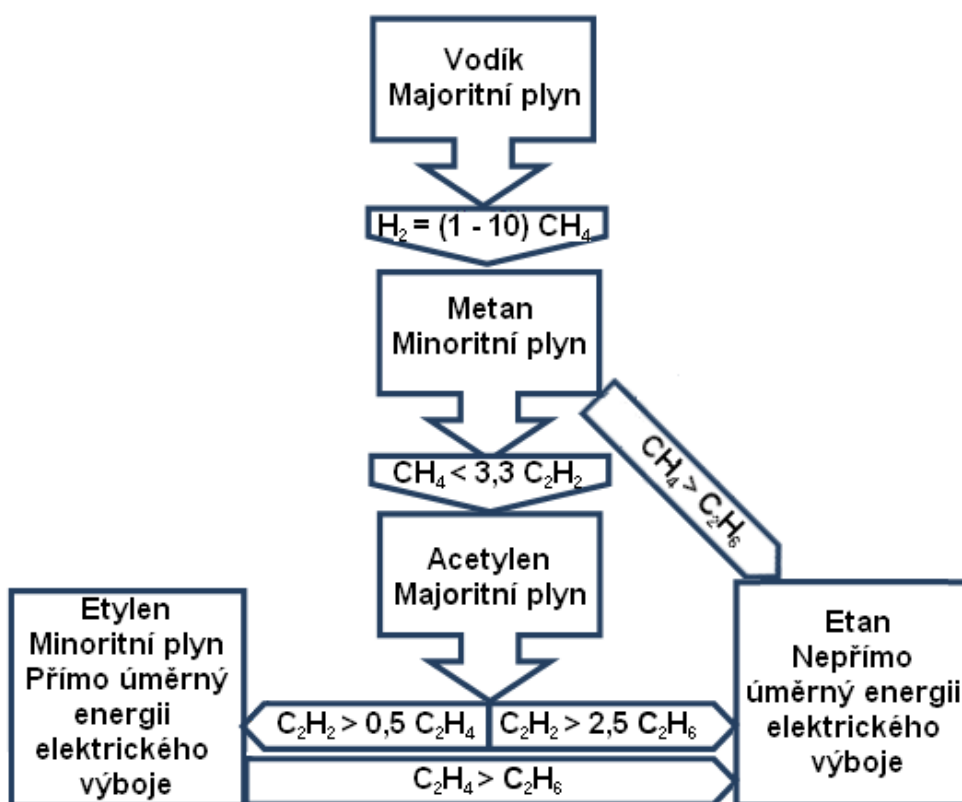
Množství $C_2H_6 < 0,4 \times C_2H_2$, $C_2H_6 < C_2H_4$ a $C_2H_6 < CH_4$. Množství C_2H_6 je zároveň nepřímo úměrné energii daného elektrického výboje.

5.2.6 SHRUTÍ ELEKTRICKÝCH VÝBOJŮ

Pro lepší znázornění jsou v Tab. 31 opět uvedeny závislosti mezi jednotlivými uhlovodíky při poruše elektrických výbojů.

Tab. 31 Vztahy mezi jednotlivými uhlovodíky pro elektrické výboje

	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
H ₂		1 – 10			
CH ₄	0,1 – 1		Max 3,3		Min
C ₂ H ₂		Min 0,3		Min 0,5	Min 2,5
C ₂ H ₄			Max 2		Min
C ₂ H ₆		Max	Max 0,4	Max	



Obr. 24 Grafické znázornění závislostí uhlovodíků pro tepelnou poruchu

Výše popsané závislosti množství jednotlivých uhlovodíků jsou opět graficky znázorněny na Obr. 24.

5.3 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE (PD)

Poruchy pro jednotlivé metody, které jsou pro částečné výboje (PD) zajímavé a konkrétní hraniční hodnoty množství jednotlivých plynů jsou uvedeny v Tab. 32 až Tab. 37.

Tab. 32 PD dle ČSN EN 60599

Diagnóza	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
PD	NS	< 0,1	< 0,2

Tab. 33 PD dle Duvalovy trojúhelníkové metody

Diagnóza	CH ₄ (%)
PD	> 98

Tab. 34 PD dle Doernenburgovy metody

Diagnóza	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$
Částečné výboje	< 0,1	NS	< 0,3	> 0,4

Tab. 35 PD dle Rogersovy metody

Diagnóza	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
Částečné výboje	< 0,1	< 0,1	< 1,0

Tab. 36 PD dle metody C. E. G. B.

Diagnóza	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$
Částečné výboje	$\leq 0,1$	< 1	< 1	< 0,5
Částečné výboje se stopou po výboji	$\leq 0,1$	< 1	< 1	> 0,5

Tab. 37 PD dle metody C. S. U. S.

Plyn	Normální stav (ppm)	Abnormální stav (ppm)	Diagnóza
H ₂	< 150	> 1 000	Koróna, Oblouk
CH ₄	< 25	> 80	Jiskření

Metoda klíčových plynů přisuzuje částečným výbojům největší množství vodíku a metanu a menší množství etylenu a etanu.

V dalším následuje rozbor jednotlivých plynů pro poruchu částečné výboje.

5.3.1 VODÍK H₂

Metody ČSN EN 60599, Doernenburgova, Rogersova i C. E. G. B. shodně stanoví množství vodíku jako alespoň 10 násobek množství metanu.

Metody klíčových plynů i C. S. U. S. svorně říkají, že při částečných výbojích je vodík dominantním plynem.

Duvalova trojúhelníková metoda se o vodíku nijak nezmiňuje.

H₂ je majoritním plynem. Množství H₂ > 10×CH₄.

5.3.2 METAN CH₄

Kromě výše uvedeného Doernenburgova metoda říká, že množství metanu bude vyšší než 3,3 násobek množství acetyleny.

Podle metody C. E. G. B. je množství metanu vyšší než množství etanu.

Z Duvalova trojúhelníku na Obr. 8 je zřejmé, že metanu bude minimálně 98 %.

Metody klíčových plynů i C. S. U. S. se dále o metanu zmiňují jako o, pro částečné výboje, majoritním plynu.

CH₄ je majoritním plynem. Množství CH₄ < 0,1×H₂, CH₄ > 3,3×C₂H₂ a CH₄ > C₂H₆.

5.3.3 ACETYLEN C₂H₂

Doernenburgova metoda stanovuje množství acetyleny jako maximálně 10 % množství etylenu, metoda C. E. G. B. toto množství nijak neomezuje. Doernenburgova metoda množství acetyleny navíc limituje jako maximálně 2,5 násobek etanu.

Duvalova trojúhelníková metoda množství acetyleny omezuje jako max. 2 %.

Metody klíčových plynů a C. S. U. S. se o acetyleny ve spojitosti s částečnými výboji nezmiňují.

Množství C₂H₂ < 0,5×C₂H₄, C₂H₂ < 2,5×C₂H₆ a C₂H₂ < 0,3×CH₄.

5.3.4 ETYLEN C_2H_4

Metoda ČSN EN 60599 kromě výše uvedeného, omezuje množství etylenu jako maximálně 20 % množství etanu, zatímco metody Rogersova i C. E. G. B. omezují množství etylenu pouze jako množství menší než je množství etanu.

Duvalova trojúhelníková metoda množství etylenu omezuje jako max. 2 %.

Metoda klíčových plynů řadí etylen mezi minoritní plyny.

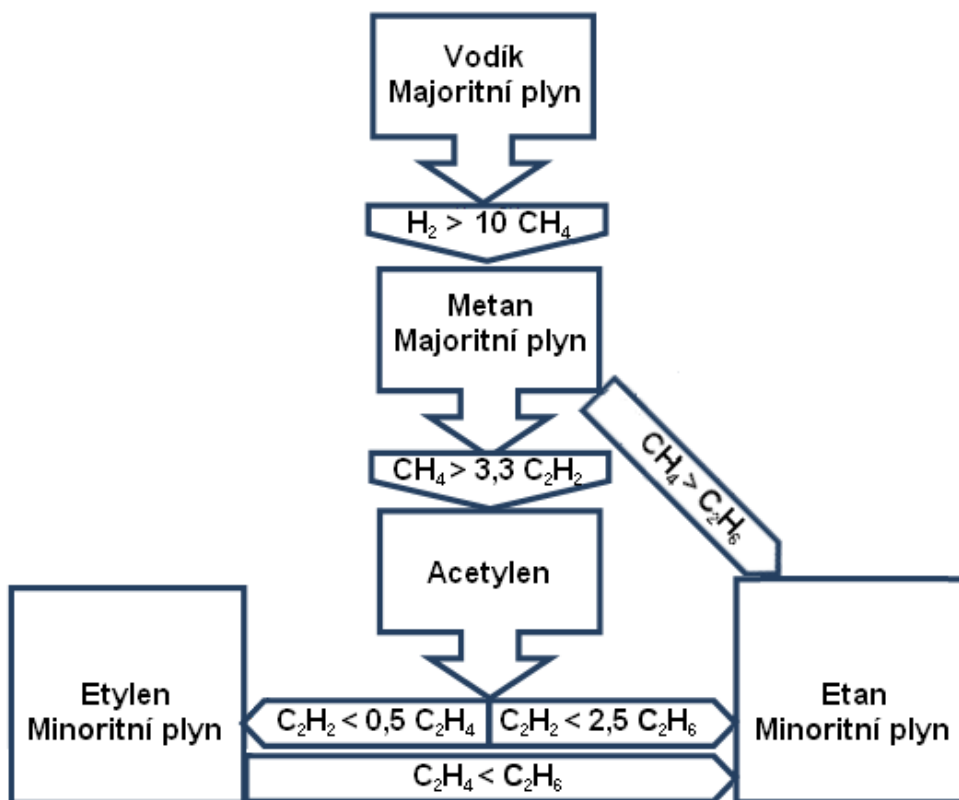
C_2H_4 je minoritním plynem. Množství $C_2H_4 > 2 \times C_2H_2$ a $C_2H_4 < C_2H_6$.

5.3.5 ETAN C_2H_6

K výše uvedenému se navíc metoda klíčových plynů zmiňuje o etanu jako o minoritním plynu.

C_2H_6 je minoritním plynem. Množství $C_2H_6 > 0,4 \times C_2H_2$, $C_2H_6 > C_2H_4$ a $C_2H_6 < CH_4$.

5.3.6 SHRUTÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ



Obr. 25 Grafické znázornění závislostí uhlovodíků pro částečné výboje

V Tab. 38 jsou opět uvedeny vztahy mezi jednotlivými uhlovodíky pro částečné výboje.

Na Obr. 25 jsou znázorněny stejné závislosti, ale graficky.

Tab. 38 Vztahy mezi jednotlivými uhlovodíky pro částečné výboje

	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
H ₂		Min. 10			
CH ₄	Max. 0,1		Min. 3,3		Min.
C ₂ H ₂		Max. 0,3		Max. 0,5	Max. 2,5
C ₂ H ₄			Min. 2		Max.
C ₂ H ₆		Max.	Min. 0,4	Min.	

5.4 CELKOVÝ POHLED

V této podkapitole následuje zamyšlení nad jednotlivými plyny a vyzvednutí důležitých rysů těchto plynů v souvislosti s konkrétními poruchami. Vyzvednuty budou pouze ty rysy, které jsou potvrzeny více než jen jednou interpretační metodou.

5.4.1 VODÍK H₂

U elektrických i částečných výbojů je o vodíku mluveno jako o majoritním plynu.

Z pohledu množství vodíku v porovnání s množstvím metanu se vodíku vyskytuje nejméně při tepelné poruše. Poměr vodíku roste při elektrickém výboji a nejvyšších hodnot dosahuje při částečných výbojích.

5.4.2 METAN CH₄

Metan je majoritním plynem jak u tepelné poruchy, tak u poruchy částečnými výboji. U poruchy elektrickými výboji je považován pouze za minoritní plyn.

Vzhledem k vodíku je metanu nejvíce při tepelné poruše, při elektrických výbojích jej ubývá, přičemž při částečných výbojích je již toto množství minimální.

5.4.3 ACETYLEN C₂H₂

Acetylen je u poruchy elektrickými výboji považován za majoritní plyn.

Množství acetyleny je v porovnání s množstvím etylenu pro tepelnou poruchu nižší, pro výboje elektrické vyšší.

5.4.4 ETYLEN C₂H₄

U tepelné poruchy se jedná o majoritní plyn, zatímco u částečných výbojů pouze o plyn minoritní.

Vyskytuje-li se tepelná porucha, je množství etylenu přímo úměrné stupni přehřátí. Obdobné platí i pro elektrické výboje, množství etylenu je opět přímo úměrné energii daného elektrického výboje.

Vzhledem k acetylenu je etylenu více při tepelné poruše, při elektrických výbojích je tohoto množství méně.

5.4.5 ETAN C₂H₆

Etan je pro veškeré z poruch pouze minoritním plynem.

Množství etanu je nepřímo úměrné stupni přehřátí zařízení v případě tepelné poruchy i energii v případě elektrického výboje.

5.4.6 CELKOVÉ SHRNUÍ

Podstatné rozdíly mezi jednotlivými metodami nebyly nalezeny. Společné rysy jsou popsány výše.

Při podrobném prostudování celkového pohledu na význam jednotlivých sledovaných plynů se naskýtají tyto rozhodovací hlediska, o jakou poruchu v zařízení se jedná:

1. Nejprve se porovnají množství sledovaných plynů s pro poruchu významnými hodnotami buď v normě ČSN EN 60599, nebo s hodnotami experimentálně stanovenými pro dané konkrétní zařízení, kdy je vhodné již transformátor podrobněji sledovat.
2. Množství acetylenu vzhledem k etylenu
 - a. Nízké – Tepelná porucha
 - b. Vysoké – Elektrické výboje nebo částečné výboje

Přesné hodnoty nejsou uváděny záměrně, a to z důvodu jistých nepřesností měřících zařízení. Pro přesnější stanovení je vhodné zkontrolovat následující:

3. Množství metanu vzhledem k vodíku
 - a. Nižší – Částečné výboje
 - b. Vyšší – Elektrické výboje

Výše uvedené tedy dává vodítko k určení druhu poruchy.

Nejprve se pomocí etylenu a acetylenu zjistí podle 2. bodu, do které ze dvou skupin bude odhalená porucha patřit – do skupiny tepelných poruch, či do skupiny elektrických poruch. Poté se pomocí metanu a vodíku z 3. bodu, jedná-li se o poruchy elektrické, stanoví, zda jde o částečné výboje, či výboje elektrické. Jde-li o tepelnou poruchu či poruchu elektrických výbojů, lze jejich úroveň posoudit z poměru množství uvolněného etylenu ku množství uvolněného etanu. Tento poměr je přímo úměrný teplotě dané tepelné poruchy i energii případných elektrických výbojů.

5.5 VYŠETŘENÍ OMEZENÍ POČTU PLYNŮ NA 4

Výše je uvedeno, že tedy společným znakem těchto metod jsou dva plynové poměry pro určení, o jakou závadu se jedná, plus jeden plynový poměr pro zjištění, jaké je tato závada úrovně. Jedná se celkem tedy o znalosti množství pěti plynů. V následujícím bude prošetřeno, zda lze třetí poměr plynů, sloužící k určení úrovně dané poruchy, zanedbat. To nastane v případě, že bude závislý na poměrech potřebných k samotnému pojmenování závady.

Pro toto vyšetření se bude předpokládat, že je-li plynový poměr C_2H_4/C_2H_6 závislý na plynových poměrech C_2H_2/C_2H_4 a/nebo CH_4/H_2 a jejich kombinacích, musí být mezi těmito poměry regrese. Blíže jsou regrese popsány v příloze 1.

Bude se testovat hypotéza (86), a to na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Tato hypotéza bude testována na datovém souboru IEC TC 10 představeném v kap. 4 pro vybrané tvary regresních rovnic. Tato hypotéza bude zamítnuta, pokud intervalový odhad příslušného regresního koeficientu nebude obsahovat nulovou hodnotu, tj. bude-li bodový odhad příslušného regresního koeficientu větší než poloměr intervalu spolehlivosti téhož regresního koeficientu.

5.5.1 REGRESE S JEDNOU NEZÁVISLOU NÁHODNOU PROMĚNNOU

Nejprve bude uvažováno, že plynový poměr C_2H_4/C_2H_6 je závislý pouze na jednom z plynových poměrů, a to buď na C_2H_2/C_2H_4 nebo CH_4/H_2 .

REGRESE TVARU $Y = a + bX$

Nejprve tedy budou předpokládány rovnice tvaru:

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 + \beta_1 \frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \quad (6)$$

resp.

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 + \beta_1 \frac{CH_4}{H_2}. \quad (7)$$

Pro tyto rovnice se dostanou odhady regresních koeficientů, jak jsou uvedeny v Tab. 39.

Tab. 39 Regresní koeficienty pro rovnice (6) a (7)

Rovnice	a	b	$\pm t \cdot SE$
(6)	12,655	0,262	3,401
(7)	12,483	-0,026	0,156

Z Tab. 39 lze vidět, že hypotéza (86) nelze zamítnout na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ ani pro jednu z rovnic (6) a (7). Z výše uvedeného nelze tedy s jistotou říci, že by byl plynový poměr C_2H_4/C_2H_6 lineárně závislý na jakémkoliv z poměrů C_2H_2/C_2H_4 nebo CH_4/H_2 .

REGRESE TVARU $Y = a + bX + cX^2$

Nyní jsou uvažovány rovnice:

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 + \beta_1 \frac{C_2H_2}{C_2H_4} + \beta_2 \left(\frac{C_2H_2}{C_2H_4} \right)^2, \quad (8)$$

resp.

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 + \beta_1 \frac{CH_4}{H_2} + \beta_2 \left(\frac{CH_4}{H_2} \right)^2. \quad (9)$$

Odhady regresních koeficientů pro rovnice (8) a (9) jsou uvedeny v Tab. 40.

Tab. 40 Regresní koeficienty pro rovnice (8) a (9)

Rovnice	a	b	$\pm t_1 \cdot SE$	c	$\pm t_2 \cdot SE$
(8)	11,386	1,448	7,269	-0,089	0,483
(9)	13,461	-0,809	2,582	0,002	0,005

Jak plyne z Tab. 40, hypotéza (86) nelze na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ zamítnout ani pro rovnice (8) a (9). Ani zde nelze tedy s jistotou říci, že plynový poměr C_2H_4/C_2H_6 je závislý na jakémkoliv z poměrů C_2H_2/C_2H_4 nebo CH_4/H_2 , uvažuje-li se závislost jako polynom druhého stupně.

REGRESE TVARU $Y = a + b/X$

Tomuto tvaru odpovídají regresní rovnice:

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 + \beta_1 \frac{C_2H_4}{C_2H_2}, \quad (10)$$

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 + \beta_1 \frac{H_2}{CH_4}. \quad (11)$$

Pro rovnice (10) a (11) jsou odhady příslušných regresních koeficientů uvedeny v Tab. 41.

Tab. 41 Regresní koeficienty pro rovnice (10) a (11)

Rovnice	a	b	$\pm t \cdot SE$
(10)	13,496	-0,007	0,029
(11)	12,967	-0,105	0,446

Pro rovnice (10) a (11) z Tab. 41 plyne, že hypotézu (86) nelze na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ zamítnout pro žádný z uvedených regresních koeficientů. Nelze tedy s jistotou říci, zda poměr C_2H_4/C_2H_6 je lineárně závislý na poměru C_2H_4/C_2H_2 nebo H_2/CH_4 .

REGRESE TVARU $Y = a + b/X + c/X^2$

V Tab. 42 jsou uvedeny odhady regresních koeficientů pro tyto rovnice:

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 + \beta_1 \frac{C_2H_4}{C_2H_2} + \beta_2 \left(\frac{C_2H_4}{C_2H_2} \right)^2, \quad (12)$$

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 + \beta_1 \frac{H_2}{CH_4} + \beta_2 \left(\frac{H_2}{CH_4} \right)^2. \quad (13)$$

Tab. 42 Regresní koeficienty pro rovnice (12) a (13)

Rovnice	a	b	$\pm t_1 \cdot SE$	c	$\pm t_2 \cdot SE$
(12)	13,945	-0,033	0,124	0,000	0,000
(13)	13,921	-0,397	1,536	0,003	0,013

Ani zde, pro rovnice (12) a (13), nelze na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ zamítnout hypotézu (86). Nelze tedy s jistotou určit, zda je poměr C_2H_4/C_2H_6 závislý na jakémkoliv z poměrů C_2H_4/C_2H_2 nebo H_2/CH_4 tak, jak předepisují rovnice (12) a (13).

REGRESE TVARU $Y = ae^{bX}$

Předpokládané rovnice:

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 e^{b \frac{C_2H_2}{C_2H_4}}, \quad (14)$$

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 e^{b \frac{CH_4}{H_2}}, \quad (15)$$

budou pro zjednodušení převedeny na následující tvar, s kterým se bude dále pracovat:

$$\ln \left(\frac{C_2H_4}{C_2H_6} \right) = \ln(\beta_0) + \beta_1 \frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \quad (16)$$

resp.

$$\ln \left(\frac{C_2H_4}{C_2H_6} \right) = \ln(\beta_0) + \beta_1 \frac{CH_4}{H_2}. \quad (17)$$

V Tab. 43 jsou uvedeny příslušné regresní koeficienty pro rovnice (16) a (17).

Tab. 43 Regresní koeficienty pro rovnice (16) a (17)

Rovnice	a	b	$\pm t \cdot SE$
(16)	1,443	0,093	0,147
(17)	1,444	-0,004	0,008

Pomocí hodnot uvedených v Tab. 43 opět nelze hypotézu (86) na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ zamítnout. Nelze tedy s jistotou určit, zda je poměr C_2H_4/C_2H_6 exponenciálně závislý na jakémkoliv z poměrů C_2H_2/C_2H_4 nebo CH_4/H_2 .

5.5.2 REGRESE S VÍCE NEZÁVISLÝMI NÁHODNÝMI PROMĚNNÝMI

Nyní budou uvažovány rovnice, kdy je plynový poměr C_2H_4/C_2H_6 závislý na kombinaci plynových poměrů C_2H_2/C_2H_4 a CH_4/H_2 .

REGRESE TVARU $Y = a + bX_1 + cX_2$

V Tab. 44 jsou uvedeny regresní koeficienty pro následující rovnici:

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 + \beta_1 \frac{C_2H_2}{C_2H_4} + \beta_2 \frac{CH_4}{H_2}. \quad (18)$$

Tab. 44 Regresní koeficienty pro rovnici (18)

Rovnice	a	b	$\pm t_1 \cdot SE$	c	$\pm t_2 \cdot SE$
(18)	13,056	0,191	3,449	-0,027	0,164

Hypotéza (86) nelze na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ zamítnout ani pro rovnici tvaru (18). Domněnku, že je poměr C_2H_4/C_2H_6 lineárně závislý na poměrech C_2H_2/C_2H_4 a CH_4/H_2 se tedy nepodařilo potvrdit.

REGRESE TVARU $Y = a + bX_1 + cX_1^2 + dX_2 + eX_2^2$

Pro tento tvar regrese se uvažuje rovnice:

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 + \beta_1 \frac{C_2H_2}{C_2H_4} + \beta_2 \left(\frac{C_2H_2}{C_2H_4} \right)^2 + \beta_3 \frac{CH_4}{H_2} + \beta_4 \left(\frac{CH_4}{H_2} \right)^2, \quad (19)$$

s regresními koeficienty, jak je uvádí Tab. 45.

Tab. 45 Regresní koeficienty pro rovnici (19)

Rovnice	a	b	$\pm t_1 \cdot SE$	c	$\pm t_2 \cdot SE$	d	$\pm t_3 \cdot SE$	e	$\pm t_4 \cdot SE$
(19)	13,179	0,801	7,780	-0,655	3,146	-0,057	0,506	0,001	0,006

Pomocí hodnot uvedených v Tab. 45 nelze hypotézu (86) zamítnout na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, tudíž nelze potvrdit domněnku, že poměr C_2H_4/C_2H_6 je závislý na poměrech C_2H_2/C_2H_4 a CH_4/H_2 podle rovnice (19).

REGRESE TVARU $Y = a + b/X_1 + c/X_2$

V Tab. 46 jsou uvedeny regresní koeficienty pro tuto rovnici:

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 + \beta_1 \frac{C_2H_4}{C_2H_2} + \beta_2 \frac{H_2}{CH_4}. \quad (20)$$

Tab. 46 Regresní koeficienty pro rovnici (20)

Rovnice	a	b	$\pm t_1 \cdot SE$	c	$\pm t_2 \cdot SE$
(20)	14,272	-0,007	0,030	-0,107	0,485

Ani zde nelze hypotézu (86) zamítnout na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Domněnku, že je poměr C_2H_4/C_2H_6 lineárně závislý na poměrech C_2H_4/C_2H_2 a H_2/CH_4 se tedy nepodařilo potvrdit.

$$\text{REGRESE TVARU } Y = a + b/X_1 + c/X_1^2 + d/X_2 + e/X_2^2$$

V dalším uvažujeme rovnici:

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 + \beta_1 \frac{C_2H_4}{C_2H_2} + \beta_2 \left(\frac{C_2H_4}{C_2H_2} \right)^2 + \beta_3 \frac{H_2}{CH_4} + \beta_4 \left(\frac{H_2}{CH_4} \right)^2, \quad (21)$$

Pro rovnici (21) jsou regresní koeficienty uvedeny v Tab. 47.

Tab. 47 Regresní koeficienty pro rovnici (21)

Rovnice	a	b	$\frac{\pm t_1}{\cdot SE}$	c	$\frac{\pm t_2}{\cdot SE}$	d	$\frac{\pm t_3}{\cdot SE}$	e	$\frac{\pm t_4}{\cdot SE}$
(21)	16,395	-0,039	0,127	-0,590	1,995	0,000	0,000	0,004	0,016

Ani pro rovnici (21) nelze pro žádný z příslušných regresních koeficientů na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ zamítnout hypotézu (86). Domněnku, že poměr C_2H_4/C_2H_6 je závislý na poměrech C_2H_2/C_2H_4 a CH_4/H_2 podle rovnice (21) tedy nelze potvrdit.

$$\text{REGRESE TVARU } Y = ae^{bX_1}e^{cX_2}$$

Exponenciální rovnici:

$$\frac{C_2H_4}{C_2H_6} = \beta_0 e^{b \frac{C_2H_2}{C_2H_4}} e^{c \frac{CH_4}{H_2}}, \quad (22)$$

převědeme na tvar:

$$\ln \left(\frac{C_2H_4}{C_2H_6} \right) = \ln(\beta_0) + \beta_1 \frac{C_2H_2}{C_2H_4} + \beta_2 \frac{CH_4}{H_2}, \quad (23)$$

na kterém lze lépe vyšetřit regresní koeficienty. Ty jsou uvedeny v Tab. 48.

Tab. 48 Regresní koeficienty pro rovnici (23)

Rovnice	a	b	$\pm t_1 \cdot SE$	c	$\pm t_2 \cdot SE$
(23)	1,493	0,084	0,148	-0,004	0,007

Hypotéza (86) se opět nezamítá na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ pro žádný z příslušných regresních koeficientů. Nepotvrdilo se tudíž, že poměr C_2H_4/C_2H_6 je exponenciálně závislý na kombinaci poměrů C_2H_2/C_2H_4 a CH_4/H_2 .

5.5.3 SHRNUÍ

Z výše popsaného se jeví, že mezi plynovými poměry C_2H_4/C_2H_2 nebo CH_4/H_2 a plynovým poměrem C_2H_4/C_2H_6 nebyla nalezena žádná závislost.

Z výše uvedeného vyplývá, že je třeba měřit všech 5 plynů, tedy všechny 3 plynové poměry, uvedené v kap. 5.4.6. Poměr etylenu a etanu je potřebný ke stanovení úrovně daného nestandardního děje.

6 PŘESNOST STÁVAJÍCÍCH INTERPRETAČNÍCH METOD ŠETŘENÁ V DATABÁZI IEC TC 10

V následující kapitole bude prošetřena přesnost stávajících metod pro interpretaci plynů rozpuštěných v oleji. To bude provedeno na databázi IEC TC 10, která obsahuje jak přesná množství zjištěných plynů, tak poruchy, které byly následně na zařízení odhaleny.

Některé z interpretačních metod využívající plynové poměry mohou zjištěné složení plynu přiřadit do oblasti, kde není definována žádná interpretace poruchy. Nastane-li tento případ, bude určena vzdálenost této koncentrace od jednotlivých poruchových oblastí a bude-li daná porucha vzdálena od některé/některých z oblastí výrazně méně, bude přisouzena této oblasti/těmto oblastem. Stanovení vzdálenosti bude provedeno pomocí Euklidovské metriky, jak je znázorněno rovnicí:

$$v_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (pp_{j,i} - h_{j,i})^2}, \quad (24)$$

kde v_i značí vzdálenost daného j -tého plynového poměru pp_{ij} od hraniční hodnoty tohoto j -tého plynového poměru h_{ij} pro i -tou oblast, pro kterou počítáme vzdálenost a která definuje poruchu.

6.1 ČSN EN 60599

Nejprve bude prošetřena metoda popsaná v normě ČSN EN 60599 kap. 3.1.

Některé z poruchových oblastí pro metodu dle normy ČSN EN 60599 se překrývají, tudíž umožňují pro určité plynové koncentrace stanovit více než jednu konkrétní poruchu. Konkrétně jde o poruchy D1 a D2, jak je uvedeno v Tab. 49.

Tab. 49 Překrývající poruchové oblasti D1 a D2 pro metodu ČSN EN 60599

Charakteristická porucha	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
D1 – Výboje nízké energie	> 1	0,1 – 0,5	> 1
D2 – Výboje vysoké energie	0,6 – 2,5	0,1 – 1	> 2

Nastanou-li případy, kdy jeden plynový poměr má více než jednu možnou interpretaci a jedna z těchto interpretací bude správná, bude se předpokládat jen případ odhalení správné poruchy. Pokud nastane případ, kdy ani jedna z možných poruch nebude správná, bude se předpokládat porucha, která je k danému plynovému poměru nejbližší, či porucha D2, půjde-li o případ z Tab. 49.

Pro případ, že daný plynový poměr padne mimo definovanou oblast, vypočítají se jeho vzdálenosti od jednotlivých oblastí konkrétně pomocí vzorce:

$$v_i = \sqrt{\left(pp_{\frac{C_2H_2}{C_2H_4},i} - h_{\frac{C_2H_2}{C_2H_4},i} \right)^2 + \left(pp_{\frac{CH_4}{H_2},i} - h_{\frac{CH_4}{H_2},i} \right)^2 + \left(pp_{\frac{C_2H_4}{C_2H_6},i} - h_{\frac{C_2H_4}{C_2H_6},i} \right)^2}. \quad (25)$$

V Tab. 50 je uvedeno, jak metoda ČSN EN 60599 přiřazovala pro jednotlivé plynové poměry pravděpodobné poruchy v konfrontaci se skutečnými poruchami.

