

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv typových zkoušek transformátoru na elektrickou
pevnost vinutí transformátoru**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan KOLIHA**
Osobní číslo: **E17N0035K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Vliv typových zkoušek transformátoru na elektrickou pevnost vinutí transformátoru**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

1. Uveďte základní principy funkce transformátoru.
2. Proveďte analýzu možných negativních vlivů typové zkoušky transformátoru na elektrickou pevnost vinutí transformátoru.
3. Ověřte měřením možné negativní vlivy typové zkoušky transformátoru na elektrickou pevnost vinutí transformátoru.
4. Proveďte zhodnocení vlivu typové zkoušky na elektrickou pevnost vinutí transformátoru.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Normy ČSN

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Tato práce se zabývá zkoumáním vlivu typových zkoušek transformátoru na elektrickou pevnost izolace vinutí. V úvodu je popsán základní princip funkce transformátoru a jeho hlavní konstrukční části. Následuje rozbor degračních mechanismů působících na izolaci a studie experimentů zaměřených na namáhání izolace vysokonapětovými impulzy a teplotou. V praktické části je u tří transformátorů opakovaně prováděna typová zkouška elektrické pevnosti a hodnotí se její vliv na degradaci izolace.

Klíčová slova

Transformátor, elektrická pevnost, typová zkouška, vinutí, izolace

Abstract

This thesis focuses on research of impact of transformer type tests on electrical strength of the winding insulation. In the introductory part, basic principle of function of a transformer and his main construction parts are described. Analysis of degradation mechanisms affecting the insulation and study of experiments focused on stressing insulation with high voltage impulses and temperature follows. Impact of repeated electrical strength tests on insulation degradation of three transformers is evaluated in the practical part.

Key words

Transformer, electrical strength, type test, winding, insulation

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 16.6.2020

Jan Koliha

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. za rady, připomínky, podporu a metodické vedení práce.

Dále chci poděkovat Ing. Rostislavu Vlkovi, Ph.D. a Ing. Michalovi Kocourovi za rady, poskytnuté materiály a odborné vedení při měření.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 TRANSFORMÁTOR	11
1.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP FUNKCE TRANSFORMÁTORU	11
1.1.1 Zákon elektromagnetické indukce.....	11
1.2 KONSTRUKČNÍ ČÁSTI TRANSFORMÁTORU	13
1.2.1 Magnetický obvod.....	13
1.2.2 Vinutí transformátoru	13
1.2.3 Izolace vinutí	14
1.2.4 Izolační systém olej - papír.....	14
1.2.5 Přepínač odboček.....	17
1.2.6 Chlazení.....	17
2 DEGRADAČNÍ MECHANISMY PŮSOBÍCÍ NA IZOLACI	19
2.1 HYDROLÝZA.....	19
2.2 OXIDACE	20
2.3 KYSELINA	20
2.4 POLYMERACNÍ STUPEŇ (PN).....	21
2.5 TEPLOTA	21
2.6 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	21
3 ANALÝZA MOŽNÝCH NEGATIVNÍCH VLIVŮ TYPOVÉ ZKOUŠKY NA ELEKTRICKOU PEVNOST VINUTÍ	23
3.1 VLIV OPAKOVANÝCH NAPĚŤOVÝCH IMPULZŮ	23
3.1.1 Vliv opakovaných napěťových impulzů na polymerační stupeň.....	25
3.2 VLIV TEPLoty	26
3.2.1 Vliv teploty na elektrickou pevnost papíru	28
4 TYPOVÁ ZKOUŠKA TRANSFORMÁTORU	30
4.1 TEORETICKÝ ÚVOD.....	30
4.1.1 Zkouška elektrické pevnosti	30
4.1.2 Oteplení	31
4.1.3 Ochrana před zkratem a přetížením	33
4.2 EXPERIMENT	34
4.2.1 Měřicí postup.....	34
4.2.2 Zkouška elektrické pevnosti vinutí	35
4.2.3 Zkouška oteplení a odolnost proti přetížení.....	37
4.2.4 Zkouška elektrické pevnosti vinutí po teplotních zkouškách	40
ZÁVĚR	45
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	47
PŘÍLOHY	49

Seznam symbolů a zkratek

Seznam symbolů

d	délka	[m]
I	elektrický proud	[A]
M_p	molekulová hmotnost polymeru	[g/mol]
M_m	molekulová hmotnost monomeru	[g/mol]
N_P	počet závitů primární cívky	[-]
N_S	počet závitů sekundární cívky	[-]
p	tlak	[Pa]
P_n	polymerační stupeň	[-]
R_l	odpor na začátku zkoušky oteplení	[Ω]
R_2	odpor na konci zkoušky oteplení	[Ω]
R_P	odpor primárního vinutí	[Ω]
R_S	odpor sekundárního vinutí	[Ω]
S	zdánlivý výkon	[VA]
Δt	oteplení	[$^{\circ}\text{C}$]
t	čas	[s]
t_1	teplota na začátku zkoušky oteplení	[$^{\circ}\text{C}$]
t_2	teplota na konci zkoušky oteplení	[$^{\circ}\text{C}$]
t_a	teplota okolního prostředí	[$^{\circ}\text{C}$]
T_1	doba čela	[s]
T_2	doba půltýlu	[s]
u_i	okamžitá hodnota indukovaného napětí	[V]
u_{iP}	indukované napětí v primárním vinutí	[V]
u_{iS}	indukované napětí v sekundárním vinutí	[V]
U_{BDV}	průrazné napětí	[V]
U_{nS}	jmenovité primární napětí	[V]
U_{nP}	jmenovité sekundární napětí	[V]
U_P	napětí na primárním vinutí	[V]
U_S	napětí na sekundárním vinutí	[V]
U_{pr}	přeskokové napětí	[V]
U_z	zkušební napětí	[V]

Seznam řeckých symbolů

Φ	celkový magnetický tok	[Wb]
Φ_P	magnetický tok primární částí transformátoru	[Wb]
Φ_S	magnetický tok sekundární částí transformátoru	[Wb]
Φ_u	magnetický tok magnetickým obvodem	[Wb]
Φ_σ	rozptylový magnetický tok	[Wb]
ψ	spřažený magnetický tok	[Wb]

Seznam zkratek

AC	Alternating current (střídavý proud)
ČEPS	Česká přenosová soustava

Úvod

Transformátor je základním prvkem elektrizační soustavy. Podle údajů společnosti ČEPS a.s. z prosince 2019 obsahují rozvodny přenosové soustavy celkem 77 transformátorů, které se starají o převod mezi napěťovými hladinami 440 kV, 220 kV a 110 kV. [16]

V distribuční soustavě a na nižších napěťových úrovních počty transformátorů v provozu výrazně narůstají. Jejich poruchy často způsobují neplánované přerušení dodávky elektřiny a finanční ztráty. Proto se u transformátorů provádí celá řada zkoušek, aby se ověřilo, že splňují požadované parametry a včasným odhalením nedostatků bylo možné předejít závadě při provozu. Mezi tyto testy patří také typová zkouška elektrické pevnosti a typová zkouška oteplení.

Cílem práce je zhodnotit vliv těchto typových zkoušek na izolaci vinutí transformátoru.

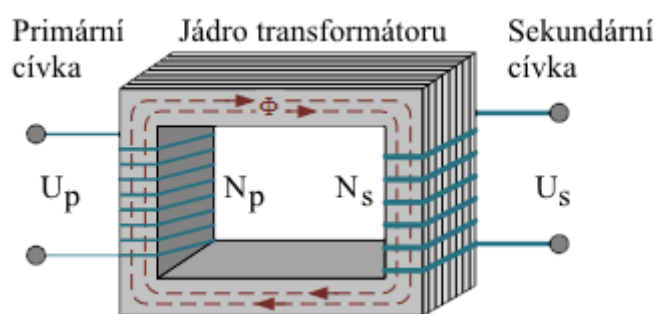
V úvodu práce je popsán princip funkce transformátoru a jeho hlavní konstrukční části. Další kapitola se věnuje popisu degračních mechanismů, které negativně ovlivňují izolační vlastnosti systému olej - papír. Z důvodu odhadu výsledku měření je poté provedena analýza experimentů zaměřených na namáhání izolace teplotou a napěťovými impulzy. Praktická část se věnuje měření tří transformátorů. Nejprve je u všech proveden určený počet zkoušek elektrické pevnosti. Dále se uskuteční zkouška oteplení, po kterém následuje další testy elektrické pevnosti se stejným počtem opakování jako při prvním měření.

1 Transformátor

1.1 Základní princip funkce transformátoru

Transformátor si můžeme představit jako netočivý elektrický stroj, který se používá pro přeměnu střídavého napětí z jedné napět'ové úrovně na jinou, při zachování stejné frekvence a výkonu.

Na obrázku *Obr. 1.1* je zobrazeno principiální uspořádání jednofázového transformátoru. Jeho princip vychází z Faradayova zákona elektromagnetické indukce.



Obr. 1.1: Principiální uspořádání transformátoru [5]

kde:

U_P je primární napětí	[V]
U_S je sekundární napětí	[V]
N_P je počet závitů primární cívky	[-]
N_S je počet závitů sekundární cívky	[-]
Φ je magnetický tok	[Wb]

1.1.1 Zákon elektromagnetické indukce

Tento zákon popisuje vznik elektrického napětí způsobený změnou magnetického toku. Pokud přivedeme na primární cívku napětí U_P , procházející proud vybudí magnetický tok Φ_P , který indukuje napětí v sekundární cívkě.

Když na sekundární stranu transformátoru připojíme zátěž, začne v sekundární cívkě protékat magnetický tok Φ_S , orientovaný proti směru toku Φ_P . Tato skutečnost je

dána Lenzovým zákonem, který popisuje snahu magnetického pole, vytvořeného indukovaným elektrickým proudem, kompenzovat změny magnetického toku. [1, 8]

Magnetické toky Φ_P a Φ_S jsou složeny z toků Φ_u , uzavírajících se magnetickým obvodem a z rozptylových toků Φ_σ , které se uzavírají vzduchem. Toky vytvořené cívkami transformátoru jsou dány vzorci:

$$\Phi_P = \Phi_{Pu} + \Phi_{P\sigma} \quad (1.1)$$

$$\Phi_S = \Phi_{Su} + \Phi_{S\sigma} \quad (1.2)$$

Celkový magnetický tok Φ je potom jejich součtem. Zákon elektromagnetické indukce dále definuje indukované napětí jako časovou derivaci magnetického toku.

(1.3)

$$u_i = - \frac{d\psi}{dt},$$

kde:

u_i je okamžitá hodnota indukovaného napětí [V]

ψ je spřažený magnetický tok [Wb]

t je čas [s]

Spřažený magnetický tok označuje magnetický tok cívky s N závitů, vzorec tedy:

$$\psi = N * \phi \quad (1.4)$$

Pro primární cívku s magnetickým tokem Φ_P je indukované napětí:

$$u_{iP} = N_P * \frac{d\phi_P}{dt}, \quad (1.5)$$

kde:

u_{iP} je indukované napětí v primárním vinutí [V]

N_P je počet závitů primárního vinutí [-]

Φ_P je magnetický tok [Wb]

t je čas [s]

Časová změna magnetického toku působí i na závity výstupního vinutí a indukuje v něm napětí u_{iS} .

$$u_{iS} = N_S * \frac{d\phi_S}{dt} \quad (1.6)$$

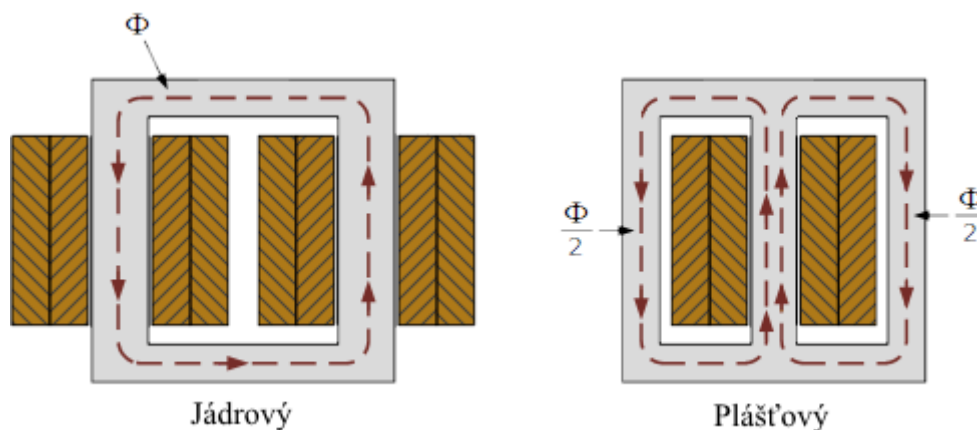
1.2 Konstrukční části transformátoru

Každý transformátor se skládá z několika hlavních částí – magnetického obvodu z transformátorových plechů, vinutí, izolace vinutí a chladicího systému.

1.2.1 Magnetický obvod

Magnetický obvod, známý také jako jádro transformátoru, je navržen tak, aby omezoval ztráty vířivými proudy. Ty vznikají působením časově proměnného magnetického toku na jádra z masivního materiálu. Lze je omezit použitím tenkých izolovaných trafoplechů ze slitiny železa a křemíku. Jejich tloušťka se pohybuje mezi 0,35 mm (pro vyšší frekvence) a 0,5 mm (pro nízké frekvence). [1]

Běžně se setkáváme s dvěma hlavními konstrukčními typy magnetických obvodů: jádrové a plášťové. U jádrového obvodu jsou vinutí umístěna zvenčí a obklopují jádro. Plášťový transformátor má vinutí uvnitř, viz obrázek *Obr. 1.2*. [5]



Obr. 1.2: Druhy magnetických obvodů [5]

1.2.2 Vinutí transformátoru

Konstrukce vinutí jsou velmi rozmanité (např. deskové, jednovrstvé, mnohovrstvé). Hlavní veličiny, které určují typ konstrukce, jsou jmenovitý proud a jmenovité napětí transformátoru. Podle jmenovitého proudu se volí průřez vodičů a případně i počet paralelních větví. Jmenovité napětí transformátoru má vliv na volbu konstrukce izolace mezi závitů, cívkami a na izolaci jednotlivých částí vinutí vzhledem k dalším vodivým i uzemněným částem transformátoru. [5, 9]

1.2.3 Izolace vinutí

Podle izolačního systému transformátory dělíme na suché, olejové a zalévané. Nejčastěji používané jsou suché a olejové. U suchých transformátorů slouží jako materiál pro výrobu izolace vinutí celulósový papír. U olejových transformátorů je izolační médium olej a celulósový papír. Nízkou elektrickou pevnost papíru lze podstatně zvýšit impregnací, při které je vzduch mezi vlákny celulózy vytlačen olejem. Takto impregnovaný papír má tak dobré vlastnosti, že se stal nejrozšířenějším izolantem pro výkonové transformátory. [2, 13]

1.2.4 Izolační systém olej - papír

Izolační systém olej – papír představuje základní izolaci olejových transformátorů. Olej se používá nejen jako izolační kapalina, ale také plní funkci chladicího média. Jeho parametry se musí monitorovat, aby byla zaručena správná funkce. Papír je použit na izolaci vinutí. [2, 13]

Olej

Olej má v elektrotechnice velice rozsáhlé použití díky svým elektroizolačním vlastnostem. Mezi ně patří dobrá elektrická pevnost, tekutost, schopnost snadno vyplnit prostory a dutiny, zhášení oblouku a také chladicí účinky. Nevýhodou oleje je jeho postupná degradace. [2, 4]

Základní rozdělení olejů

Oleje se podle původu dělí na přírodní a syntetické. U přírodních dále rozlišujeme minerální, rostlinné a živočišné oleje. Minerální olej je ropný produkt, který se používá v transformátorech. O jeho složení a vlastnostech více níže.

Rostlinný olej je směs esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin. Rozděluje se na vysychavé (dřevný, lněný) a nevysychavé (ricinový, řepkový). Nevysychavé oleje se používají k impregnaci papírových kondenzátorů, vysychavé oleje se uplatňují např. u elektroizolačních laků. [2, 6]

Syntetické oleje se mají dobré chemické a elektrické vlastnosti. Jsou nehořlavé, ekologicky nezávadné, tepelně stálé a mají výborné izolační vlastnosti. [1, 9]

V dnešní době roste tlak na použití tekutin šetrnějších k životnímu prostředí jako například biologicky odbouratelná syntetická izolační kapalina MIDEL 7131. [22]

Transformátorový olej

V transformátorech je jako izolační kapalina nejčastěji používán minerální olej. Minerální oleje se vyrábějí destilací a rafinací ropy. Destilace je proces používaný k oddělení složek kapalných směsí, založený na principu různých teplot bodu varu. Dvousložková směs je v destilační komoře zahřívána, dokud se nedosáhne bodu varu u jedné z nich. Tato složka přechází do plynné podoby a její kondenzací v tepelném výměníku mimo destilační komoru dojde k opětovnému zkapalnění.

Rafinací se poté odstraní nežádoucí látky obsahující kyslík, čímž se zlepší kvalita oleje. Zkvalitnění oleje lze dosáhnout i jinými způsoby, například odplyněním nebo odfiltrováním nečistot. [12, 15]

Minerální oleje jsou z chemického hlediska složité směsi uhlovodíků. Většinu tvoří uhlovodíky (97 %), dále sloučeniny síry, kyslíku, dusíku a kovy obsažené v organických a anorganických solích. Podle celkového chemického složení lze určit jeho vlastnosti. [12, 13]

Jednou z hlavních nevýhod minerálních olejů je degradace, kdy dochází ke změně jejich vlastností v čase. Stárnutí oleje je způsobeno fyzikálně - chemickými procesy. Největší vliv na degradaci oleje má vysoká teplota, způsobená například zahřátím vinutí. Dalším faktorem, který negativně ovlivňuje izolační vlastnosti oleje, je kontakt se vzduchem. [11, 13]

Údržba oleje

Jako každý materiál i olej postupem času stárne a ztrácí své vlastnosti. Neinhibované oleje (čistý základový olej bez antioxidantu) dosahuje vysokého stupně degradace po šesti až osmi letech provozu. U inhibovaných olejů (přidaná antioxidační složka pro zvýšení životnosti) se tato doba pohybuje mezi patnácti až dvaceti lety provozu. Dalším provozováním takto starých olejů se zvyšuje riziko havárie. Když olej dosáhne takového stupně degradace, že není schopný plnit svou úlohu v transformátoru, musí se

přistoupit k jeho obnově. Stárnutí oleje se týká jen 3 až 5 % objemu oleje, zbytek zůstává beze změn. Metod ošetření oleje je několik a liší se podle rozsahu degradace. Filtrování se používá tehdy, když jsou v oleji tuhé nežádoucí částice a saze. Filtrace obnovuje základní elektrické a izolační vlastnosti transformátorového oleje. [11, 14]

Regenerace oleje je komplexní úprava oleje, jejímž cílem je obnova všech vlastností. Regenerace se v dnešní době provádí pomocí pojízdných stanic. Mobilní stanice umožňují vysoušení, filtraci, odplynění s procesem regenerace a následné inhibice oleje. [22, 23]



Obr. 1.3: Mobilní zařízení na filtraci použitého oleje. [23]

Papír

Papír je tenký a hladký materiál, který se vyrábí zhutněním vláken. Tvoří ho rostlinná vlákna, která jsou převážně založena na celulózové bázi. Nejčastěji používaný materiál je dřevo, obvykle smrkové, jedlové nebo topolové. Mohou být použity i rostlinné materiály jako konopí, bavlna či len. Neupravený papír obsahuje jen celulózu, z toho důvodu se k němu přidávají různé přísady, díky kterým získává své vlastnosti. [7]

Dělení papíru

Papír se dělí podle několika kritérií. Nejpoužívanější rozdělení je dle metody výroby na ručně vyrobený papír a strojově vyrobený papír. Také se může dělit podle formátu, způsobu použití a podle plošné hmotnosti (gramáže). Ta udává hmotnost papíru o ploše 1 m². Běžně používaný papír má plošnou hmotnost do 150 g*m⁻². V elektrotechnice

se tento papír využívá v kondenzátorech, v kabelech, pro izolaci vinutí elektrických strojů nebo na odizolování magnetických obvodů.

