

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vliv konstrukce magnetického obvodu na indukčnost a  
ztráty tlumivky**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ondřej KLOUDA**  
Osobní číslo: **E17B0025P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Téma práce: **Vliv konstrukce magnetického obvodu na indukčnost a ztráty tlumivky**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Zásady pro vypracování

1. Uvedte možná technická řešení tlumivek.
2. Uvedte sledované faktory pro konkrétní tlumivku a jejich dopad na výsledky.
3. Proveďte potřebná měření.
4. Vyhodnoťte výsledky a shrňte.



Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

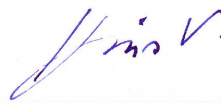
1. Bartoš, V., Skala, B. : Měření na elektrických strojích. Skripta ZČU, Plzeň 2002.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



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



**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

## **Abstrakt**

Tato práce obsahuje data naměřená a vyhodnocená při měření na dvou vzorcích 3f tlumivek s EI jádrem. Tato data jsou vyhodnocena a popisují, jaký vliv mají různé konstrukční úpravy na parametry měřených zařízení.

## **Klíčová slova**

Proud, napětí, tlumivka, Joulovy ztráty, ztráty vířivými proudy, hysterézní ztráty, činný výkon, jalový výkon, cívka, jádro, indukčnost, indukce, magnetický obvod, vzduchová mezera, měření, oteplovací zkouška, Ohmova metoda pro měření odporu



## **Abstract**

This work contains data measured and evaluated during measurement on two specimens of 3f choking coils with EI core. These data are evaluated and describe the effect of different constructional modifications on the parameters of the measured devices.

## **Key words**

Current, voltage, choking coil, Joule losses, eddy current losses, hysteresis losses, active power, reactive power, coil, core, inductance, induction, magnetic circuit, air gap, measurement, warming test, resistance measurement using Ohm method

## **Prohlášení**

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 10.6.2020

Ondřej Klouda

## **Poděkování**

Mé poděkování patří váženému panu doc. Ing. Bohumilu Skalovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, cenné profesionální rady, trpělivost a ochotu při konzultacích.

## Obsah

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b><u>9</u></b>
<b>2 SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b><u>10</u></b>
<b>3 OBECNÉ INFORMACE O TLUMIVCE.....</b>	<b><u>12</u></b>
3.1 KONSTRUKCE.....	<u>12</u>
3.2 ZTRÁTY.....	<u>13</u>
3.3 INDUKČNOST.....	<u>15</u>
3.3.1 Vlastní indukčnost.....	<u>15</u>
3.3.2 Vzájemná indukčnost.....	<u>16</u>
3.4 POUŽITÍ.....	<u>17</u>
<b>4 KONSTRUKCE.....</b>	<b><u>19</u></b>
4.1 ANALYTICKÝ NÁVRH.....	<u>22</u>
4.2 REALIZACE KONSTRUKCE.....	<u>25</u>
4.2.1 Cívky.....	<u>25</u>
4.2.2 EI jádro.....	<u>26</u>
<b>5 VÝSLEDKY PRAKTICKÉHO MĚŘENÍ.....</b>	<b><u>27</u></b>
5.1 ZNAČENÍ V PRŮBĚHU MĚŘENÍ.....	<u>27</u>
5.2 MĚŘENÍ NA TLUMIVKÁCH B A C S NEZKRÁCENÝMI EI JÁDRY.....	<u>28</u>
5.2.1 Měření na tlumivkách bez vzduchové mezery.....	<u>28</u>
5.2.2 Měření na tlumivkách se vzduchovou mezerou.....	<u>34</u>
5.2.3 Měření na tlumivkách s překlenutou vzduchovou mezerou 1 mm.....	<u>42</u>
5.3 MĚŘENÍ NA TLUMIVKÁCH B A C SE ZKRÁCENÝMI EI JÁDRY.....	<u>48</u>
5.3.1 Měření na tlumivkách s překlenutou vzduchovou mezerou 1 mm.....	<u>49</u>
5.3.2 Měření na tlumivkách s překlenutou vzduchovou mezerou 1 mm a sníženým počtem závitů.....	<u>55</u>
5.4 OTEPLOVACÍ ZKOUŠKA TLUMIVKY B A C.....	<u>62</u>
5.4.1 Zatížení jmenovitým proudem.....	<u>63</u>
5.4.2 Oteplovací zkouška v režimu ED 40 %.....	<u>72</u>
5.5 MĚŘENÍ ODPORU VINUTÍ TLUMIVEK B I C.....	<u>76</u>
<b>6 ZÁVĚR.....</b>	<b><u>80</u></b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b><u>82</u></b>

# 1 Úvod

K tomuto tématu bakalářské práce jsem se dostal díky zapojení do projektu, ve kterém byly od zadavatele určeny potřebné požadavky na dvě tlumivky. Ty mají mít stejné rozměry, které jsou omezeny provozním prostředím, ale hodnoty indukčností jsou rozdílné. Budu zde popisovat postupně od prvopočátku, jak budeme postupovat a jaká měření budou zapotřebí, abychom byli schopni docílit požadovaným parametrů. Tato měření budou prováděna na různých konstrukčních úpravách, které budou provedeny během realizace pro splnění požadavků, budou zde popsána a také zhodnocena. Nejdůležitější veličiny, které budeme zkoumat, jsou ztráty, indukčnost a oteplení.

Práce bude rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické budu popisovat důležité vlivy, veličiny a samotné konstrukční části tlumivky. Praktická část bude rozsáhlejší, než-li teoretická a bude obsahovat tři skupiny informací. Zaprvé budu popisovat aktuální konstrukce, na kterých se měření provádí a postup, který bude aplikován a jaké s tím spojené překážky během realizace této konstrukce budeme muset vyřešit. Zadruhé bude popsán postup a teorie provedených měření. A konečně zatřetí budu uvádět a zhodnocovat výsledky všech měření, která budu provádět. Během měření budou použity čtyři měřicí přístroje. Bude to osciloskop na odečtení napětí, proudu a fázového posunu, ampermetr pro odečtení proudu, TESTO 175-T3 pro měření teploty a multimetr na odečtení napětí, jelikož jeho výhodou je, že jeho konstrukce umožňuje rychlé a snadné měření.

Museli jsme předpokládat, že se během realizace konstrukce a měření objeví určité několik problémů a chyb, které budeme schopni vyřešit. Cílem našeho snažení by mělo být sestavení dvou rozdílných a funkčních prototypů tlumivek požadovaných parametrů.

## 2 Seznam symbolů a zkratk

U.....	(V).....	Napětí
I.....	(A).....	Proud
R.....	( $\Omega$ ).....	Odpor
$\Delta P_j$ .....	(W).....	Jouleovy ztráty
$\Delta P_o$ .....	(W).....	Celkové ztráty
$\Delta P_{Fe}$ .....	(W).....	Ztráty v železe
f.....	(Hz).....	Frekvence
$S_s$ .....	( $J \cdot m^3$ ).....	Plocha hysterézní smyčky
V.....	( $m^3$ ).....	Objem
$\rho$ .....	( $kg/m^3$ ).....	Hustota
l.....	(m).....	Délka
S.....	( $m^3$ ).....	Obsah/Průřez
B.....	(T).....	Magnetická indukce
d.....	(mm).....	Tloušťka feromagnetika
X.....	( $\Omega$ ).....	Reaktance
$I_n$ .....	(A).....	Jmenovitý proud
$I_{on}$ .....	(A).....	Proud (60s zap/90s vyp)
$I_{peak}$ .....	(A).....	Proud (30s zap)
m.....	(kg).....	Hmotnost
g.....	(10N/kg).....	Gravitační konstanta
$F_g$ .....	(N).....	Gravitační síla
$R_{mFe}$ .....	( $H^{-1}$ ).....	Mag. odpor železa
$R_{\delta}$ .....	( $H^{-1}$ ).....	Mag. odpor vzduchové mezery
$\mu_0$ .....	( $H \cdot m^{-1}$ ).....	Permeabilita vakua
$\mu_r$ .....	(- ).....	Relativní permeabilita
$R_{mcelk}$ .....	( $H^{-1}$ ).....	Celkový mag. odpor
L.....	(H).....	Indukčnost
N.....	(závitů).....	Počet závitů

$U_m$	.....(A).....	Magnetické motorické napětí
$\Phi$	.....(Wb).....	Magnetický tok
$\Delta P_{hys}$	.....(W).....	Hysterézní ztráty
$V_{Fe}$	.....(m <sup>3</sup> ).....	Objem feromagnetika
$\Delta P_{vpr}$	.....(W).....	Ztráty vířivými proudy
$M$	.....(H).....	Vzájemná indukčnost
$\phi_{12}$	.....(Wb).....	Vzájemná mag. indukčnost
$I_1$	.....(A).....	Proud, který vybudí $\phi_{12}$
$U_i$	.....(V).....	Indukované napětí
$L_1$	.....(H).....	Indukčnost před snížením počtu závitů
$N_1$	.....(závity).....	Závity před snížením počtu závitů
$R_{mcelk1}$	.....(H <sup>-1</sup> ).....	$R_{mcelk}$ před snížením počtu závitů
$L_2$	.....(H).....	Indukčnost po snížení počtu závitů
$N_2$	.....(závity).....	Závity po snížení počtu závitů
$R_{mcelk2}$	.....(H <sup>-1</sup> ).....	$R_{mcelk}$ po snížení počtu závitů
$Z$	.....( $\Omega$ ).....	Impedance
$R_V$	.....( $\Omega$ ).....	Odpor V-metru
$R_A$	.....( $\Omega$ ).....	Odpor A-metru
$Q$	.....(VAr).....	Jalový výkon
$\cos(\varphi)$	.....(-).....	Účinnost



## 3 Obecné informace o tlumivce

### 3.1 Konstrukce

Tlumivka je zařízení, jejímž hlavním parametrem je indukčnost a svými vlastnostmi a konstrukcí je velmi podobná transformátoru, ale má vzduchovou mezeru. Vyrábí se jako jednofázový nebo třífázový stroj. Je konstruována tak, aby vinutí jejich cívek mělo co nejmenší velikost odporu a kapacity. Toto zařízení se skládá z cívky nebo cívek a jádra. Cívka má tvar buď solenoidu (válcová cívka) nebo toroidu (kruhová cívka) se vzduchovým či feromagnetickým jádrem [11]. Vinutí, které tvoří cívku, je izolováno izolací, nejčastěji používaným typem izolovaného vodiče pro cívku je lakovaný drát, jelikož oproti ostatním izolacím je lak prostorově nenáročný a má dobré izolační vlastnosti jako ostatní druhy izolace. Tato prostorová úspora je velmi vhodnou vlastností u konstrukce cívek, jelikož nám umožňuje navinutí většího počtu závitů. Po navinutí cívky izolovaným vinutím, následuje ještě další krok a to ten, že navinutou cívku impregnujeme. Impregnace vyplní mezery mezi závity, poté ji vysušíme v peci. Při hustě vinutém vinutí je využívána vakuová impregnace. Tento krok je důležitý proto, aby se zmenšila pravděpodobnost vodivého spojení mezi jednotlivými vinutími v cívce, kterému se jinak říká mezizávitový zkrat.

Je-li jádro železné, tak se po překročení určité velikosti proudu začne přesycovat, v tuto chvíli přestane lineárně narůstat napětí a indukčnost v závislosti na velikosti proudu. Toto přesycení železného jádra je nežádoucím jevem. Po nějaké době přestane narůstat napětí i indukčnost a ustálí se na konstantní hodnotě. Železná jádra se využívají i přes tuto jejich nepříznivou vlastnost, jelikož výrazně zvětšují indukčnost tlumivky. Je-li tlumivka bez železného jádra a je-li navyšován proud, tak nyní napětí lineárně narůstá po celou dobu z toho důvodu, že vzduch nejsme schopni přesytit jako je tomu u železného jádra. Avšak cívka se vzduchovým jádrem má malou indukčnost a napětí při stejném protékajícím proudu a počtu závitů oproti tlumivce s železným jádrem. Tlumivka je vyráběna buď v jádrovém či plášťovém provedení. U jádrového provedení je vinutí na každém sloupcu jádra oproti plášťovému, u kterého na krajních sloupcích

vinutí není a je pouze na prostředním. Konstrukce jádra je buď taková, že je složeno z válcovaných plechů, anebo je to celek z feritu. Je-li složeno z jednotlivých plechů, tak jsou to slitiny železa a křemíku, které jsou následně válcované za studena nebo za tepla. Pokud jsou plechy válcované za studena, způsobí tento proces změny v orientaci krystalických zrn ve směru válcování, tento směr je také směrem lehké magnetizace [5]. Tyto plechy jsou následně skládány a staženy k sobě dle kladených požadavků. Na povrchu každého plechu se nachází izolace, která slouží k odizolování všech plechů mezi sebou. Jedním z používaných typů válcovaných plechů jsou EI plechy. Pokud jsou jádra jako feritový celek, tak je postup zpracování totožný jako u běžné keramiky. Směs je zapotřebí pečlivě promíchat a následně ji vylisovat do požadovaného tvaru, poté je vysušena a nakonec vypálena. Výsledného tvaru je docíleno broušením do požadovaných rozměrů. Tato feritová jádra jsou tvrdá, ale bohužel křehká a jejich hlavní výhodou je, že se v nich nevyskytují v takové míře vířivé proudy, které omezujeme u skládaných železných jader.

Zvětšení hodnoty proudu, při kterém se začíná jádro přesycovat, docílíme za pomoci nemagnetických mezer, které také nazýváme jako vzduchové mezery. Ty se vyskytují ve sloupcích jádra. Tyto mezery by měly být malé z toho důvodu, aby nedocházelo k rozptylu magnetického toku do stran v místě vzduchové mezery a nevznikaly tak další ztráty v magnetickém obvodu.

### **3.2 Ztráty**

Jelikož je tlumivka konstrukčně téměř totožná s transformátorem, tak ztráty, které se v ní vyskytují, jsou stejné jako u transformátoru. Což značí, že jsou zde ztráty v jádře a ztráty ve vinutí. Mechanické ztráty se zde nevyskytují, jelikož se nejedná o točivý stroj.

Ztráty ve vinutí se také jinak nazývají Jouleovými ztrátami. K těmto ztrátám dochází z důvodu přeměny kinetické energie částic na energii tepelnou při průchodu proudu elektrickým vodičem. Tyto ztráty se používají například u tepelných spotřebičů, ale u vinutí tlumivky má negativní vliv a je nežádoucí, protože při nárůstu teploty vinutí

se poškozuje izolace a odpor vinutí narůstá s rostoucí teplotou. Tyto ztráty se můžou zmenšit snížením odporu vinutí, jelikož jsou na něm i závislé, jak vyplývá ze vzorce číslo 1.

$$\Delta P_j = R \cdot I^2 \quad (1)$$

Ztráty v jádře můžeme dále dělit na ztráty vířivými proudy a hysterézní (magnetické). Ztráty hysterézní vznikají při přemagnetování feromagnetického jádra. Při tomto ději dochází ke změnám elektrické a magnetické energie na energii tepelnou, což vede k ohřívání jádra. Tyto ztráty se dají omezit tím, že se použije magneticky měkký materiál, aby byla hysterézní smyčka co nejužší a tím pádem materiál nepotřeboval velké množství energie na přemagnetování. Ztráty hysterézní jsou, jak je vidět ve vzorci 2, přímo úměrné ploše hysterézní smyčky.

$$\Delta P_{hys} = f \cdot S_s \cdot V_{Fe} \quad (2)$$

Druhými ztrátami v jádře jsou ztráty vířivými proudy. Tyto ztráty jsou způsobovány indukovaným elektrickým napětím a následně tzv. vířivým proudem. Ten má charakter smyček a je indukován do vodivého jádra tlumivky, je-li v něm proměnný magnetický indukční tok. Tyto indukované proudy působí negativně vůči magnetickému toku v jádře a omezují ho. Abychom zmenšili tyto ztráty, je potřeba snížit vodivost jádra, což se dělá přimícháním křemíku do železa. Tímto způsobem sice docílíme snížení vodivosti, ale nedá se tím vodivost snižovat do nekonečna. Jelikož způsobuje křehnutí slitiny Fe a Si. Dalším krokem ke snížení dopadu vířivých proudů na magnetický tok je, že jádro skládáme z několika lisovaných, navzájem izolovaných plechů místo z celistvého kusu. To způsobí, že vířivé proudy se mohou uzavírat pouze v jednotlivých plechách a jsou tím pádem menší. Ve vzorci 3 je vidět, že pokud je jádro složeno ze 3 válcovaných plechů místo jednoho celistvého kusu stejného materiálu, tak je potom odpor přibližně 9 krát větší. Z toho vyplývá, že navýšení odporu dosáhneme také tím, že složíme jádro z válcovaných plechů místo celistvého kusu. Tyto válcované transformátorové plechy jsou mezi sebou vzájemně izolovány. Plechy, mají nízkou

vodivost (velká rezistivita) a úzkou hysterézní smyčku.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad \times \quad R = \rho \cdot \frac{3 \cdot l}{\frac{S}{3}} \quad \longrightarrow \quad R = \rho \cdot \frac{9 \cdot l}{S} \quad (3)$$

$$\Delta P_{\text{vpr}} = \frac{4 \cdot d^2 \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot V}{3 \cdot \rho} \quad (4)$$

### 3.3 Indukčnost

Indukčnost je fyzikální veličina, která charakterizuje cívku, stejně jako rezistor je charakterizován odporem a kondenzátor jeho kapacitou. Známe dva druhy indukčnosti a to vlastní a vzájemnou. Liší se od sebe místem procházejícího proudu, který budí magnetický tok. U vlastní indukčnosti protéká tento proud samotnou cívku, anebo závitem. A u vzájemné indukčnosti tento proud protéká cívku, anebo závitem, který působí na cívku nebo závit v jejím poli a indukuje do něj napětí. Vlastní indukčnost je značena velkým písmenem L a vzájemná indukčnost se značí velkým písmenem M. Jak vlastní, tak vzájemná indukčnost má totožnou hlavní jednotku henry, značenou H. Tato jednotka se rovná Vs/A, což detailněji popisuje to, co v sobě jednotka henry skrývá. Definice říká, že v uzavřeném obvodu vzniká elektromotorické napětí 1V, pokud se proud, který prochází tímto obvodem rovnoměrně mění o 1A za každou 1s [7] [8] [9].

#### 3.3.1 Vlastní indukčnost

Vlastní indukčnost slouží k tomu, aby popsala schopnost vytvářet magnetické pole při protékajícím proudu skrze danou cívku. Lze popsat dvěma způsoby a to buď statickou nebo dynamickou definicí.

Statická definice zní, že vlastní indukčnost pro jednoduchou tenkou smyčku (závit) se rovná podílu magnetického toku a vlastního proudu, který protéká smyčkou [7] [8].

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (5)$$

Dynamická definice nám říká, že vlastní indukčnost jednoduché tenké smyčky (závitu) se rovná parciální derivaci magnetického toku proudem, který protéká smyčkou. Tento proud je proměnný s časem, a tak se s časem mění i magnetický tok, časovou změnou tohoto magnetického toku se následně v závitu indukuje napětí. [10]

$$L = \frac{d\Phi}{di} \quad (6)$$

$$u = -L \frac{di}{dt} \quad (7)$$

### 3.3.2 Vzájemná indukčnost

Vzájemná indukčnost se dá popsat stejně jako vlastní indukčnost dvěma způsoby a to buď statickou nebo dynamickou definicí.

Statická definice vzájemné indukčnosti popisuje, že pokud protékající proud  $I_1$  jednoduchou tenkou smyčkou (závit) vybudí tok a část tohoto toku bude procházet plochou jiné smyčky, která se nachází v dosahu vybuděného toku, tak tato část toku bude značena  $\Phi_{12}$ . A vzájemná indukčnost mezi dvěma jednoduchými tenkými smyčkami (závity) se tím pádem bude rovnat tomuto podílu části magnetického toku  $\Phi_{12}$  a proudu  $I_1$ , který tento tok vybudil [8].

$$M = \frac{\Phi_{12}}{I_1} \quad (8)$$

Vzorce 9 a 10 jsou dynamickou definicí vzájemné indukčnosti. Mění-li se proud  $i_1$  procházející jednoduchou smyčkou (závitem) v závislosti na čase, tak i magnetický tok se bude měnit v závislosti na čase a touto časovou změnou magnetického toku se bude indukovat napětí  $u_{12}$  do závitu (který je poblíž závitu protékajícího proudem  $i_1$ ), jehož plochou bude procházet část magnetického toku vybuzeného proměnným proudem  $i_1$  [10].

$$M = \frac{d \Phi_{12}}{d i_1} \quad (9)$$

$$u_{12} = -M * \frac{d i_1}{d t} \quad (10)$$

### 3.4 Použití

Je-li tlumivka použita v elektrickém obvodu, tak zvyšuje jeho indukčnost. Této vlastnosti využívají vyhlazovací tlumivky, které slouží k vyhlazení průběhu protékajícího proudu. Elektrický proud je u tlumivky stavová veličina, což znamená, že se jeho hodnota nemění skokově, ale spojitě během přechodového jevu. Tento přechodový jev trvá přibližně  $5\tau$  a během něj brání tlumivka změně směru proudu. Díky tomuto zpoždění změny proudu je toto zařízení ideální pro mnoho aplikací. Úbytek napětí na tlumivce se například používá při rozběhu indukčního elektrického stroje, pro snížení velikosti rozběhového proudu a tím zmenšení namáhání izolace vinutí. Napětí není stavová veličina, jelikož se u tlumivky skokově měnit může. Další zásadní vlastností tlumivky je, že se chová jako dolní propust a propouští pouze signály nízkých frekvencí a blokuje vysoké frekvence. U vyšších frekvencí narůstá totiž hodnota reaktance tlumivky.

Tlumivka je zařízení, které se používá u indukčních strojů při rozběhu za účelem ochrany vinutí nebo izolace vinutí. Některé stroje si totiž v průběhu rozběhu berou větší proud, než který dokážou konstrukčně zvládnout a z tohoto důvodu se připojuje sériově

předřadná tlumivka, která nedovolí proudu rázově narůst a díky tomu ochrání vinutí stroje, jehož izolace je citlivá na vyšší teploty. Po rozběhu se jednoduše tlumivka vyzkratuje a dále se při provozu nepoužívá. Tento způsob rozběhu motoru se nazývá rozběh se sníženým napětím, protože dojde k úbytku napětí na tlumivce a tím klesne napětí, které napájí motor.

Tlumivky můžeme také využívat jako ochranu tyristorů. Pro tyristory je charakteristické, že u nich dochází ke strmým nárůstům proudu, což způsobí následně i změnu napětí. Tlumivka chrání obvod a zamezuje tomu, aby v krátkém čase překročil proud, anebo napětí přípustné hodnoty. Využívá se sycení jádra provozním proudem tyristoru. Díky tomu dochází pomalu k přesycení jádra, což způsobí nárůst magnetického odporu jádra a to způsobí snížení indukčnosti až na tak nepatrnou hodnotu, že téměř neovlivňuje obvod. Toto následně způsobí postupný nárůst protékajícího proudu obvodem tyristoru na plnou hodnotu proudu. Takováto tlumivka je zapojována do série s tyristorem. Doba, než se přesytí jádro tlumivky, se nazývá jako ochranná doba tyristoru. Se sycením jádra klesá i napětí na tlumivce, tento fakt způsobuje zpoždění nárůstu napětí na tyristoru [4].

