

POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Pavel Hahn

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektrotechnika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Hodnocení transformátorového oleje
pomocí moderních strukturálních analýz

Školitel:

Supervisor

doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D.

Oponent:

Opponent

Ing. Martin Brandt, PhD.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Predložená dizertačná práca má v odbore Elektrotechniky, konkrétne pre analýzu stavu transformátorových olejov výkonových transformátorov veľký význam. So zreteľom na aktuálne diagnostické metódy bežne používané v praxi v samostatných akreditovaných chemických laboratóriách alebo laboratóriách prevádzkovateľov výkonových transformátorov. Tieto sú v práci doplnené po teoretickej a praktickej stránke o progresívne laboratórne techniky infračervenej spektroskopie, diferenčnej skenovacej kalorimetrie, širokopásmovej dielektrickej spektroskopie a ultrafialovo-viditeľnej spektroskopie. Práca obsahuje široké vedomosti autora o týchto metodikách, ktoré sú podložené rozsiahlymi experimentálnymi výsledkami. Zámer použiť tieto metodiky a postupy sledujú ciele ako využiť tieto navrhnuté metodiky a postupy v praxi a konkrétne určiť reálny stav izolačnej sústavy výkonových transformátorov v kratšom čase, s väčšou kvalitou a presnosťou získaných výsledkov, ako bežne používané metódy analýz stavu transformátorových olejov. Tie majú byť podkladom pre lepšie vyhodnotenie celkového stavu prevádzkovaných výkonových transformátorov. Výsledky, ktoré boli dosiahnuté jednotlivými experimentami sú podrobne a prehľadne opísané od štvrtej kapitoly. Ako sám autor zistil počas zbierania údajov nie všetky stanovené metódy sú vhodné pre analýzu starnutia transformátorových olejov najmä pri metóde DSC, pri ktorej nebolo možné určiť konečné kritérium zostarnutia oleja. Vzhľadom k tomu, že samotný princíp metódy vychádza z ohrevu veľmi malého množstva vzorky oleja až do hodnôt teplôt nad bod vzplanutia meraného oleja (do 300 °C) bolo možné už na začiatku predpokladať, že vzorka sa pri takýchto teplotách bude správať nestabilne. To však nemá až taký vplyv na pozitívne výsledky ostatných metód, ktorými sa potvrdili predpokladané výsledky v úvodnej časti práce. Autor stanovil konečné kritériá pre zostarnutie konkrétneho typu oleja a zvolené metodiky zrýchleného starnutia. Praktické využitie získaných výsledkov je zvlášť vhodné pri metódach FT-IR, BDS a UV/VIS. Z pohľadu ďalších výskumov sú získané výsledky taktiež dôležité. Je možné ich využiť pri zdokonaľovaní simulácií zrýchleného starnutia transformátorových olejov iných výrobcov, doladovaní určených konečných kritérií a napr. doplnenie ďalších katalyzátorov ako sú vzorky železnej transformátorovej nádoby, kombinácia hliníkového a medeného vinutia a dreva (keďže má v sťahovacej konštrukcii výkonových transformátorov pomerne veľké zastúpenie). Vzorky by však museli byť vo väčších nádobkách s presne vypočítanými pomermi, pričom by sa mal uvažovať stav hermetizovaného a nehermetizovaného transformátora.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Autor logicky v práci uvádza v prvej kapitole stručný prehľad bežne používaných metód pre diagnostiku transformátorových olejov. Tie rozšíril o teoretický opis metód, ktoré sú nosnou časťou dizertačnej práce, pričom sú metodicky správne podložené informáciami z dostupnej zahraničnej literatúry vedeckých tímov a platných noriem. Následne je plynule spracovaná druhá kapitola aké sú súčasne možnosti a trendy v diagnostike transformátorových olejov. Autor definuje prvé teoretické ciele, na ktorých stavia svoju dizertabilnú časť práce. Preštudovaním veľkého množstva odbornej literatúry vedcov uznávaných v zahraničí i na domácej výskumnej pôde, ktorí sa zaoberajú touto problematikou metodicky správne vytvoril rešerš so základnou analýzou štruktúrálnych zmien vzoriek oleja pri zrýchlenom tepelnom starnutí pre overenie uvedených hypotéz. Prvé experimenty uvedené v tejto kapitole dizertačnej práce boli zamerané na určenie životnosti minerálneho oleja bez prítomnosti katalyzátorov starnutia. Získané výsledky sú spracované prehľadne formou znázornených kriviek s určením resp. overením konečných kritérií, vyplývajúcich z jednotlivých typov skúšok a metodík. Následne autor definuje hlavné ciele dizertačnej práce tak, aby vylepšil diagnostické postupy súvisiace z aplikáciou moderných metód hodnotenia stavu izolačného systému transformátorov. Štvrtá kapitola je zameraná na predstavenie hlavného experimentu práce, ktorý z časového hľadiska trval 2 roky. Experiment nadväzuje na doposiaľ získané výsledky uvedené v predchádzajúcich kapitolách. Sú zadefinované podmienky testovania, metódy a postupy získavania údajov v dvoch hlavných kategóriách a to: pre minerálny olej bez katalyzátorov starnutia a s katalyzátormi (tými sú časť medeného vinutia a papiera), ktoré boli získané priamo od výrobcu transformátorov. Hlavnú zložku experimentov – transformátorový olej Nytro Lyra X autor zvolil správne, keďže pre strednú Európu je pre výkonové transformátory dodávaný veľmi často pre novo vyrábané výkonové transformátory. Získané výsledky z jednotlivých experimentov sú v piatej kapitole vyjadrené správne aj s náležitou diskúsiou. Dosiahnuté výsledky opísané v závere práce sú zosumarizované s uvedeným súhrnom najdôležitejších výsledkov uskutočnených v rámci experimentu dizertačnej práce. Aj keď jedna zo zvolených metód nie je najvhodnejšia (DSC) pre získanie relevantných výsledkov, nemá zásadný vplyv na celkové zhodnotenie a to, že autor splnil stanovené ciele dizertačnej práce.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a

