

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Jan Štásek

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Měřič indukčnosti
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2019/2020

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

Jméno a příjmení: **Jan Štásek**
Osobní číslo: **I17318**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Téma práce: **Měřič indukčnosti**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je navrhnout a sestavit přístroj na měření indukčnosti. V rámci práce student popíše možnosti měření indukčnosti a na základě poznatků vybere princip, který bude implementován do výsledného zařízení. Měření indukčnosti bude provedeno automatizovaně po připojení indukčnosti. Výstup bude vypsán na zobrazovači. Sestrojené zařízení bude otestováno testovacími měřeními.

V teoretické části student nastuduje vlastnosti pasivních elektrických prvků a možnosti jejich měření.

V praktické části pak student navrhne měřicí přístroj pro měření indukčnosti a otestuje jeho funkčnost pomocí testovacích měření.

Rozsah pracovní zprávy: **40**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- SROVNAL, Vilém. *Elektrotechnická měření: měřicí přístroje : pro SPŠ elektrotechnické*. Praha: Informatorium, 2008. ISBN 9788073330620.
Elektrotechnická měření. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 9788073000226.
HAASZ, Vladimír, Jan HOLUB, Michal JANOŠEK, Petr KAŠPAR a Vojtěch PETRUCHA. *Elektrická měření: přístroje a metody*. 3. přepracované vydání. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06412-2.
MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMELE AT89C2051: [měření, řízení a regulace pomocí několika jednoduchých přípravek]*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ?C & praxe. ISBN 80-7300-174-8.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Luboš Rejfek, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. května 2020**

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan

Ing. Jan Pidanič, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 17. prosince 2019

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 14.05.2021

Jan Šťásek

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Lubošovi Rejfkovi, Ph.D. za jeho pomoc a odborné rady při tvoření práce. Také bych rád poděkoval rodině za podporu při studiu.

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací měřicího přístroje pro měření indukčnosti, které je prováděno automatizovaně. V teoretické části se čtenář seznámí s pasivními prvky elektrotechniky a s rozбором měřících metod pro měření indukčností. Praktická část je věnována postupnému měření dostupných metod pro měření indukčností a následnému zhodnocení metod a jejich porovnání. Na základě porovnání metod byl vybrán princip pro výsledné zařízení využívající rezonance paralelního zapojení cívky a kondenzátoru. Navržené zařízení bylo otestováno sadou měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Indukčnost, Měření Indukčnosti, Rezonance, Napěťový dělič, Přechodové děje

TITLE

Inductance measuring instrument

ANNOTATION

The bachelor's thesis deals with the design and implementation of a measuring device for measuring inductance, which is performed automatically. The reader gets acquainted with the passive elements of electrical engineering and with the analysis of measuring methods for measuring inductances in the theoretical part. The practical part is devoted to the gradual measurement of available methods for measuring inductances and subsequent evaluation of methods and their comparison. The principle based on the comparison of methods was chosen for the resulting device using the resonance of the parallel connection of the coil and capacitor. The proposed device was tested by a set of measurements.

KEYWORDS

Inductance, Inductance measurement, Resonance, Voltage divider, Transients

OBSAH

ÚVOD	13
1 ZÁKLADNÍ ELEKTROTECHNICKÉ POJMY A POPIS PASIVNÍCH PRVKŮ	14
1.1 Elektrický obvod	14
1.2 Základní veličiny	14
1.2.1 Elektrické napětí	15
1.2.2 Elektrický proud	15
1.3 Zdroje napětí a proudu	16
1.3.1 Zdroje stejnosměrného napětí a proudu	17
1.3.2 Zdroje střídavého napětí a proudu	18
1.4 Pasivní elektrické prvky	18
1.4.1 Rezistory	18
1.4.2 Kapacitory	19
1.4.3 Induktory	21
2 PRINCIPY A METODY MĚŘENÍ INDUKČNOSTI	27
2.1 Důležité vztahy pro metody a principy měření indukčnosti	27
2.1.1 Definice impedance	27
2.1.2 Definice rezonančního vztahu	28
2.2 Rozbor a popis jednotlivých metod měření indukčnosti	28
2.2.1 Měření indukčnosti voltmetrem a ampérmetrem	28
2.2.2 Měření indukčnosti rezonanční metodou	29
2.2.3 Měření indukčnosti pomocí voltmetru ampérmetru a wattmetru	30
2.2.4 Měření indukčnosti třemi ampérmetry	31
2.2.5 Měření indukčnosti třemi voltmetry	33
2.3 Můstkové metody měření indukčnosti	34
2.3.1 Maxwell-Wienův můstek	34
2.3.2 Owenův můstek	35
2.3.3 Rezonanční můstek	36
2.4 Přechodný jev v elektrickém obvodu s cívkou	37
2.5 Indukční dělič	39
3 PRAKTICKÁ REALIZACE DOSTUPNÝCH METOD	441

3.1	Kalibrační měření jednotlivých cívek	41
3.2	Měření stejnosměrných odporů jednotlivých cívek	41
3.3	Měření pomocí rezonanční metody	41
3.4	Měření pomocí Ohmovy metody pro malé indukčnosti realizované osciloskopem a ampérmetrem	43
3.5	Měření pomocí metody tří voltmetrů realizované osciloskopem	43
3.6	Měření pomocí můstkové metody	44
3.7	Měření indukčnosti pomocí přechodových jevů	44
3.8	Měření pomocí indukčního děliče	46
3.9	Zhodnocení měřených metod a výběr metody pro navrhované zařízení	46
4	Návrh konceptu zařízení a popis jednotlivých elementů	49
4.1	Hardwarová část zařízení	49
4.2	Podrobný popis principu zařízení a schéma zapojení	50
4.3	Softwarová část zařízení	51
4.4	Testovací měření na nepájivém poli a návrh DPS	54
4.5	Testovací měření	55
	ZÁVĚR	57
	POUŽITÁ LITERATURA	58
	PŘÍLOHY	60