Lepenka je pevný materiál o plošné hmotnosti nad $250 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Je vyrobena z buničiny, někdy i s podílem dřevoviny. Lepenka se rozděluje na obyčejnou, lesklou pro elektrotechniku, drážkovou a transformátorovou. Obyčejná lepenka se používá tam, kde se nekladou požadavky na chemickou čistotu, mechanické a elektrické vlastnosti. Pokud jsou nároky na lepší vlastnosti, použije se lepenka lesklá.

Drážková lepenka je využívána pro drážkovou izolaci. Má dobré mechanické vlastnosti, které si zachovává i v ohybu. Transformátorová lepenka je vyrobena z čisté buničiny. Má velkou pevnost v tahu a vysokou elektrickou pevnost. Pokud lepenka obsahuje nečistoty, může zhoršovat izolační vlastnosti transformátorového oleje. [13, 17]

1.2.5 Přepínač odboček

Přepínač odboček slouží pro regulování výstupního napětí z transformátoru. Mezi nejdůležitější parametry, které se monitorují na přepínači odboček, patří teplota oleje a obsah plynů (hlavně kyslíku) v oleji. Také se kontroluje správná pozice a přesnost přepnutí přepínače na požadovanou odbočku. [13, 17]

1.2.6 Chlazení

Elektrická energie ztracená v transformátoru při převodu z primární do sekundární části se ve vinutí, v magnetickém obvodu i v jiných částech transformátoru přeměňuje na teplo. Při velkém oteplení může docházet k omezení výkonu nebo k poškození izolace. Zvýšení povolené provozní teploty o 10% může snížit životnost izolace až o 50%. [17]

Způsob chlazení záleží na provedení transformátoru. Druh a způsob chlazení musí být uveden na štítku pomocí písmenné značky. Na štítku mohou být uvedena maximálně čtyři písmena: chladivo, které je ve styku s vinutím, jeho způsob oběhu, chladivo, které je ve styku s vnějškem a jeho způsob oběhu. [1]

První písmeno: druh chladiwa, které je ve styku s vinutím

O – olej

W – voda

G – plyn

A – vzduch

Druhé písmeno: způsob cirkulace chladiva

N – odvod tepla je přirozený

D – odvod tepla je nucený a řízený (např. čerpadly)

F – odvod tepla je nucený a neřízený

Třetí písmeno: druh chladiva, které je v kontaktu s vnějším okolím transformátoru

A – vzduch

W – voda

Čtvrté písmeno: způsob oběhu chladiva v okolí transformátoru

N – odvod tepla je přirozený

F – odvod tepla je nucený a neřízený

2 Degradální mechanismy působící na izolaci

Na izolační systém transformátoru působí různé degradační mechanismy. Jeho částmi jsou papír a olej. Vlákna používaná na výrobu papíru jsou obvykle tvořena celulózu, což je přírodní polymer. U molekul celulózy dochází postupem času ke snížení stupně polymerace a s tím související degradací vlastností jako křehkost nebo mechanická pevnost. Působením dalších vnějších vlivů - vody, teploty či vzduchu dochází ke snížení a případně i narušení izolačních vlastností papíru. [17]

2.1 Hydrolýza

Vlivem vody dochází u celulózy k rozkladu na kratší řetězce - monomery. Tento proces se nazývá hydrolýza. Narušují se při něm chemické vazby v papíru a dochází ke ztrátě jeho mechanických vlastností. Hydrolýzu dělíme na tři typy. Termickou, kyselou a alkalickou. O termické hydrolýze mluvíme při teplotách nad 120 - 130 °C. Kyselá, jak už z názvu vyplývá, se vyskytuje v kyselém prostředí a dochází k ní nejčastěji. Alkalická působí v alkalickém prostředí, typicky k ní dochází při nevhodném postupu při odkyselování papíru.

Vlhkost a voda obecně transformátoru nesvědčí. Snižuje životnost izolace, způsobuje korozi vinutí a dalších součástí. Kromě toho negativně působí na elektrickou pevnost oleje. Je doporučeno, aby obsah vody v oleji nebyl větší než 0,5 %.

Oxidace celulózy produkuje vodu. Ta se rozděluje mezi olej a papír v poměru, který závisí na teplotě. Zvýšení teploty způsobí přesun vody z papíru do oleje, při poklesu teploty dojde k přesunu v opačném směru. Objem generované vody je určený převážně obsahem kyslíku a teplotou systému. [17]

V oleji se voda může vyskytovat v několika formách:

Volná voda se nachází u dna transformátoru. Do izolačního systému se dostává vlivem jeho hyroskopických vlastností. Tato voda přímo neovlivňuje vlastnosti oleje, ale může vlivem teploty a do oleje jako voda rozpuštěná nebo emulgovaná.

Rozpuštěná voda v oleji představuje značné riziko. Její odstranění se provádí rozstříkáváním oleje do vakua za nízké teploty.

Emulgovaná voda je směs mikroskopických kapek vody, které zhoršují dielektrické vlastnosti izolačního oleje. [1, 13]

Přítomnost vody v oleji se zjišťuje coulometrickou titrační metodou. Ta je založena na reakci vody, jódu, oxidu siřičitého a alkoholu v organickém rozpouštědle. [13]

2.2 Oxidace

Oxidace je hlavní příčinou stárnutí izolačních olejů při provozu. Probíhá při styku materiálu se vzdušným kyslíkem a dochází při ní k odštěpování elektronů z atomů. Oleje jsou složeny z uhlovodíků a právě na vazbách mezi uhlíkem a vodíkem probíhají oxidační reakce. Světlo a zvýšená teplota tyto reakce urychlují. Produkty oxidace jsou různé kyslíkaté látky, zejména ketony, kyseliny a estery, které dále podléhají kondenzačním reakcím. Tyto reakce vedou ke zvyšování kyselosti a viskozity oleje. [17]

Počátek a další rozvoj oxidační degradace olejů se projeví nejprve zakalením oleje. To je způsobeno tím, že se z oleje začnou vylučovat některé nerozpustné produkty oxidace. Zakalení oleje nemusí být nutně způsobeno vlhkostí a vodou rozptýlenou v oleji, ale právě rozvíjející se oxidací. Pokud se nevěnuje pozornost prvním náznakům, může pokročilá oxidace způsobit úplné zanesení systému lepivými oxidačními produkty. To má za následek zvýšení elektrické vodivosti nebo zhoršení elektrické i mechanické pevnosti izolace. [17]

2.3 Kyselina

Kyseliny obsahuje olej, který je v kontaktu s celulózou. Jeho stárnutím se zvětšuje obsah kyselých látek v oleji. Úroveň stáří oleje je udávána číslem kyselosti. Jedná se dnes o nejvýznamnější parametr z hlediska stárnutí oleje. Obsah kyselých látek se uvádí i u nových izolačních olejů. Tam indikuje stupeň rafinace nebo upozorňuje na přítomnost organických kyselin. Číslo kyselosti udává množství KOH (hydroxid draselný), které je potřeba v nevodném prostředí na neutralizaci organických a anorganických kyselých složek v 1 g oleje. Pro určení čísla kyselosti se používají dvě metody: potenciometrická metoda nebo stanovení čísla kyselosti na alkalickou modř 6B. [7, 17]

Vysoké číslo kyselosti (více než 0,6 mg KOH/g oleje) způsobuje vznik kalu v oleji. Tento produkt se poté usazuje v celém transformátoru, kde zůstává i po výměně oleje. Usazování kalu nepříznivě ovlivňuje odvod tepla a může tak zapříčinit i selhání zařízení.

2.4 Polymerační stupeň (P_n)

Patří mezi parametry, které poskytují nejvíce informací o degradaci celulózy. Sleduje se jím výskyt produktů vytvořených vlivem stárnutí. Udává počet stavebních jednotek (merů) v makromolekule. Mer je opakující se část makromolekuly, která má stýle stejné chemické složení. Polymerační stupeň se definuje následujícím vztahem:

$$P_n = \frac{M_p}{M_m}, \quad (2.1)$$

kde:

M_p je molekulová hmotnost polymeru [g/mol]

M_m je molekulová hmotnost monomeru [g/mol]

Polymerační stupeň postupem času klesá. U celulózy se pohybuje mezi hodnotami 2500 – 150. Pokud vychází jeho hodnota pod 150, je izolace na konci své životnosti. [3, 19]

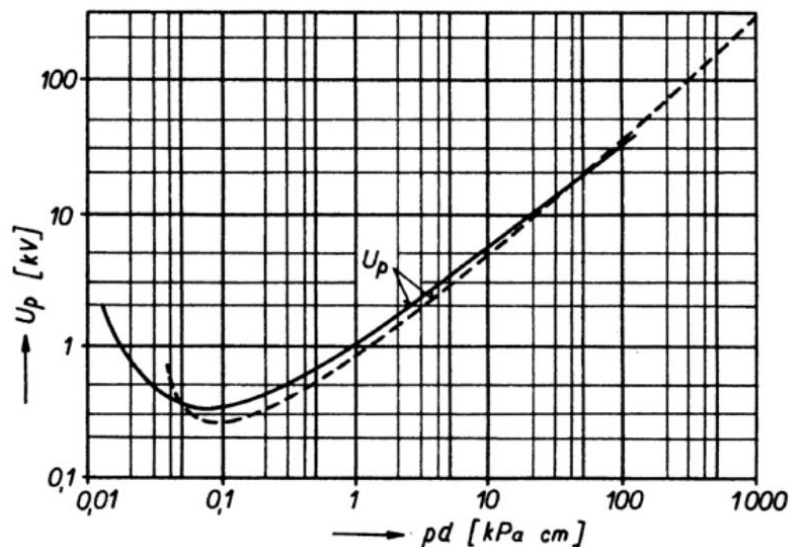
2.5 Teplota

Teplota je jedním z hlavní faktorů, které ovlivňují životnost izolačního systému. Při rostoucí teplotě se urychlují chemické reakce (např. oxidace), zvýšení teploty o 10 °C reakční rychlost zdvojnásobí. Životnost izolace se tak při vyšších teplotách výrazně snižuje. Růst teploty může být způsoben zvýšením zatížení, elektrickým obloukem nebo částečnými výboji. Teplota ovlivňuje rychlost rozkladu papírové izolace i degradaci oleje. [10]

2.6 Částečné výboje

V izolaci transformátorů mohou být plynem vyplněné malé dutinky. Ty také běžně vznikají při velkém lokálním elektrickém namáhání. Při zvyšování střídavého napětí, přiloženého k elektrodám přístroje, se objeví v okolí určitého napětí v jeho dutinách tzv. částečné výboje. Vznik těchto výbojů je často způsoben nehomogenitami mezi izolantem a přilehlými vodiči. Elektrická pevnost prostředí dutinky – plynu – je vždy menší než pevnost okolního pevného izolantu. Proto dojde k průrazu v prostředí dutinky při nižším napětí, než je průrazné napětí izolace okolního izolantu. K průrazu plynu v dutince

dochází, když napětí na ní dosáhne hodnotu průrazného napětí podle Paschenova zákona.



Obr. 2.1: Závislost přeskovového napětí v homogenním poli pro vzduch (Paschenův zákon) [2]

Obrázek Obr. 2.1 zobrazuje závislost pokusně zjištěného (plná čára) a vypočítaného (čárkovaná čára) přeskovového napětí U_p v homogenním poli podle Paschenova zákona. Ten také říká, že když zvýšíme vzdálenost mezi elektrodami nkrát a současně zmenšíme tlak nkrát přeskové napětí U_p se nezmění. [2]

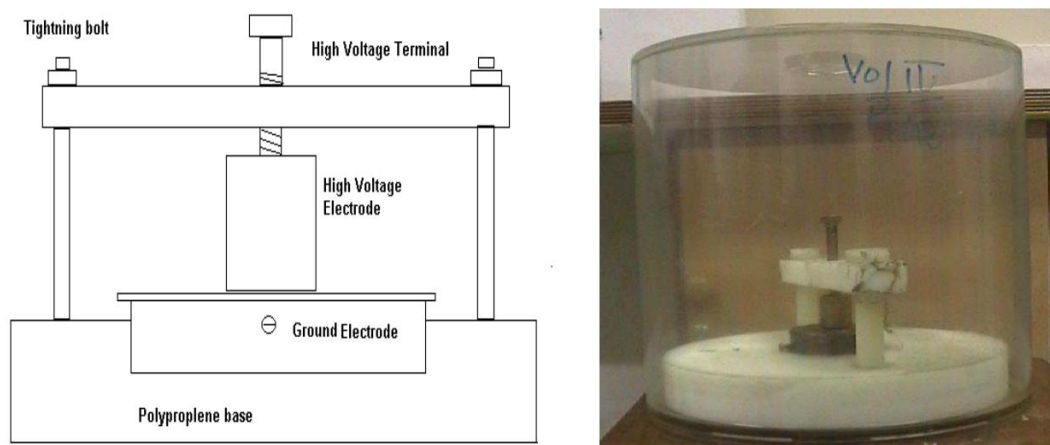
V normě [9] je částečný výboj definovaný jako lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostí izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. Částečné výboje jsou důsledkem koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci, nebo na povrchu izolace a vytvářejí proudové (napětíové) impulsy s dobou trvání mnohem menší než $1\mu s$. [9]

3 Analýza možných negativních vlivů typové zkoušky na elektrickou pevnost vinutí

Typová zkouška transformátoru (popsána v kapitole 4) zahrnuje zkoušku oteplením a zkoušku elektrické pevnosti vinutí. Před samotným měřením je provedena analýza obdobných zkoušek kvůli zjištění možných negativních vlivů na izolaci vinutí.

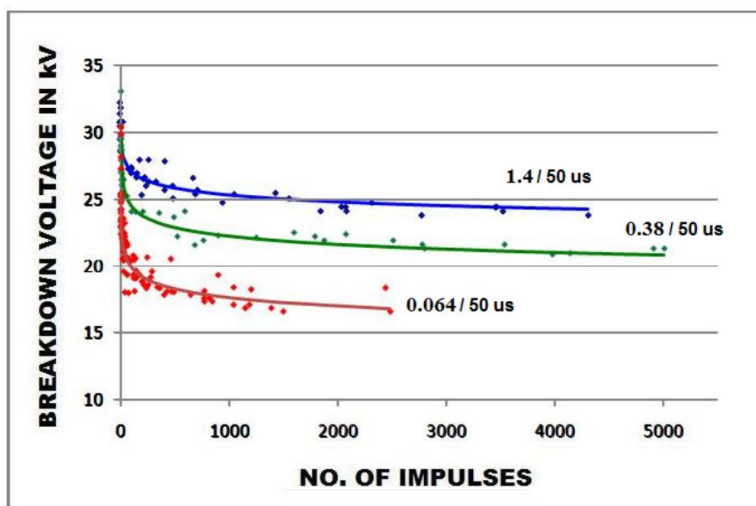
3.1 Vliv opakovaných napěťových impulzů

Práce [18] se zabývá analýzou degradace papírové izolace při opakovaném zatěžování atmosférickými impulzy. Používají se různé doby čela T_1 ($0,064 \mu\text{s} - 1,4 \mu\text{s}$) a doby půltýlu T_2 ($6 - 67 \mu\text{s}$).



Obr. 3.1: a) Blokové schéma zapojení b) Testovací stanice [18]

Obrázek Obr. 3.1 ukazuje schéma zapojení a fotografii testovací stanice. Kraftový papír o rozměrech 120 x 90 mm a tloušťce 0,2 – 1,5 mm je nejprve v klimatické komoře zbaven vlhkosti (zahřátý na 65°C po dobu 48 hodin). Poté je na 240 hodin ponořen do minerálního oleje. Takto ošetřený papír se umístí mezi dvě elektrody a je zkoušen přibližně 60 impulzy za minutu. Hledá se velikost průrazného napětí U_{BDV} , při kterém již stačí jediný impulz k přeskoku mezi elektrodami. Po přeskoku se snižuje napětí o 5% až k hodnotě 75% U_{BDV} a zaznamenává se počet impulzů potřebných k dosažení dalšího průrazu.

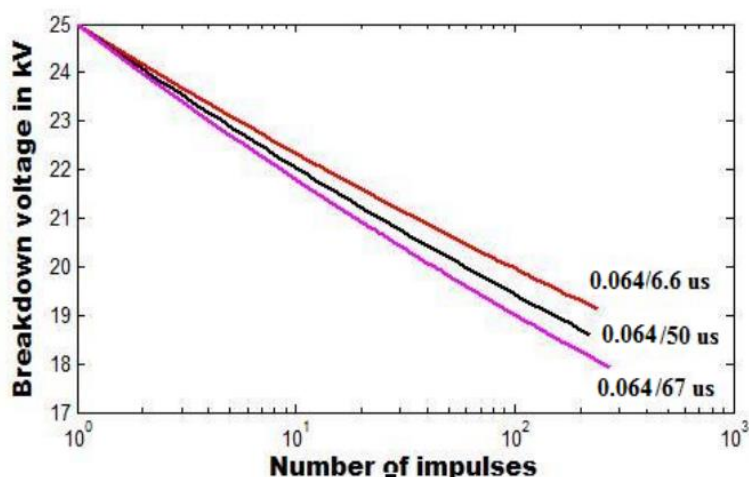


Graf 3.1: Výsledky měření pro různé doby čela T_1 [18]

Graf 3.1 ukazuje závislost napětí U_{BDV} na počtu impulzů. Jsou v něm zobrazené tři použité impulzy a naměřené hodnoty byly proloženy spojnici trendu. Z grafu je patrné, že při kratší době čela T_1 dojde k přeskoku při nižším napětí. Také ukazuje, že pro zopakování tohoto jevu stačí i jeden impulz, přestože se napětí při snižuje po každém přeskoku. Můžeme tedy říci, že opakované namáhání snižuje elektrickou pevnost papíru.

Napětí potřebné pro první přeskok U_{BDV} bylo pro jednotlivé impulzy:

1,4/50 μ s	31 kV
0,38/50 μ s	29,5 kV
0,064/50 μ s	25 kV



Graf 3.2: Výsledky měření, různé doby půltýlu T_2 [18]

Graf 3.2 zobrazuje závislost průrazného napětí U_{BDV} na počtu impulzů, při různých dobách půltýlu T_2 . Je z něj patrné se, že ta nemá na velikost napětí, při kterém dojde k přeskoku vliv a ve všech třech případech byla jeho hodnota 25 kV. Degradace izolace je větší s delší dobou T_2 , k přeskokům docházelo při shodném počtu impulzů s nižším zkušebním napětím. [18]

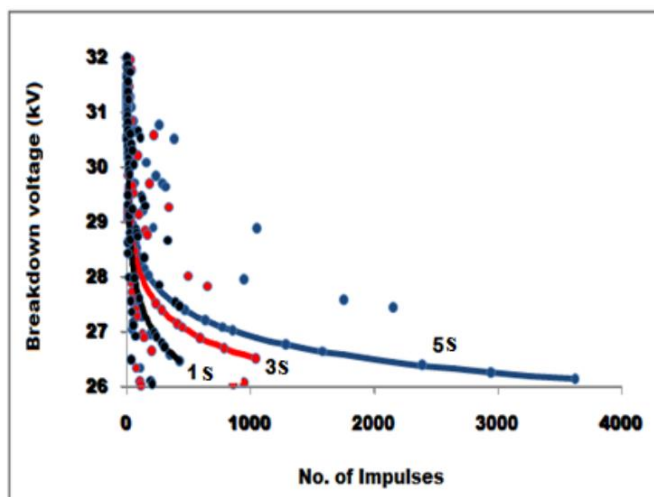
3.1.1 Vliv opakovaných napěťových impulzů na polymerační stupeň

K podobným výsledkům došli autoři při pokusu [19]. Kraftový papír před měřením nejprve vysušili v klimatické komoře (80°C po dobu 72 hodin) a poté impregnovali olejem. Jeho tloušťka byla 0,25 mm. Papír se umístil mezi 2 elektrody dle obrázku *Obr. 3.2*.



