

Expertní systémy v diagnostice transformátorů - 2. část

Expert Systems in Transformer Diagnostics - second part

Miloš Hammer, Ondřej Janda

hammer@fme.vutbr.cz, yjanda01@stud.fme.vutbr.cz

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

Abstrakt: Článek navazuje obsahově na část předcházející a tuto rozvíjí k praktické aplikaci. Je podrobně popsán na našem pracovišti vytvořený expertní systém, a to včetně verifikace jeho činnosti na konkrétních datech z diagnostických měření transformátorů z energetické praxe.

Abstract: This paper advances in previously published paper and exploits possibilities of using expert system in practical application. Expert system assembled in our department is closely described. Example of expert system working process is presented.

Expertní systémy v diagnostice transformátorů – 2. část

Miloš Hammer¹, Ondřej Janda²

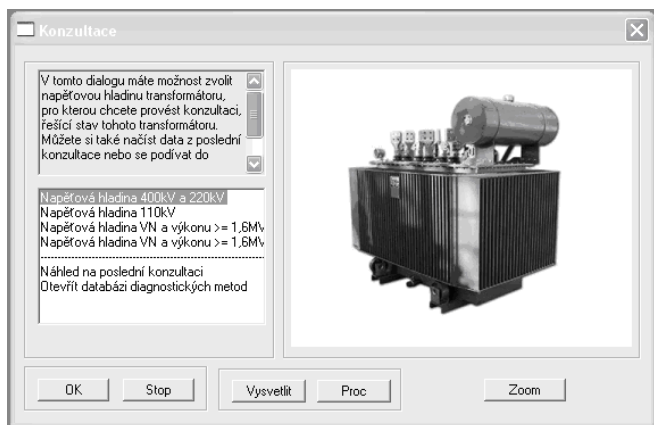
¹ Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
Email: hammer@fme.vutbr.cz

² Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
Email: yjanda01@stud.fme.vutbr.cz

Abstrakt – Článek navazuje obsahově na část předcházející a tuto rozvíjí k praktické aplikaci. Je podrobně popsán na našem pracovišti vytvořený expertní systém, a to včetně verifikace jeho činnosti na konkrétních datech z diagnostických měření transformátorů z energetické praxe.

1 Úvod do problému

Na našem pracovišti se mimo jiné zabýváme i výzkumem využití **umělé inteligence** v **diagnostice transformátorů**. Na základě tohoto výzkumu vznikl i dále popisovaný expertní systém. Tento systém slouží jako nástroj pro diagnostiku stavu především **výkonových transformátorů**, které nachází uplatnění v energetice. Při jeho tvorbě se důsledně vycházelo z teorie, která je popsána v 1. části tohoto článku. Na *obr.1* je jedna z úvodních obrazovek **expertního systému**, ze které má uživatel možnost zvolit všechny činnosti vytvořeného expertního systému, např. vybrat příslušné parametry, diagnostické metody a veličiny, průběh vlastní konzultace, požadované výstupy, apod. [1], [5], [6].



Obr. 1 Úvodní obrazovka expertního systému pro diagnostiku transformátorů [1], [6]

2 Charakteristika expertního systému pro diagnostiku transformátorů

Na našem pracovišti vyvinutý expertní systém pro diagnostiku transformátorů je **pravidlový** a slouží pro ohodnocení stavu výkonových transformátorů, a to na základě parametrů nejpoužívanějších diagnostických metod. Východím porovná-

vacím hlediskem i v tomto případě jsou v normách a předpisech [2], [7] stanovené kritériální hodnoty pro příslušnou diagnostickou veličinu u sledovaného transformátoru.

Expertní systém **vychází** z prázdného expertního systému ESTA. Právě tato koncepce umožňuje, aby systém sloužil kromě samotného nástroje pro konzultaci také jako prostředí pro **editaci** a **vkládání nových znalostí** do báze znalostí.

V dalším textu jsou stručně popsány **vlastnosti** expertního systému, **prostředí** expertního systému, **tvorba báze znalostí** – reprezentace znalostí a **komunikace** s jinými aplikacemi v prostředí MS Windows.

Vlastnosti expertního systému

Vlastnosti námi vyvinutého expertního systému jsou ve svých základech obdobné, které jsou popsány např. v [1], [5], [6]. Jedná se tedy o podporu DDE komunikace s jinými aplikacemi ve Windows, možnost odkazu na soubory s nápovědou systému Windows, možnost vkládání obrázků do dialogu, automatická kontrola syntaxe báze znalostí při ukončení její editace a nabídka několika prostředků pro vysvětlovací činnost expertního systému.

Prostředí expertního systému

V tomto prostředí probíhá vlastní tvorba **báze znalostí**, díky které se stává z prázdného expertního systému **expertní systém problémově orientovaný**. Probíhá v něm také konzultace uživatele s expertním systémem.

Prostředí má klasický vzhled, který je typický pro všechny aplikace operačního systému Windows. V horní části obrazovky lze najít lištu nástrojů spolu s nabídkami, pod kterými jsou schovány nástroje pro tvorbu a ladění báze znalostí i pro řízení průběhu konzultace. Spodní část slouží jako stavový řádek pro zobrazování informací o právě probíhajících akcích v expertním systému. Celá střední část (např. obr. 1) slouží jako pracovní prostor, kde se zobrazují jednotlivá okna při tvorbě a editaci sekcí a parametrů. V této části se také zobrazují dialogová okna během vlastní konzultace.

Tvorba báze znalostí - reprezentace znalostí

Každá báze znalostí obsahuje **pravidla** týkající se specifického oboru. V případě expertního systému pro diagnostiku transformátorů obsahuje báze znalostí např. pravidla pro jednotlivé diagnostické metody nebo pravidla pro vyhodnocení kritériálních hodnot diagnostických veličin.

Hlavními stavebními prvky báze znalostí jsou **sekce** a **parametry**. V sekcích jsou obsaženy vlastní pravidla (logika expertního systému), která vedou uživatele skrz bázi znalostí až do bodu, kdy je uživateli předložen konečný výsledek konzultace. Parametr je proměnná, která je **nositelem veškerých informací** v expertním systému a může nabývat těchto typů: **text, číslo, boolean, seznam**.

Komunikace s jinými aplikacemi v prostředí MS Windows

I expertní systém pro diagnostiku transformátorů **dokáže komunikovat** s ostatními aplikacemi v operačním systému MS Windows pomocí protokolu DDE (Dynamic Data Exchange). To znamená, že lze komunikovat například s tabulkovým procesorem MS Excel, s databázemi MS Access, s textovým procesorem MS Word, ale i s jinými aplikacemi, které podporují tento typ komunikace. Z těchto aplikací lze informace pomocí DDE protokolu přijímat, ale i do aplikací ukládat. Protokol DDE navíc umožňuje v rámci aplikace spouštění vlastních příkazů. Protokol je založen na posílání zpráv v architektuře klient/server. Expertní systém jako klient může s DDE serverem navázat jedno nebo více spojení, která jsou na sobě zcela nezávislá.