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1	Nezávislý zdroj napětí	17
Obrázek 2	Nezávislý zdroj proudu a skutečný zdroj proudu	17
Obrázek 3	Schématická značka rezistoru	19
Obrázek 4	Náhradní schéma reálného rezistoru	19
Obrázek 5	Schématická značka kondenzátoru	20
Obrázek 6	Schématická značka induktoru	21
Obrázek 7	Schématická značka vzájemné indukčnosti	23
Obrázek 8	Sériové náhradní schéma cívky	25
Obrázek 9	Paralelní náhradní schéma cívky	26
Obrázek 10	Schéma zapojení pro měření indukčnosti voltmetrem a ampérmetrem	28
Obrázek 11	Sériový rezonanční obvod	29
Obrázek 12	Paralelní rezonanční obvod	30
Obrázek 13	Schéma zapojení pro měření indukčnosti pomocí voltmetru, ampérmetru a wattmetru	31
Obrázek 14	Schéma zapojení pro měření indukčnosti třemi ampérmetry	32
Obrázek 15	Fázorový diagram pro měření indukčnosti metodou tří ampérmetrů	32
Obrázek 16	Schéma zapojení pro měření indukčnosti třemi voltmetry	33
Obrázek 17	Fázorový diagram pro měření indukčnosti třemi voltmetry	34
Obrázek 18	Schéma zapojení Maxwell-Wienova můstku	35
Obrázek 19	Schéma zapojení Owenova můstku	36
Obrázek 20	Schéma zapojení rezonančního můstku	36
Obrázek 21	Schéma zapojení elektrického obvodu s cívkou	37
Obrázek 22	Schéma zapojení indukčního děliče	39
Obrázek 23	Zaznamenaný průběh přechodného jevu na osciloskopu	45
Obrázek 24	Průběh vstupního signálu na osciloskopu	46
Obrázek 25	Arduino nano	49
Obrázek 26	LCD modul 16x2 znaků	50
Obrázek 27	Schéma zapojení výsledného zařízení	51
Obrázek 28	Rozložení pinů na použitém OZ	51
Obrázek 29	Ukázka algoritmu softwarové části	54
Obrázek 30	Výsledné zařízení na nepájivém poli	54
Obrázek 31	Sestavené zařízení při finálním měření	55

Tabulka 1 Skutečné hodnoty indukčností cívek	41
Tabulka 2 Hodnoty stejnosměrných odporů cívek	41
Tabulka 3 Výsledné hodnoty pro rezonanční metodu pomocí sériového rezonančního obvodu	42
Tabulka 4 Výsledné hodnoty pro rezonanční metodu pomocí paralelního rezonančního obvodu	43
Tabulka 5 Výsledné hodnoty pro Ohmovu metodu realizovanou pomocí osciloskopu a ampérmetru	43
Tabulka 6 Výsledné hodnoty pro metodu tří voltmetrů realizovanou osciloskopem	44
Tabulka 7 Výsledné hodnoty můstkové metody	44
Tabulka 8 Výsledné hodnoty přechodného jevu v obvodu s cívkou	45
Tabulka 9 Výsledné hodnoty indukčního děliče	46
Tabulka 10 Přehled výsledků všech měřených metod	47
Tabulka 11 Přehled výsledků všech měřených metod včetně jejich chyb	47
Tabulka 12 Hodnoty zkušební měření na výsledném zařízení	54
Tabulka 13 Naměřené hodnoty před kalibrací	55
Tabulka 14 Naměřené hodnoty po kalibraci	56

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

B _c	[S]	Kapacitní susceptance
C	[F]	Kapacita
E	[N·C ⁻¹]	Intenzita elektrostatického pole
F	[Hz]	Frekvence
G	[S]	Elektrická vodivost
I	[A]	Elektrický proud
J	[A/m]	Proudová hustota
L	[H]	Indukčnost
Q	[C]	Elektrický náboj
R	[Ω]	Elektrický odpor
S	[m ²]	Plocha
U	[V]	Elektrické napětí
X _c	[Ω]	Kapacitní reaktance
X _l	[Ω]	Indukční reaktance
Z	[Ω]	Impedance
φ	[Wb]	Magnetický tok
φ	[V]	Elektrický potenciál

ÚVOD

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat zařízení pro automatizované měření indukčnosti. Aby toto bylo možné realizovat je potřeba provést rozbor metod pro měření indukčnosti a provést jejich testovací měření a na základě porovnání těchto metod vybrat metodu pro navrhované zařízení a navrhnout toto zařízení.

V současné době pozorujeme využití elektromagnetické indukce a elektřiny samotné ve spoustě technických, zdravotních, přírodovědeckých, výzkumných ale i běžných oborech. Elektřina a magnetismus se staly nedílnou součástí dnešního světa a jsou tak nepopsatelným přínosem. Také možnost automatizace a robotizace se rozšířila do všech různých odvětví. Potřeba provádět měření indukčností při konstrukci těchto zařízení byla motivací pro tvorbu této bakalářské práce.

Elektřina a další záležitosti s ní spojené se mohou zdát jako relativně novodobá záležitost. Ovšem historie elektřiny sahá do pradávných časů. První zmínky sahají až do starověkého Řecka. Řecký filozof Tháles v 6. stol. př. n. l. jako první zjistil že jantar, tedy elektron, který se tře o len přitahuje stéblo slámy. Tento důkaz si však nedokázal patřičně vysvětlit a prezentoval ho jako důkaz, že mají duši neživé předměty. Po další tisíciletí zůstala elektřina stále pojmem, který neměl jednoznačné, a hlavně smysluplné vysvětlení. V 17. století přišel se svojí myšlenkou Benjamin Franklin, který provedl rozsáhlý výzkum elektřiny. A zjistil, jistým pokusem v bouřlivé noci, že blesk je elektrické povahy. Na konci 18. století italský lékař a fyzik Luigi Galvani tvrdil, že žabí stehýnka ležící na plechu sebou při dotyku skalpelu škubou. Tomu tvrzení silně oponoval též italský fyzik Alessandro Volta. Tvrdil, že elektřinu nevyrábí žabí stehýnka, ale kontakt dvou kovových částí v určitém prostředí. To také dokázal později vytvořením Voltova sloupu, který byl složen ze zinkových a měděných kotoučů potažených kůží. A tímto sloupem tekla elektrický proud i bez přítomnosti části živého organismu. Století elektřiny tedy 19. století, přineslo spoustu klíčových momentů. Michael Faraday dokázal velmi dobře popsat elektromagnetickou indukci. Na Faradayovu teorii navázal fyzik James C. Maxwell, který dokázal teoreticky objasnit a popsat souvislost jevů. Z čehož vznikli známé Maxwellovy rovnice.[18]

V teoretické části proběhlo seznámení se základními prvky elektrotechniky a popisem pasivních prvků, zejména však induktorů. Dále byl proveden rozbor dostupných metod pro měření indukčností. Praktická část závěrečné práce se týkala měření jednotlivých metod a následnému vybrání principu měření, který byl implementován do závěrečného zařízení. Sestavené zařízení bylo otestováno testovacím měřením.

1 ZÁKLADNÍ ELEKTROTECHNICKÉ POJMY A POPIS PASIVNÍCH PRVKŮ

V první kapitole bude čtenář seznámen se základními elektrotechnickými pojmy, zejména s podrobným popisem pasivních prvků. Největší pozornost bude věnována popisu induktoru, jelikož je nejdůležitější z hlediska tématu závěrečné práce. Zmíněn bude také návrh válcové vzduchové cívky z mechanických rozměrů.

