



**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Lukáš Český

Autoreferát dizertačnej práce

NÁVRH A ANALÝZA JEDNOPÓLOVÉHO PRÍSTROJOVÉHO TRANSFORMÁTORA NAPÄTIA

na získanie akademického titulu doktor
(philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: elektroenergetika

v študijnom odbore: elektrotechnika

Miesto a dátum: Bratislava, august 2021

Dizertačná práca bola vypracovaná

Na: Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Lukáš Český
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: prof. Ing. František Janíček, PhD.
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: doc. Ing. Marek Roch, PhD.
FEIT UNIZA, Univerzitná 1, 010 26 Žilina

Ing. Tomáš Spielböck, PhD.
SEPS a.s., Mlynské nivy 59/A, 824 84 Bratislava 26

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať **dňa 19. 8. 2021 o 9.00 hod.** na Ústave elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky online.

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan fakulty

Obsah

Obsah	3
Úvod.....	4
Ciele dizertačnej práce	5
1 Prístrojové transformátory napätia	6
1.1 Základné definície PTN	6
1.2 Parametre PTN	7
2 Skúšky prístrojových transformátorov napätia	8
2.1 Typové skúšky.....	8
2.2 Kusové skúšky prístrojového transformátora napätia.....	12
3 Výpočet oteplenia jednopólového prístrojového transformátora napätia	15
3.1 Návrh jadra a vinutí PTN.....	15
3.2 Výpočet oteplenia.....	17
3.3 Korekcia výpočtu.....	18
3.4 Meranie oteplenia snímačmi teploty.....	19
3.5 Meranie oteplenia odporovou metódou	19
3.6 Porovnanie vypočítaných a nameraných hodnôt	19
4 Overenie výpočtu oteplenia pro rôzne konfigurácie prístrojového transformátora napätia.....	21
5 Implementácia výpočtu do existujúceho výpočtového programu	27
5.1 Predstavenie programu ITCT	27
5.2 Definícia vstupných parametrov výpočtu oteplenia v programe ITCT	28
5.3 Výsledky výpočtu oteplenia v ITCT.....	29
Záver	30
Použitá literatúra.....	31
Publikácie autora príbuzné k téme dizertačnej práce	32

Úvod

Meranie elektrických veličín na úrovniach vysokého a veľmi vysokého napätia v elektrizačnej sústave je nevyhnutné pre spravodlivú fakturáciu elektrickej energie a správne fungovanie elektrických ochrán. Meracie zariadenia i elektrické ochrany majú nízkonapäťové vstupy, preto je potrebné transformovať tieto veličiny na požadovanú úroveň. Tento účel splňajú prístrojové transformátory.

Dizertačná práca sa zameriava na prístrojový transformátor napätia typu TJC 6. Transformátor je určený hlavne do vzduchom izolovaných rozvádzačov vysokého napätia do menovitej hodnoty napätia 24 kV.

Pre identifikáciu požiadaviek na prístrojové transformátory napätia je dôležité sa oboznámiť s normami, ktoré sa týčto transformátorov týkajú – globálne platia normy IEC 61869-1:2007 a IEC 61869-3:2011. Pre overenie správnosti designu prístrojového transformátora napätia je pri jeho vývoji dôležité vykonať všetky relevantné skúšky z citovaných noriem. Pri nesprávnom návrhu sa vo veľkej miere prejavia defekty práve pri ich testovaní. Z toho dôvodu je jedným z cieľov dizertačnej práce popísať typové a kusové skúšky.

Čo sa týka požiadaviek na prístrojové transformátory napätia, v posledných rokoch sa vyžaduje ich bezporuchová prevádzka pri zvýšenej teplote okolia. Ide najmä o prístrojové transformátory inštalované pri generátorových vypínačoch, kde nie je výnimkou teplota okolia 80 °C. V spojení s požadovanou teplotnou triedou izolačného systému E (prevádzkovateľná do teploty 120 °C) definovanou normou IEC 60085:2007 sa markantne znižuje rezerva. Na základe týchto faktov bol definovaný hlavný cieľ dizertačnej práce, ktorým je návrh výpočtu oteplenia prístrojového transformátora napätia do 24 kV s presnosťou do +15 °C. Vypočítaná hodnota nesmie byť nižšia ako nameraná z dôvodu bezpečnostnej rezervy. Vzťažná hodnota je hodnota oteplenia určená skúškou oteplenia v zmysle článku 7.2.2 normy IEC 61869-3:2011. Na overenie správnosti merania a výpočtu boli v prístrojovom transformátore zaliate snímače teploty.

Správnosť výpočtu bola verifikovaná pre rôzne konfigurácie prístrojového transformátora napätia pri zohľadnení rôznych záťaží, konfigurácií vinutí a vonkajších designov. Po overení bol navrhnutý výpočet implementovaný do existujúceho výpočtového softwaru pre návrh prístrojových transformátorov.

Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je navrhnuť algoritmus výpočtu oteplenia jednopólového prístrojového transformátora napätia do 24 kV a jeho implementácia do výpočtového softwaru "Instrument transformer calculation tool". V rámci výpočtu oteplenia je nutné zohľadniť rozdielne konfigurácie funkčných častí prístrojového transformátora spojené s rôznymi elektrickými parametrami a zároveň zohľadniť rozdielny vonkajší design prístrojového transformátora. Vypočítaná hodnota môže byť oproti nameranej maximálne o 15 K vyššia, pričom kvôli bezpečnostnej rezerve vypočítaná hodnota musí byť vždy vyššia ako nameraná.

Tézy dizertačnej práce

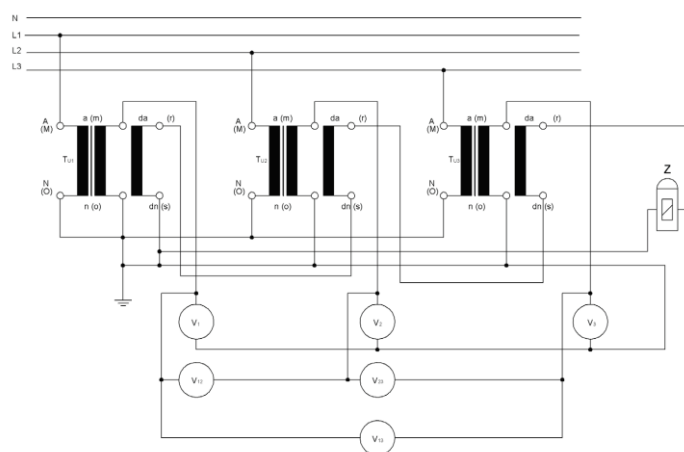
1. Opis typovej a kusovej skúšky jednopólových prístrojových transformátorov na vnútornú aplikáciu napätia v zmysle kapitol 7.2 (typové skúšky) a 7.3 (kusové skúšky) normy IEC 61869-3:2011.
2. Návrh výpočtu oteplenia jednopólového prístrojového transformátora napätia pre vnútornú aplikáciu z pohľadu maximálneho oteplenia (kapitola 6.4 normy IEC 61869-3:2011 a IEC 61869-1:2007) a pri zaťažení krajnou záťažou (menovitý tepelný medzný výkon), resp. pri uvažovaní menovitého napäťového činiteľa a menovitej záťaže.
3. Experimentálna verifikácia navrhnutého výpočtu oteplenia na vybranom type prístrojových transformátorov napätia rôznych výkonov, konfigurácie primárneho vinutia a vonkajších prevedení.
4. Implementácia výpočtu oteplenia prístrojového transformátoru do existujúceho výpočtového softvéru "Instrument transformer calculation tool".

1 Prístrojové transformátory napätia

Prístrojové transformátory napätia sú elektromagnetické netočivé stroje. Napájajú obvody elektrických prístrojov slúžiacich na meranie alebo chránenie prvkov sústavy. Ich konštrukcia a fyzikálne vlastnosti sú podobné výkonovým transformátorom, ale ich funkčné vlastnosti sú bližšie elektrickým prístrojom [1] [2].

Hlavnou funkciou prístrojových transformátorov je transformácia vysokých hodnôt prúdov a napätí na štandardizované hodnoty $100/\sqrt{3}$ resp. $110/\sqrt{3}$ V pre meracie vinutie a $100/3$ resp. $110/3$ V pre istiace vinutie. Primárna cievka PTN je pripojená k sústave paralelne [3].

Medzi fázou a zem sa pripájajú jedнопólové a medzi dve fázy dvojпólové PTN. Keďže dizertačná práca je zameraná na jedнопólový prístrojový transformátor napätia, v ďalších časti práce sú zamerané práve na tento typ. Najčastejšie používaná schéma zapojenia jedнопólových PTN je na obr. 1. Primárne vinutia PTN sú zapojené do hviezdy (A - N). prvé sekundárne vinutie je zapojené do hviezdy (a - n) a druhé sekundárne vinutie je zapojené do otvoreného trojuholníka (da - dn). Uzol primárneho aj prvého sekundárneho vinutia sa uzemní.



obr. 1 Schéma zapojenia jedнопólového PTN [4]

1.1 Základné definície PTN

K základným pojmom v oblasti PTN patria nasledovné elektrické veličiny:

Menovitý prevod k je pomer primárneho napätia U_{1n} a sekundárneho napätia U_{2n} . Je definovaný nasledovným vzťahom:

$$k = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad (1)$$

Menovité primárne napätie U_{1n} resp. menovité sekundárne napätie U_{2n} sú efektívne hodnota primárneho a sekundárneho napätia PTN, na ktorú bol transformátor navrhnutý. Je to štítkový údaj [3].