k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Autorom dosiahnuté výsledky spísané v dizertačnej práci sú adekvátne s prínosom pre možné ďalšie výskumné úlohy spojené s analýzou starnutia izolačných olejov používaných vo výkonových transformátoroch a vypínačoch. Opísané progresívne metódy je možné v rámci praktického využitia nasadiť ako doplnkové metódy ku štandardným metódam v diagnostike výkonových transformátorov. Bude však potrebná dlhodobá spolupráca medzi prevádzkovateľmi výkonových transformátorov a výskumnou inštitúciou, ktorá má dostupné laboratórne zariadenia a personálne kapacity. Aby bolo možné stanoviť celkový stav izolačnej sústavy výkonových transformátorov budú potrebné viaceré porovnávania vzoriek olejov medzi štandardnými a novými metódami.

Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Predložená dizertačná práca je spracovaná systematicky a prehľadne. Formálna úprava a jazyková úroveň je vysoká. Pripomienku mám ku obr. 4.5. na strane č. 56, v ktorom nesúhlasí tvar nameraných výsledkov vo zväčšenom okne. Zobrazená časť, ktorú autor chcel zväčšiť pre detailnejší prehľad je tepelný tok v záporných hodnotách a vo zväčšenom okne v kladných a s iným tvarom. Inak spracovanie obrázkov, grafov a príloh zodpovedá požiadavkám kladených na dizertačnú prácu.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Publikácie autora sú zamerané na predmetnú oblasť a splňajú jeho výskumný potenciál zameraný na testovanie a experimentálne analýzy transformátorových olejov. Podľa zverejnených článkov autor spolupracuje tímovo a podieľal sa na zverejnení dosiahnutých výsledkov na medzinárodných konferenciách a publikáciách v zahraničných časopisoch, ktoré sú registrované vo vedeckých databázach IEEE, WoS alebo SCOPUS.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Dizertačná práca je ucelená a sú v nej spracované výsledky aktuálne riešených výskumných zámerov a projektov na medzinárodnej a národnej úrovni. Majú praktické využitie, ktoré pri vhodnej spolupráci s prevádzkovateľom výkonových transformátorov môžu nájsť uplatnenie a posunúť tak možnosti diagnostiky a hodnotenia celkového technického stavu dôležitých elektrických strojov akými sú v distribučnej a prenosovej sústave olejom chladené transformátory. V práci mi však chýba aspoň jeden experiment pre porovnanie vypočítaného stratového činiteľa $\tan \delta$ z metódy BDS s použitím katalyzátora voči skutočne odmeranému $\tan \delta$ „klasickou“ metódou pomocou Scheringovho mostíka. Tým by sa skutočne potvrdili stanovené kritériá pre túto metódu.