1.1 Elektrický obvod

Elektrický obvod je ideálním prototypem reálného elektrického zařízení. Je to prostorově omezená soustava navzájem vodivě spojených obvodových prvků. Zobrazuje se schématem zapojení, které je sestaveno ze schématických značek jednotlivých prvků (součástí). Jevy, které v elektrickém obvodu probíhají lze dostatečným způsobem popsat pomocí proudů a napětí.[1]

Prvky, které se v elektrickém obvodu objevují dělíme na aktivní a pasivní. Aktivní prvky, dodávají do obvodu elektrickou energii, jedná se tedy o zdroje elektrické energie. Základní členění aktivních prvků je na zdroje napětí a proudu. Pasivní prvky elektrickou energii spotřebovávají, tedy proměňují na jiný typ energie, nebo hromadí, ať už v podobě elektrického nebo magnetického pole. Jedná se především o rezistory, induktory a kapacitory. Pasivní a aktivní obvodové prvky budou popsány v další části závěrečné práce.[2] Pro tuto bakalářskou práci budou malá písmena ve znaku veličin symbolizovat okamžité hodnoty a obvodové veličiny na charakteristikách.[5]

1.2 Základní veličiny

V této podkapitole budou definovány základní veličiny elektrotechniky a postupně budou popsány ty nejdůležitější z hlediska tématu závěrečné práce.[22]

Příčinou všech jevů elektrických, elektromagnetických i magnetických, které se objevují v elektrotechnice je elektricky nabitá hmota, která nese kladný nebo záporný elektrický náboj. Elektrické náboje se mohou přitahovat, pokud jejich síly působí nesouhlasným směrem nebo odpuzovat, pokud jejich síly působí směrem souhlasným. Elektrický náboj se značí Q a jednotkou je Coulomb [C]. Proton je držitelem nejmenšího kladně nabitého náboje o velikosti $q_p = +1.602 \cdot 10^{-19}$ C. Elektron představuje nejmenší záporně nabitou hmotu o velikosti $q_e = -1.602 \cdot 10^{-19}$ C. Hmota, která je elektricky neutrální nabývá stejným počtem kladných i záporných elementárních nábojů. Pokud dojde k oddělení elektronu vzniká záporný náboj a kladný iont. V okolí elektrického náboje vzniká elektrostatické pole, které je charakterizované siločárami. Po kterých by se v tomto poli pohybovali zkušební náboje.[22]

Síla, kterou na sebe působí dva náboje je podle [22] definována pomocí Coulombova zákona.

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (1.1)$$

Kde Q_1 je první zkušební náboj, Q_2 je druhý zkušební náboj, r je vzdálenost a ε je permitivita prostředí.[22]

1.2.1 Elektrické napětí

Elektrické napětí značíme U jednotkou je Volt [V]. Elektrické napětí je práce na přesunutí jednotkového náboje z jednoho bodu do druhého. Jedná se o veličinu integrální.[2] Podle [2] je elektrické napětí definováno.

$$U = \frac{A}{Q} \quad (1.2)$$

Kde A je práce na přesunutí jednotkového náboje a Q je jednotkový náboj.[2]

V každém bodě elektrostatického pole má elektrický náboj jinou energii polohy, což lze podle [2] definovat jako potenciál.

$$\varphi = \frac{W}{Q} \quad (1.3)$$

Kde W je potenciální energie nabitého tělesa a Q je jeho náboj.[2]

Rozdílem energií polohy dvou bodů je $W = W_1 - W_2$, při aplikování k náboji Q .[2]

$$\frac{W}{Q} = \frac{W_1}{Q} - \frac{W_2}{Q} \quad (1.4)$$

$$U_{1,2} = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (1.5)$$

Z rovnice (1.5) vyplývá, že elektrické napětí mezi dvěma body v elektrostatickém poli je dáno rozdílem potenciálů v těchto dvou bodech. Místa, ve kterých je stejný potenciál se nazývají ekvipotenciální plochy a jsou kolmé k siločarám elektrostatického pole.[2]

Míra působící síly, na jednotkový náboj se nazývá intenzita elektrostatického pole. Označuje se E její jednotkou je Volt na metr [V/m].[2] Její definice je podle [2] následující.

$$E = \frac{F}{Q} \quad (1.6)$$

Kde F je působící síla a Q je jednotkový náboj v poli.[2]

1.2.2 Elektrický proud

Elektrický proud je definovaný jako pohyb náboje, který projde určitou plochou za určitý časový okamžik. Jedná se o veličinu skalární, její označení je I jednotkou je ampér [A]. V soustavě SI patří mezi sedm základních veličin. Také je to veličina integrální.[20] Podle [20] je definice následující.

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (1.7)$$

Kde dQ je pohyb náboje za určitý časový okamžik, dt je daný časový okamžik.[20]

Elektrický proud vztažený k určité ploše se nazývá proudová hustota J jednotkou je ampér na metr čtverečný [A/m^2]. V homogenním proudovém poli je proud dán součinem proudové hustoty J a plochy S . Homogenní proudové pole je zvláštním případem, protože jím protéká v čase neproměnný proud. Z čehož vyplývá, že i proudová hustota je v tomto poli ve všech bodech shodná.[2] Proudová hustota je podle [2] definována vztahem.

$$J = \frac{I}{S} \quad (1.8)$$

Kde I je elektrický proud v homogenním poli, S je plocha.[2]

V proudovém poli je pohyb nábojů zajištěn díky přítomnosti síly, která na náboje působí. Jak je definováno rovnicí (1.6). Důsledkem těchto vztahů vzniká proudová hustota daná rovnicí (1.8).[2] Pro snazší pochopitelnost zde bude uveden již odvozený vztah, který plyne z výše uvedených vztahů. Jedná se o elektrickou vodivost prostředí, značí se G a jednotkou je Siemens [S]. Převrácená veličina elektrické vodivosti se nazývá elektrický odpor značí se R jednotkou je Ohm [Ω].[13]

$$G = \frac{S}{l} \cdot \gamma \Rightarrow R = \frac{l}{S} \cdot \rho \quad (1.9)$$

Kde S je obsah průřezu vodiče, l je délka vodiče, γ je konduktivita a ρ je rezistivita.[13]

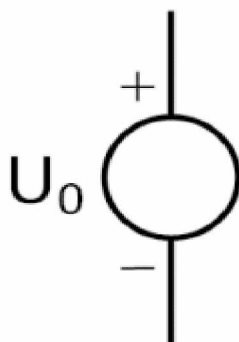
Z výše uvedeného vyplývá tzv. Ohmův zákon, který je podle [13] definován níže. Součástka vykazující elektrický odpor se nazývá rezistor, podrobněji bude tato součástka popsána v další podkapitole bakalářské práce.[13]

$$U = R \cdot I \quad (1.10)$$

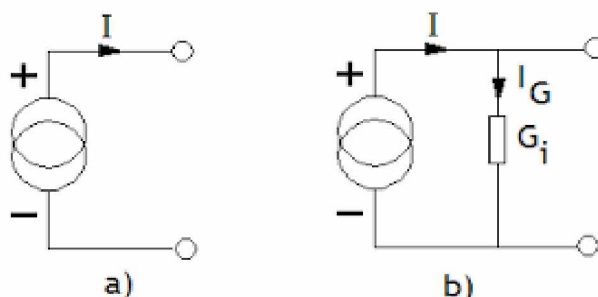
Kde R je elektrický odpor, a I protékající proud.[13]