Obr. 3.2: Papír umístěný mezi dvě elektrody [19]

Použité testovací impulzy byly s parametry 1,2/50 μ s, 0,4/50 μ s a 0,064/50 μ s. Mezi jednotlivými impulzy se ponechávaly intervaly 1, 3 a 5 sekund. Postup měření byl shodný s prací [18], po přeskoku se snižovalo napětí o 5% do 85% hodnoty U_{BDV} a zaznamenával se počet impulzů potřebný pro další přeskok. [19]



Graf 3.3: Výsledky měření, impulz 1,2/50 μ s [19]

Na Grafu 3.3 vidíme závislost průrazného napětí U_{BDV} na počtu zkoušek pro impulz 1,2/50 μ s, při různých časových prodlevách mezi impulzy. Graf je proložen spojnicí trendu. Je z něj patrné, že intervaly mezi impulzy mají vliv na četnost přeskoků. U intervalu 1 s dochází k přeskoku typicky po 5 - 280 impulzech, při intervalu 3s po 7 - 680 opakováních a u 5 s intervalu mezi 8. – 1040. testem. Při delších prodlevách tedy dochází k částečné regeneraci izolačních vlastností papíru.

V této práci se také zjišťoval polymerační stupeň celulózy (viz kapitola 2.4). Tabulka Tab. 3.1 ukazuje naměřený pokles stupně polymerizace při jednotlivých typech impulzů. Dále v ní vidíme, že strmější doba čela způsobuje při stejném počtu zkoušek větší degradaci izolace. Toto zjištění potvrzuje i studie [18]. [19]

Tab. 3.1: Polymerační stupeň celulózy [19]

No. of Impulses	1.2/50 μ s	0.4/50 μ s	0.064/50 μ s
0	1070	1070	1070
1	1008	988	829
5	938	858	705
10	906	794	623
20	848	692	502

3.2 Vliv teploty

Experiment [20] se zabývá problematikou stárnutí izolace transformátoru. Simuluje se v něm namáhání izolace při provozu pomocí zkoušky zrychleného stárnutí izolace.

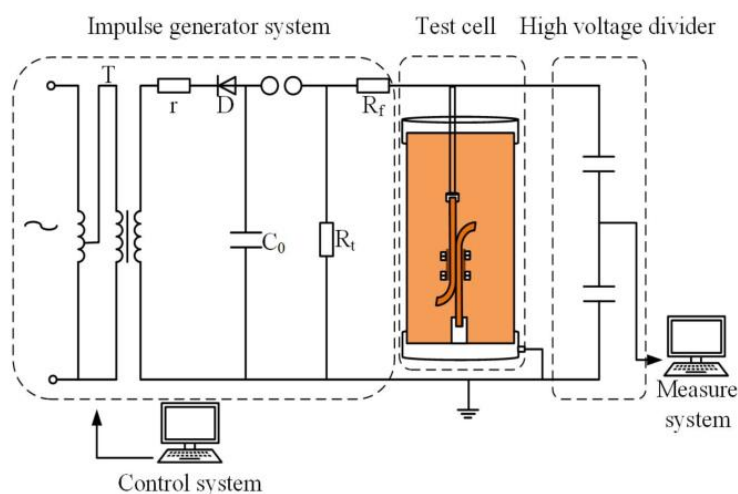
Transformátory jsou rozděleny do 3 skupin a na předem určené časy se umístí do klimatické komory. Testovací podmínky pro jednotlivé skupiny jsou následující:

Skupina A, bez teplotního namáhání

Skupina B, teplotní namáhání 278 hodin v teplotě 130°C, simuluje 10 let provozu při 80°C

Skupina C, teplotní namáhání 556 hodin v teplotě 130°C, simuluje 20 let provozu při 80°C

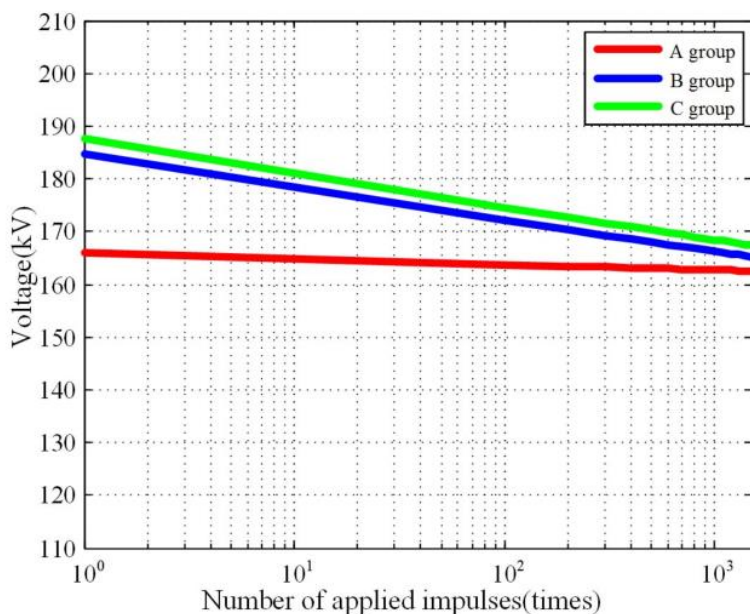
Po ukončení zahřívání jsou transformátory zapojeny podle schématu níže (Obr. 3.3).



Obr. 3.3: Blokové schéma zapojení [20]

Zkušební systém pro generování vysokonapěťových impulzů se připojí k testovanému transformátoru a měřicí systém zaznamenává počet zkoušek. Hledá se průrazné napětí U_{BDV} , při kterém dojde k přeskoku mezi primárním a sekundárním vinutím. Po dalším přeskoku se stejným napětím je při dalším testu hodnota zkušebního napětí snížena o 2 kV. Provádí se maximálně 1000 měření s jedním zkušebním napětím.

U skupiny A byla hodnota průrazného napětí, při kterém došlo k prvnímu přeskoku 165,9 kV, u skupiny B 185,3 kV a u skupiny C 187,5 kV. [20]



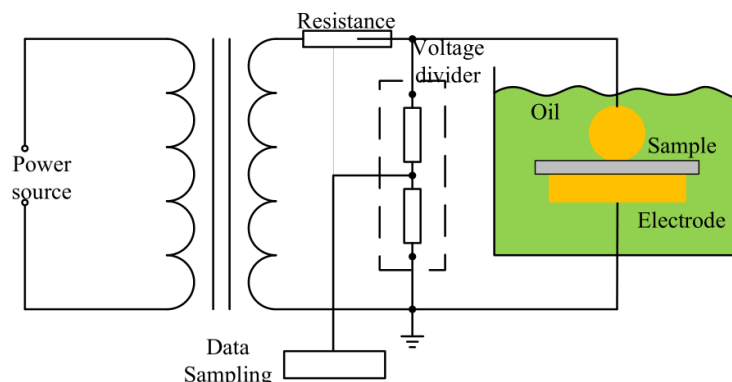
Graf 3.4: Naměřené hodnoty pro skupiny transformátorů A, B, C [20]

Graf 3.4 zobrazuje naměřené hodnoty pro všechny skupiny transformátorů. Vidíme, že transformátor ze skupiny A měl dobrou elektrickou pevnost izolace, ke snížení zkušebního napětí se přistouplo pouze dvakrát. Graf ukazuje zajímavý výsledek u skupiny B (simulováno 10 let v provozu) a skupiny C (20 let v provozu). Tyto transformátory vykazují vyšší elektrickou pevnost, než transformátor ze skupiny A, který nebyl teplotně namáhán. Tento výsledek se v práci diskutuje se závěrem, že při zatěžování vysokou teplotou zřejmě došlo k poškození papírových vláken. Trhliny se poté nasákly olejem, který zvýšil elektrickou pevnost izolace. Jinak ale můžeme říci, že teplotní namáhání má negativní vliv na elektrickou pevnost izolace. Izolace skupiny A vydržela při stejném napětí i stovky impulzů, zatímco u skupin B a C bylo zapotřebí přikládáné napětí snižovat, aby se dosáhlo stejných výsledků. [20]

3.2.1 Vliv teploty na elektrickou pevnost papíru

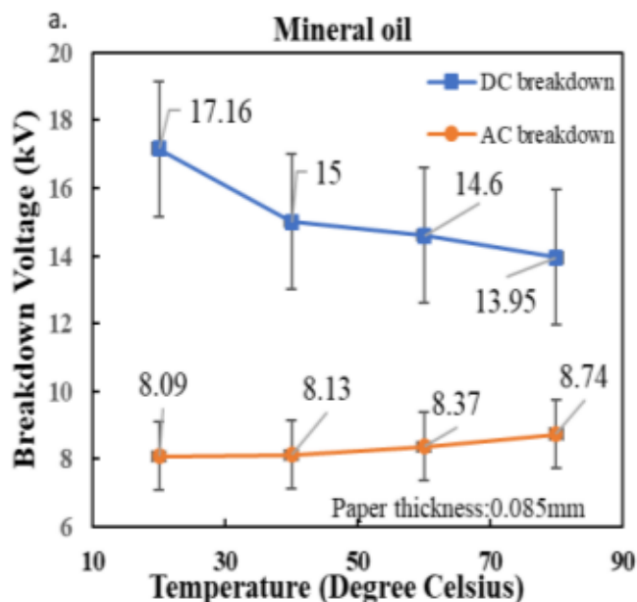
Cílem měření [21] bylo zjistit, jaký vliv má teplota na elektrickou pevnost papíru. Papír o tloušťce 0,085 mm je ponořen do nádoby s olejem a namáhá se nejprve stejnosměrným a poté střídavým napětím, dokud nedojde k přeskoku. Následně se teplota oleje zvýší o 20°C a měření je opakováno.

Principiální schéma zapojení zobrazuje obrázek *Obr. 3.4*.



Obr. 3.4: Principiální schéma zapojení pro měření elektrické pevnosti papíru [21]

Graf 3.5 zobrazuje závislost průrazného napětí U_{BDV} na teplotě. Vidíme, že u stejnosměrného napětí při zvýšení teploty dochází k výraznému poklesu napětí, při kterém dojde k přeskočení. Konkrétně z 17,16 kV při teplotě 20°C na 13,95 kV při 80 °C. Z těchto výsledků je zřejmé, že vyšší teplota snižuje elektrickou pevnost papíru. U střídavého napětí nemá růst teploty velký vliv na pokles hodnoty průrazného napětí. Ta naopak při vyšší teplotě ještě mírně vzroste. Je možné, že došlo k podobnému jevu jako u pokusu [20] - při přeskočení došlo k poškození vláken papíru, trhliny vyplnil olej a zvýšil tak elektrickou pevnost papíru.



Graf 3.5: Závislost střídavého a stejnosměrného průrazného napětí na teplotě

4 Typová zkouška transformátoru

Typová zkouška je test, který se provádí při podstatné změně technologie nebo konstrukce výrobku, případně při použití nových materiálů. Prokazuje, že produkt splňuje specifikace zákazníka. Transformátor musí projít zkušebními postupy v prostorách výrobce, obvykle se provádí na prototypu nové výrobní šarže. Dále se četnost typových zkoušek řídí smlouvami nebo firemními předpisy. [24]

Dle analýzy provedené v kapitole 3 očekávám, že v průběhu měření budu pozorovat postupné zhoršování izolačních vlastností.

4.1 Teoretický úvod

Při měření se provádí zkouška elektrické pevnosti a zkouška oteplením, obě jsou popsány v normě [24].

4.1.1 Zkouška elektrické pevnosti

Při této zkoušce se izolace transformátoru zatěžuje po dobu 1 min napětím sinusového průběhu o frekvenci 50/60 Hz. Před provedením měření se odpojí odpory, kondenzátory a jiné součásti. Během zkoušky nesmí dojít k přeskoku nebo průrazu izolace, ke koruně (sršení) a podobným jevům se nepřihlíží. Hodnoty zkušebního napětí a místa jeho přiložení jsou uvedeny v tabulce *Tab. 4.1*. [24]

Tab. 4.1: Zkušební napětí pro zkoušku elektrické pevnosti [24]

Místa přiložení zkušebního napětí	Pracovní napětí V				
	< 50	150	300	600	1 000
1) Mezi živé části vstupních obvodů a živé části výstupních obvodů (základní izolace)	250	1 400	2 100	2 500	2 750
2) Mezi živé části vstupních obvodů a živé části výstupních obvodů (dvojitá nebo zesílená izolace)	500	2 800	4 200	5 000	5 500
3) Přes základní nebo přídatnou izolaci mezi: <ul style="list-style-type: none"> a) živými částmi, které mají různou polaritu <ul style="list-style-type: none"> – uvnitř téhož vinutí: bez zkoušky (pouze funkční izolace); – kromě vinutí: zkouška se provede; b) živými částmi a kostrou, pokud je určena pro připojení k ochrannému uzemnění; c) přístupnými vodivými částmi a kovovou tyčinkou stejného průměru jako pohyblivý přívod (nebo kovovou fólií ovinutou okolo přívodu) zasunutou do průchodky vstupního otvoru, návlaček a uchycení přívodu apod.; d) živými částmi a mezilehlou vodivou částí e) mezilehlými vodivými částmi a kostrou f) každým vstupním obvodem a všemi ostatními vstupními obvody spojenými navzájem 	250	1 400	2 100	2 500	2 750
4) Přes zesílenou izolaci mezi kostrou a živými částmi	500	2 800	4 200	5 000	5 500

4.1.2 Oteplení

Transformátory nesmí při normálním provozu dosahovat nadměrných teplot. Ty se určují podle dále uvedených podmínek po dosažení ustáleného stavu. Zkouška a měření se provádí v prostředí bez proudění vzduchu za takových podmínek, aby nebyly ovlivněny jejich výsledky. Pokud má transformátor jmenovitou hodnotu teploty okolí t_a , provádí se zkouška při teplotě $t_a \pm 5^\circ\text{C}$.

Přenosné transformátory se umístí na podložku z překližky opatřenou matným černým nátěrem, nepřenosné transformátory se na podložku namontují jako při běžném použití. Podložka je 20 mm silná a má rozměry, které nejméně o 200 mm přesahují rozměry pravoúhlého průmětu vzorku na podložku.

Teploty vinutí se určují metodou změny odporu. Jedna z metod spočívá v měření každého vinutí zvlášť a určení odporu vinutí co možná nejdříve po vypnutí a potom v krátkých intervalech tak, aby bylo možné zaznamenat křivku závislosti odporu na čase pro zjištění odporu v okamžiku vypnutí. Hodnota oteplení vinutí se počítá podle vzorce:

$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (x + t_1) - (t_2 - t_1), \quad (4.1)$$

kde:

$x = 234,5$ pro měď

$x = 225$ pro hliník

Δt je oteplení, výše uvedené t_2 je takové, že maximální hodnota se rovná $\Delta t + t_2$

R_1 je odpor na začátku zkoušky, při teplotě t_1

R_2 je odpor na konci zkoušky, po dosažení ustáleného stavu

t_1 je teplota na začátku zkoušky

t_2 je teplota na konci zkoušky

Na začátku zkoušky musí mít vinutí teplotu rovnající se teplotě okolí. Při určování teploty vinutí se měří teplota okolí v takové vzdálenosti od vzorku, aby nedošlo k ovlivnění jeho teploty. V tomto místě nesmí teplota vzduchu během zkoušky kolísat o více než 10°C . Pro transformátory typu t_a se výsledná teplota rovná $\Delta t + t_a$. Ostatní teploty se určí pomocí termočlánků zvolených a umístěných tak, aby měly co nejmenší vliv na teplotu zkoušené části. [24]

Za předpokladu, že během zkoušky transformátor pracuje při své jmenovité teplotě okolí (25°C nebo t_a), nesmí teplota překročit hodnoty uvedené v tabulce Tab. 4.2 [24]

Tab.4.2: Hodnoty maximálních teplot při normálním použití [24]

Části ^a	Teplota °C
Vinutí (např. cívky a ostatní izolanty, která jsou ve styku s vinutími), jestliže materiál izolace systému je:	
– třídy A ^b	100
– třídy E ^b	115
– třídy B ^b	120
– třídy F ^b	140
– třídy H ^b	165
– ostatních tříd ^c	–
Vnější kryty ^d (kterých se lze dotknout normalizovaným zkušebním prstem) nepřenosných transformátorů , jestliže jsou z:	
– kovu	70
– jiného materiálu	80
Vnější kryty ^d (kterých se nelze dotknout normalizovaným zkušebním prstem) nepřenosných transformátorů	85
Vnější kryty ^d , rukojeti apod. u přenosných transformátorů :	
– jestliže jsou tyto části nepřetržitě drženy v ruce při normálním použití (například v ruce držené transformátory):	
• z kovu	55
• z jiného materiálu	75
– jestliže tyto části nejsou nepřetržitě drženy v ruce při normálním použití:	
• z kovu	60
• z jiného materiálu	80
Svorky pro vnější vodiče a svorky spínačů	70
Izolace vnitřního a vnějšího spojování ^e :	
– z pryže	65
– z polyvinylchloridu	70
Části, jejichž poškození by mohlo ohrozit bezpečnost ^e :	
– z pryže (jiné než izolace vodičů)	75
– z fenolformaldehydu	105
– z močovinformaldehydu	85
– z impregnovaného papíru a tkaniny	85
– z impregnovaného dřeva	85
– z polyvinylchloridu (části jiné než izolace vodičů), polystyrénu a podobného termoplastu	65
– z lakovaného papíru	75
Podložky	85
Desky plošných spojů ^e :	
– spojené fenolformaldehydem, melamineformaldehydem, fenolfurfuralem nebo polyesterem	105
– spojené epoxidovou pryskyřicí	140
^a Pokud jsou použity jiné materiály, nesmí být vystaveny teplotám vyšším, než těm, které byly ověřeny jako přípustné pro tyto materiály.	
^b Klasifikace materiálu podle IEC 60085 a IEC 60216; nicméně hodnoty byly přizpůsobeny s ohledem na skutečnost, že při těchto zkouškách jsou míněny teploty částí a ne hodnoty teploty horkého místa.	
^c Jestliže je použito jiných materiálů, než které jsou předepsány v IEC 60085 a IEC 60216, musí izolační systém vyhovět zkoušce podle 14.3.	
^d Jestliže některá součást tvoří část vnějšího povrchu transformátoru , nesmí teplota této součásti být vyšší než je hodnota předepsaná pro příslušný vnější kryt .	
^e Druhy pryžové a polyvinylchloridové izolace jsou izolace vodičů, pro které jednotlivě platí IEC 60245 a IEC 60227.	

Bezprostředně po zkoušce musí vzorek vyhovět zkoušce elektrické pevnosti popsané v kapitole 4.1.1.

4.1.3 Ochrana před zkratem a přetížením

Transformátor se nesmí stát nebezpečným v důsledku zkratů a přetížení, k nimž může dojít při běžném provozu. Shoda se ověřuje prohlídkou a dále zkouškami, které se provádějí bezprostředně po zkoušce oteplením. Musí být zachována stejná teplota okolí a poloha transformátoru. Ten se poté zkouší 1,1 násobkem jmenovitého vstupního napětí při zkratování výstupního vinutí tak dlouho, dokud se nedosáhne ustáleného stavu. Teploty nesmí překročit hodnoty uvedené v tabulce *Tab. 4.3*, pokud transformátor pracuje při jmenovité teplotě okolí (25°C nebo t_a). V případech, že oteplení na zkoušené ploše se liší od jmenovité teploty okolí, musí se vzít tento rozdíl v úvahu při použití mezních hodnot z tabulky *Tab. 4.3*. Během zkoušky z transformátoru nesmí šlehat plameny, vytékat roztavený kov, nesmí vznikat nebezpečné množství jedovatých nebo hořlavých plynů a nesmí se přesáhnout hodnoty z tabulky 4.3. Po zkouškách a po vychladnutí izolace přibližně na teplotu okolí musí izolace odolat zkoušce elektrické pevnosti.