Tab. 50 Poruchy odhalené pomocí metody ČSN EN 60599

		Porucha dle ČSN EN 60599						
		PD	D1	D2	T1,2	T3	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	PD	4	0	0	0	0	5	9
	D1	1	23	0	0	0	2	26
	D2	0	2	43	0	0	3	48
	T1,2	0	0	1	8	1	6	16
	T3	0	0	1	4	11	2	18
	Celkem	5	25	45	12	12	18	117

Jak lze v Tab. 50 vidět, pro 18 ze 117 vzorků plynu nebylo možné vinou absence měření určitých plynů stanovit pomocí metody ČSN EN 60599 předpokládanou poruchu. Ze zbylých 99 měření byla metoda ČSN EN 60599 úspěšná v 89 případech, což činilo úspěšnost zhruba 90 %.

Tab. 51 Poruchy odhalené pomocí metody ČSN EN 60599 – omezení na 3 druhy poruch

		Porucha dle ČSN EN 60599				
		PD	ED	TF	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	PD	4	0	0	5	9
	ED	1	68	0	5	74
	TF	0	2	24	8	34
	Celkem	5	70	24	18	117

Budou-li se předpokládat pouze 3 druhy poruch tak, jak jsou definovány v kap. 5, tedy PD, ED a TF, pak bude metoda ČSN EN 60599 úspěšná v 96 případech z 99, což činí úspěšnost 97 %. To lze vidět v Tab. 52.

Tab. 52 Poruchy odhalené pomocí metody ČSN EN 60599 – omezení na 2 druhy poruch

		Porucha dle ČSN EN 60599			
		EF	TF	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	EF	73	0	10	83
	TF	2	24	8	34
	Celkem	75	24	18	117

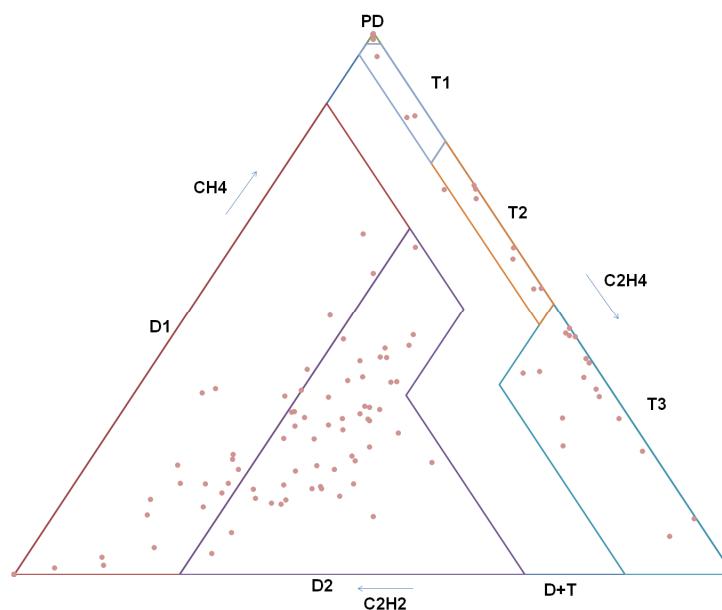
Při předpokladu 2 druhů poruch – pouze elektrické (EF) či tepelné (TF), bude metoda ČSN EN 60599 úspěšná v 97 případech z 99, což je tentokrát úspěšnost 98 %.

Metoda ČSN EN 60599 dosahuje úspěšnosti při přiřazování poruch do pěti kategorií 90 %, při rozdělování poruch do tří kategorií 97 % a pro dvě poruchy 98 %.

6.2 DUVALOVA TROJÚHELNÍKOVÁ METODA

Další z prošetřovaných metod je Duvalova trojúhelníková metoda, která je také popsána v normě ČSN EN 60599.

Tato metoda má každou z poruchových oblastí stanovenou jednoznačně, nedochází k tomu, že by jednomu vzorku plynu bylo přisouzeno více možných poruch.



Obr. 26 Duvalova trojúhelníková metoda pro databázi IEC TC 10

Použití Duvalova trojúhelníku na databázi IEC TC 10 lze vidět na Obr. 26.

Tab. 53 Poruchy odhalené pomocí Duvalovy trojúhelníkové metody

		Porucha dle Duvalovy trojúhelníkové metody							
		PD	D1	D2	T1,2	T3	D+T	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	PD	4	0	0	0	0	0	5	9
	D1	0	21	4	0	0	0	1	26
	D2	0	1	47	0	0	0	0	48
	T1,2	0	0	0	8	2	1	5	16
	T3	0	0	0	2	15	0	1	18
	Celkem	4	22	51	10	17	1	12	117

V Tab. 53 jsou uvedeny výsledky, které dává Duvalova trojúhelníková metoda v konfrontaci se skutečnými zjištěnými poruchami. Duvalova trojúhelníková metoda nebyla schopna stanovit možnou poruchu pro 12 měření. Ve zbylých měření byla Duvalova trojúhelníková metoda úspěšná v 95 případech ze 105, což je cca 90 %. Bude-li bod, který padl do oblasti D+T připočten k oblasti T2, ke které má nejbližší, zvednou se tyto úspěšnosti na 91 %.

Tab. 54 Poruchy odhalené pomocí Duvalovy trojúhelníkové metody – omezení na 3 druhy poruch

		Porucha dle Duvalovy trojúhelníkové metody					
		PD	ED	TF	D+T	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	PD	4	0	0	0	5	9
	ED	0	73	0	0	1	74
	TF	0	0	27	1	6	34
	Celkem	4	73	27	1	12	117

Předpokládají-li se zde 3 druhy poruch (V Tab. 53 jsou uvedeny výsledky, které dává Duvalova trojúhelníková metoda v konfrontaci se skutečnými zjištěnými poruchami. Duvalova trojúhelníková metoda nebyla schopna stanovit možnou poruchu pro 12 měření. Ve zbylých měření byla Duvalova trojúhelníková metoda úspěšná v 95 případech ze 105, což je cca 90 %. Bude-li bod, který padl do oblasti D+T připočten k oblasti T2, ke které má nejbližší, zvednou se tyto úspěšnosti na 91 %.

Tab. 54), ale i 2 druhy poruch (Tab. 55), bude Duvalova trojúhelníková metoda úspěšná ve 104 případech ze 105, což je úspěšnost 99 %. Po přiřazení poruchy náležitě oblasti D+T do oblasti T2, se bude jednat o 105 případů ze 105, což je úspěšnost 100 %.

Tab. 55 Poruchy odhalené pomocí Duvalovy trojúhelníkové metody – omezení na 2 druhy poruch

		Porucha dle Duvalovy trojúhelníkové metody				
		EF	TF	D+T	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	EF	77	0	0	6	83
	TF	0	27	1	6	34
	Celkem	77	27	1	12	117

Duvalova trojúhelníková metoda dosahuje úspěšnosti při přiřazování poruch do pěti kategorií 91 %, při rozdělování poruch do tří i dvou kategorií 100 %.

6.3 DOERNENBURGOVA METODA

Pro Doernenburgovu metodu jsou poruchy, odhalené touto metodou, v konfrontaci s poruchami skutečnými uvedeny v Tab. 56.

Padne-li plynový poměr mimo oblast definovanou Doernenburgovu metodou, vypočítají se jeho vzdálenosti od jednotlivých oblastí vzorcem:

$$v_i = \sqrt{\left(\frac{pp_{CH_4,i}}{H_2} - \frac{h_{CH_4,i}}{H_2}\right)^2 + \left(\frac{pp_{C_2H_2,i}}{C_2H_4} - \frac{h_{C_2H_2,i}}{C_2H_4}\right)^2 + \left(\frac{pp_{C_2H_2,i}}{CH_4} - \frac{h_{C_2H_2,i}}{CH_4}\right)^2 + \left(\frac{pp_{C_2H_6,i}}{C_2H_2} - \frac{h_{C_2H_6,i}}{C_2H_2}\right)^2} \quad (26)$$

Doernenburgova metoda předpokládá pouze 3 druhy poruch, tudíž poruchy zjištěné u jednotlivých naměřených veličin budou rovnou zredukovány do 3 skupin, jak jsou stanoveny v kap. 5. Doernenburgova metoda navíc nebyla schopna pro 18 vzorků plynu stanovit možnou poruchu vinou absence měření určitých plynů a pro 1 vzorek vinou přibližně shodné vzdálenosti od všech poruchových zón.

Z Tab. 56 lze vidět, že Doernenburgova metoda byla úspěšná v 92 případech z 99, kdy byly měřeny všechny potřebné plyny pro tuto metodu, což činilo úspěšnost cca 93 %.

Při uvažování pouze poruch EF a TF (Tab. 57) je Doernenburgova metoda úspěšná v 94 případech z 99 (95 %).

Tab. 56 Poruchy odhalené pomocí Doernenburgovy metody

		Porucha dle Doernenburgovy metody				
		PD	ED	TF	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	PD	4	0	0	5	9
	ED	2	64	2	6	74
	TF	2	0	24	8	34
	Celkem	8	64	26	19	117

Tab. 57 Poruchy odhalené pomocí Doernenburgovy metody – omezení na 2 druhy poruch

		Porucha dle Doernenburgovy metody			
		EF	TF	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	EF	70	2	11	83
	TF	2	24	8	34
	Celkem	64	26	19	117

Doernenburgova metoda dosahuje úspěšnosti při přiřazování poruch do tří kategorií 93 %, při rozdělování poruch do dvou kategorií 95 %.

6.4 ROGERSOVA METODA

Pro Rogersovu metodu též existují koncentrace plynů, pro které tato metoda nedokáže určit, o jakou poruchu se jedná. V tomto případě opět budou počítány vzdálenosti od oblastí jednotlivých poruch pomocí vzorce:

$$v_i = \sqrt{\left(pp_{\frac{C_2H_2}{C_2H_4},i} - h_{\frac{C_2H_2}{C_2H_4},i} \right)^2 + \left(pp_{\frac{CH_4}{H_2},i} - h_{\frac{CH_4}{H_2},i} \right)^2 + \left(pp_{\frac{C_2H_4}{C_2H_6},i} - h_{\frac{C_2H_4}{C_2H_6},i} \right)^2}. \quad (27)$$

Rogersova metoda má, oproti poruchám v databázi IEC TC 10, definovány poruchy rozdílně. Tyto rozdíly se vyskytují především u poruch tepelných. Jejich přiřazení k poruchám definovaným v databázi IEC TC 10 bude následující:

- „Normální stav“ – nepřijazeno k žádné z poruch databáze IEC TC 10
- „Částečné výboje“ – v Rogersově metodě i databázi IEC TC 10 se shodují

- „Oblouk“ – přiřazen k poruchám D1 a D2. Ty budou tedy v dalším sloučeny do jedné skupiny ED.
- „Nízká teplota“ a „Teplota < 700 °C“ – sloučeno do skupiny poruch T1,2
- „Teplota > 700 °C“ – přiřazena poruše T3

Vše lze názorně vidět v Tab. 58.

Tab. 58 Poruchy odhalené pomocí Rogersovy metody

		Porucha dle Rogersovy metody						
		Normální stav	PD	ED	T1,2	T3	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	PD	0	2	0	0	0	7	9
	ED	0	0	59	0	0	15	74
	T1,2	0	0	1	7	2	6	16
	T3	0	0	2	2	11	3	18
	Celkem	0	2	62	9	13	31	117

Rogersovou metodou nebylo možné stanovit diagnózu v 18 případech vinou absence měření některých důležitých plynů. V dalších 13 případech nebylo možné tuto diagnózu stanovit z důvodu významné vzdálenosti od všech oblastí definovaných pro jednotlivé poruchy. Rogersova metoda tedy úspěšně stanovila diagnózu pro 79 vzorků z 99 případů (Tab. 58), kdy byly měřeny veškeré potřebné plyny. To činilo úspěšnost 80 %. Do oblasti „Normální stav“ nepadlo žádné pozorování, tudíž bude v Tab. 59 a Tab. 60 zanedbáno.

Tab. 59 Poruchy odhalené pomocí Rogersovy metody – omezení na 3 druhy poruch

		Porucha dle Rogersovy metody				
		PD	ED	TF	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	PD	2	0	0	7	9
	ED	0	59	0	15	74
	TF	0	3	22	9	34
	Celkem	2	62	22	31	117

Při omezení jak na poruchy PD, ED a TF, tak pouze na poruchy EF a TF (Tab. 59), je Rogersova metoda shodně úspěšná v 83 případech z 99, což tentokrát činí úspěšnost 84 %.

Tab. 60 Poruchy odhalené pomocí Rogersovy metody – omezení na 2 druhy poruch

		Porucha dle Rogersovy metody			
		EF	TF	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	EF	61	0	22	83
	TF	3	22	9	34
	Celkem	64	22	31	117

Rogersova metoda dosahuje úspěšnosti při přiřazování poruch do tří kategorií 80 %, při rozdělování poruch do dvou kategorií 84 %.

6.5 METODA C. E. G. B.

Pro případ, kdy měřená koncentrace padne do nedefinované oblasti, bude její vzdálenost od jednotlivých oblastí stanovena pomocí vzorce:

$$v_i = \sqrt{\left(\frac{pp_{CH_4}}{H_2} - \frac{h_{CH_4}}{H_2}\right)^2 + \left(\frac{pp_{C_2H_6}}{CH_4} - \frac{h_{C_2H_6}}{CH_4}\right)^2 + \left(\frac{pp_{C_2H_4}}{C_2H_6} - \frac{h_{C_2H_4}}{C_2H_6}\right)^2 + \left(\frac{pp_{C_2H_2}}{C_2H_4} - \frac{h_{C_2H_2}}{C_2H_4}\right)^2} \quad (28)$$

Metoda C. E. G. B. má definovaných 12 druhů poruch. Jejich přiřazení k jednotlivým poruchám tak, jak jsou prošetřeny v databázi IEC TC 10, bude následující:

- PD – „Částečné výboje“, „Částečné výboje se stopou po výboji“
- D1 – „Přeskok bez síly k dokončení“
- D2 – „Oblouk se silou k dokončení“, „Nepřerušené jiskření s proměnným potenciálem“
- T1,2 – „Přehřátí < 150 °C“, „Přehřátí 150 °C – 200 °C“, „Přehřátí 200 °C – 300 °C“, „Obecné přehřátí vodiče“, „Bludné proudy ve vinutí“
- T3 – „Bludné proudy v jádře a nádobě, přehřáté spoje“.

V oblasti „Normální stav“ se nevyskytla ani jedna z plynových koncentrací, proto bude dále v Tab. 62 a Tab. 63 zanedbána. Metoda C. E. G. B. nebyla schopna přiřadit v 18 případech plynovou koncentraci do vhodné oblasti vinou absence měření určitých požadovaných plynů. Další 3 koncentrace nebylo možné přiřadit vinou významných vzdáleností od všech definovaných oblastí poruch. Metoda C. E. G. B. byla úspěšná v 84 případech z 99 (Tab. 61), kdyby byly k dispozici hodnoty všech potřebných plynů, což činí úspěšnost 85 %.

Omezí-li se možná odezva pouze na poruchy PD, ED a TF, bude metoda C. E. G. B. úspěšná v 87 případech z 99, jak ukazuje Tab. 62. V tomto případě je úspěšnost metody C. E. G. B. 88 %.

Tab. 61 Poruchy odhalené pomocí metody C. E. G. B.

		Porucha dle metody C. E. G. B.							
		Normální stav	PD	D1	D2	T1,2	T3	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	PD	0	2	2	0	0	0	5	9
	D1	0	1	19	0	1	0	5	26
	D2	0	0	0	42	0	3	3	48
	T1,2	0	0	0	1	7	2	6	16
	T3	0	0	0	1	1	14	2	18
	Celkem	0	3	21	44	9	19	21	117

Tab. 62 Poruchy odhalené pomocí metody C. E. G. B. – omezení na 3 druhy poruch

		Porucha dle metody C. E. G. B.				
		PD	ED	TF	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	PD	2	2	0	5	9
	ED	1	61	4	8	74
	TF	0	2	24	8	34
	Celkem	3	65	28	21	117

Při omezení pouze na poruchy EF a TF je tato metoda úspěšná v 90 případech (Tab. 63), což je úspěšnost 91 %.

Metoda C. E. G. B. dosahuje úspěšnosti při přiřazování poruch do pěti kategorií 85 %, při rozdělování poruch do tří kategorií 88 % a při přiřazení poruch do dvou kategorií 91 %.

Tab. 63 Poruchy odhalené pomocí metody C. E. G. B. – omezení na 2 druhy poruch

		Porucha dle metody C. E. G. B.			
		EF	TF	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	EF	66	4	13	83
	TF	2	24	8	34
	Celkem	68	28	21	117

6.6 METODA KLÍČOVÝCH PLYNŮ

Pro metodu klíčových plynů budou pro rozhodnutí, o jakou poruchu se jedná, použita následující kritéria:

- TF – „Přehřátý oleji“, „Přehřátá celulóza“ – přiřazeny plyny, splňující podmínky:

$$Když \left(\text{Nebo} \left(\begin{array}{l} A \left(\begin{array}{l} C_2H_4 > CO; C_2H_4 > H_2; C_2H_4 > CH_4; \\ C_2H_4 > C_2H_6; C_2H_4 > C_2H_2 \end{array} \right); \\ A \left(\begin{array}{l} CH_4 > CO; CH_4 > H_2; \\ CH_4 > C_2H_6; CH_4 > C_2H_4; CH_4 > C_2H_2 \end{array} \right) \end{array} \right); \text{ano; ne} \right), \quad (29)$$

$$Když \left(A \left(\begin{array}{l} CO > H_2; CO > CH_4; CO > C_2H_6; \\ CO > C_2H_4; CO > C_2H_2; \end{array} \right); \text{ano; ne} \right). \quad (30)$$

- PD – „Částečné výboje“ – přiřazeny plyny splňující podmínku:

$$Když \left(\text{Nebo} \left(\begin{array}{l} A \left(\begin{array}{l} H_2 > CO; H_2 > CH_4; H_2 > C_2H_6; \\ H_2 > C_2H_4; H_2 > C_2H_2 \end{array} \right); \\ A \left(\begin{array}{l} CH_4 > CO; CH_4 > H_2; CH_4 > C_2H_6; \\ CH_4 > C_2H_4; CH_4 > C_2H_2 \end{array} \right) \end{array} \right); \text{ano; ne} \right), \quad (31)$$

- ED – „Jiskření v oleji“ – přiřazeny plyny splňující podmínku:

$$Když \left(\text{Nebo} \left(\begin{array}{l} A \left(\begin{array}{l} H_2 > CO; H_2 > CH_4; H_2 > C_2H_6; \\ H_2 > C_2H_4; H_2 > C_2H_2 \end{array} \right); \\ A \left(\begin{array}{l} C_2H_2 > CO; C_2H_2 > H_2; C_2H_2 > CH_4; \\ C_2H_2 > C_2H_6; C_2H_2 > C_2H_4 \end{array} \right) \end{array} \right); \text{ano; ne} \right). \quad (32)$$

Po aplikaci těchto kritérií vyšly jednotlivé poruchy, jak je ukázáno v Tab. 64. Jak lze vidět v (29) až (32), mohou nastat případy, kdy bude porucha přiřazena jak přehřátému oleji, tak částečným výbojům, resp. jak částečným výbojům, tak elektrickým výbojům. V těchto případech, bude-li jedna ze stanovených poruch správná, bude porucha přiřazena této diagnóze.

Metoda klíčových plynů, bude-li vykonána podle kritérií uvedených výše, nedojde k výsledku jen v jednom případě. Ve zbylých případech je úspěšná v 87 případech ze 116, což činí úspěšnost 75 %.

V Tab. 65 lze vidět to samé omezené jen na poruchy EF a TF. Zde byla metoda klíčových plynů úspěšná v 89 případech ze 116, což je tentokrát úspěšnost 77 %.

Tab. 64 Poruchy odhalené pomocí metody klíčových plynů

		Porucha dle metody klíčových plynů				
		PD	ED	TF	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	PD	9	0	0	0	9
	ED	2	49	23	0	74
	TF	2	2	29	1	34
	Celkem	13	51	52	1	117

Tab. 65 Poruchy odhalené pomocí metody klíčových plynů – omezení na 2 druhy poruch

		Porucha dle metody klíčových plynů			
		EF	TF	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	EF	60	23	0	83
	TF	4	29	1	34
	Celkem	64	52	1	117

Metoda klíčových plynů dosahuje úspěšnosti při přiřazování poruch do tří kategorií 75 %, při rozdělování poruch do dvou kategorií 77 %.

6.7 METODA C. S. U. S.

Pro metodu C. S. U. S. budou poruchy rozřazeny do 3 kategorií tak, jak je ukázáno v kap. 5. Výsledky tohoto jsou zobrazeny v Tab. 66. I zde je možné jedné plynové koncentraci přiřadit více než jednu možnou diagnózu. V takovém případě bude zvolena diagnóza správná.

Pro každou plynovou koncentraci vyšlo více možných diagnóz, někdy vyšly dokonce veškeré možné. Vzhledem k tomu, i když odhalila správnou diagnózu ve všech případech, nelze mluvit o spolehlivosti této metody.

Tab. 66 Poruchy odhalené pomocí metody C. S. U. S.

		Porucha dle metody C. S. U. S.				
		PD	ED	TF	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	PD	9	0	0	0	9
	ED	0	74	0	0	74
	TF	0	0	34	0	34
	Celkem	9	74	34	0	117

Pro metodu C. S. U. S. nemá smysl hovořit o její úspěšnosti, její limity, nastavené touto metodou, mnohdy umožňují přiřadit poruchu najednou do všech kategorií.

6.8 SHODNÉ RYSY METOD

Pomocí shodných rysů rozebraných v kap. 5.4.6, se nejprve stanoví pomocí kroku 2, jedná-li se o poruchu elektrickou, či tepelnou. Zvolí-li se poměr $C_2H_2/C_2H_4 \in \langle 0,3; 0,5 \rangle$ vyjdou výsledky uvedené v Tab. 67. K výsledku nebylo možné dojít v 11 případech ze 117. Ze zbylých 106 měření bylo dosaženo správného výsledku ve 105 měřeních, což činilo úspěšnost 99 %.

Tab. 67 Poruchy odhalené pomocí shodných rysů všech metod – 2. krok

		Porucha dle shodných rysů			
		EF	TF	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	EF	78	0	5	83
	TF	1	27	6	34
	Celkem	79	27	11	117

Pomocí kroku 3 se bude nyní vyšetřovat, zda jde o částečné výboje, elektrické výboje, či tepelnou poruchu. Pro poměr $CH_4/H_2 \in \langle 0,05; 0,08 \rangle$ vyjdou výsledky uvedené v Tab. 68. K výsledku nebylo možné dojít v 15 případech ze 117. Ze zbylých 102 měření bylo dosaženo správného výsledku v 99 měřeních, což činilo úspěšnost 97 %.

V posledním kroku zbývá rozdělit závady do všech pěti skupin. Pro rozhodnutí úrovně přehřátí vyšly nejlepší výsledky pro poměr $C_2H_4/C_2H_6 \in \langle 4,7; 5,6 \rangle$, u úrovně elektrických

výbojů pro poměr $C_2H_4/C_2H_6 \in \langle 8,47; 8,49 \rangle$. Výsledek bylo možné docílit v 99 případech ze 117, v těchto případech byla úspěšnost metody 67 %.

Tab. 68 Poruchy odhalené pomoci shodných rysů všech metod – 3. krok

		Porucha dle shodných rysů				
		PD	ED	TF	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	PD	2	2	0	5	9
	ED	1	70	0	3	74
	TF	0	0	27	7	34
	Celkem	3	72	27	15	117

Tab. 69 Poruchy odhalené pomoci shodných rysů všech metod

		Porucha dle shodných rysů						
		PD	D1	D2	T1,2	T3	Nelze	Celkem
Skutečná porucha	PD	2	2	0	0	0	5	9
	D1	0	12	13	0	0	1	26
	D2	1	11	32	0	0	4	48
	T1,2	0	0	0	9	5	2	16
	T3	0	0	0	1	11	6	18
	Celkem	3	25	45	10	16	18	117

Shodné rysy dosahují úspěšnosti při přiřazování poruch do pěti kategorií 67 %, při rozdělování poruch do tří kategorií 97 %, pro dvě poruchy vyšla úspěšnost 99 %.

6.9 CELKOVÝ SOUHRN

V následujícím bude shrnuto výše popsané. Bude určeno, která z metod je nejlepší, chce-li se rozhodnout pouze mezi poruchou elektrickou či tepelnou, mezi částečnými výboji, elektrickými výboji a tepelnou poruchou nebo i stanovit úroveň elektrických výbojů či přehřátí. Vše bylo prošetřeno na databázi IEC TC 10.

6.9.1 ELEKTRICKÁ PORUCHA/TEPELNÁ PORUCHA

Je-li požadavek rozhodnout pouze mezi poruchou elektrickou a tepelnou pro metody ČSN EN 60599, Duvalovu trojúhelníkovou, Doernenburgovu i shodných rysů vychází úspěšnosti nad 95 %. Shodné rysy mají ovšem tu výhodu, že je třeba znalost pouhých dvou plynů.

6.9.2 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE/ELEKTRICKÉ VÝBOJE/TEPELNÁ PORUCHA

Při požadavku o rozhodnutí mezi poruchami částečné výboje, elektrické výboje a tepelná pro metody ČSN EN 60599, Duvalovu trojúhelníkovou, Doernenburgovu a shodných rysů se dostává úspěšnost nad 90 %.

6.9.3 VEŠKERÉ PORUCHY

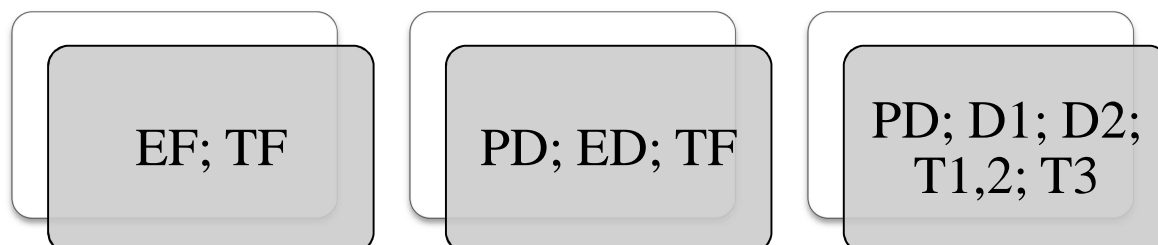
I pro veškeré poruchy vyšly nejlépe metody dle ČSN EN 60599 a Duvala, které opět dosahují úspěšnosti nad 90 %.

6.9.4 CELKEM

Nejlépe se co do schopnosti odhalit skutečnou závadu ukázaly metody ČSN EN 60599 a Duvalova trojúhelníková metoda. U těchto dvou metod se zároveň vyskytovalo nejméně případů, kdy metoda nebyla schopna určit pravděpodobnou diagnózu. Je-li požadavek stanovit pouze širší skupinu možných poruch, je možno volit z více vhodných metod.

7 MATEMATICKÉ METODY VHODNÉ K INTERPRETACI PLYNŮ ROZPUŠTĚNÝCH V OLEJI

V této kapitole bude následovat prošetření, jak se mění nutnost sledování počtu diagnostikovaných plynů rozpuštěných v oleji v závislosti na počtu poruch, resp. počtu kroků vedoucích k diagnóze.

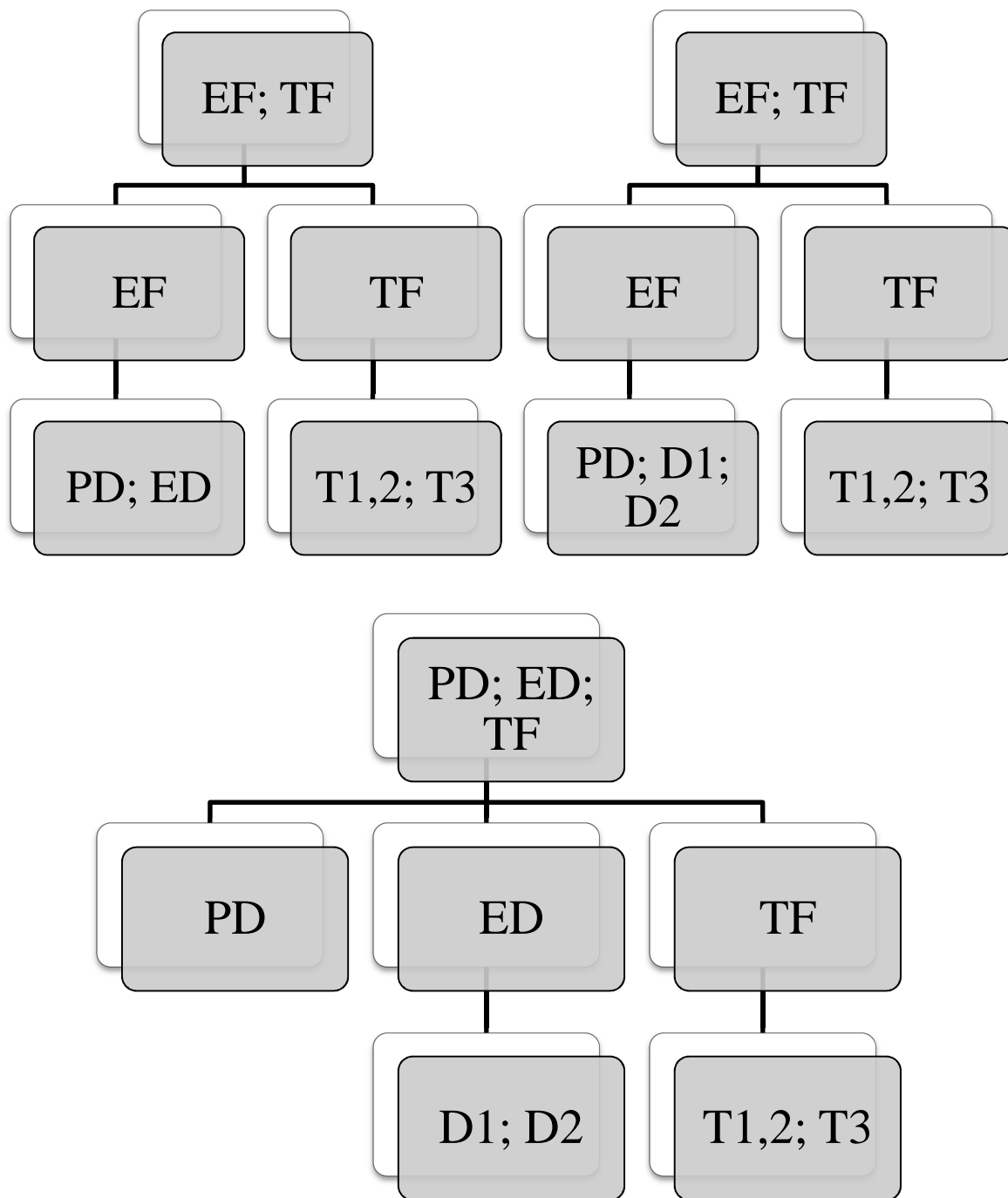


Obr. 27 Rozdělení poruch – 1. krok

Bude-li požadována diagnóza poruchového stavu transformátoru v jednom kroku, lze rozhodovat mezi všemi možnými poruchami z databáze IEC TC 10 a to částečnými výboji, elektrickými výboji o nízké energii, elektrickými výboji o vysoké energii, tepelnou poruchou s teplotou $T < 700\text{ °C}$, či tepelnou poruchou s teplotou $T > 700\text{ °C}$. Tuto množinu lze omezit pouze na zjišťování poruch částečné výboje, elektrické výboje a tepelnou poruchu. Další zúžení omezí zjišťované poruchy na poruchu elektrickou, či tepelnou. Existují i jiné možnosti, mezi jakými poruchami se při jednokrokové diagnóze rozhodovat, ale v následujícím textu budou rozebrány jen výše popsané. Vše lze názorně vidět na Obr. 27.