1.3 Zdroje napětí a proudu

Tyto dvojpóly (zdroje) mají tu vlastnost, že jsou schopny trvale dodávat elektrickou energii do obvodu, proto jsou řazeny do aktivních prvků.[1] Napětí, které se nachází na svorkách zdroje, na které bývá připojena zátěž se nazývá svorkové napětí. Reálné zdroje elektrické energie jsou charakteristické tím, že při odběru elektrického proudu poklesne napětí na jejich svorkách. To způsobuje fakt, že každý zdroj elektrické energie má jistý tzv. vnitřní odpor. Pro modelování a řešení elektrických obvodů používáme ideální zdroje. Základní rozdělení zdrojů je na zdroje stejnosměrného napětí a proudu a na zdroje střídavého napětí a proudu. Na obr. 1. je schématická značka nezávislého zdroje napětí a na obr. 2. zleva schématická značka nezávislého zdroje proudu a zprava skutečného zdroje proudu.[4]



Obrázek 1 Nezávislý zdroj napětí



Obrázek 2 Nezávislý zdroj proudu a skutečný zdroj proudu

1.3.1 Zdroje stejnosměrného napětí a proudu

Ideální zdroj napětí je takový, jehož vnitřní odpor je nulový. Na jeho svorkách je bez ohledu na velikost odebíraného proudu stále stejně velké napětí. Zatěžovací charakteristika zdroje udává závislost napětí na svorkách zdroje vůči odebíranému proudu. Zůstává-li svorkové napětí zdroje neměnné se změnou odporu zatěžovacího rezistoru, jedná se o zdroj tvrdého napětí. Mění-li se svorkové napětí zdroje se změnou zátěže výrazně, jedná se o zdroj tzv. měkkého napětí.[4]

Ideální zdroj proudu je takový, jehož vnitřní odpor je bezmezně velký. Dokáže dodávat stále stejně velký proud bez ohledu na velikost zátěže, která je připojena na výstupu elektrického obvodu. Je-li proud, který protéká mezi výstupními svorkami nezávislý na velikosti odporu zátěže, pak dochází pouze ke změně napětí, které vzniká na zatěžovacím rezistoru. Poté se jedná o zdroj tzv. tvrdého někdy přezdívaného stálého proudu.[4]

Reálný zdroj napětí se skládá z ideálního zdroje napětí U_0 , který je zapojen v sérii s vnitřním odporem R_i . Kde U_0 představuje v podstatě vnitřní napětí zdroje, které bývá často nahrazováno pojmem elektromotorické napětí značené písmenem E . Pokud připojíme k reálnému zdroji napětí, zatěžovací rezistor R_z , bude protékat elektrickým obvodem proud I_z . [4]

$$I_z = \frac{U_0}{R_i + R_z} \quad (1.11)$$

Kde U_0 je vnitřní napětí zdroje, R_i je vnitřní odpor, R_z je zatěžovací rezistor.[4]

Reálný zdroj proudu je složen z ideálního zdroje proudu I_0 , ke kterému je připojen vnitřní odpor R_i paralelně. Pokud připojíme k reálnému zdroji proudu zatěžovací rezistor R_z , který bude odebírat proud I_z , poté bude napětí na výstupních svorkách dáno vztahem.[4]

$$U_z = R_i \cdot (I_0 - I_z) \quad (1.12)$$

Kde R_i je vnitřní odpor, I_0 je proud ideálním zdrojem proudu, I_z je proud zátěže.[4]

1.3.2 Zdroje střídavého napětí a proudu

Zdroje střídavého napětí a proudu jsou vždy reprezentovány pomocí vlnovky ve znaku zdroje. V anglické literatuře, vidíme často označení jako zdroj AC napětí nebo proudu. Je zřejmé, že střídavé veličiny s časem mění svoji velikost a smysl periodicky. Z toho lze vydedukovat a uvědomit si význam vlnovky ve znaku. Tedy střídavé veličiny nemají konstantní průběh s časem.[22]

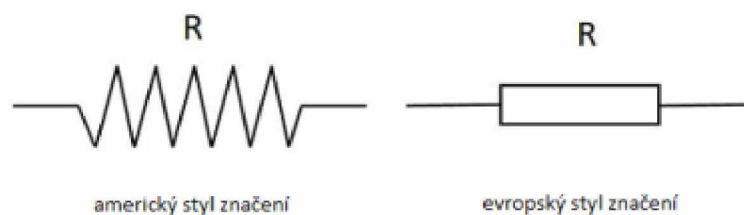
1.4 Pasivní elektrické prvky

Jedná se o základní elektrotechnické součástky, které se vyskytují v každém elektronickém zařízení. Na rozdíl od aktivních prvků tyto prvky energii spotřebovávají, nebo ji v sobě akumulují. Jsou to součástky, které ke své funkci nepotřebují přídavný zdroj elektrické energie. Jedná se především o rezistory, induktory a kapacitory. Porozumění principu pasivních prvků je klíčové při navrhování elektrických obvodů. U pasivních součástek se zabýváme především teplotní závislostí, stabilitou, maximálním dovoleným zatížením, parazitními vlastnostmi a výběrem jmenovité hodnoty a tolerance.[6]

V další podkapitole budou jednotlivé pasivní součástky popisovány včetně jejich vlastností. Nejrozšířenější popis bude věnován induktoru, jelikož je to klíčový prvek vzhledem k tématu a charakteru bakalářské práce.[6]

1.4.1 Rezistory

Rezistory jsou pasivní elektrotechnické součástky, které se hojně využívají v elektronice a v elektronických zařízeních. Tato součástka bývá velmi často nazývána jako odpor, což v mnoha případech vede k nejednoznačnému pojmenování a možné záměně se stejnojmennou veličinou elektrickým odporem. Nejčastějším důvodem pro zařazení rezistoru do elektrického obvodu je snížení velikosti elektrického proudu nebo k získání určitého úbytku napětí. Také se využívají při elektrických měřeních, nejčastěji při měření proudu (bočník), při měření a regulaci výkonu, jako topná tělesa, pro tlumení kmitavých obvodů nebo jako nabíjecí odpor při nabíjení a vybíjení kondenzátoru apod. Schématická značka rezistoru není celosvětově sjednocena. V Evropě se používá symbol ve tvaru obdélníku, kdežto ve Spojených státech a Japonsku se používá symbol složený z lomených čar viz obr. 3. Rezistor značíme písmenem R a jednotkou elektrického odporu je Ohm $[\Omega]$. [6]