Menovitý napäťový činiteľ F_v je maximálna hodnota napätia, ktoré musí PTN pri zachovaní triedy presnosti tepelne vydržať požadovaný čas [5].

Menovité napätie sústavy U_n je efektívna hodnota napätia medzi fázami, podľa ktorej sú definované jej prevádzkové charakteristiky. Pri PTN sa rovná jeho primárnemu napätiu v trojfázovej konfigurácii.

Izolačné napätie U_1 je efektívna hodnota napätia, ktorú musí vydržať izolácia PTN permanentne. Izolačné napätie je zvyčajne rovné U_n .

Najvyššie napätie sústavy U_m je maximálna efektívna hodnota napätia, ktorá sa môže za normálneho prevádzkového stavu v sústave vyskytnúť. Je uvedená na štítku PTN [1].

Skúšobné napätie U_f je napätie, ktoré musí transformátor vydržať po dobu jednej minúty za predpísaných atmosférických podmienok. Skúšobná frekvencia sa obvyčajne pohybuje okolo hodnoty 100 Hz. Najkratšia doba testu je 15 sekúnd. Skúšobné napätie je jedným zo štítkových údajov PTN [1] [5].

Menovitá záťaž S_n je súčin Y_n a druhej mocniny U_{2n} . Menovitá záťaž je uvádzaná na štítku PTN. Požiadavky na menovitú záťaž sú obvyčajne 10 - 500 VA pre účinník $\cos \varphi = 0,8$. Menovité záťaže pod 10 VA majú podľa normy IEC 61869-3:2011 účinník $\cos \varphi = 1$ [5] [6].

Menovitý tepelný medzný výkon S_{lim} je taký výkon, ktorým je možné trvalo zaťažiť jedno zo sekundárnych vinutí, pričom chyba napätia nesmie prekročiť hranicu 10 % pri menovitom napätí a zároveň hodnota oteplenia nesmie presiahnuť dovolené oteplenie podľa teplotnej triedy.

Chyba napätia ε_u je chyba spôsobená odchýlkou medzi menovitým a reálnym prevodom. Vyjadruje sa v % [1] [7] [8] [9].

Chyba uhlu δ_u je fázový rozdiel primárneho a sekundárneho napätia. Podobne ako pri PTP aj PTN majú definované chyby napätia a uhla pomocou tried presnosti.

1.2 Parametre PTN

Podľa všeobecnej normy IEC 61869-1:2007 sú definované štítkové parametre pre PTP a PTN. Na štítku musia byť povinne uvedené informácie o výrobcovi, roku výroby, sériovom čísle, typu transformátora, menovitej frekvencii, najvyššom prevádzkovom napätí, menovitej napäťovej hladine, menovitom striedavom skúšobnom napätí, atmosférickom impulznom skúšobnom napätí, teplotnej triede a hmotnosti ak presahuje 25 kg. [10].

Okrem spomínaných spoločných štítkových parametrov podľa všeobecnej normy IEC 61869-1:2007 musí štítok PTN obsahovať všetky údaje podľa normy IEC 61869-3:2011 zameranej na PTN – menovité primárne a sekundárne napätie, menovitá záťaž a odpovedajúca trieda presnosti a prepäťový činiteľ.

2 Skúšky prístrojových transformátorov napätia

Pre overenie návrhu a funkčnosti je nutné prístrojový transformátor otestovať. V zmysle platnej normy vhodnou kombináciou skúšok definujeme typové a kusové skúšky. V rámci dizertačnej práce som sa zaoberal medzinárodnou normou pre prístrojové transformátory napätia IEC 61869-3:2011.

2.1 Typové skúšky

Typová skúška je súčasťou postupu posudzovania zhody, ktorou poverený orgán skúma technický návrh výrobku a overuje a potvrdzuje, že technický návrh výrobku spĺňa požiadavky. Vykonáva sa pri zavedení nového typu do výroby, prípadne pri zásadnom zásahu do dizajnu v akreditovaných laboratóriách, ktoré vydávajú na ich základe typový protokol podľa príslušnej normy. Podľa IEC 61869-3:2011 typová skúška pozostáva zo skúšok uvedených v tab. 1. Každý článok má definovaný samostatný postup [11].

tab. 1 Typové testy podľa IEC 61869-3:2011 [5]

7.2.2	Otepľovacia skúška
7.2.3	Skúška atmosférickým impulzom na primárnych svorkách
7.2.4	Skúška za dažďa pre vonkajšie prístrojové transformátory (nevzťahuje sa)
7.2.5	Skúšky elektromagnetickej kompatibility (nevzťahuje sa)
7.2.6	Skúšky presnosti
7.2.7	Skúšky overenia stupňa ochrany krytím
7.2.8	Skúška tesnosti krytu pri teplote okolia (nevzťahuje sa)
7.2.9	Tlaková skúška krytu (nevzťahuje sa)
7.2.301	Skúšky skratovej odolnosti

Počas riešenia dizertačnej práce bol typovo testovaný jednopólový prístrojový transformátor napätia do 24 kV TJC 6 s prevodom $22000 / \sqrt{3} // 110 / \sqrt{3} / 100 / 3$, triedou presnosti a menovitou záťažou 0.5 50 VA pre prvé vinutie a 6P 50 VA pre druhé vinutie, menovitou frekvenciou 50 Hz, menovitým napäťovým činiteľom $1,9 \times U_n / 8h$, menovitým tepelným medzným výkonom 500 VA a napäťovými hladinami 24 / 50 / 125 kV pri požadovanej teplote okolia v rozsahu od -5 °C do +40 °C.

Prvou skúškou z rozsahu podľa normy IEC 61869-3:2011 článok 7.2.2 je otepľovacia skúška. Táto skúška pozostáva z meraní pre tri rôzne stavy prevádzky. Prvé meranie je vykonávané pri 1,2-násobku menovitého napätia pri menovitých záťažach na všetkých sekundárnych vinutiach. Test je ukončený po dosiahnutí ustálenej teploty. Druhou časťou testu je

otepl'ovacia skúška pri menovitom napäťovom činiteli – v našom prípade 1,9-násobku menovitého napätia po dobu 8 hodín. Treťou časťou je test oteplenia pri menovitom tepelnom medznom výkone realizovanom pri menovitom napätí. Limitným výkonom je vždy zaťažované len jedno sekundárne vinutie. Ak má transformátor sekundárnych vinutí viac, mal by byť vykonaný jednotlivo pre každé vinutie okrem reziduálnych vinutí zapojených do otvoreného trojuholníku. Aby PTN otepl'ovacej skúške vyhovel, musí byť oteplenie spolu s teplotou okolia (najčastejšie 40 °C) menšie ako daná teplotná trieda (obvyčajne trieda E) [5].



obr. 2 Otepl'ovacia skúška PTN

Pri testovaní boli merané odpory jednotlivých vinutí pred testovaním a po testovaní. Atmosférické podmienky boli teplota okolia na začiatku testu $v_{start} = 23,6$ °C. teplota okolia na konci testu pre menovitý stav $v_{end} = 24,2$ °C. teplota okolia na konci testu pre stav pri 1,9-násobku menovitého napätia $v_{end} = 27,2$ °C. teplota okolia na konci testu pri limitnom výkone $v_{end} = 26,0$ °C, vlhkosť $f = 47,7$ % a tlak $p = 994$ hPa. Z nameraných hodnôt odporov boli potom dopočítané jednotlivé hodnoty oteplenia podľa vzťahu 2.

$$\Theta = \frac{R_{end} - R_{start}}{R_{start}} (235 + v_{start}) - (v_{end} - v_{start}) \quad (2)$$

Θ je výsledné vypočítané oteplenie [K],

R_{start} – odpor na začiatku testu [Ω],

R_{end} – odpor na konci testu [Ω],

v_{start} – teplota okolia na začiatku testu [°C],

v_{end} – teplota okolia na konci testu [°C].

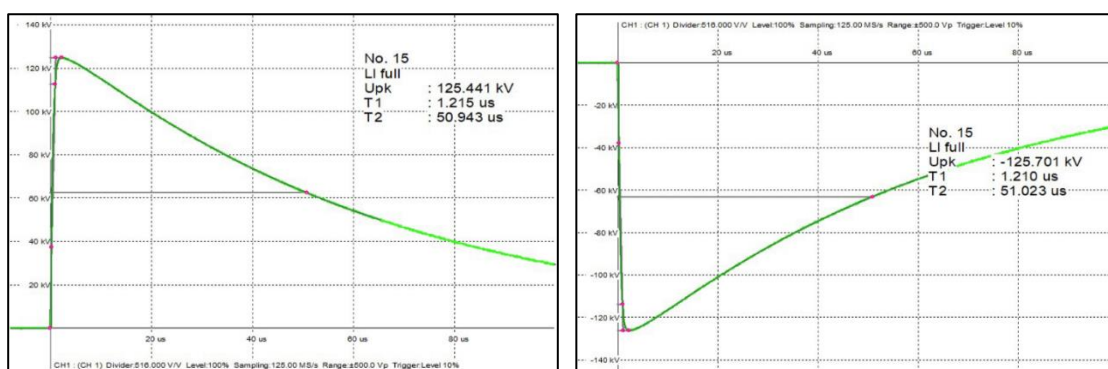
Transformátor vyhovel otepl'ovacej skúške podľa normy IEC 61869-3:2011 článok 7.2.2.