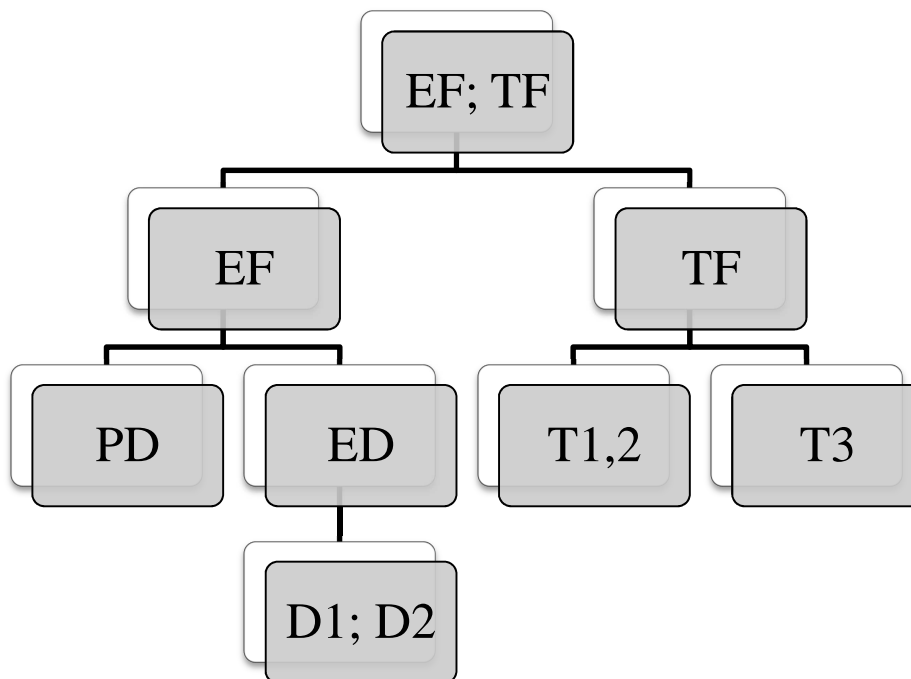
V případě diagnózy pomocí dvou kroků lze dále postupovat podle tří scénářů. Existuje-li dvojice diagnostikovaných poruch elektrická porucha – tepelná porucha, lze tepelnou poruchu dále upřesnit, zda se jedná o tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ °C}$, či tepelnou poruchu s teplotou $T > 700\text{ °C}$. Elektrickou poruchu lze dále rozvést na dvojici poruch částečné výboje a elektrické výboje, či na trojici poruch částečné výboje, elektrické výboje o nízké energii a elektrické výboje o vysoké energii. V případě, že jsme se v prvním kroku rozhodovali o poruše z trojice částečné výboje – elektrické výboje – tepelná porucha, lze v druhém kroku u elektrických výbojů rozhodovat mezi výboji o nízké energii a výboji o vysoké energii. U tepelné poruchy lze dále rozhodovat obdobně, jak je uvedeno výše, tedy mezi tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ °C}$, či tepelnou poruchu s teplotou $T > 700\text{ °C}$. V dalším textu budou prošetřovány pouze postupy znázorněné na Obr. 28.

Pro případ diagnostiky ve třech následných krocích, se nejprve určí jedna z dvojice poruch elektrická porucha – tepelná porucha. Ve druhém kroku se tepelná porucha rozdělí na tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ °C}$, či tepelnou poruchu s teplotou $T > 700\text{ °C}$, elektrická porucha se rozdělí na částečné výboje, či elektrické výboje. Třetí krok bude spočívat v rozložení elektrických výbojů na výboje o nízké energii a výboje o vysoké energii. To lze názorně spatřit na Obr. 29.



Obr. 28 Rozdělení poruch - 2. krok

Pomocí shlukové analýzy budou příslušná pozorování rozdělena do shluků, které budou porovnány se skutečnými poruchami přiřazenými jednotlivým pozorováním. Vydou-li uspokojivé výsledky, tyto budou dále analyzovány. Závislost skutečných poruch na poruchách stanovených dle shlukové analýzy bude prošetřena pomocí testu nezávislosti v kontingenčních tabulkách. Vše je blíže popsáno v příloze.



Obr. 29 Rozdělení poruch – 3. Krok

7.1 ROZDĚLENÍ PORUCH 1. KROK

Nejprve se bude uvažovat, že je požadováno dojít k diagnóze stavu transformátoru hned po prvním kroku. V tomto případě je na výběr ze tří výše diskutovaných možností. Pro každou z možností vyšlo více uspokojivých výsledků. V následujícím z nich bude vybrán vždy jeden reprezentant a ten bude dále rozebrán.

7.1.1 PORUCHY PD x D1 x D2 x T1,2 x T3

Nejprve se bude předpokládat zjišťování všech poruch, tedy poruch částečné výboje, elektrické výboje nízké energie, elektrické výboje vysoké energie, tepelná porucha s teplotou $T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tepelná porucha s teplotou $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pro tyto poruchy vyšly uspokojivé výsledky pouze pro kombinaci plynů $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2$ (metan-etylen-acetylen). Lze si všimnout, že jde o shodnou kombinaci plynů jako u Duvalovy trojúhelníkové metody. Množství jednotlivých plynů bylo vyjádřeno v procentuálním množství z celkového obsahu těchto tří plynů podle rovnic:

$$\%CH_4 = \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}, \quad (33)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}, \quad (34)$$

$$\%C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}. \quad (35)$$

Částečné výboje se vyskytovaly v pozorováních 1 – 4, výboje nízké energie byly v pozorováních 5 – 29, výboje vysoké energie byly v pozorováních 30 – 77, tepelná porucha

s teplotou $T < 700 \text{ }^\circ\text{C}$ byla v pozorováních 78 – 88 a tepelná porucha s teplotou $T > 700 \text{ }^\circ\text{C}$ se vyskytovala v pozorováních 89 – 105. Tato pozorování jsou uvedena v každém dendrogramu na x-ové ose.

Pro tuto kombinaci plynů vyšla shluková analýza uspokojivě pro Metodu nejvzdálenějšího souseda v kombinaci se všemi metrikami pro data původní i pro data standardizovaná. Pro některé z těchto kombinací ovšem vyšly charakteristiky jednotlivých shluků (clusterů) nepatrně odlišně od ostatních. Níže budou konkrétně popsány výsledky pro Metodu nejvzdálenějšího souseda v kombinaci s Euklidovskou metrikou a nestandardizovanými daty.

V tomto případě shluková analýza rozdělila poruchové stavy podle Tab. 70. Pomocí statistiky χ^2 bylo zkoumáno, zda jsou poruchy skutečné a poruchy stanovené dle shlukové analýzy nezávislé. Tato statistika bude porovnána s kritickými hodnotami pro hladiny významnosti $\alpha = 0,05$ a $\alpha = 0,005$. Tyto kritické hodnoty jsou pro 5 možných poruch $\chi_{16}^2(0,05) = 26,30$, resp. $\chi_{16}^2(0,005) = 34,27$, pro 3 možné poruchy $\chi_4^2(0,05) = 9,49$, resp. $\chi_4^2(0,005) = 14,86$ a pro 2 možné poruchy $\chi_1^2(0,05) = 3,84$, resp. $\chi_1^2(0,005) = 7,88$.

Tab. 70 Výsledky pozorování pro vybranou jedнокrokovou metodu

		Poruchy podle shlukové analýzy					
		PD	D1	D2	T12	T3	Celkem
Skutečné poruchy	PD	4	0	0	0	0	4
	D1	0	15	8	2	0	25
	D2	0	9	38	1	0	48
	T12	3	0	0	6	2	11
	T3	0	0	0	2	15	17
	Celkem	7	24	46	11	17	105

Jak lze v Tab. 70 vidět, v tomto uspořádání byla shluková analýza úspěšná v 78 případech ze 105, což činilo úspěšnost 74 %. Při testu, zda jsou poruchy odhalené pomocí shlukové analýzy závislé na poruchách skutečnými, vyšlo testové kritérium $\chi^2 = 207,748$, čímž se zamítla hypotéza o nezávislosti poruch odhalených pomocí shlukové analýzy na poruchách skutečných.

V Tab. 71 jsou uvedeny údaje o každém ze shluků. Součet čtverců uvnitř daného shluku popisuje jeho kompaktnost. Čím je tento součet menší, tím je daný shluk kompaktnější. Průměrná (resp. maximální) vzdálenost od centroidu značí tuto vzdálenost od středu daného shluku. Centroid je tedy vektor středů jednotlivých shluků. Lze vidět, že nejkompaktnější je shluk odpovídající poruše částečné výboje a naopak nejméně kompaktní je shluk odpovídající poruše elektrické výboje vysoké energie, což může být zaviněno nejmenším, resp. největším množstvím pozorování pro danou poruchu.

Tab. 71 Údaje o shlucích

Shluk	Součet čtverců uvnitř shluku	Průměrná vzdálenost od centroidu	Maximální vzdálenost od centroidu
PD	0,052015	0,076780	0,135540
D1	0,496466	0,125346	0,336107
D2	0,895130	0,124261	0,279237
T12	0,225859	0,136581	0,201834
T3	0,430766	0,130996	0,350072

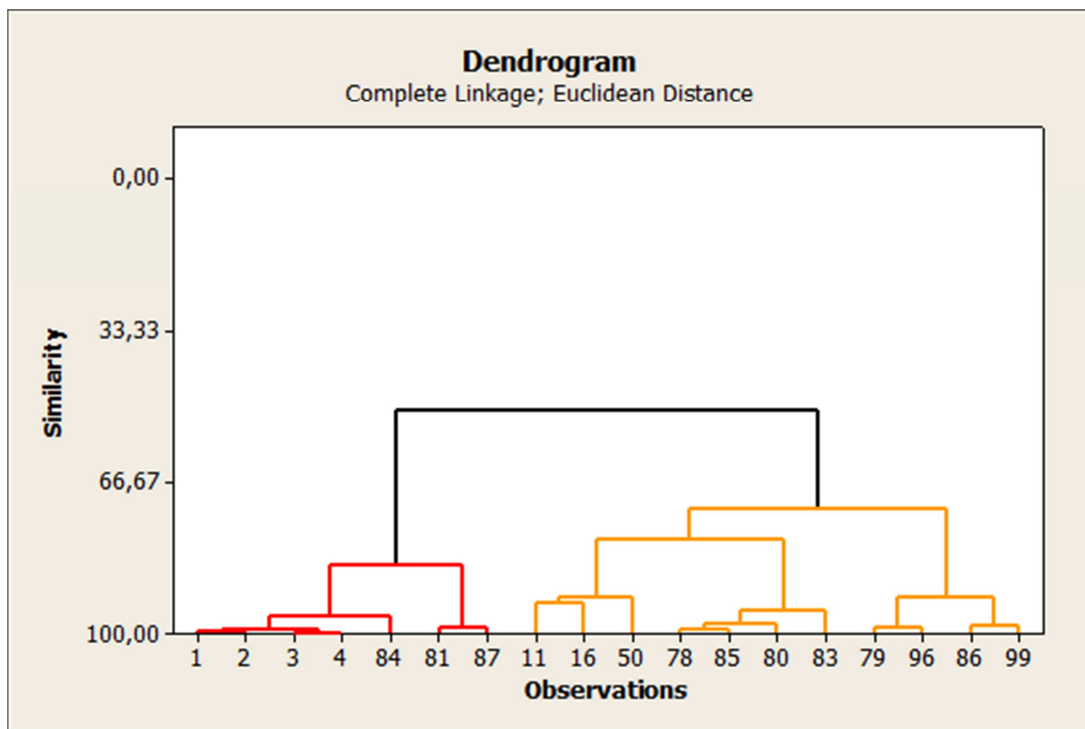
V Tab. 72 jsou uvedeny souřadnice každého z centroidů pro jednotlivé shluky. Jak lze z těchto souřadnic vidět, porucha částečné výboje je v pomyslném rohu jednotkové krychle znázorňující souřadnice těchto sledovaných plynů. Obě tepelné poruchy jsou blízko jedné z ploch této krychle, konkrétně plochy odpovídající malému množství acetyleny. Poruchy elektrické výboje jak nízké, tak vysoké energie jsou v obecném prostoru této jednotkové krychle.

Tab. 72 Centroidy jednotlivých shluků

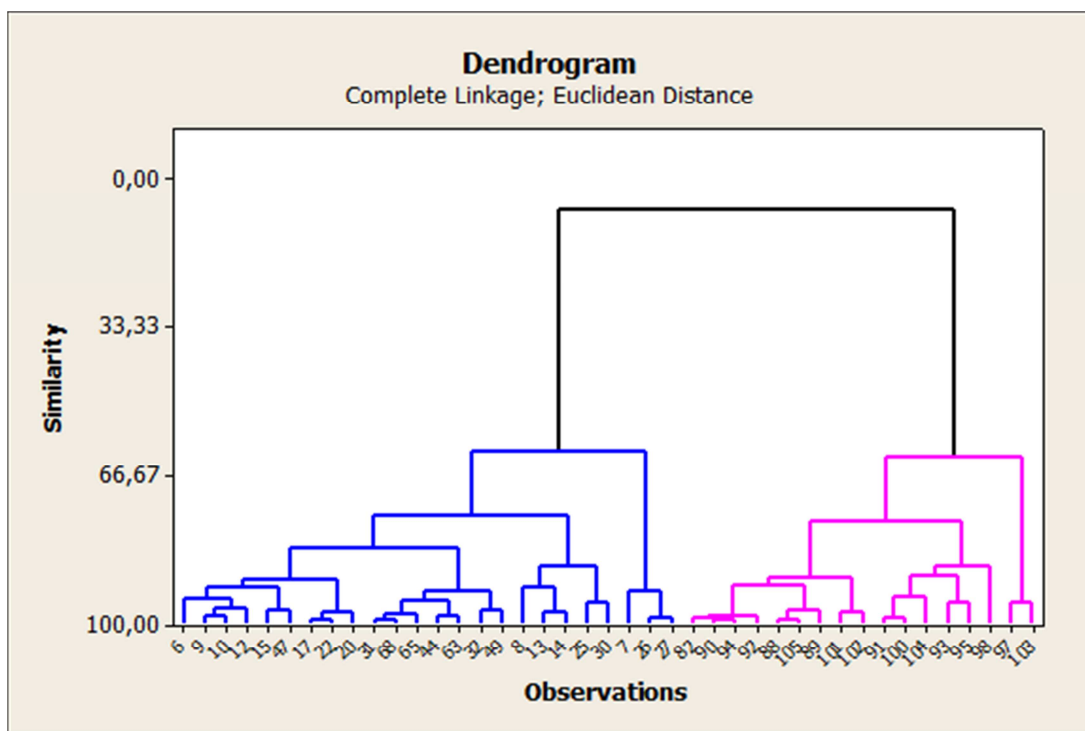
Plyn	PD	D1	D2	T12	T3
CH ₄	0,945549	0,130297	0,294650	0,624106	0,326459
C ₂ H ₄	0,042776	0,205585	0,309024	0,316327	0,639441
C ₂ H ₂	0,011675	0,664118	0,396326	0,059567	0,034100

Na Obr. 30 znázorňuje dendrogram pro shluky reprezentující poruchy částečné výboje (červená barva) a tepelná porucha s teplotou $T < 700$ °C (oranžová barva). Pro poruchu částečné výboje jsou správně data pozorování 1 – 4, pro které je podle tohoto dendrogramu úroveň podobnosti 99,01%. Úroveň podobnosti i s chybnými pozorováními je pak 85 %. Pro tepelnou poruchu s teplotou $T < 700$ °C jsou správná data pozorování 78 – 88. Tato data jsou spolu spojena až na celkové úrovni, která zahrnuje i chybná pozorování a kdy úroveň podobnosti činí 73 %.

Obr. 31 znázorňuje dendrogram shluků poruch elektrické výboje nízké energie (modrá barva) a tepelnou poruchu s teplotou $T > 700$ °C (růžová barva). Správná pozorování pro poruchu elektrické výboje nízké energie jsou spojena až na celkové úrovni obsahující i chybná pozorování, kdy činí úroveň podobnosti 62 %. Pro tepelnou poruchu s teplotou $T > 700$ °C jsou správná pozorování také spojena až na celkové úrovni i s poruchami, tentokrát s úrovní podobnosti 63 %.

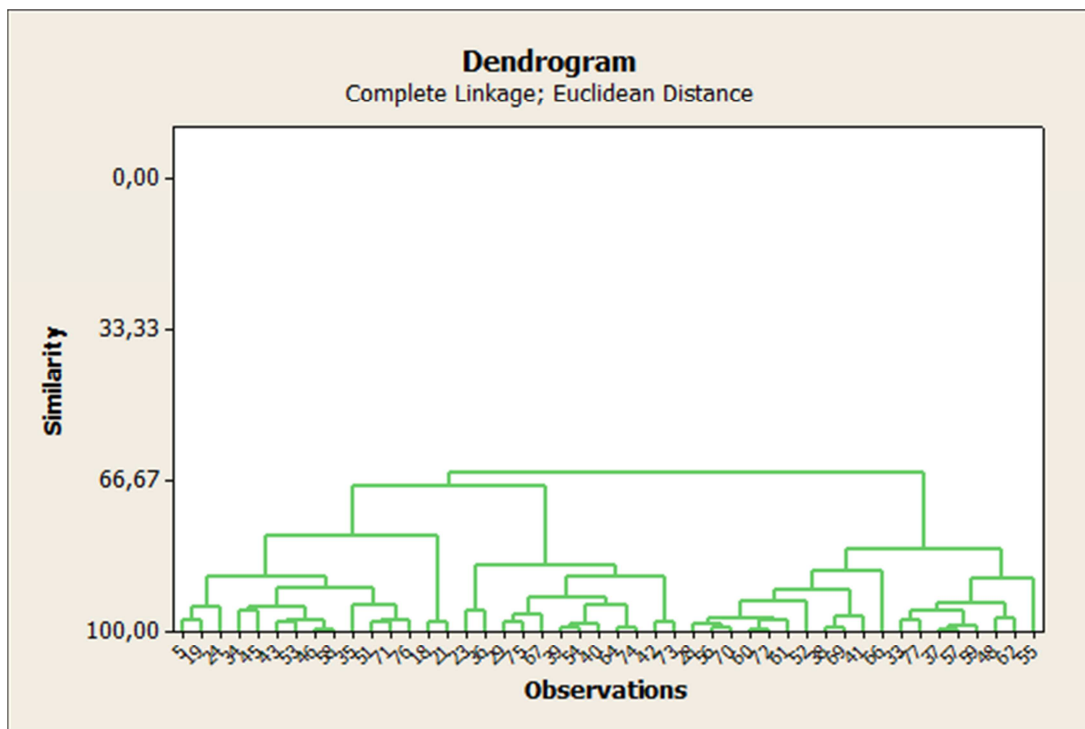


Obr. 30 Dendrogram PD a T12

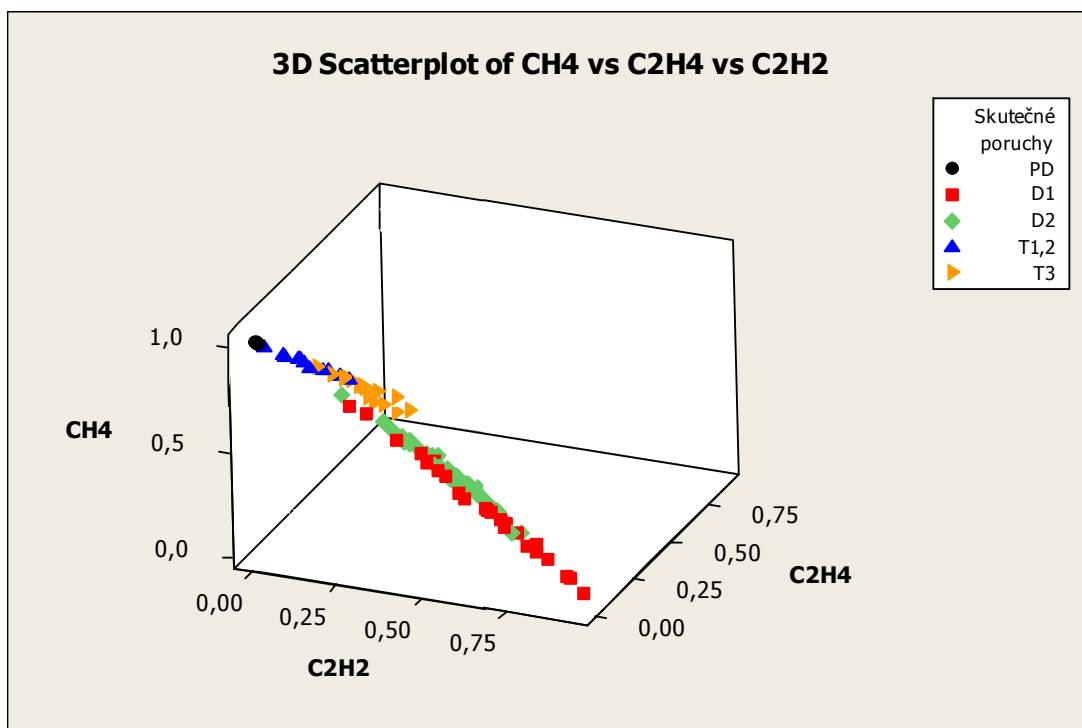


Obr. 31 Dendrogram D1 a T3

Na Obr. 32 je znázorněn dendrogram pro shluk odpovídající poruše elektrické výboje vysoké energie, jejíž správná pozorování jsou opět spojena až na celkové úrovni i s chybnými pozorováními s úrovní podobnosti 65 %.



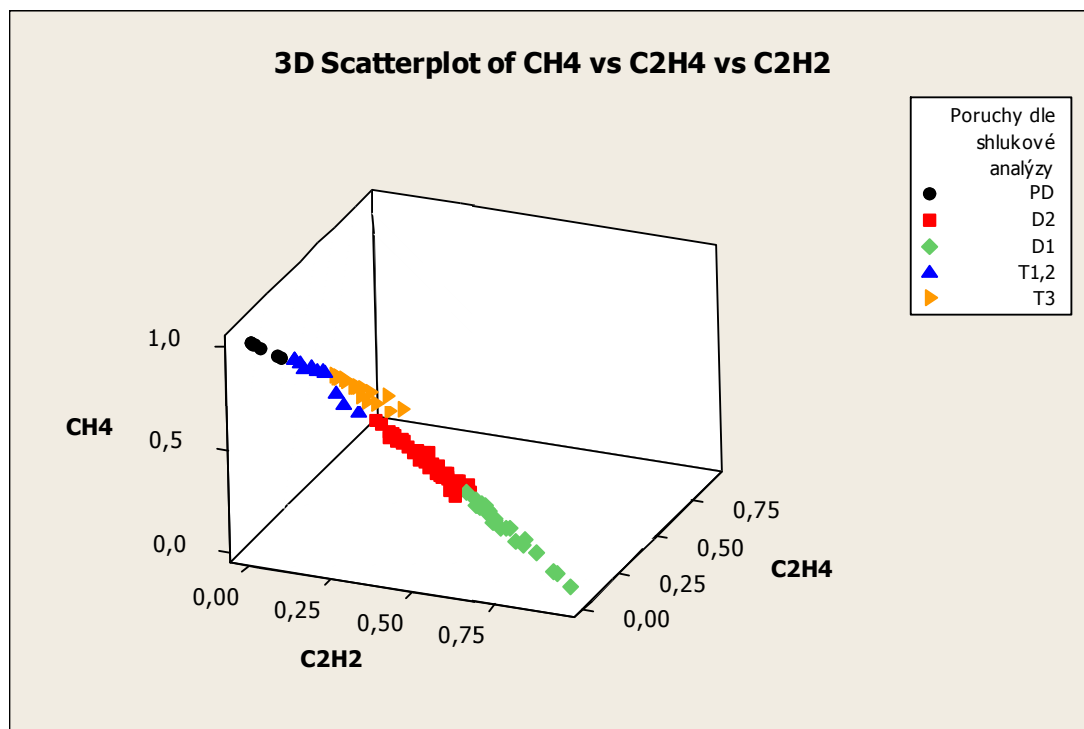
Obr. 32 Dendrogram D2



Obr. 33 Skutečně odhalené poruchy na zařízení

Na Obr. 33 jsou znázorněny naměřené hodnoty skutečných poruch, na Obr. 34 jsou pro porovnání znázorněny neměřené hodnoty poruch podle shlukové analýzy. Na obou obrázcích lze spatřit, že částečné výboje se vyskytují v rohu těchto pomyslných jednotkových krychlí,

tepelné poruchy u plochy reprezentující nízké množství acetylenu, zatímco elektrické výboje jsou obecně v prostoru této krychle, jak plynulo již z Tab. 72.



Obr. 34 Poruchy podle shlukové analýzy

Při požadavku rozhodnout mezi poruchami PD x D1 x D2 x T1,2 x T3 byly shlukovou analýzou dosaženy nejlepší výsledky pro kombinaci plynů CH₄-C₂H₄-C₂H₂ shluknutých pomocí Metody nejvzdálenějšího souseda, za použití Euklidovské metriky. Správný výsledek byl odhalen v 74 % případů.

7.1.2 PORUCHY PD x ED x TF

Nyní bude provedeno sloučení některých z poruch. Budou se tedy zjišťovat pouze poruchy částečné výboje, elektrické výboje a tepelná porucha.

Pro tyto poruchy vycházely uspokojivé výsledky pro různé kombinace plynů (kromě dále rozebrané také CH₄-C₂H₄-C₂H₂, C₂H₄-C₂H₂-H₂-CO, C₂H₆-C₂H₄-C₂H₂-CO₂, CH₄-C₂H₄-C₂H₂-CO, C₂H₆-C₂H₄-C₂H₂-CO, C₂H₆-C₂H₄-C₂H₂-H₂-CO, CH₄-C₂H₄-C₂H₂-CO₂-CO, C₂H₄-C₂H₂-H₂-CO₂-CO, CH₄-C₂H₄-C₂H₂-H₂-CO₂-CO a CH₄-C₂H₆-C₂H₄-C₂H₂-H₂-CO) a pro jejich různé kombinace shlukovacích metod a metrik. Nejlepších výsledků bylo dosaženo pro kombinaci plynů C₂H₆-C₂H₄-C₂H₂ (etan-etylen-acetylen). Množství jednotlivých plynů je vyjádřeno v procentuálním množství z celkového obsahu těchto tří plynů, jak znázorňují následující rovnice:

$$\%C_2H_6 = \frac{C_2H_6}{C_2H_6 + C_2H_4 + C_2H_2}, \quad (36)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6 + C_2H_4 + C_2H_2}, \quad (37)$$

$$\%C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_6 + C_2H_4 + C_2H_2}. \quad (38)$$

Částečné výboje se vyskytovaly v pozorováních 1 – 4, elektrické výboje byly přítomné v pozorováních 5 – 73 a tepelná porucha v pozorováních 74 – 100. Tato pozorování jsou opět uvedena v každém dendrogramu na x-ové ose.

Pro tuto kombinaci plynů vyšla shluková analýza uspokojivě pro veškeré shlukovací metody v kombinaci s různými metrikami jak pro data původní, tak pro data standardizovaná. Níže budou popsány konkrétně výsledky pro Metodu nejvzdálenějšího souseda v kombinaci s Euklidovskou metrikou pro nestandardizovaná data.

Poruchové stavy byly rozloženy tak, jak zobrazuje Tab. 73. Pomocí statistiky χ^2 bylo opět zkoumáno, zda jsou poruchy skutečné a poruchy stanovené dle shlukové analýzy nezávislé. Tato statistika bude porovnána s kritickými hodnotami pro hladiny významnosti $\alpha = 0,05$ a $\alpha = 0,005$. Kritické hodnoty jsou stejné, jako byly v 7.1.1.

Tab. 73 Výsledky pozorování pro vybranou jednkrokovou metodu

		Poruchy podle shlukové analýzy			
		PD	ED	TF	Celkem
Skutečné poruchy	PD	4	0	0	4
	ED	0	69	0	69
	TF	2	1	24	27
	Celkem	6	70	24	100

Podle Tab. 73 byla v tomto uspořádání shluková analýza úspěšná v 97 případech ze 100, což činilo úspěšnost 97 %. Při testu, zda je mezi poruchami skutečnými a odhalenými pomocí shlukové analýzy nezávislost, vyšlo testové kritérium $\chi^2 = 156,649$. Hypotéza o nezávislosti skutečných poruch a poruch stanovených dle shlukové analýzy tedy byla zamítnuta.

Tab. 74 Údaje o shlucích

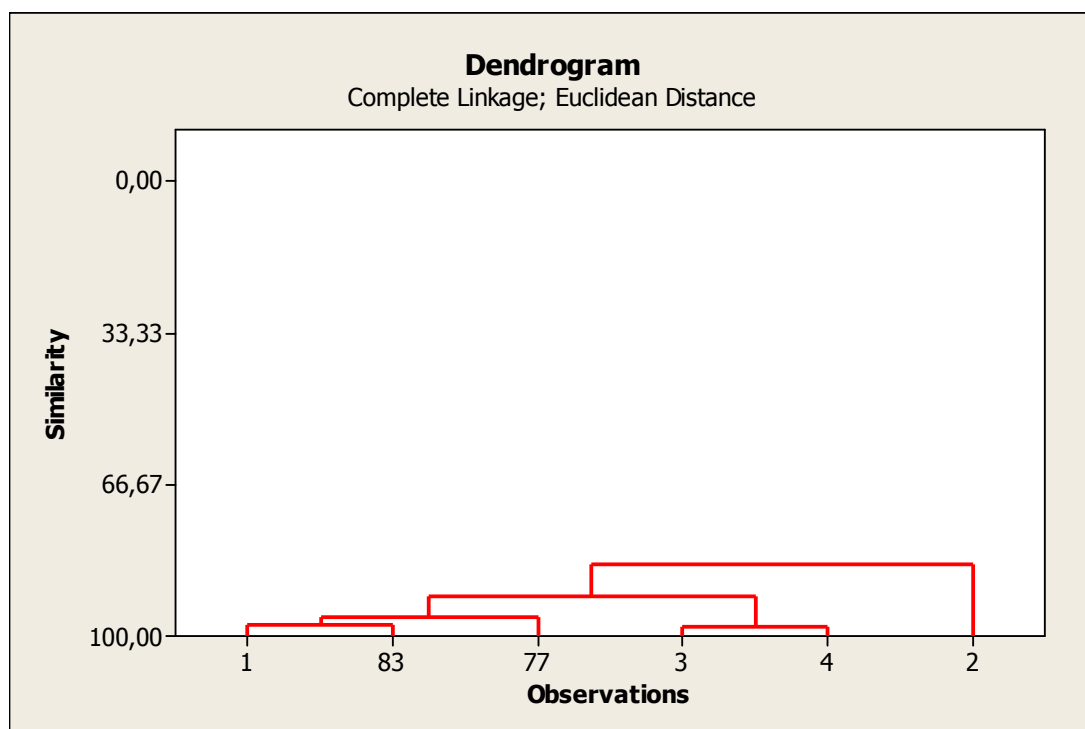
Shluk	Součet čtverců uvnitř shluku	Průměrná vzdálenost od centroidu	Maximální vzdálenost od centroidu
PD	0,03057	0,059117	0,133741
ED	3,08711	0,180343	0,475537
TF	0,93676	0,165443	0,443433

V Tab. 74 jsou uvedeny údaje o každém ze shluků. Opět lze vidět, že nejkompaktnější je shluk náležící k částečným výbojům, oproti nejméně kompaktnímu shluku reprezentujícímu elektrické výboje. I zde, stejně jako v kap. 7.1.1, může být viníkem počet pozorování jednotlivých poruch. U shluku reprezentujícího částečné výboje navíc poklesly jak průměrná, tak maximální vzdálenost od centroidu.