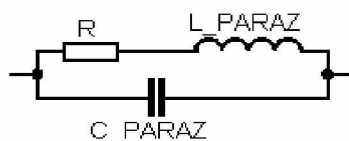


Obrázek 3 Schématická značka rezistoru

Nejprve je vhodné stanovení popisu ideálního a reálného rezistoru. Ideální rezistor lze popsat jedinou základní charakteristikou, respektive náhradním schématem, které obsahuje pouze jediný prvek. U reálného rezistoru je situace složitější, protože uvažujeme reálný materiál, ze kterého je rezistor vyroben.[22]

Ideální rezistor má nezávisle na vnějších podmínkách a fyzikálních parametrech okolního prostředí, vykazovat čistě reálný elektrický odpor. Z toho plyne, že napětí na svorkách rezistoru je přímo úměrné proudu, kterým jím protéká. Lze tedy říci, že je charakterizován závislostí mezi napětím a proudem, pomocí voltampérové charakteristiky nebo pomocí ampérvoltové charakteristiky. V obecném případě to může být křivka u nelineárního rezistoru nebo přímka u rezistoru lineárního. Konstantou úměrnosti u lineárního rezistoru je elektrický odpor, z tzv. Ohmova zákona dostáváme vztah, který je již definován rovnicí (1.10).[1]

Reálný rezistor je vyroben z reálného materiálu, který vykazuje elektrický odpor a má jistou geometrii. Reálné vlastnosti rezistoru jsou určeny mnoha parametry a jevy. Z kterých nejdůležitější jsou velikost elektrického odporu (jmenovitá hodnota a tolerance), teplotní závislost elektrického odporu, napěťová závislost elektrického odporu a maximální provozní napětí, kmitočtová závislost elektrického odporu (impedance), maximální ztrátový výkon ohřívající rezistor, stárnutí rezistoru (změna odporu v závislosti na čase), šum rezistoru. Náhradní schéma reálného rezistoru se skládá ze sériového parazitního induktoru a paralelního kapacitoru viz obr. 4.[6]

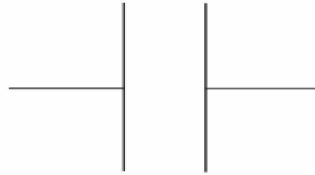


Obrázek 4 Náhradní schéma reálného rezistoru

1.4.2 Kapacitory

Kapacitory, obvykle nazývány též jako kondenzátory jsou dalšími zástupci pasivních elektrických prvků. Dokáží uchovávat elektrickou energii ve formě elektrostatického pole. Jejich hlavní vlastností je kapacita, která se značí písmenem C a její jednotkou je Farad [F].[5] Kondenzátory se skládají ze dvou vodivých desek, které jsou odděleny dielektrikem. Na každou z desek působí elektrické náboje opačné polarity, které se vzájemně přitahují elektrickou silou. Dielektrikum, které je mezi deskami chrání náboje, aby nedošlo k neutralizaci a tím vybití kondenzátoru. Vzhledem k zákonům o elektrostatické indukci, jsou

velikostně náboje na obou deskách stejné. Podle tvaru se kondenzátory dělí na válcové, deskové, kulové, svítkové. Podle dielektrika se rozdělují na vzduchové, keramické, slídové, elektrolytické atd. Schématická značka je uvedena na obr. 5.[7]



Obrázek 5 Schématická značka kondenzátoru

Nejprve je vhodné stanovení popisu ideálního a reálného kapacitoru. Jak bylo uvedeno u rezistoru, obdobné je to i u kapacitoru. Ideální kapacitor lze popsat jedinou základní charakteristikou, respektive náhradním schématem, které obsahuje pouze jediný prvek. U reálného kapacitoru, tj. technického je situace poměrně složitější a bude také patřičně rozebrána.[1]

Ideální kapacitor je charakterizován závislostí mezi nábojem a napětím. Lze tedy tuto závislost zobrazit voltcoulombovou charakteristikou. V případě nelineárního kapacitoru to může být křivka, v případě lineárního kapacitoru pak přímka. Konstantou úměrnosti u lineárního kapacitoru je kapacita, z čehož dostáváme vztah.[16]

$$Q = C \cdot u \quad (1.13)$$

Kde C je kapacita a u je elektrické napětí.[16]

Po dosazení do vztahu (1.7), který definuje elektrický proud a dosazením za elektrický náboj, vyplývá následující vztah pro elektrický proud na kapacitoru.[16]

$$i = C \cdot \frac{du}{dt} \quad (1.14)$$

Kde C je kapacita, du je elektrické napětí za časový okamžik, dt je daný časový okamžik.[16]

Poté lze po jednoduché matematické úpravě vztahu (1.14), získat vztah, který definuje napětí na kapacitoru.[1]

$$u = \frac{1}{C} \int i dt \quad (1.15)$$

Kde $1/C$ je převrácená hodnota kapacity a integrál z $i dt$ symbolizuje elektrický proud za daný časový okamžik.[1]

1.4.3 Induktory

Induktory, často nazývané jako cívky, jsou dalšími zástupci pasivních elektrotechnických prvků. Cívky patří do skupiny pasivních dvojpólů, které jsou konstruovány takovým způsobem, aby dokázaly vytvořit vlastní indukčnost značenou písmenem L v jednotkách Henry [H]. V elektrických obvodech mají obvykle dvě zásadní funkce. Používají se k vytvoření magnetického pole elektrického proudu, které se dále využívá k působení magnetické síly, v tomto případě se jedná o cívku s jádrem. Běžná cívka poté najde své využití jako nositel indukčnosti, k indukci elektrického proudu proměnným magnetickým polem. Cívka je tvořena závitů, které jsou sestaveny do jedné nebo více vrstev. Prostor, který vzniká mezi závitů má obvykle kruhový, čtvercový nebo obdélníkový průřez. Velikost indukčnosti cívek závisí na počtu závitů, jejich geometrickém uspořádání a na magnetických vlastnostech prostředí. Vzhledem k tématu bakalářské práce bude tomuto prvku věnována poměrně obsáhlá část. Schematická značka cívky je zobrazena na obr. 6.[8]

Schematická značka cívky



Obrázek 6 Schématická značka induktoru

Ideální induktor by měl vykazovat jedinou vlastnost, a to vlastní indukčnost. Ideální induktor je charakterizován závislostí proudu a spřaženého magnetického toku Ψ jehož jednotka je Weber [Wb]. Lze tedy tuto závislost charakterizovat weberampérovou charakteristikou, která může být stejně jako u rezistoru a kapacitoru lineární nebo nelineární. U charakteristiky nelineární je obrazem křivka, u lineární charakteristiky pak přímka. Konstantou úměrnosti u lineární charakteristiky je indukčnost cívky. Z čehož lze dostat následující vztah.[1]

$$\psi = L \cdot i \quad (1.16)$$

Kde L je indukčnost cívky, a i je protékající proud.[1]

Dosadí-li se do tzv. Faradayova indukčního zákona definovaného podle [2], který pojednává o změně magnetického pole za určitý časový interval, za který se naindukuje indukované napětí. Indukované napětí musí působit proti příčině svého vzniku, proto uvažujeme záporné znaménko.[1]

$$u_i = - \frac{d\psi}{dt} = - \frac{dL \cdot i}{dt} = -L \cdot \frac{di}{dt} \quad (1.17)$$