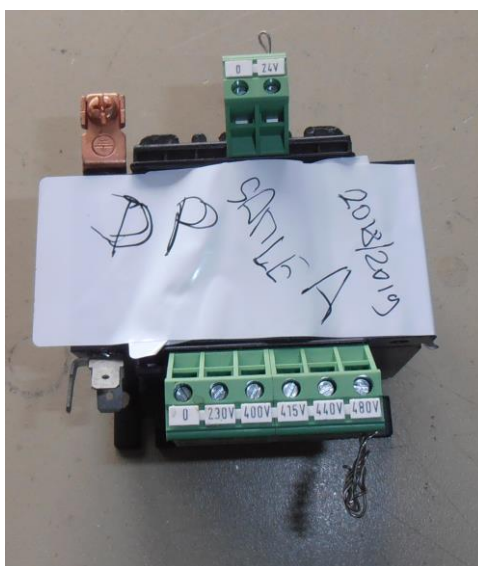
Tab.4.3: Nejvyšší povolené hodnoty teplot při zkratu nebo přetížení [24]

Tepelná třída izolace	A	E	B	F	H
	Maximální teplota °C				
Vinutí chráněno bezpodmínečně Článek 15.2	150	165	175	190	210
Vinutí chráněno ochranným prvkem:					
a) Články 15.3.2 – 15.3.3 – 15.3.4 – během požadované doby nebo během doby T dané tabulkou 4 ^a	200	215	225	240	260
b) Článek 15.3.1					
– během první hodiny, vrcholová hodnota	200	215	225	240	260
– po první hodině, vrcholová hodnota	175	190	200	215	235
– po první hodině, střední hodnota ^b	150	165	175	190	210
c) Článek 15.3.5	175	190	200	215	235

Pokud je transformátor chráněn miniaturními pojistkami podle IEC 60127, musí být navíc provedena zkouška přetížením při 1,5 násobku jmenovitého proudu pojistky, dokud nenastane ustálený stav. Když je transformátor chráněn jističem dle IEC 60898, zatěžuje se po dobu určenou v IEC 60898 proudem rovnajícím se 1,45 násobku hodnoty jmenovitého proudu jističe. Proud se musí během zkoušky udržovat konstantní. Jistič se nahradí spojem zanedbatelné impedance.

4.2 Experiment

Měření proběhlo v období od 8. 11. 2018 do 14. 4. 2019 ve firmě z Plzeňského kraje, která se zabývá výrobou transformátorů. V ní bylo dohodnuto otestování tří vzorků dle normy ČSN EN 61558-1 ed. 2. Z důvodu zachování anonymity výrobce jsou jednotlivé přístroje označeny názvy Vzorek A, Vzorek B a Vzorek C. Tyto transformátory byly ze dvou typových řad – vzorek A řada 1, Vzorek B a C řada 2. Na obrázku *Obr. 4.1* je testovaný transformátor - Vzorek A.



Obr. 4.1: Testovaný transformátor, vzorek A

V tabulce *Tab. 4.4* jsou parametry jednotlivých transformátorů.

Tab. 4.4: Parametry měřených transformátorů

	S [VA]	U_{nP} [V]	U_{nS} [V]	t_a [°C]	Třída izolace [-]
Vzorek A	100	230/480 AC	24 AC	40	B
Vzorek B, C	63	230/400 AC	24 AC	50	B

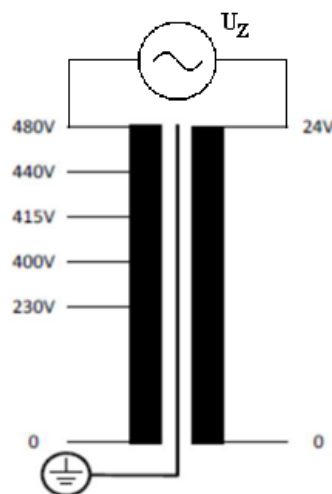
4.2.1 Měřicí postup

S konzultantem práce byl dohodnut postup testování. Zkoušku elektrické pevnosti u každého vzorku provedu 200x. Každých 10 měření zaznamenám proud procházející obvodem (rostoucí hodnota proudu může značit brzký přeskok/průraz). Budu si všimnout neobvyklých jevů (intenzivnější sršení, zápach) a zaznamenávat je. Pokud dojde při měření k přeskokům, zapíši čas od začátku zkoušky a spustím další testovací cyklus. Když další test nebude možné provést (okamžitě bude docházet k dalším přeskokům), snížím zkušební napětí U_z , vždy o 100 V, dokud nebude možné zkoušku dokončit. Po pěti úspěšných testech na nižším napětí se může napětí opět postupně zvyšovat na určenou hodnotu.

Poté se pomocí klimatické komory provede zkouška oteplení a ochrany proti přetížení. Po dokončení testů v klimatické komoře a vychladnutí izolace se provede dalších 200 zkoušek elektrické pevnosti se stejnými podmínkami jako při prvním měření.

4.2.2 Zkouška elektrické pevnosti vinutí

Během tohoto měření byla v laboratoři konstantní teplota okolí 22°C. Pro vzorek A bylo od výrobce předepsáno zkušební napětí U_Z 6,1 kV, testovací přístroj Kikusui měl ale rozsah pouze 5 kV. Vzorek B a C měly předepsanou hodnotu zkušebního napětí 5,1 kV. Schéma zapojení testovacího obvodu pro vzorek A vidíme na obrázku *Obr. 4.2*. Testovací přístroj byl u všech transformátorů připojen vždy na svorky s nejvyšším napětím.



Obr. 4.2: Schéma zapojení pro zkoušku elektrické pevnosti vinutí

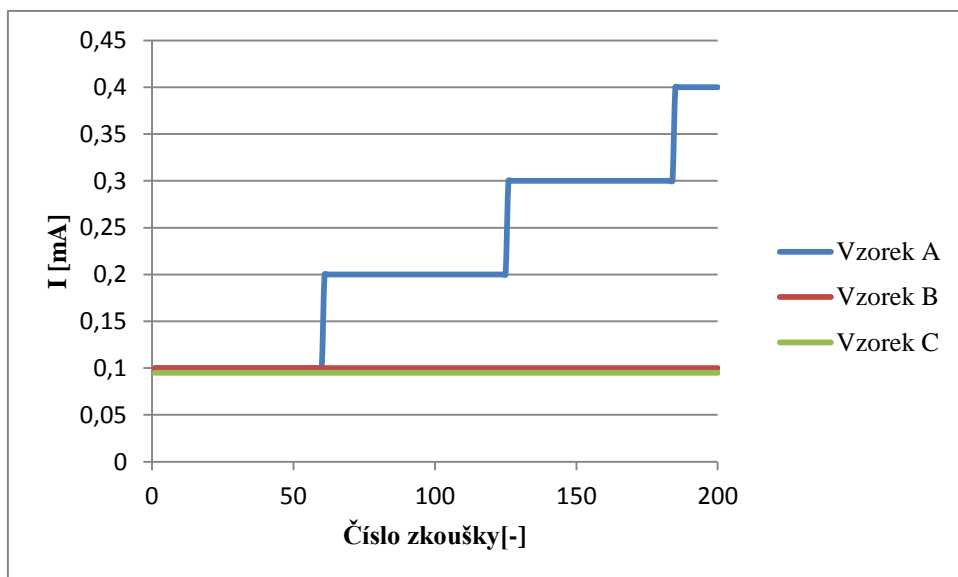
Testovací přístroj a připojení ke svorkám vzorku vidíme na obrázku *Obr. 4.3*.



Obr. 4.34: a) Připojení zkoušeného vzorku b) Testovací přístroj Kikusui

Na přístroji se nastavila amplituda zkušebního napětí (5,1 kV) a doba namáhání (60 s). Konec testu (případně přeskok) byl přístrojem signalizovaný pomocí zvukového signálu.

Každý test se spouštěl manuálně. Příloha obsahuje naměřené hodnoty ke všem vzorkům (obrázky Obr. P.1 – P.7).



Graf 4.1: Naměřený proud v obvodu

Graf 4.1 zobrazuje naměřený proud I v obvodu. Je z něj patrné, že u vzorku A v průběhu měření došlo k postupnému nárůstu proudu z 0,1 mA na 0,4 mA, při měření vzorků B a C zůstala jeho hodnota po celou dobu rovna 0,1 mA. U vzorku A také bylo s rostoucím proudem patrné intenzivnější sršení. Při této zkoušce nedošlo k přeskoku ani u jednoho měřeného transformátoru.

4.2.3 Zkouška oteplení a odolnost proti přetížení

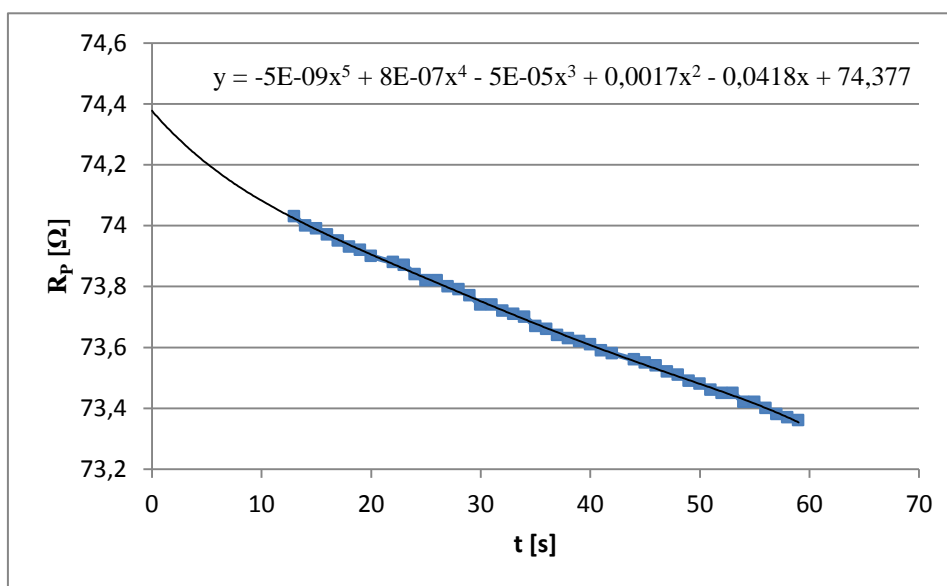
Tyto zkoušky byly provedeny v klimatické komoře na obrázku *Obr. 4.4*. Pro vzorek A je stanovena teplota okolí t_a na 40°C, pro Vzorky B a C 50°C. Data jsou znamenávána přístrojem pro sběr dat Keysight 34972A.



Obr. 4.4: Klimatická komora

Podle třídy izolace (B) je pro všechny vzorky normou [24] určena maximální teplota při zkoušce oteplením na 120°C a při přetížení na 225 °C. Testy jsou popsány v kapitolách 4.1.2 a 4.1.3. Teplota vinutí po oteplovací zkoušce se počítá podle vzorce 4.1.

Hodnota R_2 se určuje následujícím způsobem. Naměřené hodnoty odporů těsně po ukončení zkoušek (v příloze *Tab P.1 – P.3*) se vloží do grafu. Výsledná závislost je aproximována polynomem řádu, který co nejvěrněji kopíruje naměřené hodnoty.



Graf 4.2: Vzorek A – naměřené hodnoty odporu primárního vinutí po zkoušce oteplením

Graf 4.2 zobrazuje závislost odporu primárního vinutí na čase u vzorku A, po zkoušce oteplením. Naměřené hodnoty jsou aproximované polynomem pátého řádu. Po dosazení nuly do jeho předpisu dostáváme hodnotu odporu $R_2 = 74,377 \Omega$. Stejný postup použijeme pro zjištění hodnot odporů u ostatních vzorků, grafy jsou vloženy v příloze (Graf P.1 – P.10). Pro výpočet ještě musíme znát materiál vinutí – u všech vzorků je vinutí z mědi. Ostatní naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce Tab. 4.5.

Tab. 4.5: Naměřené a vypočítané hodnoty pro zkoušku oteplení

	Vzorek A		Vzorek B		Vzorek C	
	Primární vinutí	Sekundární vinutí	Primární vinutí	Sekundární vinutí	Primární vinutí	Sekundární vinutí
t_1 [s]	40	40	50	50	50	50
t_2 [s]	40,4	40,5	49,3	49,6	49,8	49,8
R_1 [Ω]	60,8013	0,1929	38,9997	0,5068	39,3007	0,4604
R_2 [Ω]	74,377	0,235	46,476	0,6045	47,078	0,5077
Δt [$^{\circ}\text{C}$]	60,9	59,4	55,2	55,8	56,5	55,7

Oteplení Δt určíme dosazením do vzorce 4.1:

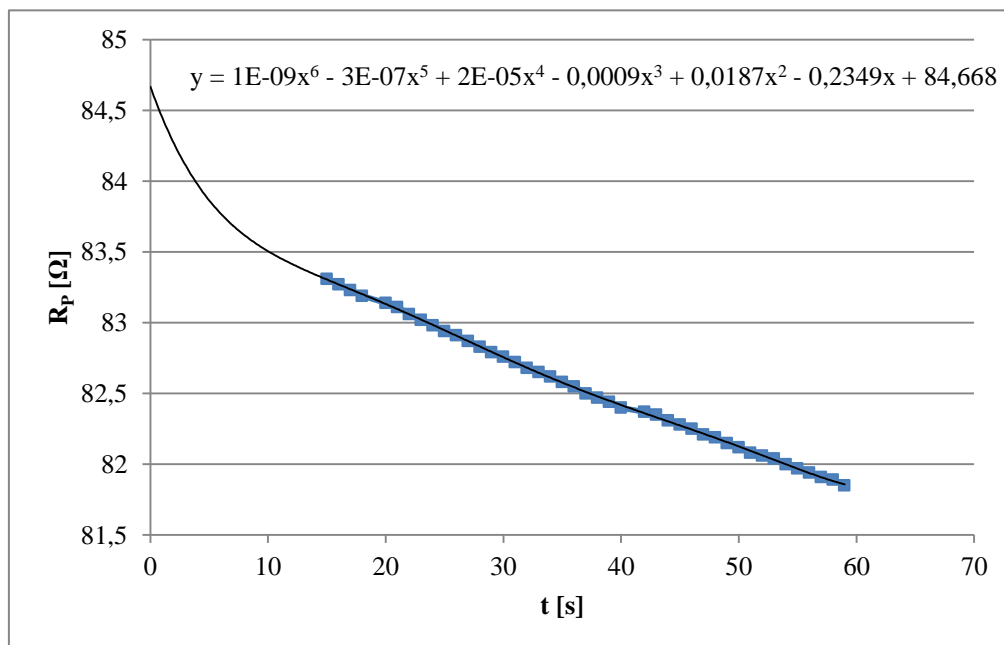
$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (x + t_1) - (t_2 - t_1) = \frac{74,377 - 60,8}{60,8} (234,5 + 40) - (40,4 - 40) = 60,9$$

Po přičtení teploty t_a dostáváme celkové hodnoty oteplení pro všechny vzorky – viz tabulka Tab. 4.6. Žádný vzorek nepřesáhl při oteplení hodnoty $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$, zkouška tedy proběhla úspěšně.

Tab. 4.6: Výsledné hodnoty oteplení Δt

	Vzorek A		Vzorek B		Vzorek C	
	Primární vinutí	Sekundární vinutí	Primární vinutí	Sekundární vinutí	Primární vinutí	Sekundární vinutí
Δt [$^{\circ}\text{C}$]	100,9	99,4	105,2	105,8	106,5	105,7

Po testu odolnosti proti přetížení se při zjišťování hodnot odporů postupovalo obdobně. Graf 4.3 zobrazuje odpor naměřený na primárním vinutí vzorku A po ukončení zkoušky. Naměřené hodnoty jsou aproximované polynomem šestého řádu. Při dosazení nuly do předpisu polynomu dostáváme hodnotu odporu $R_2 = 84,668 \Omega$.



Graf 4.3: Vzorek A - naměřené hodnoty odporu primárního vinutí po přetížení

V tabulce Tab. 4.7 jsou naměřené a vypočítané hodnoty pro přetížení.

Tab. 4.7: Naměřené a vypočítané hodnoty pro přetížení

	Vzorek A		Vzorek B		Vzorek C	
	Primární vinutí	Sekundární vinutí	Primární vinutí	Sekundární vinutí	Primární vinutí	Sekundární vinutí
t_1 [s]	40	40	50	50	50	50
t_2 [s]	41,4	41,4	51,4	51,4	51,3	51,3
R_1 [Ω]	60,8013	0,1929	38,9997	0,5068	39,3007	0,4604
R_2 [Ω]	84,668	0,2642	55,058	0,7153	56,328	0,7288
Δt [$^{\circ}\text{C}$]	106,4	100,1	115,7	115,7	122	122,6

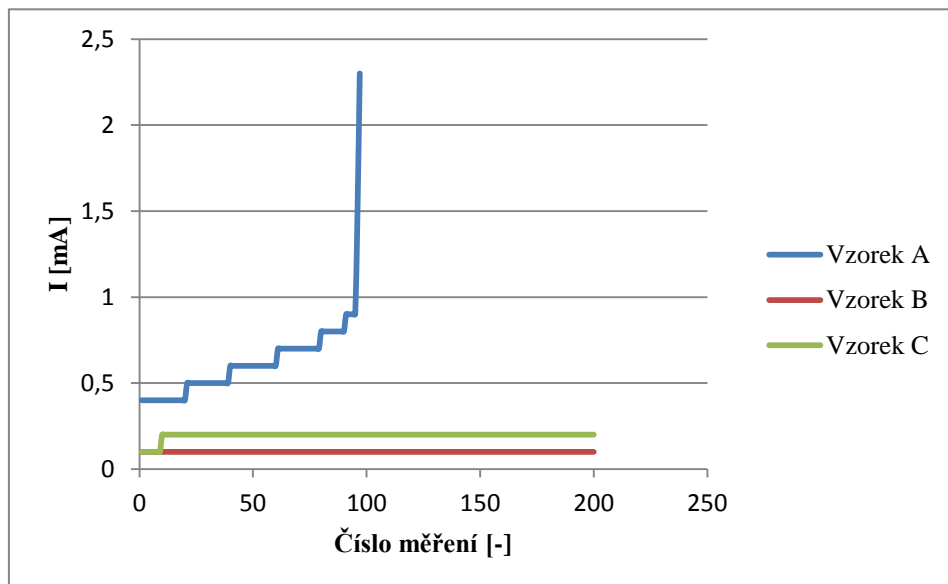
Po přičtení hodnot t_a dostáváme celkové hodnoty přetížení pro všechny vzorky (tabulka Tab. 4.8). Ani jeden nepřekročil limit 225°C .

Tab. 4.8: Výsledné hodnoty oteplení Δt po přetížení

	Vzorek A		Vzorek B		Vzorek C	
	Primární vinutí	Sekundární vinutí	Primární vinutí	Sekundární vinutí	Primární vinutí	Sekundární vinutí
Δt [$^{\circ}\text{C}$]	146,4	140,1	165,7	165,7	172	172,6

4.2.4 Zkouška elektrické pevnosti vinutí po teplotních zkouškách

Teplota okolí při této zkoušce byla 22°C. Z údajů v grafu 4.4 vidíme, že po tepelném namáhání nejhůře dopadl vzorek A. U vzorku B a C se hodnota naměřeného proudu I po celou dobu pohybovala mezi 0,1 mA – 0,2 mA.