3 Tvorba a struktura báze znalostí

Expertní systém pro diagnostiku transformátorů tvoří **38** bází znalostí, uspořádaných do **stromové struktury** (pro každou napěťovou hladinu, stav, atd. je vytvořena samostatná báze znalostí). Tento způsob **tvorby** báze znalostí, to znamená její rozdělení na menší funkční části, byl vybrán z důvodů větší přehlednosti a snadnější orientace v její struktuře. V těchto bázích znalostí je celkem **2100** pravidel, **128** odkazů na vnější zdroje, **110** kontextových odkazů, **296** cílů a **55** obrázků.

Při konstrukci báze znalostí byly použity zejména tyto **zdroje**:

- české i mezinárodní technické normy,
- podnikové normy významných firem, které se zabývají diagnostikou transformátorů, odborná literatura,
- výsledky konzultací s expertem.

Již z vlastního principu expertního systému je zřejmé, že kvalita vyvozovaných závěrů je závislá především na kvalitě znalostí zakódovaných v bázi znalostí znalostním inženýrem. Na *obr. 2* je znázorněn příklad struktury **báze znalostí** expertního systému.

Jak je patrné i z *obr. 2* v energetice se transformátory **rozdělují** [7] na několik skupin, a to dle napěťových hladin a případně výkonu a určení. Jedná se o tyto skupiny transformátorů:

1. Transformátory napěťové hladiny 400 a 220 kV.
2. Transformátory napěťové hladiny 110 kV.
3. Transformátory napěťové hladiny vn a výkonu $\geq 1,6$ MVA – distribuční.

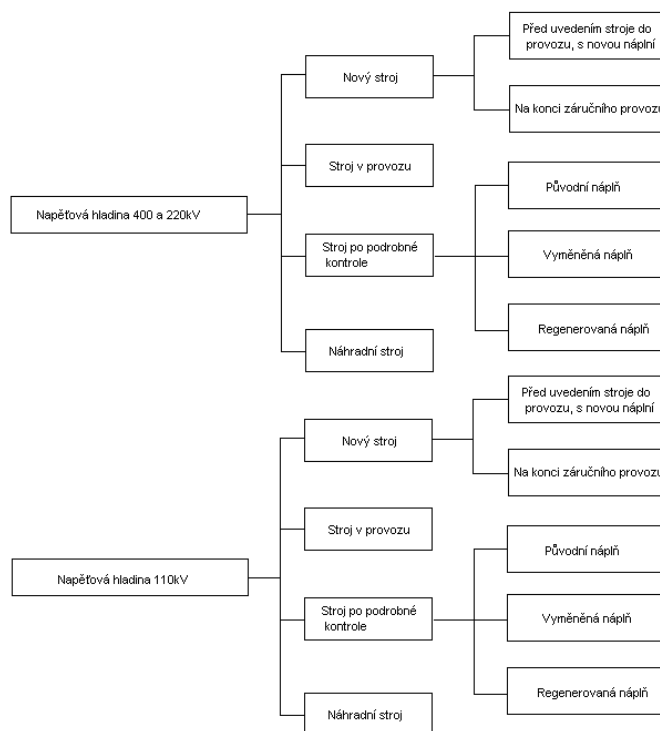
4. Transformátory napěťové hladiny vn a výkonu $\geq 1,6$ MVA – vlastní spotřeby.

Zvláštní skupinu tvoří **kondenzátorové průchodky**.

Z hlediska aplikace diagnostických metod je také rozhodující, o jaký transformátor se jedná.

Rozeznáváme:

- a) nový stroj,
- b) stroj po podrobné kontrole,
- c) stroj v provozu,
- d) náhradní stroj.



Obr. 2 Příklad báze znalostí expertního systému [1], [6]

U **nového stroje** se ještě rozlišují dva případy, a to stroj:

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

Podobně u stroje po **podrobné kontrole** se rozlišují případy, kdy stroj má:

- původní náplň,
- vyměněnou náplň,
- regenerovanou náplň.

Pro uvedené skupiny elektrických strojů netočivých jsou předepsány příslušné diagnostické metody. Použití jednotlivých metod se řídí strojem a je uvedeno v příslušných normách, předpisech a ostatní literatuře, např. [2], [3], [4], [7]. Z uvedeného vyplývá, že se vždy neaplikují všechny diagnos-

tické metody. Např. pro posouzení stavu izolačního systému **stroje v provozu** se určitě zjišťuje:

- 1) **izolační odpor,**
- 2) **kapacita a ztrátový činitel,**
- 3) **veličina C_2/C_{50} .**

Interval měření: 4 roky (podle způsobu provozu a z provozních zkušeností se termíny jednotlivých kontrol mohou zkrátit, pokud je transformátor vystaven nepříznivým podmínkám, např.: stroje s přerušovaným provozem nebo vodním chlazením).

4) kontrola olejové náplně.

Během provozu stroje se provádějí **periodické kontroly** olejové náplně dané podnikovou normou pro určité napěťové hladiny nebo kontroly ve zkrácených časových intervalech v závislosti na aktuálním stavu posuzovaného transformátoru.

Intervaly měření: každé 4 roky - komplexní rozbor, plynová chromatografie rozkladových plynů rozpuštěných v oleji se provádí podle důležitosti stroje.

Podle způsobu provozu a z provozních zkušeností se termíny jednotlivých kontrol mohou zkrátit, pokud je transformátor vystaven nepříznivým podmínkám nebo hodnota některého sledovaného parametru neodpovídá normálnímu stavu.

Celkový stručný **přehled** diagnostických metod používaných v současné době pro transformátory je následující [2], [3], [7]:

Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu

Měření **izolačního odporu** je jednou z nejstarších technik pro ověřování stavu izolačního systému i elektrických strojů netočivých. Je založena na měření proudu protékajícího izolací při určitém stejnosměrném napětí ve vybraných časových intervalech. Odpor se potom počítá z obecně známého Ohmova zákona.

Polarizační index je veličina charakterizující stav izolace (především přítomnost vlhkosti) a stanoví se z časového průběhu izolačního odporu. Určuje se především **jednominutový** polarizační index p_{i60} :

$$p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}}$$

kde R_{iz60} je hodnota izolačního odporu v $M\Omega$ odečtená v čase 60s (1 minuta) po připojení měřicího napětí, R_{iz15} je hodnota izolačního odporu v $M\Omega$ odečtená v čase 15s po připojení měřicího napětí.

Měření ztrátového činitele a kapacity, výpočet časové konstanty vinutí

Ztrátový činitel, kapacita a výpočet časové konstanty je popsán např. v [2], proto jsou dále uvedeny jen některé vybrané skutečnosti.

Velikost **ztrátového činitele ($tg\delta$)** je přímo úměrná ztrátám energie, které jsou rozptýleny v dielektriku při jeho namáhání proměnným elektrickým polem.