Druhou skúškou z rozsahu typovej skúšky podľa IEC 61869-3:2011 článok 7.2.3 je skúška atmosférickým impulzom na primárnych svorkách. Skúška bola realizovaná pätnástimi kladnými a pätnástimi zápornými atmosférickými impulzmi. Skúška atmosférickým impulzom na primárnych svorkách prístrojového transformátora napätia je na obr. 3 [10] [12].



obr. 3 Skúška atmosférickým impulzom na primárnych svorkách PTN

Priebeh jedného kladného a jedného záporného impulzu je na obr. 4 a resp. 4 b Skúšobné napätie bolo nastavené na 125 kV. Tolerancie podľa normy IEC 60060-1 boli pri testovacom napätí $\pm 3\%$. Neistota merania času čela T1 a poltylu T2 boli 5% [13].



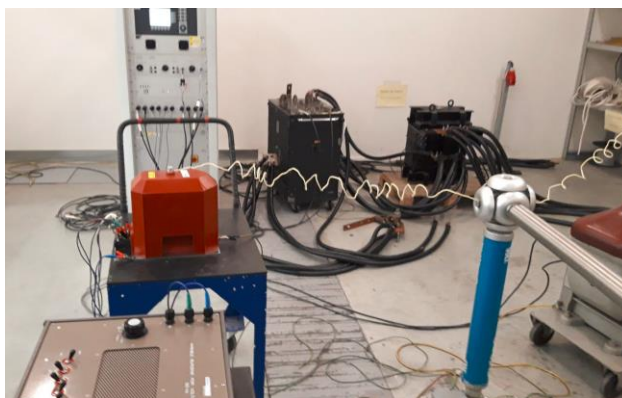
a

b

obr. 4 Priebeh atmosférického impulzu na primárnych svorkách: a.) kladný impulz b.) záporný impulz

Skúška prebehla bez preskoku. Objekt vyhovел skúške podľa článku 7.2.3 normy IEC 61869-3:2011.

Skúška presnosti podľa článku 7.2.6 normy bola vykonaná na objekte triedy 0.5 s menovitou záťažou 50 VA pre meracie vinutie a triedy 6P pri menovitej záťaži 50 VA pre istiace vinutie. Nepresnosť merania prevodu transformátoru bola $\pm 0,05\%$. pre chybu uhla $\pm 1,5^\circ$. Fotka testovacej aparatury je na obr. 5.



obr. 5 Skúška triedy presnosti

Výsledky testu sú spracované v tab. 2 pre meracie vinutie a v tab. 3 pre istiace vinutie. Transformátor splnil požiadavky kladené pre triedu presnosti .

tab. 2 Chyby napätia a fázového posunu pre vinutie a-n

Trieda presnosti	0.5					
Napätie [%]	120	100	80	120	100	80
Zát'az [VA]	50			12.5		
Menovitá zát'az/Zát'az	1			1/4		
Limit chyby napätia [%]	±0.5					
Limit fázového posunu [min]	±20					
Chyba napätia [%]	-0,338	-0,339	-0,340	-0,019	-0,020	-0,019
Chyba fázového posunu [min]	0,69	0,59	0,53	1,99	1,92	1,86

tab. 3 Chyby napätia a fázového posunu pre vinutie da-dn

Trieda presnosti	6P							
Napätie [%]	190	100	5	2	190	100	5	2
Zát'až [VA]	50				12.5			
Menovitá zát'až/Zát'až	1				1/4			
Limit chyby napätia [%]	±6.0							
Limit fázového posunu [min]	±240							
Chyba napätia [%]	0,396	0,402	0,198	0,002	0,947	0,953	0,773	0,65
Chyba fázového posunu [min]	11,4	10,1	14,2	18,2	4,65	4,19	5,70	9,1

Článok 7.2.7 normy opisuje požiadavky na overenie stupňa krytia. Pri PTN určených pre vnútorne priestory je požadované krytie sekundárnej svorkovnice minimálne IP 20 podľa normy IEC 60529:1989+AMD2:2013 CSV [10] [14].

Pre prístrojové transformátory napätia vnútorného prevedenia je síce postačujúce krytie IP 20, skúškou sa overoval stupeň krytia IP 40. Test bol vykonaný testovacím drôtom priemeru 1 mm, dĺžky 100 m, s inventárnym číslom 11-4309, platnou kalibráciou do 01/2020, poslednou

kalibráciou vykonanou firmou TL Opava. Testovaný objekt vyhovel požiadavkám na krytie IP 40.

Poslednou skúškou z rozsahu typovej skúšky podľa normy IEC 61869-3:2011 článok 7.2.301 bola skúška skratovej odolnosti. PTN je počas nej napájaný skratovým prúdom po dobu 1 sekundy.

Pri prvom teste bolo skratované vinutie a - n, da - dn bolo naprázdno. Pri druhom teste sme skratované vinutie a vinutie naprázdno vymenili. Namerané hodnoty a výsledky testu sú uvedené v tab. 4. Po testoch transformátor nebol vizuálne poškodený. Transformátor tiež vyhovel dielektrickým testom a testom presnosti uvedených v ďalších kapitolách. Na základe toho vyhovel skúške.

tab. 4 Skúška skratovej odolnosti PTN

Napätie aplikované na svorku	A	A
Zemnená svorka	N	N
Skratované vinutie	a - n	da - dn
Vinutie naprázdno	da - dn	a - n
Aplikované napätie [kV]	13,1	13,1
Prúd medzi skratovanými svorkami [A]	265	194
Dĺžka trvania testu [ms]	1025	1027
Priemer sekundárneho vinutia [mm]	2,00	1,60
Prúdová hustota sekundárneho vinutia[A / mm ²]	84,9	97,2

2.2 Kusové skúšky prístrojového transformátora napätia

Kusové skúšky sa vykonávajú na overenie štítkových údajov na každom vyrobenom prístrojovom transformátore. Slúžia tiež na odhalenie kvalitatívnych problémov konkrétneho výrobku. Ku každému PTN sa dodáva protokol o kusových skúškach. Rozsah kusovej skúšky je uvedený v tab. 5.

tab. 5 Kusové skúšky podľa IEC 61869-3:2011 [5]

7.3.1	Skúšky striedavým napätím na primárnych svorkách
7.3.2	Meranie čiastkových výbojov
7.3.3	Skúšky striedavým napätím medzi sekciami vinutí
7.3.4	Skúšky striedavým napätím na sekundárnych svorkách
7.3.5	Skúšky presnosti (rovnaké ako pri typových testoch)
7.3.6	Kontrola správnosti značenia
7.3.7	Skúška tesnosti krytu pri teplote okolia (nevzťahuje sa)
7.3.8	Tlaková skúška krytu (nevzťahuje sa)

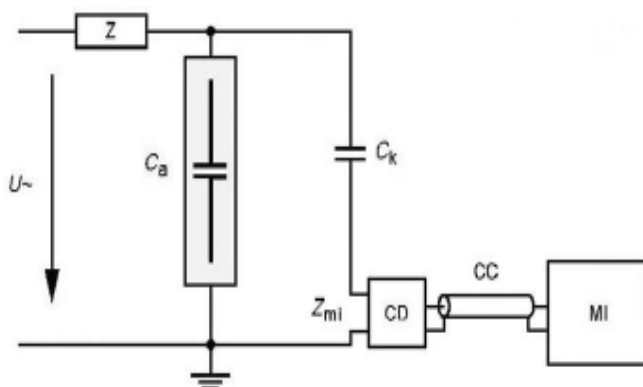
Prvou skúškou z rozsahu kusových skúšok podľa normy IEC 61869-3 článok 7.3.1 je skúška striedavým napätím na primárnych svorkách. Toto napätie je uvedené na štítku ako skúšobné striedavé napätie. Transformátor je testovaný po dobu 60 sekúnd pri frekvencii do 200 Hz. Prístrojový transformátor sa testuje zvýšenou frekvenciou, aby sa zabránilo presýteniu jadra.

V prípade jednopólového PTN je skúšobné napätie aplikované medzi primárnou svorkou a zemou. Týmto testom sa prejavia chyby izolácie na povrchu PTN aj na cievkach PTN.

V našom prípade bolo testované výdržné napätie 50 kV uvedené na štítku transformátora. Frekvencia skúšobného napätia bola 160 Hz po dobu 38 sekúnd.

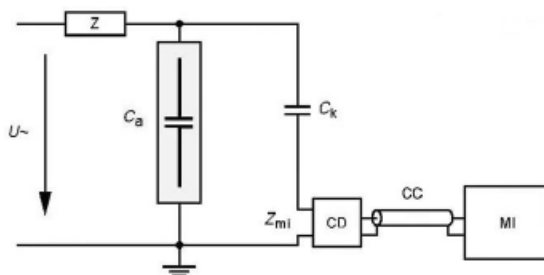
Schéma zapojenia je na obr. 6. U je vysokonapäťový zdroj, Z je filter, Z_{mi} vstupná impedancia meracieho systému, CC koaxiálny kábel, C_a testovaný objekt, C_k väzbový kondenzátor HighVolt 0.1 nF, CD zariadenie HighVolt typ MC 20-4, MI merací prístroj HighVolt typ WGBS.