Otázka č.1: Prečo ste zvolili použitie metódy DSC ku analýze starnutia oleja? Podrobnejšie vysvetlite, kde sa v súčasnosti táto metóda používa a na aké účely.

Otázka č. 2: Súvisí s otázkou č.1, či práve hliníkový kalíštek, do ktorého bola vzorka navážená nereagoval so vzorkou oleja pri vyšších teplotách. Prečo ste neskúmali aj vzájomné pôsobenie hliníka na olej, keďže v súčasnej dobe sú v prevádzke distribučné výkonové transformátory 35 až 45 ročné s hliníkovým vinutím a práve oni môžu byť vhodnými kandidátmi na porovnávanie vašich výsledkov zrýchleného starnutia voči vzorkám oleja zostarnutého prirodzenou prevádzkou transformátora týmito novými metódami. Aj pri distribučných transformátoroch stredného výkonu sa vo veľkej miere vyrábajú vinutia s hliníku.

Otázka č. 3: Prečo ste pri nastavovaní experimentu nepoužili väčšie odmerné fľaštičky, ale len 50 ml? Prečo ste neuvažovali aspoň pre pár vzoriek s overením získaných výsledkov metódy BDS ($\tan \delta$) s katalyzátorom s meraním pomocou Scheringovho mostíka?

Otázka č. 4: Pri akej hodnote stratového činiteľa je možné usúdiť, že olej je tak zoxidovaný, že je potrebná jeho regenerácia, prípadne filtrácia, tak aby to bolo ekonomicky výhodné s pohľadom nákladom a zostatkovej životnosti transformátora?

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ano
yes

Datum

Date

28.10.2019

Podpis oponenta:

Signature of opponent



POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Pavel Hahn

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektrotechnika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Hodnocení transformátorového oleje
pomocí moderních strukturálních analýz

Školitel:

Supervisor

doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D.

Oponent:

Opponent

doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Disertační práce pana inženýra Hahna představuje, zejména s ohledem na rozsah a preciznost provedeného experimentu, velmi významný přínos pro obor. Práce je napsaná přehledně a výborně strukturovaná. Autor provede čtenáře systematicky současným stavem problematiky, logicky navazuje popisem dosud realizovaných experimentů a z toho vyplývající formulací cílů. Popis a vyhodnocení vlastních experimentů je systematické a přehledné. Velmi dobře se v něm orientuje a text neztrácí kontinuitu. Celkové zhodnocení a zobecnění výsledků v kontextu celé řady souvisejících vlivů je výborně provedené na vysoké odborné úrovni. Využití výsledků pro praxi i další výzkum má značný význam a práce představuje soubor unikátních informací s vysokým potenciálem dalšího uplatnění.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Postup řešení problému hledání nových směrů v hodnocení transformátorových olejů aplikovaný v předložené práci je velmi systematický, svědčí o důkladné a hluboké znalosti řešené problematiky a je zcela odpovídající pro dosažení formulovaných cílů práce. Mimořádná je už samotná příprava experimentu, která vyžadovala detailní koordinaci a přesnost. Použité metody jsou vhodně zvolené s ohledem na potřeby praxe a vedou k originálním a unikátním výsledkům. Cíle disertační práce jsou zcela splněny a prezentace výsledných zjištění má nadstandardní úroveň.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a

k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Výsledky výzkumu popsaného v disertační práci jsou nové a mají vysoký potenciál pro praktické uplatnění. Hlavní význam má především komplexnost celé studie, která je unikátní počtem paralelně použitých hodnotících metod a rozsahem získaných dat. Výsledný výběr diagnostických metod povede ke zkrácení času zkoušky, zjednodušení přípravy vzorku a zvýšení přesnosti měření. Nesporným benefitem je také to, že pro nově navrhované kritériální parametry hodnocení oleje jsou odvozena konečná kritéria zestárnutí.

**Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě
a jazykové úrovni disertační práce**

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Po formální stránce je text na velmi dobré úrovni. Práce je přehledná v celém rozsahu, nabitá fakty a graficky pěkně zpracovaná. Postup měření a grafické zpracování výsledků je popsáno srozumitelně a systematicky, orientace v grafech je velmi dobrá a celá koncepce práce umožňuje čtenáři sledovat postupný proces řešení v navazujících a logicky zdůvodněných krocích. Chtěla bych zdůraznit, že o schopnostech autora svědčí i fakt, že je jeho text na vysoké odborné úrovni a zároveň se čte velmi dobře a udržuje pozornost čtenáře až do konce.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Publikovaná témata ukazují na systematický zájem autora o problematiku řešenou v disertační práci. Z uvedených článků je patrné postupné získávání podkladů pro zobecnění výsledků pro impaktovanou publikaci v závěru výzkumného procesu, což je u tak obsáhlých studií nutný postup pro získání kvalitních výsledků, jaké jsou publikovány také v tomto případě.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Ing. Pavel Hahn splnil cíle formulované ve své disertační práci. Předložená práce obsahuje nové vědecké poznatky a splňuje požadavky na kvalitu závěrečné práce v doktorském studiu. Úroveň práce je nadprůměrná. Doktorand prokázal schopnost samostatné tvůrčí vědecké činnosti. Z výše uvedených důvodů doporučuji disertační práci pana inženýra Hahna k obhajobě.

Jak hodnotíte možnosti nasazení nových diagnostických technik pro analýzu transformátorového oleje do provozní praxe?

Měl jste možnost setkat se s aplikací některé z použitých metod pro olej na bázi přírodních esterů?

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

| | | |
|------------|---|----------|
| ano yes | x | ne no |
|------------|---|----------|

Datum

Date

16. 10. 2019

Podpis oponenta:

Signature of opponent





POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Pavel HAHN

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektrotechnika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Hodnocení transformátorového oleje
pomocí moderních strukturálních analýz

Školitel:

Supervisor

doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D.

Oponent:

Opponent

doc. Ing. Pavel Mach, CSc.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Otázka hodnocení životnosti transformátorového oleje, který je součástí izolačního systému v řadě typů výkonových elektrických zařízení, je klíčová pro uživatele těchto zařízení. Proto jakoukoli práci, která zlepšuje diagnostiku v uvedené oblasti, je možné považovat za vysoce aktuální.

V současnosti je toto hodnocení prováděno tradičními metodami, z nichž řada je standardizovaná. Práce se zabývá využitím moderních diagnostických metod, FT-IR spektroskopii, DSC, BDS a UV-VIS, které sledují odlišné parametry než metody hromadně používané.

Hlavní potenciál tohoto přístupu vidím v možnosti zkrácení potřebné doby pro diagnostiku a v tom, že na rozdíl od metod užívaných v současnosti, kdy je zpravidla sledována vlhkost transformátorového oleje, jeho ztrátový činitel a průrazného napětí, umožňují výše zmíněné diagnostické metody hlouběji analyzovat ne projevy stárnutí, ale jeho příčiny. Tento přístup by měl umožnit také zkrácení celkové doby diagnostiky potřebné k predikci životnosti transformátoru.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

V prvních dvou kapitolách autor uvádí do dané problematiky a kapitolu 3 tvoří cíle práce. Za těžiště práce považuji kapitoly 4 až 6, kde jsou uvedeny výsledky vlastní práce doktoranda.

Autor práce navrhl a realizoval technicky, přístrojově, analyticky i časově velmi náročný experiment, který navazoval na experiment realizovaný na jeho mateřském pracovišti v letech 2012 až 2016, jehož výsledky byly publikovány. Na rozdíl od provedeného experimentu, do kterého nebyly zahrnuty katalyzátory stárnutí transformátorového oleje, však do svého experimentu zahrnul i vliv mědi a transformátorového papíru, což jsou katalyzátory, které mohou vlastní proces stárnutí oleje podstatnou měrou ovlivnit.