Měření ztrátového činitele izolačního systému transformátoru a jeho kapacity má značný význam pro posouzení jejího stavu a dalšího profylaktického sledování. Velikost ztrátového činitele je ovlivněna polarizací měřeného dielektrika (množstvím přítomných polárních látek, např. vody, reakčních produktů stárnutí a tepelného namáhání izolace, mechanických mikronečistot), teplotou či cirkulací izolačního média. Ztrátový činitel je v absolutní hodnotě bezrozměrný údaj. V praxi se často používá údaj vynásobený 10^2 .

Kapacita (C) se obvykle udává v pF nebo μF .

Časovou konstantu (τ) stanovíme výpočtem, např. dle vztahu:

$$\tau = R_{iz60} \times C_{50}$$

kde R_{iz60} je izolační odpor v $M\Omega$ určený v čase 60s po zapojení měřicího napětí, C_{50} je kapacita izolace změřená při 50 Hz v μF .

Měření částečných výbojů

Metoda **měření částečných výbojů** spočívá v měření a vyhodnocování proudových impulsů vyvolaných ve vnějším měřicím obvodu částečnými výboji vznikajícími ve vyšetřovaném izolačním systému. Částečné výboje mohou vznikat v dutinách izolace, mezi vlastní izolací vodiče a vodičem, mezi špatně odizolovanými částmi magnetického obvodu, po povrchu izolace, na rozhraní dvou dielektrik (například olej-vzduch, olej-papír), mezi kontakty, v místech s nedostatečně uzemněnými částmi, které mají být na zemním potenciálu apod. Příčinou jejich vzniku je buď špatně navržená izolační soustava nebo technologie nebo nedodržení technologických postupů nebo překročení předpokládaných provozních podmínek (vznik přepětí, apod.).

Částečné výboje vyvolávají postupně **zhoršování** kvality izolačního systému v důsledku svého zpravidla dlouhodobého, kumulativního působení. Měření částečných výbojů lze odhalit vznikající závadu a tím předejít haváriím s velkými ekonomickými ztrátami.

Sled a tvar výbojů lze pozorovat během aplikovaného střídavého napětí z křivky napětí, snímané například z vhodného kapacitního děliče, připojeného ke svorkám proměřovaného transformátoru. Tímto děličem může být kondenzátorová průchodka, opatřená měřicím vývodem. Alternativně lze použít i jiný způsob snímání (například z měřicí impedance připojené k nulovému vývodu transformátoru, z odizolované nádoby nebo zemního vodiče).

Měření a analýza polarizačního spektra

Při přiložení stejnosměrného napětí na dielektrikum dochází k jeho **polarizaci**. Na polarizaci izolačního systému transformátoru se pro relaxační doby v rozmezí sekund až hodin významnou měrou podílejí molekuly vody přítomné v papírové izolaci a depolymerizační produkty stárnutí. Molekuly, které tvoří izolační soustavu, jsou natáčeny ve směru elektrického pole. Po krátkodobém zkratování se izolační

soustava částečně depolarizuje. Po odzkratování se vlivem zbytkového náboje objeví na koncích izolačního systému zotavené napětí, jehož velikost je závislá na nabíjecí a vybíjecí době, velikosti nabíjecího napětí a na geometrických a polarizačních vlastnostech konkrétní izolační soustavy.

Spínání a odspínání měřicího napětí a zkratování a odzkratování měřeného objektu je prováděno mikroprocesorem řízeným obvodem s vysokonapěťovými spínači. Průběh zotaveného napětí a jeho maximální hodnota pro různé nabíjecí časy a poměry nabíjecí a vybíjecí doby je měřen obvodem s vysokou vstupní impedancí.

Zjišťování veličiny C_2 / C_{50}

Zjišťování **oměru kapacit** C_2 (kapacita měřená při frekvenci 2 Hz) a C_{50} (kapacita měřená při frekvenci 50 Hz) je metoda pro zjišťování míry navlhnutí izolačního systému transformátorů plněných olejem. Metoda využívá závislosti relativní permitivity na kmitočtu střídavého elektrického pole, která se projevuje u většiny dielektrik a souvisí s jejich polarizací. Nejvíce se v izolaci projevuje přítomnost vody, jakožto látky silně polární. Proto u nenavlhle izolace se zjištěné hodnoty kapacit C_2 a C_{50} příliš neliší, zatímco u navlhle se liší. Měřicím přístrojem k tomu uzpůsobeným se stanoví kapacita C vinutí transformátorů proti kostře, která je totožná s kapacitou C_{50} měřenou při kmitočtu 50 Hz, dále se určí veličina, rozdílu kapacit $C_2 - C_{50}$ naměřených při kmitočtech 2 a 50 Hz, která představuje přírůstek kapacity C .

Poměr naměřených hodnot kapacit C_2 a C_{50} spolu s dalšími diagnostickými veličinami přispívá k objektivnějšímu posouzení izolačního stavu transformátoru.

Metoda frekvenčních charakteristik

Metoda **frekvenčních charakteristik** je určena k detekci poruch vinutí transformátorů, jakými jsou např. mezizávitový zkrat nebo deformace vinutí. Je založena na skutečnosti, že každé vinutí transformátoru představuje určité uskupení mezizávitových kapacit, kapacit vinutí k zemi, vzájemných a vlastních indukčností a odporu vinutí. Toto uskupení je charakterizováno svojí frekvenční charakteristikou, tedy závislostí útlumu napětí na frekvenci. Každý mezizávitový zkrat nebo deformace vinutí, které znamenají určitou změnu některé kapacity nebo indukčnosti, se projeví změnou průběhu frekvenční charakteristiky. Detekce těchto změn je předmětem metody frekvenčních charakteristik.

Měření odporu vinutí transformátoru

Odpor vinutí se v diagnostické praxi používá převážně pro přesné **stanovení teploty vinutí** transformátoru. U regulačních transformátorů lze z hodnot odporu, naměřených při postupném zařazování všech odboček, usuzovat na kvalitu regulačního zařízení (kontakty přepínače, připojení odboček vinutí).

Teplota vinutí je údaj, důležitý pro správné vyhodnocování diagnostických metod, zejména měření izolačního odporu, kapacity a ztrátového činitele.

Ke hrubému stanovení teploty postačí údaj teploměru instalovaných na transformátoru. Přitom je třeba si uvědomit, že

tyto teploměry měří teplotu oleje pod víkem transformátoru a teplotě vinutí odpovídá až údaj při ustáleném stavu. U některých velkých transformátorů bývají instalovány dva teploměry, z nichž jeden měří teplotu oleje u dna transformátoru. V takovém případě je pro další úvahy používána průměrná hodnota údajů, odečtených na obou teploměrech.

Pro přesné stanovení teploty se provádí měření odporu vinutí transformátoru s následným **výpočtem**, pro který je nutno znát údaj odporu vinutí při známé teplotě. Tento údaj je uveden v dokumentaci výrobce.