Úspešný výsledok testu podľa článku 7.3.1 je, ak transformátor vydrží celú dobu testu bez vypnutia (závitový skrat alebo porucha izolácie) a zároveň nie je vizuálne vidieť poruchy izolácie na povrchu transformátora, prípadne elektrický oblúk počas testovania. Na základe týchto podmienok testovaný transformátor prešiel skúškou striedavým napätím na primárnych svorkách.



obr. 6 Schéma zapojenia pri skúške striedavým napätím na primárnych svorkách

Bezprostredne po ukončení skúšky striedavým napätím na primárnych svorkách nasleduje meranie čiastkových výbojov podľa článku 7.3.2. Skúška sa vykonáva podľa IEC 61869-1: 2007 článok 7.3.2.2 procedúra A. Znamená to, že sa vykonáva znižovaním napätia bezprostredne po teste striedavým napätím na primárnych svorkách. Schéma zapojenia je na obr. 7. U je vysokonapäťový zdroj, Z je filter, Z_{mi} je vstupná impedancia meracieho systému, CC koaxiálny kábel, C_a testovaný objek, C_k je väzbový kondenzátor LDIC 1000 pF typ CDHT 0704B11, CD je zariadenie LDIC typ LDM – 5/U, MI je merací prístroj LDIC typ LDS – 6. Testovací obvod bol v súlade s IEC 60270:2000 [15] [16] .



obr. 7 Schéma zapojenia pri meraní čiastkových výbojov

Čiastkové výboje sa posudzujú pri dvoch hladinách $1,2 \times U_n$ a $1,2 / \sqrt{3} \times U_n$. Maximálne dovolené hodnoty čiastkových výbojov sú $50 / 20$ pC. V našom prípade boli požadované minimálne hodnoty napätia 28,8 kV a 16,6 kV – reálne testované 29,1 kV a 16,9 kV. Aparatúra bola kalibrovaná na hodnotu 10 pC a pozadie bolo 1 pC. Po ustálení čiastočných výbojov podľa normy po 30 sekundách boli odčítané výboje 2,6 pC a 1,1 pC.

Článok 7.3.3 popisuje skúšku striedavým napätím medzi sekciami vinutia. Jednotlivé vinutia sú skúšané 3 kV po dobu 60 s. Touto skúškou sú identifikované poruchy izolácie vinutia cievky. Pri testovaní bolo aplikované napätie 3 kV po dobu jednej minúty na jednotlivé vinutia.

Ďalším testom je skúška striedavým napätím na sekundárnych svorkách podľa článku 7.3.4. Jednotlivé svorky PTN boli skúšané 3 kV voči ostatným vinutiám a zemi. Touto skúškou sú identifikované skraty medzi jednotlivými vinutiami navzájom a medzi vinutiami a zemou. Transformátor vyhovel skúškam podľa oboch článkov normy.

Posledným testom je kontrola správnosti značenia podľa článku 7.3.6. Pri tomto teste sa kontrolujú štítkové hodnoty a značenie jednotlivých svoriek. Okrem toho sa kontroluje testovaný transformátor s dodanou výkresovou dokumentáciou.

3 Výpočet oteplenia jednopólového prístrojového transformátora napätia

V súčasnosti sú kladené stále vyššie požiadavky na oteplenie rozvádzačov vysokého napätia. Tieto zmeny noriem sú prenášané aj na výrobcov prístrojových transformátorov. Štandardne epoxidový prístrojový transformátor vyhovuje teplotnej triede E, čo znamená, že súčet teploty okolia a oteplenia prístrojového transformátora nesmie presiahnuť 120 °C. Zatiaľ, čo v minulosti boli požiadavky na teplotu okolia takmer vždy 40 °C, v súčasnosti sa tieto nároky zvyšujú. Nie je výnimkou napríklad hodnota 80 °C pre generátorové vypínače. To znamená, že maximálna hodnota oteplenia PTN musí dosahovať namiesto pôvodných 75 K len 35 K.

K potvrdeniu výrobitel'nosti prístrojových transformátorov pre použite vo zvýšenej teplote okolia bolo potrebné výpočet oteplenia spresniť. V porovnaní s výkonovým transformátorom prístrojový transformátor je zaliaty v epoxidovej hmote. Okrem toho jeho funkčné časti sú bandážované niekoľkými vrstvami odpruženia, izolácie a ochrany proti poškodeniu počas výroby. To sú všetko faktory, ktoré vplyvajú na výpočet oteplenia. Ovplyvňujú tým najmä hodnotu súčiniteľa prestupu tepla α .

Požadovaná presnosť výpočtu bola na úvod stanovená na +15 K oproti nameraným hodnotám. Hodnota vypočítaného oteplenia musí byť vždy vyššia ako nameraná.

Čo sa týka overenia výsledkov, vypočítané hodnoty boli porovnané s hodnotami nameraných a prepočítaných odporov primárneho a sekundárneho vinutia podľa normy IEC 61869-3:2011 článok 7.2.2. Druhým stupňom overenia bolo meranie oteplenia pomocou snímačov teploty pridaných na kritické miesta funkčných častí PTN a to medzi primárne a sekundárne vinutie a na začiatky jednotlivých sekundárnych vinutí. Merania boli vykonané v akreditovanom laboratóriu.

Otepľovacia skúška podľa normy je vykonávaná pre 3 rôzne prevádzkové stavy – pri menovitom napätí, pri menovitom tepelnom medznom výkone S_{lim} a pri menovitom napäťovom činiteli F_v – štandardne 1,9 – násobku menovitého napätia. Hodnota oteplenia PTN je najvyššia hodnota spomedzi všetkých prevádzkových stavov. Preto pre potreby najvyššieho oteplenia uvažujeme dva prevádzkové stavy, kedy môže maximálne oteplenie nastať – prevádzkový stav pri S_{lim} a prevádzkový stav pri F_v .

V ďalších častiach kapitoly 3 sa budem zaoberať výpočtom oteplenia jednopólového PTN typu TJC 6.

3.1 Návrh jadra a vinutí PTN

Pre výpočet oteplenia bol vybraný prístrojový transformátor typu TJC 6 s prevodom 22000/ $\sqrt{3}$ V/100/ $\sqrt{3}$ V/100/3 V, dvomi sekundárnymi vinutiami – a-n.: 100 VA, da-dn.: 150 VA. 6P, frekvenciu 50 Hz a menovitým napäťovým činiteľom F_v : 1,9 / 8h.

K správneému výpočtu oteplenia prístrojového transformátora je nutné najprv poznať dizajn jednotlivých funkčných častí transformátora.

Jadro prístrojového transformátora TJC 6 je tvorené z pásov z elektrotechnickej ocele. Vzhľadom k najlepšiemu pomeru ceny jadra k efektívnemu prierezu bolo vybrané C-jadro s tromi stupňami. C-jadro sa skladá z dvoch častí, ktoré sa prevlečú primárnou a sekundárnou cievkou. Je bandážované, má vrstvu odpruženia kvôli eliminácii tlaku epoxidovej hmoty na jadro a s tým spojenej deformácii magnetizačnej krivky. Ďalšou vrstvou bandáže je zemnená polovodiavá vrstva, ktorá prispieva k homogenite povrchu

Z pohľadu výpočtu oteplenia je dôležitá celková plocha jadra. Plocha jadra S_{jadro} vychádza z geometrických rozmerov zvoleného jadra. Keďže jadro sa štandardne pri jednotlivých typoch PTN nemení, uvažujeme túto hodnotu ako konštantu.

Z konštrukčného hľadiska je primárne vinutie navíjané priamo na sekundárne vinutia. Medzi jednotlivými polohami vinutia je medzipolohová izolácia. Z pohľadu stanovenia oteplenia je veľmi dôležitý počet primárnych závitov N_1 . Od počtu závitov sa odvíjajú rozmery cievky a dĺžka vodiča, čím je spojený odpor vinutia. Počet závitov je daný vzťahom 3 [17].

$$N_1 = \frac{U_{1n}}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} f S_j B_n} \quad (3)$$

N_1 je počet primárnych závitov [-],

U_{1n} - menovité primárne napätie prístrojového transformátora [V],

f - menovitá frekvencia [Hz],

S_j - prierez jadra [m²],

B_n - menovité sýtenie [T].

Ďalšími dôležitými parametrami je ochladzovacia plocha primárneho vinutia, ktorú dostaneme z jeho šírky a výšky.

K výpočtu oteplenia potrebujeme ďalej poznať počet sekundárnych závitov N_{sek1} a N_{sek2} . Pre jednotlivé sekundárne vinutia sú dané vzťahom 4 [17].

$$N_2 = \frac{U_{2n} N_1}{U_{1n}} \quad (4)$$

N_2 je počet sekundárnych závitov [-],

N_1 - počet primárnych závitov [-],

U_{1n} - menovité primárne napätie prístrojového transformátora [V],

U_{2n} - menovité sekundárne napätie prístrojového transformátora [V].

Ďalším dôležitým parametrom vinutí je ich odpor. Hodnoty jednotlivých odporov R_{prim} , R_{sek1} a R_{sek2} dostaneme ako súčin strednej dĺžky vodiča a jeho odporu na meter. Táto hodnota je rovnaká pre všetky tri prevádzkové stavy.

Pre výpočet oteplenia jednotlivých vinutí je potrebné poznať hodnoty súčiniteľa prestupu tepla. Pri úvodnom návrhu algoritmu bolo uvažované so súčiniteľom prestupu tepla pre epoxidovú hmotu. Detailný rozbor ale ukázal, že súčiniteľ prestupu tepla je ovplyvňovaný viacerými faktormi. Je to napríklad rozloženie vinutí, medzi polohová izolácia alebo bandáže jadra. Veľmi výrazne na súčiniteľ prestupu tepla vplýva množstvo epoxidovej hmoty, ktoré sa dostane dovnútra cievky a preleje tým závit a izoláciu. Toto množstvo epoxidu je pre primárnu a sekundárnu cievku rozdielne.