Dalším využívaným typem tlumivky je zhášecí tlumivka, která se používá při zkratových proudech v distribučních sítích, také známá jako Petersenova cívka. Využití tlumivky se také najde u spínaných zdrojů, kde dle jejího zapojení se spínačem a transformátorem můžeme dělit tyto spínané zdroje na rezonanční a nerezonanční. Rezonanční se liší od nerezonančního tím, že jeho spínací kmitočet je proměnný [3]. Dalšími aplikacemi jsou trakční tlumivky, odrušovací tlumivky, tlumivky jako indukční předřadníky u starých zářivek a filtrační tlumivky.

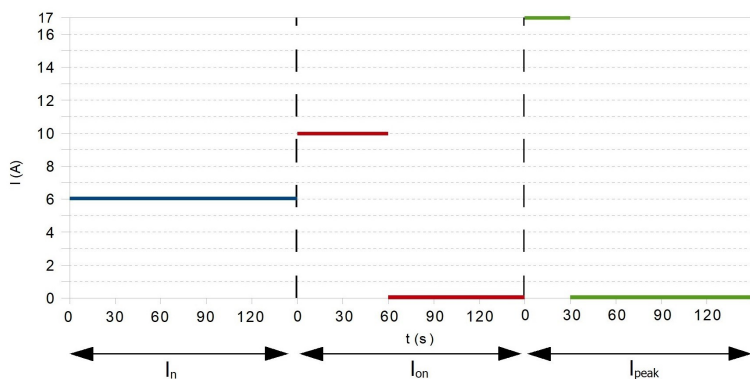


## 4 Konstrukce

Zákazníkem byly zadány parametry pro dvě odlišné varianty tlumivek a také bylo popsáno prostředí, ve kterém by se měly nacházet a také provozovat. Společně mají to, že se budou nacházet v nadmořské výšce 2000 m. n. m. s teplotou okolí 60 °C. Přičemž chlazení bude zajišťovat pouze obyčejné přirozené proudění vzduchu. Bude se zde vyskytovat i tepelná pojistka, která se bude nacházet na prostřední fázi vinutí cívky a bude reagovat na nominální aktivační teplotu 125 °C.

Prvním krokem realizace návrhu bylo zkonstruování prototypu cívky. Tento prototyp byl značen A. Byl vyroben pouze pro jedinou fázi z důvodu ověření několika faktů, jako je například proveditelnost kostry, proveditelnost vinutí a předběžná oteplovací zkouška při protékajícím jmenovitém proudu  $I_n$  bez jádra. Ale měření a výsledky těchto zkoušek nejsou náplní ani předmětem mé bakalářské práce.

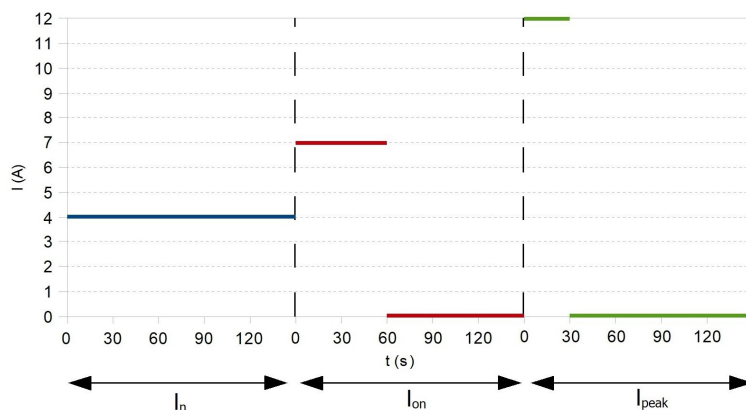
Tlumivka, kterou jsme pro snadnější rozlišování v průběhu měření označili písmenem B, měla zadanou jmenovitou hodnotu indukčnosti 2 mH a jmenovitý proud ( $I_n$ ) 6 A. Jednotlivé cívky fází jsou pro odlišení mezi sebou značeny jako B1-B2-B3. Během režimu, který označujeme jako ED 40 %, má být tlumivka namáhána proudem ( $I_{on}$ ) o velikosti 10 A po dobu 60 sekund a poté následně po dobu 90 sekund bude proud odpojen. Tlumivka má také být schopna krátkodobého provozu při protékajícím proudu ( $I_{peak}$ ) 17 A po dobu 30 sekund. Tyto proudy jsou graficky znázorněny na Obr. 1.



Obr 1: Napájení tlumivky B třemi hodnotami proudů v závislosti na čase

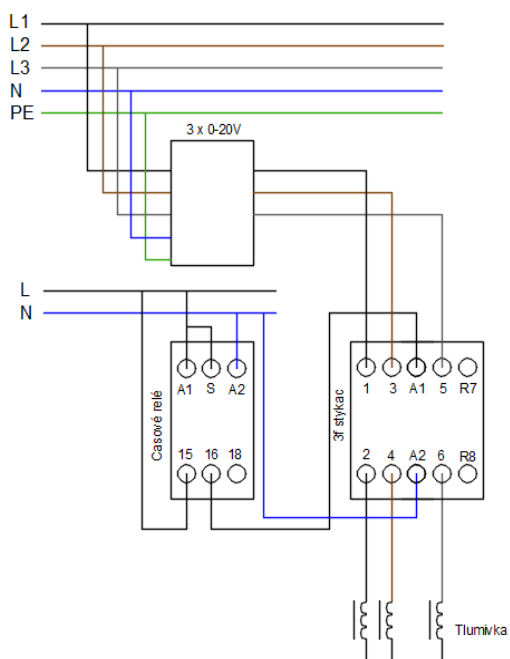
Minimální dovolená hodnota zadavatelem pro indukčnost, při které může být tlumivka provozována, je 1,7 mH.

Tlumivka, pro kterou jsme využívali pracovní označení písmenem C, měla zadanou jmenovitou hodnotu indukčnosti 4 mH a jmenovitý proud ( $I_n$ ) 4 A. Jednotlivé cívky fází jsou pro odlišení mezi sebou značeny jako C1-C2-C3. V průběhu toho, když bude tlumivka v režimu ED 40 %, má být namáhána proudem ( $I_{on}$ ) o velikosti 7 A po dobu 60 sekund a poté má být po dobu 90 sekund proud odpojen. Tlumivka má také zvládat provoz při připojeném krátkodobém proudu ( $I_{peak}$ ) o hodnotě 12 A po dobu 30 sekund. Tyto proudy jsou graficky znázorněny na Obr. 2. Minimální dovolená velikost indukčnosti, při které může být tlumivka provozována, je 3,2 mH.

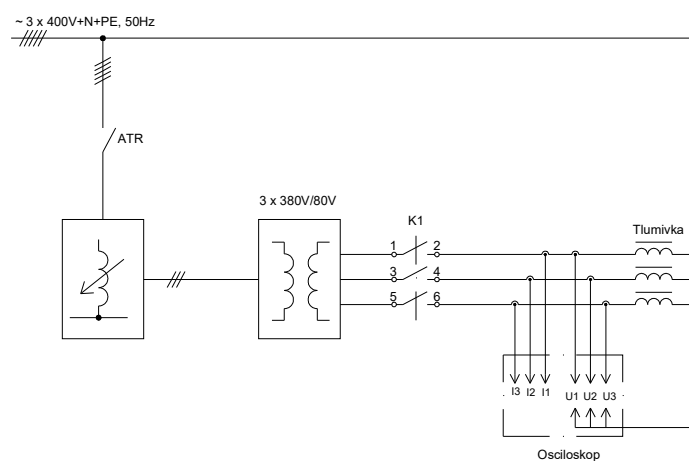


Obr 2: Napájení tlumivky C třemi hodnotami proudů v závislosti na čase

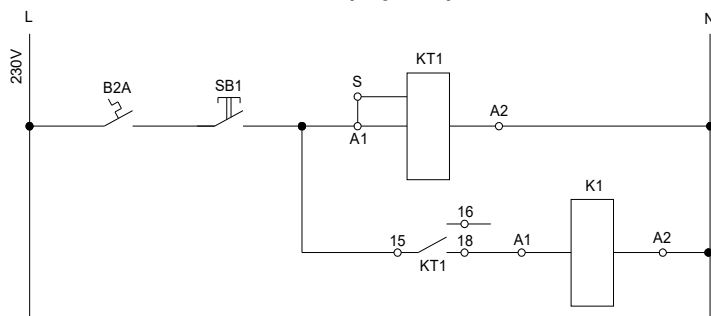
Pro realizaci chodu režimu ED 40 % v laboratorních podmínkách byl zkonstruován jednoduchý obvod s využitím časového relé ELKO CRM-2H a stykače Z-SCH230/25-40, který střídavě spínal a vypínal přívodní proud do tlumivky. Díky tomu jsme byli schopni realizovat měření oteplovacích zkoušek při tomto chodu. Napájení kontaktů 1-3-5 3f stykače nebylo zajištěno přímo ze sítě  $L_1$ - $L_2$ - $L_3$ , jak je tomu u kontaktů časového relé. Tyto kontakty byly však napájeny snižovacím transformátorem, který byl napájen síťovým regulačním autotransformátorem, jehož vstupy byly teprve napájeny přímo ze sítě.



Obr 3: Schéma zapojení tlumivky pro chod ED 40%



Obr 4: Silové schéma zapojení pro chod ED 40%



Obr 5: Ovládací schéma pro chod ED 40%

## 4.1 Analytický návrh

Analytický návrh je prvním krokem na cestě k realizaci prototypu produktu. Tato metoda je vhodná pro předběžný návrh, který pak nadále zpřesňujeme například za pomoci FEM simulace. Velkou snahou během výpočtů tlumivky je, aby ztráty byly co nejmenší a tím pádem nedocházelo k velkému oteplení jak vinutí tak i jádra. Dalším důležitým hlediskem v průběhu matematických výpočtů je magnetická indukce jádra. Ta by měla být taková, aby v průběhu magnetování magnetického obvodu byla velikost efektivní permeability konstantní v určitém rozmezí proudu [3].

Ve výpočtech jsme vycházeli ze zadaných hodnot rozměrů a dalších parametrů, které jsme obdrželi od zadavatele a to  $L$  a  $I$ . Při návrhu tlumivky jsme také byli omezeni maximálními rozměry. Analytické návrhy byly počítány pomocí tabulek v excelu, tyto tabulky s výpočty jsou uvedeny níže, výpočet tlumivky B je uveden v tabulce číslo 1 a výpočet tlumivky C je uveden v tabulce číslo 2.

zadání	3x 2mH	3x 6A/ 480V
tloušťka vložky (mm)	delta	1,05
rozměry jádra	3x UI 60/21,1	
(mm)	a	100
(mm)	d1	20
vyska svazku plechu (mm)	h1	21
mezera mezi jádry (mm)	m	$(a-3*d1) / 2$
rozměr plechu c	c	délka kostry vč. obou čel
plocha mezery (m <sup>2</sup> )	Sm	$d1 * h1 * 1e-6$
Mag. odpor-jedna mezera (H/m)	Rm1	$delta / (4\pi * 1e-7 * Sm)$
Mag. odpor mezer "delta" (H/m)	Rmd	$1,5 * Rm1$
stř. délka krajní siločáry (mm)	Lfe	$2*(a-2*d1) + 2*c + \pi*d1/2$
intenzita v jádře (A/m)	Hfe	$Bfe/0,05$
úbytek mag napětí na jádře (A)	dUm	$Hfe * Lfe$
mag. Indukce v jádře (T)	Bfe	1,350
Mag. odpor jádra (H/m)	Rfe	$H/Bfe*Lfe/(d1*h1)$
mag odpor celého obvodu (H/m)	Rm	$Rmd+Rfe$
počet závitů (-)	N	57
paralelních vodičů	all	1
počet vrstev (-)	Nv	$N*all/Np$
počet vrstev (-)	Nv	6
závitů ve vrstvě (-)	Np	$c-(2*n1)/sv$
závitů ve vrstvě (-)	Np	11
proud 1f (A)	I	6,00
magnetické napětí cívky 1f (A)	Um	$N*I$
výška vodiče (mm)	hv	1,32
šířka vodiče (mm)	sv	1,32
koef plnění Cu	kv	0,785
kruhový vodič ? (0 / 1)		$if hv=sv$
průřez =plocha vodiče (mm <sup>2</sup> )	Sv	1,37
průřez =plocha vodiče (m <sup>2</sup> )	Sv	1,37E-06
plocha cívky, jen Cu (mm <sup>2</sup> )	Sc Cu	$N * Sv$
plocha cívky, vč. činitele plnění (mm <sup>2</sup> )	Sc	$kv / Sc Cu$
plocha okna jádra pro vinutí (mm <sup>2</sup> )	S okna	$m * c / 2$
plocha okna kostry pro vinutí (mm <sup>2</sup> )	S okna k	$(m-n1)*(c-2*n1) / 2$
naplnění okna (%)		0,77
proudová hustota (A/mm <sup>2</sup> )	J	$I / Sv$
magnetický tok (Wb)	fi	$Um / Rm$
magnetická indukce	B (T)	$fi / Sm$
indukčnost 1f	L(mH)	2,200
kmitočet (Hz)	f	50
reaktance (Ω)	XL	$2\pi * f * L$
napětí AC (V)	Uac	$XL * I$
jalový výkon 1f (Var)	Q1	$Uac * I$
jalový výkon 3f (Var)	Q3	$3 * Q1$
objem Fe jádra 1f (mm <sup>3</sup> )	V Fe1f	$d1 * c * h1$
tloušťka kostry cívky (mm)	n1	1,5
délka vodiče - 2x mezi jádry (mm)	L1	$2x(hv * Nv/2 + 2*n1 + h1)$
délka vodiče - 2x vně jader (mm)	L2	$2x(hv * Nv/2 + 2*n1 + d1)$
délka vodiče - 4x oblouk (mm)	L3	$2*\pi*(hv * Nv/2)$
délka závitu (mm)	L	$L1+L2+L3$
délka vodiče 1f (m)	Lv	$L*N*1e-3$
objem vodiče 1f (mm <sup>3</sup> )	Vcu 2	$Sv * Lv * 1e3$
hmotnost vodiče 1f (kg)	m Cu 2 1f	$ro * Vcu 2 * 1e-9$
<b>hmotnost Cu 3f (kg)</b>	m Cu 2 3f	<b>3x mCu2 1f</b>
odpor vodiče 1f (Ohm)	R1f 20oC	$0,0178 x Lv / Sv mm2$
teplota vinutí (střední) (°C)	theta	140
odpor vodiče 1f (Ω)	R1f 140oC	$R1f 20oC x (1+0,004 x (theta - 20))$
ztrátový výkon 1f (W)	dP	$R1f 140oC x I^2$
přibližný povrch pro chlazení (cm <sup>2</sup> )	S vent	$(a + 2 x d1 + h1) x c x 2$
přibližné oteplení (K)	dt	$dP/11,3e-4/Svent$

Tabulka 1: Analytický návrh tlumivky B (2mH/6A)

zadání	3x 4mH		3x 4A/ 480V
tloušťka vložky (mm)	delta		1,05
rozměry jádra	3x UI 60/21,1		
(mm)	a		100
(mm)	d1		20
vyska svazku plechu (mm)	h1		21
mezera mezi jádry (mm)	m	$(a-3*d1) / 2$	20
rozměr plechu c	c	délka kostry vč. obou čel	17
plocha mezery (m <sup>2</sup> )	Sm	$d1 * h1 * 1e-6$	4,20E-04
Mag. odpor-jedna mezera (H/m)	Rm1	$delta / (4pi*1e-7 * Sm)$	1,99E+06
Mag. odpor mezer "delta" (H/m)	Rmd	$1,5 * Rm1$	2,99E+06
stř. délka krajní siločáry (mm)	Lfe	$2*(a-2*d1) + 2*c + pi*d1/2$	185,40
intenzita v jádře (A/m)	Hfe	$Bfe/0,05$	26,24
úbytek mag napětí na jádře (A)	dUm	$Hfe * Lfe$	4,86
mag. Indukce v jádře (T)	Bfe		1,312
Mag. odpor jádra (H/m)	Rfe	$H/Bfe*Lfe/(d1*h1)$	8,83
mag odpor celého obvodu (H/m)	Rm	$Rmd+Rfe$	1,99E+06
počet závitů (-)	N		94
paralelních vodičů	all		1
počet vrstev (-)	Nv	$N*all/Np$	7,49
počet vrstev (-)	Nv		8
závitů ve vrstvě (-)	Np	$c-(2*n1)/sv$	12,5
závitů ve vrstvě (-)	Np		12
proud 1f (A)	I		4,00
magnetické napětí cívky 1f (A)	Um	$N*I$	374,34
výška vodiče (mm)	hv		1,12
šířka vodiče (mm)	sv		1,12
koef plnění Cu	kv		0,785
kruhový vodič ? (0 / 1)		if hv=sv	1
průřez =plocha vodiče (mm <sup>2</sup> )	Sv		0,98
průřez =plocha vodiče (m <sup>2</sup> )	Sv		9,85E-07
plocha cívky, jen Cu (mm <sup>2</sup> )	Sc Cu	$N * Sv$	92,15
plocha cívky, vč. činitele plnění (mm <sup>2</sup> )	Sc	$kv / Sc Cu$	117,39
plocha okna jádra pro vinutí (mm <sup>2</sup> )	S okna	$m * c / 2$	170
plocha okna kostry pro vinutí (mm <sup>2</sup> )	S okna k	$(m-n1)*(c-2*n1) / 2$	129,5
naplnění okna (%)			0,91
proudová hustota (A/mm <sup>2</sup> )	J	$I / Sv$	4,06
magnetický tok (Wb)	fi	$Um / Rm$	1,88E-04
magnetická indukce	B (T)	$fi / Sm$	0,448
indukčnost 1f	L(mH)		4,400
kmitočet (Hz)	f		50
reaktance (Ω)	XL	$2pi * f * L$	1,4
napětí AC (V)	Uac	$XL * I$	5,5
jalový výkon 1f (Var)	Q1	$Uac * I$	22,1
jalový výkon 3f (Var)	Q3	$3 * Q1$	66,3
objem Fe jádra 1f (mm <sup>3</sup> )	V Fe1f	$d1 * c * h1$	7140
tloušťka kostry cívky (mm)	n1		1,5
délka vodiče - 2x mezi jádry (mm)	L1	$2x(hv * Nv/2 + 2*n1 + h1)$	56,96
délka vodiče - 2x vně jader (mm)	L2	$2x(hv * Nv/2 + 2*n1 + d1)$	54,96
délka vodiče - 4x oblouk (mm)	L3	$2*pi*(hv * Nv/2)$	28,13
délka závitu (mm)	L	$L1+L2+L3$	140,05
délka vodiče 1f (m)	Lv	$L*N*1e-3$	13,11
objem vodiče 1f (mm <sup>3</sup> )	Vcu 2	$Sv * Lv * 1e3$	12906,39
hmotnost vodiče 1f (kg)	m Cu 2 1f	$ro * Vcu 2 * 1e-9$	0,11
<b>hmotnost Cu 3f (kg)</b>	m Cu 2 3f	$3x mCu2 1f$	<b>0,34</b>
odpor vodiče 1f (Ohm)	R1f 20oC	$0,0178 x Lv / Sv mm2$	0,237
teplota vinutí (střední) (°C)	theta		140
odpor vodiče 1f (Ω)	R1f 140oC	$R1f 20oC x (1+0,004 x (theta - 20))$	0,351
ztrátový výkon 1f (W)	dP	$R1f 140oC x I^2$	5,61
přibližný povrch pro chlazení (cm <sup>2</sup> )	S vent	$(a + 2 x d1 + h1) x c x 2$	47,2
přibližné oteplení (K)	dt	$dP/11,3e-4/Svent$	41,2

Tabulka 2: Analytický návrh tlumivky C (4mH/4A)

## 4.2 Realizace konstrukce

### 4.2.1 Cívky

Pro jednotlivé cívky tlumivky u varianty značené písmenem B jsme použili značení B1-B2-B3, počet závitů každé ze tří cívek u prvotního návrhu je totožný a činí 66 závitů s průměrem izolovaného vodiče 1,25 mm. Cívky pro variantu tlumivky C byly značeny symbolikou C1-C2-C3, pro tuto variantu u prvotního návrhu bylo použito 94 závitů s průměrem izolovaného vodiče 1,12 mm.

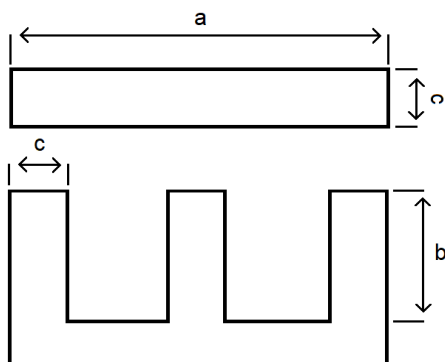
Výroba cívek byla provázena několika problémy. V katalogu nebyla nalezena vhodná kostra, která by disponovala požadovanými rozměry. Z toho důvodu byla vybrána kostra EI 60/21/1 od firmy Weisser, která měla dostatečné rozměry k tomu, abychom ji byli schopni nasadit na listěné E jádro. Její výška byla větší než potřebná a činila 39 mm. Na takto vysokých kostrách byla možnost provedení úpravy a to takové, že za pomoci dvou řezů byla kostra rozdělena na tři díly, přičemž prostřední díl nebyl nadále potřeba. Smirkovým papírem byly odstraněny otřepy u obou konců, jejichž součástí jsou čela. Následně tyto části s čely byly nasazeny na navíjecí trn a slepeny k sobě, takto nově vzniklá kostra byla přibližně velká 22,4 mm. Spojení proběhlo na navíjecím trnu, aby byla zachována osa kostry. Lepidlo však nedisponovalo dostatečnou pevností, a proto bylo nakonec spojení uskutečněno s využitím mikropájkky. A to tak, že pomocí ní byly nataveny obě strany kostry, které se následně spojily dohromady. Před nasazením kostry na navíjecí trn, byl pomocí WD spreje namazán trn, aby bylo usnadněno stahování hotových cívek z navíjecího trnu. Lakovaný vodič spadl do třídy izolace F 155 °C. Během navíjení bylo potřeba závity „sklepávat“ pro lepší vměstnání závitů. Během této procedury však u dvou koster ze šesti dokonce i pájený spoj povolil a zhotovení koster a navinutí vinutí se muselo opakovat. U našich vzorků nebyla provedena impregnace, aby nebyl omezen odvod tepla (Jouleových ztrát), když je chlazení zprostředkováváno pouhým přirozeným prouděním vzduchu. Provizorně byly vývody cívek přilepeny lepící páskou, aby se zamezilo odvíjení a povolání závitů. Tyto vývody z cívek jsou delší, než je potřeba, aby bylo docíleno pružnosti vývodu a dalo se



s nimi dobře manipulovat. Jejich délka činí 10-15 cm. Z konců vývodu cívek byl za pomoci nože stažen izolační lak v délce 2,5 cm, vodič byl následně ještě oškrábán, abychom předešli výskytu zbytku izolace a nedocházelo tak ke špatnému kontaktu ve svorkovnici, což by zmenšilo plochu pro průtok proudu a zvětšilo přechodový odpor v daném místě. To by následně zvětšilo i ztráty v daném místě a docházelo by k nárůstu teploty ve svorkovnici.

#### 4.2.2 EI jádro

Jádro bylo konstruováno z EI izolovaných plechů, které jsou v katalogu firmy WAASNER značeny jako 3UI 60 / EI 100 /100. Tyto plechy mají míry  $a=100$  mm,  $b=60$  mm,  $c=20$  mm a tloušťku 0,35 mm. Udávaná magnetická indukce námi použitých plechů byla 1,7 T. Plechy byly k sobě přišroubovány s využitím šroubů typu M3x40 a izolačních plastových hříbků. Tyto hříbků byly použity pro vycentrování železných šroubů uprostřed otvorů, které se nacházely ve všech plechách, aby nedošlo vinou spojovacích šroubů k jejich vodivému spojení. Kdyby k těmto vodivým spojení došlo, způsobilo by to zvětšení vířivých proudů. Všechny tři cívky jsou samostatně nasunuty na tyto tři sloupky E jádra.