Teplota vinutí transformátoru se vypočítá podle vzorce:

$$t_x = \frac{R_x}{R_0} (t_0 + 235) - 235 \quad [^{\circ}C, \Omega, \Omega, ^{\circ}C],$$

kde t_x je neznámá teplota, R_0 je odpor vinutí při známé teplotě, R_x je odpor vinutí změřený při neznámé teplotě a t_0 je známá teplota (údaj výrobce).

Kondenzátorové průchodky - měření ztrátového činitele a kapacity v provozu

Velikost **ztrátového činitele** je přímo úměrná ztrátám energie rozptýleným v dielektriku při jeho namáhání proměnným elektrickým polem. Jestliže budou tyto ztráty, jež se přeměňují v teplo, dostatečně velké, pak může dojít při současném působení tepla od vinutí k tepelnému narušení jak izolační soustavy průchodky, tak i vodiče a k následné destrukci průchodky.

Měření se provádí **můstkovou metodou**, při níž je v jedné větvi můstku zapojen kondenzátor se známým dielektrikem, v druhé větvi pak je zapojen proměřovaný objekt, jehož **kapacitu a ztrátový činitel** je třeba změřit. Použitím vhodné kombinace odporových a kapacitních dekád a jejich nastavením na takovou hodnotu, aby v diagonální větvi můstku tekla nulový proud, lze zjistit **kapacitu** proměřovaného objektu.

Stanovení celkového obsahu plynů rozpuštěných v minerálním oleji

Stanovení **celkového obsahu plynů** rozpuštěných v izolačním oleji provozovaných strojů umožňuje posoudit, zda nedochází k přesycování oleje plyny, a tak nehrozí nebezpečí poklesu hodnoty průrazného napětí oleje, příp. vydělování plynů do plynového relé. U hermetizovaných strojů lze navíc ověřit i funkčnost hermetizace. U nových nebo opravovaných strojů lze měřením celkového obsahu plynů rozpuštěných v oleji posoudit kvalitu nové nebo opravené izolační soustavy.

Odstranění rozpuštěných plynů z oleje pro analýzu smí být provedeno vakuovou extrakcí nebo stripováním [7].

Metoda analýzy plynů adsorpční plynovou chromatografií

Vzorky plynů, ať získané z plynových relé nebo odstraněné ze vzorku oleje, se analyzují plynovým chromatografem.

Naměřené hodnoty jednotlivých rozkladových plynů se vyhodnotí buďto podle doporučených kritériálních hodnot podle normy IEC 60599 nebo podle kritérií doporučených jednotlivými výrobci.

Stanovují se plyny dle *tab. 1.* a dále ΣC_3 popř. ΣC_4 , které příslušná norma vysloveně nevyžaduje.

Metoda stanovení 2-furfuralu a jemu příbuzných sloučenin

2-furfural a jemu příbuzné furanové sloučeniny rozpuštěné v minerálním oleji se analyzují vysoce účinnou kapalinovou chromatografií (HPLC). Před HPLC analýzou se furanové deriváty extrahují z oleje vhodnou extrakční metodou jako je extrakce z kapaliny do kapaliny [7].

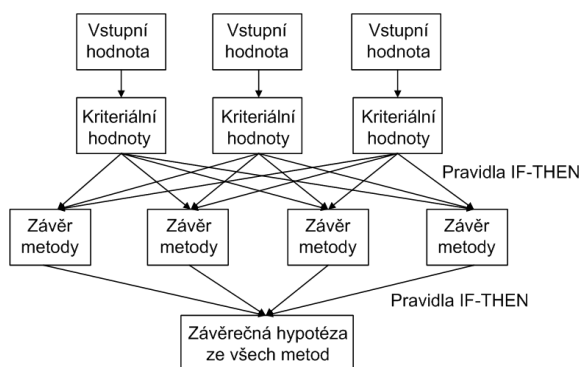
Metoda stanovení průměrného polymerizačního stupně (PPS) pevné izolace na bázi celulózy

Podstatou zkoušky je měření výtokových časů roztoků papíru, který je rozpuštěný ve zředěném kuenu (kuprietyléndiáminé) v poměru 1:1, ve viskozimetru. Další podrobnosti jsou např. v [7].

Tab. 1 Diagnostikované plyny

vodík	H ₂ ,
kyslík	O ₂ ,
dusík	N ₂ ,
metan	CH ₄ ,
etan	C ₂ H ₆ ,
etylen	C ₂ H ₄ ,
acetylen	C ₂ H ₂ ,
oxid uhelnatý	CO,
oxid uhličitý	CO ₂ ,

Obecná vnitřní **struktura báze znalostí** v expertním systému pro diagnostiku transformátorů, která obsahuje některý z výše uvedených souborů diagnostických metod, je na *obr. 3.*



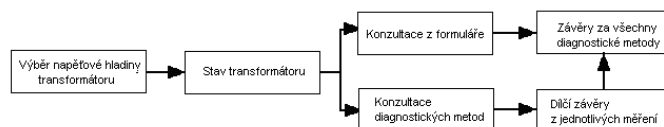
Obr. 3 Vnitřní struktura báze znalostí pravidlového expertního systému [1], [5], [6]

V následující části tohoto článku je podrobněji pojednáno o struktuře báze znalostí pravidlového expertního systému, jsou popsány jednotlivé způsoby vkládání informací, pravidla pro porovnávání kriteriálních hodnot i generování závěrečných hypotéz.

4 Konzultace uživatele s expertním systémem

Konzultace uživatele s expertním systémem [1], [6] probíhá podle schématu na *obr. 4.*

Nejdříve je nutné vybrat napětovou hladinu transformátoru (*obr. 1*), která bude předmětem konzultace, potom je potřeba zvolit, zda se jedná o nový stroj, stroj v provozu, stroj po podrobné kontrole a náhradní stroj (*obr. 5*), dále druh konzultace a nakonec je nutné zadat způsob získání závěrů. Po vygenerování závěrečné expertízy jsou ohodnocené parametry uloženy do souboru, aby na jejich základě mohla být kdykoli zopakována konzultace.



Obr. 4 Průběh konzultace v expertním systému [1], [6]

Jak je patrné např. i z *obr. 7*, expertní systém řeší konzultaci izolačního stavu transformátoru třemi způsoby:

- pomocí vstupního formuláře (formulářový vstup),**
- zpracováním celého souboru předepsaných diagnostických metod,**
- možností použití diagnostických metod jednotlivě.**

a) Konzultace izolačního stavu transformátoru načtením hodnot ze vstupního formuláře

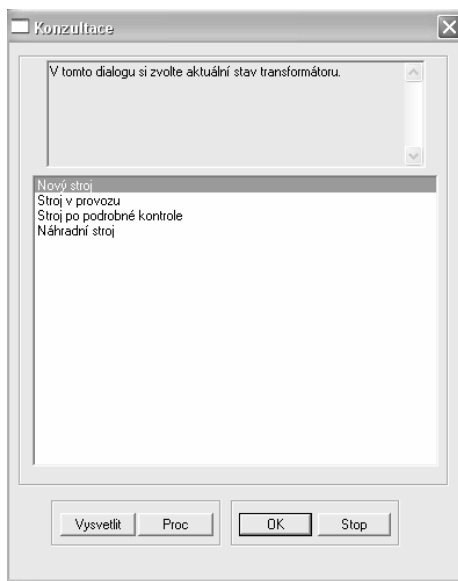
Formulářový vstup je v případě expertního systému řešen odlišným způsobem, než je běžné. Samotný formulář představuje tabulka vytvořená v MS Excel, do níž jsou zadávány numerické hodnoty parametrů souboru diagnostických metod. Tyto numerické hodnoty jsou pak pomocí komunikačního protokolu DDE načteny do expertního systému a v něm na základě produkčních pravidel ohodnoceny.