Z nasledovným skutočnosťou vyplynulo, že koeficient α má v každej časti transformátoru inú hodnotu a preto bolo nutné pri výpočte kalkulovať s tromi rôznymi súčiniteľmi prestupu tepla. Ich hodnota bola stanovená experimentálne. Boli to α_{prim} pre primárne vinutie, α_{sek1} pre prvé sekundárne vinutie a α_{sek2} pre druhé sekundárne vinutie.

Pri určení hodnôt oteplení začneme oteplením jadra. Jej hodnotu pri menovitom napätí vypočítame podľa rovnice 5. Vychádza zo strát v jadre, ochladzovacej plochy a súčiniteľa prestupu tepla. Oteplenie pri menovitom napäťovom činiteli bude rovné rovnici 6.

$$\Delta v_{U_n} = \frac{\Delta P_{U_n}}{\frac{S_{\text{jadro}}}{1000000} \alpha_{\text{sek1}}} \quad (5)$$

Δv_{U_n} je oteplenie jadra pri menovitom napätí [K],

ΔP_{U_n} - straty jadra pri menovitom napätí [W],

S_{jadro} - celková plocha jadra [cm²],

α_{sek1} - súčiniteľ prestupu tepla [W.m⁻².K⁻¹].

$$\Delta v_{U_{1.9}} = \frac{-\Delta P_{U_{1.9}}}{\frac{S_{\text{jadro}}}{1000000} \alpha_{\text{sek1}}} \quad (6)$$

$\Delta v_{U_{1.9}}$ je oteplenie jadra pri 1,9-násobku menovitého napätia [K],

$\Delta P_{U_{1.9}}$ - straty jadra pri 1,9-násobku menovitého napätia [W].

3.2 Výpočet oteplenia

Výpočet oteplenia vinutí transformátora vychádza z Joulových strát ΔP pre jednotlivé vinutia. Pre výpočet Joulových strát boli stanovené okrem hodnôt odporov vinutí prúdy tečúce vinutiami pri jednotlivých prevádzkových stavoch. Pri stave s menovitým napäťovým činiteľom musíme pri stanovení hodnôt prúdov počítať so zvýšenou hodnotou napätia vo výpočte.

Z Joulových strát ochladzovacej plochy a súčiniteľa prestupu tepla dostávame oteplenie pre jednotlivé vinutia transformátoru pri limitnom výkone. Je popísané v rovnici 7.

$$\Delta v = \frac{\Delta P}{\frac{S_{\text{prim}}}{1000000} \alpha} \quad (7)$$

Δv je oteplenie jednotlivých vinutí pri S_{lim} [K],

- ΔP - straty jednotlivých vinutí pri S_{lim} [W],
 S - ochladzovacia plocha primárneho vinutia [cm²],
 α - súčiniteľ prestupu tepla [W.m⁻².K⁻¹].

3.3 Korekcia výpočtu

Pri porovnaní vypočítaných a nameraných hodnôt bolo zistené, že sa líšia. Detailný rozbor ukázal, že okrem oteplenia daného výpočtom sa jednotlivé funkčné časti transformátora ovplyvňujú navzájom. Z tohto dôvodu boli k výpočtu oteplenia z predošlej kapitoly pridané koeficienty ovplyvnenia.

Koeficienty ovplyvnenia boli stanovené pre 2 kritické prevádzkové stavy – pri medznom tepelnom výkone a pri uvažovaní menovitého napäťového činiteľa (v našom prípade $1,9 \times U_n / 8h$). Počas stanovovania sa koeficienty určili pre konkrétny prípad na základe nameraných hodnôt. Koeficienty boli potom verifikované pre rôzne konfigurácie prístrojového transformátora napätia – vid'. Kapitola 4. Ovplyvnenia medzi jednotlivými vinutiami sú v tab. 6.

tab. 6 Koeficienty ovplyvnenia

	Od jadra	Od prim. vin.	Od 1. sek. vin.	Od 2. sek. vin.
Primárne vinutie S_{lim}	0,0	-	X,X	0,0
Primárne vinutie F_v	0,0	-	0,0	X,X
1. sekundárne vinutie S_{lim}	X,X	0,0	-	0,0
1. sekundárne vinutie F_v	X,X	0,0	-	X,X
2. sekundárne vinutie S_{lim}	0,0	X,X	X,X	-
2. sekundárne vinutie F_v	X,X	0,0	0,0	-

Po zohľadnení koeficientov ovplyvnenia dostávame finálne korigované hodnoty oteplení jednotlivých vinutí. Sú uvedené v tab. 7.

tab. 7 Hodnoty vypočítaného oteplenia

Oteplenie	S_{lim}	F_v
Δv Prim [K]	23,857	45,524
Δv Sec Y [K]	28,166	41,889
Δv Sec D [K]	27,770	43,249

3.4 Meranie oteplenia snímačmi teploty

Na meranie oteplenia boli použité keramické snímače teploty typu HEL-707-T-0-12-00, ktorý je na obr. 8.



obr. 8 Snímač teploty HEL-707-T-0-12-00 [20]

Snímač teploty bol umiestnený na začiatky primárneho a obidvoch sekundárnych vinutí. Pre bezproblémové meranie boli snímače teploty vyvedené na sekundárnu svorkovnicu PTN.

Hodnoty odporu snímačov teploty pred meraním a po meraní sú v tab. 8.

tab. 8 Hodnoty odporov snímačov teploty

	start	F _v	Slim
a - n [kΩ]	1,0804	1,2335	1,1714
A - N [kΩ]	1,0806	1,2324	1,1774
da - dn[kΩ]	1,0800	1,2321	1,1716

3.5 Meranie oteplenia odporovou metódou

Odporová metóda je založená na meraní odporov jednotlivých vinutí pred začatím otepľovacej skúšky a na jej konci. Meranie odporovou metódou je štandardnou metódou pri typových testoch. Prepočet oteplenia z odporu dostaneme pomocou vzťahu 8.

$$\Delta v = \left(\frac{R_{\text{end}} - R_{\text{start}}}{R_{\text{start}}} \right) (235^{\circ}\text{C} + v_{\text{start}}) - (v_{\text{end}} - v_{\text{start}}) \quad (8)$$

Teplota okolia pre test pri menovitom napäťovom činiteli bola 24,8 °C, pre test pri menovitom tepelnom medznom výkone 24,1 °C. Namerané hodnoty odporov pred a po teste sú v tab. 9.

tab. 9 Hodnoty odporov jednotlivých vinutí

	štart	F _v	S _{lim}
R _{A-N} [kΩ]	2,8330	3,2112	3,056
R _{a-n} [Ω]	0,1299	0,1499	0,142
R _{da-dn} [Ω]	0,1372	0,1585	0,150

3.6 Porovnanie vypočítaných a nameraných hodnôt

Výpočtom získané hodnoty boli porovnané s nameranými. Ich porovnanie je v tab. 10.

tab. 10 Oteplenie vinutí pri F_v

oteplenie	F_v		
metóda	senzor	odporová metóda	výpočet
$\Delta v_{A-N} [K]$	37,82	31,40	45,524
$\Delta v_{a-n} [K]$	37,59	36,70	41,889
$\Delta v_{da-dn} [K]$	39,34	37,00	43,249

S vyššími hodnotami oteplenia sú spojené aj vyššie rozdiely oteplení pri rôznych metódach. Hodnoty v tab. 11 boli porovnávané voči výsledkom kalkulácie. Z tabuľky je zrejmé, že najvyššie oteplenie je pri kalkulovaných hodnotách. Vďaka tomu má výpočet zachovanú potrebnú rezervu. Presnosť výpočtu do +15 K je taktiež naplnená.

tab. 11 Porovnanie výsledkov oteplenia vinutí pri F_v

rozdiel	F_v		
metóda	výpočet	Odporová metóda	senzor
$\Delta v_{A-N} [K]$	-	-14,124	-7,704
$\Delta v_{a-n} [K]$	-	-5,189	-4,299
$\Delta v_{da-dn} [K]$	-	-6,249	-3,909

Pri zaťažovaní prvého sekundárneho vinutia menovitým tepelným medzným výkonom sa jednotlivé vinutia opäť oteplili takmer rovnako. Hodnoty oteplení sa v tomto prípade pohybujú medzi 18 K a 28 K. Sú nižšie ako pri $1,9 \times U_n$, takže z pohľadu maximálneho oteplenia je rozhodujúci stav pri menovitom napäťovom činiteli. Výsledky testov sú v tab. 12.

tab. 12 Oteplenie vinutí pri S_{lim}

oteplenie	S_{lim}		
metóda	senzor	odporová metóda	výpočet
$\Delta v_{A-N} [K]$	22,71	18,59	23,857
$\Delta v_{a-n} [K]$	22,98	22,03	28,166
$\Delta v_{da-dn} [K]$	23,12	22,33	27,770

Pri otepľovacej skúške pri menovitom tepelnom medznom výkone bola dodržaná presnosť výpočtu +15 K pri všetkých vinutiach. Porovnanie výsledkov oteplení je v tab. 13.

tab. 13 Porovnanie výsledkov oteplenia vinutí pri S_{lim}

rozdiel	S_{lim}		
metóda	výpočet	Odporová metóda	senzor
$\Delta v_{A-N} [K]$	-	-5,267	-1,147
$\Delta v_{a-n} [K]$	-	-6,136	-5,186
$\Delta v_{da-dn} [K]$	-	-5,440	-4,650