Obr 6: Míry EI plechů

## 5 Výsledky praktického měření

### 5.1 Značení v průběhu měření

Z důvodu lepší orientace mezi naměřenými daty byl zaveden kód obsahující několik symbolů, přičemž každý symbol popisuje různé změny na konstrukci tlumivky.

L BZrx 2mH/6A

L.....Vzduchová mezera

B.....Varianta vinutí tlumivky

Z.....Snížení vinutí cívek

r.....Zkrácené železné E plechy vodním paprskem

x.....Překlenutá vzduchová mezera

2mH.....Požadovaná indukce

6A.....Jmenovitá hodnota proudu

## 5.2 Měření na tlumivkách B a C s nezkrácenými EI jádry

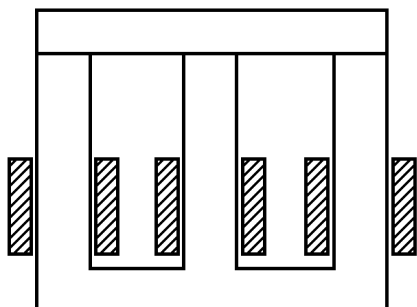
V průběhu těchto měření byla pro konstrukci tlumivek používána původní nezkrácená jádra z EI plechů značených 3UI 60 / EI 100 /100 s námi navinutými cívkami. Varianty B a C se mezi sebou lišily pouhým počtem závitů a tloušťkou použitého vodiče při navíjení cívek. Cívky B měly 66 závitů, každá s průměrem drátu 1,25 mm a cívky C 94 závitů, každá s průměrem vodiče 1,12 mm. Během měření byl k získání požadovaných dat používán osciloskop s napěťovými a proudovými sondami.

### 5.2.1 Měření na tlumivkách bez vzduchové mezery

Během tohoto měření byla jádra E a I na sebe přímo vložena, což způsobilo uzavření magnetického obvodu. Jádro I, které bylo položeno na jádro E, bylo zatíženo s využitím 3kg závaží, které působilo na magnetický obvod gravitační silou 30 N, což také vyplývá ze vzorce 11.

$$F_g = m * g \quad (11)$$

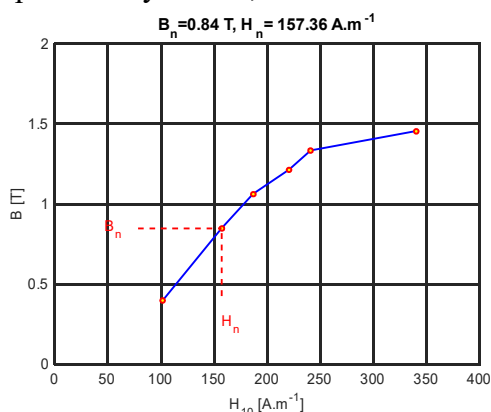
Díky tomuto závaží jsme omezili vibrace tlumivky a také zmenšili zbytkovou vzduchovou mezeru mezi částmi jádra E a I na minimum. V tomto případě byla vzduchová mezera způsobena pouhými nedokonalostmi hran plechů a jejich neúplně přesnému sklepaní. Vibrace jsou způsobeny tím, že tlumivkou prochází střídavý proud, který způsobuje přerušované působení elektromagnetické síly na I jádro, které je touto silou střídavě přitahováno. Pokud by tlumivkou procházel stejnosměrný proud, chovala by se poté jako obyčejný elektromagnet, který přitahuje pohyblivou část magnetického obvodu, které se říká také jinak kotva.



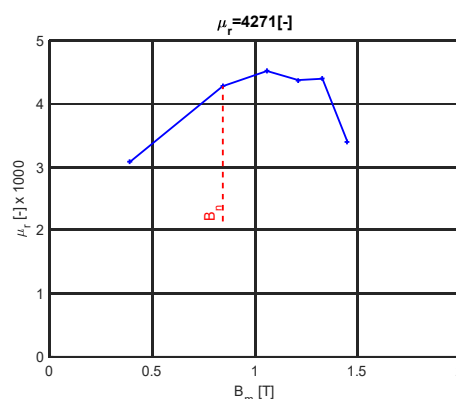
Obr 7: Tlumivka s nezkráceným E jádrem bez vzduchové mezery

Tato konstrukce tlumivky je vlastně transformátor a měření, které na ní bude probíhat je vlastně měření na transformátoru naprázdno, díky kterému dokážeme zjistit magnetizační proud a ztráty. Tento magnetizační proud je proud, který dokáže vybudit magnetické pole při jmenovitém napětí. Z výpočtů byla navržena hodnota indukce  $B$  na 0,78 T, při které nabývá napětí jmenovité hodnoty při předpokladu, že se obvod bude sytit lineárním způsobem. Což se projevuje lineárním průběhem  $B$ - $H$  charakteristiky obvodu.

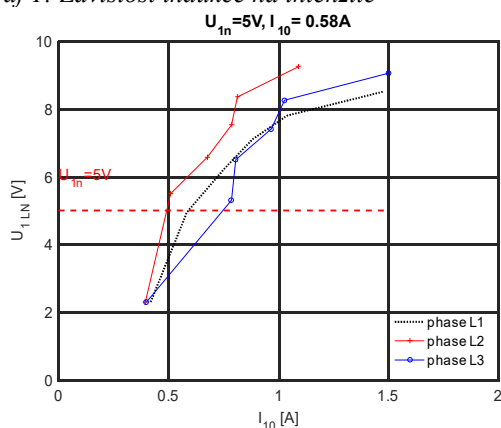
Z výsledků měření na tlumivce varianty B naprázdno vyplývá, že pracovní bod se nachází v lineární části průběhu závislosti indukce na intenzitě, která je znázorněna v grafu 1. To znamená, že sycení magnetického obvodu je v pořádku. Magnetizační proud má velikost 0,58 A, jak je vidět v grafu 3 při jmenovitém napětí 5 V. Z grafu číslo 5 lze vyčíst, že při jmenovitém napětí jsou ztráty v železe přibližně 10krát větší než Jouleovy ztráty. Jouleovy ztráty dosahují 0,13 W, ztráty v železe 1,1 W a celkové ztráty naprázdno vychází 1,23 W.



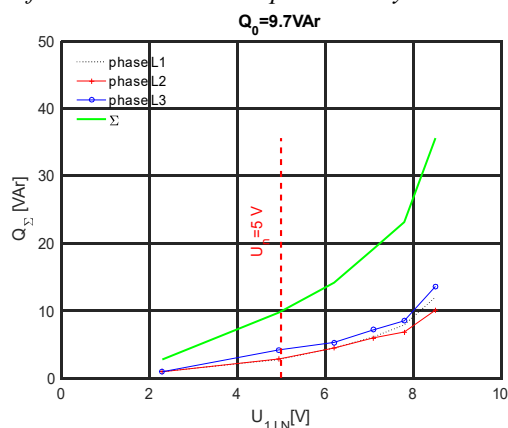
Graf 1: Závislost indukce na intenzitě



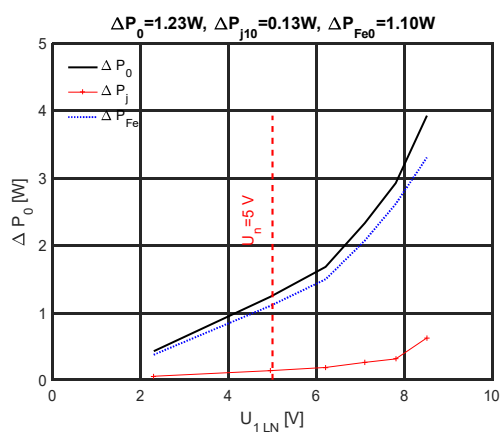
Graf 2: Závislost relativní permeability na intenzitě



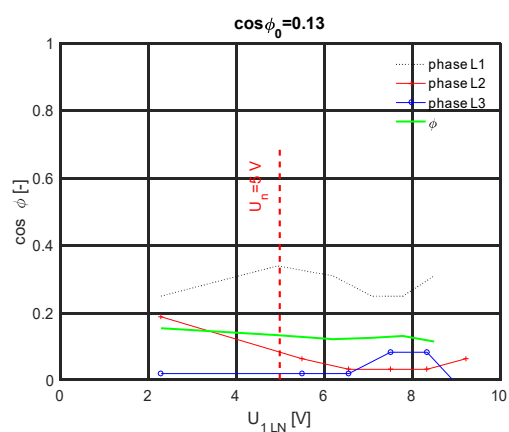
Graf 3: Závislost napětí na proudu naprázdno



Graf 4: Závislost jalového výkonu na napětí



Graf 5: Závislost ztrát na napětí

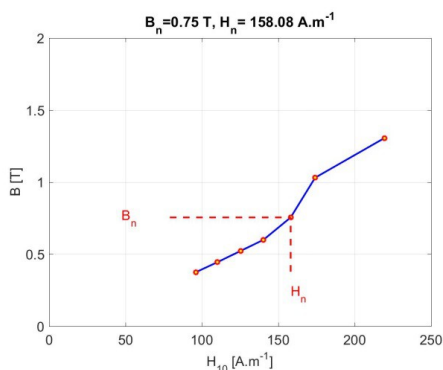


Graf 6: Závislost účinníku na napětí

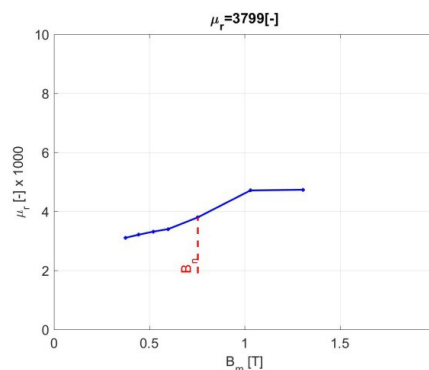
$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$U_3$ (V)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$P_3$ (W)	$P$ (W)	$Q_1$ (VAR)	$Q_2$ (VAR)	$Q_3$ (VAR)	$Q$ (VAR)	$P_{j1}$ (W)	$P_{j2}$ (W)	$P_{j3}$ (W)	$P_j$ (W)	$P_m$ (W)	$P_{Fe}$ (W)	$\text{Cos}(\varphi_1)$ (-)	$\text{Cos}(\varphi_2)$ (-)	$\text{Cos}(\varphi_3)$ (-)	$\text{Cos}(\varphi)$ (-)
2	2	2	0.42	0.40	0.40	0	0	0	0	1	1	1	3	0.02	0.02	0.02	0.05	0	0	0.25	0.19	0.02	0.15
5	6	5	0.58	0.51	0.79	1	0	0	1	3	3	4	10	0.04	0.03	0.07	0.13	0	1	0.34	0.06	0.02	0.13
6	7	7	0.75	0.68	0.81	1	0	0	2	4	4	5	14	0.06	0.05	0.07	0.18	0	1	0.31	0.03	0.02	0.12
7	8	7	0.88	0.79	0.97	2	0	1	2	6	6	7	19	0.09	0.07	0.10	0.26	0	2	0.25	0.03	0.08	0.12
8	8	8	1.04	0.81	1.03	2	0	1	3	8	7	8	23	0.12	0.07	0.12	0.31	0	3	0.25	0.03	0.08	0.13
9	9	9	1.48	1.09	1.50	4	1	1	4	12	10	14	36	0.24	0.13	0.25	0.62	0	3	0.31	0.06	0.04	0.11

Tabulka 3: Naměřené a dopočítané hodnoty tlumivky B naprázdno

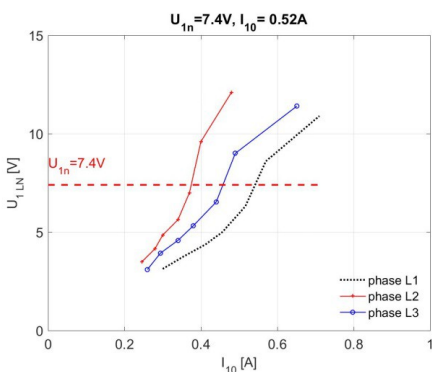
Z výsledků měření na tlumivce varianty C naprázdno vyplývá, že pracovní bod se nachází v lineární části průběhu závislosti indukce na intenzitě, která je znázorněna v grafu 7. To znamená, že sycení magnetického obvodu je v pořádku. Magnetizační proud má velikost 0,52 A, jak je vidět v grafu 9 při jmenovitém napětí 7,4 V. Z grafu číslo 11 lze vyčíst, že při jmenovitém napětí jsou ztráty v železe přibližně 6krát větší než Jouleovy ztráty. Jouleovy ztráty  $\Delta P_j$  dosahují 0,12 W, ztráty v železe  $\Delta P_{Fe}$  0,69 W a celkové ztráty naprázdno vychází 0,81 W. U varianty C dosahují  $\Delta P_j$  i  $\Delta P_{Fe}$  menších hodnot oproti variantě B, jelikož jsou napájeny menším proudem.



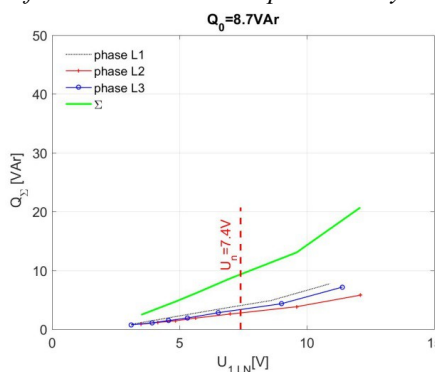
Graf 7: Závislost indukce na intenzitě



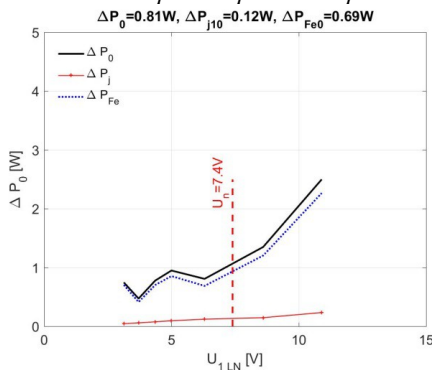
Graf 8: Závislost relativní permeability na intenzitě



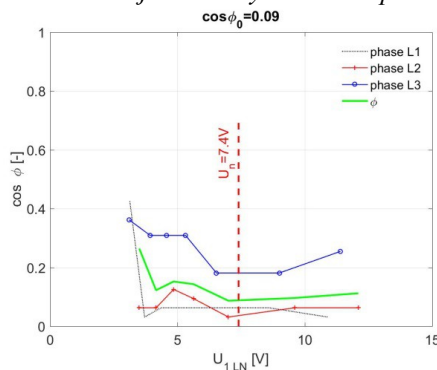
Graf 9: Závislost napětí na proudu naprázdno



Graf 10: Závislost jalového výkonu na napětí



Graf 11: Závislost ztrát na napětí



Graf 12: Závislost účinníku na napětí



U <sub>1</sub> (V)	U <sub>2</sub> (V)	U <sub>3</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>3</sub> (W)	P (W)	Q <sub>1</sub> (VAR)	Q <sub>2</sub> (VAR)	Q <sub>3</sub> (VAR)	Q (VAR)	P <sub>j1</sub> (W)	P <sub>j2</sub> (W)	P <sub>j3</sub> (W)	P <sub>j</sub> (W)	P <sub>m</sub> (W)	P <sub>Fe</sub> (W)	Cos(φ <sub>1</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>2</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>3</sub> ) (-)	Cos(φ) (-)
3	4	3	0.30	0.25	0.26	0	0	0	1	1	1	1	2	0.02	0.01	0.01	0.04	0	1	0.43	0.06	0.36	0.26
4	4	4	0.35	0.28	0.29	0	0	0	0	1	1	1	4	0.02	0.02	0.02	0.06	0	0	0.03	0.06	0.31	0.12
4	5	5	0.41	0.30	0.34	0	0	0	1	2	1	1	5	0.03	0.02	0.02	0.08	0	1	0.06	0.13	0.31	0.15
5	6	5	0.46	0.34	0.38	0	0	1	1	2	2	2	6	0.04	0.02	0.03	0.09	0	1	0.06	0.09	0.31	0.14
6	7	7	0.52	0.37	0.44	0	0	1	1	3	3	3	9	0.05	0.03	0.04	0.12	0	1	0.06	0.03	0.18	0.09
9	10	9	0.57	0.40	0.49	0	0	1	1	5	4	4	13	0.07	0.03	0.05	0.15	0	1	0.06	0.06	0.18	0.10
11	12	11	0.71	0.48	0.65	0	0	2	2	8	6	7	21	0.10	0.05	0.09	0.23	0	2	0.03	0.06	0.25	0.11

Tabulka 4: Naměřené a dopočítané hodnoty tlumivky C naprázdno

## 5.2.2 Měření na tlumivkách se vzduchovou mezerou

Druhé měření bylo provedeno na tlumivce s pozměněnou konstrukcí jádra a to takovou obměnou, že byla vytvořena ideální vzduchová mezera o velikosti 1mm. Námí zvolený tvar plechů je nejideálnější pro zkonstruování jádra se vzduchovou mezerou, jelikož jde vytvořit pouhým uložením vložek mezi jádro E a I. Zatímco u jiných druhů jader musí být například zkrácen střední sloupek [4]. Hlavním účelem experimentu bylo zjištění velikosti indukčnosti a jak se chová indukčnost při protékajícím proudu až do hodnoty proudu  $I_{\text{peak}}$ . Vzduchové mezery v magnetickém obvodu se využívá pro úpravy vlastností magnetického obvodu. Čím větší je vzduchová mezera, tím větší je magnetický odpor. To vede k menší indukčnosti, magnetickému toku a magnetické indukci jak je i vidět na vzorcích 12, 13, 14, 15, 16 a 17. To, že díky vzduchové mezeře narůstá magnetický odpor jádra, vysvětluje porovnání vzorců 12 a 13. Vyplývá z toho totiž, že pro stejné rozměry je menší magnetický odpor u železného jádra, jelikož je jmenovatel větší díky relativní permeabilitě  $\mu_r$ , která nabývá hodnot větších než jedna u používaných feromagnetických materiálů pro konstrukci jádra. Dalším důvodem pro využívání vzduchové mezery je úprava vlastností magnetického obvodu, které se stávají více lineární [3]. To způsobuje vzduch s jeho lineárními vlastnostmi. Vzduchové mezery se využívá z důvodu omezení zkreslení, teplotní závislosti permeability, ztrát atd. Účinek takové vzduchové mezery je závislý na poměru délky vzduchové mezery k velikosti celkové magnetické siločáry. Pokud se snažíme jádra E a I na sebe co nejlépe sesadit, aby vznikla co nejmenší možná vzduchová mezera, tak bude tato mezera stejně velká jak pro velké, tak pro malé plechy, ze kterých je zkonstruováno jádro. Pokud je jádro pečlivě seskládáno dohromady z transformátorových plechů, tak se udává, že vzduchová mezera může být kolem 2  $\mu\text{m}$ . Z toho vyplývá, že taková vzduchová mezera se stejnými parametry bude více ovlivňovat malá zařízení. Ve vytvořené vzduchové mezeře dochází k rozptylu indukčního toku. Vinutí, které se nachází ve větší vzdálenosti od středu cívky, je více ovlivňováno tímto rozptylovým indukčním tokem, s čímž souvisí i změna činitele indukčnosti  $A_L$  [4].

$$R_{mFe} = \frac{1}{\mu_0 * \mu_r} * \frac{l}{S} \quad (12)$$

$$R_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} * \frac{l}{S} \quad (13)$$

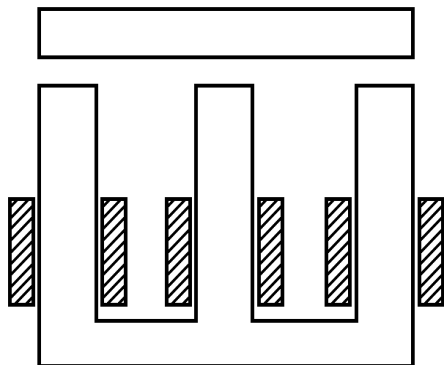
$$R_{mcelk} = R_{mFe} + R_{\delta} \quad (14)$$

$$L = \frac{N^2}{R_{mcelk}} \quad (15)$$

$$\Phi = \frac{U_m}{R_{mcelk}} \quad (16)$$

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (17)$$

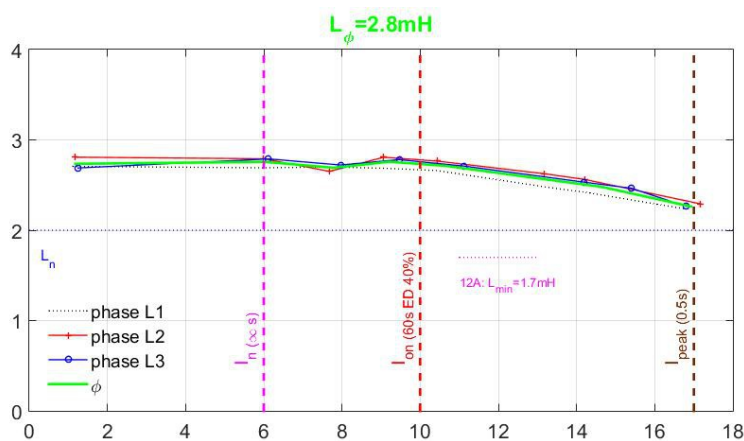
Pro vytvoření této vzduchové mezery byly využity text-gumoidové vložky, které však měly tloušťku pouhých 0,95 mm, z toho důvodu bylo ještě zapotřebí využít přeloženého kancelářského papíru, abychom docílili stejné tloušťky, jaké budou mít finální distanční vložky. S využitím digitálního posuvného měřítka jsme byli schopni změřit, že vzniklá vzduchová mezera bude mít rozměr 1,05 mm. Následně touto kombinací byl podložen každý ze tří sloupků tlumivky v místech dotyku jader E a I. Takto vzniklá tlumivka se vzduchovou mezerou o velikosti 1,05 mm byla zatížena závažím o stejné hmotnosti, jako tomu bylo i u předchozího měření, které působilo na soustavu gravitační silou



Obr 8: Tlumivka s nezkráceným E jádrem a se vzduchovou mezerou

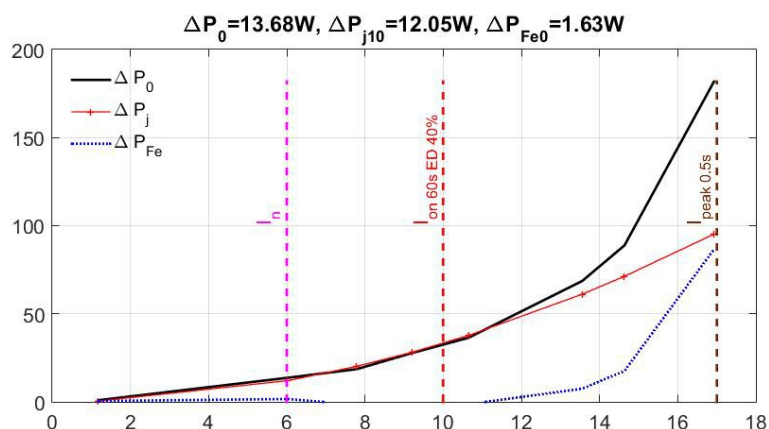
30 N. Jak je vidět na obrázku číslo 8, bylo opět využito originálního nezkráceného jádra s výškou sloupků 60 mm.