Tento způsob komunikace je velmi rychlý, neboť po načtení formuláře se ihned zobrazí výsledky jednotlivých diagnostických metod a nakonec je zobrazena konečná expertíza. V podstatě je tu zautomatizován proces dialogu s uživatelem.

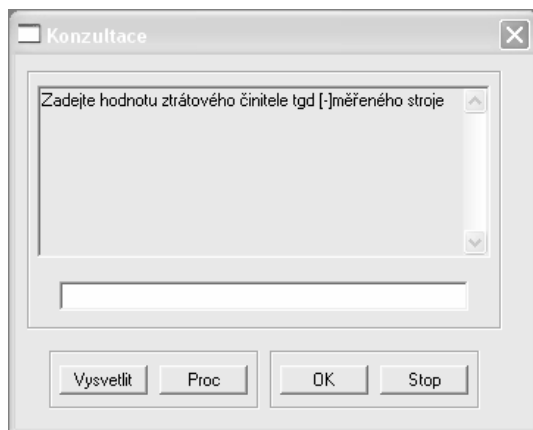
b) Konzultace izolačního stavu transformátoru souborem předepsaných diagnostických metod

Jak již bylo konstatováno, pro každou napětovou hladinu a stav transformátoru (nový stroj, stroj v provozu, stroj po podrobné kontrole a náhradní stroj) je předepsán jiný soubor diagnostických metod pro ohodnocení jeho izolačního systému. **Expertní systém umožňuje provést konzultaci celého souboru diagnostických metod**, přičemž po provedení každé diagnostické metody vygeneruje zprávu o výsledku této metody. Po provedení všech diagnostických metod expertní systém vygeneruje konečné vyhodnocení.

Během konzultace prochází inferenční mechanismus bázi znalostí pravidlo po pravidle. Parametry obsažené v pravidlech nemusí mít po každé přiřazenou hodnotu, na základě které by bylo pravidlo aktivováno nebo přeskočeno.



Obr. 5. Okno dialogu pro volbu stavu transformátoru

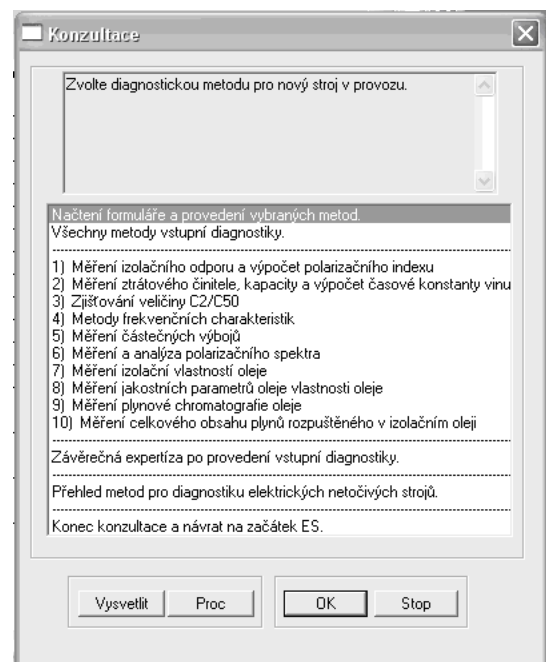


Obr. 6 Okno dialogu pro zadávání hodnot diagnostických veličin [1], [6]

Pokud inferenční mechanismus narazí na neznámý parametr, který nemá žádnou hodnotu, vyvolá příslušné dialogové okno, ve kterém se dotazuje uživatele na zadání požadované hodnoty. V dialogu je možné zadat textovou, numerickou či boolean hodnotu nebo zvolit odpověď z předloženého seznamu. Příklad dialogového okna, kdy expertní systém požaduje zadání numerické hodnoty je např. na obr. 6.

Jak je vidět z obr. 6 nebo obr. 7, dialogové okno tvoří několik částí (platí pro všechny typy dialogových oken):

- otázka, na základě které uživatel zadá požadovanou vstupní hodnotu,
- pole pro vkládání vstupních hodnot,
- grafický objekt, který je nepovinný, má estetickou hodnotu, popřípadě vysvětlovací funkci,
- v každém dialogovém okně jsou tlačítka, kterými uživatel komunikuje s expertním systémem:
 - „Vysvětlit“ - slouží k vyvolání nápovědy k dotazovanému parametru,
 - „Proc“ - slouží k vysvětlení, jakým způsobem bylo dosaženo dotazovaného parametru a proč byl položen dotaz,
 - „OK“ - slouží k potvrzení dialogu a k pokračování konzultace,
 - „Stop“ - dojde k přerušení konzultace (pokračovat v konzultaci od místa, kde byla přerušena, lze výběrem „Konzultace\Pokračovat v konzultaci“ v menu expertního systému),
 - „Zoom“ - vyskytuje se pouze u dialogových oken s obrázkem a slouží k jeho zvětšení na celou obrazovku.



Obr. 7 Okno dialogu pro volbu diagnostických metod transformátoru [1], [6]

c) Použití diagnostických metod jednotlivě

Často může nastat případ, kdy je stav transformátoru ohodnocován **pouze některými diagnostickými metodami** a nikoliv celým souborem těchto metod. V tomto případě umožňuje expertní systém použít diagnostické metody jednotlivě. Komunikace s expertním systémem je stejná jako v předešlém případě. Uživatel si zvolí z nabídky diagnostickou metodu a expertní systém si od něj v dialogu vyžádá informace nutné k provedení expertízy. Závěrečné doporučení je pak generová-

no pro každou provedenou diagnostickou metodu zvlášť. Nemusí být generováno celkové konečné doporučení, jak je tomu v případě b). V tomto případě potom platí pro vyvození celkového konečného doporučení jednoduché pravidlo, které bylo stanoveno na základě konzultace s experty:

„Pokud expertní systém vygeneruje alespoň jeden závěr, ve kterém hodnoty zkoumaných parametrů nevyhovují kritériím předepsaným pro konkrétní typ transformátoru, nedoporučuje se další jeho provoz. V opačném případě je možný normální provoz stroje a další diagnostická měření je doporučeno provádět v plánovaných intervalech.“

Konzultace uživatele s expertním systémem – kritériální hodnoty

Po načtení vstupních hodnot do expertního systému (z formuláře nebo zadané uživatelem při konzultaci) se pomocí pravidel tyto hodnoty porovnají s kritériálními hodnotami. Pokud hodnota splní kritérium, je konsekvent pravidla uložen do báze znalostí a pokračuje se dále. Pokud hodnota nevyhoví požadavku, je pravidlo ignorováno a přechází se k dalšímu pravidlu v pořadí.