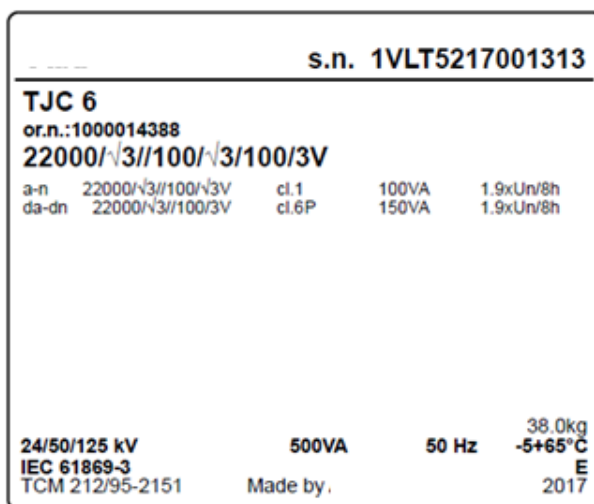
4 Overenie výpočtu oteplenia pro rôzne konfigurácie prístrojového transformátora napätia

Pre overenie správnosti výpočtu boli vyrobené 4 ks prístrojových transformátorov s rôznymi elektrickými parametrami a tým spojenými rôznymi konfiguráciami primárnych, sekundárnych vinutí a iným množstvom epoxidovej hmoty ako izolačného média. Tieto prístrojové transformátory boli podrobené otepľovacej skúške podľa IEC 61869-3:2011. V jednom prípade bol prístrojový transformátor testovaný pre dve menovité záťaže 50/50 VA a 100/150 VA.

Z pohľadu elektrických parametrov má najväčší vplyv na konfiguráciu primárnych a sekundárnych vinutí najmä menovité primárne a sekundárne napätie a menovitá sekundárna záťaž. Pri porovnávaní som hľadal najhorší prípad, teda skúšky boli prevedené pri menovitom tepelnom medznom výkone a pri menovitom napäťovom činiteli F_v .

Z pohľadu designu funkčných častí prístrojového transformátora je dôležité najmä zvolené menovitá indukcia B_n , použitý primárny a sekundárny vodič a s tým spojený odpor a geometria vinutia.

Prvým testovaným prístrojovým transformátorom bol transformátor TJC 6 so štítkovými údajmi podľa obr. 9. TJC 6 je jedнопólový prístrojový transformátor napätia s menovitou hodnotou napätia 24 kV.



obr. 9 Parametre prístrojového transformátora TJC 6

Pri stanovení hodnôt oteplení a verifikácie výpočtu sme v prvom kroku vypočítali hodnoty oteplenia podľa výpočtu v kapitole 4. Tieto hodnoty sme porovnali s hodnotami meranými podľa normy IEC 61869-3:2011. Porovnané hodnoty vypočítaných a nameraných oteplení pri S_{lim} sú v tab. 14.

tab. 14 Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt oteplení TJC 6 pri S_{lim}

Vinutie	Vypočítané oteplenie pri S_{lim} [K]	Namerané oteplenie pri S_{lim} [K]	Rozdiel [K]
A-N	23,857	18,59	5,267
a-n	28,166	22,03	6,136
da-dn	27,770	22,33	5,440

Pre stav $1,9 \times U_n$ sú hodnoty porovnané v tab. 15.

tab. 15 Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt oteplení TJC 6 pri F_v

Vinutie	Vypočítané oteplenie pri F_v [K]	Namerané oteplenie pri F_v [K]	Rozdiel [K]
A-N	45,524	31,40	12,029
a-n	41,889	36,70	6,576
da-dn	43,249	37,00	3,909

Na základe výsledkov je zrejmé, že horší prípad z pohľadu oteplenia predstavoval prevádzkový stav $1,9 \times U_n$. Čo sa týka presnosti výpočtu, najvyššia odchýlka je na primárnom vinutí pri stave F_v . Je to 12,029 K. Naopak najnižšiu odchýlku predstavuje hodnota na sekundárnom vinutí da – dn pri stave F_v . 3,909 K. V oboch prípadoch sa jedná o vyššiu vypočítanú hodnotu ako nameranú a zároveň menší rozdiel medzi nameranou a vypočítanou hodnotou ako 15 K. Výpočet vyhovел požiadavkám zadania.

V ďalšom kroku bol transformátor z predošlej časti kapitoly otestovaný s inou menovitou záťažou - zmenili sa len štítkové parametre. Z toho dôvodu nebolo nutné testovať prevádzkový stav $1,0 \times U_n$ pri limitnom výkone ale iba $1,9 \times U_n$ po dobu 8 hodín. Štítkové parametre transformátora TJC 6 sú na obr. 10.

s.n. 1VLT5217001313					
TJC 6					
of.n.:1000014388					
22000/√3//100/√3/100/3V					
a-n	22000/√3//100/√3V	cl.1	50VA	1,9xUn/8h	
da-dn	22000/√3//100/√3V	cl.6P	50VA	1,9xUn/8h	
24/50/125 kV					
IEC 61869-3		500VA	50 Hz	38,0kg	
TCM 212/95-2151		Made by		-5+65°C	
				E	
				2017	

obr. 10 Parametre prístrojového transformátora TJC 6

Atmosférické podmienky počas testu pri menovitom napätí boli: $v_{start} = 22,4 \text{ } ^\circ\text{C}$, teplota okolia na konci testu $v_{end} = 24,4 \text{ } ^\circ\text{C}$, relatívna vlhkosť $f = 25,0 \text{ } \%$ a tlak $p = 999 \text{ hPa}$. Testovacie napätie $U_{test} = 1,9 \times U_n = 24,13 \text{ kV}$.

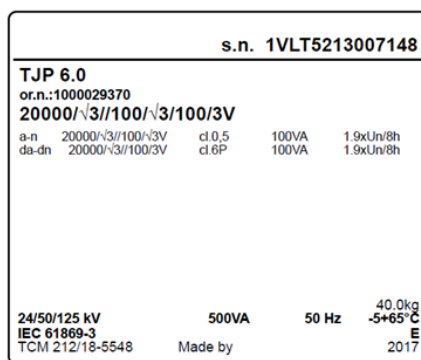
Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt sú v tab. 16.

tab. 16 Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt oteplení TJC 6 pri F_v

Vinutie	Vypočítané oteplenie pri F_v [K]	Namerané oteplenie pri F_v [K]	Rozdiel [K]
A-N	22,453	16,9	5,553
a-n	23,551	23,4	0,151
da-dn	23,005	22,7	0,305

Prístrojový transformátor TJC 6 v danej konfigurácii dosahoval vyššie hodnoty oteplení aj pre menovité výkony 50 / 50 VA pri prevádzkovom stave $1,9 \times U_n / 8$ hodín. Najväčšia odchýlka medzi nameranou a vypočítanou hodnotou bola 6,135 K pri prvom sekundárnom vinutí pri stave $1,0 \times U_n$. Naopak najnižší rozdiel medzi nameranými a vypočítanými hodnotami bol pri vinutí a – n stavu $1,9 \times U_n / 8$ h (0,151 K). Vypočítané hodnoty boli vždy vyššie ako namerané a zároveň ani jedna vypočítaná hodnota nebola vyššia ako nameraná o viac ako 15 K.

Druhým testovaným prístrojovým transformátorom bol jednopólový prístrojový transformátor napätia s poistkou TJP 6.0. Menovité napätie pre tento typ je 24 kV. Okrem modifikovaných funkčných častí prístrojového transformátora – rozdielne primárne aj sekundárne vinutie obsahuje tento transformátor poistkový nástavec, v ktorom je osadená 6,3 A poistka. Čo sa týka elektrických parametrov má testovaný transformátor v porovnaní s prvým transformátorom rozdielny prevod a menovité výkony, čím je spojená rozdielna konfigurácia vinutí. Štítkové údaje transformátora sú na obr. 11.



obr. 11 Parametre prístrojového transformátora TJP 6.0

Atmosférické podmienky počas testu pri menovitom tepelnom medznom výkone so záťažou 500 VA na prvom sekundárnom vinutí boli: $v_{start} = 22,3$ °C. teplota okolia na konci testu $v_{end} = 22,5$ °C, relatívna vlhkosť $f = 32,0$ % a tlak $p = 988$ hPa. Testovacie napätie $U_{test} = 1,0 \times U_n = 11,6$ kV.

Porovnané hodnoty vypočítaných a nameraných oteplení pri menovitom tepelnom medznom výkone sú v tab. 17.

tab. 17 Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt oteplení TJP 6.0 pri S_{lim}

Vinutie	Vypočítané oteplenie pri S_{lim} [K]	Namerané oteplenie pri S_{lim} [K]	Rozdiel [K]
A-N	32,934	23,3	9,634
a-n	32,753	26,1	6,653
da-dn	33,256	30,4	2,856

Pre stav menovitého napäťového činiteľa sú hodnoty porovnané v tab. 18.

tab. 18 Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt oteplení TJP 6.0 pri F_v

Vinutie	Vypočítané oteplenie pri F_v [K]	Namerané oteplenie pri F_v [K]	Rozdiel [K]
A-N	37,081	22,1	14,981
a-n	33,724	27,8	5,924
da-dn	32,810	27,3	5,510

Podľa nameraných hodnôt je najvyššie oteplenie dosiahnuté na vinutí da – dn pri stave S_{lim} . Čo sa týka presnosti výpočtu, najvyššia odchýlka je na primárnom vinutí pri stave F_v . Je to 14,981 K. Naopak najnižšiu odchýlku predstavuje hodnota na vinutí da - dn pri stave $1,0 \times U_n$ (2,856 K). V oboch prípadoch sa jedná o vyššiu vypočítanú hodnotu ako nameranú a zároveň menší rozdiel medzi nameranou a vypočítanou hodnotou ako 15 K. Transformátor na základe toho vyhovel zadaniu.