V průběhu měření na tlumivce B se vzduchovou mezerou byla potvrzena hodnota jmenovitého napětí 5 V. A to tak, že na tuto hodnotu napětí tlumivka reagovala protékajícím proudem o jmenovité hodnotě 6 A, jak je i zvýrazněno v tabulce číslo 5.



Graf 13: Indukčnost tlumivky L B 2mH/6A v závislosti na protékajícím proudu

Z grafu 13 je patrný průběh indukčnosti tlumivky v závislosti na protékajícím proudu. Požadavky na tlumivku B jsou takové, aby indukčnost byla ideálně 2 mH v rozmezí hodnot protékajícího proudu  $I_n$  až  $I_{peak}$ . Dovolená nevyváženost mezi fázemi je +/- 5 %. Námi zjištěná průměrná hodnota indukčnosti při jmenovitém proudu je 2,8 mH, což je velmi blízko požadované hodnotě. A indukčnost se do hodnoty  $I_{on}$  chová téměř konstantně, až po překročení této hodnoty začíná mírně klesat. Průběh indukčnosti, jak je vidět z grafu, je velmi příznivý a na to, že se jedná o první měření indukčnosti navrženého prototypu, tak je velikost velmi blízká požadované hodnotě a ne příliš proměnná.

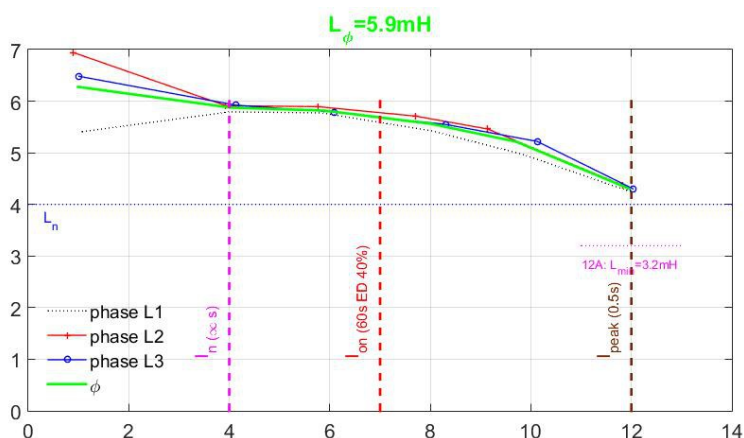


Graf 14: Ztráty tlumivky L B 2mH/6A v závislosti na protékajícím proudu

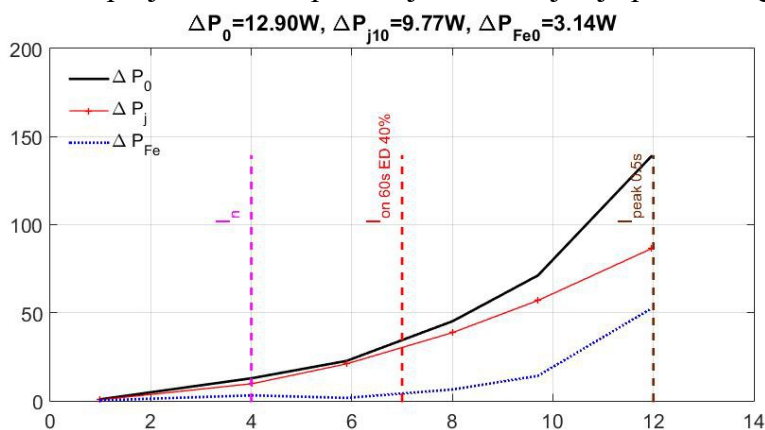
Graf číslo 14 popisuje ztráty v železe, Jouleovy a celkové. Ztráty v železe jsou zanedbatelné oproti Jouleovým a také nezávislé na proudu. Následně kolem proudu 14 A začínají strmě narůstat a při hodnotě proudu  $I_{\text{peak}}$  dosáhnou téměř totožné hodnoty jako ztráty Jouleovy. Tento strmý nárůst ztrát v železe je způsobován přesycováním magnetického obvodu, které vyvolá i nárůst magnetického odporu jádra, což způsobí nárůst ztrát v železe. Při jmenovitém protékajícím proudu dosahují Jouleovy ztráty  $\Delta P_J$  hodnoty rovné 12,05 W a  $\Delta P_{Fe}$  1,63 W.

U <sub>1</sub> (V)	U <sub>2</sub> (V)	U <sub>3</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>3</sub> (W)	P (W)	Q <sub>1</sub> (VAr)	Q <sub>2</sub> (VAr)	Q <sub>3</sub> (VAr)	Q (VAr)	P <sub>J1</sub> (W)	P <sub>J2</sub> (W)	P <sub>J3</sub> (W)	P <sub>J</sub> (W)	P <sub>m</sub> (W)	P <sub>F<sub>0</sub></sub> (W)	Cos(φ <sub>1</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>2</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>3</sub> ) (-)	Cos(φ) (-)
1	1	1	1.12	1.17	1.25	0	0	0	1	1	1	1	3	0.14	0.15	0.17	0.46	0	0	0.25	0.40	0.14	0.28
5	5	5	5.95	6.00	6.12	4	5	5	14	30	31	33	94	3.92	3.99	4.15	12.05	0	2	0.14	0.14	0.14	0.15
7	6	7	7.72	7.68	7.96	6	6	6	19	51	49	56	155	6.60	6.54	7.01	20.15	0	2	0.13	0.13	0.11	0.12
8	8	8	9.10	9.07	9.46	9	9	10	28	70	73	77	220	9.17	9.11	9.91	28.19	0	0	0.13	0.13	0.13	0.13
9	9	9	10.43	10.43	11.11	11	12	13	36	91	94	103	288	12.04	12.05	13.66	37.76	0	1	0.13	0.13	0.13	0.13
10	11	11	13.28	13.18	14.20	30	32	7	69	135	141	156	432	19.52	19.25	22.32	61.09	0	7	0.22	0.22	0.04	0.16
11	12	12	14.30	14.21	15.40	38	32	19	89	152	161	177	490	22.64	22.37	26.25	71.26	0	18	0.24	0.19	0.11	0.18
12	13	12	16.80	17.17	16.81	56	65	61	182	192	205	191	588	31.24	32.66	31.28	95.19	0	87	0.28	0.30	0.30	0.30

Tabulka 5: Naměřené a dypočítané hodnoty tlumivky B se vzduchovou mezerou (L B)

Graf 15: Indukčnost tlumivky  $L C 4mH/4A$  v závislosti na protékajícím proudu

Za pomoci využití grafu číslo 15, je patrný průběh indukčnosti v závislosti na připojeném proudu tlumivky varianty C. Na první pohled je jasné, že velikost dopočtené indukčnosti ze získaných dat je vzdálenější od požadované hodnoty, než-li tomu je u varianty B. Při protékajícím jmenovitém proudu u varianty B jsme se lišili indukčností o pouhých 0,8 mH, avšak nyní u varianty C se lišíme o více jak dvojnásobek oproti variantě B a to o 1,9 mH. Průběh není konstantní v požadovaném rozmezí proudu a je od počátku klesající. To je způsobeno přesycováním plechů kvůli větší indukčnosti způsobené větším počtem závitů. U této varianty je ihned po prvním měření indukčnosti patrné, že bude potřeba změn pro přiblížení průběhu k požadavku. Dosažená hodnota průměrné indukčnosti při jmenovitém proudu je 5,9 mH, jak je patrné i z grafu.

Graf 16: Ztráty tlumivky  $L C 4mH/4A$  v závislosti na protékajícím proudu

S využitím grafu číslo 16 můžeme vidět, že ztráty v železe začaly narůstat přibližně při proudu  $I_{on}$  a při stejné hodnotě se tedy začaly i přesycovat plechy magnetického obvodu. Při protékajícím jmenovitém proudu dosahují ztráty Jouleovy 9,77 W

a v železe 3,14 W. Oproti variantě B dosahuje větších  $\Delta P_{Fe}$ , ale  $\Delta P_j$  jsou menší. Je to způsobeno tím, že variantou značenou písmenem C protéká proud o menších hodnotách, a proto i Jouleovy ztráty mají naměřené menší hodnoty, jelikož jsou závislé na kvadrátu proudu, jak je i patrné ze vzorce 1. A jelikož indukčnost je zde větší oproti předchozí variantě tlumivky díky většímu počtu navinutých závitů, tak dochází k větší indukci indukovaného napětí, což vyplývá ze vzorce 18. Toto indukované napětí následně vybudí indukované vířivé proudy v plechách jádra, které znesnadňují průchod magnetického toku, což způsobuje větší ztráty v železe vířivými proudy.

$$U_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (18)$$

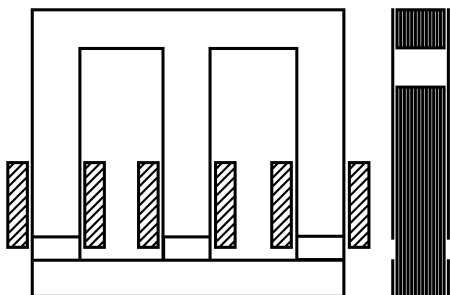


U <sub>1</sub> (V)	U <sub>2</sub> (V)	U <sub>3</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>3</sub> (W)	P (W)	Q <sub>1</sub> (VAr)	Q <sub>2</sub> (VAr)	Q <sub>3</sub> (VAr)	Q (VAr)	P <sub>j1</sub> (W)	P <sub>j2</sub> (W)	P <sub>j3</sub> (W)	P <sub>j</sub> (W)	P <sub>m</sub> (W)	P <sub>Fe</sub> (W)	Cos(φ <sub>1</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>2</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>3</sub> ) (-)	Cos(φ) (-)
2	2	2	1.07	0.90	1.01	0	0	0	1	2	2	2	6	0.23	0.16	0.21	0.60	0	0	0.13	0.13	0.21	0.16
7	7	8	4.00	3.93	4.13	5	4	4	13	29	29	32	89	3.22	3.10	3.45	9.77	0	3	0.17	0.14	0.12	0.15
11	11	11	5.84	5.77	6.08	7	7	8	23	62	62	66	189	6.86	6.69	7.47	21.01	0	2	0.12	0.12	0.12	0.12
14	14	14	8.02	7.71	8.30	19	14	13	45	109	106	117	332	12.93	11.95	13.92	38.79	0	6	0.17	0.13	0.11	0.14
15	16	16	9.84	9.14	10.13	31	23	17	71	149	142	161	453	19.46	16.79	20.73	56.98	0	14	0.21	0.16	0.11	0.16
16	16	16	12.01	11.83	12.03	54	54	30	139	186	186	192	565	28.99	28.13	29.23	86.36	0	52	0.28	0.28	0.16	0.24

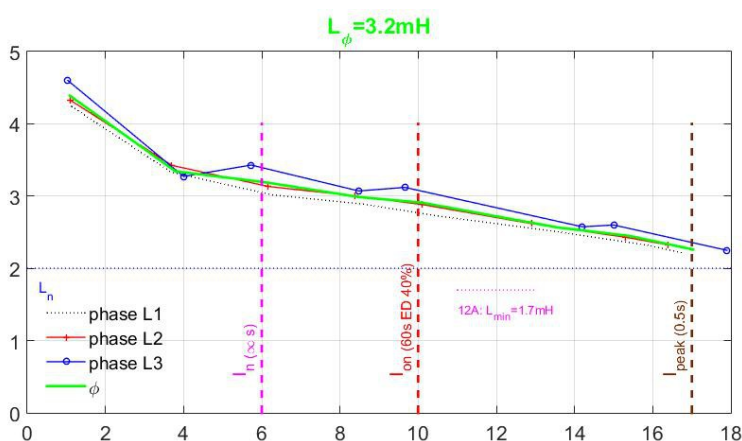
Tabulka 6: Naměřené a dopočítané hodnoty tlumivky C se vzduchovou mezerou (L C)

### 5.2.3 Měření na tlumivkách s překlenutou vzduchovou mezerou 1 mm

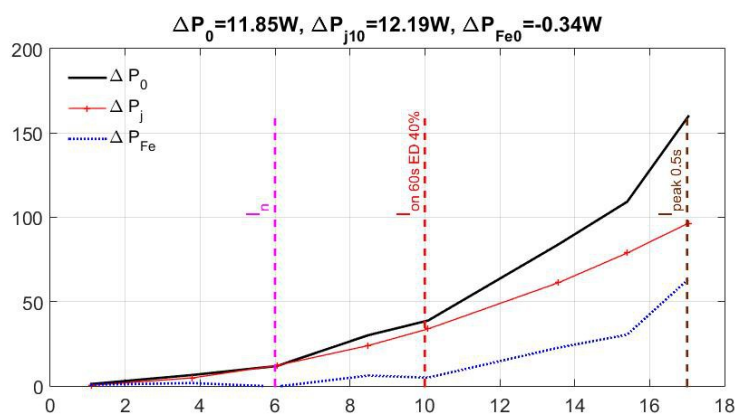
V průběhu předchozího měření jsme měřili na tlumivce se vzduchovou mezerou, která se nám povedla reálně vytvořit o velikosti 1,05 mm, namísto požadovaného 1 mm. Při tomto měření zůstane velikost této vzduchové mezery stejná a bude také jako v předchozím případě vytvořena s využitím text-gumoidových vložek a přeloženého kancelářského papíru. Tato mezera v magnetickém obvodu nebude ideální, ale překlenutá. Toto překlenutí bude uskutečněno otočením dvou postranních E plechů. Jelikož se tlumivka bude nacházet v omezeném prostoru, tak není možné použít stahovací konstrukci, jak je u tohoto typu jádra běžné. Kvůli těmto faktům jsme se přiklonili ke vzduchové mezeře, která bude překlenuta postranními plechy. Díky tomuto zákroku do stávající konstrukce nám sice pro malé proudy naroste indukčnost cívky kvůli poklesu magnetického odporu, než dojde k přesycení krajních plechů, ale také bude cívka díky tomu samodržitelná a nebude potřeba stahovací konstrukce. Tento krok se nám osvědčil a tlumivka držela pohromadě a nebylo zapotřebí využívat 3 kg závaží, jak tomu bylo při předchozích experimentech nutné. E plechy, které jsme využívali, byly jako u dosavadních měření původní tzn. nezkrácené velikosti. Vibrace, které způsobovaly nepříjemný hluk v průběhu dřívějších experimentů, byly při tomto měření omezeny na snesitelnou hlasitost. Hlavním cílem tohoto měření bylo zjištění toho, jak se nám změnila indukčnost cívky po překlenutí vzduchové mezery plechy E.



Obr 9: Tlumivka s nezkráceným E jádrem a s překlenutou vzduchovou mezerou

Graf 17: Indukčnost tlumivky  $L Bx 2mH/6A$  v závislosti na protékajícím proudu

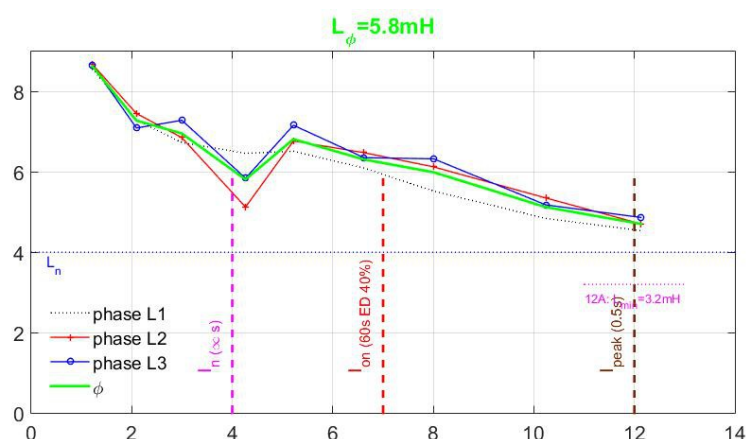
Z grafu číslo 17 je patrné, že překlenutí dvěma plechy způsobilo navýšení indukčnosti, jelikož se nám skrze ně uzavřel tok, což zmenšilo magnetický odpor v místě vzduchové mezery. Zvýšená indukčnost při protékajícím jmenovitém proudu byla nyní 3,2 mH a průběh pro celé zaznamenané rozmezí proudů byl klesající. Největší nárůst indukčnosti jde zaznamenat pro malé proudy oproti grafu číslo 13. S narůstajícím proudem se začínají plechy, které překlenují vzduchovou mezeru přesycovat, a jejich magnetický odpor roste a tím pádem klesá indukčnost. Toto vyplývá ze vzorce číslo 15. Čím by bylo více plechů, kterými bychom překlenuli vzduchovou mezeru, tím by bylo zapotřebí většího proudu, aby došlo k přesycení těchto plechů a tím pádem k poklesu indukčnosti.

Graf 18: Ztráty tlumivky  $L Bx 2mH/6A$  v závislosti na protékajícím proudu

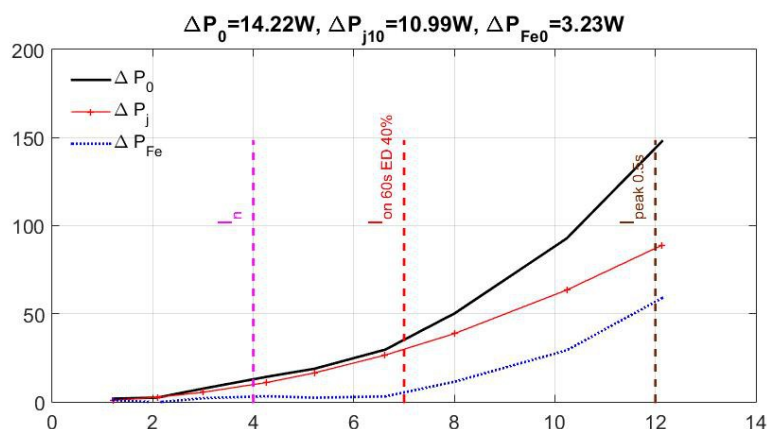
V grafu číslo 18 je vidět v porovnání s tlumivkou bez překlenuté mezery, že Jouleovy ztráty zůstaly stejné jako i při protékajících 17 A. Ztráty v železe však poklesly. To je převážně způsobeno nesprávně nastaveným protékajícím proudem fázemi.

U <sub>1</sub> (V)	U <sub>2</sub> (V)	U <sub>3</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>3</sub> (W)	P (W)	Q <sub>1</sub> (VAr)	Q <sub>2</sub> (VAr)	Q <sub>3</sub> (VAr)	Q (VAr)	P <sub>J1</sub> (W)	P <sub>J2</sub> (W)	P <sub>J3</sub> (W)	P <sub>J</sub> (W)	P <sub>m</sub> (W)	P <sub>Fe</sub> (W)	Cos(φ <sub>1</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>2</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>3</sub> ) (-)	Cos(φ) (-)
2	2	2	1.13	1.10	1.04	1	0	0	1	2	2	2	5	0.14	0.13	0.12	0.40	0	1	0.37	0.19	0.13	0.23
4	4	4	3.68	3.70	4.00	3	1	2	7	14	15	16	44	1.50	1.52	1.77	4.79	0	2	0.22	0.06	0.16	0.15
6	6	7	6.27	6.16	5.73	5	5	2	12	37	37	39	113	4.35	4.20	3.63	12.19	0	0	0.13	0.13	0.06	0.11
8	8	8	8.59	8.39	8.48	13	6	11	30	66	66	71	203	8.17	7.80	7.96	23.93	0	6	0.19	0.09	0.16	0.15
9	9	10	10.50	10.10	9.66	15	15	9	39	94	92	99	285	12.20	11.30	10.33	33.84	0	5	0.16	0.16	0.09	0.14
11	11	11	13.60	12.90	14.20	32	22	30	84	143	136	159	439	20.48	18.44	22.32	61.23	0	23	0.22	0.16	0.19	0.19
12	12	13	15.90	15.30	15.00	52	45	12	109	179	175	198	551	27.99	25.94	24.91	78.83	0	30	0.28	0.25	0.06	0.20
12	12	12	16.80	16.40	17.90	55	49	55	160	190	192	215	598	31.24	29.80	35.47	96.51	0	63	0.28	0.25	0.25	0.27

Tabulka 7: Naměřené a dopočítané hodnoty tlumivky B s překlenutou vzduchovou mezerou (L Bx)

Graf 19: Indukčnost tlumivky  $L Cx 4mH/4A$  v závislosti na protékajícím proudu

Jak tomu bylo i u varianty B, tak i u tlumivky C díky překlenuté vzduchové mezeře narostla indukčnost, jak je vidět v grafu číslo 19. A to převážně pro malé proudy. Jelikož nedošlo ještě k přesycení plechů, které překlenuly vzduchovou mezeru, tak se magnetický odpor pro malý proud zmenšil a narostla indukčnost. Po přesycení plechů, které překlenují vzduchovou mezeru, opět dochází k poklesu indukčnosti. Zaznamenaný velký pokles indukčnosti, ke kterému došlo kolem 4 A, způsobil nejspíše nesprávně odečtený fázový posun z osciloskopu, anebo HOLD osciloskopu v době poklesu. Pro takto sestavenou tlumivku při protékání jmenovitým proudem je průměrná indukčnost 5,8 mH, což není o tolik rozdílná hodnota oproti tomu, když nebyla překlenuta vzduchová mezeru. Průběh indukčnosti v měřeném rozmezí proudů je však mnohem více zubatý.

Graf 20: Ztráty tlumivky  $L Cx 4mH/4A$  v závislosti na protékajícím proudu

Z grafu číslo 20 vyplývá, že kolem 8 A se začalo přesycovat jádro tlumivky, jelikož

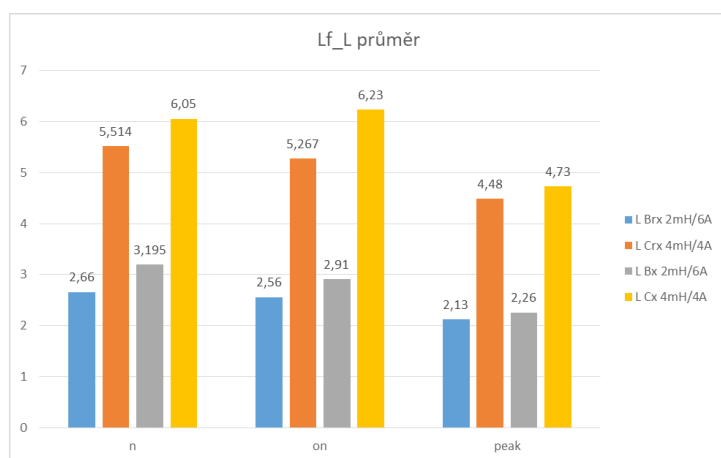
začaly narůstat i ztráty v železe. Při vyšších hodnotách proudu jsou Jouleovy ztráty podobné, ale ztráty v železe jsou o něco menší, než tomu bylo bez překlenuté vzduchové mezery. Při protékajícím jmenovitém proudu jsou Jouleovy ztráty  $\Delta P_j$  rovny 10,99 W a ztráty v železe  $\Delta P_{Fe}$  rovny 3,23 W. Což je v porovnání při hodnotách při jmenovitém proudu u tlumivky bez překlenutí vzduchové mezery téměř totožné. Malý rozdíl mezi nimi je převážně způsoben nepřesně nastaveným procházejícím proudem ve všech třech fázích.