Tab. 75 Centroidy jednotlivých shluků

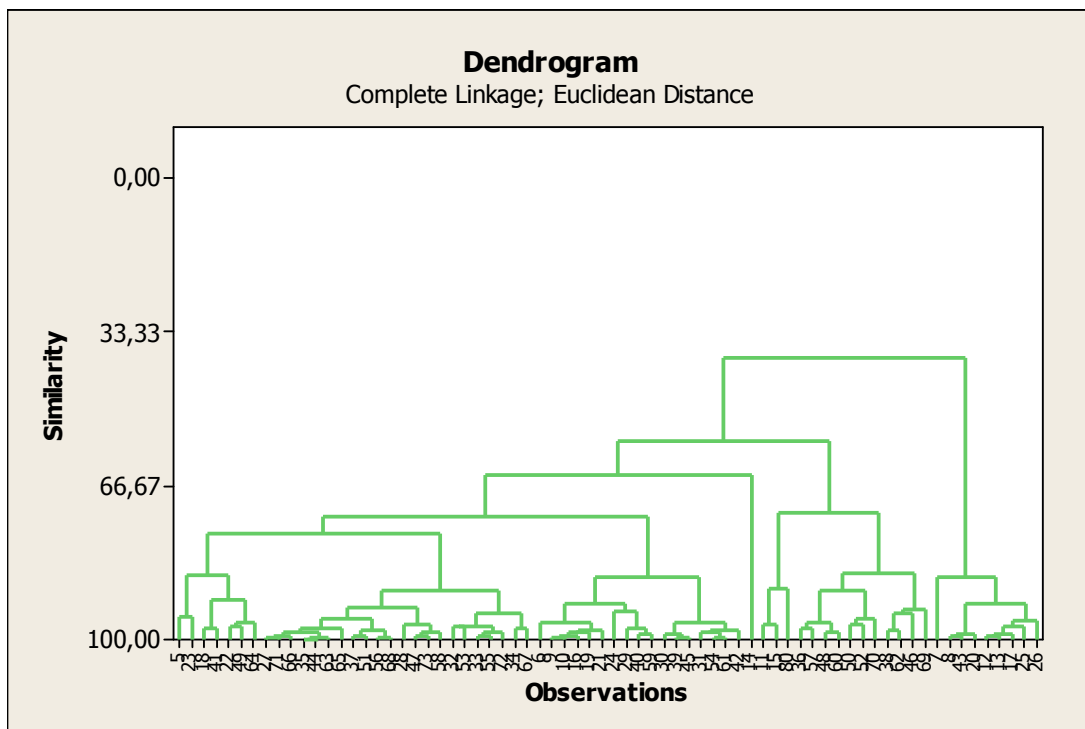
Plyn	PD	ED	TF
C ₂ H ₆	0,930016	0,068245	0,205601
C ₂ H ₄	0,041536	0,351582	0,760404
C ₂ H ₂	0,028448	0,580173	0,033995

V Tab. 75 jsou uvedeny souřadnice každého z centroidů pro jednotlivé shluky. Shluk odpovídající částečným výbojům se opět nachází v rohu pomyslné jednotkové krychle reprezentující dané sledované plyny. Shluky, reprezentující elektrické výboje, resp. tepelnou poruchu, leží poblíž ploch reprezentující nízká množství etanu, resp. acetyleny.



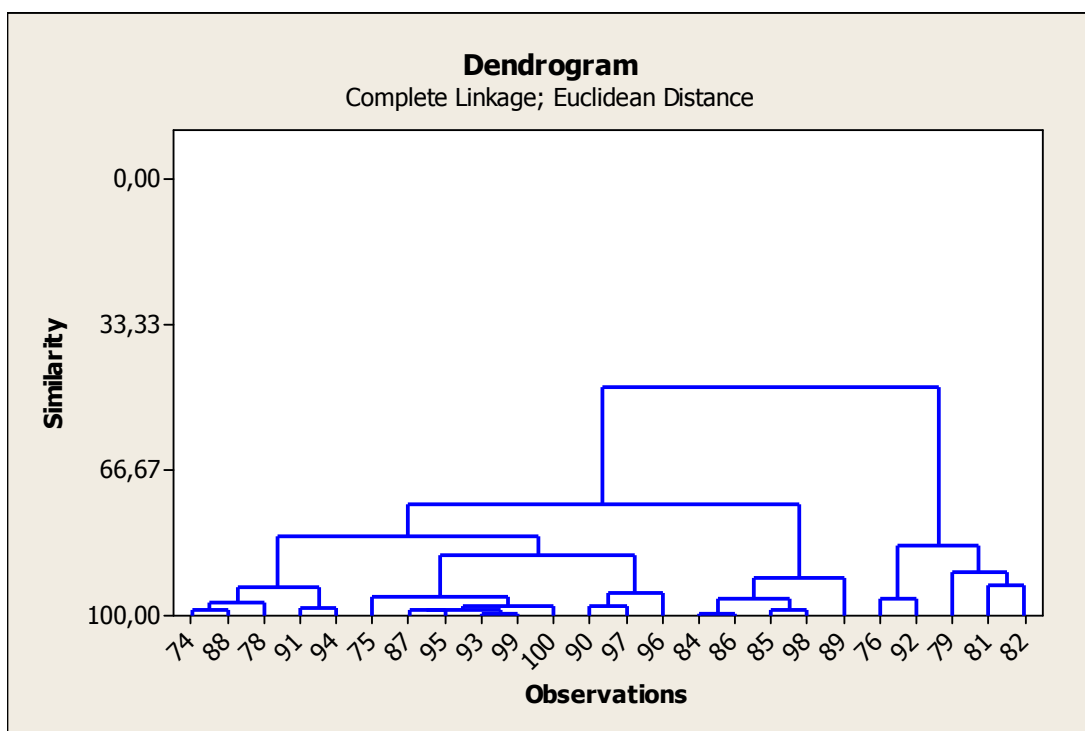
Obr. 35 Dendrogram PD

Na Obr. 35 je znázorněn dendrogram pro shluk reprezentující částečné výboje. Pro tuto poruchu jsou správná data pozorování 1 – 4, která jsou spojena až na celkové úrovni i s chybnými pozorováními, kdy je úroveň podobnosti 84 %.



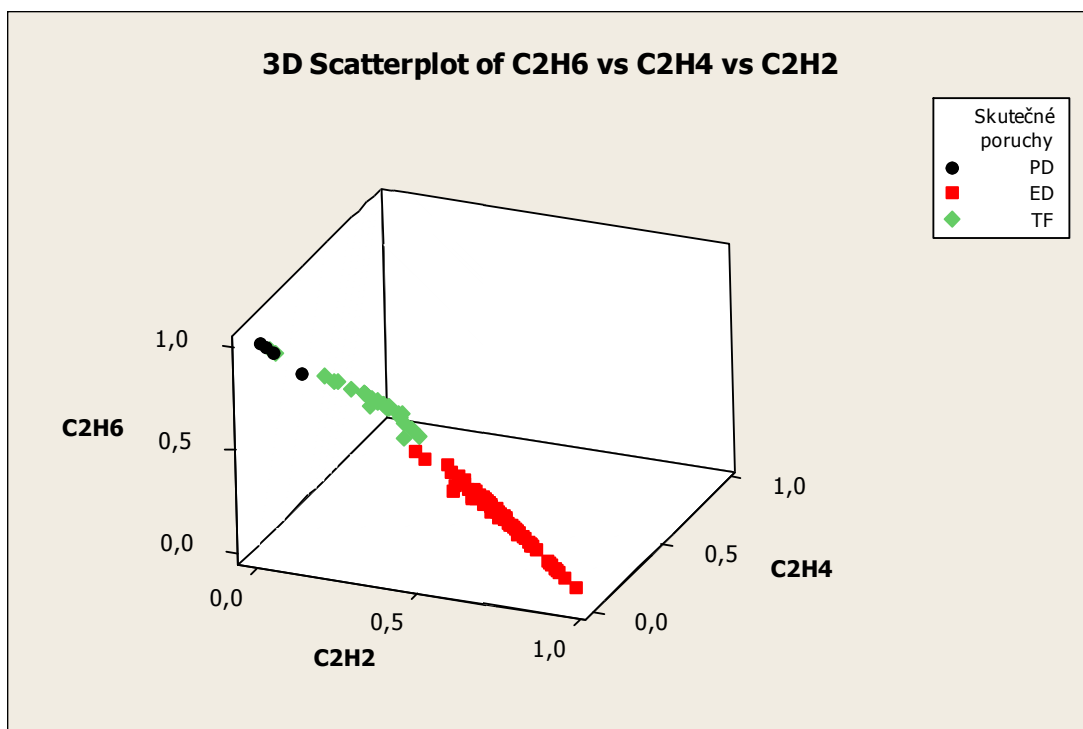
Obr. 36 Dendrogram ED

Obr. 36 znázorňuje dendrogram pro shluk reprezentující elektrické výboje. Správná pozorování pro elektrické výboje jsou spojena až na celkové úrovni zahrnující i chybná pozorování, kdy činila úroveň podobnosti 39 %.

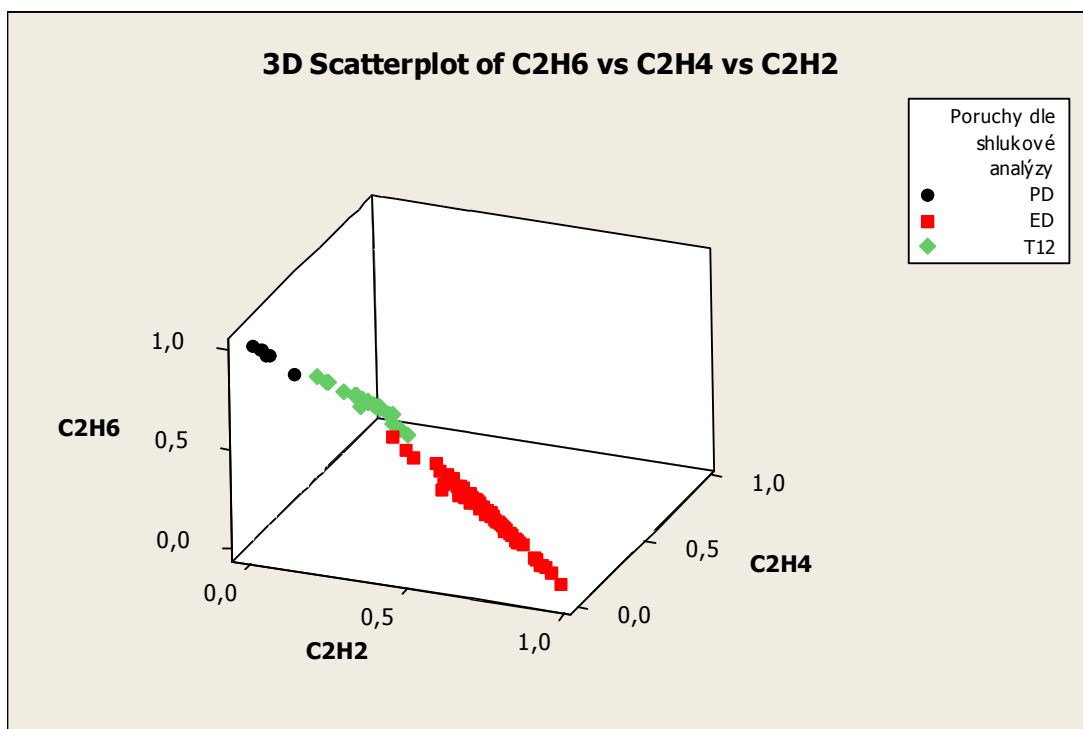


Obr. 37 Dendrogram TF

Na Obr. 37 je znázorněn dendrogram pro shluk elektrickou poruchu, jehož správná pozorování 74 až 100 jsou opět spojena až na celkové úrovni i s pozorováními chybnými, kdy úroveň podobnosti činila 48 %.



Obr. 38 Skutečně odhalené poruchy na zařízení



Obr. 39 Poruchy podle shlukové analýzy

Na Obr. 38 jsou znázorněny naměřené hodnoty pro skutečné poruchy, na Obr. 39 jsou tyto hodnoty znázorněny pro poruchy určené shlukovou analýzou.

Při požadavku rozhodnout mezi poruchami PD x ED x TF byly shlukovou analýzou dosaženy nejlepší výsledky pro kombinaci plynů C₂H₆-C₂H₄-C₂H₂ shluknutých pomocí Metody nejvzdálenějšího souseda, za použití Euklidovské metriky. Správný výsledek byl odhalen v 97 % případů.

7.1.3 PORUCHY EF x TF

V této kapitole budou po sloučení prošetřovány pouze dva druhy poruch, a to porucha elektrická a porucha tepelná.

Kombinace plynů, pro které vycházely uspokojivé výsledky, kromě té v této kapitole dále podrobně rozebrané, byly C₂H₆-C₂H₂, CH₄-C₂H₂, CH₄-H₂, CH₄-C₂H₄-C₂H₂, C₂H₄-C₂H₂-H₂, CH₄-C₂H₆-C₂H₂, CH₄-C₂H₆-H₂, C₂H₄-C₂H₂-CO, CH₄-C₂H₂-H₂, CH₄-C₂H₆-C₂H₄-C₂H₂, CH₄-C₂H₄-C₂H₂-H₂, C₂H₆-C₂H₄-C₂H₂-H₂, CH₄-C₂H₂-H₂-CO, CH₄-C₂H₆-C₂H₄-C₂H₂-H₂, C₂H₆-C₂H₄-C₂H₂-H₂-CO, CH₄-C₂H₄-C₂H₂-H₂-CO a CH₄-C₂H₆-C₂H₄-C₂H₂-H₂-CO. Pro tyto kombinace plynů vycházely uspokojivé výsledky pro různé kombinace shlukovacích metod a metrik. Nejlepších výsledků bylo dosaženo pro kombinaci plynů C₂H₄-C₂H₂ (etylen-acetylen). Množství jednotlivých plynů je vyjádřeno v procentuálním množství z celkového obsahu těchto dvou plynů tak, jak je znázorněno v následujících rovnicích:

$$\%C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{C_2H_4 + C_2H_2}, \quad (39)$$

$$\%C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4 + C_2H_2}. \quad (40)$$

Elektrická porucha se vyskytovala v pozorováních 1 – 78 a tepelná porucha byla přítomna v pozorováních 79 – 106. Tato pozorování jsou opět uvedena v každém dendrogramu na x-ové ose.

Pro tuto kombinaci plynů vyšla shluková analýza uspokojivě pro veškeré shlukovací metody v kombinaci se všemi metrikami jak pro data původní, tak pro data standardizovaná, s výjimkou Mediánové metody, u které byly dosaženy uspokojivé výsledky jen pro některé metriky. Níže budou popsány konkrétně výsledky pro Metodu nejvzdálenějšího souseda v kombinaci s Euklidovskou metrikou pro nestandardizovaná data.

Poruchové stavy byly rozloženy tak, jak zobrazuje Tab. 76. Pomocí statistiky χ^2 bylo opět zkoumáno, zda jsou poruchy skutečné a poruchy stanovené dle shlukové analýzy nezávislé. Tato statistika bude porovnána s kritickými hodnotami pro hladiny významnosti $\alpha = 0,05$ a $\alpha = 0,005$. Kritické hodnoty jsou stejné, jako byly v kap. 7.1.1.

Podle Tab. 76 byla při tomto uspořádání shluková analýza úspěšná ve 105 případech ze 106, což činilo úspěšnost 99 %. Při testu, zda je mezi poruchami skutečnými a odhalenými pomocí shlukové analýzy nezávislost vyšlo testové kritérium $\chi^2 = 100,920$, tudíž hypotéza o nezávislosti skutečných poruch a poruch dle shlukové analýzy byla zamítnuta.

Tab. 76 Výsledky pozorování pro vybranou jednokrokovou metodu

		Poruchy podle shlukové analýzy		
		EF	TF	Celkem
Skutečné poruchy	EF	78	0	78
	TF	1	27	28
	Celkem	79	27	106

Tab. 77 Údaje o shlucích

Shluk	Součet čtverců uvnitř shluku	Průměrná vzdálenost od centroidu	Maximální vzdálenost od centroidu
EF	2,82374	0,155863	0,469107
TF	0,20464	0,073221	0,207247

V Tab. 77 jsou uvedeny údaje o každém ze shluků. Shluk reprezentující tepelnou poruchu je dle všech kritérií v této tabulce mnohem kompaktnější než shluk reprezentující poruchu elektrickou, což může být zaviněno menším počtem pozorování jednotlivých poruch.

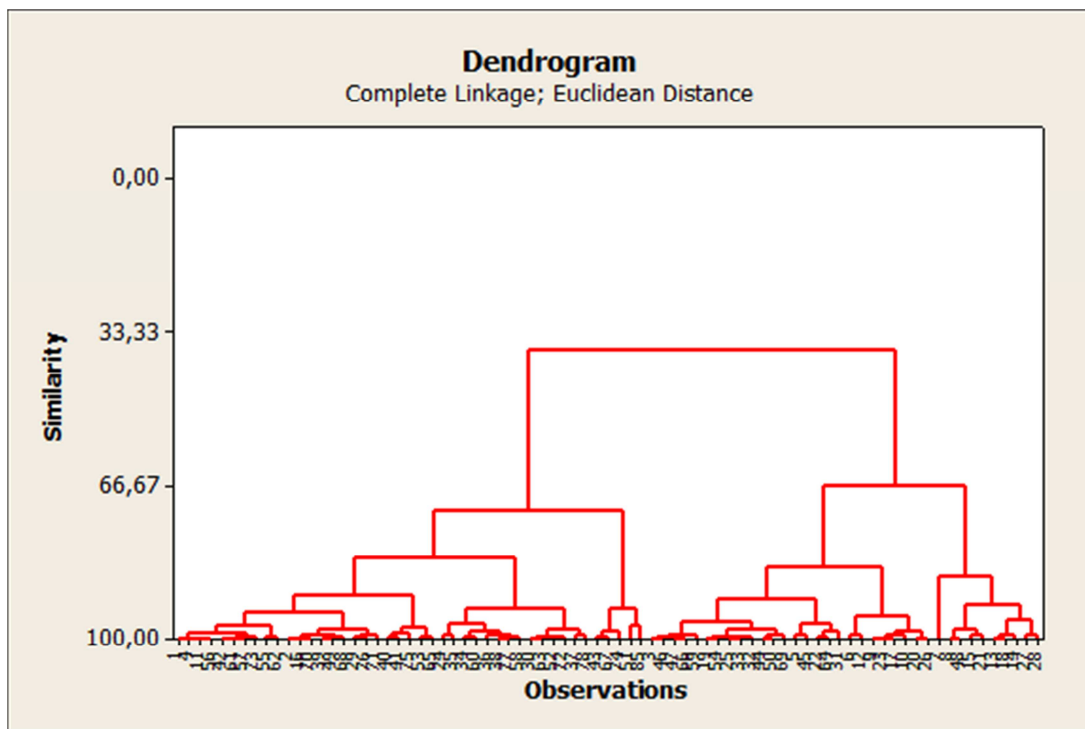
Tab. 78 Centroidy jednotlivých shluků

Plyn	EF	TF
C ₂ H ₄	0,382890	0,946546
C ₂ H ₂	0,617110	0,053454

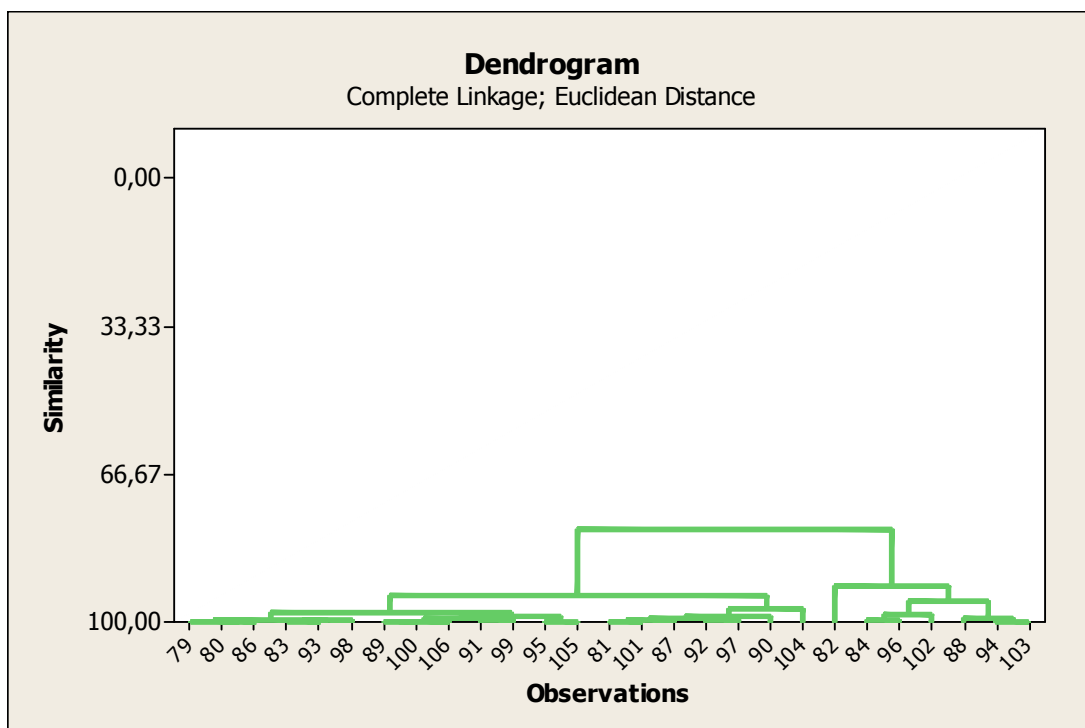
V Tab. 78 jsou uvedeny souřadnice každého z centroidů pro jednotlivé shluky. Shluk tepelné poruchy se nachází v rohu jednotkového čtverce reprezentujícího dané sledované plyny, konkrétně v rohu značícím nízký obsah acetyleny oproti vysokému obsahu etylenu. Shluk reprezentující elektrickou poruchu je od hranic tohoto čtverce vzdálen.

Obr. 40 znázorňuje dendrogram pro shluk elektrické poruchy. Správná pozorování pro elektrickou poruchu jsou spojena až na celkové úrovni spolu s pozorováními chybnými, kdy činila úroveň podobnosti 37 %.

Na Obr. 41 je znázorněn dendrogram pro shluk reprezentující tepelnou poruchu, jež se skládá pouze ze správných pozorování. Jejich úroveň podobnosti činila 79 %.

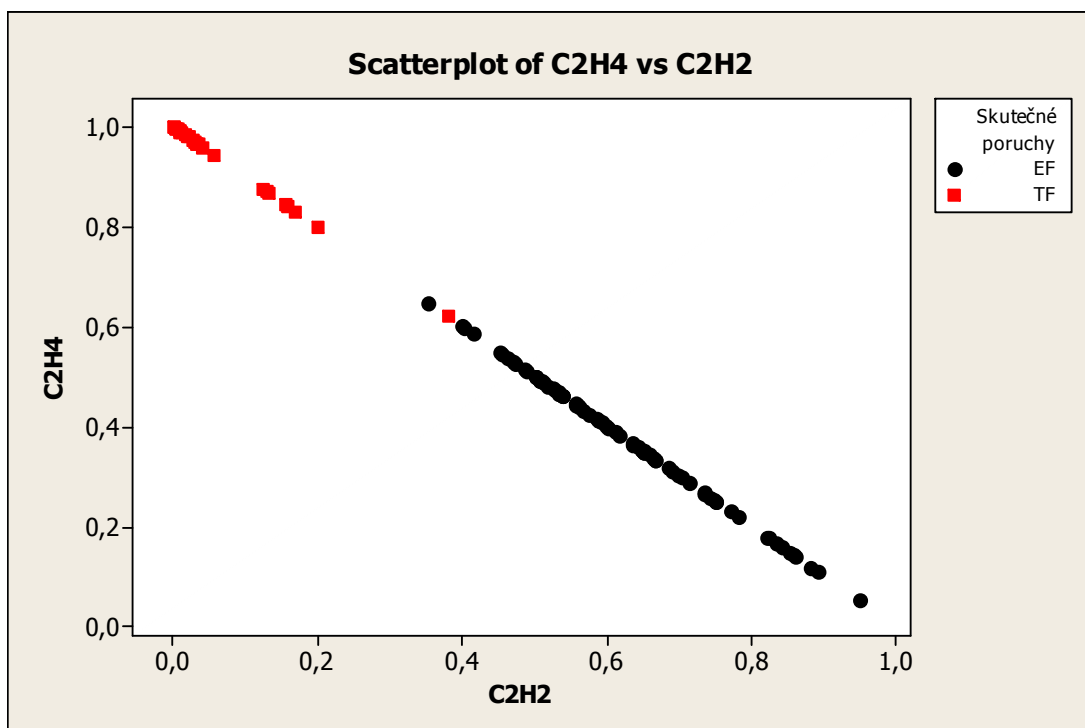


Obr. 40 Dendrogram EF

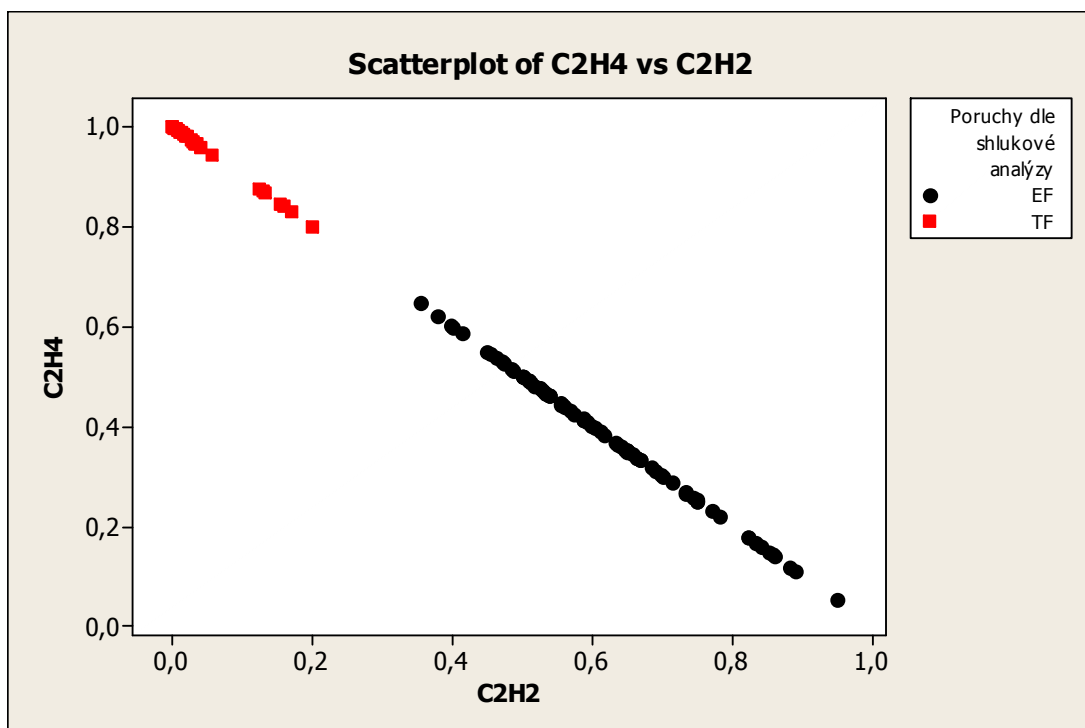


Obr. 41 Dendrogram TF

Na Obr. 42 jsou znázorněny naměřené hodnoty pro skutečné poruchy, na Obr. 43 pro poruchy podle shlukové analýzy.



Obr. 42 Skutečně odhalené poruchy na zařízení



Obr. 43 Poruchy podle shlukové analýzy

Při požadavku rozhodnout mezi poruchami EF x TF byly shlukovou analýzou dosaženy nejlepší výsledky pro kombinaci plynů C₂H₄-C₂H₂ shluknutých pomocí Metody nejvzdálenějšího souseda, za použití Euklidovské metriky. Správný výsledek byl odhalen v 99 % případů.

7.2 ROZDĚLENÍ PORUCH 2. KROK

V této části bude požadováno dojít k pravděpodobné diagnóze poruchy po dvou krocích. Jsou zde tři možnosti, které jsou znázorněny v Obr. 28. Pro každou z těchto možností bude vybrán jeden z reprezentantů uspokojivých výsledků a ten bude dále podrobněji rozebrán.

7.2.1 PORUCHY EF (PD x ED) x TF (T1,2 x T3)

První krok, zda se jedná o poruchu elektrickou či tepelnou byl popsán výše v kap. 7.1.3. Nyní bude uvedeno, jak se z elektrických resp. tepelných poruch stanoví, zda se jedná o částečné výboje nebo elektrické výboje, resp. zda se jedná o tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, nebo tepelnou poruchu s teplotou $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Nejprve bude pojednáno o rozhodnutí, zda se jedná o částečné výboje nebo výboje elektrické. Zde vycházely uspokojivé výsledky (kromě kombinace plynů podrobněji diskutované níže) pro kombinace plynů $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-CO}_2$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2$, $\text{C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-H}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-CO}_2$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-CO}_2$, $\text{C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}_2$, $\text{C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-CO}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-H}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-CO}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-H}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-CO}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$ a $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2\text{-H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$. Pro tyto kombinace plynů vycházely uspokojivé výsledky pro různé kombinace shlukovacích metod a metrik. V dalším bude konzultována kombinace plynů $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2$ (metanetylen-acetylen). Množství jednotlivých plynů bylo vyjádřeno v procentuálním množství z celkového obsahu těchto tří plynů tak, jak je znázorněno v rovnicích:

$$\%CH_4 = \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}, \quad (41)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}, \quad (42)$$

$$\%C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}. \quad (43)$$

Částečné výboje se vyskytovaly v pozorováních 1 – 4 a elektrické výboje v pozorováních 5 – 77. Tato pozorování jsou opět uvedena v každém dendrogramu na x-ové ose.