Konzultace s expertním systémem – konečná doporučení

Závěrečná doporučení, která expertní systém vygeneruje na základě vstupních hodnot, jsou uživateli předkládána formou grafických oken v prostředí expertního systému (obr. 8) a zároveň jsou ukládána do textového souboru. Expertní systém je schopen vygenerovat dva druhy konečných doporučení:

1. Konečná doporučení za jednotlivé diagnostické metody.
2. Konečná doporučení za celý soubor předepsaných diagnostických metod.

Tato spolu velice úzce souvisí, neboť na základě doporučení z jednotlivých diagnostických metod je generováno doporučení za celý soubor diagnostických metod. V dalším textu z hlediska přehlednosti nebudou dále rozlišována konečná doporučení, nebude-li to nutné.

Jak je patrné z obr. 8, okno expertního systému se závěrem konzultace obsahuje tři tlačítka:

- „Proč“ - slouží k vysvětlení, jakým způsobem bylo dosaženo konečného doporučení,
- „OK“ - slouží k potvrzení dialogu a k pokračování konzultace,
- „Stop“ - dojde k přerušení konzultace.

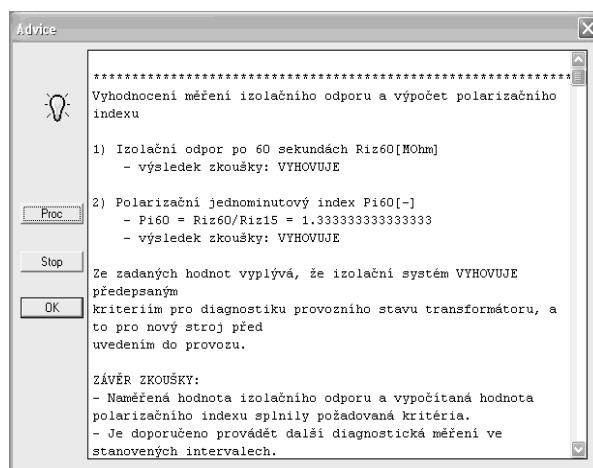
Je zřejmé, že jedním z požadavků na expertní systém je i zpětná **reprodukovatelnost** a **záloha** provedených konzultací. Expertní systém pro diagnostiku transformátorů nabízí dva způsoby řešení tohoto problému:

- ukládání průběhu konzultace do textového souboru

Každou konzultaci uživatele s expertním systémem je možno ukládat do textového souboru. Tento soubor má příponu „log“ a lze jej otevřít přímo v prostředí expertního systému. Do tohoto souboru lze ukládat kromě konečných doporučení také dialogy mezi expertním systémem a uživatelem, zahrnující kromě otázek, které jsou kladeny uživateli, i zadané odpovědi.

- ukládání parametrů do souboru

Jak již bylo napsáno dříve, během konzultace uživatel zadává hodnoty parametrům, které jsou dosazovány do pravidel a vyhodnocovány. Expertní systém je naprogramován tak, aby ohodnocené parametry ukládal do souborů s příponou „dat“ a následně je uměl přečíst a zobrazit. Pro každou bázi znalostí je vytvořen samostatný soubor, do kterého se tyto parametry zálohují.



Obr. 8 Okno s konečným doporučením pro diagnostickou metodu měření izolačního odporu [1], [6]

5 Ověření funkce expertního systému na reálných datech

Když byla dokončena tvorba expertního systému, byla testována jeho funkčnost na datech, která byla získána z reálného provozu. Aby byly předvedeny možnosti expertního systému, bylo provedeno ohodnocení stavu transformátoru expertním systémem třemi způsoby [1]:

1. Ohodnocení izolačního stavu transformátoru na základě dialogu s expertním systémem.
2. Ohodnocení izolačního stavu transformátoru na základě hodnot načtených z formuláře.
3. Ohodnocení izolačního stavu transformátoru předepsaným souborem diagnostických metod pro stroj po opravě.

Ohodnocení izolačního stavu transformátoru na základě dialogu s expertním systémem

Vstupní hodnoty diagnostických parametrů

Pro ověření funkce expertního systému byla použita vybraná data (z roku 1978 a 1990) pocházející z měření transformátoru dle *tab. 2*.

Při kontrolním měření byly realizovány všechny požadované diagnostické metody, avšak pro ověření našeho expertního systému byly použity v předkládaném článku pouze dále uvedené diagnostické metody a parametry:

Tab. 2 Parametry diagnostikovaného objektu

Zařízení	Blokový transformátor
Výrobce	Škoda Plzeň
Rok výroby	1978
Převod	420/13,8/13,8 kV
Výkon	245/127/127 MVA
Počet vinutí	3

1. Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu

- izolační odpor R_{iz15} [MΩ], R_{iz60} [MΩ],
- polarizační index jednodominutový P_{i60} [-],

2. Měření ztrátového činitele, kapacity a časové konstanty

- ztrátový činitel $tg\delta$ [-],
- kapacita C [pF],
- časová konstanta τ [s].

V článku použité a zadávané konkrétní hodnoty jsou uvedeny v *tab. 3* pro rok měření 1978 a v *tab. 4* pro rok měření 1990. Výsledky měření pro rok 1978 jsou dále označovány: **výsledky 1**, výsledky měření pro rok 1990 jsou dále označovány: **výsledky 2**.

Tab. 3 Výsledky měření izolačního odporu, ztrátového činitele a kapacity v roce 1978 (výsledky 1)

Zapojení *	R_{iz15} [MΩ]	R_{iz60} [MΩ]	$tg\delta$ [-]	C_{novy} [pF]	C_{50} [pF]
VVN-GST A+B	2800	5000	0,38	7120	7120
VN1-GST A+B	2600	5000	0,4	7670	7670
VN2-GST A+B	2350	4600	0,36	7850	7850

* označení způsobu zapojení vinutí při měření [2], [7]

Konzultace provedená expertním systémem

Po spuštění expertního systému byl v dialogu s expertním systémem zvolen jako typ stroje transformátor o určité napětové hladině (*obr. 1*), potom zda se jedná o nový stroj, stroj v provozu, stroj po podrobné kontrole a náhradní stroj (*obr. 5*) a dále druh konzultace. Poté byly z nabídky **postupně prováděny vybrané diagnostické metody**, jejichž průběh byl zaznamenáván do textového souboru. Jak je vidět z *tab. 3* a *tab. 4*, u transformátoru bylo **vinutí zapojeno různým způsobem** (způsoby zapojení přesně stanovuje příslušná norma), proto

bude konzultace expertním systémem také provedena pro každé **předepsané zapojení** zvlášť.