U <sub>1</sub> (V)	U <sub>2</sub> (V)	U <sub>3</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>3</sub> (W)	P (W)	Q <sub>1</sub> (VAr)	Q <sub>2</sub> (VAr)	Q <sub>3</sub> (VAr)	Q (VAr)	P <sub>j1</sub> (W)	P <sub>j2</sub> (W)	P <sub>j3</sub> (W)	P <sub>j</sub> (W)	P <sub>m</sub> (W)	P <sub>Fe</sub> (W)	Cos(φ <sub>1</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>2</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>3</sub> ) (-)	Cos(φ) (-)
3	3	3	1.22	1.17	1.25	0	1	1	2	4	4	4	12	0.30	0.28	0.32	0.89	0	1	0.06	0.25	0.16	0.15
5	5	5	2.05	2.00	2.23	1	1	0	2	10	9	11	30	0.84	0.80	1.00	2.65	0	0	0.09	0.13	0.03	0.08
7	6	7	3.06	2.96	2.97	3	2	2	8	20	19	21	60	1.88	1.76	1.78	5.42	0	2	0.16	0.13	0.09	0.13
9	7	9	4.25	4.13	4.41	7	3	4	14	36	27	41	104	3.63	3.43	3.93	10.99	0	3	0.19	0.13	0.09	0.13
11	11	12	5.35	5.15	5.15	6	5	8	19	59	56	63	178	5.75	5.33	5.36	16.44	0	2	0.09	0.09	0.13	0.11
13	13	14	6.70	6.26	6.91	16	8	6	30	85	80	94	258	9.02	7.88	9.65	26.54	0	3	0.19	0.09	0.06	0.12
15	15	17	8.42	7.60	8.00	23	11	17	50	122	111	131	364	14.25	11.61	12.93	38.79	0	11	0.19	0.09	0.13	0.14
16	16	17	10.30	9.51	10.90	40	29	24	93	158	150	187	495	21.32	18.18	24.00	63.50	0	29	0.25	0.19	0.13	0.19
18	18	20	12.30	11.80	12.30	67	58	23	148	207	199	240	646	30.41	27.99	30.56	88.96	0	59	0.31	0.28	0.09	0.23

Tabulka 8: Naměřené a dopočítané hodnoty tlumivky C s překlenutou vzduchovou mezerou (L Cx)

### 5.3 Měření na tlumivkách B a C se zkrácenými EI jádry

Pro měření na zkráceném jádře je potřeba plechy E zkrátit. Mají totiž příliš velkou délku sloupků, jejichž velikost  $b$  je znázorněna na obrázku 6. Zákazník udal omezené prostory, ve kterých tlumivka bude pracovat a takto velké E jádro by nevyhovovalo. Z tohoto důvodu byly zkráceny plechy vodním paprskem na takovou velikost, aby sloupky jádra E nepřesahovaly přes kostry cívek a ušetřili jsme tím místo. Bohužel kvůli tomuto kroku vznikly železné ořepky v řezu, které by mohly způsobit vodivé propojení plechů mezi sebou. To by mohlo vést k tomu, že by došlo ke zvětšení vířivých proudů a tím pádem i ztrát v železe. Navýšení ztrát by se projevilo i na výsledné indukčnosti, která by poklesla. Z grafu číslo 21 je patrné, že indukčnost po zásahu o mnoho neklesla a tím pádem vířivé proudy o mnoho nenarostly. Z toho důvodu jsme se rozhodli, že dále nebudeme upravovat plechy, což by znamenalo odstranění ořepů. Metoda řezání vysokotlakým vodním paprskem byla zvolena z důvodu několika jeho výhod. Například síla, kterou vyvíjí na řezaný objekt je malá a tak nezpůsobuje mikrotrhliny v řezaném materiálu. Další výhodou, a tou nejdůležitější pro naši aplikaci je ta, že vytváří tzv. studený řez, který tepelně nenamáhá materiál, protože tepelné působení by mohlo způsobit poškození izolace plechů [6]. Takové tepelné namáhání by mohla například vyvinout kotoučová pila při řezání našich plechů. Jedinou nevýhodou bylo, že nám plechy v řezu kvůli použité vodě mírně narezly i přes to, že jsme plechy poctivě ořekli a následně dali sušit na topení. Jelikož došlo ke zmenšení magnetického



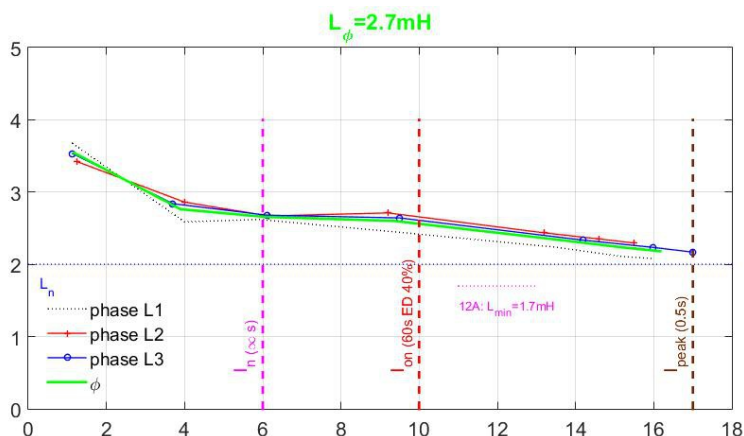
Graf 21: Porovnání indukčnosti tlumivky B i C před a po nařezání jádra E ve třech důležitých hodnotách proudu



jádra, ale velikost vzduchové mezery zůstala stejná, tak vliv této vzduchové mezery bude více ovlivňovat obvod s kratšími plechy, jelikož poměr vzduchové mezery a siločáry bude větší.

### 5.3.1 Měření na tlumivkách s překlenutou vzduchovou mezerou 1mm

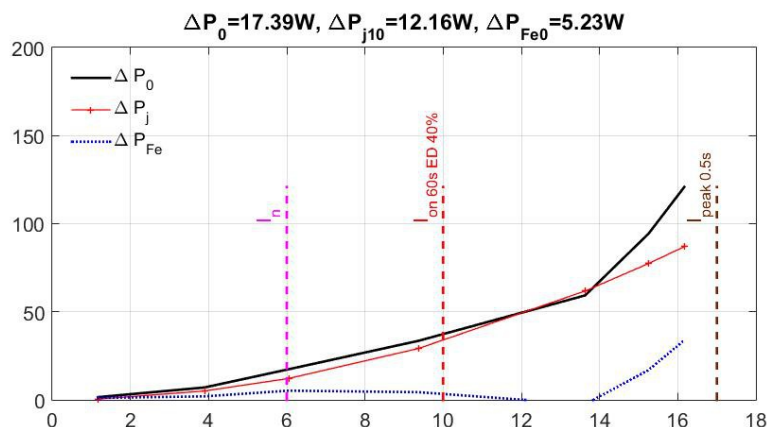
Během tohoto měření se bude měřit jako v předcházejícím měření na tlumivce s překlenutou vzduchovou mezerou o velikosti 1,05mm, ale jádro již bylo zkráceno, aby tlumivka měla požadované rozměry. Toto měření nám slouží ke zjištění toho, jaké změny parametrů tlumivky způsobí konstrukční změna ve formě zkrácení E plechů vodním paprskem.



Graf 22: Indukčnost tlumivky  $L$  Brx 2mH/6A v závislosti na protékajícím proudu

Grafické znázornění dopočtené indukčnosti po odřezání nadbytečné části E jádra je vyobrazeno v grafu číslo 22. Pokud budu porovnávat graf indukčnosti po zkrácení a před zkrácením jádra, mohu na první pohled vidět, že pokles indukčnosti v závislosti na proudu a sycení plechů není nyní tak skokový a probíhá plynuleji. To je pravděpodobně způsobeno tím, že magnetický obvod byl seskládán jinak, než tomu bylo před řezáním jádra a také tím, co jsem zmínil již dříve, že po zkrácení plechů a ponechání stejné vzduchové mezery má nyní vzduchová mezera větší vliv na magnetický obvod. Což se projevuje například tím, že se obvod lineárněji sytí a tím pádem lineárněji dochází i k poklesu indukčnosti díky vzduchové mezeře. Dopočtená průměrná indukčnost při jmenovitém proudu byla nyní 2,7 mH, což je velmi blízko požadavku. Při velikosti proudu  $I_{\text{peak}}$  indukčnost v závislosti na sycení poklesla na

2,17 mH. Z toho vyplývá, že pokles indukčnosti je mezi  $I_n$  a  $I_{peak}$  malý a není skokový, což značí to, že tlumivka má příznivý průběh pro provoz. Před dosažením  $I_n$  je v grafu vidět jako u předchozích měření na překlenuté vzduchové mezeře, že dochází ke strmému poklesu indukčnosti, než dojde k přesycení těchto postranních plechů. Však oproti předchozímu měření na nezkráceném jádře je nyní tento pokles méně strmý a indukčnost pro menší proudy dosahuje menších velikostí.

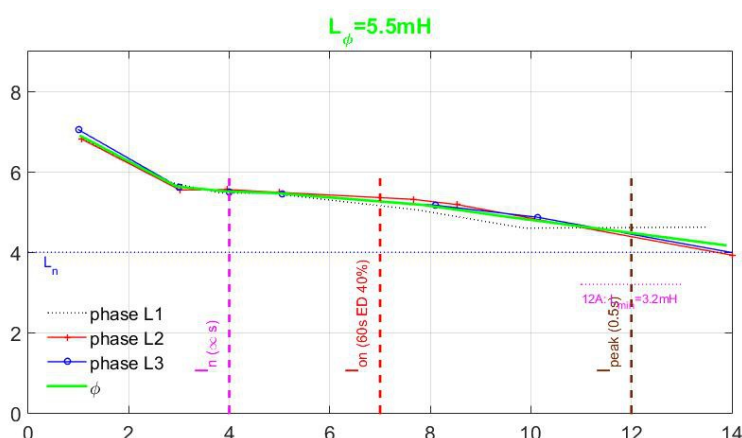


Graf 23: Ztráty tlumivky L Brx 2mH/6A v závislosti na protékajícím proudu

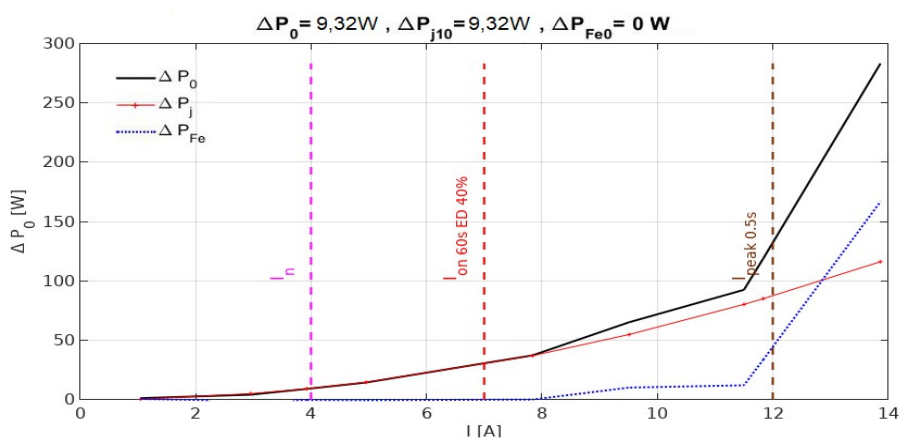
Pokud se porovná graf ztrát na protékajícím proudu před a po zkrácení jádra, tak je vidět, že ztráty Jouleovy po zkrácení zůstaly totožné, jelikož jsou vázány na proud protékající cívkou a délkou jejího vinutí a to vše zůstalo totožné. Avšak změny, které se udály s jádrem, způsobily změny ve ztrátách v železe. Nárůst těchto ztrát započal dříve a to při 14 A a dosáhly menších hodnot kolem proudu  $I_{peak}$  a to téměř poloviny, jak je vidět z grafů i tabulek. Klesla na hodnotu 33 W, což jde vyčíst z tabulky číslo 9 a porovnat s původní hodnotou v tabulce 7. K tomuto snížení ztrát v železe došlo tím, že řezání E plechů zmenšilo plochu, do které se indukují vířivé proudy, na kterých jsou ztráty v železe závislé. Díky tomu se zmenšily celkové ztráty  $\Delta P_0$  z 159,51 W na 119,95 W při  $I_{peak}$ . Jouleovy ztráty  $\Delta P_j$  jsou rovny 12,16 W a v železe  $\Delta P_{Fe}$  jsou 5,23 W při protékání jmenovitého proudu  $I_n$ .

U <sub>1</sub> (V)	U <sub>2</sub> (V)	U <sub>3</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>3</sub> (W)	P (W)	Q <sub>1</sub> (VAr)	Q <sub>2</sub> (VAr)	Q <sub>3</sub> (VAr)	Q (VAr)	P <sub>j1</sub> (W)	P <sub>j2</sub> (W)	P <sub>j3</sub> (W)	P <sub>j</sub> (W)	P <sub>m</sub> (W)	P <sub>Fe</sub> (W)	Cos(φ <sub>1</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>2</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>3</sub> ) (-)	Cos(φ) (-)
1	1	1	1.13	1.25	1.13	0	1	0	2	1	2	1	4	0.14	0.17	0.14	0.46	0	1	0.25	0.45	0.28	0.34
3	4	3	4.00	4.00	3.70	1	3	3	7	13	14	12	39	1.77	1.77	1.52	5.06	0	2	0.09	0.22	0.22	0.18
5	5	5	5.90	6.15	6.10	5	10	3	17	29	30	32	91	3.85	4.19	4.12	12.16	0	5	0.16	0.31	0.09	0.20
7	8	8	9.40	9.20	9.50	11	16	7	34	68	71	73	212	9.78	9.38	9.99	29.15	0	4	0.16	0.22	0.09	0.16
10	10	10	13.50	13.20	14.20	20	21	18	59	128	133	142	403	20.18	19.31	22.32	61.80	0	2	0.16	0.16	0.13	0.15
10	11	11	15.20	14.60	15.97	48	25	22	94	147	157	171	476	25.58	23.62	28.23	77.43	0	17	0.31	0.16	0.13	0.20
11	11	11	16.00	15.50	17.00	52	44	24	120	161	170	187	518	28.34	26.62	31.99	86.95	0	33	0.31	0.25	0.13	0.23

Tabulka 9: Naměřené a dopočítané hodnoty tlumivky B s překlenutou vzduchovou mezerou a zkráceným jádrem (L Brx)

Graf 24: Indukčnost tlumivky  $L$  Crx 4mH/4A v závislosti na protékajícím proudu

Graf číslo 24 nám ukazuje průběh indukčnosti v závislosti na proudu u tlumivky varianty C se zkrácenými plechy. Jak tomu bylo u předchozího měření na tlumivce B se zkráceným jádrem, tak i tady došlo k vyhlazení průběhu křivky indukčnosti. Pokud budu porovnávat změny průběhu, které vznikly díky většímu vlivu vzduchové mezery oproti předchozímu měření na tlumivce C bez zkráceného jádra, tak se průběh rapidně vyhladil, dokonce více, než tomu bylo u tlumivky B. Dopočtená indukčnost při jmenovitém proudu byla nyní 5,5 mH, což je velmi blízko požadavku a při  $I_{\text{peak}}$  indukčnost v závislosti na sycení poklesla na 4,3 mH. Z toho vyplývá, že pokles indukčnosti je mezi  $I_n$  a  $I_{\text{peak}}$  větší oproti tlumivce B. Než proud dosáhne toho, že se přesytí postranní plechy u vzduchové mezery, tak je vidět pro malé proudy strmý pokles indukčnosti, ale stejně jak tomu bylo i u varianty B, tak nyní se zkrácenými plechy je tento pokles méně strmý. Indukčnost pro menší proudy dosahuje nyní menších velikostí.

Graf 25: Ztráty tlumivky  $L$  Crx 4mH/4A v závislosti na protékajícím proudu

Když budu porovnávat graf číslo 25 s grafem číslo 23, tak po zkrácení jádra i u této varianty tlumivky zůstaly Jouleovy ztráty stejné a změnil se pouze průběh ztrát v železe. Tyto ztráty začaly narůstat déle a to až při 8 A, strmý nárůst započal až při 11,58 A. Avšak po překročení hodnoty proudu  $I_{\text{peak}}$  a to o 0,84 A, došlo k vyrovnání ztrát v železe a ztrát Jouleových. S narůstajícím proudem narůstaly i ztráty v železe více než Jouleovy. V této části není tlumivka již použitelná, je však použitelná do požadovaného maxima. Tento rapidní nárůst ztrát v železe je způsoben přesycením plechů a velkým proudem ve vinutí a způsobuje přehřátí. Velikost ztrát v železe při proudu  $I_{\text{peak}}$  byla však téměř poloviční oproti stavu před zkrácením jádra, a klesla na hodnotu 34 W, což jde vyčíst z tabulky číslo 10 a porovnat s původní hodnotou v tabulce 8. K tomuto snížení ztrát v železe došlo tím, že řezání E plechů zmenšilo plochu, do které se indukují vířivé proudy, na kterých jsou ztráty v železe závislé. S tímto přičiněním se zmenšily celkové ztráty  $\Delta P_0$  z 147,96 W na 119,06 W při  $I_{\text{peak}}$ . A ztráty Jouleovy  $\Delta P_j$  jsou rovny 9,32 W a v železe  $\Delta P_{\text{Fe}}$  jsou 0 W při protékání jmenovitého proudu  $I_n$ .

U <sub>1</sub> (V)	U <sub>2</sub> (V)	U <sub>3</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>3</sub> (W)	P (W)	Q <sub>1</sub> (VAr)	Q <sub>2</sub> (VAr)	Q <sub>3</sub> (VAr)	Q (VAr)	P <sub>j1</sub> (W)	P <sub>j2</sub> (W)	P <sub>j3</sub> (W)	P <sub>j</sub> (W)	P <sub>m</sub> (W)	P <sub>Fe</sub> (W)	Cos(φ <sub>1</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>2</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>3</sub> ) (-)	Cos(φ) (-)
2	2	2	1.07	1.07	1.00	0	1	0	1	2	2	2	7	0.23	0.23	0.20	0.66	0	1	0.19	0.25	0.16	0.20
5	5	5	2.84	3.02	3.00	2	2	1	4	15	16	16	47	1.62	1.83	1.82	5.27	0	1	0.13	0.13	0.03	0.10
7	7	7	3.81	3.97	4.00	3	3	3	9	25	27	27	80	2.92	3.17	3.23	9.32	0	0	0.13	0.13	0.09	0.12
8	9	9	4.80	5.00	5.06	5	5	4	15	40	43	44	126	4.63	5.03	5.17	14.83	0	0	0.13	0.13	0.09	0.12
12	13	13	7.75	7.67	8.10	15	9	13	37	95	99	104	297	12.07	11.82	13.25	37.15	0	0	0.16	0.09	0.13	0.13
14	14	15	9.87	8.53	10.13	35	11	19	65	138	119	148	404	19.58	14.62	20.73	54.93	0	10	0.25	0.09	0.13	0.16
17	16	16	12.30	10.40	11.80	44	31	18	93	198	160	187	545	30.41	21.74	28.13	80.28	0	12	0.22	0.19	0.09	0.16
17	16	17	12.60	10.60	12.30	65	21	33	119	200	166	207	573	31.91	22.58	30.56	85.06	0	34	0.31	0.13	0.16	0.20
18	18	18	13.50	14.00	14.10	95	111	76	283	221	218	235	674	36.63	39.40	40.16	116.19	0	167	0.40	0.45	0.31	0.38

Tabulka 10: Naměřené a dopočítané hodnoty tlumivky C s překlenutou vzduchovou mezerou a zkráceným jádrem (L Crx)

### 5.3.2 Měření na tlumivkách s překlenutou vzduchovou mezerou 1 mm a sníženým počtem závitů

Toto měření probíhalo totožně jako předchozí na tlumivce s překlenutou vzduchovou mezerou a zkráceným jádrem, změna nyní byla na vinutí a to taková, že bylo odvinuto 9 závitů ze všech tří cívek tlumivky B. Každý takto odvinutý vodič měřil přibližně 0,97 m. U tlumivky varianty C bylo odvinuto 14 závitů z každé cívky, přeměřená délka všech tří odvinutých vodičů činila přibližně stejně a to 1,68 m. Potřebný počet závitů byl zjištěn s využitím vzorce číslo 22 a následně byla vinutí odvinuta na takto zjištěný potřebný počet závitů. Výsledný počet závitů byl tedy po této úpravě pro cívky tlumivky B 57 závitů a pro cívky tlumivky C 80 závitů. V průběhu měření byly závity pouze odvinuty, ale ne odstraněny, to bylo učiněno až po tomto kontrolním měření indukčnosti. Z důvodu toho, že pokud by nebyly naměřené hodnoty příznivé, tak by bylo možno eventuálně ještě cívky předělat. Po přeměření indukčnosti, byl vodič zkrácen, odizolován a následně zapojen do lámací svorkovnice 6 mm<sup>2</sup>.

Výpočet počtu závitů, kterého je potřeba docílit, aby se indukčnost zařízení ještě více přiblížila k požadovaným hodnotám, byl odvozen ze vzorce číslo 15. A to tím způsobem, že vzorce pro výpočet indukčnosti byly od sebe rozlišeny spodními indexy. Spodní index 1 značí aktuální nedostatečné hodnoty parametrů tlumivky, které byly naměřeny při měření na zkráceném jádře s překlenutou vzduchovou mezerou. A spodní index 2 značí parametry, kterých chceme docílit.

$$L_1 = \frac{N_1^2}{R_{mcelk1}} \quad (19)$$

$$L_2 = \frac{N_2^2}{R_{mcelk2}} \quad (20)$$

Jelikož magnetický obvod zůstane stejný jako i v průběhu minulého měření, zůstanou stejné i jeho parametry magnetického odporu, tím pádem můžeme psát:

$$R_{mcelk1} = R_{mcelk2} \longrightarrow \frac{N_1^2}{L_1} = \frac{N_2^2}{L_2} \longrightarrow N_2^2 = N_1^2 * \frac{L_2}{L_1} \quad (21)$$

Po jednoduché úpravě rovnice se dostaneme k výpočtu potřebného počtu závitů cívky. Ten vypočítáme s využitím naměřené indukčnosti při  $N_1$  a požadované indukčnosti  $L_2$ .

$$N_2 = N_1 * \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (22)$$

Jelikož naměřená indukčnost při předchozím měření byla velká pro oba typy tlumivek oproti požadované, tak byla potřeba ji snížit. Indukčnost je závislá na velikosti vzduchové mezery, která ovlivňuje magnetický odpor a počtu závitů cívky, jak také vyplývá ze vzorce číslo 15. Protože limitní rozměry tlumivky jsou dané a nejde s nimi hýbat a pertinaxové vložky jsou dodávány pouze o rozměrech 1mm, tak nám nezbývá nic jiného, než indukčnost ovlivnit počtem závitů cívek. Sekundárními výhodami této úpravy indukčnosti je zmenšení Jouleových ztrát vinutí, které jsou závislé na odporu vodiče, který jsme odvinutím zmenšili, což vyplývá ze vzorce číslo 1. Další výhodou je menší množství použité mědi, které se projeví snížením nákladů na materiál a zrychlením navíjení cívky, čímž se ušetří čas a další peníze.