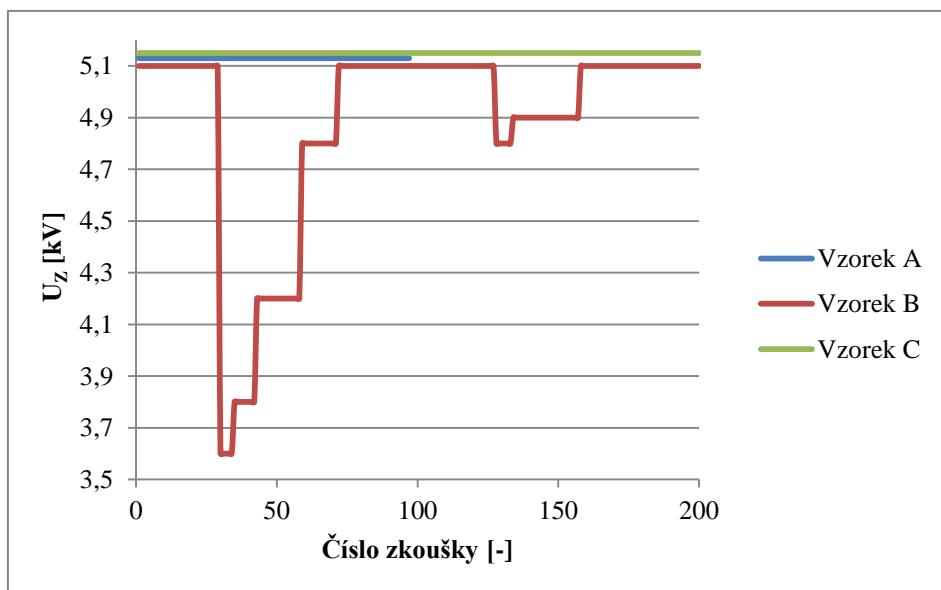
Graf 4.4: Naměřený proud v obvodu po teplotních zkouškách

U vzorku A jsem pozoroval postupný nárůst proudu po každých 10 – 15 měřeních. Od 90. do 95. zkoušky měl proud hodnotu 0,9 mA. Při 96. zkoušce došlo k prvnímu přeskoku, 27 sekund od spuštění testu. Proud v obvodu byl 1,5 mA. Další zkouška skončila přeskokem po 13 sekundách s hodnotou proudu 2,3 mA. Zkouška číslo 98 byla prakticky okamžitě ukončena hlasitým prasknutím. Zanedlouho se dostavil zápach spálené izolace. V testech nebylo možné pokračovat, v izolaci se vytvořil vodivý kanál.



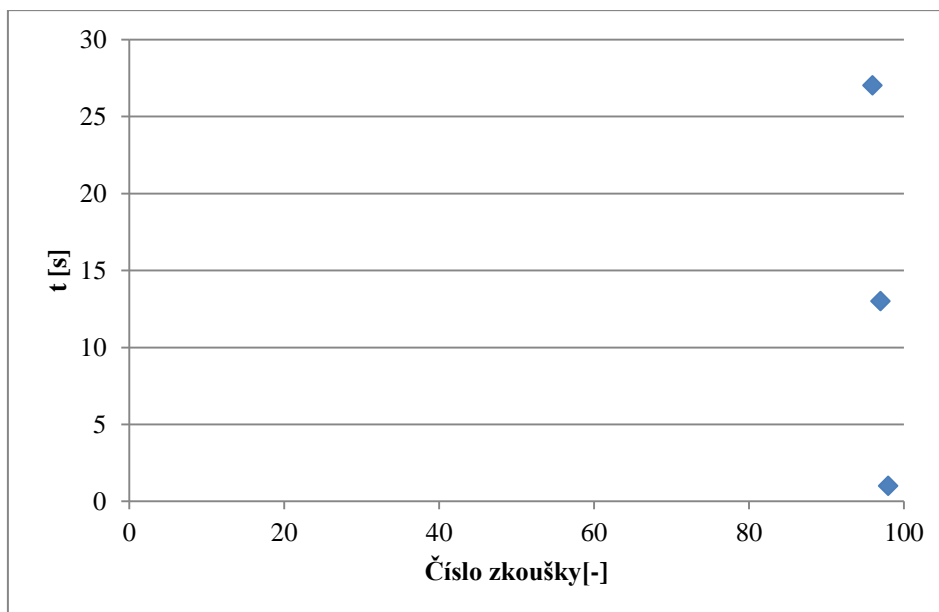
Obr. 4.5: Displej měřícího přístroje po průrazu izolace

Obrázek *Obr. 4.5* zobrazuje displej měřicího přístroje při pokusu provést další zkoušku. Napětí jsem nastavil na nulu a proud v obvodu byl 23,5 mA už při 40 V.



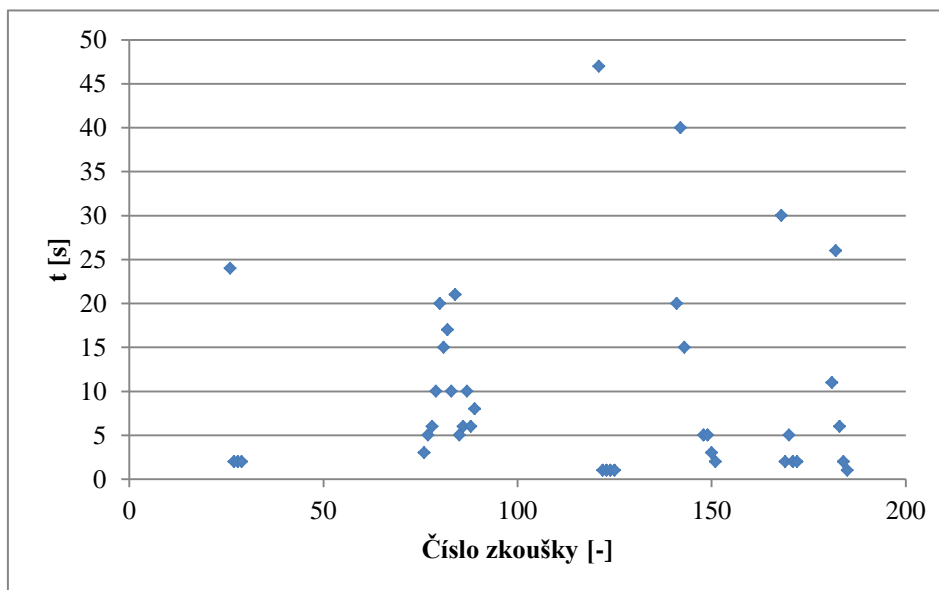
Graf 4.5: Zkušební napětí vzorků po teplotních zkouškách

U vzorků B a C k průrazu izolace nedošlo, ale přeskoky se objevovaly. Jak je patrné z *grafu 4.5*, u vzorku B se přikročilo ke snižování zkušebního napětí. Vzorky A a C během zkoušek zkušební napětí snížit nepotřebovaly. U vzorku B došlo při 26. zkoušce k přeskoku a od 30. testu bylo nutné snížit napětí na 3,6 kV, aby se v měření mohlo pokračovat. Od 35. zkoušky se napětí zvýšilo na 3,8 kV, poté od 45. na 4,2 kV, od 59. na 4,8 kV a zpět na 5,1 kV se dostalo od 74. zkoušky. K dalšímu snížení (na 4,8 kV) se přistoupilo při 128. zkoušce. Od 135. zkoušky se napětí navýšilo na 4,9 kV a od 158. zpět na 5,1 kV.



Graf 4.6: Vzorek A – četnost přeskoků

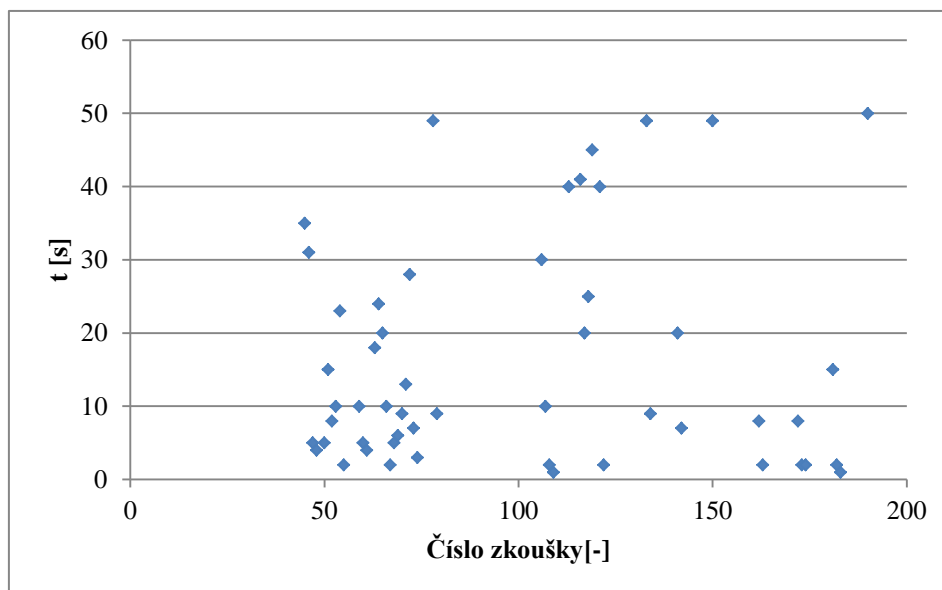
Graf 4.6 zobrazuje závislost času od začátku zkoušky, při kterém došlo k průrazu, a čísla zkoušky pro vzorek A. U toho po celou dobu měření nedošlo k přeskokům, vidíme pouze 3 incidenty, z toho poslední způsobil průraz izolace.



Graf 4.7: Vzorek B – četnost přeskoků

Z grafu 4.7, který ukazuje závislost času od začátku zkoušky, při kterém došlo k průrazu, a čísla zkoušky pro vzorek B vidíme, že zde je četnost přeskoků vyšší. Dále je z něj patrné, že k většině přeskoků dochází v prvních 30 sekundách zkoušky. Během 200 zkoušek došlo k 41 přeskokům, z toho k sedmi při sníženém napětí (4,9 kV). Při porovnání údajů o zkušebním napětí a přeskocích zjistíme, že nejvíce přeskoků za sebou (14 zkoušek

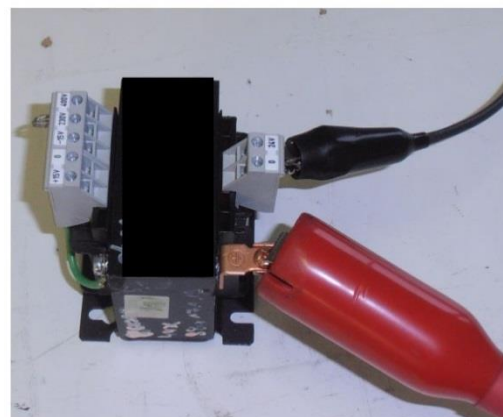
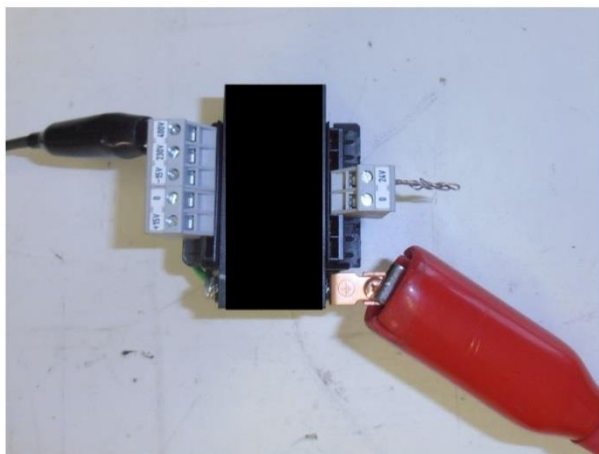
v řadě) bylo zaznamenáno po návratu zkušebního napětí na hodnotu 5,1 kV (po prvním snižování na 3,6 kV).



Graf 4.8 Vzorek C – četnost přeskoků

Z grafu 4.8, zobrazujícím závislost času od začátku zkoušky, při kterém došlo k průrazu, a čísla zkoušky pro vzorek C je vidět, že k většině přeskoků došlo během prvních 30 sekund zkoušek. Počet přeskoků byl 53. Při měření vzorku B všechny zkoušky proběhly v jeden den. U vzorku C se polovina testů provedla po oteplovací zkoušce, druhá polovina o měsíc později. Cílem toho pokusu bylo zjistit, zda dojde k regeneraci izolace v průběhu času. Během prvních 96 testů (po zkoušce oteplení) došlo k 27 přeskokům a při zbylých 104 zkouškách k 26 přeskokům. Ponechání transformátoru delší dobu v klidu nemá podle tohoto měření vliv na obnovení izolačních vlastností. Za pozornost stojí fakt, že při první polovině zkoušek došlo ke všem přeskokům mezi 45. a 78. testem, v druhé polovině měření jsou tyto incidenty rovnoměrněji rozloženy do všech 104 testů.

U vzorků transformátorů B a C byla po oteplovacích testech provedeno zkouška elektrické pevnosti mezi kostrou a primárním vinutím a mezi kostrou a sekundárním vinutím. Připojení svorek pro toto měření je vyobrazeno na obrázku *Obr. 4.6*. Toto měření má od výrobce určené zkušební napětí 3,2 kV AC. Obě zkoušky byly pro vzorky B a C provedeny desetkrát. K přeskočení ani průrazu izolace nedošlo, proud v obvodu se u obou transformátorů pohyboval mezi 0,1 mA a 0,2 mA.



*Obr. 4.65: a) Zapojení pro zkoušku elektrické pevnosti primární vinutí – kostra
b) Zapojení pro zkoušku elektrické pevnosti sekundárního vinutí – kostra*

Závěr

Tato práce se zabývala výzkumem vlivu typových zkoušek na elektrickou pevnost vinutí transformátoru. Je v ní uveden princip funkce transformátoru a jeho hlavní části. Dále se zkoumají dopady různých faktorů na degradaci izolačního systému, který se u transformátorů skládá z papíru a oleje. Nejvýznamněji k zhoršování izolačních vlastností přispívá teplota, mezi další nepříznivé vlivy patří vlhkost, kyselina, oxidace nebo částečné výboje. Pokusy analyzované v kapitole 3 ukazují, že namáhání izolace teplotou a vysokým napětím zrychluje její stárnutí a snižuje izolační schopnosti.

Náplní praktické části bylo experimentální měření tří transformátorů ze dvou typových řad. Označeny byly vzorek A - první typová řada, vzorek B a vzorek C - oba druhá typová řada. U každého transformátoru byla nejprve 200x provedena typová zkouška elektrické pevnosti. Vzorek A vykazoval v průběhu měření mírný nárůst proudu v obvodu (z 0,1 mA na 0,4 mA), u dvou ostatních vzorků zůstal proud po celou dobu měření beze změny (0,1 mA). K přeskoku ani průrazu při těchto zkouškách nedošlo.

Po oteplovacím testu, kterým všechny vzorky úspěšně prošly, se zkouška elektrické pevnosti opakovala. Opět byla provedena 200x.

U vzorku A nadále narůstal procházející proud, v tomto případě z 0,4 mA na začátku měření k 0,9 mA u 90. testu. Během pokusu číslo 96 a 97 pokusu došlo k přeskoku, při 98. zkoušce k průrazu izolace a vytvoření vodivého kanálu.

Vzorek B měl po celou dobu testování konstantní proud v obvodu 0,1 mA. Celkem bylo zaznamenáno 41 přeskoků, většina v prvních 30 sekundách testu. Od pokusu číslo 30 do pokusu číslo 74 a poté od 128. do 158. zkoušky se snížilo zkušební napětí U_z , aby bylo možné v měření pokračovat. Jinak docházelo k přeskoku okamžitě po spuštění testu. K průrazu izolace u tohoto transformátoru nedošlo.

Měření vzorku A i B proběhlo vždy v jeden den. U vzorku C se postupovalo následovně. Polovina testů byla provedena bezprostředně po zkoušce oteplením a druhá část o měsíc později. Zjišťovala se tak možnost regenerace izolace v čase. Po deseti měřeních u vzorku C došlo k nárůstu proudu z 0,1 mA na 0,2 mA. Na této hodnotě zůstal až do konce měření. Počet přeskoků u tohoto vzorku byl 53. Během prvních 96 měření 27 případů a u zbylých 104 dalších 26. Regenerace izolace v čase prokázána nebyla, průraz izolace nenastal.

U vzorku C jsou horší výsledky měření po oteplovací zkoušce (větší proud, více přeskoků), než u vzorku B ze stejné typové řady. Tento výsledek přisuzuji vyšší maximální

teplotě vinutí při oteplovací zkoušce u vzorku C (106,2 °C) oproti vzorku B (105,2 °C).

Hlavním činitelem způsobujícím degradaci izolace bylo teplotní namáhání. Potvrzují se tak teoretické předpoklady, že teplota negativně ovlivňuje izolační vlastnosti materiálů. Při druhé zkoušce elektrické pevnosti došlo u každého vzorku k odlišným incidentům (průraz izolace, nutnost snižování zkušebního napětí), proto doporučuji se této problematice nadále věnovat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] WINDERS, John J. *Power Transformers Principles and Applications*. Allentown, Pennsylvania: Marcel Dekker, 2002, 286 s. ISBN 0-8247-0766-4.
- [2] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [3] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [4] HEATHCOTE, Martin J. *A practical technology of the power transformer*. 13th ed. Amsterdam: Elsevier, 2007. ISBN 978-075-0681-643.
- [5] Electronics Tutorials. *Transformer Basics and Transformer Principles* [online]. 2019 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.electronicstutorials.ws/transformer/transformer-basics>.
- [6] EL-PRO-CUS. *Everything You Need to Know About Transformers & Their Functioning* [online]. 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/working-procedure-on-how-do-transformers-work/>
- [7] DE KOCK, Jan a Kobus STRAUSS. *Practical Power Distribution for Industry*. Amsterdam: Elsevier, 2004, 192s. ISBN 978-0-7506-6396-0.
- [8] Voltech Instruments. *Basic Transformer Theory* [online]. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: https://www.voltech.com/Articles/086-627/001/1_1_Basic_Transformer_Theory
- [9] ČSN EN 60270 (345641). *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů*. Praha, Český normalizační institut, 2001.
- [10] TRNKA, Pavel a Radek POLANSKÝ. *Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír*. Elektro scope [online]. 2007, roč. 2007, č. 1, s. 5 [cit. 2020-04-05]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: http://147.228.94.30/index.php?option=com_content&view=article&id=76:tepelne-starnuti-izolaniho-systemu-olej-papir&catid=8:islo-1&Itemid=3
- [11] ESB Elektrické stroje. *Regenerace olejů* [online]. 2009 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <http://www.esb-bez.cz/upload/File/regenerace-transformatorovych-a-turbinovych-oleju.pdf>
- [12] Energetika a tepelná technika REVOS. *Regenerace transformátorových olejů* [online]. 2012 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <http://www.revos.cz/sluzby-pro>

- energetiku/transformatory/regenerace-transformatorovych-oleju
- [13] KALABZA, Josef. *Degradace izolačního systému transformátoru*. Plzeň, 2012, 51 s. Bakalářská. FEL ZČU Plzeň.
- [14] BUREŠ, Pavel. *Elektroizolační oleje* [online]. 2015 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektroizolacni-oleje.html>
- [15] TESTGUY. *Transformer Cooling Systems and Methods Explained* [online]. 2015 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://testguy.net/content/184-Transformer-Cooling-Systems-and-Methods>
- [16] ČEPS, A.S. *Údaje o PS* [online]. 2015 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>
- [17] U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. *Transformers: Basics, Maintenance, and Diagnostics*. Denver, Colorado: Technical Service Center, 2005.
- [18] S. P. BALAJI, I. P. M. SHEEMA, G. KRITHIKA a S. USA, Effect of Repeated Impulses on Transformer Insulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Tamil Nadu, 2011, s. 2069-2073.
- [19] S. P. BALAJI, L. LAVANYA a S. USA, Effect of repeated impulses on OIP, *2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Shanghai, 2012, s. 558-561.
- [20] Y. LI, Z. WU, a CHENGRONG LI, "Insulation performance of aging transformer winding under transient impulse," *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Manchester, 2017, s 1-4.
- [21] Huize, CUI, "Effect of Temperature and Pre-stressed Voltage on Breakdown of Oil-Impregnated Paper," *2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Perth, WA, 2018, s. 1-5.
- [22] ELPRO - ENERGO S.R.O. *Olej - Olejové transformátory* [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/olej/>
- [23] BASEKO, S.R.O. *Mobilní zařízení na filtraci použitého oleje*. [online]. [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: https://www.ehydraulika.cz/hydraulika_cz/eshop/18-1-Zarizeni-na-filtraci-oleje/0/5/288-Filtracni-stanice-SE300-Mobile
- [24] ČSN EN 61558-1 (351330) ed. 2. *Bezpečnost výkonových transformátorů, napájecích zdrojů a podobně - Část 1: Všeobecné požadavky a zkoušky*. Praha, Český normalizační institut, 2006.