Pro tuto kombinaci plynů vyšla shluková analýza uspokojivě pro veškeré shlukovací metody v kombinaci s různými metrikami jak pro data původní, tak pro data standardizovaná. Pro některé z těchto kombinací ovšem vyšly odlišné charakteristiky jednotlivých shluků. Níže

budou popsány výsledky konkrétně pro Metodu nejvzdálenějšího souseda v kombinaci s Euklidovskou metrikou pro nestandardizovaná data.

Skutečné poruchy a poruchy dle shlukové analýzy byly rozloženy tak, jak zobrazuje Tab. 79. Pomocí statistiky χ^2 bylo zkoumáno, zda jsou poruchy skutečné a poruchy stanovené dle shlukové analýzy nezávislé. Tato statistika bude porovnána s kritickými hodnotami uvedenými v kap. 7.1.1.

Tab. 79 Výsledky pozorování pro vybranou metriku

		Poruchy podle shlukové analýzy		
		PD	ED	Celkem
Skutečné poruchy	PD	4	0	4
	ED	0	73	73
	Celkem	4	73	77

Podle Tab. 79 byla při tomto uspořádání shluková analýza úspěšná v 77 případech ze 77, což činilo úspěšnost 100 %. Při testu, zda je mezi poruchami skutečnými a odhalenými pomocí shlukové analýzy nezávislost vyšlo testové kritérium $\chi^2 = 77$. Ovšem některé z teoretických četností byly nižších než 5, tj. výsledek nemusí být relevantní. Proto byl vykonán Fisherův faktoriálový test, kdy vyšla statistika $P = 7,4 \times 10^{-7}$, tudíž byla zamítnuta hypotéza o nezávislosti diagnostikovaných poruch na poruchách skutečných na hladině významnosti $\alpha \geq P$.

Tab. 80 Údaje o shlucích

Shluk	Součet čtverců uvnitř shluku	Průměrná vzdálenost od centroidu	Maximální vzdálenost od centroidu
PD	0,00012	0,005208	0,007519
ED	3,76583	0,195222	0,565983

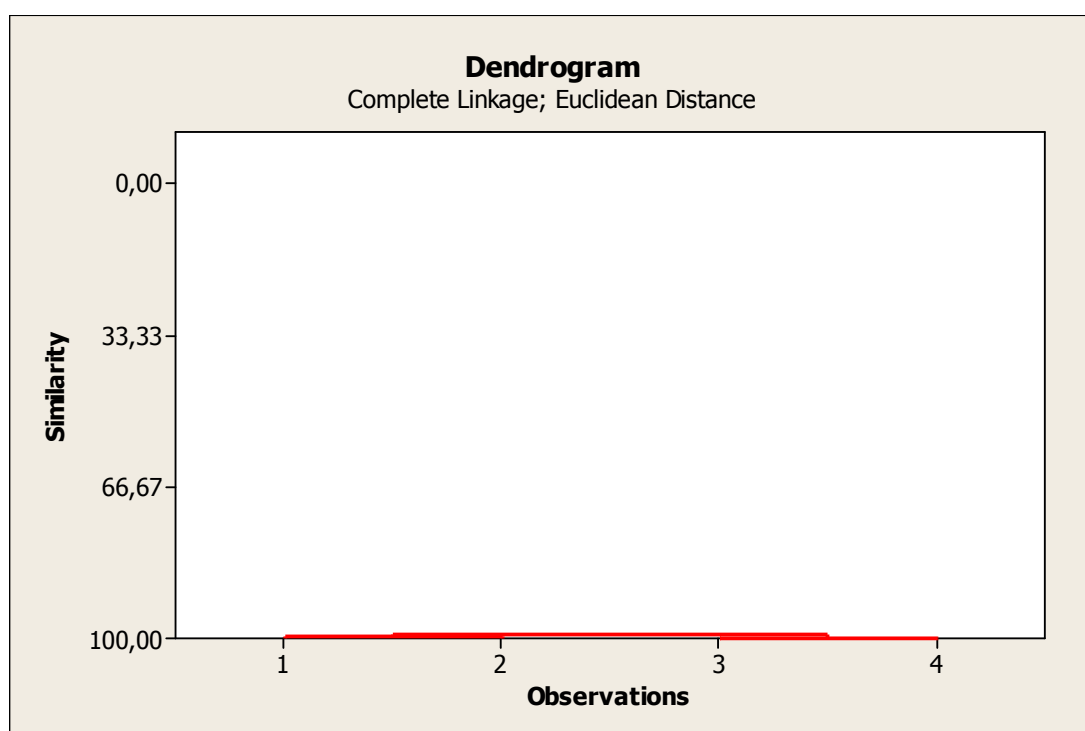
V Tab. 80 jsou uvedeny údaje o každém ze shluků. Shluk reprezentující částečné výboje je dle všech kritérií v této tabulce mnohem kompaktnější než shluk reprezentující elektrické výboje.

V Tab. 81 jsou uvedeny souřadnice každého z centroidů pro jednotlivé shluky. Centroid shluku reprezentujícího poruchu částečné výboje se nachází v rohu jednotkové krychle reprezentující hodnoty těchto sledovaných plynů. Centroid shluku reprezentujícího poruchu elektrické výboje je oproti tomu v obecném prostoru této jednotkové krychle.

Tab. 81 Centroidy jednotlivých shluků

Plyn	PD	ED
CH ₄	0,993236	0,253011
C ₂ H ₄	0,003125	0,271214
C ₂ H ₂	0,003638	0,475775

Obr. 44 znázorňuje dendrogram pro shluk reprezentující částečné výboje. Úroveň podobnosti v tomto případě činí 99,01%.

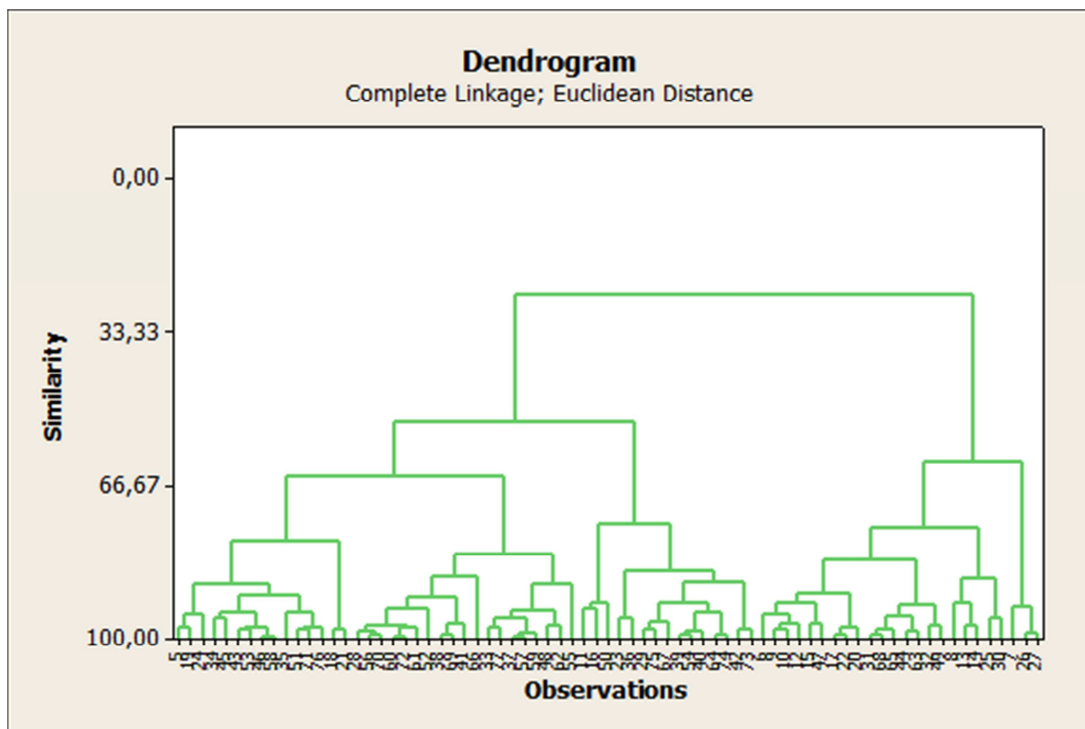


Obr. 44 Dendrogram PD

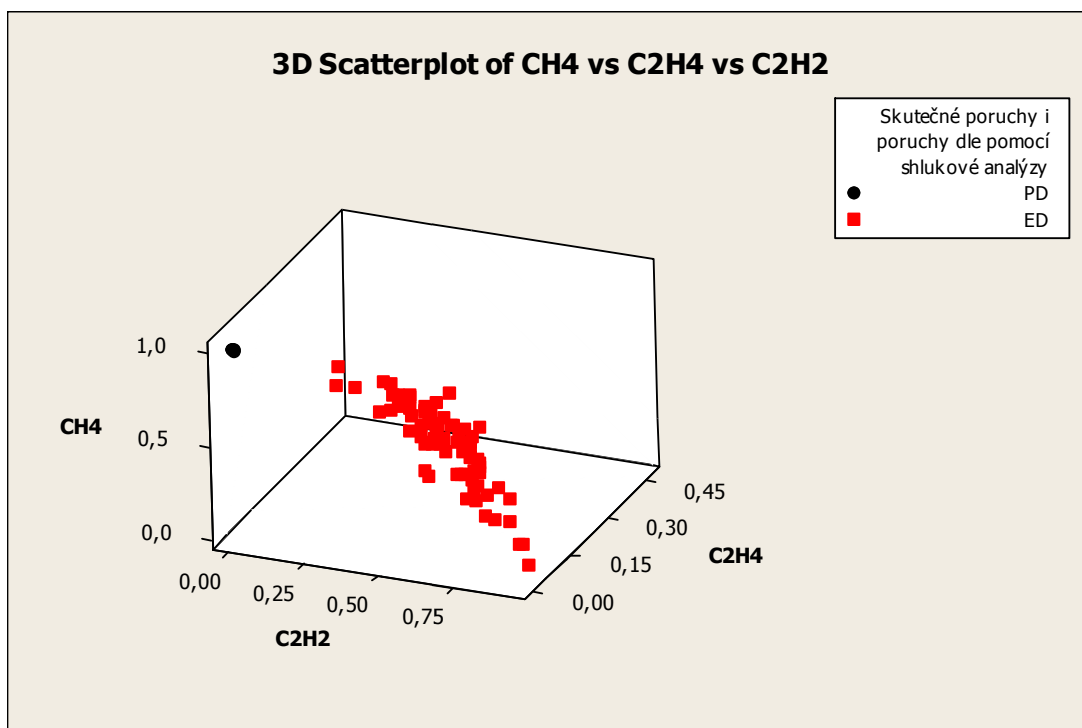
Na Obr. 45 je znázorněn dendrogram pro shluk reprezentující poruchu elektrické výboje, jehož úroveň podobnosti činí 25 %.

Na Obr. 46 jsou znázorněny naměřené hodnoty spolu s jak skutečnými poruchami, tak poruchami dle shlukové analýzy. Stejně jako v Tab. 81 leží shluk reprezentující poruchu částečné výboje v rohu pomyslné jednotkové krychle, zatímco shluk reprezentující elektrické výboje v obecném prostoru této krychle.

Při požadavku rozhodnout mezi poruchami PD x ED byly shlukovou analýzou dosaženy nejlepší výsledky pro kombinaci plynů CH₄-C₂H₄-C₂H₂ shluknutých pomocí Metody nejvzdálenějšího souseda za použití Euklidovské metriky. Správný výsledek byl odhalen ve 100 % případů.



Obr. 45 Dendrogram ED



Obr. 46 Skutečně odhalené poruchy na zařízení i poruchy dle shlukové analýzy

Nyní bude prošetřeno stanovení úrovně tepelné poruchy, a to zda jde o tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo tepelnou poruchu s teplotou $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Zde vycházely uspokojivé výsledky (kromě kombinace plynů podrobněji diskutované níže) pro kombinace plynů $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-H}_2$, $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-CO}$, $\text{C}_2\text{H}_4\text{-}$

H₂-CO, CH₄-C₂H₆-C₂H₄-C₂H₂, C₂H₆-C₂H₄-C₂H₂-H₂, CH₄-C₂H₄-C₂H₂-CO, C₂H₆-C₂H₄-H₂-CO a CH₄-C₂H₆-C₂H₄-H₂-CO, CH₄-C₂H₄-C₂H₂-H₂-CO. Pro tyto kombinace plynů vycházely uspokojivé výsledky pro různé kombinace shlukovacích metod a metrik. V dalším bude konzultována kombinace plynů CH₄-C₂H₄ (metan-etylen). Množství jednotlivých plynů bylo vyjádřeno v procentuálním množství z celkového obsahu těchto dvou plynů tak, jak je znázorněno v rovnicích:

$$\%CH_4 = \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_4}, \quad (44)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_4}. \quad (45)$$

Tepelná porucha s teplotou T < 700 °C se vyskytovala v pozorováních 1 – 16 a tepelná porucha s teplotou T > 700 °C v pozorováních 17 – 34. Tato pozorování jsou opět uvedena v každém dendrogramu na x-ové ose.

Pro kombinaci plynů CH₄-C₂H₄ vyšla shluková analýza uspokojivě pouze pro Centroidní metodu, Metodu nejvzdálenějšího souseda a Mediánovou metodu v kombinaci s různými metrikami jak pro data původní, tak pro data standardizovaná. Pro některé z těchto kombinací ovšem vyšly odlišné charakteristiky jednotlivých shluků. Níže budou popsány konkrétně výsledky pro Metodu nejvzdálenějšího souseda v kombinaci s Euklidovskou metrikou pro nestandardizovaná data.

Poruchové stavy byly rozloženy tak, jak zobrazuje Tab. 82. Pomocí statistiky χ^2 bylo opět zkoumáno, zda jsou poruchy skutečné a poruchy stanovené dle shlukové analýzy nezávislé. Tato statistika bude porovnána s kritickými hodnotami uvedenými v kap. 7.1.1.

Tab. 82 Výsledky pozorování pro vybranou metriku

		Poruchy podle shlukové analýzy		
		T12	T3	Celkem
Skutečné poruchy	T12	14	2	16
	T3	2	16	18
	Celkem	16	18	34

Podle Tab. 82 byla při tomto uspořádání shluková analýza úspěšná ve 30 případech z 34, což činilo úspěšnost 88 %. Při testu, zda je mezi poruchami skutečnými a odhalenými pomocí shlukové analýzy nezávislost vyšlo testové kritérium $\chi^2 = 19,84$, díky čemuž byla hypotéza o nezávislosti skutečných poruch a poruch dle shlukové analýzy zamítnuta.

Tab. 83 Údaje o shlucích

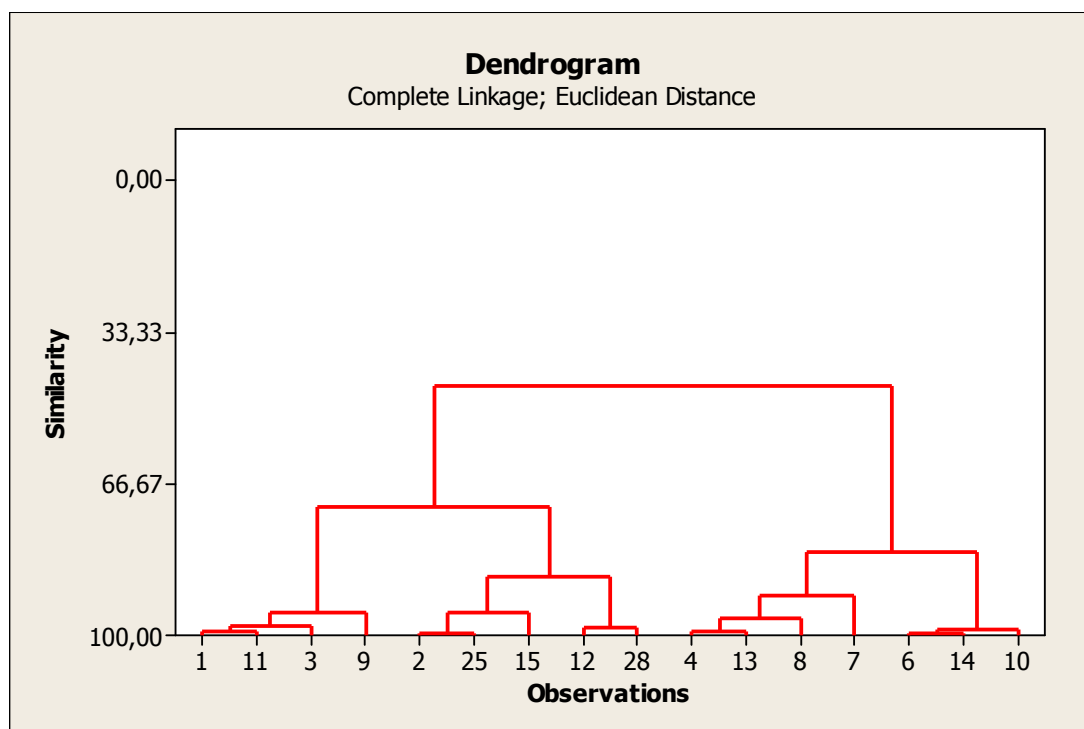
Shluk	Součet čtverců uvnitř shluku	Průměrná vzdálenost od centroidu	Maximální vzdálenost od centroidu
T12	0,850361	0,199634	0,372719
T3	0,426645	0,120678	0,377477

V Tab. 83 jsou uvedeny údaje o každém ze shluků. Jak lze vidět, shluk reprezentující tepelnou poruchu s teplotou $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ je kompaktnější než shluk reprezentující tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tab. 84 Centroidy jednotlivých shluků

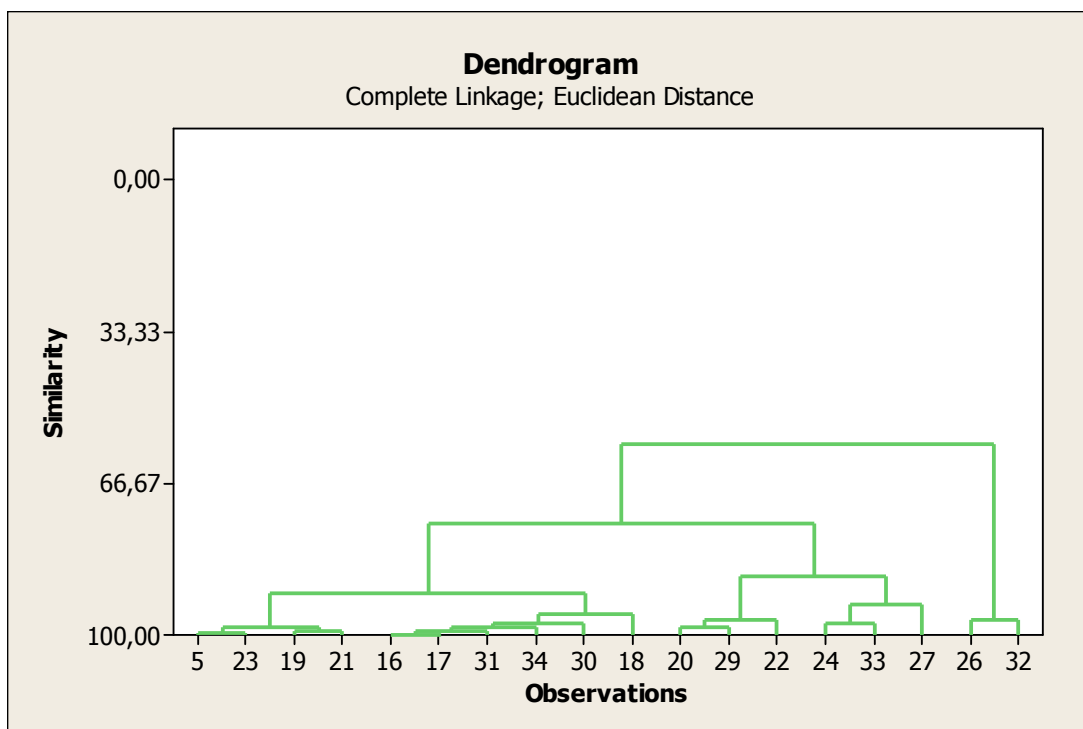
Plyn	T12	T3
CH ₄	0,750639	0,340991
C ₂ H ₄	0,249361	0,659009

V Tab. 84 jsou uvedeny souřadnice každého z centroidů pro jednotlivé shluky. Oba shluky tepelných poruch jak s teplotou $T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, tak teplotou $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou umístěny v obecné ploše jednotkového čtverce reprezentujícího souřadný systém CH₄-C₂H₄.

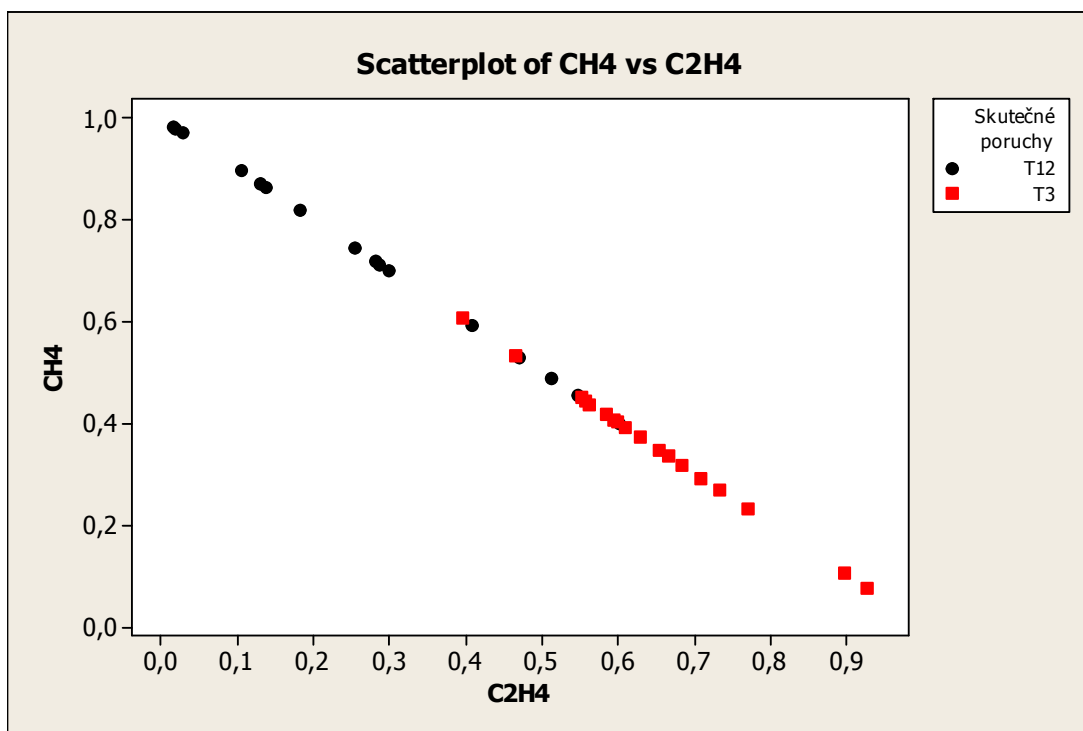


Obr. 47 Dendrogram T12

Obr. 47 znázorňuje dendrogram pro shluk reprezentující tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Správná pozorování pro tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou spojena až na celkové úrovni i s chybnými pozorováními, kdy činila úroveň podobnosti 45 %.



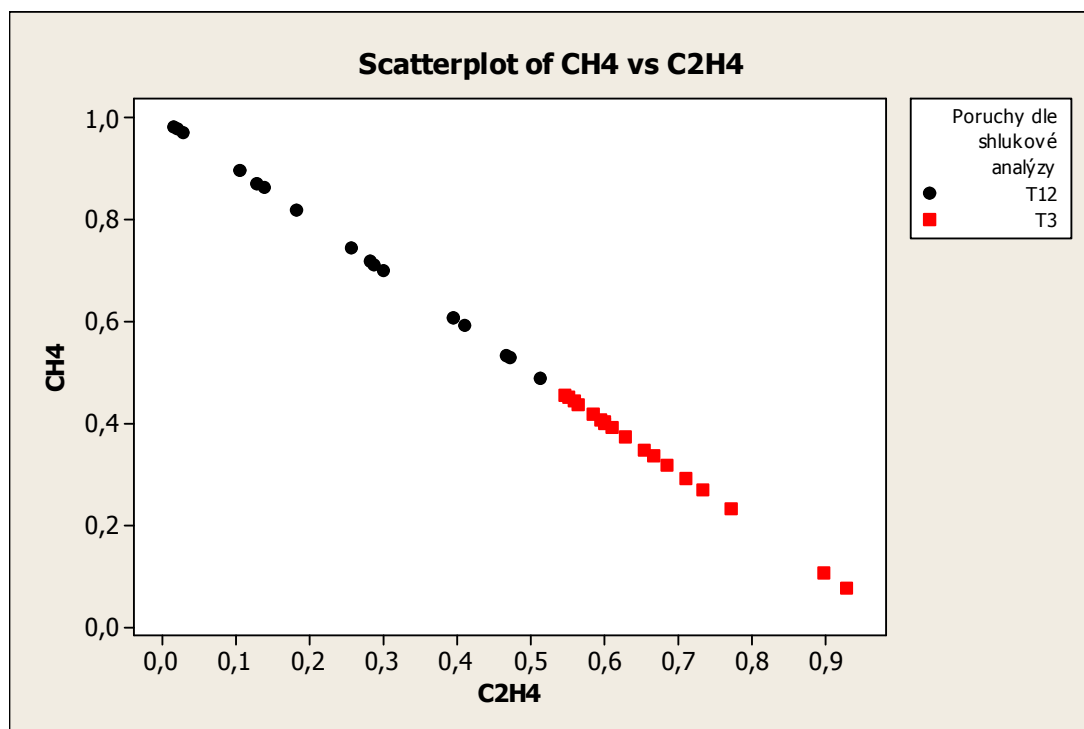
Obr. 48 Dendrogram T3



Obr. 49 Skutečně odhalené poruchy na zařízení

Na Obr. 48 je znázorněn dendrogram pro shluk reprezentující tepelnou poruchu s teplotou $T > 700$ °C, jejíž správná pozorování jsou spojena také až na celkové úrovni i s pozorováními, kdy se tato porucha nevyskytovala. Celková úroveň podobnosti činila 58 %.

Na Obr. 49 jsou znázorněny naměřené hodnoty spolu se skutečnými poruchami, na Obr. 50 jsou pro porovnání znázorněny stejná data, tentokrát s poruchami podle shlukové analýzy. Lze vidět, že shluky jsou obecně vzdáleny od hranic těchto jednotkových čtverců.



Obr. 50 Poruchy podle shlukové analýzy

Při požadavku rozhodnout mezi poruchami $T_{1,2}$ a T_3 byly shlukovou analýzou dosaženy nejlepší výsledky pro kombinaci plynů CH_4 - C_2H_4 shluknutých pomocí Metody nejvzdálenějšího souseda za použití Euklidovské metriky. Správný výsledek byl odhalen v 88 % případů.

V tomto případě, se tedy posoudí, zda se jedná o poruchu elektrickou nebo poruchu tepelnou podle kap. 7.1.3. Ve druhém kroku se stanoví pro případ, že se jedná o poruchu elektrickou, zda jde o částečné výboje či výboje elektrické, pro případ, že se jedná o poruchu tepelnou, zda jde o tepelnou poruchu s teplotou $T < 700$ °C, či o tepelnou poruchu s teplotou $T > 700$ °C. V tomto případě dostaneme výsledek uvedený v Tab. 85.

Jak lze vidět v Tab. 85, v tomto uspořádání byla shluková analýza úspěšná ve 100 případech ze 105, což činilo úspěšnost 95 %. Při testu, zda je mezi poruchami skutečnými a odhalenými pomocí shlukové analýzy nezávislost vyšlo testové kritérium $\chi^2 = 233,464$, pomocí něhož se tedy hypotéza o nezávislosti poruch skutečných a odhalených pomocí shlukové analýzy na hladině významnosti α zamítá.

Tab. 85 Výsledky pozorování pro vybranou dvoukrokovou metodu

		Poruchy podle shlukové analýzy				
		PD	ED	T12	T3	Celkem
Skutečné poruchy	PD	4	0	0	0	4
	ED	0	73	0	0	73
	T12	1	0	8	2	11
	T3	0	0	2	15	17
	Celkem	5	73	10	17	105

Dále lze postup jednoduše transformovat tak, že by se zjišťovaly poruchy pouze z množin částečné výboje – elektrické výboje – tepelné porucha, či elektrická porucha – tepelná porucha s teplotou $T < 700\text{ °C}$ – tepelná porucha s teplotou $T > 700\text{ °C}$.

Bude-li se nejprve rozhodovat z dvojic poruch EF x TF, které se následně upřesní na poruchy PD x ED x T1,2 x T3, bude činit celková úspěšnost odhalení správné poruchy 95 %.

7.2.2 PORUCHY EF (PD x D1 x D2) x TF (T1,2 x T3)

První krok, zda se jedná o poruchu elektrickou, či tepelnou je stále stejný a je popsán výše v kap. 7.1.3. Nyní bude uvedeno, jak se z poruch elektrických stanoví, zda se jedná o částečné výboje, elektrické výboje vysoké energie nebo elektrické výboje nízké energie. Stanovení o jakou konkrétní tepelnou poruchu se jedná, bude stejné jako v kap. 7.2.1.

Nejprve tedy bude pojednáno o upřesnění elektrické poruchy, tedy stanovení, zda se jedná o částečné výboje, elektrické výboje nízké energie či elektrické výboje vysoké energie. Zde vycházely uspokojivé výsledky, kromě kombinace plynů podrobněji diskutované níže, také pro kombinace plynů $C_2H_6-C_2H_4-C_2H_2$ a $CH_4-C_2H_6-C_2H_4-C_2H_2$. Pro tyto kombinace plynů vycházely použitelné výsledky pouze pro Metodu nejvzdálenějšího souseda a Mediánovou metodu a různé kombinace metrik Euklidovské, Pearsonovy a Čtvercové Euklidovské s daty standardizovanými či nestandardizovanými. V dalším bude konzultována kombinace plynů $CH_4-C_2H_4-C_2H_2$ (metan-etylen-acetylen). Množství jednotlivých plynů bylo vyjádřeno v procentuálním množství z celkového obsahu těchto tří plynů tak, jak je znázorněno v následujících rovnicích:

$$\%CH_4 = \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}, \quad (46)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}, \quad (47)$$

$$\%C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}. \quad (48)$$

Částečné výboje se vyskytovaly v pozorováních 1 – 4, elektrické výboje nízké energie v pozorováních 5 – 29 a elektrické výboje vysoké energie v pozorováních 30 – 77. Tato pozorování jsou opět uvedena v každém dendrogramu na x-ové ose.