Tab. 4 Výsledky měření izolačního odporu, ztrátového činitele a kapacity v roce 1990 (výsledky 2)

Zapojení *	R_{iz15} [MΩ]	R_{iz60} [MΩ]	$tg\delta$ [-]	C_{novy} [pF]	C_{50} [pF]
VVN-GST A+B	1100	2200	0,43	7120	7155
VN1-GST A+B	1050	2000	0,47	7670	7897
VN2-GST A+B	900	1700	0,49	7850	7715

* označení způsobu zapojení vinutí při měření [2], [7]

Pro názornost je dále uveden **průběh konzultace (výsledky 1)** pro zapojení vinutí **VVN** hodnoceného elektrického stroje, včetně dialogu uživatele s expertním systémem a vyhodnocení jednotlivých diagnostických metod. Konzultace je ponechána v takové formě, ve které ji expertní systém ukládá do souboru zálohy. Dále je uveden průběh konzultace pro zapojení **VN1-GST A+B** a nakonec pro zapojení **VN2-GST A+B**.

Stejná prezentace výsledků konzultace je uvedena pro **výsledky 2**.

Výsledky 1

Zapojení transformátoru: VVN

a) Vyhodnocení měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu:

Vyhodnocení měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu

- 1) Izolační odpor po 60 sekundách R_{iz60} [MΩ]
 - výsledek zkoušky: VYHOVUJE
- 2) Polarizační jednodominutový index P_{i60} [-]
 - $P_{i60} = R_{iz60}/R_{iz15} = 1.785714285714286$
 - výsledek zkoušky: VYHOVUJE

Ze zadaných hodnot vyplývá, že izolační systém VYHOVUJE předepsaným kritériím pro diagnostiku provozního stavu transformátoru, a to pro nový stroj před uvedením do provozu.

ZÁVĚR METODY:

- Naměřená hodnota izolačního odporu a vypočítaná hodnota polarizačního indexu splnily požadovaná kritéria.
- Je doporučeno provádět další diagnostická měření ve stanovených intervalech.

b) Vyhodnocení měření ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí:

Vyhodnocení měření ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí

- 1) Ztrátový činitel $\text{tg}\delta[-]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE
- 2) Kapacita vinutí $C[\text{pF}]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE
- 3) Časová konstanta vinutí $\tau[\text{s}]$
- $\tau = R_{iz60} \cdot C_{50} = 35.6$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

Ze zadaných hodnot vyplývá, že izolační systém VYHOVUJE předepsaným kritériím pro diagnostiku provozního stavu transformátoru, a to pro nový stroj před uvedením do provozu.

ZÁVĚR METODY:

- Naměřené hodnoty ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí splnily požadovaná kritéria.
- Je doporučeno provádět další diagnostická měření ve stanovených intervalech.

Zapojení transformátoru: VN1

a) Vyhodnocení měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu:

Vyhodnocení měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu

- 1) Izolační odpor po 60 sekundách $R_{iz60}[\text{M}\Omega]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE
- 2) Polarizační jednodominutový index $P_{i60}[-]$
- $P_{i60} = R_{iz60}/R_{iz15} = 1.923076923076923$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

Ze zadaných hodnot vyplývá, že izolační systém VYHOVUJE předepsaným kritériím pro diagnostiku provozního stavu transformátoru, a to pro nový stroj před uvedením do provozu.

ZÁVĚR METODY:

- Naměřená hodnota izolačního odporu a vypočítaná hodnota polarizačního indexu splnily požadovaná kritéria.
- Je doporučeno provádět další diagnostická měření ve stanovených intervalech.

b) Vyhodnocení měření ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí:

Vyhodnocení měření ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí

- 1) Ztrátový činitel $\text{tg}\delta[-]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE
- 2) Kapacita vinutí $C[\text{pF}]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE
- 3) Časová konstanta vinutí $\tau[\text{s}]$
- $\tau = R_{iz60} \cdot C_{50} = 38.35$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

Ze zadaných hodnot vyplývá, že izolační systém VYHOVUJE předepsaným kritériím pro diagnostiku provozního stavu transformátoru, a to pro nový stroj před uvedením do provozu.

ZÁVĚR METODY:

- Naměřené hodnoty ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí splnily požadovaná kritéria.
- Je doporučeno provádět další diagnostická měření ve stanovených intervalech.

Zapojení transformátoru: VN2

a) Vyhodnocení měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu:

Vyhodnocení měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu

- 1) Izolační odpor po 60 sekundách $R_{iz60}[\text{M}\Omega]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE
- 2) Polarizační jednodominutový index $P_{i60}[-]$
- $P_{i60} = R_{iz60}/R_{iz15} = 1.957446808510638$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

Ze zadaných hodnot vyplývá, že izolační systém VYHOVUJE předepsaným kritériím pro diagnostiku provozního stavu transformátoru, a to pro nový stroj před uvedením do provozu.

ZÁVĚR METODY:

- Naměřená hodnota izolačního odporu a vypočítaná hodnota polarizačního indexu splnily požadovaná kritéria.
- Je doporučeno provádět další diagnostická měření ve stanovených intervalech.

b) Vyhodnocení měření ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí:

Vyhodnocení měření ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí

1) Ztrátový činitel $\text{tg}\delta[-]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

2) Kapacita vinutí $C[\text{pF}]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

3) Časová konstanta vinutí $\tau[\text{s}]$
- $\tau = R_{iz60} \cdot C_{50} = 36.11$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

Ze zadaných hodnot vyplývá, že izolační systém VYHOVUJE předepsaným kritériím pro diagnostiku provozního stavu transformátoru, a to pro nový stroj před uvedením do provozu.

ZÁVĚR METODY:

- Naměřené hodnoty ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí splnily požadovaná kritéria.

- Je doporučeno provádět další diagnostická měření ve stanovených intervalech.

Výsledky 2

Zapojení transformátoru: VVN

a) Vyhodnocení měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu:

Vyhodnocení měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu

1) Izolační odpor po 60 sekundách $R_{iz60}[\text{M}\Omega]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

2) Polarizační jednonominutový index $Pi60[-]$
- $Pi60 = R_{iz60}/R_{iz15} = 2$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

Ze zadaných hodnot vyplývá, že izolační systém VYHOVUJE předepsaným kritériím pro diagnostiku provozního stavu transformátoru.

ZÁVĚR METODY:

- Naměřená hodnota izolačního odporu a vypočítaná hodnota polarizačního indexu splnily požadovaná kritéria.