Tretí prístrojový transformátor bol jednopólový prístrojový transformátor napätia s poistkou TJP 6.0 - G. Čo sa týka vonkajšieho dizajnu, transformátor má iné primárne pripojenie, inú základovú dosku a iný kryt sekundárnych svoriek. Menovité hodnoty napätia pre tento typ sú od 3,6 do 24 kV. Parametre transformátora sú na obr. 12.

s.n. 1VLT5220002705					
TJP 6.0-G					
or.n.:1000029049					
22000/√3/110/√3/110/3V					
a-n	22000/√3/110/√3V	cl.0,5	50VA	1.9xUn/8h	
da-dn	22000/√3/110/√3V	cl.6P	50VA	1.9xUn/8h	
24/50/125 kV		500VA	50 Hz	-5+65°C	E
IEC 61869-2		Made by		2020	
TCM 212/18-5548					

obr. 12 Parametre prístrojového transformátora TJP 6.0 - G

Atmosférické podmienky počas testu pri $1,0 \times U_n$ so záťažou 500 VA na prvom sekundárnom vinutí boli: $v_{start} = 23,8$ °C, teplota okolia na konci testu $v_{end} = 26,0$ °C, relatívna vlhkosť $f = 33,0$ % a tlak $p = 984$ hPa. Testovacie napätie $U_{test} = 1,0 \times U_n = 12,7$ kV. Porovnané hodnoty vypočítaných a nameraných oteplení pri S_{lim} sú v tab. 19.

tab. 19 Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt oteplení TJP 6.0 - G pri S_{lim}

Vinutie	Vypočítané oteplenie pri S_{lim} [K]	Namerané oteplenie pri S_{lim} [K]	Rozdiel [K]
A-N	25,979	21,2	4,779
a-n	26,264	17,4	8,864
da-dn	26,673	16,7	9,973

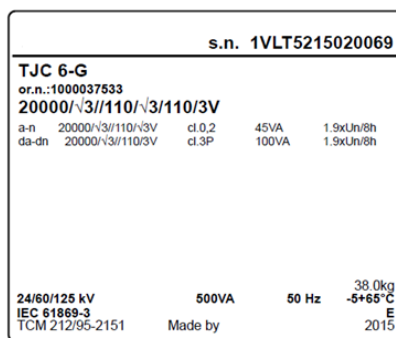
Pre stav pri menovitom napäťovom činiteli sú hodnoty porovnané v tab. 20.

tab. 20 Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt oteplení TJP 6.0 - G pri F_v

Vinutie	Vypočítané oteplenie pri F_v [K]	Namerané oteplenie pri F_v [K]	Rozdiel [K]
A-N	22,676	15,5	7,176
a-n	23,266	12,9	10,366
da-dn	22,760	18,7	4,060

Pre tento prípad bola najvyššia hodnota oteplenia nameraná na primárnom vinutí pri stave menovitého tepelného medzného výkonu. Čo sa týka presnosti výpočtu, najväčší rozdiel je na sekundárnom vinutí a - n pri stave F_v (10,366 K). Naopak najnižší rozdiel je na vinutí da - dn pri stave F_v (4,060 K). Na primárnom aj oboch sekundárnych vinutiach boli vypočítané hodnoty vyššie ako namerané a zároveň rozdiel nie je vyšší ako 15 K. Transformátor splnil stanovené kritériá.

Posledným prístrojovým transformátorom bol jednopólový prístrojový transformátor do 24 kV – TJC 6 – G s menovitým napätím $20/\sqrt{3}$ kV a menovitými záťažami 45 / 100 VA. Štítok transformátoru TJC 6-G je na obr. 13.



obr. 13 Parametre prístrojového transformátora TJC 6 - G

Podmienky počas skúšky pri $1,0 \times U_n$ so záťažou 500 VA na prvom sekundárnom vinutí boli: $v_{start} = 23,3$ °C, teplota okolia na konci testu $v_{end} = 25,3$ °C, relatívna vlhkosť $f = 31,0$ % a tlak $p = 999$ hPa. Testovacie napätie $U_{test} = 1,0 \times U_n = 11,6$ kV.

Porovnané hodnoty vypočítaných a nameraných oteplení pri stave menovitého tepelného medzného výkonu sú v tab. 21.

tab. 21 Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt oteplení TJC 6 - G pri S_{lim}

Vinutie	Vypočítané oteplenie pri S_{lim} [K]	Namerané oteplenie pri S_{lim} [K]	Rozdiel [K]
A-N	26,834	22,1	4,734
a-n	28,661	23,4	5,261
da-dn	28,762	23,8	4,962

Pre stav F_v sú hodnoty porovnané v tab. 22.

tab. 22 Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt oteplení TJC 6 - G pri F_v

Vinutie	Vypočítané oteplenie pri F_v [K]	Namerané oteplenie pri F_v [K]	Rozdiel [K]
A-N	28,726	15,3	13,426
a-n	26,931	18,8	8,131
da-dn	26,914	19,3	7,614

Pre tento prípad bola najvyššia hodnota oteplenia nameraná na sekundárnom vinutí da - dn pri stave menovitého tepelného medzného výkonu.. Čo sa týka presnosti výpočtu, najväčší rozdiel je na primárnom vinutí pri stave F_v (13,426 K). Naopak najnižší rozdiel je na primárnom vinutí pri stave S_{lim} (4,734 K). Na primárnom aj oboch sekundárnych vinutiach boli vypočítané hodnoty vyššie ako namerané a zároveň rozdiel nie je vyšší ako 15 K. Transformátor splnil stanovené kritériá.

5 Implementácia výpočtu do existujúceho výpočtového programu

Po verifikácii výpočtu v kapitole 4 nasledovala jeho implementácia do existujúceho výpočtového programu „ITCT – Instrument transformer calculation tool“. V rámci implementácie bolo nutné rozšíriť už existujúci algoritmus programu o nové konštanty i premenné používané na výpočet oteplenia.

5.1 Predstavenie programu ITCT

Instrument transformer calculation tool - ITCT je program používaný na návrh prístrojových transformátorov vysokého napätia. Po zadaní požadovaných parametrov je jeho pomocou navrhovaná konštrukcia prístrojových transformátorov s ohľadom na elektrické i mechanické požiadavky na prístrojový transformátor. Formulár zadania je na obr. 14.

The screenshot shows the ITCT input form with the following fields and values:

- Type: TJC, 6, Standard: IEC 61869-3
- f: 50 Hz, Ambient Temp: 40 °C, Altitude: 1.0 km
- Ratio: 22000-√3/100-√3/100:3 V
- Insulation level: 24/50/125 kV, F_u: 1.9 /8 h
- Secondary winding:
 - a-n: Type: M, Class: 0.5, Burden: 10 VA, I_a: 4.0 A, Power Factor: 0.8
 - da-dn: Type: R, Class: 3P, Burden: 50 VA, I_a: 6.0 A, Power Factor: 0.8
- Special instructions: Bn: T
- Calculate button

obr. 14 Formulár zadania programu ITCT

Výstupom z výpočtu sú počty závitov a priemer vodiča na jednotlivých vinutiach cievky, počet závitov na polohu a celkový počet polôh, typ medzizávitovej izolácie a jej rozmery, hmotnosti vodičov na jednotlivých vinutiach, odpory jednotlivých vinutí. Výsledky výpočtu ITCT sú na obr. 15. Čo sa týka triedy presnosti, jej posúdenie je možné z chybových kriviek, ktoré sú ilustrované v druhej kapitole.

WINDING	A-N	1a-1n	2a-2n
No of turns:			
No of coils:		1	
Turns/coils:	0	1	1
Layers:		0	
Turns/Layers:		0	
Wire:			
Cu weight:	kg	kg	kg
Layer insul:			
Resistance:	0 Ω	0 Ω	0 Ω
Temp. rise:	0 °C	0 °C	0 °C
Δθ Slim	0 °C	0 °C	0 °C
Δθ Fv	0 °C	0 °C	0 °C
Ith Slim	0 A	0 A	0 A
Ith Fv	0 A	0 A	0 A
Outer Width:	0 mm	0 mm	0 mm
		% min	% min
CRITICAL	Partial bur:	0	0
ERRORS	Nominal bur:	0	0

obr. 15 Výsledky výpočtu v ITCT

premenné zadávané do výpočtového programu priamo a premenné, ktoré slúžia ako výstupné hodnoty, prípadne medzivýsledky.

V rámci premenných definovaných v zadaní sú to menovitá záťaž jednotlivých sekundárnych vinutí - S211 pre 1. sekundárne vinutie a S221 pre druhé sekundárne vinutie, menovité primárne napätie U11, menovité sekundárne napätia U211, U221 a prepäťový činiteľ F_v .

Druhou skupinou premenných využívaných pri výpočte oteplenia prístrojového transformátora sú premenné získané z výstupov výpočtu prístrojového transformátora. Medzi tieto hodnoty patria primárny odpor R11, odpory prvého a druhého sekundárneho vinutia R211 a R221, ochladzovacia plocha S_{prim} a rozmery vinutia.

5.3 Výsledky výpočtu oteplenia v ITCT

Poslednou skupinou premenných použitých pri výpočte v ITCT sú vypočítané premenné. Tie sú dané výpočtom na základe algoritmu popísaného kapitole 3 za použitia vstupných hodnôt.