Kde di je protékající proud za časový okamžik a dt je časový okamžik.[1]

Základní vlastností ideálního induktoru je, že hromadí elektromagnetickou energii ve formě magnetického pole. Zde uvádím pro lepší interpretaci celkový odvozený vztah.[22]

$$W = \int u \cdot i \, dt = \int L \cdot \frac{di}{dt} \cdot i \, dt = L \int i \, di = \frac{1}{2} L \cdot i^2 \quad (1.18)$$

Kde L je indukčnost cívky, i je protékající proud v druhé mocnině.[22]

Reálný induktor, pro který bude lepší uvést pojem cívka, která je navinuta z vodiče určité délky s určitým průřezem a určitým měrným odporem. Bude tedy vykazovat kromě své indukčnosti také parazitní odpor, který je dán vztahem (1.9).[22]

Dle konstrukce se dají cívky dělit na dvě velké skupiny, cívky s jádrem, jádro je tvořeno magneticky vodivým materiálem a cívky bez jádra, tedy vzduchové cívky. Vzduchové cívky jsou takové, které nemají magnetické jádro vůbec nebo mají jednoduché tzv. doladovací jádro, které je ovšem tvořeno otevřeným magnetickým obvodem. Cívky s magnetickými jádry mohou mít zcela uzavřený magnetický obvod nebo také existuje polouzavřený magnetický obvod.[8]

Pokud magnetické pole jedné cívky přesahuje i do cívky druhé, pak změny magnetického toku v ní vyvolávají napětí tzv. vzájemné indukce. Která opět plyne z tzv. Faradayova indukčního zákona definovaného podle [2]. Kde písmeno M označuje vzájemnou indukčnost.[1]

$$u_{i2} = - \frac{d\psi}{dt} = - \frac{dMi_1}{dt} \quad (1.19)$$

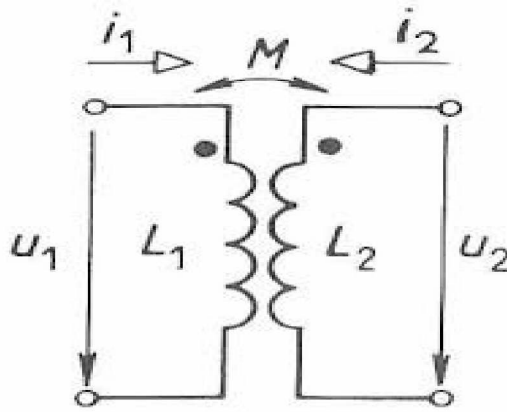
Analogická situace bude pak i u druhé cívky. Protéká-li proud druhou cívkou, v jejím okolí vznikne magnetické pole a pokud toho pole zasahuje i do cívky první, pak změny tohoto pole vyvolávají opět tzv. napětí vzájemné indukce.[1]

$$u_{i1} = - \frac{d\Psi}{dt} = - \frac{dM \cdot i_1}{dt} \quad (1.20)$$

Oba tyto jevy, tedy jev vlastní a vzájemné indukce, se projevují v elektrickém obvodu vždy současně, jsou-li v obvodu alespoň dvě cívky magneticky propojeny. V cívce L_1 vzniká napětí vlastní indukce od proudu i_1 a také napětí vzájemné indukce od proudu i_2 , z čehož dostáváme výsledné napětí na první cívce, které je dáno jejich součtem, jak ukazuje rovnice (1.21). Analogicky dostáváme napětí i na cívce druhé, jak lze vidět v rovnici (1.22). Pro lepší demonstraci tohoto jevu je vhodné grafické zobrazení, které je ukázáno na obr. 7.[1]

$$u_1 = -L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + \left(-M \cdot \frac{di_2}{dt} \right) \quad (1.21)$$

$$u_2 = -L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + \left(-M \cdot \frac{di_1}{dt} \right) \quad (1.22)$$



Obrázek 7 Schématická značka vzájemné indukčnosti

Spojování cívek může být zrealizováno paralelní nebo sériovou kombinací. Pokud jsou cívky zapojeny do sériové kombinace. Je vhodné zavést vztah pro energii magnetického pole cívky.[1]

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1.23)$$

Kde L je indukčnost cívky, a I je protékající proud v druhé mocnině.[1]

Pokud jsou tedy cívky zapojeny v sérii a magnetický tok jedné cívky nezasahuje do cívky druhé pak bude jejich vzájemná indukčnost nulová. Z tohoto tvrzení lze stanovit, že energie magnetického pole obou cívek musí být stejná. A lze tedy dvě cívky v sérii nahradit jedinou cívkou s indukčností danou vztahem.[16]

$$L = L_1 + L_2 \quad (1.24)$$

Může nastat případ, že cívky spojené v sérii budou vázány vzájemnou indukčností, pak bude situace odlišná. Mohou nastat dva případy. V prvním případě budou magnetické pole obou cívek působit souhlasným směrem. V případě druhém pak magnetické pole obou cívek bude působit směrem nesouhlasným. Tedy v prvním případě se bude magnetické pole obou cívek počítat dle vztahu (1.25) a v případě druhém odečítat dle vztahu (1.26).[4]

$$L = L_1 + L_2 + 2M \quad (1.25)$$

$$L = L_1 + L_2 - 2M \quad (1.26)$$

U paralelní kombinace je napětí na obou cívkách stejné, pokud nejsou vázány vzájemnými indukčnostmi. A lze tedy dvě paralelně spojené cívky nahradit jedinou cívkou s indukčností dle vztahu.[16]

$$L = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \quad (1.27)$$

Může nastat případ, že dvě cívky spojené paralelně budou vázány vzájemnou indukčností. Situace je velmi obdobná jako u sériové kombinace, také nastanou dva případy. V prvním případě budou magnetické pole obou cívek působit souhlasně. V druhém případě pak budou

magnetické pole obou cívek působit nesouhlasně. Tedy v prvním případě se budou magnetické pole obou cívek sčítat dle vztahu (1.28). A v případě druhém pak odečítat dle vztahu (1.29).[4]

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1 + M} + \frac{1}{L_2 + M} \quad (1.28)$$

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1 - M} + \frac{1}{L_2 - M} \quad (1.29)$$