Jelikož se jednalo o poslední konstrukční změny, byla po měření provedena finální revize jednotlivých částí. Cívky byly staženy z jader a tato jádra byla rozebrána na jednotlivé plechy. Byla zjištěna reálná hmotnost cívek i plechů. A u obou typů plechů byl také spočítán jejich počet. Hmotnost byla změřena za pomoci váhy, která dokázala měřit s přesností na jeden gram. Tato získaná data jsou k nahlédnutí v tabulce číslo 11. V průběhu sestavení konstrukce jádra nebyl známý přesný počet použitých plechů, ale byla tendence kostru cívky vměstnat na co největší počet plechů. U tlumivky B i C po přepočítání vyšla stejná hodnota, a to 60 plechů E a 61 plechů I. Stejně hodnoty vyšly i po převážení těchto plechů E a i I u obou variant tlumivek. Plechy E vážily 500 g a plechy I 300 g. Toto zjištění mě vede k domněnce, že plechy mají tloušťku takovou, jakou garantuje výrobce, který se snaží distribuovat kvalitní produkt. Tuto domněnku

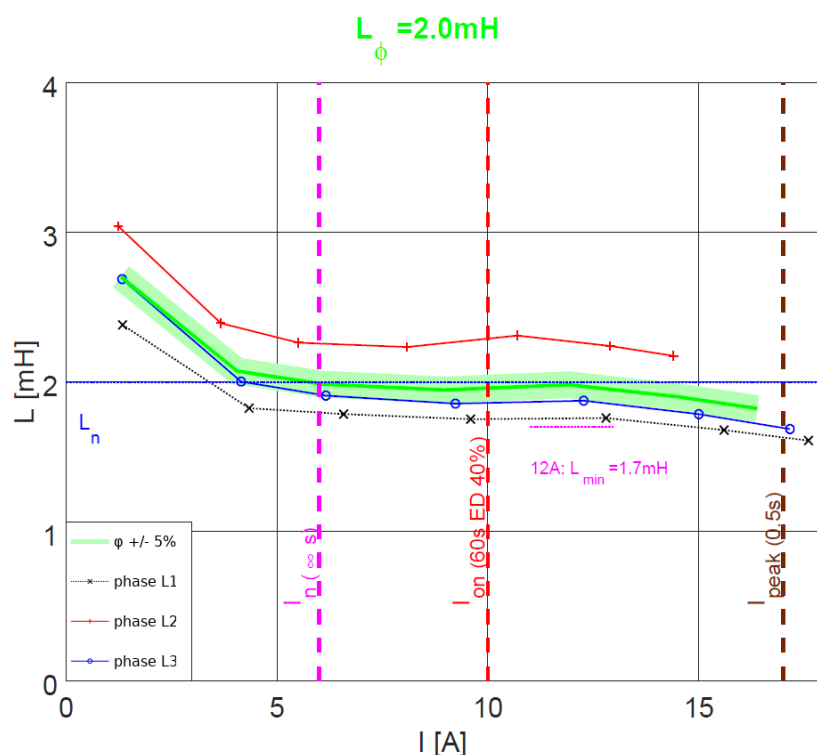


jsme si ověřili tím, že jsme přeměřili za pomoci posuvného měřítka tři náhodně vybrané plechy na sobě, jejich změřená tloušťka byla 1,05 mm. Tato hodnota je totožná s tou, co udává výrobce po přenásobení třemi plechy, kdy tloušťka jednoho plechu je 0,35 mm. Zjištění, že tlumivky B i C mají stejný počet plechů typu E, mě překvapilo, jelikož v průběhu všech měření byla manipulace s variantou B obtížnější. Z toho důvodu, že plechy v kostrách byly volnější, a občas se při pohybu plechy posunuly nebo dokonce vysunuly. Bude to určitě způsobeno tím, že kostry byly ručně řezány a pájeny dohromady a u varianty C se uvnitř vyskytovaly větší ořepky. Ořepky napomáhaly většímu utomování plechů uvnitř koster a lepšímu pospolnému držení celého výrobku.

Po zvážení cívek jsme zjistili, že u tlumivky typu B mají B1, B2 a B3 totožnou hmotnost a to 70 g. Měření hmotností cívek C1, C2 a C3 bohužel potvrdilo obavu, která vznikla po snížení vinutí cívek. A to tu, že jsme na jedné cívce odvinuli více vinutí, než bylo potřeba. Jelikož C1 a C2 vážila každá 85 g a cívka C3 pouhých 80 g. Tato chyba vznikla v průběhu odvíjení závitů, jelikož na cívce C1 odvinuté závity byly poctivě počítány, ale u dalších dvou byla odvinuta pouze stejná délka vodiče, bez počítání závitů. Však vyvedené dráty z cívky C3 byly nejspíše kratší a tak jsme odvinuli o jeden závit navíc, abychom dorovnali délku odvinutého vinutí z cívky C3 s odvinutým vinutím z cívky C1.

	L BZrx 2mH/6A				L CZrx 4mH/4A		
	Hmotnost (g)	počet (závitů)	Množství (plechů)		Hmotnost (g)	počet (závitů)	Množství (plechů)
E	500		60	E	500		60
I	300		61	I	300		61
B1	70	57		C1	85	80	
B2	70	57		C2	85	80	
B3	70	57		C3	80	79	

Tabulka 11: Hmotnosti cívek, plechů a množství plechů ze kterých se skládalo jádro

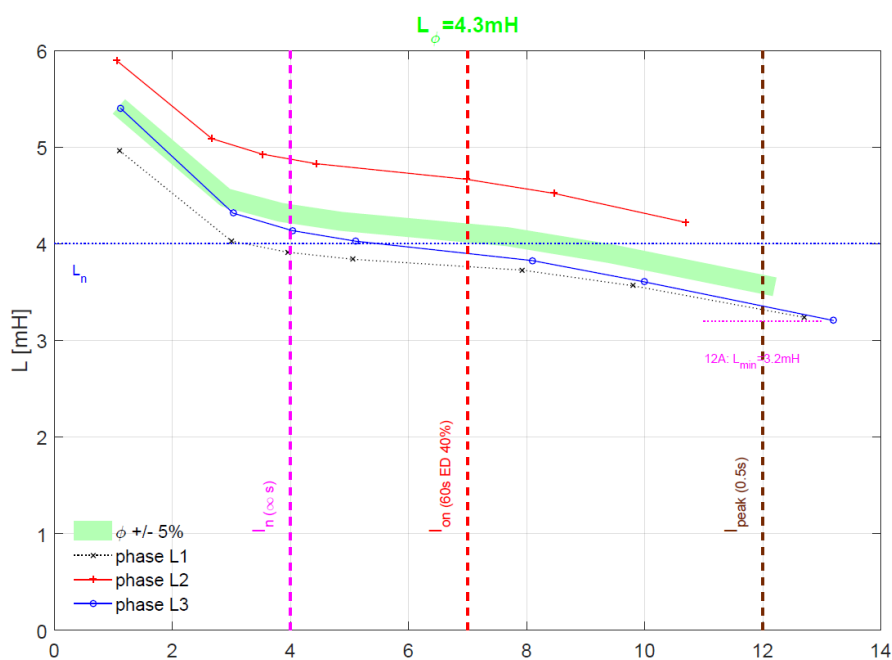


Graf 26: Indukčnost tlumivky L BZrx 2mH/6A v závislosti na protékajícím proudu

Graf číslo 26 popisuje závislost indukčnosti na protékajícím proudu tlumivkou s překlenutou vzduchovou mezerou a s odvinutými 9 závity z původního počtu, který činil 66 závitů. Toto rozhodnutí způsobilo snížení strmosti poklesu indukčnosti s narůstajícím proudem mezi  $I_n$  a  $I_{peak}$ . Toto snížení strmosti bylo způsobeno poklesem sycení jádra. Hodnota indukčnosti při protékajícím jmenovitém proudu  $I_n$  byla posunuta o 0,7 mH po ose y směrem k požadované hodnotě a tím pádem průměrná indukčnost dosahovala 2 mH a přesně takový požadavek byl na tlumivku. Velikost průměrné indukčnosti pro proud  $I_{peak}$  byla přibližně 1,8 mH. Zákazníkem byla zadána ještě jedna hodnota indukčnosti a to minimální indukčnost  $L_{min}$ . Tato indukčnost je dána pro variantu tlumivky B na 1,7 mH a při protékajícím proudu o velikosti 12 A nesmí pod tuto hodnotu indukčnost poklesnout. V grafu je tato limitní hodnota znázorněna a je patrné, že při protékajícím proudu 12 A nedošlo k poklesu průměrné indukčnosti pod tuto limitu, jelikož průměrná indukčnost dosahovala velikosti 1,98 mH. Sklon indukčnosti pro malé proudy při přesycování postranních plechů, které překlenují vzduchovou mezeru zůstal přibližně stejný, jako tomu bylo i u předchozího měření s původním počtem závitů.

U <sub>1</sub> (V)	U <sub>2</sub> (V)	U <sub>3</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>3</sub> (W)	P (W)	Q <sub>1</sub> (VAR)	Q <sub>2</sub> (VAR)	Q <sub>3</sub> (VAR)	Q (VAR)	P <sub>J1</sub> (W)	P <sub>J2</sub> (W)	P <sub>J3</sub> (W)	P <sub>J</sub> (W)	P <sub>m</sub> (W)	P <sub>Fe</sub> (W)	Cos(φ <sub>1</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>2</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>3</sub> ) (-)	Cos(φ) (-)
1	1	1	1.34	1.24	1.33	0	0	0	1	1	1	1	4	0.17	0.15	0.17	0.50	0	0	0.34	0.13	0.13	0.21
3	3	3	4.34	3.67	4.15	2	2	2	6	11	10	11	31	1.80	1.31	1.69	4.81	0	2	0.22	0.16	0.22	0.21
4	4	4	6.58	5.51	6.16	5	3	5	13	24	22	22	68	4.15	2.96	3.73	10.84	0	2	0.22	0.13	0.22	0.19
5	6	5	9.59	8.08	9.23	11	7	9	28	50	46	49	145	8.81	6.37	8.37	23.55	0	4	0.22	0.16	0.19	0.19
7	8	7	12.80	10.70	12.27	12	16	14	41	91	82	89	262	15.70	11.16	14.80	41.66	0	0	0.13	0.19	0.16	0.16
8	9	9	15.60	12.90	15.00	28	29	25	83	127	114	126	367	23.31	16.22	22.12	61.66	0	21	0.22	0.25	0.19	0.23
9	10	9	17.60	14.40	17.16	35	36	30	100	155	138	156	449	29.68	20.22	28.95	78.84	0	21	0.22	0.25	0.19	0.22

Tabulka 12: Naměřené a dopočítané hodnoty tlumivky B s překlenutou vzduchovou mezerou, zkráceným jádrem a odvinutým vinutím (L BZrx)



Graf 27: Indukčnost tlumivky L CZrx 4mH/4A v závislosti na protékajícím proudu

Po srovnání grafu číslo 24 s grafem 27, na kterém je zobrazena závislost indukčnosti pro tlumivku varianty C s překlenutou vzduchovou mezerou E plechy a odvinutým vinutím na protékajícím proudu je patrné, že došlo k většímu snížení strmosti indukčnosti mezi proudy  $I_n$  a  $I_{peak}$ . Toto vyhlazení bylo způsobeno snížením sycení magnetického obvodu. Hodnota indukčnosti při protékajícím jmenovitém proudu  $I_n$  byla posunuta o 1,2 mH po ose y směrem k nule. Počet závitů byl snížen o 14 na 80. Za pomoci této konstrukční změny se povedlo přiblížit průměrnou indukčnost blíže k požadavku při protékajícím jmenovitém proudu  $I_n$  a to na hodnotu 4,3 mH. I pro tuto variantu bylo zadavatelem zadáno  $L_{min}$ , které bylo nyní 3,2 mH pro stejnou velikost protékajícího proudu a to 12 A. Tato velikost proudu je pro tento typ srovnatelná s proudem  $I_{peak}$ . Průměrná indukčnost při hodnotě proudu  $I_{peak}$  nabývá velikosti 3,6 mH. Z toho vyplývá, že indukčnost při 12 A neklesla pod zadaný limit  $L_{min}$  zadavatele. Tato limita varianty C je znázorněna v grafu, jako tomu bylo i v grafu pro tlumivku B. Sklon indukčnosti pro malé proudy při přesycování postranních plechů, které překlenují vzduchovou mezeru zůstal podobný, jako tomu bylo u předchozího stavu s původním počtem závitů.

U <sub>1</sub> (V)	U <sub>2</sub> (V)	U <sub>3</sub> (V)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	I <sub>3</sub> (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	P <sub>3</sub> (W)	P (W)	Q <sub>1</sub> (VAR)	Q <sub>2</sub> (VAR)	Q <sub>3</sub> (VAR)	Q (VAR)	P <sub>J1</sub> (W)	P <sub>J2</sub> (W)	P <sub>J3</sub> (W)	P <sub>J</sub> (W)	P <sub>m</sub> (W)	P <sub>Fe</sub> (W)	Cos(φ <sub>1</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>2</sub> ) (-)	Cos(φ <sub>3</sub> ) (-)	Cos(φ) (-)
2	2	2	1.11	1.06	1.12	1	0	1	1	2	2	2	6	0.21	0.19	0.22	0.62	0	0	0.28	0.03	0.30	0.20
4	4	4	3.00	2.67	3.03	3	1	2	6	11	11	12	35	1.55	1.23	1.59	4.37	0	2	0.25	0.09	0.17	0.18
5	5	5	3.95	3.52	4.03	4	2	3	8	19	19	21	59	2.69	2.14	2.81	7.64	0	1	0.19	0.09	0.13	0.15
6	7	7	5.05	4.43	5.11	7	1	4	12	30	30	33	93	4.40	3.39	4.51	12.30	0	1	0.22	0.03	0.12	0.13
9	10	10	7.93	6.98	8.10	16	9	10	35	73	71	79	223	10.84	8.42	11.34	30.60	0	5	0.22	0.13	0.13	0.16
11	12	11	9.80	8.46	10.00	24	13	12	49	106	102	114	322	16.56	12.37	17.28	46.20	0	3	0.22	0.13	0.11	0.16
13	14	13	12.70	10.70	13.20	41	29	19	89	161	150	177	488	27.81	19.78	30.11	77.70	0	11	0.25	0.19	0.11	0.19

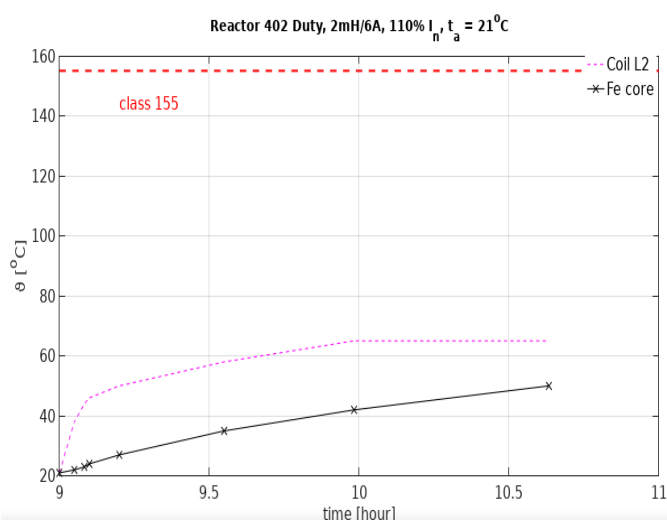
Tabulka 13: Naměřené a dopočítané hodnoty tlumivky C s překlenutou vzduchovou mezerou, zkráceným jádrem a odvinutým vinutím (L CZrx)

## 5.4 Oteplovací zkouška tlumivky B a C

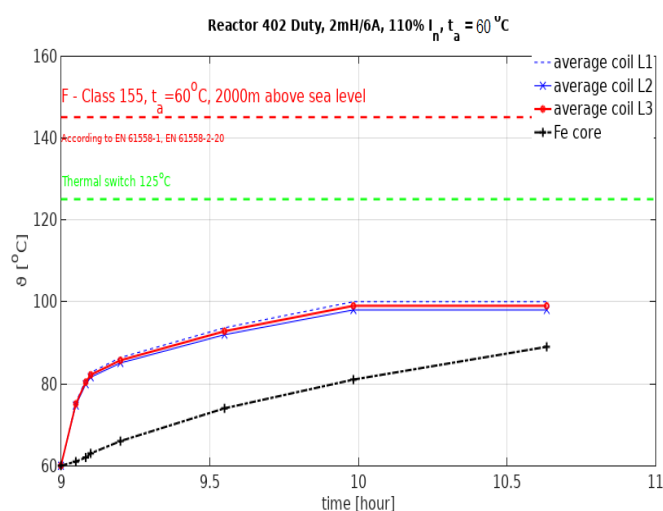
Tato zkouška je nedílnou součástí při vývoji tlumivky. Za pomoci ní jsme schopni zjistit, jak se bude zařízení zahřívat a jestli reálně je schopna tlumivka bezpečného provozu bez přehřívání. V konstrukci tlumivky je totiž prvek, který je citlivý na vyšší teploty a tímto prvkem je lakovaná izolace vinutí. Jeho izolace má totiž dovolenou maximální teplotu 155 °C, pokud by byla tato teplota překročena, došlo by k porušení izolace a to by dále vedlo k mezizávitovému zkratu a následně zničení zařízení. Během jejího provozu však bude tlumivka vybavena i teplotní pojistkou, která bude reagovat na nižší teplotu, než na kterou je dimenzována izolace a to na teplotu 125 °C. Tato teplotní pojistka by měla samotné zařízení i zařízení v jejím okolí chránit před poškozením způsobeným ztrátovým teplem. Během měření při jmenovitém proudu i při chodu ED 40 % byl použit měřicí přístroj TESTO 175-T3, který disponoval dvěma vstupy. Oba vstupy byly využity a byly do nich zapojeny dotykové termočlánky typu K. Skutečnost, že měřicí přístroj dokázal měřit dvěma dotykovými čidly naráz, byla pro nás výhodná. Jelikož jsme díky tomu získávali teplotu jádra i cívky zároveň a to přesně ve stejném časovém okamžiku, což by se nám nepovedlo při použití vícero měřících přístrojů. První čidlo sloužilo k měření teploty vinutí cívky a druhé k měření železného EI jádra. Čidlo, které sloužilo k měření vinutí, bylo přiloženo na prostřední cívku C2 nebo B2 tlumivky. A druhé čidlo jsme přiložili na jádro E v bodě uprostřed spojnice sloupků, na kterých byly nasazeny cívky B1 a B2, anebo u druhé tlumivky C1 a C2.

### 5.4.1 Zatížení jmenovitým proudem

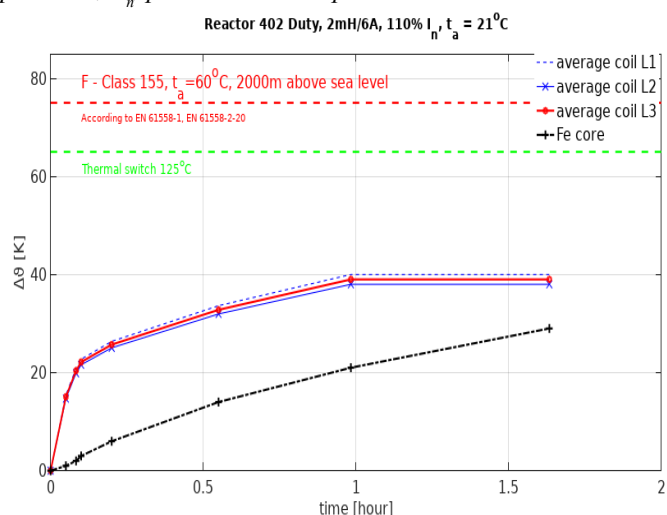
První oteplovací zkouška na tlumivkách byla naplánována při protékajícím jmenovitém proudu. Tlumivky však byly odměřeny při 110% jmenovitého proudu. Protože norma ČSN EN 61558 -1 a ČSN EN 61558 -2-20 udává, že měření má probíhat při 110%  $I_n$ .



Graf 28: Závislost teploty na čase tlumivky varianty L B při proudu  $1,1I_n$ , při laboratorní teplotě  $21^\circ\text{C}$



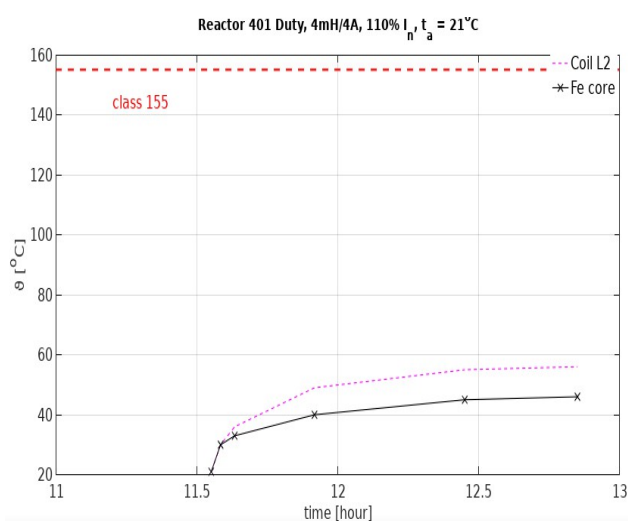
Graf 29: Závislost teploty na čase tlumivky varianty L B při proudu  $1,1I_n$ , přepočítané na teplotu  $60^\circ\text{C}$



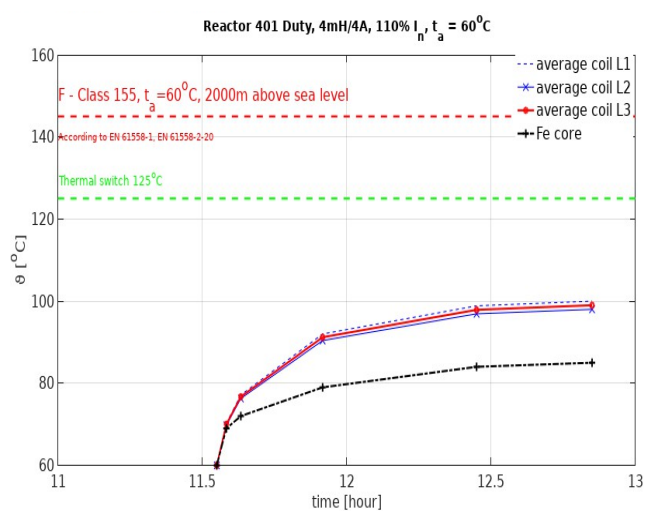
Graf 30: Závislost oteplení na čase tlumivky varianty L B při proudu  $1,1I_n$ , přepočítaného na teplotu  $60^\circ\text{C}$

Grafy číslo 28, 29 a 30 znázorňují měření oteplovací zkoušky při protékajícím proudu o velikosti  $1,1 I_n$ , u tlumivky varianty B je tento proud 6,6 A. V průběhu tohoto měření bylo na konstrukci tlumivky využito nezkrácené jádro a byla vytvořena

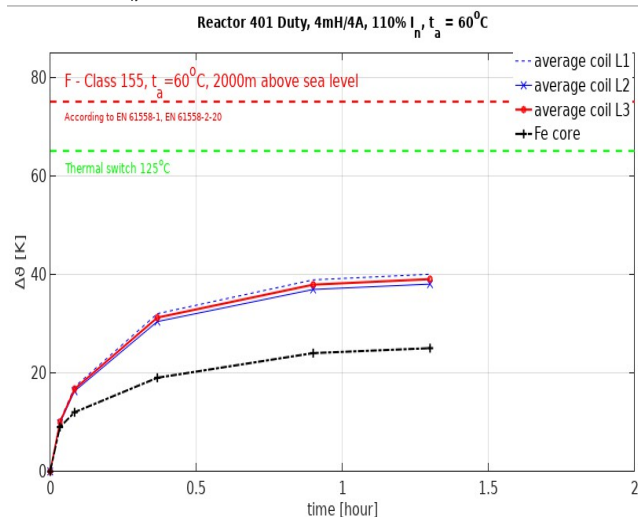
vzduchová mezera o velikosti 1mm s využitím text-gumoidových podložek. Námí změřená maximální dosažená kontaktní teplota při laboratorní teplotě 21 °C na prostřední cívice, byla 65 °C a jádra 50 °C, jak lze vyčíst z grafu číslo 28. Z grafů můžeme vidět, že u vinutí vzrostla dotyková teplota o 44 °C a teplota vinutí by dosáhla při teplotě okolí 60 °C teploty 99 °C. Teplota, které by dosáhlo zařízení, jak je vidět v grafu číslo 29, se ani nepřiblížila k hodnotě, na kterou reaguje teplotní pojistka a už vůbec ne k teplotě, na kterou je dimenzována izolace vodičů cívek. Teplota cívek dosáhla maxima po 59 minutách od připojení proudu a poté se teplota udržovala konstantní. Celá tato oteplovací zkouška trvala 1 h 38 minut.