Přílohy

Tab. P 1: Naměřené hodnoty odporů po zkoušce oteplením a přetěžování – vzorek A

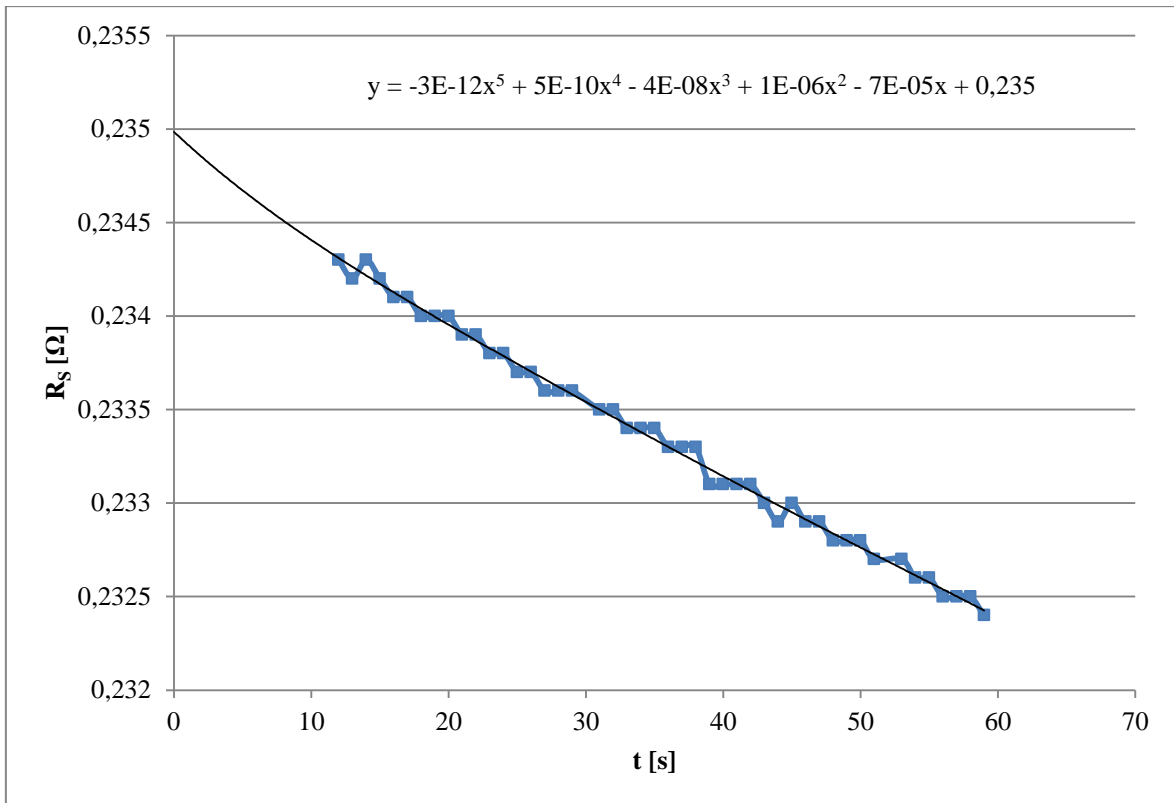
Zkouška oteplení				Přetížení			
t [s]	R _P [Ω]	t [s]	R _S [Ω]	t [s]	R _P [Ω]	t [s]	R _S [Ω]
13	74,03	12	0,2343	15	83,31	64	0,259
14	74	13	0,2342	16	83,27	65	0,259
15	73,99	14	0,2343	17	83,23	66	0,2589
17	73,95	16	0,2341	20	83,14	68	0,2587
18	73,93	17	0,2341	21	83,11	69	0,2586
19	73,92	18	0,234	22	83,06	70	0,2585
20	73,9	19	0,234	23	83,02	71	0,2584
22	73,88	20	0,234	24	82,98	72	0,2583
23	73,87	21	0,2339	25	82,94	74	0,2582
24	73,84	22	0,2339	26	82,91	75	0,2581
25	73,82	23	0,2338	27	82,87	76	0,258
26	73,82	24	0,2338	28	82,83	77	0,2579
27	73,8	25	0,2337	29	82,79	78	0,2578
28	73,79	26	0,2337	30	82,76	80	0,2577
29	73,77	27	0,2336	31	82,72	82	0,2575
30	73,74	28	0,2336	32	82,68	83	0,2574
32	73,72	29	0,2336	33	82,65	84	0,2573
33	73,71	31	0,2335	35	82,58	85	0,2572
34	73,7	32	0,2335	36	82,55	87	0,2571
35	73,67	33	0,2334	37	82,5	88	0,2569
36	73,66	34	0,2334	38	82,47	90	0,2568
37	73,64	35	0,2334	39	82,44	92	0,2567
38	73,63	36	0,2333	40	82,4	94	0,2565
39	73,62	37	0,2333	42	82,37	95	0,2564
40	73,61	38	0,2333	43	82,35	96	0,2563
41	73,59	39	0,2331	44	82,31	98	0,2562
42	73,58	41	0,2331	45	82,28	99	0,2561
44	73,56	42	0,2331	46	82,25	100	0,256
45	73,55	43	0,233	47	82,21	101	0,2559
46	73,54	44	0,2329	48	82,19	103	0,2558
47	73,52	45	0,233	49	82,15	104	0,2557
48	73,51	46	0,2329	50	82,12	105	0,2556
49	73,49	47	0,2329	51	82,08	106	0,2555
50	73,48	49	0,2328	52	82,06	107	0,2554
51	73,46	50	0,2328	53	82,04	108	0,2553
53	73,45	53	0,2327	54	82	111	0,2552
55	73,42	54	0,2326	55	81,97	112	0,2551
56	73,4	55	0,2326	56	81,94	113	0,255
58	73,37	58	0,2325	58	81,89	116	0,2548
59	73,36	59	0,2324	59	81,85	117	0,2547

Tab. P 2: Naměřené hodnoty odporů po zkoušce oteplením a přetěžování – vzorek B

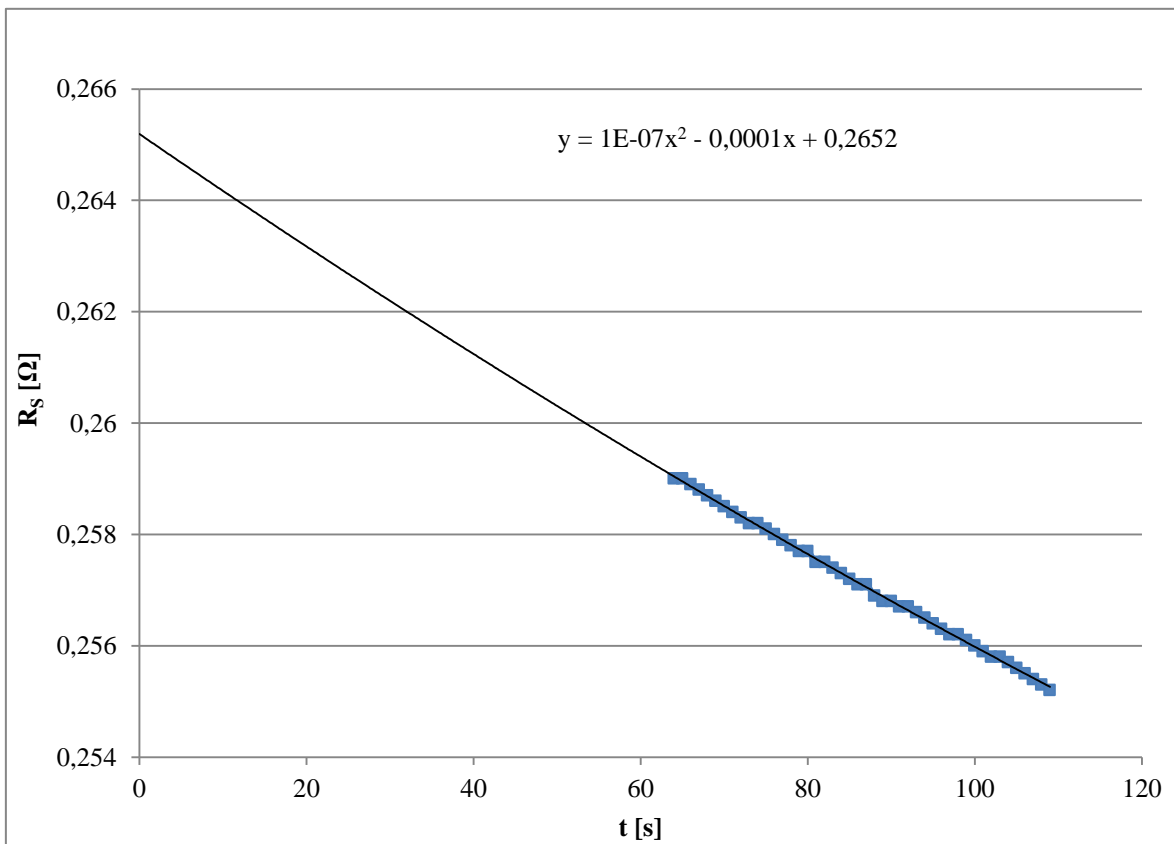
Zkouška oteplení				Přetížení			
t [s]	R _p [Ω]	t [s]	R _s [Ω]	t [s]	R _p [Ω]	t [s]	R _s [Ω]
12	46,2	13	0,603	16	54,41	64	0,6983
13	46,2	14	0,6029	17	54,35	65	0,6979
14	46,18	15	0,6028	18	54,33	66	0,6976
16	46,17	16	0,6026	19	54,32	67	0,6973
17	46,15	17	0,6025	20	54,3	68	0,697
18	46,13	18	0,6024	21	54,26	70	0,6964
19	46,13	19	0,6022	22	54,22	71	0,6961
20	46,13	20	0,6021	23	54,2	73	0,6955
21	46,12	22	0,602	24	54,17	74	0,6953
22	46,1	23	0,6018	25	54,14	76	0,6947
23	46,1	24	0,6017	26	54,1	77	0,6944
24	46,09	25	0,6016	27	54,08	79	0,6938
25	46,08	26	0,6016	29	54,06	80	0,6935
26	46,07	27	0,6013	30	54,02	81	0,6933
27	46,05	29	0,6012	31	54	82	0,6929
28	46,03	30	0,6011	32	53,97	83	0,6927
29	46,05	31	0,6009	33	53,95	85	0,6921
30	46,02	32	0,6008	34	53,92	86	0,6918
31	46,02	33	0,6007	35	53,9	87	0,6915
32	46,02	34	0,6006	36	53,88	89	0,691
33	45,99	35	0,6004	37	53,85	90	0,6907
34	46	36	0,6003	38	53,83	91	0,6904
35	45,98	37	0,6002	39	53,8	92	0,6902
36	45,97	38	0,6001	40	53,77	93	0,69
38	45,96	39	0,6	41	53,75	95	0,6894
39	45,94	40	0,5999	42	53,73	96	0,6891
41	45,95	41	0,5998	43	53,68	97	0,6888
42	45,93	42	0,5997	44	53,68	98	0,6886
44	45,92	44	0,5996	45	53,67	99	0,6884
45	45,91	45	0,5995	46	53,63	100	0,6881
46	45,9	46	0,5994	47	53,61	101	0,6879
48	45,88	47	0,5993	48	53,58	103	0,6873
50	45,87	49	0,5991	49	53,54	104	0,6871
51	45,86	50	0,599	51	53,54	105	0,6868
52	45,85	51	0,5988	52	53,52	106	0,6865
53	45,84	53	0,5986	53	53,48	108	0,6861
54	45,83	54	0,5985	54	53,47	109	0,6858
55	45,82	55	0,5984	55	53,44	111	0,6853
56	45,82	56	0,5983	56	53,42	112	0,6851
57	45,81	57	0,5982	57	53,4	114	0,6845
60	45,79	59	0,598	59	53,37	117	0,6839

Tab. P 3: Naměřené hodnoty odporů po zkoušce oteplením a přetěžování – vzorek C

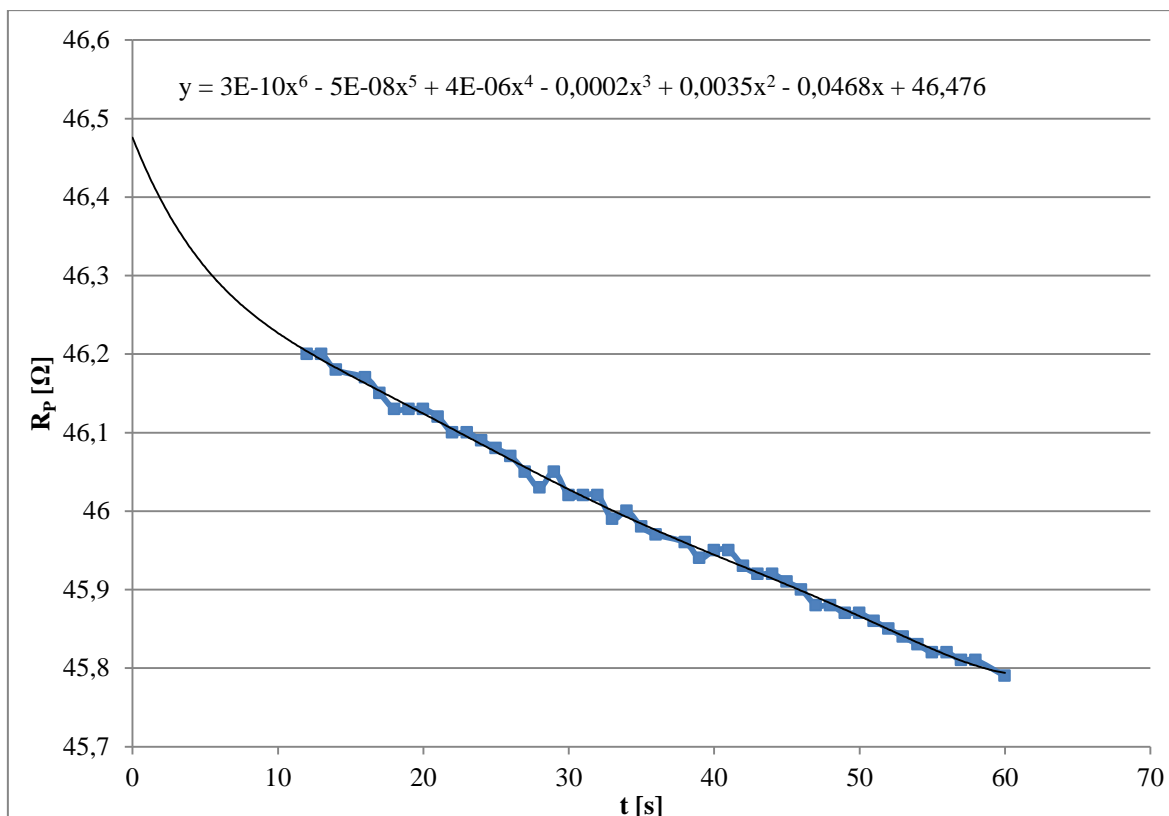
Zkouška oteplení				Přetíženi			
t [s]	R _p [Ω]	t [s]	R _s [Ω]	t [s]	R _p [Ω]	t [s]	R _s [Ω]
13	46,94	64	0,6005	17	55,23	64	0,7099
14	46,91	65	0,6005	18	55,19	65	0,7095
15	46,91	66	0,6004	19	55,16	66	0,7092
16	46,89	67	0,6002	20	55,13	67	0,7088
17	46,89	69	0,6001	21	55,09	68	0,7085
18	46,87	70	0,6	22	55,07	69	0,7082
20	46,86	71	0,5998	23	55,03	71	0,7075
21	46,85	72	0,5997	24	54,99	73	0,7068
22	46,83	74	0,5996	25	54,98	74	0,7066
23	46,84	75	0,5995	26	54,95	76	0,7058
24	46,83	76	0,5994	27	54,91	77	0,7056
25	46,81	77	0,5993	28	54,9	79	0,7049
26	46,81	79	0,5992	29	54,85	80	0,7046
27	46,79	80	0,599	30	54,83	81	0,7043
28	46,78	81	0,5989	31	54,81	82	0,704
29	46,77	82	0,5988	32	54,79	83	0,7036
30	46,76	83	0,5987	33	54,76	85	0,703
31	46,75	84	0,5986	34	54,72	86	0,7027
33	46,73	85	0,5985	35	54,7	87	0,7024
34	46,72	86	0,5984	36	54,67	88	0,7021
35	46,71	87	0,5983	38	54,66	89	0,7019
36	46,7	88	0,5982	39	54,62	90	0,7015
37	46,69	89	0,5981	40	54,6	91	0,7012
38	46,68	90	0,598	41	54,57	92	0,7009
39	46,67	91	0,5979	42	54,55	94	0,7003
40	46,67	92	0,5978	43	54,52	95	0,7
42	46,65	93	0,5977	44	54,5	96	0,6997
43	46,65	95	0,5975	45	54,47	98	0,6992
44	46,64	96	0,5974	46	54,45	99	0,6988
46	46,63	97	0,5973	47	54,42	100	0,6986
47	46,6	99	0,5971	48	54,39	101	0,6983
48	46,61	100	0,597	49	54,37	102	0,698
49	46,6	102	0,5968	50	54,35	104	0,6974
50	46,59	103	0,5967	51	54,33	105	0,6971
51	46,58	105	0,5965	52	54,32	107	0,6966
52	46,57	107	0,5963	53	54,28	108	0,6963
53	46,55	109	0,5962	54	54,26	109	0,696
54	46,54	111	0,596	55	54,23	111	0,6954
55	46,55	113	0,5958	56	54,22	112	0,6952
56	46,53	114	0,5957	57	54,16	113	0,6949
58	46,52	116	0,5956	58	54,19	115	0,6944



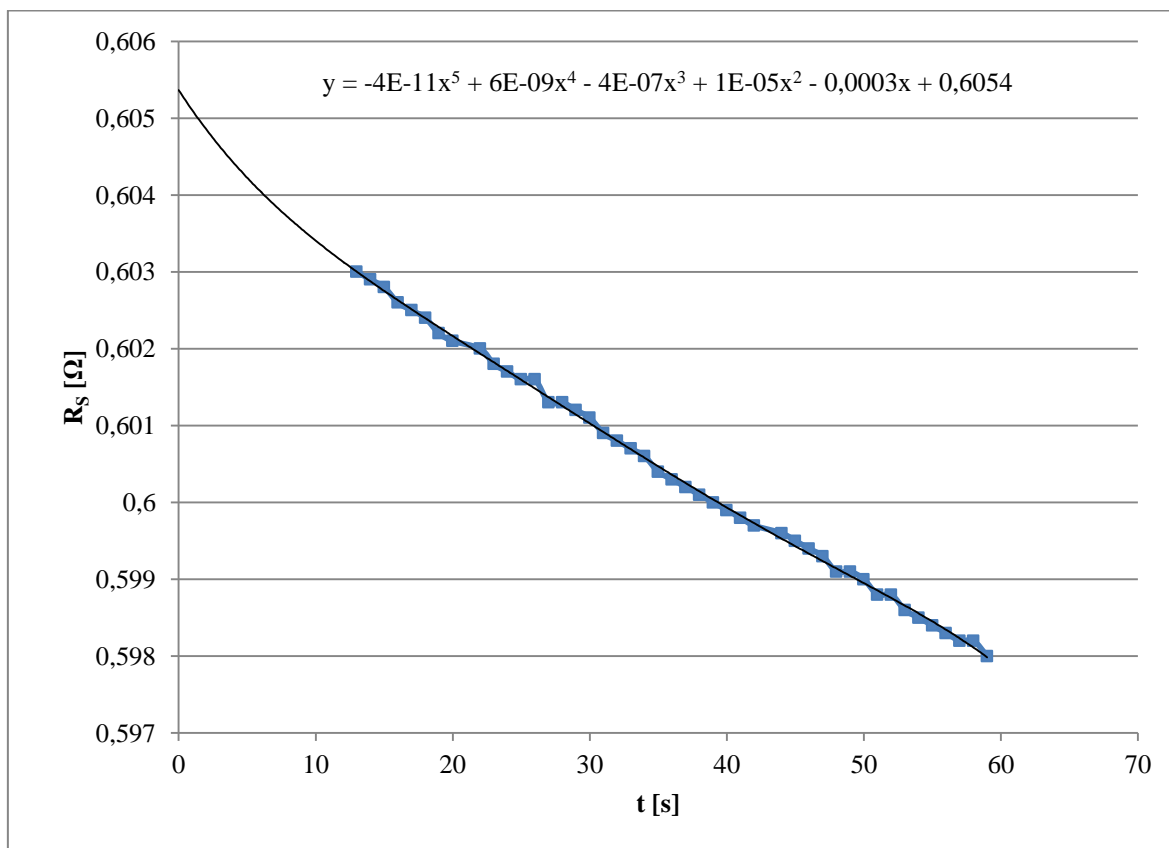
Graf P. 1: Vzorek A – naměřené hodnoty odporu sekundárního vinutí po zkoušce oteplením