- Je doporučeno provádět další diagnostická měření ve stanovených intervalech.

b) Vyhodnocení měření ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí:

Vyhodnocení měření ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí

1) Ztrátový činitel $\text{tg}\delta[-]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

2) Kapacita vinutí $C[\text{pF}]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

3) Časová konstanta vinutí $\tau[\text{s}]$
- $\tau = R_{iz60} \cdot C_{50} = 12.1635$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

Ze zadaných hodnot vyplývá, že izolační systém VYHOVUJE předepsaným kritériím pro diagnostiku provozního stavu transformátoru.

ZÁVĚR METODY:

- Naměřené hodnoty ztrátového činitele, kapacity vinutí a výpočet časové konstanty vinutí splnily požadovaná kritéria.

- Je doporučeno provádět další diagnostická měření ve stanovených intervalech.

Zapojení transformátoru: VN1

a) Vyhodnocení měření izolačního odporu a výpočet polarizačního:

Vyhodnocení měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu

1) Izolační odpor po 60 sekundách $R_{iz60}[\text{M}\Omega]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

2) Polarizační jednonominutový index $Pi60[-]$
- $Pi60 = R_{iz60}/R_{iz15} = 1.904761904761905$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

Ze zadaných hodnot vyplývá, že izolační systém VYHOVUJE předepsaným kritériím pro diagnostiku provozního stavu transformátoru.

ZÁVĚR METODY:

- Naměřená hodnota izolačního odporu a vypočítaná hodnota polarizačního indexu splnily požadovaná kritéria.

- Je doporučeno provádět další diagnostická měření ve stanovených intervalech.

b) Vyhodnocení měření ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí:

Vyhodnocení měření ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí

1) Ztrátový činitel $\text{tg}\delta[-]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

2) Kapacita vinutí $C[\text{pF}]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

3) Časová konstanta vinutí $\tau[\text{s}]$
- $\tau = R_{iz60} \cdot C_{50} = 13.4249$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

Ze zadaných hodnot vyplývá, že izolační systém VYHOVUJE předepsaným kritériím pro diagnostiku provozního stavu transformátoru.

ZÁVĚR METODY:

- Naměřené hodnoty ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí splnily požadovaná kritéria.

- Je doporučeno provádět další diagnostická měření ve stanovených intervalech.

Zapojení transformátoru: VN2

a) Vyhodnocení měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu:

Vyhodnocení měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu

1) Izolační odpor po 60 sekundách $R_{iz60}[\text{M}\Omega]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

2) Polarizační jednonominutový index $Pi60[-]$
- $Pi60 = R_{iz60}/R_{iz15} = 1.888888888888889$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

Ze zadaných hodnot vyplývá, že izolační systém VYHOVUJE předepsaným kritériím pro diagnostiku provozního stavu transformátoru.

ZÁVĚR METODY:

- Naměřená hodnota izolačního odporu a vypočítaná hodnota polarizačního indexu splnily požadovaná kritéria.

- Je doporučeno provádět další diagnostická měření ve stanovených intervalech.

b) Vyhodnocení měření ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí:

Vyhodnocení měření ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí

1) Ztrátový činitel $\text{tg}\delta[-]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

2) Kapacita vinutí $C[\text{pF}]$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

3) Časová konstanta vinutí $\tau[\text{s}]$
- $\tau = R_{iz60} \cdot C_{50} = 13.1155$
- výsledek zkoušky: VYHOVUJE

Ze zadaných hodnot vyplývá, že izolační systém VYHOVUJE předepsaným kritériím pro diagnostiku provozního stavu transformátoru.

ZÁVĚR METODY:

- Naměřené hodnoty ztrátového činitele, kapacity a výpočet časové konstanty vinutí splnily požadovaná kritéria.

- Je doporučeno provádět další diagnostická měření ve stanovených intervalech.

6 Závěr

Jak plyne ze závěrů generovaných expertním systémem, všechny zadané hodnoty diagnostikovaných parametrů vybraných diagnostických metod vyhovují předepsaným kritériím pro tento typ transformátoru. V dalším postupu byly výsledky získané expertním systémem porovnávány se závěry, které provedla zkušební laboratoř. Porovnáme-li závěr vytvořený zkušební laboratoří a závěr vyvozený na základě expertízy provedené expertním systémem, můžeme konstatovat, že tyto se shodují. V případě ověření expertního systému pro diagnostiku transformátorů nejsou v tomto článku prezentovány protokoly zkušební laboratoře. Je to z toho důvodu, že pro ověření expertního systému byly vybrány jen některé diagnostické metody a zkušební protokol se vyjadřuje k diagnostikovanému transformátoru podrobně a komplexně.

Při tvorbě výše popsaného expertního systému se důsledně vycházelo ze zkušeností z vývoje expertního systému pro elektrické stroje točivé, který je popsán např. v [1], [5] a obojí bude součástí na našem pracovišti vzniklého tzv. pokročilého diagnostického systému. Tento systém obsahuje hodnocení současného stavu a i prognózu životnosti všech v energetice běžných elektrických strojů, jako např. elektrických strojů točivých (generátory, motory), transformátorů, vypínačů, kabelů, apod. Rovněž součástí vzniklého pokročilého diagnos-

tického systému je určení a rozbor spolehlivosti všech výše vyjmenovaných strojů, přístrojů, komponent a zařízení.

Literatura

- [1] HAMMER, M. *Metody umělé inteligence v diagnostice elektrických strojů*. 1.vyd. Praha: BEN, 2009. 399 s. ISBN 978-80-7300-231-2.
- [2] BARTÁK, A.; MRAVINAČ, L.; NEUMANN, J.; VAŘÁK, J. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1984.256 s. 621.313;621.317.333.6.
- [3] Materiály ze zasedání mezinárodní odborné organizace a jejich komisi - CIGRE A2, 2004-2009. Transformátory.
- [4] Business Case for Transformer On-line Monitoring EPRI Diagnostic Conference July 2006 - souhrn materiálů. 2006.
- [5] SZABÓ, R. *Expertní systémy v diagnostice izolačních systémů elektrických točivých strojů*. Brno: VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. 2005. 114 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Hammer M., CSc.
- [6] ŠIMKOVÁ, M. *Příspěvek k diagnostice výkonových olejových transformátorů*. Brno, 2010. 201 s. Dizertační práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Vedoucí disertační práce: Doc.Ing. Miloš Hammer, CSc.
- [7] ČEZ, a.s., *PODNIKOVÁ NORMA evid.č. 00/05. Profylaktika elektrických strojů netočivých - výkonové transformátory*. Praha: ČEZ, a.s., 2006. 93 s.
- [8] ČSN 351082. *Výkonové transformátory, Metody oteplovacích zkoušek*. Úřad pro vynálezy a normalizaci, 1987. 32 s.
- [9] ČSN 351090. *Metoda měření dielektrických parametrů izolace výkonových transformátorů*. Úřad pro vynálezy a normalizaci, 1987. 8 s.
- [10] HAMMER, M.; JANDA, O.; ERTL, J. *Inteligentní zařízení pro posuzování a prognózu stavu transformátorů*. Brno. 2010. Funkční vzorek.

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