Pro tuto kombinaci plynů vyšla shluková analýza uspokojivě pouze pro shlukovací Mediánovou metodu v kombinaci s Euklidovskou, Manhattsanskou nebo Pearsonovou metrikou pro data původní či standardizovaná. Pro některé z těchto kombinací ovšem vyšly odlišné charakteristiky jednotlivých shluků. Níže bude popsána konkrétně Mediánová metoda v kombinaci s Manhattsanskou metrikou pro nestandardizovaná data.

Skutečné poruchy a poruchy dle shlukové analýzy byly rozloženy tak, jak zobrazuje Tab. 86. Pomocí statistiky χ^2 bylo opět zkoumáno, zda jsou poruchy skutečné a poruchy stanovené dle shlukové analýzy nezávislé. Tato statistika bude porovnána s kritickými hodnotami stanovenými v kap. 7.1.1.

Tab. 86 Výsledky pozorování pro vybranou metriku

		Poruchy podle shlukové analýzy			
		PD	D1	D2	Celkem
Skutečné poruchy	PD	4	0	0	4
	D1	0	17	8	25
	D2	0	2	46	48
	Celkem	4	19	54	77

Podle Tab. 86 byla při tomto uspořádání shluková analýza úspěšná v 67 případech ze 77, což činilo úspěšnost 87 %. Při testu, zda je mezi poruchami skutečnými a odhalenými pomocí shlukové analýzy nezávislost vyšlo testové kritérium $\chi^2 = 113,696$, tedy hypotéza o nezávislosti skutečných poruch a poruch dle shlukové analýzy byla zamítnuta.

Tab. 87 Údaje o shlucích

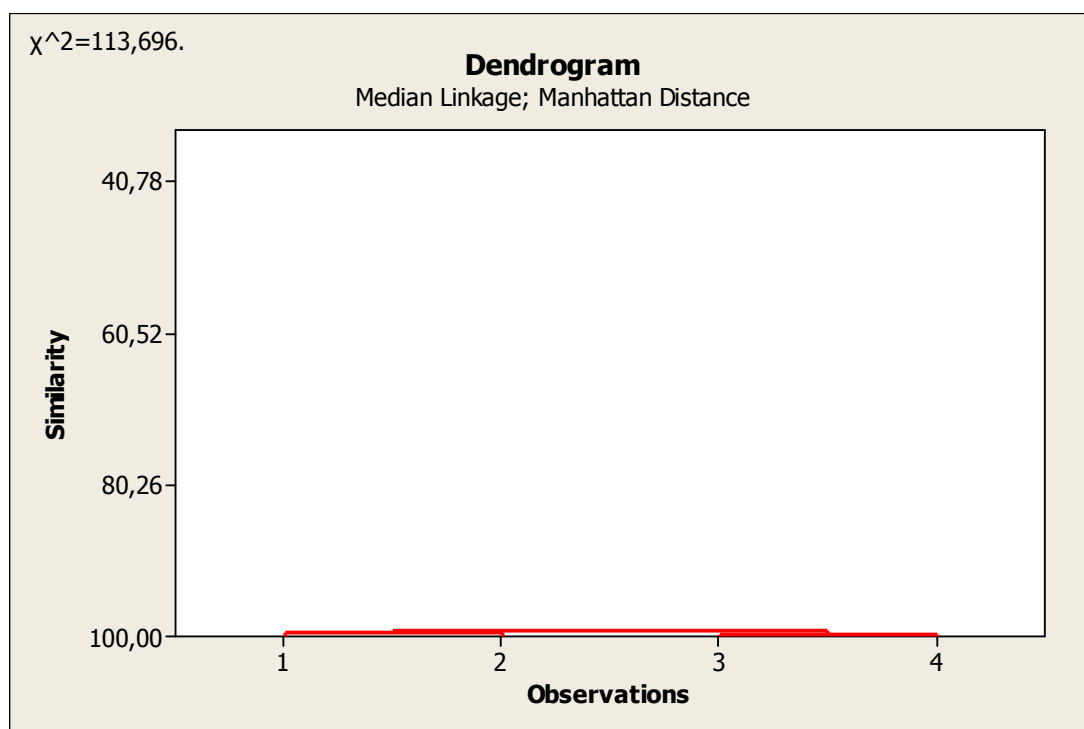
Shluk	Součet čtverců uvnitř shluku	Průměrná vzdálenost od centroidu	Maximální vzdálenost od centroidu
PD	0,00012	0,005208	0,007519
D1	0,44075	0,132173	0,302549
D2	1,54076	0,145498	0,415762

V Tab. 87 jsou uvedeny údaje o shlucích. Shluk reprezentující částečné výboje je dle všech kritérií v této tabulce nejkompaktnější, zatímco nejméně kompaktní se jeví shluk reprezentující elektrické výboje vysoké energie.

Tab. 88 Centroidy jednotlivých shluků

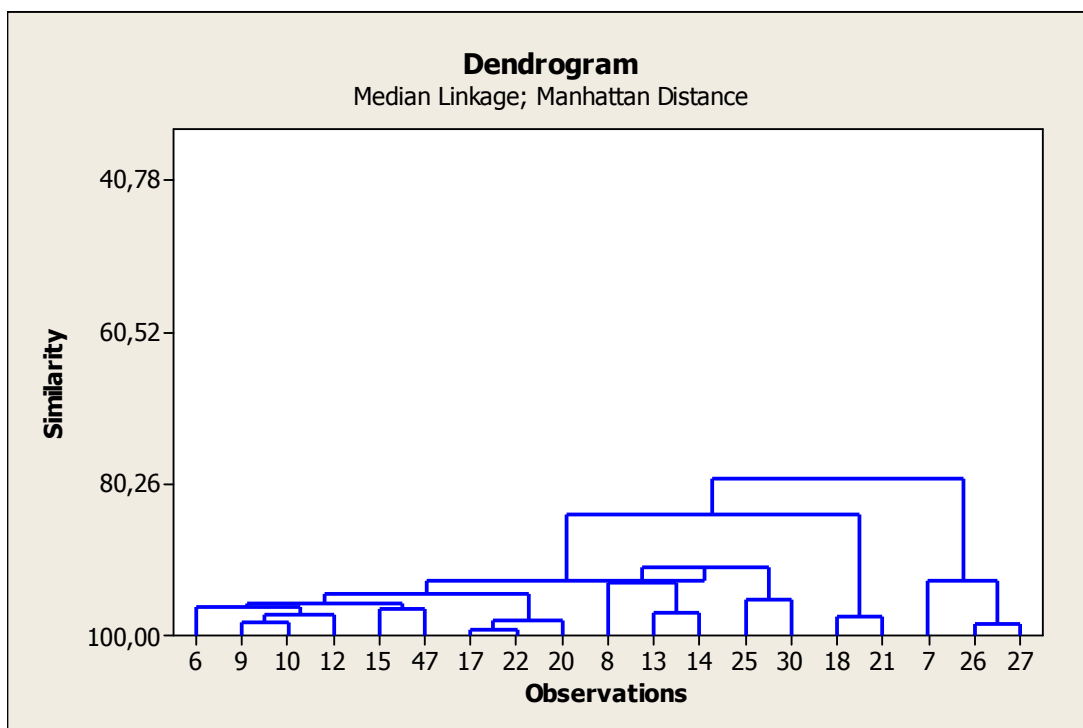
Plyn	PD	D1	D2
CH ₄	0,993236	0,144955	0,291031
C ₂ H ₄	0,003125	0,164067	0,308914
C ₂ H ₂	0,003638	0,690978	0,400055

V Tab. 88 jsou uvedeny souřadnice každého z centroidů pro jednotlivé shluky. Shluk částečných výbojů se nachází v rohu jednotkové krychle reprezentující hodnoty těchto sledovaných plynů. Shluky reprezentující elektrické výboje jak nízké, tak vysoké energie jsou oproti tomu v obecném prostoru této jednotkové krychle.



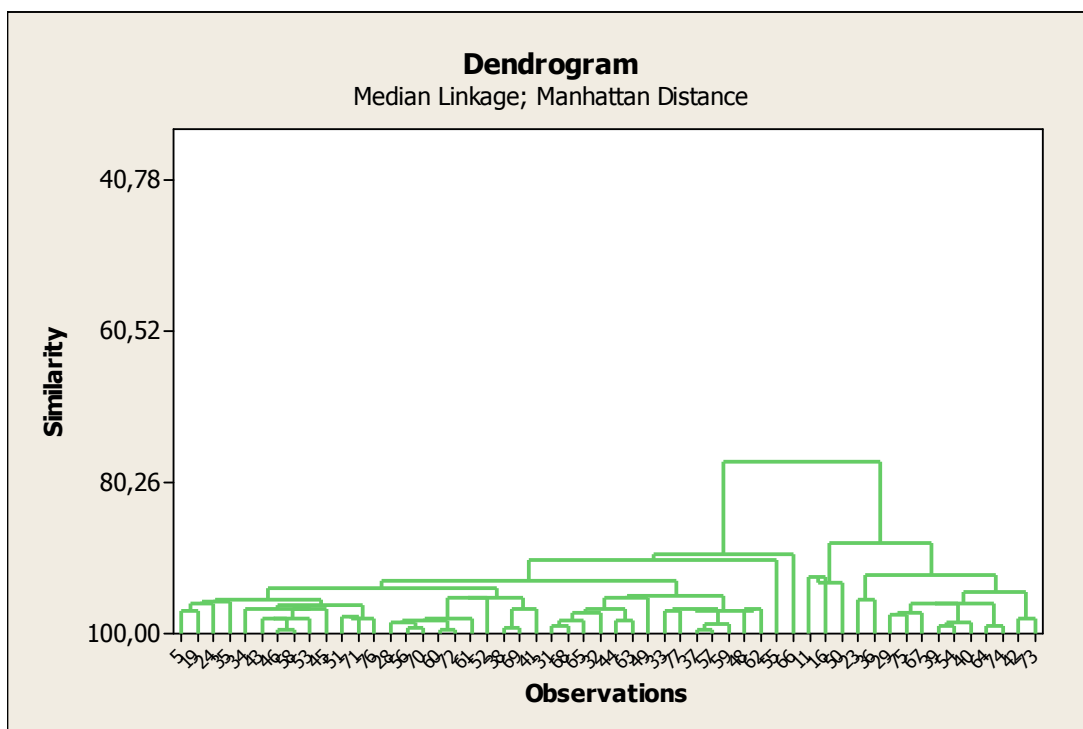
Obr. 51 Dendrogram PD

Obr. 51 znázorňuje dendrogram pro shluk reprezentující částečné výboje. Úroveň podobnosti v tomto případě činí 99 %.



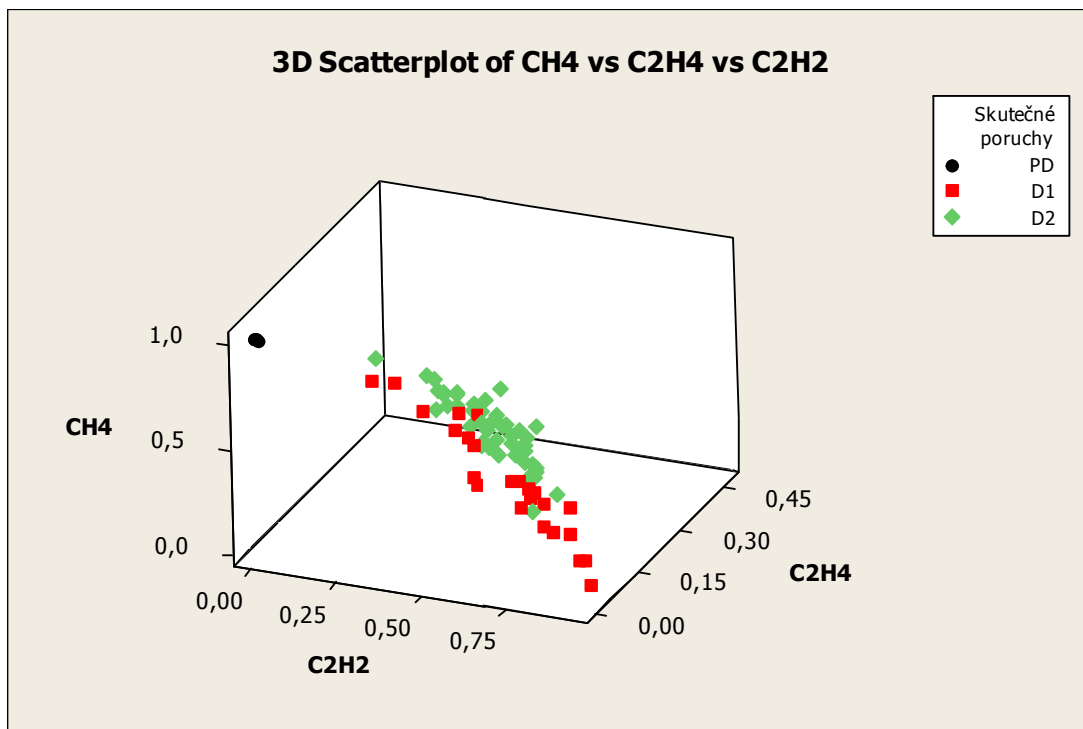
Obr. 52 Dendrogram D1

Na Obr. 52 je znázorněn dendrogram pro shluk reprezentující elektrické výboje nízké energie, jejíž správná pozorování jsou spojena až na celkové úrovni, kdy jsou zahrnuta i pozorování ve skutečnosti neobsahující tuto poruchu, při celkové úrovni podobnosti 80 %.

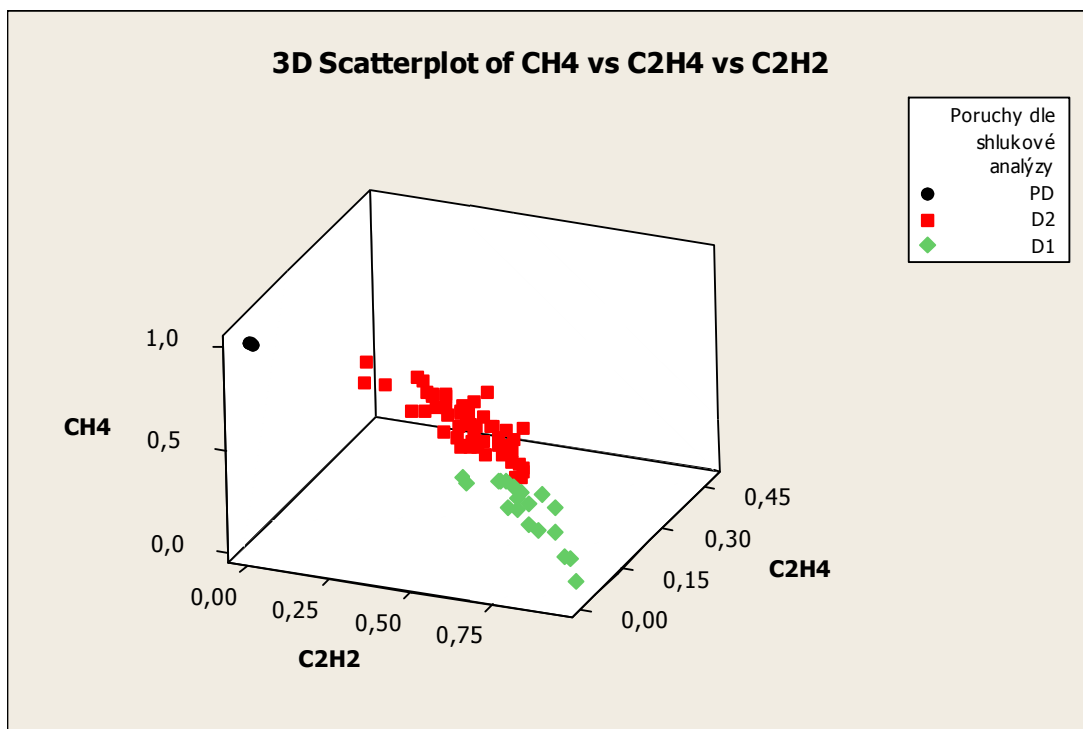


Obr. 53 Dendrogram D2

Na Obr. 53 je znázorněn dendrogram pro shluk reprezentující elektrické výboje vysoké energie. Správná pozorování jsou spojena až na celkové úrovni, kdy se opět vyskytovala i pozorování s touto poruchou nekorespondující. Celkové úroveň podobnosti činila v tomto uskupení 78 %.



Obr. 54 Skutečně odhalené poruchy na zařízení



Obr. 55 Poruchy podle shlukové analýzy

Na Obr. 54 jsou znázorněny naměřené hodnoty spolu se skutečnými poruchami, na Obr. 55 jsou pro porovnání znázorněny stejná data, tentokrát s poruchami podle shlukové analýzy

Při požadavku rozhodnout mezi poruchami PD x D1 x D2 byly shlukovou analýzou dosaženy nejlepší výsledky pro kombinaci plynů CH₄-C₂H₄-C₂H₂ shluknutých pomocí Mediánové metody za použití Manhattanské metriky. Správný výsledek byl odhalen v 87 % případech.

V tomto případě, bude-li se odhadovat porucha v transformátoru, nejprve se posoudí, zda se jedná o poruchu elektrickou nebo tepelnou, tak, jak je uvedeno v kap. 7.1.3. Ve druhém kroku se stanoví pro případ, že se jedná o poruchu elektrickou, zda jde o částečné výboje, elektrické výboje nízké energie či elektrické výboje vysoké energie. Pro případ, že se jedná o poruchu tepelnou, zda jde o poruchu tepelnou s teplotou T < 700 °C či o poruchu tepelnou s teplotou T > 700 °C. V tomto případě dostaneme výsledky podle Tab. 89.

Jak lze vidět v Tab. 89, v tomto uspořádání byla shluková analýza úspěšná v 90 případech ze 105, což činilo úspěšnost 86 %. Při testu, zda je mezi poruchami skutečnými a odhalenými pomocí shlukové analýzy nezávislost, vyšlo testové kritérium $\chi^2 = 283,504$, čímž lze na hladině významnosti α zamítnout hypotézu o nezávislosti poruch odhalených shlukovou analýzou na poruchách skutečných.

Postup lze dále i zde transformovat na zjišťování pouze poruch částečné výboje – elektrické výboje nízké energie – elektrické výboje vysoké energie – tepelná porucha, nebo elektrická porucha – tepelná porucha s teplotou T < 700 °C – tepelná porucha s teplotou T > 700 °C.

Tab. 89 Výsledky pozorování pro vybrané metriky

		Poruchy podle shlukové analýzy					
		PD	D1	D2	T12	T3	Celkem
Skutečné poruchy	PD	4	0	0	0	0	4
	D1	0	17	8	0	0	25
	D2	0	2	46	0	0	48
	T12	1	0	0	8	2	11
	T3	0	0	0	2	15	17
	Celkem	5	19	54	10	17	105

Bude-li se nejprve rozhodovat z dvojice poruch EF x TF, které se následně upřesní na poruchy PD x D1 x D2 x T1,2 x T3, bude činit celková úspěšnost odhalení správné poruchy 86 %.

7.2.3 PORUCHY PD x ED (D1 x D2) x TF (T1,2 x T3)

První krok, zda jde o částečné výboje, elektrické výboje nebo tepelnou poruchu je stejný jako v kap. 7.1.2. Nyní bude popsáno, jak se z poruchy elektrickými výboji stanoví, zda jde o elektrické výboje nízké energie či elektrické výboje vysoké energie. Stanovení o jakou konkrétní tepelnou poruchu se jedná, bude stejné jako v kap. 7.2.1.

Nejprve tedy bude pojednáno o rozhodovacím kritériu, zda se jedná o elektrické výboje nízké energie či elektrické výboje vysoké energie. Zde vycházely uspokojivé výsledky, kromě kombinace plynů podrobněji diskutované níže, také pro plyny $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2$ pro nestandardizovaná data Metodu nejvzdálenějšího souseda a Euklidovskou metriku. V dalším bude konzultována kombinace plynů $\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_4\text{-C}_2\text{H}_2$ (metan-etylen-acetylen). Množství jednotlivých plynů bylo vyjádřeno v procentuálním množství z celkového obsahu těchto tří plynů tak, jak je znázorněno v následujících rovnicích:

$$\%CH_4 = \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}, \quad (49)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}, \quad (50)$$

$$\%C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2}. \quad (51)$$

Elektrické výboje nízké energie se vyskytovaly v pozorováních 1 – 25 a elektrické výboje vysoké energie v pozorováních 26 – 73. Tato pozorování jsou opět uvedena v každém dendrogramu na x-ové ose.

Pro tuto kombinaci plynů vyšla shluková analýza uspokojivě pouze pro Metodu nejvzdálenějšího souseda a Mediánovou metodu a různé metriky a data původní, či standardizovaná. Pro některé z těchto kombinací ovšem vyšly odlišné charakteristiky jednotlivých shluků. Níže bude popsána konkrétně Mediánová metoda v kombinaci s Manhattanskou metriku a nestandardizovanými daty.

Skutečné poruchy a poruchy dle shlukové analýzy byly rozloženy tak, jak zobrazuje Tab. 90. Pomocí statistiky χ^2 bylo opět zkoumáno, zda jsou poruchy skutečné a poruchy stanovené dle shlukové analýzy nezávislé. Tato statistika bude porovnána s kritickými hodnotami uvedenými v kap. 7.1.1.

Podle Tab. 90 byla při tomto uspořádání shluková analýza úspěšná v 63 případech ze 73, což činilo úspěšnost 86 %. Při testu, zda je mezi poruchami skutečnými a odhalenými pomocí shlukové analýzy nezávislost, vyšlo testové kritérium $\chi^2 = 34,790$. Jelikož veškeré teoretické četnosti byly dostatečné, hypotéza o nezávislosti skutečných poruch a poruch dle shlukové analýzy tedy byla na hladině významnosti α zamítnuta.

V Tab. 91 jsou uvedeny údaje o shlucích, v Tab. 92 jsou uvedeny souřadnice každého z centroidů pro jednotlivé shluky. Jak pro shluk reprezentující elektrické výboje nízké energie, tak pro shluk reprezentující elektrické výboje vysoké energie vyšla data totožná jako v Tab. 87, resp. Tab. 88, jelikož se porovnávají shodná data shodnou metodou i metriku jako dříve, pouze ochuzená o data shluku reprezentujícího částečné výboje, který vyšel přesně.

Tab. 90 Výsledky pozorování pro vybranou metriku

		Poruchy podle shlukové analýzy		
		D1	D2	Celkem
Skutečné poruchy	D1	17	8	25
	D2	2	46	48
	Celkem	19	54	73

Tab. 91 Údaje o shlucích

Shluk	Součet čtverců uvnitř shluku	Průměrná vzdálenost od centroidu	Maximální vzdálenost od centroidu
D1	0,44075	0,132173	0,302549
D2	1,54076	0,145498	0,415762

Tab. 92 Centroidy jednotlivých shluků

Plyn	D1	D2
CH ₄	0,144955	0,291031
C ₂ H ₄	0,164067	0,308914
C ₂ H ₂	0,690978	0,400055

Dendrogramy pro tyto shluky vyjdou též shodně, jak je znázorněno na Obr. 52, resp. Obr. 53, kdy každé z nynějších pozorování bude přiřazeno pozorování n+4 pozorování z těchto obrázků. Úroveň podobnosti se změní na hladiny významnosti 75 % pro shluk elektrických výbojů nízké energie, resp. 72 % pro shluk elektrických poruch vysoké energie.

Shodné jsou i znázornění skutečných zjištěných poruch, resp. poruch stanovených pomocí shlukové analýzy tak jako na Obr. 54, resp. Obr. 55, jen bez poruch částečných výbojů „PD“.

Při požadavku rozhodnout mezi poruchami D1 x D2 byly shlukovou analýzou dosaženy nejlepší výsledky pro kombinaci plynů CH₄-C₂H₄-C₂H₂ shluknutých pomocí Mediánové metody za použití Manhattanské metriky. Správný výsledek byl odhalen v 86 % případů.

V tomto případě, budeme-li chtít tedy odhadnout poruchu v transformátoru, nejprve posoudíme, zda se jedná o částečné výboje, elektrické výboje nebo tepelnou poruchu tak, jak

je uvedeno v kap. 7.1.2. Ve druhém kroku se stanoví pro případ, že se jedná o elektrické výboje, zda jde o elektrické výboje nízké energie, či elektrické výboje vysoké energie. Jedná-li se o poruchu tepelnou, zda jde o poruchu tepelnou s teplotou $T < 700\text{ °C}$, či o poruchu tepelnou s teplotou $T > 700\text{ °C}$. V tomto případě dostaneme výsledky, jak jsou uvedeny v Tab. 93.

Tab. 93 Výsledky pozorování pro vybrané metriky

		Poruchy podle shlukové analýzy					
		PD	D1	D2	T12	T3	Celkem
Skutečné poruchy	PD	4	0	0	0	0	4
	D1	0	16	8	0	0	24
	D2	0	2	43	0	0	45
	T12	2	0	1	7	1	11
	T3	0	0	0	2	14	16
	Celkem	6	18	52	9	15	100

Jak lze vidět v Tab. 93, v tomto uspořádání byla shluková analýza úspěšná v 84 případech ze 100, což činilo úspěšnost 84 %. Při testu, zda je mezi poruchami skutečnými a odhalenými pomocí shlukové analýzy nezávislost, vyšlo testové kritérium $\chi^2 = 251,346$, tudíž byla prokázána závislost skutečných poruch na poruchách stanovených dle shlukové analýzy.

Postup lze dále i zde transformovat na zjišťování pouze poruch částečné výboje – elektrické výboje nízké energie – elektrické výboje vysoké energie – tepelná porucha, nebo částečné výboje – elektrické výboje – tepelná porucha s teplotou $T < 700\text{ °C}$ – tepelná porucha s teplotou $T > 700\text{ °C}$.

Bude-li se nejprve rozhodovat z trojice poruch PD x ED x TF, které se následně upřesní na poruchy PD x D1 x D2 x T1,2 x T3, bude činit celková úspěšnost odhalení správné poruchy 84 %.

7.3 ROZDĚLENÍ PORUCH 3. KROK

V této části bude požadováno dojít k pravděpodobné diagnóze poruchy po třech následných krocích tak, jak je znázorněno na Obr. 29.

7.3.1 PORUCHY EF (PD x ED (D1 x D2)) x TF (T1,2 x T3)

První krok, zda se jedná o poruchu elektrickou či tepelnou, byl popsán výše v kap. 7.1.3. Druhý krok, jak se z poruch elektrických stanoví, zda se jedná o výboje částečné nebo elektrické, resp. zda se jedná o tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ °C}$, nebo o tepelnou poruchu s teplotou $T > 700\text{ °C}$ je shodný jako v kap. 7.2.1. Třetí krok – rozhodnutí zda se u

elektrických výbojů jedná o elektrické výboje nízké energie či elektrické výboje vysoké energie je popsán v kap. 7.2.3.

Tab. 94 Výsledky pozorování pro vybrané metriky

		Poruchy podle shlukové analýzy					
		PD	D1	D2	T12	T3	Celkem
Skutečné poruchy	PD	4	0	0	0	0	4
	D1	0	17	8	0	0	25
	D2	0	2	46	0	0	48
	T12	1	0	0	8	2	11
	T3	0	0	0	2	15	17
	Celkem	5	19	54	10	17	105

V tomto případě, budeme-li chtít tedy odhadnout poruchu v transformátoru, nejprve posoudíme, zda se jedná o částečné výboje, elektrické výboje, tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ či tepelnou poruchu s teplotou $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ tak, jak je naznačeno v kap. 7.2.1. Pro elektrické výboje se pak ve 3. kroku stanoví, zda jde o elektrické výboje nízké energie či elektrické výboje vysoké energie. V tomto případě dostaneme výsledky, jak jsou uvedeny v Tab. 94.

Jak lze v Tab. 94 vidět, v tomto uspořádání byla shluková analýza úspěšná v 90 případech ze 105, což činilo úspěšnost 86 %. Při testu, zda je mezi poruchami skutečnými a odhalenými pomocí shlukové analýzy nezávislost, vyšlo testové kritérium $\chi^2 = 283,504$, tudíž hypotéza, že mezi poruchami určenými pomocí shlukové analýzy a poruchami skutečnými není závislost, byla na hladině významnosti α zamítnuta.

Postup lze dále i zde transformovat na zjišťování pouze poruch částečné výboje – elektrické výboje nízké energie – elektrické výboje vysoké energie – tepelná porucha.

Bude-li se nejprve rozhodovat z dvojice poruch EF x TF, které se následně upřesní na poruchy PD x ED x T1,2 x T3 a až ve třetím kroku na poruchy PD x D1 x D2 x T1,2 x T3, bude činit celková úspěšnost odhalení správné poruchy 86 %.

7.4 POUŽITÉ PLYNOVÉ POMĚRY

Nyní budou popsány jednotlivé plynové poměry potřebné k vykonání shlukových analýz popsaných výše.

7.4.1 CH₄ x C₂H₄ x C₂H₂

Plynový poměr metan-etylen-acetylen byl u shlukové analýzy použit v kap. 7.1.1, 7.2.1, 7.2.2, 7.2.3 a 7.3.1 k určení poruch částečné výboje, elektrické výboje nízké energie, elektrické výboje vysoké energie, tepelná porucha s teplotou $T < 700$ °C, tepelná porucha s teplotou $T > 700$ °C a zda jde o obecné elektrické výboje.

ČÁSTEČNÉ VÝBOJE

Tab. 95 Extrémní hodnoty pro částečné výboje pro kombinaci plynů metan-etylen-acetylen

Porucha	Limit	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
PD	x_{min}	0,987	0,001	0,001
	x_{max}	0,998	0,006	0,007

Jak lze vidět v Tab. 95, extrémní hodnoty částečných výbojů pro veškeré z výše uvedených plynů jsou blízko k hranici daného beta rozdělení. Na hladině významnosti $\alpha = 0,5$ padne maximálně 25 % pozorování metanu pod jeho minimální hodnotu a etylenu a acetyleny nad jejich maximální hodnotu. Pro hladinu významnosti $\alpha = 0,1$ půjde maximálně o 50 % pozorování. Tyto podíly jsou zapříčiněny malým počtem rozboru těchto plynů ($n = 4$) pro pozorování poruchy PD. Je-li požadován podíl těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, bylo by třeba mít těchto pozorování alespoň 29.

Nejmenší podíl, který padne mezi minimální a maximální hodnoty jednotlivých plynů uvedených v Tab. 95, je pro hladinu významnosti $\alpha = 0,5$ 50 %. Byl-li by zde požadavek podílu těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, bylo by třeba mít těchto pozorování alespoň 46.