Graf 31: Závislost teploty na čase tlumivky varianty LC při proudu  $I, I_n$ , při laboratorní teplotě 21 °C



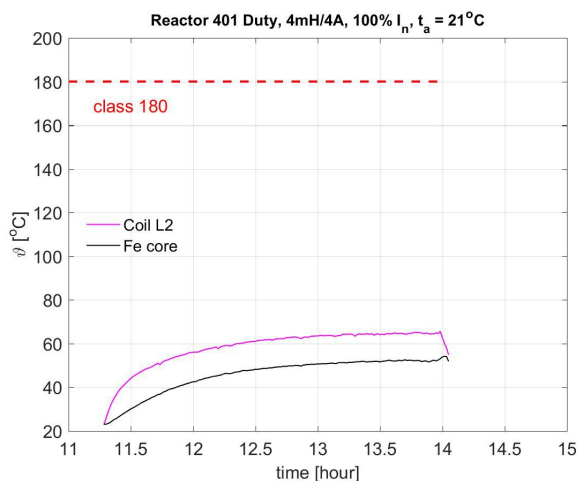
Graf 32: Závislost teploty na čase tlumivky varianty LC při proudu  $I, I_n$ , přepočítané na teplotu 60 °C



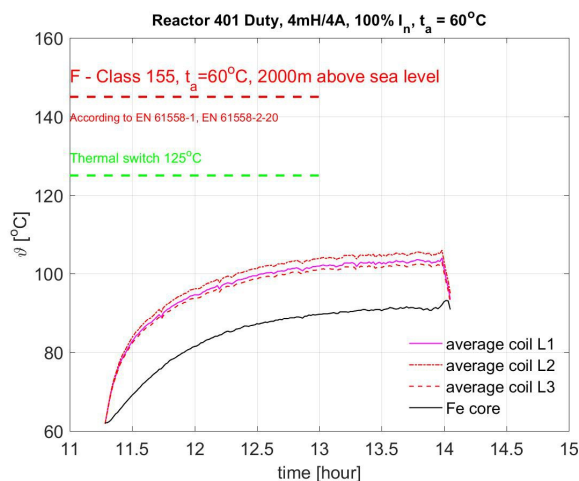
Graf 33: Závislost oteplení na čase tlumivky varianty LC při proudu  $I, I_n$ , přepočítaného na teplotu 60 °C



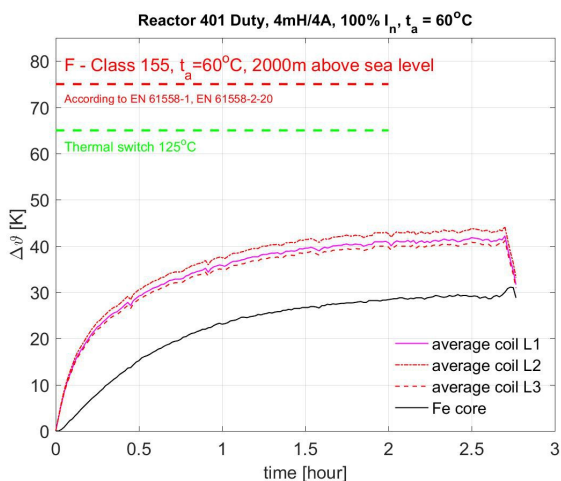
Stejně jak tomu bylo i u předchozího měření na tlumivce B, tak i zde bylo použito stejné nezkrácené jádro tlumivky, vzduchová mezera byla vytvořena stejným postupem, akorát byly využity cívky C1-C2-C3. A proud  $1,1 I_n$ , byl pro variantu tlumivky C 4,4 A. V průběhu měření jsme zjistili, že maximální dosažená dotyková teplota při laboratorní teplotě 21 °C prostřední cívky byla 56 °C a jádra 46 °C. Této hodnoty jsme dosáhli až u konce měření a to po 1 h a 18 minutách. Jestliže porovnáme maximální dosaženou dotykovou teplotu u varianty C s B, tak je patrné jak z grafů tak z uvedených čísel v textu, že je menší maximální dotyková teplota u varianty C. Dosažení této teploty trvá také v porovnání s tlumivkou B delší dobu. To je způsobeno tím, že tlumivka typu C je zatěžována menším proudem v průběhu měření. Avšak teploty jader jsou si podobné, protože železo, ze kterého jsou transformátorové plechy, má velkou tepelnou vodivost a cívky C a B mají mírně odlišné koeficienty přestupu tepla, což je způsobeno jinými závity a uspořádáním vodičů na kostrách. V grafu číslo 32 můžeme vidět, jaké maximální hodnoty by dosáhla teplota při provozu při teplotě okolí 60 °C. Při takové teplotě by se ohřálo vinutí na 99 °C a jádro na 85 °C. Z grafu 31 je patrné, že dotyková teplota u vinutí vzrostla v průběhu měření o 35 °C. Jelikož tlumivka dosáhla menší maximální teploty než varianta B, tak je zřejmé, že by ohřev nezpůsobil sepnutí tepelné pojistky, natož poškození izolace vinutí.



Graf 34: Závislost teploty na čase tlumivky varianty Crx při jmenovitém proudu, při laboratorní teplotě 21 °C



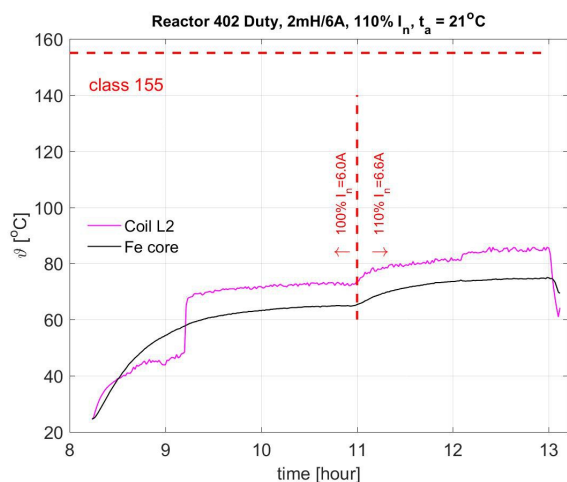
Graf 35: Závislost teploty na čase tlumivky varianty Crx při jmenovitém proudu, přepočítané na teplotu 60 °C



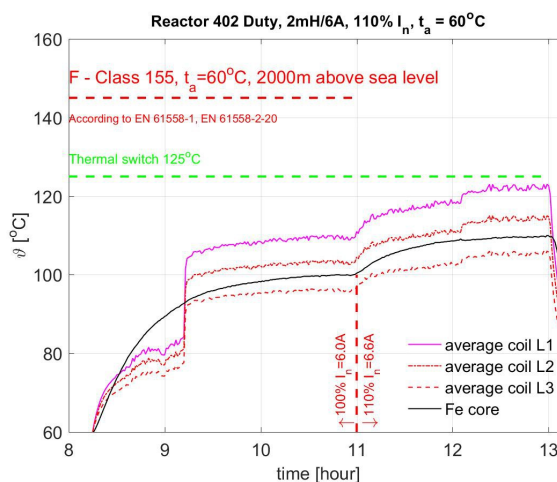
Graf 36: Závislost oteplení na čase tlumivky varianty Crx při jmenovitém proudu, přepočítaného na teplotu 60 °C

Grafy číslo 34, 35 a 36 znázorňují získaná data z měření na tlumivce s překlenutou vzduchovou mezerou o velikosti 1 mm. Použité plechy na konstrukci jádra byly při tomto měření zkráceny. Toto měření bylo aplikováno pouze u konstrukce tlumivky varianty C. Okamžitě po skončení oteplovací zkoušky, byla změřena za pomoci Ohmovy metody velikost teplého odporu vinutí všech tří cívek při protékajícím stejnosměrném proudu. Čas, kdy toto měření začalo, můžeme vidět i ve všech třech

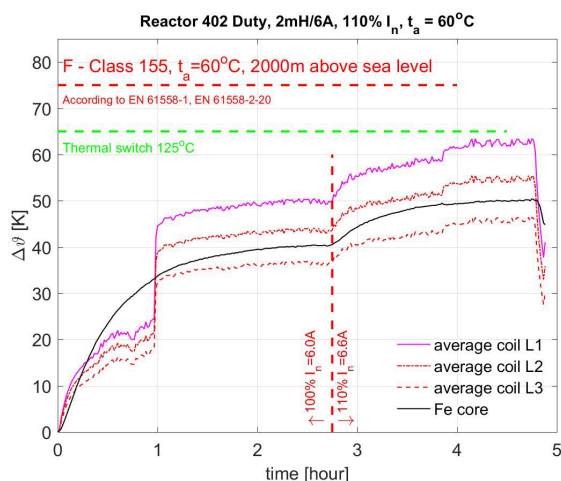
grafech, projevilo se to na chladnutí cívek. Tento pokles teploty začal po 13 h 59 minutách, což bylo 2 h a 42 minut po zahájení měření. A byl způsoben odpojením střídavého zdroje a přepojením na stejnosměrný zdroj, jelikož u stejnosměrného proudu se neprojevuje reaktance cívky na Jouleových ztrátách. V grafech můžeme také vidět, že poté, co začala klesat teplota po odpojení střídavého zdroje u cívek, tak změřená dotyková teplota jádra prudce narostla. To je následkem toho, že se jádro přestalo chvět, a to způsobilo, že mělo lepší styk s kostrou a vinutím, které bylo teplejší. Jádro se proto začalo ohřívat od teplejšího vinutí. Oteplovací zkouška zde byla provedena pouze při protékajícím jmenovitém proudu, což je 4 A, nikoliv při 110%  $I_n$ . Změřená maximální dotyková teplota při laboratorní teplotě 21 °C byla na prostřední cívce C2 65,2 °C a na jádře 52,2 °C při ukončení oteplovací zkoušky. Graf číslo 35 obsahuje data přepočítané změřené teploty tlumivky na teplotu okolí 60 °C. Z tohoto grafu lze vyčíst, že maximální dosažená teplota cívky by byla 106 °C. Z grafu 34 je patrné, že dotyková teplota u vinutí vzrostla v průběhu měření o 42,4 °C. Ze všech grafů také vyplývá, že dosažená teplota není tak velká, aby mohla způsobovat reakci tepelné pojistky.



Graf 37: Závislost teploty na čase tlumivky varianty L BZrx při jmenovitém proudu, při laboratorní teplotě 21 °C



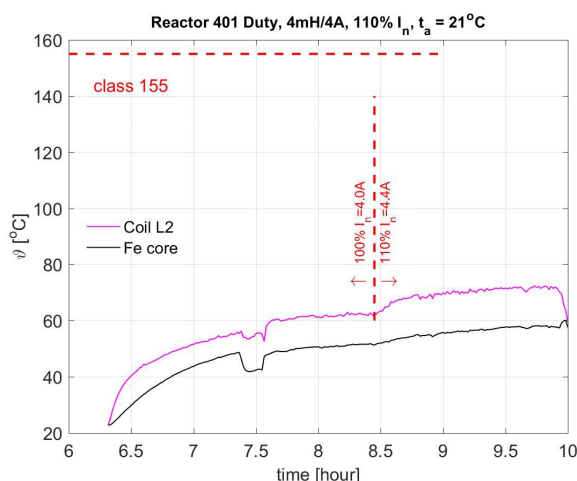
Graf 38: Závislost teploty na čase tlumivky varianty L BZrx při jmenovitém proudu, přepočítané na teplotu 60 °C



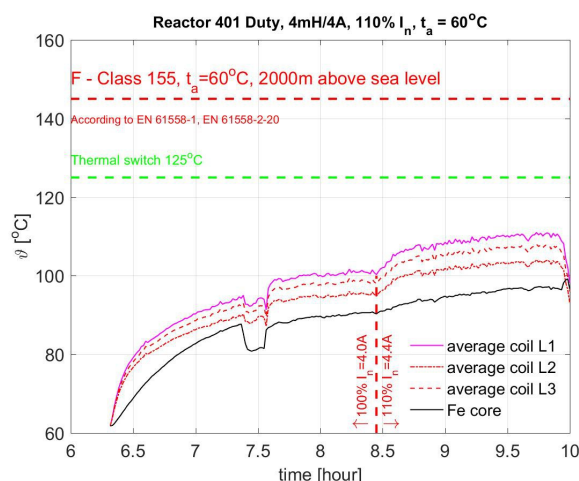
Graf 39: Závislost teploty na čase tlumivky varianty L BZrx při jmenovitém proudu, přepočítané na teplotu 60 °C

Grafy číslo 37, 38 i 39 obsahují data získaná a přepočítaná z měření na tlumivce varianty B s překlenutou vzduchovou mezerou. Na konstrukci byly využity řezané plechy vodním paprskem a vinutí na cívkách B1-B2-B3 byla odvinuta. Měření probíhalo tak, že nejdříve byl připojen jmenovitý proud a po ustálení teplot byl tento proud navýšen na hodnotu  $1,1 I_n$ . Při sledování všech tří grafů lze vidět, že v jednu chvíli dojde k náhlému skokovému nárůstu změřené dotykové teploty cívky při nepatrné změně času o cca 17 °C při protékání jmenovitým proudem. Tato náhlá skoková změna nenastala u železného jádra, ale pouze u měřeného vinutí cívky. Tento jev způsobila chyba při nastavení dotykových termočlánků měřícího přístroje, protože nebyly v průběhu měření správně přitlačeny na měřenou plochu. A jak je vidět v grafu číslo 39,

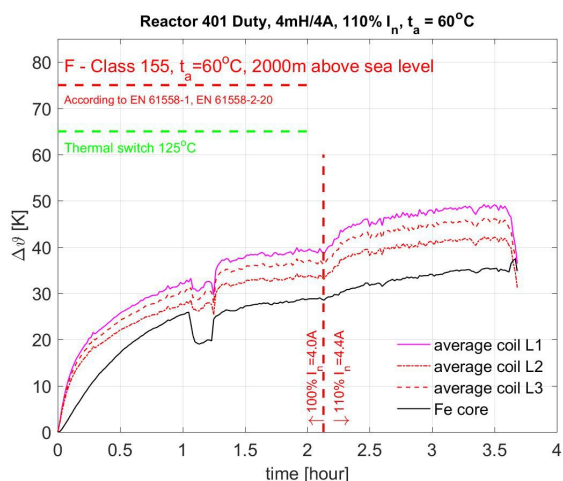
byl tento termočlánek dotlačen 58 minut od začátku měření. V průběhu protékajícího jmenovitého proudu byla změřena dotyková maximální teplota, na které se ustálil růst pro vinutí 73,3 °C a pro jádro 65 °C při laboratorní teplotě 21 °C. Po převedení naměřených teplot na teplotu okolí 60 °C by dosáhla maximální teplota prostřední cívky B2 103,7 °C. Po připojení proudu 1,1  $I_n$  při okolní laboratorní teplotě 21 °C bylo změřeno maximální dotykové teplo na cívce 85,8 °C a na jádře 75 °C. Po následném přepočtení naměřených teplot na teplotu okolí 60 °C by dosáhla maximální teplota prostřední cívky B2 115 °C. Z grafu číslo 37 je patrné, že dotyková teplota u vinutí vzrostla v průběhu celého měření o 61,2 °C. Tato oteplovací zkouška trvala 4 h 45 minut, což bylo téměř dvakrát déle, než předchozí měření oteplovacích zkoušek a to z toho důvodu, že jsme čekali na dva ustálené stavy. Po ukončení oteplovací zkoušky byly změřeny teplé odpory za pomoci Ohmovy metody, to lze zpozorovat jako pokles teploty na konci průběhu. Z grafu 38 lze usoudit, že průběh oteplení cívky B1 je velmi blízko teplotní limitě tepelné pojistky, na kterou reaguje. To by mohlo v praxi během provozu způsobit sepnutí tepelné pojistky při průchodu jmenovitého proudu, například kvůli povlaku prachu, který by zhoršoval odvod tepla přirozeným prouděním vzduchu. Jelikož zadavatelem nebylo udáno, že by prostor, ve kterém tlumivka pracuje, měl stupeň krytí IP6x proti vniku prachových částic. Druhou věcí je nejistota měření teploty a tolerance při výrobě pojistky. Může totiž spínat i při nižších teplotách, abychom tomu zabránili, znamenalo by to pojistky pracně vybírat a kontrolovat, což je časově náročné.



Graf 40: Závislost teploty na čase tlumivky varianty L CZrx při jmenovitém proudu, při laboratorní teplotě 21 °C



Graf 41: Závislost teploty na čase tlumivky varianty L CZrx při jmenovitém proudu, přepočítané na teplotu 60 °C



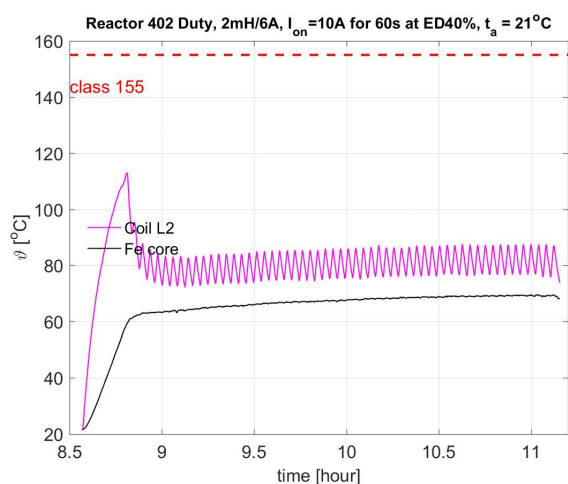
Graf 42: Závislost teploty na čase tlumivky varianty L CZrx při jmenovitém proudu, přepočítané na teplotu 60 °C

Konstrukce v průběhu tohoto měření oteplovací zkoušky byla totožná jako u předchozího případu, jediný rozdíl byl v použitých cívkách. Použity byly cívky C1-C2-C3, jelikož to byla tlumivka varianty C. Stejně jako tomu bylo u varianty B, tak i zde byla tlumivka nejdříve připojena na jmenovitý proud a následně po ustálení teploty tlumivky byla přepojena na hodnotu proudu 110% jmenovitého. Téměř stejná chyba jako u měření na tlumivce L BZrx se stala i u tlumivky L CZrx, ale oproti předchozímu měření se oddálily tentokrát obě sondy a k oddálení došlo v průběhu měření a nikoli od začátku. Došlo tím k poklesu měřené teploty, kterou zaznamenal přístroj. Jak je vidět z grafu číslo 42, k této chybě došlo přibližně po hodině a třech minutách měření a trvala 16 minut. Po této době byly opět sondy dotlačeny a byly

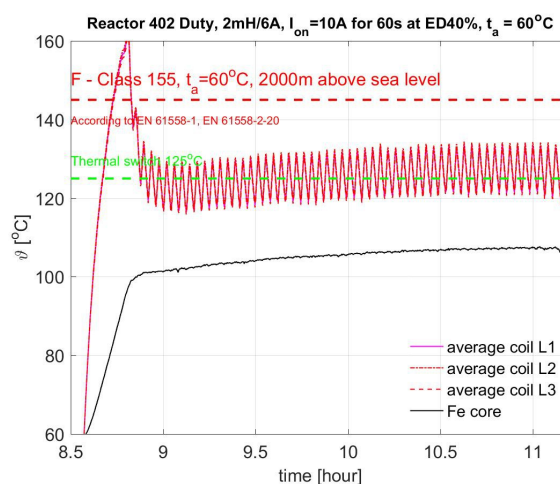
zaznamenávají správné hodnoty. Maximální dotyková změřená teplota při protékajícím jmenovitém proudu byla na prostřední cívce C2 63 °C a jádře 51,8 °C při laboratorní teplotě 21 °C. Po přepočtu změřených dat na teplotu okolí 60 °C by byla maximální dosažená teplota cívky C2 99 °C. Po navýšení hodnoty proudu na 1,1  $I_n$ , byla maximální dotyková změřená teplota na prostřední cívce 72,4 °C a na jádře 58,2 °C. Následně byla zjištěná data přepočítána na teplotu okolí 60 °C, při této teplotě okolí by se cívka C2 ohřála na teplotu 108 °C. Z grafu číslo 40 je patrné, že dotyková teplota u vinutí vzrostla v průběhu celého měření o 49,6 °C. Tato oteplovací zkouška trvala 3 h 40 minut. Následně po ukončení měření tepelné zkoušky jsme změřili teplé odpory, což je vidět na poklesu teploty na konci průběhu. Je to způsobeno odpojením od střídavého zdroje. Na konci průběhu, když se měřil teplý odpor vinutí, tak lze vidět prudký nárůst dotykové teploty na jádře, což je způsobeno tím, že se jádro přestalo chvět, a to způsobilo, že mělo lepší styk s kostrou a vinutím, které bylo teplejší. Jádro se proto začalo ohřívat od teplejšího vinutí. Pokud porovnáme průběhy s tlumivkou L BZrx můžeme říci, že oteplení je menší a tlumivka varianty C má větší teplotní rezervu od limity reakce tepelné pojistky.

## 5.4.2 Oteplovací zkouška v režimu ED 40 %

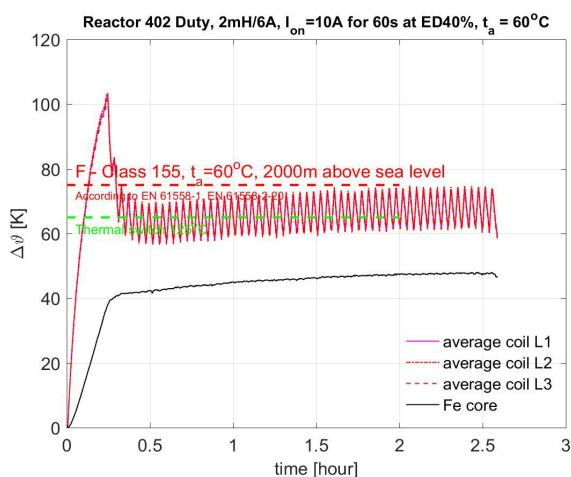
Jako druhá a zároveň poslední byla provedena oteplovací zkouška při přerušovaném proudu. Toto měření bylo provedeno na závěr a pouze na finálních konstrukcích tlumivek pro obě varianty. Hlavním cílem je zjištění, jestli jsou tlumivky schopny provozu při tomto chodu bez toho, aniž by došlo k sepnutí teplotní pojistky, anebo hůře k poškození izolace vodičů cívek.