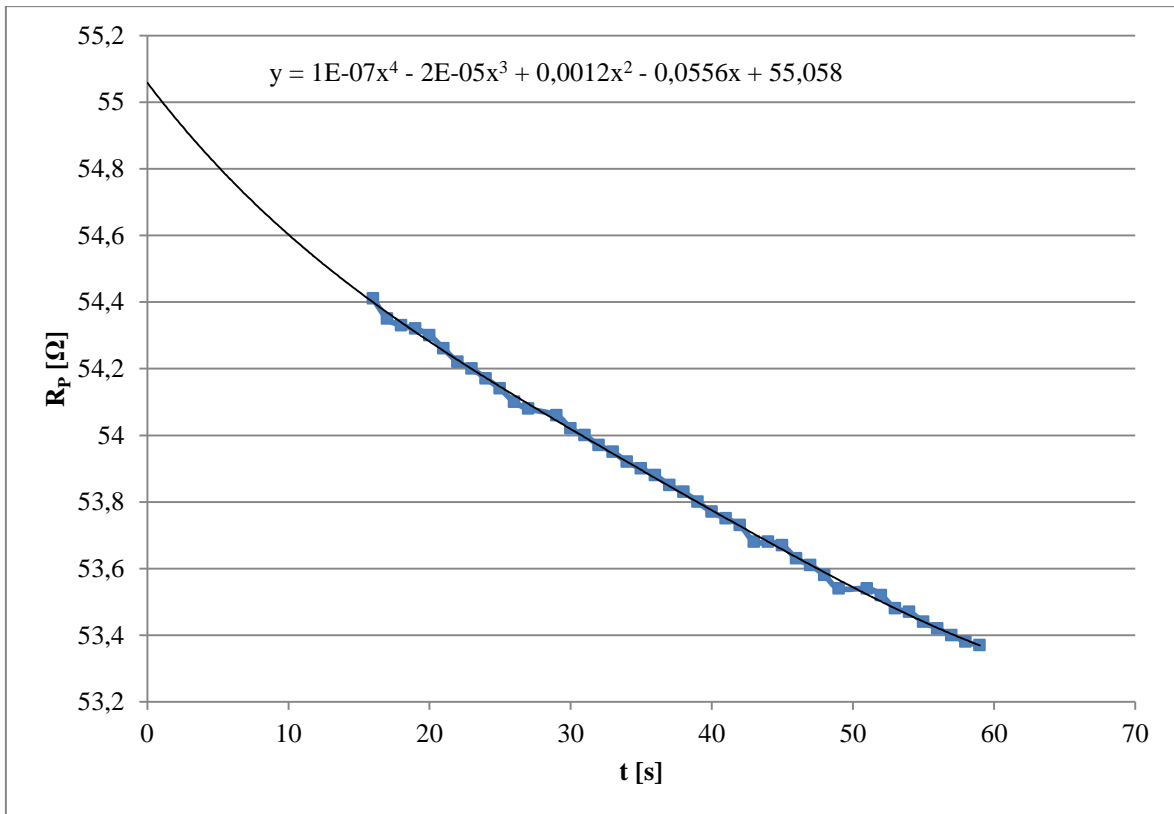
Graf P. 2: Vzorek A – naměřené hodnoty odporu sekundárního vinutí po přetížení



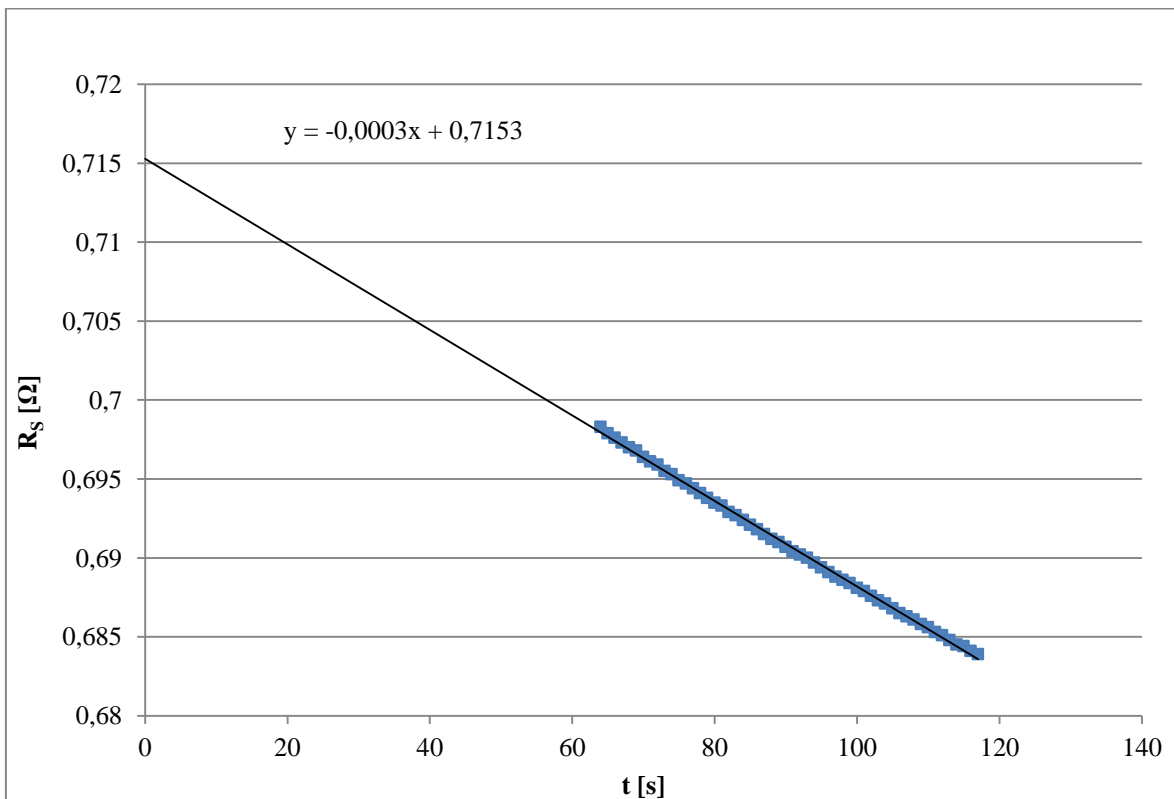
Graf P. 3: Vzorek B – naměřené hodnoty odporu primárního vinutí po zkoušce oteplením



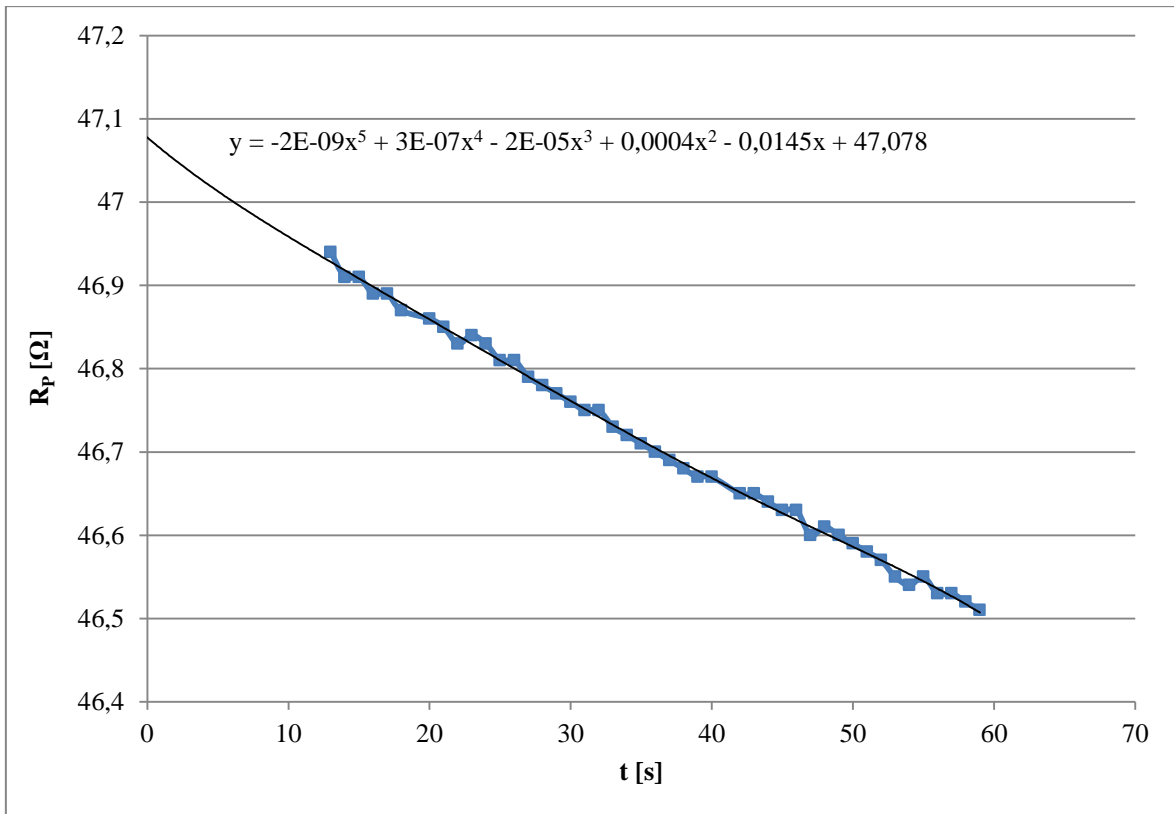
Graf P. 4: Vzorek B – naměřené hodnoty odporu sekundárního vinutí po zkoušce oteplením



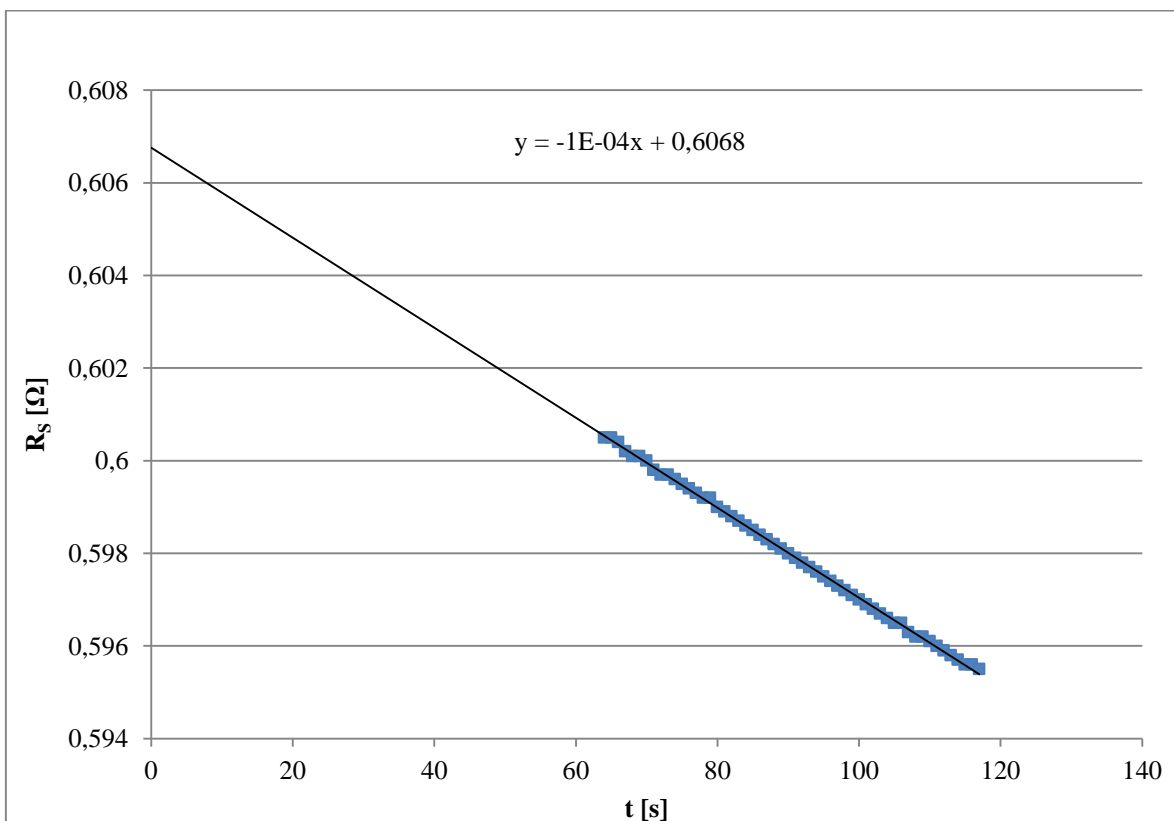
Graf P. 5: Vzorek B – naměřené hodnoty odporu primárního vinutí po přetížení



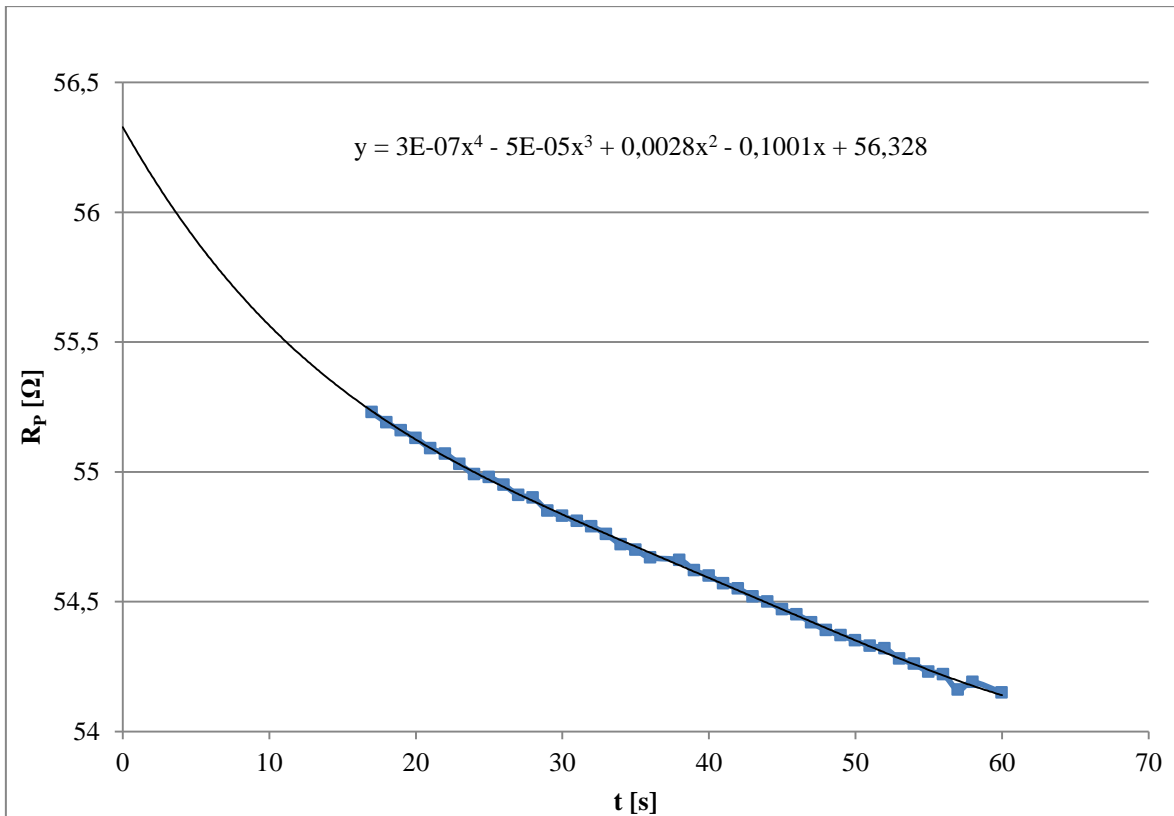
Graf P. 6: Vzorek B – naměřené hodnoty odporu sekundárního vinutí po přetížení



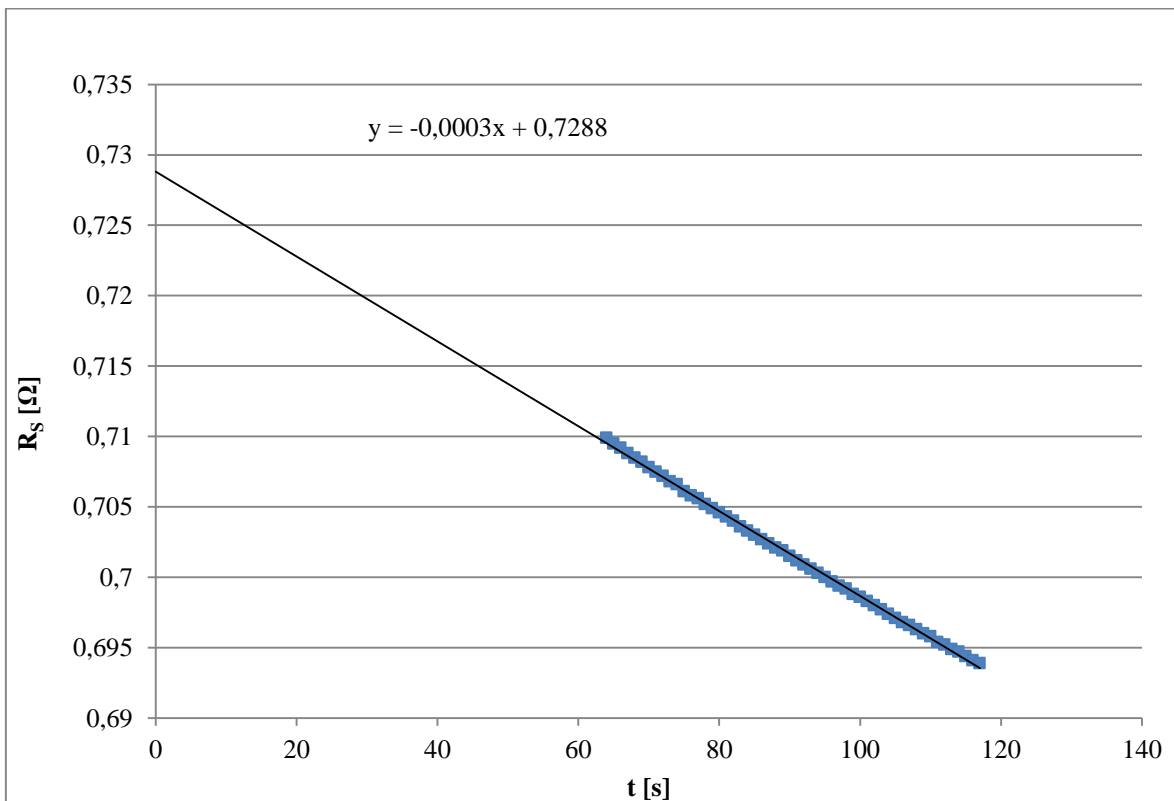
Graf P. 7: Vzorek C – naměřené hodnoty odporu primárního vinutí po zkoušce oteplením