Tab. 96 Koeficienty α , β Beta rozdělení a 0,025 a 0,975 kvantily příslušné distribuční funkce

Porucha	Koeficient	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Kvantil	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
PD	α	288,02	1,72	2,08	$Q_{0,025}$	0,981	0,000	0,000
	β	1,96	548,82	569,60	$Q_{0,975}$	0,999	0,009	0,010

Podle Tab. 96 bylo 97,5 % těchto pozorování nad hodnotou 98,1 % metanu a pod hladinami 0,9 % etylenu, resp. 1 % acetyleny. V souladu s výše popsáním, částečné výboje se odlišují od veškerých ostatních poruch velmi nízkým obsahem etylenu a vysokým obsahem metanu.

ELEKTRICKÉ VÝBOJE NÍZKÉ ENERGIE

Pro poruchu elektrické výboje nízké energie padne na hladině významnosti $\alpha = 0,1$ nad hodnotu x_{min} , resp. pod hodnotu x_{max} minimálně 90 % pozorování. Pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ to je 75 % pozorování. Je-li požadován podíl těchto pozorování 90 % na hladině

významnosti $\alpha = 0,05$, je třeba mít pozorování elektrických výbojů nízké energie 29 místo stávajících 25 pozorování.

Tab. 97 Extrémní hodnoty pro elektrické výboje nízké energie pro kombinaci plynů metan-etylen-acetylen

Porucha	Limit	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
D1	x_{min}	0,012	0,051	0,200
	x_{max}	0,629	0,333	0,938

Nejmenší podíl, který padne mezi meze v Tab. 97, je pro hladinu významnosti $\alpha = 0,5$ 90 %, pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ 75 %. Pro podíl těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, by bylo třeba mít pozorování elektrických výbojů nízké energie alespoň 46.

Tab. 98 Koeficienty α , β Beta rozdělení a 0,025 a 0,975 kvantily příslušné distribuční funkce

Porucha	Koeficient	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Kvantil	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
D1	α	1,22	6,07	3,24	$Q_{0,025}$	0,013	0,073	0,197
	β	4,04	27,12	2,32	$Q_{0,975}$	0,632	0,329	0,913

Elektrické výboje nízké energie se od tepelné poruchy s teplotou $T < 700$ °C odlišují množstvím acetyleny. Pouze 2,5 % měření elektrických výbojů nízké energie obsahuje méně než 19,7 % acetyleny, zatímco pouze 2,5 % tepelných poruch s teplotou $T < 700$ °C obsahuje více než 5,6 % acetyleny.

Od tepelné poruchy s teplotou $T > 700$ °C se elektrické výboje nízké energie odlišují množstvím etylenu. Pouze 2,5 % elektrických výbojů nízké energie obsahuje více než 32,9 % etylenu, zatímco pouze 2,5 % tepelných poruch s teplotou $T > 700$ °C obsahuje méně než 34,7 % tohoto plynu.

Množství těchto plynů se při poruše elektrickými výboji nízké energie a elektrickými výboji vysoké energie prolínají. Nelze je tedy jednoznačně odlišit. Jeví se ale, že při elektrických výbojích nízké energie se vyskytují menší množství etylenu než při elektrických výbojích vysoké energie.

ELEKTRICKÉ VÝBOJE VYSOKÉ ENERGIE

Na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ padne 90 % pozorování poruchy elektrické výboje vysoké energie nad hodnotou x_{min} , resp. pod hodnotu x_{max} (Tab. 99).

Mezi meze x_{min} a x_{max} padne na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ také 90 % pozorování poruchy elektrické výboje vysoké energie.

Tab. 99 Extrémní hodnoty pro elektrické výboje vysoké energie pro kombinaci plynů metan-etylen-acetylen

Porucha	Limit	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
D2	x_{min}	0,077	0,148	0,140
	x_{max}	0,605	0,478	0,684

Tab. 100 Koeficienty α , β Beta rozdělení a 0,025 a 0,975 kvantily příslušné distribuční funkce

Porucha	Koeficient	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Kvantil	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
D2	α	4,31	20,13	7,42	$Q_{0,025}$	0,087	0,209	0,208
	β	12,08	43,38	10,24	$Q_{0,975}$	0,493	0,435	0,650

Elektrické výboje vysoké energie se liší od tepelných poruch odlišným množstvím acetyleny. Pro elektrické výboje vysoké energie obsahovalo více než 97,5 % pozorování více než 20,8 % acetyleny, zatímco u tepelných poruch obsahuje 97,5 % pozorování méně než 14,3 % acetyleny pro tepelnou poruchu s teplotou $T > 700$ °C, resp. méně než 5,6 % acetyleny pro tepelnou poruchu s teplotou $T < 700$ °C.

TEPELNÁ PORUCHA S TEPLOTOU $T < 700$ °C

Tab. 101 Extrémní hodnoty pro tepelnou poruchu s teplotou $T < 700$ °C pro kombinaci plynů metan-etylen-acetylen

Porucha	Limit	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
T12	x_{min}	0,398	0,027	0,000
	x_{max}	0,956	0,596	0,046

Jednotlivé plyny pro tepelnou poruchu s teplotou $T < 700$ °C padnou nad hodnotu x_{min} , resp. pod hodnotu x_{max} (Tab. 101) na hladině významnosti $\alpha = 0,5$ v 90 % případů. Pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ to bude 75 % případů. Místo potřebných 29 pozorování pro podíl těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, se jich vyskytuje ve vyšetřované databázi pouze 11.

Nejmenší podíl, který padne mezi meze v tabulce je 75 % pro hladinu významnosti $\alpha = 0,5$. Pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ to je 50 %. Pro podíl těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, by bylo třeba mít těchto pozorování alespoň 46.

Tab. 102 Koeficienty α , β Beta rozdělení a 0,025 a 0,975 kvantily příslušné distribuční funkce

Porucha	Koeficient	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Kvantil	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
T12	α	4,45	1,70	0,76	$Q_{0,025}$	0,312	0,036	0,000
	β	2,09	3,89	55,46	$Q_{0,975}$	0,947	0,700	0,056

Oblasti, kde se vyskytuje 95 % pozorování pro tepelné poruchy s teplotou $T < 700$ °C se překrývá s oblastí pro tepelnou poruchu s teplotou $T > 700$ °C.

TEPELNÁ PORUCHA S TEPLOTOU $T > 700$ °C

Tab. 103 Extrémní hodnoty pro tepelnou poruchu s teplotou $T > 700$ °C pro kombinaci plynů metan-etylen-acetylen

Porucha	Limit	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
T3	x_{min}	0,070	0,393	0,000
	x_{max}	0,603	0,895	0,118

Pro tepelnou poruchu s teplotou přehřátí $T > 700$ °C a jejich 17 pozorování bude na hladině významnosti $\alpha = 0,25$, 90 % pozorování nad hodnotou x_{min} , resp. pod hodnotou x_{max} . Pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ to bude 75 % pozorování. Pro dosažení podílu těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ je požadováno 29 pozorování.

Nejmenší podíl, který padne mezi meze v Tab. 103 je pro hladinu významnosti $\alpha = 0,5$ 90 % pozorování, pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ 50 % pozorování. Pro podíl těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, by bylo třeba mít těchto pozorování alespoň 46.

Tab. 104 Koeficienty α , β Beta rozdělení a 0,025 a 0,975 kvantily příslušné distribuční funkce

Porucha	Koeficient	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Kvantil	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
T3	α	3,49	7,40	0,71	$Q_{0,025}$	0,100	0,347	0,000
	β	6,79	4,42	19,84	$Q_{0,975}$	0,638	0,865	0,143

ELEKTRICKÉ VÝBOJE

Pozorování obecných elektrických výbojů bylo 73, tudíž nad hodnotou x_{min} , resp. pod hodnotu x_{max} padne na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ 95 % pozorování. Mezi tyto meze padne 90 % těchto pozorování pro tutéž hladinu významnosti.

Tab. 105 Extrémní hodnoty pro jednotlivé poruchy pro kombinaci plynů metan-etylen-acetylen

Porucha	Limit	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
ED	x_{min}	0,012	0,051	0,140
	x_{max}	0,629	0,478	0,938

Tab. 106 Koeficienty α , β Beta rozdělení a 0,025 a 0,975 kvantily příslušné distribuční funkce

Porucha	Koeficient	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Kvantil	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
ED	α	2,25	5,96	3,76	$Q_{0,025}$	0,043	0,111	0,167
	β	6,70	16,09	4,06	$Q_{0,975}$	0,562	0,468	0,804

PD se liší od ED, stejně jako od skupiny poruch D1 x D2 x T1,2 x T3 vysokým obsahem metanu a nízkým obsahem etylenu.

D1 se liší od poruchy T12 vyšším množstvím acetyleny. Od poruchy T3 se liší nižším množstvím etylenu. Poruchy D1 a D2 se od sebe významně neliší.

D2 se liší od T12 i od T3 vyšším množstvím acetyleny.

Poruchy T12 a T3 se překrývají.

7.4.2 C₂H₆ x C₂H₄ x C₂H₂

Plynový poměr etan-etylen-acetylen byl u shlukové analýzy použit v kap. 7.1.2 k určení, zda jde o poruchu částečné výboje, elektrické výboje nebo tepelnou poruchu.

ČÁSTEČNÉ VÝBOJE

Tab. 107 Extrémní hodnoty pro částečné výboje pro kombinaci plynů etan-etylen-acetylen

Porucha	Limit	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
PD	x_{min}	0,822	0,001	0,001
	x_{max}	0,998	0,082	0,096

Veškeré extrémní hodnoty pro částečné výboje jsou stejně jako v 7.4.1 blízko k hranici daného beta rozdělení. Na hladině významnosti $\alpha = 0,5$ padne maximálně 25 % hodnot etanu pod jeho minimální hodnotu a etylenu a acetyleny nad jejich maximální hodnotu. Pro hladinu významnosti $\alpha = 0,1$ půjde maximálně o 50 % pozorování. Tyto podíly jsou zapříčiněny malým počtem rozboru těchto plynů ($n = 4$) pro pozorování poruchy PD. Je-li požadován

podíl těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, bylo by třeba mít těchto pozorování alespoň 29.

Nejmenší podíl, který padne mezi minimální a maximální hodnoty jednotlivých plynů uvedených v Tab. 107, je pro hladinu významnosti $\alpha = 0,5$ 50 %. Byl-li by zde požadavek podílu těchto pozorování 90 % a hladinu významnosti $\alpha = 0,05$, bylo by třeba mít těchto pozorování alespoň 46.

Tab. 108 Koeficienty α , β Beta rozdělení a 0,025 a 0,975 kvantily příslušné distribuční funkce

Porucha	Koeficient	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Kvantil	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
PD	α	9,22	0,64	0,67	$Q_{0,025}$	0,726	0,000	0,000
	β	0,65	20,52	17,93	$Q_{0,975}$	1,000	0,132	0,153

Částečné výboje se od elektrických výbojů liší především množstvím indikovaného etanu a acetyleny. 97,5 % pozorování částečných výbojů obsahuje minimálně 72,6 % etanu, oproti elektrickým výbojům, které obsahují maximálně 22,7 % etanu. Navíc 97,5 % plynových koncentrací při částečných výbojích obsahuje maximálně 15,3 % acetyleny, oproti koncentracím při elektrických výbojích s minimálním množstvím 28,8 % acetyleny.

Od tepelné poruchy se částečné výboje odlišují množstvím etylenu. 97,5 % PD obsahuje méně než 13,2 % etylenu, zatímco 97,5 % tepelných poruch jej obsahuje více než 17,3 %.

ELEKTRICKÉ VÝBOJE

Tab. 109 Extrémní hodnoty pro elektrické výboje pro kombinaci plynů etan-etylen-acetylen

Porucha	Limit	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
ED	x_{min}	0,001	0,051	0,319
	x_{max}	0,346	0,585	0,943

Pozorování obecných elektrických výbojů bylo 69. Nad hodnotou x_{min} , resp. pod hodnotu x_{max} bude na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ ležet 95 % pozorování.

Mezi mezemi x_{min} a x_{max} bude pro hladině významnosti $\alpha = 0,05$ ležet 90 % těchto pozorování.

Elektrické výboje se liší od tepelné poruchy především množstvím acetyleny. Při poruše elektrickými výboji je 97,5 % hodnot vyšších než 28,8 % acetyleny, zatímco při tepelné poruše je 97,5 % hodnot nižších než 18,7 % acetyleny.

Tab. 110 Koeficienty α , β Beta rozdělení a 0,025 a 0,975 kvantily příslušné distribuční funkce

Porucha	Koeficient	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Kvantil	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
ED	α	1,02	4,16	5,86	$Q_{0,025}$	0,002	0,119	0,288
	β	14,47	7,80	4,09	$Q_{0,975}$	0,227	0,625	0,856

TEPELNÁ PORUCHA

Tab. 111 Extrémní hodnoty pro tepelnou poruchu pro kombinaci plynů etan-etylen-acetylen

Porucha	Limit	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
TF	x_{min}	0,014	0,053	0,000
	x_{max}	0,939	0,967	0,258

Pro 27 pozorování tepelné poruchy padne nad hodnotu x_{min} , resp. pod hodnotu x_{max} na hladině významnosti $\alpha = 0,1$ 90 % pozorování. Pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ to bude 75 % pozorování. Je-li požadován podíl těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, je třeba mít těchto pozorování 29.

Nejmenší podíl, který padne mezi meze v Tab. 111, je pro hladinu významnosti $\alpha = 0,25$ 90 % pozorování. Pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ jde o 75 % pozorování. Pro podíl těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, by bylo třeba mít těchto pozorování alespoň 46.

 Tab. 112 Koeficienty α , β Beta rozdělení a 0,025 a 0,975 kvantily příslušné distribuční funkce

Porucha	Koeficient	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Kvantil	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
TF	α	0,93	2,19	0,57	$Q_{0,025}$	0,008	0,173	0,000
	β	2,20	1,11	13,31	$Q_{0,975}$	0,804	0,983	0,187

PD se liší od ED vyšším obsahem etanu a nižším obsahem acetyleny. Od poruchy TF se PD liší nižším obsahem etylenu.

ED se liší od poruchy TF vyšším množstvím acetyleny.

7.4.3 C₂H₄ x C₂H₂

Plynový poměr etylen-acetylen byl u shlukové analýzy použit v kap. 7.1.3, 7.2.1, 7.2.2 a 7.3.1 k určení, jedná-li se o poruchu elektrickou, či o poruchu tepelnou.

ELEKTRICKÁ PORUCHA

Tab. 113 Extrémní hodnoty pro elektrickou poruchu pro kombinaci plynů etylen-acetylen

Porucha	Limit	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
EF	x_{min}	0,051	0,353
	x_{max}	0,647	0,949

Pozorování obecné elektrické poruchy se vyskytovalo v 78 případech. Nad hodnotou x_{min} , resp. pod hodnotu x_{max} tedy bude na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ 95 % pozorování. Mezi těmito mezemi bude 90 % těchto pozorování pro tutéž hladinu významnosti.

 Tab. 114 Koeficienty α , β Beta rozdělení a 0,025 a 0,975 kvantily příslušné distribuční funkce

Porucha	Koeficient	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Kvantil	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
EF	α	4,30	7,12	$Q_{0,025}$	0,134	0,340
	β	7,12	4,30	$Q_{0,975}$	0,660	0,866

Vývoj plynů v zařízeních s elektrickou poruchou se liší od vývoje plynů v zařízeních s poruchou tepelnou nižší hladinou etylenu a vyšší hladinou acetyleny. Při elektrické poruše obsahuje 97,5 % odebraných vzorků méně než 66 % etylenu a více než 34 % acetyleny, zatímco u tepelných poruch jde o více než 71,2 % etylenu a méně než 28,8 % acetyleny.

TEPELNÁ PORUCHA

Tab. 115 Extrémní hodnoty pro tepelnou poruchu pro kombinaci plynů etylen-acetylen

Porucha	Limit	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
TF	x_{min}	0,621	0,000
	x_{max}	1,000	0,379

Pro 28 pozorování tepelné poruchy padne nad hodnotu x_{min} , resp. pod hodnotu x_{max} na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ 75 % pozorování. Je-li požadován podíl těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, je třeba mít těchto pozorování 29, namísto stávajících 28.

Nejmenší podíl, který padne mezi meze v Tab. 115 je pro hladinu významnosti $\alpha = 0,25$ 90 % pozorování, pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ to je 75 % pozorování. Pro podíl těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, by bylo třeba mít těchto pozorování alespoň 46.

Tab. 116 Koeficienty α , β Beta rozdělení a 0,025 a 0,975 kvantily příslušné distribuční funkce

Porucha	Koeficient	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Kvantil	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
TF	α	8,17	0,57	$Q_{0,025}$	0,712	0,000
	β	0,57	8,17	$Q_{0,975}$	1,000	0,288

EF se liší od TF, vyšším obsahem acetylenu a nižším obsahem etylenu.

7.4.4 CH₄ x C₂H₄

Plynový poměr metan-etylen byl u shlukové analýzy použit v kap. 7.2.1, 7.2.2, 0 a 7.3.1 k určení tepelná poruchy s teplotou $T < 700$ °C, či tepelné poruchy s teplotou $T > 700$ °C.

TEPELNÁ PORUCHA S TEPLOTOU $T < 700$ °C

Tepelná porucha s teplotou $T < 700$ °C byla opět zastoupena méně. Nad hodnotu x_{min} , resp. pod hodnotu x_{max} padne na hladině významnosti $\alpha = 0,25$ 90 % pozorování, pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ 75 % pozorování. Místo potřebných 29 pozorování pro podíl 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ se jich vyskytuje pouze 16.

Nejmenší podíl pozorování, který padne mezi meze v Tab. 117 je pro hladinu významnosti $\alpha = 0,01$ 75 %, pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ 50 %. Pro podíl těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ by bylo třeba mít těchto pozorování alespoň 46.

 Tab. 117 Extrémní hodnoty pro tepelnou poruchu s teplotou $T < 700$ °C pro kombinaci plynů metan-etylen

Porucha	Limit	CH ₄	C ₂ H ₄
T12	x_{min}	0,400	0,016
	x_{max}	0,984	0,600

 Tab. 118 Koeficienty α , β Beta rozdělení a 0,025 a 0,975 kvantily příslušné distribuční funkce

Porucha	Koeficient	CH ₄	C ₂ H ₄	Kvantil	CH ₄	C ₂ H ₄
T12	α	3,03	1,06	$Q_{0,025}$	0,286	0,009
	β	1,06	3,03	$Q_{0,975}$	0,989	0,709

Tepelná porucha s teplotou $T < 700$ °C a tepelná porucha s teplotou $T > 700$ °C, resp. 97,5 % odebraných vzorků při těchto poruchách se od sebe významně neliší. Co se týče množství

odebraných plynů, při těchto poruchách nelze z jejich množství jednoznačně říci, o kterou z těchto poruch se přesně jedná.

TEPELNÁ PORUCHA S TEPLOTOU $T > 700\text{ °C}$ (T3)

Tab. 119 Extrémní hodnoty pro tepelnou poruchu s teplotou $T > 700\text{ °C}$ pro kombinaci plynů metan-etylen

Porucha	Limit	CH ₄	C ₂ H ₄
T3	x_{min}	0,074	0,394
	x_{max}	0,606	0,926

Pro tepelnou poruchu s teplotou přehřátí $T > 700\text{ °C}$ a jejich 18 pozorování v tomto uskupení byl poměr pozorování nad hodnotou x_{min} , resp. pod hodnotou x_{max} na hladině významnosti $\alpha = 0,25$ 90 %. Pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ to bylo 75 % pozorování. Pro dosažení podílu těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, je požadováno 29 pozorování.

Nejmenší podíl, který padne mezi meze v Tab. 119 je pro hladinu významnosti $\alpha = 0,5$ 90 % pozorování, pro hladinu významnosti $\alpha = 0,05$ 50 % pozorování. Pro podíl těchto pozorování 90 % na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ by bylo třeba mít těchto pozorování alespoň 46.

Tab. 120 Koeficienty α , β Beta rozdělení a 0,025 a 0,975 kvantily příslušné distribuční funkce

Porucha	Koeficient	CH ₄	C ₂ H ₄	Kvantil	CH ₄	C ₂ H ₄
T3	α	3,79	6,95	$Q_{0,025}$	0,112	0,355
	β	6,95	3,79	$Q_{0,975}$	0,645	0,888

Poruchy T12 a T3 pro tuto kombinaci plynů splývají.

8 VYŠETŘENÍ DOMINANTNÍHO PLYNU

Sledování vývoje plynů uvnitř transformátoru patří k nákladným záležitostem. Zjištění každého z plynů vyžaduje nemalé finanční náklady. Pro redukci těchto nákladů by bylo vhodné sledovat pouze jeden z plynů a až při jeho nadměrné tvorbě udělat rozbor i dalších plynů. Nyní se naskytá otázka, který z plynů sledovat? Vhodné by bylo sledovat ten plyn, kterého je v transformátoru generováno největší množství.

8.1 DOMINANTNÍ PLYN PRO VEŠKERÉ PORUCHY

K vyšetření, zda je mezi jednotlivými plyny významný statistický rozdíl, bude použit Kruskal-Wallisův test popsáný v příloze. V Tab. 121 jsou uvedeny součty pořadí T_i , četnosti n_i a průměrné pořadí \bar{T}_i pro jednotlivé, běžně zjišťované plyny.

Tab. 121 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	CO ₂	CO
T_i	47 719,5	25 797,5	43 193	36 348,5	55 575	60 667	43 166,5
n_i	116	110	114	106	116	114	114
\bar{T}_i	411,38	234,52	378,89	342,91	479,09	532,17	378,65

Pro tyto hodnoty vyšla testová statistika $Q = 118,95$. Jelikož kritická hodnota $\chi_6^2(0,05) = 12,59$, je $Q > \chi_6^2(\alpha)$ a tudíž zamítáme hypotézu, že všech zjišťovaných plynů se během života transformátorů generovalo shodné množství.

Z velikostí průměrných součtů pořadí se jeví, že nejvíce je generováno oxidu uhličitého, následovaného vodíkem, metanem a dalšími plyny.

Kruskal-Wallisův dokáže pomocí Neményiho metody z hodnoty $|T_i - T_j|$ rozhodnout, které z výběrů se od sebe významně liší. Je zde ovšem požadavek $n_1 = n_2 = \dots = n_i$, který není v tomto případě splněn. V následujícím bude pro vybrané dvojice plynů (kde vycházela nejmenší statistika $|U_0|$) uveden výsledek dvouvýběrového Wilcoxonova testu.

8.1.1 OXID UHLIČITÝ – VODÍK

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů oxid uhličitý, vodík byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 122.

Dle dvouvýběrového Wilcoxonova testu se pro velké četnosti n_i počítá veličina U_0 , jejíž absolutní hodnota $|U_0|$ se následně porovná s kritickou hodnotou $u(\alpha/2)$, v našem případě $u(0,025) = 1,960$. Pro dvojici plynů oxid uhličitý, vodík, vyšla statistika $|U_0| = 1,45 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů tedy v tomto případě nešla zamítnout.

Tab. 122 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
H ₂	12 665,5	116	7 344,5
CO ₂	13 899,5	114	5 879,5

8.1.2 VODÍK – METAN

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, metan byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 123.

Tab. 123 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
CH ₄	12 327	116	7 915
H ₂	14 701	116	5 541

Pro dvojici plynů metan – vodík, vyšla statistika $|U_0| = 2,32 > u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů se tedy v tomto případě zamítá.

8.1.3 VODÍK – ETYLEN

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, etylen byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 124.

Tab. 124 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
C ₂ H ₄	11 553,5	114	8 225,5
H ₂	15 011,5	116	4 998,5

Pro dvojici plynů etylen, vodík, vyšla statistika $|U_0| = 3,20 > u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů se tedy v tomto případě zamítá.

Během života transformátorů se generovalo největší množství oxidu uhličitého a vodíku, dalších plynů se generovalo významně méně. V dalším bude zjišťováno, zda se u některých konkrétních poruch nevyskytuje největší množství některých jiných plynů.

8.2 DOMINANTNÍ PLYN PRO ČÁSTEČNÉ VÝBOJE

Pro částečné výboje jsou v Tab. 125 uvedeny součty pořadí T_i , četnosti n_i a průměrné pořadí \bar{T}_i pro zjišťované plyny.

Tab. 125 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	CO ₂	CO
T_i	330	189,5	45,5	34	419	185,5	174,5
n_i	9	8	6	4	9	7	9
\bar{T}_i	36,67	23,69	7,58	8,5	46,56	26,5	19,39

Pro tyto hodnoty vyšla testová statistika $Q = 37,06 > \chi_6^2(0,05)$, proto zamítáme hypotézu, že všech zjišťovaných plynů se při částečných výbojích během života transformátorů generovalo shodné množství.

V dalším bude ukázáno, zda není některého z plynů více než vodíku, resp. oxidu uhličitého.

8.2.1 VODÍK – METAN

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů metan, vodík byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 126.

Tab. 126 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
CH ₄	49	9	4
H ₂	122	9	77

Pro dvojici plynů metan – vodík, vyšla statistika $|U_0| = 3,22 > u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů se tedy v tomto případě zamítá.

8.2.2 METAN – OXID UHLIČITÝ

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů metan, oxid uhličitý byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 127.

Pro dvojici plynů metan – oxid uhličitý, vyšla statistika $|U_0| = 2,28 > u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů se tedy v tomto případě zamítá. Oxidu uhličitého tedy bylo generováno při částečných výbojích na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ výrazně menší množství než metanu.

Tab. 127 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
CH ₄	98	9	10
CO ₂	38	7	53

Při částečných výbojích se žádného ze sledovaných plynů negeneruje více než vodíku. Za vodíkem následuje množství metanu, kterého je více než oxidu uhličitého. Dále bude již ověřována jen dominance vodíku.

8.3 DOMINANTNÍ PLYN PRO ELEKTRICKÉ VÝBOJE NÍZKÉ ENERGIE

Pro elektrické výboje nízké energie jsou v Tab. 128 uvedeny součty pořadí T_i , četnosti n_i a průměrné pořadí \bar{T}_i pro jednotlivé, běžně zjišťované plyny.

 Tab. 128 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	CO ₂	CO
T_i	1 847	933,5	1 884	2 572	2 860	3 426	2 408
n_i	25	24	26	26	26	26	25
\bar{T}_i	73,88	38,90	72,46	98,92	110	131,77	96,32

Pro tyto hodnoty vyšla testová statistika $Q = 51,17 > \chi_6^2(0,05)$, proto zamítáme hypotézu, že všech zjišťovaných plynů se při elektrických výbojích nízké energie během života transformátorů generovalo shodné množství.

V dalším bude ukázáno, zda není některého z plynů více než vodíku.

8.3.1 OXID UHLIČITÝ – VODÍK

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů oxid uhličitý, vodík byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 129.

 Tab. 129 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
H ₂	607	26	420
CO ₂	771	26	256

Pro dvojici plynů oxid uhličitý – vodík, vyšla statistika $|U_0| = 1,50 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů v tomto případě tedy nelze zamítnout.

8.3.2 VODÍK – ACETYLEN

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, acetylen byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 130.

Tab. 130 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
C ₂ H ₂	640	26	387
H ₂	738	26	289

Pro dvojici plynů vodík – acetylen, vyšla statistika $|U_0| = 0,90 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů nešla tedy ani v tomto případě zamítnout.

8.3.3 VODÍK – OXID UHELNATÝ

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, oxid uhelnatý byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 131.

Tab. 131 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
H ₂	743	26	258
CO	583	25	392

Pro dvojici plynů vodík – oxid uhelnatý, vyšla statistika $|U_0| = 1,26 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů nešla tedy ani v tomto případě zamítnout.

8.3.4 VODÍK – METAN

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, metan byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 132.

Tab. 132 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
CH ₄	523,5	25	451,5
H ₂	802,5	26	198,5

Pro dvojici plynů vodík – metan, vyšla statistika $|U_0| = 2,38 > u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů se tedy v tomto případě zamítá.

Při elektrických výbojích nízké energie se žádného plynu negeneruje více než vodíku. Na prošetřované hladině významnosti se generovalo vodíku stejně jako oxidu uhličitého, acetylenu a oxidu uhelnatého.

8.4 DOMINANTNÍ PLYN PRO ELEKTRICKÉ VÝBOJE VYSOKÉ ENERGIE

Pro elektrické výboje vysoké energie jsou v Tab. 133 uvedeny součty pořadí T_i , četnosti n_i a průměrné pořadí \bar{T}_i pro jednotlivé, běžně zjišťované plyny.

Tab. 133 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	CO ₂	CO
T_i	7 560	2 809	8 183	8 801	9 817,5	10 765	7 675,5
n_i	48	45	48	48	48	48	48
\bar{T}_i	157,5	62,42	170,48	183,35	204,53	224,27	159,91

Pro tyto hodnoty vyšla testová statistika $Q = 79,56 > \chi_6^2(0,05)$, proto zamítáme hypotézu, že všech zjišťovaných plynů se při elektrických výbojích nízké energie během života transformátorů generovalo shodné množství.

8.4.1 OXID UHLIČITÝ – VODÍK

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů oxid uhličitý, vodík byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 134.

Tab. 134 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
H ₂	2 204	48	1 276
CO ₂	2 452	48	1 028

Pro dvojici plynů oxid uhličitý – vodík, vyšla statistika $|U_0| = 0,91 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů v tomto případě tedy nelze zamítnout.

8.4.2 VODÍK – ACETYLEN

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, acetylen byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 135.

Tab. 135 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
C ₂ H ₂	2 166,5	48	1 313,5
H ₂	2 489,5	48	990,5

Pro dvojici plynů vodík – acetylen, vyšla statistika $|U_0| = 1,18 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů nešla tedy ani v tomto případě zamítnout.

8.4.3 VODÍK – ETYLEN

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, etylen byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 136.

Tab. 136 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
C ₂ H ₄	2 079,5	48	1 400,5
H ₂	2 576,5	48	903,5

Pro dvojici plynů vodík – etylen, vyšla statistika $|U_0| = 1,82 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů nešla tedy ani v tomto případě zamítnout.

8.4.4 VODÍK – OXID UHELNATÝ

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, oxid uhelnatý byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 137.

Tab. 137 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
H ₂	2 655	48	825
CO	2 001	48	1 479

Pro dvojici plynů vodík – oxid uhelnatý, vyšla statistika $|U_0| = 2,40 > u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů se tedy v tomto případě zamítá.

Při elektrických výbojích vysoké energie se žádného plynu negeneruje více než vodíku. Na prošetřované hladině významnosti se generovalo vodíku stejně jako oxidu uhličitého, acetylenu a etylenu.

8.5 DOMINANTNÍ PLYN PRO TEPELNOU PORUCHU S TEPLOTOU $T < 700\text{ °C}$

Pro tepelnou poruchu s teplotou $T < 700\text{ °C}$ jsou v Tab. 138 uvedeny součty pořadí T_i , četnosti n_i a průměrné pořadí \bar{T}_i pro jednotlivé, běžně zjišťované plyny.