Pokud bude induktorem procházet harmonický proud, bude na svorkách induktoru vznikat napětí vlastní indukce definováno vztahem.[2]

$$u = L \cdot \frac{di}{dt} = U \cdot \cos \omega t \quad (1.30)$$

Jak lze poznat napětí je kosinusového charakteru a proud charakteru sinového. Tedy na induktoru proud předbíhá napětí o 90°. Poté již lze definovat velmi důležitý vztah pro napětí na induktoru.[2]

$$U = j\omega LI \quad (1.31)$$

Součin $\omega \cdot L$ má v podstatě význam odporu, ovšem v elektrickém obvodu, ve kterém protéká střídavý proud se nazývá indukční reaktance a značí se písmeny X_L . Důležitým pojmem je také impedance induktoru, kde operátor j vyjadřuje právě fázový posun o 90°. Jeho přesné vyjádření je definováno vztahem (1.32). Převrácenou hodnotou je pak susceptance, tj. jalová indukční vodivost značena písmenem B .[2]

$$j\omega \cdot L = jx_L \quad (1.32)$$

Pokud budou dvě cívky vázány vzájemnou indukčností a bude jimi protékat střídavý proud. Bude proud, který teče jednou cívkou indukovat v cívce druhé napětí vzájemné indukce. Analogicky pak lze stanovit tentýž případ z pohledu cívky druhé. Tedy, že střídavý proud, který protéká druhou cívkou bude v cívce první indukovat napětí vzájemné indukce. Lze tedy stanovit tyto vztahy.[2]

$$u_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} = U_2 \cdot \cos \omega \cdot t \quad (1.33)$$

$$u_1 = M \cdot \frac{di_2}{dt} = U_1 \cdot \cos \omega \cdot t \quad (1.34)$$

Je důležité brát v potaz fakt, že jev vzájemné indukce je vždy v elektrických obvodech provázán s jevem vlastní indukce. Což znamená, že pokud první cívkou prochází proud i_1 a druhou cívkou proud i_2 , indukuje se v první cívce napětí vlastní indukce a zároveň také napětí vzájemné indukce. Čili výsledné indukované napětí na první cívce bude dáno součtem těchto dvou napětí.[2] Vzájemné indukčnosti hrají významnou roli u indukčností vzduchových, které jsou umístěny blízko sebe.

Stanovení vlastností vzduchových cívek z jejich geometrických rozměrů se provádí pomocí tzv. Nagaokova činitele lze vypočítat indukčnost cívky. Tento činitel se značí K, a násobí se jím vztah pro stanovení vlastní indukčnosti dlouhé válcové cívky.[8]

$$L = 4\pi \cdot N^2 \cdot s \cdot l \cdot k \quad (1.35)$$

Kde L je vlastní indukčnost cívky libovolných rozměrů, N je počet závitů, S je průřez cívky, l je délka cívky a K je Nagaokův činitel.[8]

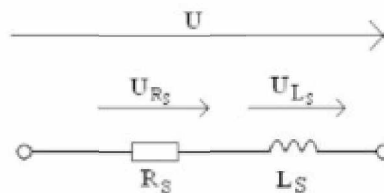
Většinou bývá Nagaokův činitel definovaný v tabulkách. A to jako poměr průměru cívky a její délky.[8]

Také je samozřejmostí určení vlastní indukčnosti vícevrstvé válcové vzduchové cívky, kde platí vztah trochu odlišný od vztahu (1.38).[8]

$$L = 0,315 \cdot \frac{a^2 \cdot N^2}{6a + 9b + 10c} \quad (1.36)$$

Kde L je vlastní indukčnost cívky, a je střední poloměr cívky, b je délka cívky, c je tloušťka cívky a N je počet závitů cívky.[8]

V rámci rozboru tohoto prvku je vhodné věnovat zájem paralelnímu a sériovému náhradnímu schématu cívky. Je nutné, aby bylo vnímáno, že reálná cívka na rozdíl od ideální cívky obsahuje parazitní vlastnosti. Hlavní parazitní vlastnosti jsou odpor vlastního vinutí a kapacita mezi závity cívky. Je patrné, že tyto parametry budou způsobovat ztráty, které se dají vyjádřit činitelem jakosti Q. Pro nižší kmitočty je povoleno zanedbat kapacitu cívky, tedy kapacitu mezi jednotlivými závity a vrstvami cívky. Na obr. 8. je sériové náhradní schéma cívky složené z ideální indukčnosti a ztrátového odporu.[17]



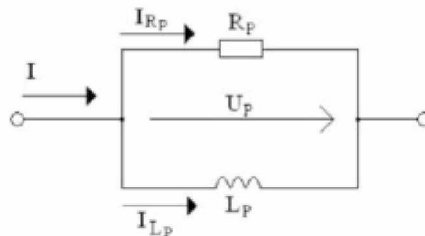
Obrázek 8 Sériové náhradní schéma cívky

Parametr Ls v sériovém náhradním schématu je vlastní indukčnost cívky a parametr Rs je odpor vinutí cívky. Z praktického pohledu se velmi často uvádí činitel jakosti cívky, který je převrácenou hodnotou ke ztrátovému činiteli.[11]

$$Q = \frac{\omega Ls}{Rs} \quad (1.37)$$

Kde Q je činitel jakosti cívky, Ls je vlastní indukčnost cívky, Rs je odpor vinutí cívky a ω je úhlová frekvence.[11]

Využívanou variantou je také paralelní náhradní schéma cívky, ve kterém parametr L_p opět reprezentuje vlastní indukčnost cívky a parametr R_p je odpor vinutí cívky, u cívek s feromagnetickými jádry reprezentuje feromagnetické ztráty. Na obr. 9. je zobrazeno paralelní náhradní schéma cívky, které se skládá z ideální indukčnosti a ztrátového odporu.[17]



Obrázek 9 Paralelní náhradní schéma cívky

Z praktického pohledu je vhodné uvést činitel jakosti pro paralelní náhradní schéma cívky.[17]

$$Q = \frac{R_p}{\omega L_p} \quad (1.38)$$

Kde Q je činitel jakosti cívky, L_p je vlastní indukčnost cívky, R_p je odpor vinutí cívky a ω je úhlová frekvence.[17]

2 PRINCIPY A METODY MĚŘENÍ INDUKČNOSTI

Tato kapitola je věnována podrobnému popisu a rozboru vybraných metod pro měření indukčnosti. Rovněž budou stanoveny základní vztahy, ze kterých vycházejí vybrané metody pro měření indukčnosti.[17]

2.1 Důležité vztahy pro metody a principy měření indukčnosti

Před samotným stanovením měřících metod a jejich rozborem je potřebné uvést některé ze základních vztahů, ze kterých měřící metody vycházejí.[11]

Dostupné metody pro měření indukčnosti se silně opírají o definici impedance a vztahu pro rezonanci. Z toho vyplývá, že je možné měřící metody rozdělit podle toho jakým vztahem se určí výsledná indukčnost v elektrickém obvodu.[11]

2.1.1 Definice impedance

Impedance je komplexní veličinou. Její označení je Z a jednotkou je Ohm $[\Omega]$. Je to vlastnost elektrického obvodu, ve kterém se vyskytuje elektrický odpor, kapacita nebo indukčnost. Znalost impedance nám umožňuje provádět analýzu střídavých elektrických obvodů. Její definice je podle [3] následující.[3]

$$|\bar{z}| = \frac{U}{I} \quad (2.1)$$

Kde U elektrické napětí, a I je elektrický proud.[3]