Graf P. 8: Vzorek C – naměřené hodnoty odporu sekundárního vinutí po zkoušce oteplením



Graf P. 9: Vzorek B – naměřené hodnoty odporu primárního vinutí po přetížení



Graf P. 10: Vzorek C – naměřené hodnoty odporu sekundárního vinutí po přetížení

8.11.2018 - VZOREK A - 51 kV AC

1 - - 0,1 mA	51 - -	101 - -	151 - -
2 - -	52 - -	102 - -	152 - - 17.1.2019
3 - -	53 - -	103 - -	153 - -
4 - -	54 - -	104 - -	154 - -
5 - -	55 - -	105 - -	155 - -
6 - -	56 - -	106 - -	156 - -
7 - -	57 - -	107 - -	157 - -
8 - -	58 - -	108 - -	158 - -
9 - -	59 - -	109 - -	159 - -
10 - - 0,1 mA	60 - - 0,1 mA	110 - - 0,2 mA	160 - - 0,3 mA
11 - -	61 - -	111 - -	161 - -
12 - -	62 - -	112 - -	162 - -
13 - -	63 - -	113 - -	163 - -
14 - -	64 - -	114 - -	164 - -
15 - -	65 - - <i>světelní</i>	115 - -	165 - -
16 - -	66 - -	116 - -	166 - -
17 - -	67 - -	117 - -	167 - -
18 - -	68 - -	118 - -	168 - -
19 - -	69 - -	119 - -	169 - -
20 - - 0,1 mA	70 - - 0,2 mA	120 - - 0,2 mA	170 - - 0,3 mA
21 - -	71 - -	121 - -	171 - -
22 - -	72 - -	122 - -	172 - -
23 - -	73 - -	123 - -	173 - -
24 - -	74 - -	124 - -	174 - -
25 - -	75 - -	125 - -	175 - -
26 - -	76 - -	126 - -	176 - -
27 - -	77 - -	127 - -	177 - -
28 - -	78 - -	128 - -	178 - -
29 - -	79 - -	129 - -	179 - -
30 - - 0,1 mA	80 - - 0,2 mA	130 - - 0,3 mA	180 - - 0,3 mA
31 - -	81 - -	131 - -	181 - -
32 - -	82 - -	132 - -	182 - -
33 - -	83 - -	133 - -	183 - -
34 - -	84 - -	134 - -	184 - -
35 - -	85 - -	135 - -	185 - -
36 - -	86 - -	136 - -	186 - -
37 - -	87 - -	137 - -	187 - -
38 - -	88 - -	138 - -	188 - -
39 - -	89 - -	139 - -	189 - -
40 - - 0,1 mA	90 - - 0,2 mA	140 - - 0,3 mA	190 - - 0,4 mA
41 - -	91 - -	141 - -	191 - -
42 - -	92 - -	142 - -	192 - -
43 - -	93 - -	143 - -	193 - -
44 - -	94 - -	144 - -	194 - -
45 - -	95 - -	145 - -	195 - -
46 - -	96 - -	146 - -	196 - -
47 - -	97 - -	147 - -	197 - -
48 - -	98 - -	148 - -	198 - -
49 - -	99 - -	149 - -	199 - -
50 - - 0,1 mA	100 - - 0,2 mA	150 - - 0,3 mA	200 - - 0,4 mA

Obr. P. 1: Výsledky zkoušky elektrické pevnosti - vzorek A

7-2-2019 - VZOREK A (PO TĚPLOTNÍM TESTU) - 5,19kV AC

1 - - 0,4 mA	51 - -	101 -	151 -
2 - -	52 - -	102 -	152 -
3 - -	53 - -	103 -	153 -
4 - -	54 - -	104 -	154 -
5 - -	55 - -	105 -	155 -
6 - -	56 - -	106 -	156 -
7 - -	57 - -	107 -	157 -
8 - -	58 - -	108 -	158 -
9 - -	59 - -	109 -	159 -
10 - - 0,9 mA	60 - - 0,7 mA	110 -	160 -
11 - -	61 - -	111 -	161 -
12 - -	62 - -	112 -	162 -
13 - -	63 - -	113 -	163 -
14 - -	64 - -	114 -	164 -
15 - -	65 - -	115 -	165 -
16 - -	66 - -	116 -	166 -
17 - -	67 - -	117 -	167 -
18 - -	68 - -	118 -	168 -
19 - -	69 - -	119 -	169 -
20 - - 0,5 mA	70 - - 0,7 mA	120 -	170 -
21 - -	71 - -	121 -	171 -
22 - -	72 - -	122 -	172 -
23 - -	73 - -	123 -	173 -
24 - -	74 - -	124 -	174 -
25 - -	75 - -	125 -	175 -
26 - -	76 - -	126 -	176 -
27 - -	77 - -	127 -	177 -
28 - -	78 - -	128 -	178 -
29 - -	79 - -	129 -	179 -
30 - - 0,5 mA	80 - - 0,8 mA	130 -	180 -
31 - -	81 - -	131 -	181 -
32 - -	82 - -	132 -	182 -
33 - -	83 - -	133 -	183 -
34 - -	84 - -	134 -	184 -
35 - -	85 - -	135 -	185 -
36 - -	86 - -	136 -	186 -
37 - -	87 - -	137 -	187 -
38 - -	88 - -	138 -	188 -
39 - -	89 - -	139 -	189 -
40 - - 0,6 mA	90 - - 0,9 mA	140 -	190 -
41 - -	91 - - 0,9 mA	141 -	191 -
42 - -	92 - -	142 -	192 -
43 - -	93 - - 0,9 mA	143 -	193 -
44 - -	94 - - 0,9 mA	144 -	194 -
45 - -	95 - - 0,9 mA	145 -	195 -
46 - -	96 - x 1,5 mA; 27 A	146 -	196 -
47 - -	97 - x 2,3 mA; 13 A	147 -	197 -
48 - -	98 - PRŮRAZ	148 -	198 -
49 - -	99 -	149 -	199 -
50 - - 0,6 mA	100 -	150 -	200 -

Obr. P. 2: Výsledky zkoušky elektrické pevnosti - vzorek A, po zkoušce oteplením

17.1.2019 - VZOREK B - 5,19V AC

1 - - 0,1mA	51 - -	101 - -	151 - -
2 - -	52 - -	102 - -	152 - -
3 - -	53 - -	103 - -	153 - -
4 - -	54 - -	104 - -	154 - -
5 - -	55 - -	105 - -	155 - -
6 - -	56 - -	106 - -	156 - -
7 - -	57 - -	107 - -	157 - -
8 - -	58 - -	108 - -	158 - /
9 - -	59 - -	109 - -	159 - -
10 - - 0,1mA	60 - - 0,1mA	110 - -	160 - -
11 - -	61 - -	111 - -	161 - -
12 - -	62 - -	112 - -	162 - -
13 - -	63 - -	113 - -	163 - -
14 - -	64 - -	114 - -	164 - -
15 - -	65 - -	115 - -	165 - -
16 - -	66 - -	116 - -	166 - -
17 - -	67 - -	117 - -	167 - -
18 - -	68 - -	118 - -	168 - -
19 - -	69 - -	119 - -	169 - -
20 - - 0,1mA	70 - - 0,1mA	120 - -	170 - -
21 - -	71 - -	121 - -	171 - -
22 - -	72 - -	122 - -	172 - -
23 - -	73 - -	123 - -	173 - -
24 - -	74 - -	124 - -	174 - -
25 - -	75 - -	125 - -	175 - -
26 - -	76 - -	126 - -	176 - -
27 - -	77 - -	127 - -	177 - -
28 - -	78 - -	128 - -	178 - -
29 - -	79 - -	129 - -	179 - -
30 - - 0,1mA	80 - - 0,1mA	130 - -	180 - -
31 - -	81 - -	131 - -	181 - -
32 - -	82 - -	132 - -	182 - -
33 - -	83 - -	133 - -	183 - -
34 - -	84 - -	134 - -	184 - -
35 - -	85 - -	135 - -	185 - -
36 - -	86 - -	136 - -	186 - -
37 - -	87 - -	137 - -	187 - -
38 - -	88 - -	138 - -	188 - -
39 - -	89 - -	139 - -	189 - -
40 - - 0,1mA	90 - - 0,1mA	140 - -	190 - -
41 - -	91 - -	141 - -	191 - -
42 - -	92 - -	142 - -	192 - -
43 - -	93 - -	143 - -	193 - -
44 - - 5.2.2019	94 - -	144 - -	194 - -
45 - -	95 - -	145 - -	195 - -
46 - -	96 - -	146 - -	196 - -
47 - -	97 - -	147 - -	197 - -
48 - -	98 - -	148 - -	198 - -
49 - -	99 - -	149 - -	199 - -
50 - - 0,1mA	100 - - 0,1mA	150 - -	200 - - 0,1mA

Obr. P. 3: Výsledky zkoušky elektrické pevnosti - vzorek B

14-3-2019 - VZOREK B - 5,12VAC (PO TEPLŮTNÍ ZKOUŠCE)

1 - 0,1mA	51 - -	101 - -	151 - 2A
2 - -	52 - -	102 - -	152 - -
3 - -	53 - -	103 - -	153 - -
4 - -	54 - -	104 - -	154 - -
5 - -	55 - -	105 - -	155 - -
6 - -	56 - -	106 - -	156 - -
7 - -	57 - -	107 - -	157 - -
8 - -	58 - -	108 - -	158 - 2,12V -
9 - -	59 - 4,82V -	109 - -	159 - -
10 - 0,1mA	60 - -	110 - -	160 - -
11 - -	61 - -	111 - -	161 - -
12 - -	62 - -	112 - -	162 - -
13 - -	63 - -	113 - -	163 - -
14 - -	64 - -	114 - -	164 - -
15 - -	65 - -	115 - -	165 - -
16 - -	66 - -	116 - -	166 - -
17 - -	67 - -	117 - -	167 - -
18 - -	68 - -	118 - -	168 - 30A
19 - -	69 - -	119 - -	169 - 2A
20 - 0,1mA	70 - 0,1mA	120 - -	170 - 5A
21 - -	71 - -	121 - -	171 - 2A
22 - -	72 - -	122 - x i 0,1mA, 47A	172 - 2A
23 - -	73 - -	123 - x	173 - -
24 - -	74 - 5,12V -	124 - x	174 - -
25 - -	75 - -	125 - x	175 - -
26 - x i 0,1mA, 24A	76 - x i 0,1mA, 3A	126 - x	176 - -
27 - x	77 - 5A	127 - x	177 - -
28 - x	78 - 6A	128 - 4,82V -	178 - -
29 - x	79 - 10A	129 - -	179 - -
30 - 3,62V - 0,1mA	80 - 20A	130 - -	180 - -
31 - -	81 - 15A	131 - -	181 - 1A
32 - -	82 - 17A	132 - -	182 - 26A
33 - -	83 - 1A	133 - -	183 - 6A
34 - -	84 - 2A	134 - -	184 - 2A
35 - 3,82V -	85 - 5A	135 - 4,82V -	185 - 1A
36 - -	86 - 6A	136 - -	186 - -
37 - -	87 - 10A	137 - -	187 - -
38 - -	88 - 6A	138 - -	188 - -
39 - -	89 - 8A	139 - -	189 - -
40 - 0,1mA	90 - -	140 - -	190 - -
41 - -	91 - -	141 - 20A	191 - -
42 - -	92 - -	142 - 40A	192 - -
43 - -	93 - -	143 - 15A	193 - -
44 - -	94 - -	144 - -	194 - -
45 - 4,22V -	95 - -	145 - -	195 - -
46 - -	96 - -	146 - -	196 - -
47 - -	97 - -	147 - -	197 - -
48 - -	98 - -	148 - 5A	198 - -
49 - -	99 - -	149 - 5A	199 - -
50 - 0,1mA	100 - -	150 - 3A	200 - 0,1mA

Obr. P. 4: Výsledky zkoušky elektrické pevnosti - vzorek B, po zkoušce oteplením

22-2-2019 - VZOREK C - 5,17 kV AC

1 - 0,1 mA	51 -	101 -	151 -
2 -	52 -	102 -	152 -
3 -	53 -	103 -	153 -
4 - ✓	54 -	104 -	154 -
5 -	55 -	105 -	155 -
6 -	56 -	106 -	156 -
7 -	57 -	107 -	157 -
8 -	58 -	108 -	158 -
9 -	59 -	109 -	159 -
10 - 0,1 mA	60 - 0,1 mA	110 -	160 -
11 -	61 -	111 -	161 -
12 -	62 -	112 -	162 -
13 -	63 -	113 -	163 -
14 -	64 -	114 -	164 -
15 -	65 -	115 -	165 -
16 -	66 -	116 -	166 -
17 -	67 -	117 -	167 -
18 -	68 -	118 -	168 -
19 -	69 -	119 -	169 -
20 - 0,1 mA	70 - 0,1 mA	120 -	170 -
21 -	71 -	121 -	171 -
22 -	72 -	122 -	172 -
23 -	73 -	123 -	173 -
24 -	74 -	124 -	174 -
25 -	75 -	125 -	175 -
26 -	76 -	126 -	176 -
27 -	77 -	127 -	177 -
28 -	78 -	128 -	178 -
29 -	79 -	129 -	179 -
30 - 0,1 mA	80 - 0,1 mA	130 -	180 -
31 -	81 -	131 -	181 -
32 -	82 -	132 -	182 -
33 -	83 -	133 -	183 -
34 -	84 -	134 -	184 -
35 -	85 -	135 -	185 -
36 -	86 -	136 -	186 -
37 -	87 -	137 -	187 -
38 -	88 -	138 -	188 -
39 -	89 -	139 -	189 -
40 - 0,1 mA	90 - 0,1 mA	140 -	190 -
41 -	91 -	141 -	191 -
42 -	92 -	142 -	192 -
43 -	93 -	143 -	193 -
44 -	94 -	144 -	194 -
45 -	95 -	145 -	195 -
46 - 27-2-2019	96 -	146 -	196 -
47 -	97 -	147 -	197 -
48 -	98 -	148 -	198 -
49 -	99 -	149 -	199 -
50 - 0,1 mA	100 - 0,1 mA	150 -	200 - 0,1 mA

Obr. P. 5: Výsledky zkoušky elektrické pevnosti - vzorek C

13.3.2019 - VZOREK C (PO TEPLOTNÍ ZKOUŠCE) - S. P. V. A. C.

1 - 0,1 mA	51 - 150	101 - -	151 - -
2 - -	52 - 80	102 - -	152 - -
3 - -	53 - 100	103 - -	153 - -
4 - -	54 - 230	104 - -	154 - -
5 - -	55 - 20	105 - -	155 - -
6 - -	56 - -	106 - 300	156 - -
7 - -	57 - -	107 - 100	157 - -
8 - -	58 - -	108 - 20	158 - -
9 - -	59 - 100	109 - 10	159 - -
10 - 0,2 mA	60 - 50	110 - -	160 - -
11 - -	61 - 40	111 - -	161 - 300
12 - -	62 - -	112 - -	162 - -
13 - -	63 - 100	113 - 400	163 - 80
14 - -	64 - 200	114 - -	164 - -
15 - -	65 - 200	115 - -	165 - -
16 - -	66 - 100	116 - -	166 - -
17 - -	67 - 20	117 - 400	167 - -
18 - -	68 - 50	118 - 200	168 - -
19 - -	69 - 60	119 - 250	169 - -
20 - 0,2 mA	70 - 00	120 - 450	170 - -
21 - -	71 - 130	121 - -	171 - -
22 - -	72 - 200	122 - 400	172 - 80
23 - -	73 - 70	123 - 20	173 - 20
24 - -	74 - 30	124 - -	174 - 20
25 - -	75 - -	125 - -	175 - -
26 - -	76 - -	126 - -	176 - -
27 - -	77 - 400	127 - -	177 - -
28 - -	78 - 90	128 - -	178 - -
29 - -	79 - -	129 - -	179 - -
30 - 0,2 mA	80 - -	130 - -	180 - -
31 - -	81 - -	131 - -	181 - 150
32 - -	82 - -	132 - 400	182 - 20
33 - -	83 - -	133 - 10	183 - 10
34 - -	84 - -	134 - 90	184 - -
35 - -	85 - -	135 - -	185 - -
36 - -	86 - -	136 - -	186 - -
37 - -	87 - -	137 - -	187 - -
38 - -	88 - -	138 - -	188 - -
39 - -	89 - -	139 - -	189 - -
40 - 0,2 mA	90 - -	140 - -	190 - 50 A
41 - -	91 - -	141 - 200	191 - -
42 - -	92 - -	142 - 70	192 - -
43 - -	93 - -	143 - -	193 - -
44 - -	94 - -	144 - -	194 - -
45 - x, 0,2 mA, 35 A	95 - -	145 - -	195 - -
46 - 300	96 - 19.9.2019	146 - -	196 - -
47 - 50	97 - -	147 - -	197 - -
48 - 40	98 - -	148 - -	198 - -
49 - -	99 - -	149 - -	199 - -
50 - 50	100 - -	150 - 400	200 - 0,2 mA

Obr. P. 6: Výsledky zkoušky elektrické pevnosti - vzorek B, po zkoušce oteplením

14.3. 2019 - VZOREK B (PO TEPL. ZKOUŠCE)

1 - - 0,1mA	51 - -	101 -	151 -
2 - -	52 - -	102 -	152 -
3 - -	53 - -	103 -	153 -
4 - -	54 - -	104 -	154 -
5 - -	55 - -	105 -	155 -
6 - -	56 - -	106 -	156 -
7 - -	57 - -	107 -	157 -
8 - -	58 - -	108 -	158 -
9 - -	59 - -	109 -	159 -
10 - -	60 - -	110 -	160 -
11 - PRIMAR - KOSTRA	61 - SEKUNDA - KOSTRA	111 -	161 -
12 -	62 -	112 -	162 -
13 - 3,2kV AC; 0,2mA	63 - 3,2kV AC; 0,1mA	113 -	163 -
14 -	64 -	114 -	164 -
15 -	65 -	115 -	165 -
16 -	66 -	116 -	166 -
17 - VZOREK C	67 - VZOREK C	117 -	167 -
18 - P-K; 3,2kV AC	68 - S-K; 3,2kV AC	118 -	168 -
19 -	69 -	119 -	169 -
20 - - 0,1mA	70 - - 0,1mA	120 -	170 -
21 - -	71 - -	121 -	171 -
22 - -	72 - -	122 -	172 -
23 - -	73 - -	123 -	173 -
24 - -	74 - -	124 -	174 -
25 - -	75 - -	125 -	175 -
26 - -	76 - -	126 -	176 -
27 - -	77 - -	127 -	177 -
28 - -	78 - -	128 -	178 -
29 - -	79 - -	129 -	179 -
30 - - 0,1mA	80 - - 0,1mA	130 -	180 -
31 -	81 -	131 -	181 -
32 -	82 -	132 -	182 -
33 -	83 -	133 -	183 -
34 -	84 -	134 -	184 -
35 -	85 -	135 -	185 -
36 -	86 -	136 -	186 -
37 -	87 -	137 -	187 -
38 -	88 -	138 -	188 -
39 -	89 -	139 -	189 -
40 -	90 -	140 -	190 -
41 -	91 -	141 -	191 -
42 -	92 -	142 -	192 -
43 -	93 -	143 -	193 -
44 -	94 -	144 -	194 -
45 -	95 -	145 -	195 -
46 -	96 -	146 -	196 -
47 -	97 -	147 -	197 -
48 -	98 -	148 -	198 -
49 -	99 -	149 -	199 -
50 -	100 -	150 -	200 -

Obr. P. 7: Výsledky zkoušky elektrické pevnosti mezi vinutím a kostrou - vzorek B a C, po zkoušce oteplením