Stanovené cíle disertační práce považuji za velmi zdařilé. Práce navazuje na vývoj v moderních diagnostických metodách a ukazuje novou cestu pro hodnocení stárnutí transformátorového oleje. Za velmi cenné také považuji stanovení konečných kritérií zestárnutí u techniky FT-IR, BDS a UV/VIS. Důležité je také zjištění, že mezní stavy mohly

být bez problémů stanoveny pro techniku FT-IR a techniku UV/VIS, kde rozdíl ve zkrácení životnosti oleje bez katalyzátorů stárnutí a s katalyzátory stárnutí (Cu + transformátorový papír) byl nalezen na přibližně stejné hodnotě. Diskutabilní je použití BDS, kde se autor setkal s řadou odlehých hodnot. Přesto zde autor stanovil kritériální hodnotu zestárnutí, pochopitelně s ohledem na sledovaný parametr v jiné velikosti, než byly hodnoty určené pro oba typy spektroskopí. Jako nevhodná pro předpověď životnosti oleje se projevila technika DSC, kde změna sledovaného parametru byla nelineární.

Konstatuji, že cíle práce byly splněny beze zbytku.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Práce jasně ukázala, které z použitých diagnostických metod jsou vhodné, a které jsou nevhodné, pro predikci životnosti transformátorového oleje.

O novém přístupu k predikci životnosti transformátorového oleje svědčí to, že doktorand musel stanovit mezní stavy sledovaných parametrů pro techniku FT-IR, UV/VIS a BDS. Pro diferenciální skenovací kalorimetrii mezní stav stanoven nebyl, protože se ukázalo, že tato technika není vhodná pro predikci životnosti oleje.

Použití uvedených metod k predikci životnosti oleje i stanovená kritéria mezních stavů jsou původním přínosem doktoranda do dané vědní oblasti.

Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Práce má logickou strukturu, je psána dobrým jazykem a má velmi dobrou grafickou úpravu. V práci autor cituje 101 pramenů, citace jsou prováděny v přiměřené frekvenci a jsou relevantní. Provedený experiment, diagnostiky i jejich výsledky jsou jasně a srozumitelně popsány včetně analýz těchto výsledků.

Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Autor uvádí dvanáct publikací, z toho, jsou dvě kvalifikační práce, devět publikací na konferencích a jedna v časopise s poměrně vysokým IF, která v současnosti prochází přijímacím procesem. Z konferenčních publikací je sedm na mezinárodních konferencích (v pěti z nich je doktorand prvním autorem) a dvě na národních konferencích (v obou je prvním autorem). Publikáční aktivitu doktoranda považují za přiměřenou.

Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Doktorand předložil práci na velmi zajímavé aktuální téma. Zavádí moderní diagnostické metody do oblasti hodnocení stavu a předpovídání životnosti transformátorového oleje. Při zpracování práce ukázal na jedné straně schopnost realizace náročného experimentu a na druhé straně schopnost analýzy výsledků jednotlivých fází experimentu na vysoké úrovni. To svědčí nejen o jeho experimentální způsobilosti, ale i o jeho dostatečných teoretických znalostech a schopnosti jejich praktické aplikace. Výsledky práce jsou nové a budou přínosem do dané vědní oblasti.

Připomínky k práci

1. Str. 23: Je-li závislost energie na vlnové délce λ logaritmická, pak závislost energie na $1/\lambda$ není lineární.

2. Str. 25: dusík není inertní plyn.
3. Objasněte vztah (2)
4. Str. 41, citace [47] a str. 42, citace [44] nejsou správné.
5. Opravte vztah (9).

Otázky k obhajobě:

1. V jaké úrovni mohou katalyzátory stárnutí ovlivnit $tg \delta$ (odhadněte v % pro vybraný konkrétní případ) a jaké nové degradační mechanismy do stárnutí oleje zavádějí?
2. Při měření simultánní termickou analýzou STA je současně měřen hmotnostní úbytek vzorku pomocí TG a tepelný tok charakterizující děje provázející ohřev nebo chlazení vzorku (DSC). Tepelný tok souvisí s hmotností vzorku. Je při znalosti hmotnostního úbytku vzorku uváděný tepelný tok vztažen ke hmotnosti vzorku v dané fázi měření, nebo je přepočítán na hmotnost vzorku na počátku měření? Který případ považujete za správný a proč?
3. Jak si vysvětlujete značný rozptyl naměřených hodnot a značný počet odlehlých hodnot při měření BDS?

Doporučuji disertační práci k obhajobě
I recommend the dissertation for the defence

ano
yes

x

ne
no

Datum
Date

25.10.2019

Podpis oponenta:
Signature of opponent