Premenné sú uvedené v dátovom súbore na obr. 18.

```

TIC 6 over heating.txt - Notepad
File Edit Format View Help
Temperature calculating for TIC6
Constants : Slim = 500; S = XX
alpha11 = XX
alpha211 = XX
alpha221 = XX
alpha231 = XX

Burdens : S211 = 75 S221 = 100
Voltage : U11 = 12701.7
U211 = 63.5885 U221 = 36.6667
Fv = 1.9
Resistance: R11 = 3448.71
R211 = 0.146982 R221 = 0.147597
I1111m = XX
I2111m = XX I2211m = XX
I111fv = XX
I211fv = XX I221fv = XX

=====
DeltaPprim1m = Rprim * I1111m^2 = XX
DeltaPsek11m = XX
DeltaPsek21m = XX
DeltaPprimfv = Rprim * Iprimfv^2 = XX
DeltaPsek1fv = XX
DeltaPsek2fv = XX

=====
Sprim = XX (Sprim = XX; Sprim = XX; Wprim = XX)

deltaThetaPprim1m = XX deltaThetaPprimfv = XX
deltaThetaSek11m = XX deltaThetaSek1fv = XX
deltaThetaSek21m = XX deltaThetaSek2fv = XX

=====
deltaThetaSek11mcor = 26.8167 deltaThetaSek1fvcor = 30.4804
deltaThetaSek21mcor = 27.1056 deltaThetaSek2fvcor = 29.5459
deltaThetaPprim1mcor = 25.9300 deltaThetaPprimfvcor = 30.205

Primary lin Influences: 1. X.X; 2. 0
Primary fv Influences: 1. 0; 2. X.X
(LIMB Sec. Influences 1: core X.X; primary 0.0; sec1 1.0; sec2 0.0)
(FW Sec. Influences 1: core X.X; primary 0.0; sec1 1.0; sec2 X.X)
(LIMB Sec. Influences 2: core 0.0; primary X.X; sec1 X.X; sec2 1.0)
(FW Sec. Influences 2: core X.X; primary 0.0; sec1 0.0; sec2 1.0)

Ln 1, Col 1 100%

```

obr. 18 Výpočet oteplenia v ITCT

Z pohľadu užívateľa programu je potom výsledná hodnota oteplenia zobrazená v poli výsledkov, viď. obr. 15 pod hodnotami $\Delta\theta$ Slim a $\Delta\theta$ Fv na obr. 19.

$\Delta\theta$ Slim	25.93 °C	26.82 °C	27.11 °C
$\Delta\theta$ Fv	30.21 °C	30.44 °C	29.55 °C

obr. 19 Výsledky oteplenia v ITCT

Záver

Témou dizertačnej práce je návrh a analýza jednopólového prístrojového transformátora napätia. Po definícií základných pojmov v oblasti prístrojových transformátorov napätia opisujem základné rozdelenie a definície, metódy skúšania v rozsahu typových a kusových skúšok. Sú tu tiež definované limity, ktoré musia transformátory spĺňať. Teoretické poznatky sú potom aplikované pri skúšaní konkrétneho jednopólového prístrojového transformátora napätia TJC 6 určeného pre vnútorné aplikácie. Pri otepľovacej skúške platí pravidlo, že súčet teploty okolia a oteplenia prístrojového transformátora nesmie presiahnuť maximálnu teplotu prevádzkovateľnosti, teda hodnotu danú teplotnou triedou – štandardne triedy E.

Hlavným cieľom dizertačnej práce bolo navrhnuť výpočet pre oteplenie jednopólového prístrojového transformátora napätia pre vysokonapäťové aplikácie do 24 kV. Požadovaná presnosť výpočtu bola stanovená na + 15 K oproti reálne nameraným hodnotám, teda nameraná hodnota nesmie nikdy presiahnuť vypočítanú z dôvodu bezpečnostnej rezervy pri návrhu. Pri výpočte boli uvažované dva prevádzkové stavy - pri menovitom napäťovom činiteli a pri menovitom tepelnom medznom výkone s uvažovaním vzájomného ovplyvňovania jednotlivých konštrukčných častí.

S cieľom verifikovať navrhnutý postup výpočtu oteplenia boli vykonané merania pomocou snímačov teploty umiestnených na kritických miestach z hľadiska oteplenia v akreditovanom laboratóriu. Takisto sa postup overoval odporovou metódou v zmysle IEC 61869-3:2011. Postup sa potvrdil na účelovo vyrobených štyroch prístrojových transformátoroch s rôznym vnútorným a vonkajším designom. Najvyššia odchýlka medzi vypočítanou a nameranou hodnotou oteplenia bola 14,981 K, preto navrhnutý a overený spôsob výpočtu som v závere implementoval do programu “Instrument transformer calculation tool“ používaného v praxi.

Prínos dizertačnej práce

V dizertačnej práci je spracovaný výpočet oteplenia jednopólového prístrojového transformátora napätia do 24 kV. Tento algoritmus je implementovaný do výpočtového softwaru “Instrument transformer calculation tool”, ktorý je využívaný na návrh prístrojových transformátorov napätia pri sériovej výrobe. Vďaka tomuto výpočtu oteplenia je možné potvrdzovať vyššiu teplotu okolia pre vysokonapäťové aplikácie bez potreby vykonávania otepľovacej skúšky pred potvrdením parametrov zákazníkovi pre každú konfiguráciu.

Táto skutočnosť ušetrí finančné prostriedky spoločnosti (cena samotnej otepľovacej skúšky sa pohybuje rádovo v tisíckách €) a zároveň zníži čas dodávky prístrojového transformátora napätia smerom k zákazníkovi (nie je nutná výroba vzorkov (rádovo týždne výroby) ani samotné testovanie, ktoré trvá 3 dni).

Použitá literatura

- [1] Velešík P. Přístrojový transformátor napětí venkovního provedení. Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. VUT Brno. Brno. 2008.
- [2] JANÍČEK F. a kol. Rozvodné zariadenia v energetike. Bratislava. Vydavateľstvo SPEKTRUM STU Bratislava. 2019.
- [3] JANÍČEK F. a kol. Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave. Bratislava: Nakladateľstvo STU. 2004.
- [4] ABB. Návod na montáž, použitie a údržbu. ABB. Brno. 2011.
- [5] IEC. IEC 61869-3-Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers. IEC. Ženeva. 2011.
- [6] MAKIŠ D. JANÍČEK F. . Aplikácie zapojení prístrojových transformátorov pre vybrané elektrické ochrany. STU v Bratislave. Bratislava. 2017.
- [7] HANUŠ J. Teorie kompenzačního zařízení pro měřicí transformátory napětí. Technika elektrických přístrojů. Brno. 1961.
- [8] MUSTAJARVI R. INSTRUMENT TRANSFORMER - DIMENSIONING FOR SUBSTATIONS. Vaasa University of Applied Sciences. Vaasa. 2016.
- [9] JAHAGIRDAR A. THOSAR A. DHOTE V. Study of High Voltage Inductive Voltage Transformer for Transients and Ferroresonance. (ICPECTS). Chennai. 2018.
- [10] IEC. „IEC 61869-1 - Part 1: General requirements.“ IEC. Ženeva. 2007.
- [11] LUKÁČ P.. Metodický pokyn č. 1/2009. ÚNMS SR. Bratislava. 2009.
- [12] MALUNJKAR R. HADPE S. Lightning Impulse Testing of Single Phase Combined Instrument. International Research Journal of Engineering and Technology. p. 1315-1317. 2018.
- [13] IEC. IEC 60060-1:2010: High-voltage test techniques- Part 1: General definitions and test requirements. IEC. Ženeva. 2010.
- [14] IEC. IEC 60529: Edition. August 2013: Degrees of protection. IEC. Ženeva. 2013.
- [15] DAN C. MORAR R. Partial discharge measurements on 110kV current transformers. Setting the control value. Case study. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Innovative Ideas in Science. Baia Mare. Romania. 2016.
- [16] IEC. IEC 60270-2000: High-voltage test techniques - Partial discharge measurements. IEC. Ženeva. 2000.
- [17] MAHONEN P. Calculation of voltage transformer. ABB. Vaasa. 1994.

Publikácie autora príbuzné k téme dizertačnej práce

- [1] ČESKÝ L. JANÍČEK F., KUBICA J. SKUDŘÍK F.. Overheating of primary and secondary coils of voltage instrument transformers. EPE Ostrava. 2017. ISBN 978-1-5090-6406-9.
- [2] JANÍČEK F. ČESKÝ L. KUJAN V. PERNÝ M. ŠINDLER M. ZUŠČAK J. Rozvodné zariadenia v energetike. Vydavateľstvo SPEKTRUM STU Bratislava 2019. 117 s. ISBN 978-80-227-4886-5.
- [3] ČESKÝ L. JANÍČEK F. SKUDŘÍK F. ZUŠČÁK J. Design and testing of voltage instrument transformers for railway application. Elektroenergetika 2019: 10th International scientific symposium on electrical power engineering. Stará Lesná. ISBN 978-80-553-3324-3.
- [4] MAJER K. ČESKÝ L. JANÍČEK F. Digitalization in power distribution systems: Digital switchgear solution. Power engineering 2018. Energy-Ecology-Economy 2018. Bratislava: Slovak University of Technology. ISBN 978-80-89402-98-4.
- [5] JANÍČEK F. ČESKÝ L. SKUDŘÍK F. On single pole instrument voltage transformer overheating. Journal of Electrical Engineering, 72. s. 29--34.