Tab. 138 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	CO ₂	CO
T_i	980	689	754,5	234,5	839	1 191	983
n_i	16	16	16	11	15	16	16
\bar{T}_i	61,25	43,06	47,16	21,32	55,93	74,44	61,44

Pro tyto hodnoty vyšla testová statistika $Q = 24,18 > \chi_6^2(0,05)$, proto zamítáme hypotézu, že všech zjišťovaných plynů se při elektrických výbojích nízké energie během života transformátorů generovalo shodné množství.

8.5.1 OXID UHLIČITÝ – VODÍK

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů oxid uhličitý, vodík byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 139.

Tab. 139 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
H ₂	199	15	161
CO ₂	297	16	79

Pro dvojici plynů oxid uhličitý – vodík, vyšla statistika $|U_0| = 1,62 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů v tomto případě tedy nelze zamítnout.

8.5.2 OXID UHELNATÝ – VODÍK

Tab. 140 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
H ₂	227	15	133
CO	269	16	107

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů oxid uhelnatý, vodík byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 140.

Pro dvojici plynů oxid uhelnatý, vodík vyšla statistika $|U_0| = 0,51 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů nešla tedy ani v tomto případě zamítnout.

8.5.3 METAN – VODÍK

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů metan, vodík byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 141.

Tab. 141 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
CH ₄	268	16	108
H ₂	228	15	132

Pro dvojici plynů metan – vodík, vyšla statistika $|U_0| = 0,47 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů nešla tedy ani v tomto případě zamítnout.

8.5.4 VODÍK – ETYLEN

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, etylen byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 142.

Tab. 142 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
C ₄ H ₂	234	16	142
H ₂	262	15	98

Pro dvojici plynů vodík – etylen, vyšla statistika $|U_0| = 0,87 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů nešla tedy ani v tomto případě zamítnout.

8.5.5 VODÍK – ETAN

Tab. 143 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
C ₂ H ₆	230	16	146
H ₂	266	15	94

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, etan byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 143.

Pro dvojici plynů vodík – etan, vyšla statistika $|U_0| = 1,03 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů nešla tedy ani v tomto případě zamítnout.

8.5.6 VODÍK – ACETYLEN

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, acetylen byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 144.

Tab. 144 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
C ₂ H ₂	94	11	137
H ₂	257	15	28

Pro dvojici plynů vodík – acetylen, vyšla statistika $|U_0| = 2,83 > u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů se tedy v tomto případě zamítá.

Při tepelné poruše s teplotou $T < 700$ °C se žádného plynu negeneruje více než vodíku. Na prošetřované hladině významnosti se generovalo vodíku stejně jako oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého, metanu, etylenu a etanu.

8.6 DOMINANTNÍ PLYN PRO TEPELNOU PORUCHU S TEPLOTOU $T > 700$ °C

Pro tepelnou poruchu s teplotou $T > 700$ °C jsou v Tab. 145 uvedeny součty pořadí T_i , četnosti n_i a průměrné pořadí \bar{T}_i pro jednotlivé běžně zjišťované plyny.

Tab. 145 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	CO ₂	CO
T_i	1 326,5	909	1 493,5	501	1 075	1 356	720
n_i	18	17	18	17	18	17	16
\bar{T}_i	73,69	53,47	82,97	29,47	59,72	79,76	45

Pro tyto hodnoty vyšla testová statistika $Q = 32,16 > \chi_6^2(0,05)$, proto zamítáme hypotézu, že všech zjišťovaných plynů se při elektrických výbojích nízké energie během života transformátorů generovalo shodné množství.

8.6.1 ETYLEN – VODÍK

Tab. 146 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
C ₂ H ₄	394,5	18	100,5
H ₂	271,5	18	223,5

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů etylen, vodík byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 146.

Pro dvojici plynů etylen – vodík, vyšla statistika $|U_0| = 1,95 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů v tomto případě tedy nelze zamítnout.

8.6.2 OXID UHLIČITÝ – VODÍK

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů oxid uhličitý, vodík byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 147.

Tab. 147 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
H ₂	270	18	207
CO ₂	360	17	99

Pro dvojici plynů oxid uhličitý, vodík vyšla statistika $|U_0| = 1,78 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů nešla tedy ani v tomto případě zamítnout.

8.6.3 METAN – VODÍK

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů metan, vodík byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 148.

Tab. 148 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
CH ₄	376	18	119
H ₂	290	18	205

Pro dvojici plynů metan – vodík, vyšla statistika $|U_0| = 1,36 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů nešla tedy ani v tomto případě zamítnout.

8.6.4 VODÍK – ETAN

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, etan byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 149.

Tab. 149 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
C ₂ H ₆	287	17	172
H ₂	343	18	134

Pro dvojici plynů vodík – etan, vyšla statistika $|U_0| = 0,63 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů nešla tedy ani v tomto případě zamítnout.

8.6.5 VODÍK – OXID UHELNATÝ

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, oxid uhelnatý byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 150.

Tab. 150 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
CO	352,5	18	106,5
H ₂	242,5	16	181,5

Pro dvojici plynů vodík – oxid uhelnatý, vyšla statistika $|U_0| = 1,29 < u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů nešla tedy ani v tomto případě zamítnout.

8.6.6 VODÍK – ACETYLEN

Pro dvouvýběrový Wilcoxonův test a dvojici plynů vodík, acetylen byly získány součty pořadí T_i spolu s četnostmi n_i a veličiny U_i tak, jak je uvedeno v Tab. 151.

Tab. 151 Součet pořadí T_i a četnosti n_i pro jednotlivé plyny

Plyn	T_i	n_i	U_i
C ₂ H ₂	227	17	232
H ₂	403	18	74

Pro dvojici plynů vodík – acetylen, vyšla statistika $|U_0| = 2,61 > u(0,025)$, hypotéza o shodném množství generování plynů se tedy v tomto případě zamítá.

Při tepelné poruše s teplotou $T > 700$ °C se žádného plynu negeneruje více než vodíku. Na prošetřované hladině významnosti se generovalo vodíku stejně jako etylenu, oxidu uhličitého, metanu, etanu a oxidu uhelnatého.

8.7 CELKOVÝ POHLED

Z výše napsaného plyne, že pro případ, kdy je požadováno sledovat pouze jeden plyn, je nejvhodnější se zaměřit na vodík.

ZÁVĚR

Předkládaná disertační práce dává ucelený pohled na diagnostické metody sloužící k interpretaci plynů rozpuštěných v transformátorovém izolačním oleji. Tyto metody podrobně popisuje a vzájemně porovnává pomocí databáze obsahující skutečné poruchy sledovaných zařízení ve spojitosti se složením plynů v nich detekovaných.

Stávající diagnostické metody se podle předkládané práce shodují v tom, že nejprve je třeba zjistit nadstandardní množství jednotlivých plynů, které naznačuje, že se uvnitř sledovaného zařízení odehrává nestandardní děj. Dalším ze společných rysů je stanovení, zda jde o poruchu elektrickou či poruchu tepelnou pomocí acetyleny a etylenu. Z množství metanu a vodíku se upřesní, zda jde u elektrických poruch o výboje elektrické, nebo výboje částečné. V případě elektrických výbojů a tepelných poruch je pro stanovení jejich úrovně použit poměr vyprodukovaného etylenu a etanu.

Stačí-li uživateli rozhodnout, zda jde o poruchu elektrickou či tepelnou, lze ze stávajících metod použít metodu ČSN EN 60599, Duvalovu trojúhelníkovou grafickou metodu nebo Doernenburgovu metodu, které všechny mají úspěšnost detekování správné poruchy větší než 95 %. Podobnou úspěšnost má i poměr acetyleny a etylenu, které vychází z porovnání stávajících metod a má tu výhodu, že je potřeba zjistit množství jen pro dva plyny. Ostatní metody mají tuto úspěšnost již nižší.

Chce-li uživatel rozhodnout mezi trojicí možných poruch – částečné výboje, elektrické výboje a tepelná porucha, tak metody ČSN EN 60599 a Duvalova trojúhelníková grafická metoda mají úspěšnost správného odhalení opět více než 95 %. Podobnou úroveň odhalení správné poruchy má i dvojice poměrů acetyleny a etylenu a poměru množství produkovaného metanu a vodíku. Doernenburgova metoda měla tuto úspěšnost více než 90 %, ostatní metody již ovšem 90 % hranici nepřekonal.

Při požadavku odhalení všech poruch (částečné výboje, elektrické výboje nízké energie, elektrické výboje vysoké energie, tepelná porucha s teplotou $T < 700$ °C, tepelná porucha s teplotou $T > 700$ °C) bylo dosaženo úspěšnosti více než 90 % pro metody ČSN EN 60599 a Duvalovu trojúhelníkovou grafickou metody. Ostatní metody již měli úspěšnost nižší.

Při použití shlukové analýzy k odhalení poruch ve sledovaných zařízeních lze pro kombinaci zjišťovaných poruch – tepelné poruchy a elektrické poruchy, ale i pro rozhodování mezi částečnými výboji, elektrickými výboji a tepelnou poruchou dosáhnout úspěšnosti více než 95 %. Výhodou shlukové analýzy je dále to, že s rostoucí množinou zařízení se bude její úspěšnost dále zlepšovat. Další výhodou je potřeba znalosti méně plynů než u klasických diagnostických metod.

Pro potřebu zjištění všech poruch se pro shlukovou analýzu nepodařilo nalézt vhodnou kombinaci metriky a metody, pro kterou by byla úspěšnost vyšší než 90 %, jak tomu bylo u stávajících metod. To mohlo být zaviněno malým zkoumaným souborem.

Žádného plynu se ve sledovaných zařízeních neprodukovalo více než vodíku. Toho lze využít v redukci nákladů během běžného života sledovaného zařízení – není třeba sledovat veškeré vyvíjené plyny, stačí sledovat jen vodík. Až v momentě, jak je detekována nadměrná tvorba vodíku je třeba přejít ke zjištění množství všech potřebných plynů pro danou interpretační metodu a dle ní provést interpretaci a zjistit možnou poruchu uvnitř tohoto zařízení.

Byly získány zcela nové závěry a z tohoto důvodu bude na našem pracovišti snaha tyto závěry nabídnout průmyslové praxi, především pro použití do interních předpisů firem ČEZ, a. s., ORGREZ, a. s., EGÚ Brno, a. s. a dalším. Předpisy těchto firem se analýzou plynů zabývají komplexně, ovšem závěry předložené v této práci zatím nejsou v těchto předpisech uvedeny. Jako další bude účelné se snažit získané závěry prosadit při tvorbě nových norem dané problematiky se týkajících a v inovacích norem stávajících. Je samozřejmostí, že v práci získané závěry budou náležitě publikovány na konferencích a dále i formou příspěvků v odborných časopisech.

PŘÍNOS PRÁCE

V předkládané práci lze v kap. 1 nalézt stručný popis transformátoru spolu s popisem jeho činnosti a diagnostických metod sloužících k určování nestandardních dějů odehrávajících se uvnitř transformátoru. Konkrétněji je popsán princip analýzy plynů rozpuštěných v oleji, ve spojitosti s kterým jsou též definovány hlavní poruchy nastávající uvnitř transformátoru.

Analýzu plynů rozpuštěných v oleji lze vykonat až po jejich správném odhalení, nejběžnější metody sloužící k tomuto odhalení jsou v této práci popsány v kap. 2. Po odhalení konkrétních plynů vyskytujících se uvnitř sledovaného zařízení je třeba tyto plyny interpretovat. Pro tuto interpretaci je dostupných více metod, přičemž ty nejběžnější jsou uvedeny v kap. 3.

V kap. 5 lze nalézt porovnání metod sloužících k interpretaci plynů rozpuštěných v oleji a následné prošetření pomocí databáze IEC TC 10 popsané v kap. 4.

Důležitou vlastností jednotlivých interpretačních metod je jejich přesnost. Za přesnost je v této práci považován podíl správně určených poruch k celkovému počtu výsledků dané poruchy, tedy výsledků správných i chybných. To lze nalézt v kap. 6.

V kap. 7 se na databázi IEC TC 10 aplikovala shluková analýza. Bylo zjišťováno, jak se mění výsledky, je-li požadováno dojít k výsledku po jednom až třech krocích, popřípadě, mezi kterými poruchami je požadováno rozhodnout. V této závislosti se měnily i plyny potřebné k jejímu vykonání, metriky a metody shlukové analýzy.

V průběhu života transformátoru jsou z něj odebrány vzorky oleje a z nich zjišťované plyny v těchto vzorcích obsažené. To je za účelem zjištění, nezačaly-li se tyto plyny generovat v nadměrném množství, což by mohlo mít důvod v poruše uvnitř sledovaného zařízení. Analýza veškerých plynů je finančně náročnější, sledování pouze jednoho z těchto plynů by přineslo velkou finanční úsporu. Proto bylo v kap. 8 zkoumáno, kterého plynu je během života generováno nejvíce, který plyn by bylo nejvhodnější sledovat. To bylo opět provedeno na databázi IEC TC 10.

Předkládaná práce má praktický význam zejména při stanovení možné poruchy odehrávající se uvnitř zařízení, a to z plynů, uvnitř tohoto zařízení zjištěných. Ukazuje se, že je přesnější zjišťovat možné poruchy postupně – tedy nejprve rozhodnout o obecném typu poruchy a až posléze tuto poruchu upřesnit. Dále je zde ověřeno, že není nutné po dobu celého života zařízení sledovat veškeré generované plyny, ale hlavně vodík, kterého se generuje v zařízeních statisticky významně větší množství. Ostatní plyny je třeba zjišťovat až v momentě, kdy se vodíku bude generovat výrazně vyšší množství a vznikne podezření na poruchu uvnitř sledovaného zařízení. Užitečné je rovněž stanovení přesnosti pro jednotlivé stávající interpretační metody – to dává vodítko, které z konvenčních metod je nejlepší použít.

PŮVODNOST PRÁCE

Za původní v práci považuji:

- Porovnání stávajících metod pro interpretaci plynů rozpuštěných v oleji
- Stanovení pěti plynů (acetylen, etylen, metan, vodík a etan), které podle stávajících metod stačí znát pro interpretaci plynů rozpuštěných v oleji
- Stanovení přesnosti stávajících metod pro interpretaci plynů rozpuštěných v oleji
- Vyšetření změny přesnosti metod pro interpretaci plynů rozpuštěných v oleji v závislosti na omezení počtu možných výsledků
- Určení vhodných kombinací požadovaných plynů, metod a metrik shlukové analýzy pro hodnocení plynů detekovaných v izolačním oleji
- Určení statistických tolerančních intervalů pro významné plyny jednotlivých poruch
- Určení kvantilů složení plynů významných pro jednotlivé poruchy
- Stanovení dominantního plynu generujícího se ve výkonových olejových transformátorech

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Bradley, D.. *Basic Electrical power and machines*. London: Chapman & Hall, 1994. s. 203. ISBN 0-412-45540-4
- [2] 220kv-Two-Column-No-Excitation-Power-Transformer. *Made-in-China.com*. [Online] 2012. [Citace: 4. Červen 2012.] <http://image.made-in-china.com/4f0j00PectAyHCrYgm/220kv-Two-Column-No-Excitation-Power-Transformer.jpg>.
- [3] Aviation_Maintenance_Technician_Handbook_General. *AvStop.com*. [Online] 2012. [Citace: 4. Červen 2012.] http://avstop.com/ac/Aviation_Maintenance_Technician_Handbook_General/10-66.html.
- [4] IEEE Std 62-1995. *Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus – Part 1: Oil-filled Power Transformers, regulators, and Reactors*. IEEE Standards Board, March 16, 1995.
- [5] Mentlík, V.; Pihera, J.; Polanský, R.; Prosr, P.; Trnka, P.. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN – technická literatura, 2008. s. 440. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [6] ČSN 60567 ed. 2. *Olejem plněná elektrická zařízení - Odběr vzorků plynů a oleje pro analýzu volných a rozpuštěných plynů - Návod*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [7] ČSN EN 60599. *Elektrická zařízení v provozu plněná izolačním olejem – Pokyn pro interpretaci výsledků analýz rozpuštěných a volných plynů*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [8] Saha, T. K.. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. In *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Oct. 2003, vol. 10, Issue 5, s. 903 – 917. ISSN 1070-9878.
- [9] Pahlavanpour, B.; Wilson, A.. Analysis of transformer oil for transformer condition monitoring. *IEE Colloquium on An Engineering Review of Liquid Insulation (Digest No. 1997/003)*, 7 Jan. 1997, s. 1 – 5. INSPEC 5520876.
- [10] Thang, K. F.; Aggarwal, R. K.; McGrail, A. J.; Esp, D. G.. Analysis of power transformer dissolved gas data using the self-organizing map. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Oct. 2003, vol. 18, Issue 4, s. 1241 – 1248. ISSN 0885-8977.
- [11] DiGiorgio, J. B.. Dissolved gas analysis of mineral oil insulating fluids. *nttworldwide.com*. [online]. 2005 [cit. 29. června 2010]. Dostupné na WWW: <http://www.nttworldwide.com/docs/dga2102.pdf>.
- [12] Ahrens, L.. Photo-Acoustic Spectroscopy for Dissolved Gas Analysis of Transformer Oil. *19th African Hydro Symposium, Aswan, Egypt, 26*. [online]. 2007 [cit. 29. září. 2010]. Dostupné na www: <http://www.africanhydrosymposium.org/pdf/2007/PHOTO-ACOUSTIC%20SPECTROSCOPY%20FOR%20DISSOLVED.pdf>.

- [13] Innova Airtech Instruments A/S. Measuring Gases with the Help of Microphones – Photoacoustic Effect. *Touch briefings* [online], 2005, [cit. 14. 3. 2011]. Dostupné na www: http://www.touchbriefings.com/pdf/1332/Innova_tech.pdf.
- [14] Duval, M.; DePablo, A.. Interpretation of Gas-In-Oil Analysis Using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, March/April 2001, vol. 17, Issue 2, s. 31-41. ISSN 0883-7554.
- [15] Duval, M.. A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, May – June 2002, vol. 18, Issue 3, s. 8 – 17. ISSN 0883-7554.
- [16] IEEE Std C57.104TM-2008. *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*. IEEE-SA Standards Board, September 2008.
- [17] Suwanasri, T.; Suwanasri, C.. Program Development Using Dissolved Gas Analysis Method for an Analysis of Power Transformer Oil Testing Results. *GMSARN International Conference on Sustainable Development: Issues and Prospects for the GMS*, 2 – 14 Nov. 2008. Vol. 3.
- [18] Spurgeon, K.; Tang, W. H.; Wu, Q. H.; Richardson, Z. J.; Moss, G.. Dissolved gas analysis using evidential reasoning. *IEEE Proceedings Science, Measurement & Technology*, 6. May 2005, vol. 152, Issue 3, p. 110 – 117. ISSN 1350-2344.
- [19] Lewand, L.. Techniques for Interpretation of Data for DGA From Transformers [online]. Nov. 2008 [cit. 8. července 2010]. Dostupné na WWW: <http://www.transformerscommittee.org/info/F06/F06-DGA.pdf>.
- [20] Anděl, J.. *Matematická statistika*. SNTL/ALFA. Praha 1985. s. 352. ISBN 04-003-85.
- [21] Anděl, J.. *Statistické metody*. Matfyzpress. Praha 1993. s. 300. ISBN 8085863278.
- [22] Karpíšek, Z.. *MATEMATIKA IV – Statistika a pravděpodobnost*, CERM, Brno 2003. s. 170. ISBN 80-214-2522-9.
- [23] ČSN ISO 3534-1. *Statistika – Slovník a značky – Část 1: Obecné statistické termíny a termíny používané v pravděpodobnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [24] Marek, L.. *Pravděpodobnostní rozdělení v MS Excel* [online]. 2006 [cit. 11. dubna 2012]. Dostupné na WWW: <http://panda.hyperlink.cz/cestapdf/pdf06c6/mares.pdf>.
- [25] Wonnacot, T., H.; Wonnacot, R., J.. *Statistika pro obchod a hospodářství*. Praha. VICTORIA PUBLISHING a. s. s. 891. ISBN 80-85605-09-0.
- [26] Hátle, J.; Likeš, J.. *Základy počtu pravděpodobnosti a matematické statistiky*. Praha. SNTL/ALFA 1972. s. 464. ISBN 04-329-71.
- [27] Rektorys, K.. *Přehled užití matematiky*. Praha. PAMAT 2007. s. 1626. ISBN 978-80-7196-179-6.

- [28] Lukasová, A.; Šarmanová, J.. *Metody shlukové analýzy*. SNTL. Praha 1985. s. 212. ISBN 04-014-85.
- [29] Barvenčík, O.. *Statistické klasifikační metody*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Jaroslav Michálek, CSc..
- [30] Náповěda programu Minitab 15 [program]. Minitab Inc. [cit. 15. Května 2012]. Statistický program.
- [31] ČSN ISO 16269-6. *Statistická interpretace dat – Část 6: Stanovení statistických tolerančních intervalů*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [32] Karpíšek, Z.. *Statistická analýza* [online]. 2008 [cit. 13. Dubna 2012]. Dostupné na http://www.math.fme.vutbr.cz/download.aspx?id_file=2033

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

- [1] Hammer, M.; Ministr, M.. *Diagnostické zkoušky – seznam norem: výzkumná zpráva*. 2009.
- [2] Hammer, M.; Ministr, M.. *Diagnostické zkoušky – teorie pro výpočet nejistot: výzkumná zpráva*. 2009.
- [3] Hammer, M.; Ministr, M.. *Překlad normy IEEE Recommended Practise for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. 2009.
- [4] Šimková, M.; Ministr, M.; Hammer, M.. Diagnostika transformátorů s využitím expertních systémů. *Mezinárodní konference učitelů elektrotechniky SEKEL 2009, Brno - Lednice*. 15. 9. 2009 – 17. 9. 2009. s. 167-169. ISBN 978-80-214-3934-4.
- [5] Šimková, M.; Ministr, M.; Hammer, M.. Expert Systems in Transformer Diagnostics. *Recent advances in Mechatronics 2008-2009*. 18. 11. 2009 – 20. 11. 2009. s. 145-150. ISBN 978-3-642-05021-3.
- [6] Hammer, M.; Ministr, M.; Šimková, M.. Artificial Intelligence in Diagnostics of Electric Machines. *Recent advances in Mechatronics 2008-2009*. 18. 11. 2009 – 20. 11. 2009. s. 145-150. ISBN 978-3-642-05021-3.
- [7] Hammer, M.; Ministr, M.. Contribution to On-line Diagnostics of Power Oil Transformers. *Energyspectrum – International e-journal, www.energyspectrum.net*. 2010. vol. 5, No. 1, p. 30-36. ISSN 1214-7044.
- [8] Ministr, M.; Hammer, M.; Ertl, J.; Janda, O.. Ratio Methods Confrontation of Dissolved Gas Analysis. *20th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Brno*. 2011. vol. 4, No. 3, p. 228-236. ISSN 1803-1269.
- [9] Ertl, J.; Hammer, M.; Ministr, M.; Janda, O.. Failure Probability Prediction of Power Oil Transformers. *20th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Brno*. 2011. vol. 4, No. 3, p. 237-246. ISSN 1803-1269.
- [10] Janda, O.; Hammer, M.; Ertl, J.; Ministr, M.. Application of Fuzzy Logic in Power Oil Transformers Diagnostics. *20th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Brno*. 2011. vol. 4, No. 3, p. 319-324. ISSN 1803-1269.
- [11] Janda, O.; Hammer, M.; Ministr, M.; Ertl, J.. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Power Oil Transformer Diagnostics. *20th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Brno*. 2011. vol. 4, No. 3, p. 325 – 331. ISSN 1803-1269.
- [12] Hammer, M.; Ministr, M.; Ertl, J.; Janda, O.; Barvenčík, O.. Power Oil Transformer Reliability Assessment Based on Fuzzy Inference Systems and Time Series Analysis. *Energyspectrum – International e-journal, www.energyspectrum.net*. 2011. vol. 6, No. 1, p. 5-16. ISSN 1214-7044.
- [13] Hammer, M.; Ertl, J.; Janda, O.; Barvenčík, O.; Ministr, M.. Predikce poruch výkonových olejových transformátorů na základě časových řad a fuzzy přístupů. *Technická diagnostika*. 2012. vol. 21, No. z1/2012, p. 1-7. ISSN 1210-311X.

SEZNAM PROJEKTŮ AUTORA

Projekt HS 1380258, ČEZ, a. s., 2008, název: Vypracování metodik výpočtů nejistot pro diagnostiku energetických zařízení, spoluřešitel.

Projekt MPO ČR FI-IM5/173, 2008-2010, název: Metodika stanovení životnosti vysokonapěťových izolačních systémů točivých strojů, spoluřešitel.

Externí grant (GAČR 102/08/1118), 2008-2010, název: Inteligentní diagnostika elektrických strojů, člen řešitelského týmu.

Projekt SV (FSI-J-11-10), 2011, název: Rozbor spolehlivosti výkonových olejových transformátorů, člen řešitelského týmu.

Projekt SV (FSI-S-11-5), 2011-2013, název: Enviromentální a bezpečnostní aspekty vývoje, výroby a provozu strojů, člen řešitelského týmu.

Projekt SV, 2012, název: Neinvazivní metody rozboru spolehlivosti a jejich využití v optimalizaci údržby výkonových olejových transformátorů.

PEDAGOGICKÁ ČINNOST AUTORA

Vedení cvičení z předmětu Matematika I (1m)

Vedení laboratorních cvičení z předmětu Elektrotechnika a elektronika (cel)

Vedení laboratorních cvičení z předmětu Elektrotechnika a elektronika (cel-k)

Vedení laboratorních cvičení z předmětu Elektrotechnika a elektronika (6ee)

Vedení cvičení z předmětu Spolehlivost a diagnostika výrobních strojů (gsd)

Vedení diplomové práce:

Hindra, M., *Diagnostické metody sledování plynů rozpuštěných v transformátorovém oleji*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012, 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ministr Martin

Oponentský posudek bakalářské práce:

Stískal, P., *Diagnostika obráběcích strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010, 37 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

U_1	Vstupní napětí transformátoru
U_2	Výstupní napětí transformátoru
I_1	Vstupní proud transformátoru
I_2	Výstupní proud transformátoru
ϕ	Magnetický tok
H_2	Vodík
CH_4	Metan
CO	Oxid uhelnatý
CO_2	Oxid uhličitý
O_2	Kyslík
C_2H_2	Acetylen
C_2H_4	Etylen
C_2H_6	Etan
PD	Částečné výboje
D1	Elektrické výboje nízké energie
D2	Elektrické výboje vysoké energie
T1	Tepelná porucha s teplotou $T < 300\text{ °C}$
T2	Tepelná porucha s teplotou $300\text{ °C} < T < 700\text{ °C}$
T12	Tepelná porucha s teplotou $T < 700\text{ °C}$
T3	Tepelná porucha s teplotou $T > 700\text{ °C}$
TF	Tepelná porucha
ED	Elektrické výboje
EF	Elektrická porucha
v_i	Vzdálenost plynového poměru od i-té oblasti poruchy definované danou metodou
x_i	Pozorovaná jednotka znaku X u i-té statistické jednotky
$x_{(i)}$	I-tá nejmenší pozorovaná hodnota znaku X
n	Počet pozorovaných hodnot statistického souboru
m, r, s	Počet tříd rozříděného statistického souboru
f_i	Absolutní četnost i-té třídy rozříděného statistického souboru
x_i^*	Střed i-té třídy rozříděného statistického souboru

\bar{x}	Aritmetické průměr pozorované hodnoty X
ω_i	Váha i -té statistické jednotky
\tilde{x}	Medián pozorované hodnoty X
\hat{x}	Modus pozorované hodnoty X
s^2, \hat{s}^2	Výběrový rozptyl pozorované hodnoty X
s	Směrodatná odchylka pozorované hodnoty X
$F(X)$	Distribuční funkce náhodné veličiny X
p	Pravděpodobnost výskytu nějakého jevu
$E(X)$	Střední hodnota náhodné veličiny X
$D(X)$	Rozptyl náhodné veličiny X
$\sigma(X)$	Směrodatná odchylka náhodné veličiny X
$A(X)$	Šikmost náhodné veličiny X
$N(\mu, \sigma^2)$	Normální rozdělení pravděpodobnosti se střední hodnotou μ a rozptylem σ^2
$Be(a, b)$	Beta rozdělení pravděpodobnosti s parametry a a b
Y_i	Náhodná proměnná
$x_{i,j}$	Pozorovaná hodnota vektoru nezávisle proměnných
f	Regresní funkce
β_i	Regresní koeficient
e_i	Náhodná chyba
\hat{Y}	Vyrovnaná hodnota náhodné proměnné
b_i	Odhad regresního koeficientu
d	Odchylka náhodné proměnné Y_i od vyrovnané hodnoty náhodné proměnné \hat{Y}
SE	Odhad směrodatné odchylky
H_0	Statistická hypotéza
H_1	Alternativní statistická hypotéza
α	Hladina významnosti testu statistické hypotézy
t	Hodnota testového kritéria
$t_i(\alpha)$	Kritická hodnota testového kritéria pro i stupňů volnosti a hladinu významnosti α
k	Počet regresorů
$\rho(A, B)$	Vzdálenost objektů A a B
$D(\mathcal{A}, \mathcal{B})$	Koeficient nepodobnosti shluků \mathcal{A} a \mathcal{B}
SL	Úroveň podobnosti dvou shluků

$D_S(\mathcal{A}, \mathcal{B})$	Koeficient nepodobnosti shluků \mathcal{A} a \mathcal{B} pomocí metody nejbližšího souseda
$D_{CO}(\mathcal{A}, \mathcal{B})$	Koeficient nepodobnosti shluků \mathcal{A} a \mathcal{B} pomocí metody nejvzdálenějšího souseda
$D_A(\mathcal{A}, \mathcal{B})$	Koeficient nepodobnosti shluků \mathcal{A} a \mathcal{B} pomocí metody průměrné nepodobnosti objektů
$D_C(\mathcal{A}, \mathcal{B})$	Koeficient nepodobnosti shluků \mathcal{A} a \mathcal{B} pomocí centroidní metody
$D_M(\mathcal{A}, \mathcal{B})$	Koeficient nepodobnosti shluků \mathcal{A} a \mathcal{B} pomocí mediánové metody
z_{ij}	Standardizovaná hodnota j -tého znaku a i -tého objektu
x_{min}	Minimální hodnota pozorované jednotky znaku X
x_{max}	Maximální hodnota pozorované jednotky znaku X
n_i, n_j	Marginální četnosti
χ^2	Testová charakteristika χ - kvadrát
$\chi_i^2(\alpha)$	Kritická hodnota χ – kvadrát pro i stupňů volnosti a hladinu významnosti α
T_i	Součet pořadí
U_i	Testová charakteristika pro dvouvýběrový Wilcoxonův test
$W(\alpha)$	Kritická hodnota pro Wilcoxonův test a hladinu významnosti α
$u(\alpha)$	Kvantil normálního rozdělení
Q	Testová charakteristika pro Kruskal-Wallisův test

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Popis použitých matematických metod

Příloha 2 – Histogramy pro databázi IEC TC 10