Graf 43: Závislost teploty na čase tlumivky varianty L BZrx při přerušovaném proudu ED 40%, při laboratorní teplotě 21 °C



Graf 44: Závislost teploty na čase tlumivky varianty L BZrx při přerušovaném proudu ED 40%, přepočítané na teplotu 60 °C

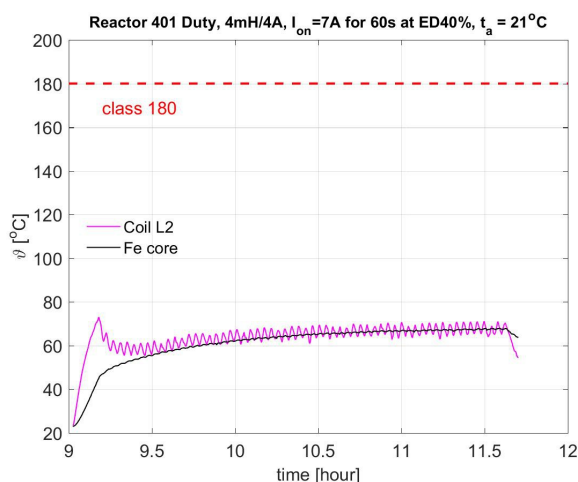


Graf 45: Závislost oteplení na čase tlumivky varianty L BZrx při přerušovaném proudu ED 40%, přepočítáno na teplotu 60 °C

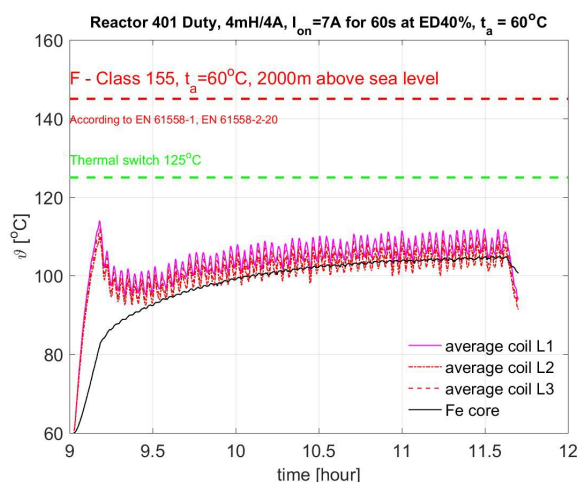
Graf číslo 43, 44 a 45 popisuje průběh oteplovací zkoušky na vzorku tlumivky varianty B, při protékajícím přerušovaném střídavém proudu  $I_{on}$  o velikosti 10 A. Tento



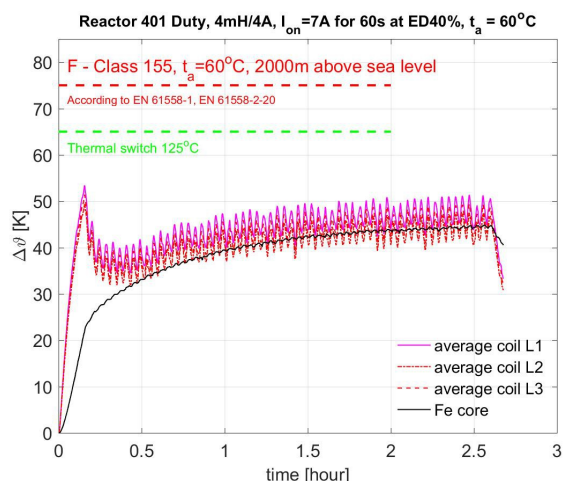
proud bude střídavě dodáván a to po dobu 60 s po uplynutí této doby bude na 90 s dodávka přerušena. Abychom docílili zrychlení experimentu a dosáhli ustálené kontaktní hodnoty teploty dříve, byl neustále bez cyklování spínání do tlumivky pouštěn proud  $I_{on}$  po dobu 10 minut. Po deseti minutách nepřerušovaného proudu jsme docílili teploty 113 °C na cívce. Za pomoci toho jsme zkrátili experiment na 2 h 34 minut. Bylo to nutné z důvodu, že velká prodleva při přerušení přívodu proudu způsobuje velké ochlazení, což by příliš prodlužovalo měření. Toto jsme si mohli dovolit při teplotě okolí 21 °C, ale pokud bychom toto zkusili při teplotě okolí 60 °C, došlo by k nevratnému poškození izolace všech tří cívek B1-B2-B3, jak je i vidět v grafu číslo 44. Měření bylo provedeno na tlumivce se zkráceným jádrem s překlenutou vzduchovou mezerou dvěma plechy a odvinutým vinutím. Maximální změřená dotyková ustálená teplota při protékajícím přerušovaném proudu  $I_{on}$  na prostřední cívce B2 byla 87,6 °C a na jádře 69,6 °C při laboratorní okolní teplotě, která činila 21 °C. Následně, jak je i vidět v grafu číslo 44, byla získaná data přepočtena na teplotu okolí 60 °C. Pokud by tlumivka pracovala v prostředí s takovouto teplotou okolí, dosáhla by teplota vinutí 134,3 °C a jádra 107,5 °C. Z grafu číslo 43 je patrné, že dotyková teplota u vinutí vzrostla v průběhu celého měření o 65,9 °C. V grafech můžeme také vidět, že při přerušení proudu  $I_{on}$  dochází k poklesu měřené dotykové teploty na cívce, teplota jádra však neklesne. To je způsobeno tím, že jádro přejímá teplo od cívek v tuto chvíli a je masivnější a má větší měrnou tepelnou kapacitu než-li vinutí, které je z mědi, a díky tomu si dokáže teplotu déle udržet. Graf číslo 44 nám ukazuje, že teplota po ustálení přesáhla limitní dovolenou hodnotu, na kterou reaguje tepelná pojistka. To znamená, že by při provozu docházelo k neustálému vypínání zařízení z důvodu přehřátí.



Graf 46: Závislost teploty na čase tlumivky varianty L CZrx při přerušovaném proudu ED 40%, při laboratorní teplotě 21 °C



Graf 47: Závislost teploty na čase tlumivky varianty L CZrx při přerušovaném proudu ED 40%, přepočítané na teplotu 60 °C



Graf 48: Závislost oteplení na čase tlumivky varianty L CZrx při přerušovaném proudu ED 40%, přepočítaného na teplotu 60 °C

Zde na grafech číslo 46, 47 a 48 je graficky znázorněno měření oteplovací zkoušky na stejné konstrukci jádra jako v předchozím měření, avšak použité cívky byly C1-C2-C3 s odvinutým vinutím na 80 závitů, kromě C3 jejíž závity byly sníženy až na 79. Proud  $I_{on}$  byl spínán pomocí zkonstruovaného cyklovače, který na 60 s spínal proud a na 90 s vypínal proud. V průběhu tohoto experimentu byl protékající proud  $I_{on}$  roven 7 A. Využili jsme stejného postupu jako u předchozího měření, abychom zkrátili dobu experimentu. A to takového, že po dobu 10 minut byl neustále připojen proud o velikosti 7 A. Díky tomu se povedlo na vinutí změřit dotykovou teplotu 73 °C.

Experiment se nám zkrátil díky prvním 10 minutám připojení nepřerušovaného střídavého proudu  $I_{on}$  na pouhé 2 h 36 minut. Po ustálení teploty jsme změřili, jak je vidět i v grafu číslo 46, že dotyková maximální teplota prostřední cívky C2 je 71,1 °C a jádra je 67,9 °C při laboratorní teplotě 21 °C. Změřená dotyková teplota jádra je velmi podobná teplotě jádra u varianty B. Následně po přepočítání dotykových změřených teplot na teplotu okolí 60 °C, ve kterém by měla tlumivka pracovat, jsme z těchto dat zkonstruovali graf číslo 47. Z tohoto grafu lze zjistit, že maximální teplota při ustáleném stavu, které by docílilo vinutí C2 tlumivky je 112 °C při teplotě okolí 60° C. Z grafu číslo 46 lze zjistit, že dotyková teplota u vinutí vzrostla v průběhu celého měření o 47,5 °C. Při porovnání grafů z měření na tlumivce L CZrx s grafy z měření na tlumivce L BZrx je na první pohled zřejmé, že varianta C dosáhla menších teplot vinutí v průběhu oteplovací zkoušky. Tato varianta C má tím pádem dostatečně velkou teplotní rezervu, než by došlo k překročení teplotní limity 125 °C, na kterou reaguje tepelná pojistka. A jelikož teplota vinutí by se ani nepřiblížila ke 155 °C, provoz by nezpůsobil degradaci materiálu izolace vlivem působení tepla. Stejně jako i u předchozích měření oteplovacích zkoušek, je zaznamenán velký pokles změřeného tepla na konci měření. To je způsobeno odpojením střídavého zdroje a měření teplých odporů, během něhož nebyl měřicí přístroj tepla ještě vypnut.

## 5.5 Měření odporu vinutí tlumivek B i C

Pro měření odporu vinutí, byla použita Ohmova metoda pro obě varianty tlumivek. Tato metoda byla vybrána z důvodu její rychlosti a jednoduchosti, ale přesto zachování velké přesnosti. Tato metoda se řadí mezi takzvané nepřímé metody, protože hodnota odporu je získána nepřímou cestou a to za pomoci změřeného proudu a napětí. S využitím A-metru a V-metru jsou změřeny hodnoty procházejícího proudu a úbytku napětí na měřeném obvodu, následně je využit Ohmův zákon pro výpočet odporu, který zní:

$$R = \frac{U}{I} \quad (23)$$

Pokud je měřený obvod napájen střídavým proudem, tak se projeví vlastnosti obvodu jako je indukčnost i kapacita a výsledná naměřená hodnota není odpor, ale impedance tohoto obvodu.

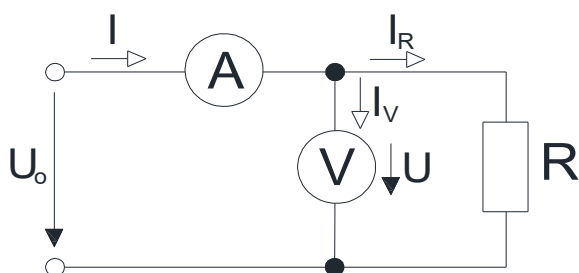
$$Z = R + jX \quad (24)$$

Chceme-li získat hodnotu odporu, tak je třeba obvod napájet stejnosměrným proudem, aby se neprojevovaly tyto vlastnosti obvodu, které díky nulové frekvenci stejnosměrného proudu jsou nulové. A díky tomu jsme schopni změřit u tlumivek, které měříme odpor všech 3 cívek, které se zachovávají jako obyčejný vodič s odporem a nikoli cívka s reaktancí.

Způsob zapojení A-metru a V-metru se liší v závislosti na velikosti měřeného odporu z důvodu přesnosti výsledných naměřených hodnot, což pomůže ke zmenšení chyby měření touto metodou. Díky tomu se metodická chyba měření pohybuje u této metody kolem 0,1 %.

Pro měření malých odporů lze využívat zapojení, které je vidět na Obr. 10. Jelikož

není V-metr ideálního charakteru, tak nemá nekonečně velký odpor a skrze něj může protékat proud. Během tohoto zapojení jím protéká malý proud, když je odpor obvodu malý. A-metr měří celkový proud, který protéká odporem i V-metrem a známe-li velikost odporu V-metru, tak potom lze provést korekci proudu, který změří A-metr. Tím, že odečteme od tohoto změřeného proudu proud procházející skrze V-metr. V-metr na rozdíl od A-metru změří skutečnou hodnotu úbytku napětí na odporu. Tato varianta je vhodná pro malé odpory z toho důvodu, že malý odpor způsobí malý protékající proud skrze V-metr, oproti proudu odporem. Během korekce odečítáme malé hodnoty proudu voltmetrem. Z toho vyplývá, že čím je tento odpor menší, tím je metoda přesnější, jelikož voltmetr není ideálního charakteru a nedisponuje nekonečným odporem, takže přes něj vždy nějaký proud bude protékat.

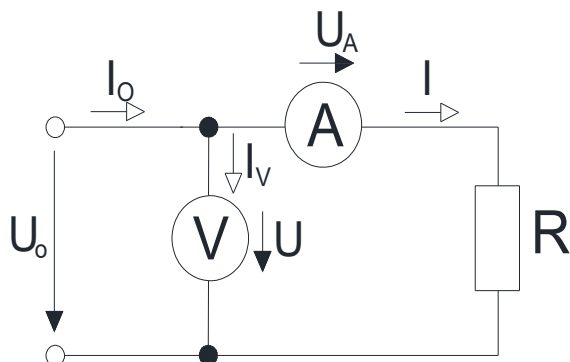


Obr 10: Schéma zapojení pro měření malých odporů

$$R = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}} \quad (25)$$

Pro měření velkých odporů lze využívat zapojení, které je vidět na Obr. 11. Jelikož není A-metr ideálního charakteru, tak nemá nulový odpor a dochází na něm k úbytku napětí. Během tohoto zapojení je úbytek napětí na A-metru oproti úbytku na měřeném velkém odporu malý. V-metr měří celkové napětí, které je součtem napětí A-metru a odporu, korekce celkového změřeného napětí lze docílit odečtením úbytku napětí na ampérmetru, pokud známe jeho odpor. Při tomto zapojení ampérmetr měří skutečnou hodnotu proudu, který protéká skrze odpor. Tato varianta je vhodná pro velké odpory

z toho důvodu, že velký odpor způsobí malý úbytek napětí na A-metru, oproti na odporu a během korekce odčítáme malé hodnoty úbytku napětí na ampérmetru. Z tohoto vyplývá, že čím je tento odpor větší, tím je metoda přesnější, jelikož je větší rozdíl mezi úbytkem na ampérmetru a velkém odporu.



Obr 11: Schéma zapojení pro měření velkých odporů

$$R = \frac{U - R_A * I}{I} \quad (26)$$

My jsme použili čtyřvodičovou Ohmovu metodu, kdy byly všechny tři cívky zapojeny do hvězdy, během měření protékal vždy dvěma cívkami stejný proud a napětí bylo měřeno pro každou cívku zvlášť. Měřili jsme studený a teplý odpor. Studený odpor byl měřen při ustálené teplotě vinutí tlumivky na 22 °C a teplý odpor, který byl změřen okamžitě po dokončení oteplovací zkoušky. Jako zdroj stejnosměrného proudu byla využita lithiová baterie.

Díky této metodě jsme byli schopni dopočítat studené odpory ze změřených hodnot proudu a napětí všech tří cívek u obou variant. Odpor za studena před sníženým počtem vinutí a změřená data byla vložena do tabulky 14 pro variantu B a 15 pro variantu C.

Fáze	U (V)	I (A)	$R_{22^{\circ}\text{C}}$ ( $\Omega$ )
L1	0,124	1,12	0,1107
L2	0,124	1,12	0,1107
L3	0,124	1,12	0,1107

Tabulka 14: Studené odpory vinutí tlumivky L Brx 2mH/6A při 22 °C

Fáze	U (V)	I (A)	$R_{20^{\circ}\text{C}}$ ( $\Omega$ )
L1	0,193	0,96	0,2010
L2	0,193	0,96	0,2010
L3	0,194	0,96	0,2021

Tabulka 15: Studené odpory vinutí tlumivky L Crx 4mH/4A při 22 °C

Tabulky 16 a 17 obsahují hodnoty proudu, napětí a dopočtené odpory jak za studena, tak za tepla pro variantu tlumivky B se sníženým počtem vinutí u všech tří fází. U teplých odporů je i zaznamenána aktuální teplota vinutí, kterou mělo při změření. Pokud porovnáme tabulku 16 s tabulkou 14 lze dopočítat, že po odvinutí došlo ke snížení studeného odporu jedné cívky B v průměru o 0,0135  $\Omega$ . A to znamená, že odpor 0,97m vodiče o průměru 1,25 mm činí těchto 0,0135  $\Omega$ . Pokud porovnáme studený a teplý odpor, tak zjistíme, že díky zvýšené teplotě došlo k nárůstu odporu přibližně o 0,023  $\Omega$  u každé jednotlivé cívky.

Fáze	U (V)	I (A)	$R_{20^{\circ}\text{C}}$ ( $\Omega$ )
L1	0,115	1,2	0,0958
L2	0,117	1,2	0,0975
L3	0,113	1,15	0,0983

Tabulka 16: Studené odpory vinutí tlumivky L BZrx 2mH/6A při 22 °C

Fáze	U (V)	I (A)	$R_{\nu}$ ( $\Omega$ )	$\Delta t$ (K)	t (°C)
L1	0,14	1,14	0,12	66,0	126,0
L2	0,14	1,15	0,12	58,3	118,3
L3	0,138	1,16	0,12	49,4	109,4

Tabulka 17: Teplé odpory vinutí tlumivky L BZrx 2mH/6A změřené po oteplovací zkoušce

Tabulky 18 a 19 obsahují hodnoty proudu, napětí a dopočtené odpory jak za studena, tak za tepla u varianty tlumivky C se sníženým počtem vinutí u všech tří fází. Jako tomu bylo i varianty B, tak i zde jsou u teplých odporů zaznamenány u každé fáze teploty, při kterých byl teplý odpor změřen. Jestliže porovnáme tabulku 15 s tabulkou 18, tak lze dopočítat, že po odvinutí došlo ke snížení studeného odporu jedné cívky C v průměru o 0,0287  $\Omega$ . To znamená, že odpor 1,68m vodiče o průměru 1,12 mm činí těchto 0,0287  $\Omega$ . A pokud porovnáme studený a teplý odpor, tak zjistíme, že díky zvýšené teplotě došlo k nárůstu odporu přibližně o 0,034  $\Omega$  u každé jednotlivé cívky.

Fáze	U (V)	I (A)	$R_{20^{\circ}\text{C}}$ ( $\Omega$ )
L1	0,1965	1,14	0,1724
L2	0,197	1,14	0,1728
L3	0,197	1,14	0,1728

Tabulka 18: Studené odpory vinutí tlumivky L CZrx 4mH/4A při 22 °C

Fáze	U (V)	I (A)	$R_{\nu}$ ( $\Omega$ )	$\Delta t$ (K)	t (°C)
L1	0,226	1,08	0,21	50,2	110,2
L2	0,221	1,08	0,20	43,2	103,2
L3	0,224	1,08	0,21	46,9	106,9

Tabulka 19: Teplé odpory vinutí tlumivky L CZrx 4mH/4A změřené po oteplovací zkoušce

## 6 Závěr

Byly navrženy dva prototypy tlumivek, které byly následně testovány. Na základě analýzy výsledků měření byly provedeny celkem tři konstrukční úpravy. A to zkrácení transformátorových E plechů za pomoci vodního paprsku, překlenutí vzduchové mezery na každé straně jedním E plechem a snížení počtu závitů.

Těmito úpravami jsme docílili toho, že indukčnost tlumivky B i C vyhovovala požadavkům zadavatele. I když tlumivka B se k požadované hodnotě indukčnosti přiblížila více v rozmezí proudu  $I_n$  až  $I_{peak}$ . Po změření oteplovací zkoušky u finálních prototypů při jmenovitém proudu a přepočítání dotykové teploty na teplotu okolí 60 °C, jsme zjistili, že teplota při  $I_n$  po ustálení se nepřiblížila k teplotě, na kterou reaguje tepelná pojistka ani u jedné varianty tlumivky. Poté co jsme zvýšili hodnotu proudu na  $1,1 I_n$ , tak cívka B1 prototypu B začala dosahovat teploty nebezpečně blízké k hodnotě, na kterou reaguje tepelná pojistka. To byl problém, jelikož tlumivka by měla být schopná práce v nadmořské výšce 2 000 m. n. m., kde kvůli menšímu tlaku (menší počet částic na  $m^3$ ) bude snížena schopnost odvodu tepla oproti místu měření, které se nacházelo v nadmořské výšce pouhých 353 m. n. m. Následovalo měření oteplovací zkoušky v režimu ED 40 %, což znamenalo, že cívkami protékal proud  $I_{on}$  po dobu 60 s a po dobu 90 s byl proud vypnutý. Získané dotykové teploty jsme přepočítali na teplotu okolí 60 °C. Během této zkoušky jsme si potvrdili domněnku z předchozího měření, že tlumivka B by nevyhovovala, jelikož teplota všech jejích cívek při ustálení by dosahovala teploty vyšší, než na kterou by reagovala tepelná pojistka. Z toho všeho vyplynulo, že i když prototyp B více vyhovoval požadované indukčnosti, tak nevyhověl oteplovacím zkouškám. A proto byl provozu schopný pouze prototyp C, který vyhovoval všem požadavkům.

Během realizace prototypů jsme čelili několika problémům, jako například rozpadání zkrácených koster, nareznutí řezaných E plechů anebo odvinutí závitu navíc



u cívky C3.

Toto téma by bylo možné ještě rozšířit a obohatit například o to, jaký vliv by na indukčnost mělo zvýšení počtu plechů na stranách při překlenutí na dva na každé straně. Tato konstrukční úprava by dle mého názoru zvýšila mechanickou samodržitelnost (pevnost), ale indukčnost pro malé proudy by narostla a také by klesala pomaleji kvůli delší době přesycení postranních plechů. Dalším rozšířením práce by mohlo být snížení dotykové teploty dosažené při oteplovacích zkouškách u tlumivky B. Jelikož tato teplota je závislá na Jouleových ztrátách, tak snížením odporu vodiče by se podle vzorce číslo 1 měla teplota vinutí snížit. Tohoto snížení odporu bychom docílili za pomoci použití silnějšího vodiče, než byl použit nyní. Pokud by použití silnějšího vodiče způsobilo snížení počtu možných navinutých závitů na kostru cívek, tak by se indukčnost donastavila za pomoci velikosti vzduchové mezery středního sloupku. Nakonec bychom mohli práci obohatit ještě o dosažení požadovaných hodnot indukčnosti jinou cestou než-li úpravou počtu závitů cívek, ale úpravou magnetického obvodu. Jak totiž vyplývá ze vzorce číslo 15, tak velikost indukčnosti se dá měnit také za pomoci magnetického odporu  $R_{mcelk}$ . Tento magnetický odpor by se dal nastavit prostřednictvím vzduchové mezery nad prostředním sloupkem. Ta by se dala nastavovat za pomoci délky prostředního sloupku. To by tedy znamenalo, že necháme stejný počet závitů pro všechny cívky fází L1-L2-L3 u obou variant tlumivek. Pro zkrácené plechy je stejně potřeba vyrobit speciální raznice, takže tato úprava by neměla na cenu vliv. Všechny cívky fází L1-L2-L3 by měly mít stejný počet závitů, což by umožnilo zjednodušení logistiky výroby.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BENEŠOVÁ, Zdeňka a Daniel Mayer: *Základní příklady z teorie elektromagnetického pole*, ZČU v Plzni, 2011. ISBN 978-80-7043-737-7.
- [2] CHMELENSKÝ, František a PUR, Zdeněk. Měření odporů In: *ELUC* [online]. [Cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1975>
- [3] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. Praha: BEN-technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-91-0.
- [4] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. 1. vyd. Praha: BEN, 1999. ISBN 80-86056-49-X.
- [5] Partula. *Transformátorová ocel. Vlastnosti a vady elektrotechnické oceli* [online]. [Cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://partula.ru/cs/transformer-steel-properties-and-defects-of-electrical-steel/>
- [6] Řezání vodním paprskem. *Wikipedie* [online]. [Cit. 2020-04-13]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Řezání\\_vodním\\_paprskem](https://cs.wikipedia.org/wiki/Řezání_vodním_paprskem)
- [7] Indukčnost. *Wikipedie* [online]. [Cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Indukčnost>
- [8] HAŇKA, Ladislav. *Teorie elektromagnetického pole*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1975. Teoretická knižnice inženýra.
- [9] REMION. Definice fyzikálních jednotek. *Laboratorní průvodce* [online]. [Cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.labo.cz/mft/jeddef.htm>
- [10] TRNKA, Zdeněk. *Teoretická elektrotechnika: učebnice pro elektrotechn. fakulty*. Praha: SNTL, 1972.

- [11] BEŠŤA, Miloš. Tlumivka. In: *Studijní materiály elektro* [online]. [Cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <http://www.mbest.cz/wp-content/uploads/2013/01/T1.2-TLUMIVKA.pdf>
- [12] KREJČÍ, František. Tlumivka. In: *Elektrika.cz* [online]. 2008 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/tlumivka>