Ve tvaru komplexního čísla je impedance definována takto.[11]

$$\bar{z} = R \pm jx = |\bar{z}|e^{j\varphi} \quad (2.2)$$

Pro úplnost a správnost této problematiky je zde zapotřebí uvést vztah pro impedanci cívky.[11]

$$z_L = j\omega L \quad (2.3)$$

Kde Z_L je impedance cívky, L je indukčnost cívky a ω je úhlová frekvence.[11]

Reálná tedy činná složka impedance způsobuje v elektrickém obvodu výkonové ztráty. Imaginární tedy jalová někdy označována jako reaktanční složka impedance způsobuje fázový posun napětí vůči proudu a naopak. Záleží, jakého charakteru bude reaktance. Pokud by byla čistě induktivního charakteru, bude napětí předbíhat proud. Pokud by však byla kapacitního charakteru bude proud předbíhat napětí.[11]

Při měření impedance je nutné elektrický obvod napájet střídavým elektrickým proudem, pokud bychom tak neučinili získali bychom pouze činnou složku impedance tedy elektrický odpor.[11]

2.1.2 Definice rezonančního vztahu

Rezonance je určitý stav střídavého elektrického obvodu, která nastane při dosáhnutí tzv. rezonančního kmitočtu. Jednoduchý rezonanční obvod je realizován sériovým nebo paralelním spojením cívky a kondenzátoru. Podmínkou je, že se indukční a kapacitní reaktance při rezonanci rovnají, tedy $X_L = X_C$. Odtud vyplývá i vztah pro určení rezonančního kmitočtu tzv. Thomsonova vztahu, který je podle [2] definován následující rovnicí.

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.4)$$

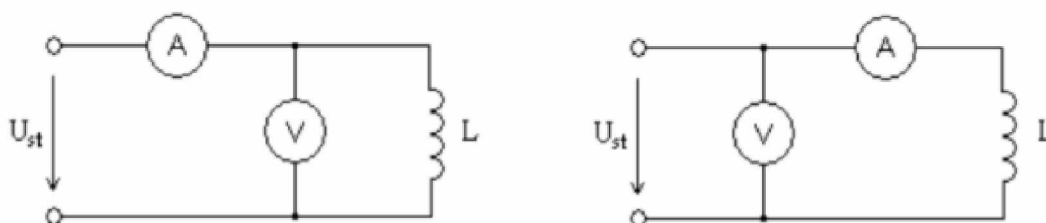
Důležité je, že tento vztah je podstatně zjednodušený. Pro složitější elektrické obvody se rezonanční kmitočet určuje z podmínek rezonance.[2]

2.2 Rozbor a popis jednotlivých metod měření indukčnosti

V této podkapitole je proveden popis a teoretický rozbor jednotlivých dostupných měřících metod pro měření indukčnosti.[17]

2.2.1 Měření indukčnosti voltmetrem a ampérmetrem

Tato měřící metoda využívá dříve zmíněnou impedanci. Měřící metoda je téměř shodná s tzv. Ohmovou metodou pro měření odporů. Patří do skupiny výchylkových metod měření. Spočívá v měření napětí a proudu protékajícího měřenou impedancí. Zde rozlišujeme dvě základní zapojení. Pokud je impedance cívky malá vzhledem k vnitřnímu odporu voltmetru, zapojíme ampérmetr před voltmetr, jak je vidět na obr. 10. vlevo. Pokud však bude impedance cívky velká, zapojíme voltmetr před ampérmetr viz obr. 10. vpravo. Je nutné tyto požadavky dodržet, kvůli eliminaci chyb. Chyba měření se v tomto zapojení určuje složitěji, protože jsou jisté fázové posuny mezi napětím a proudem a naopak.[11]



Obrázek 10 Schéma zapojení pro měření indukčnosti voltmetrem a ampérmetrem

Pro vhodnou volbu zapojení existuje vztah, díky kterému zjistíme hrubý odhad hraniční indukčnosti.[19]

$$L \approx \frac{1}{\omega} \sqrt{R_A R_V} \quad (2.5)$$

Kde R_A je vnitřní odpor ampérmetru a R_V je vnitřní odpor voltmetru.[19]

V tomto měření je potřebné znát odpor cívky, který si můžeme změřit ohmmetrem nebo libovolnou měřící metodou. Pro impedanci cívky platí vztah definovaný podle [19] níže.

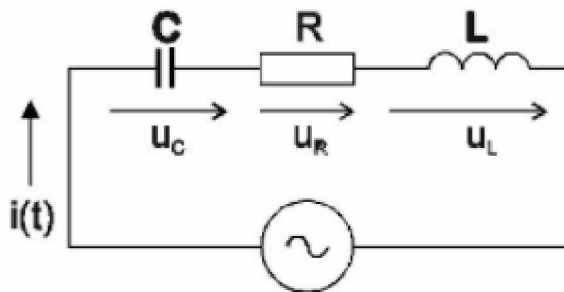
$$|\bar{z}| = \frac{u}{I} = \sqrt{R_x^2 + \omega^2 L^2} \quad (2.6)$$

Po relativně snadné matematické úpravě dostáváme výsledný vztah, ze kterého lze určit indukčnost při měření pomocí voltmetru a ampérmetru.[19]

$$L_x = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{z^2 - R_x^2} \quad (2.7)$$

2.2.2 Měření indukčnosti rezonanční metodou

Tato měřicí metoda využívá sériového nebo paralelního rezonančního obvodu. Tento obvod je v praktické podobě realizován sériovým nebo paralelním spojením reálné cívky a kondenzátoru. Tato měřicí metoda, jak napovídá název, je založena na změření tzv. rezonančního kmitočtu, a následného dopočítání indukčnosti cívky z tohoto vztahu. Který vychází z tzv. Thomsonova vztahu definovaného v předešlé podkapitole. Jako ukazatel rezonance lze použít osciloskop nebo elektronický voltmetr. Činitel jakosti elektrického obvodu bývá roven činiteli jakosti cívky. Při rezonančním kmitočtu je reaktance cívky stejná jako reaktance kondenzátoru a elektrické napětí v obvodu je „nejmenší“ v případě sériového rezonančního obvodu a „největší“ v případě paralelního rezonančního obvodu. Postupně bude stanovena měřicí metoda pomocí sériového rezonančního obvodu a poté pomocí paralelního rezonančního obvodu. Je zřejmé, že elektrický obvod musí být napájen střídavým proudem. Schéma zapojení sériového rezonančního obvodu je zobrazeno na obr. 11.[21]



Obrázek 11 Sériový rezonanční obvod

Je vhodné uvést vztah pro komplexní impedanci obvodu, který je velmi důležitý z hlediska dalších výpočtů.[21]

$$z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.8)$$

Pokud je obvod v tzv. rezonančním stavu je imaginární složka impedance rovna nule, tedy celková impedance obvodu je rovna reálnému stejnosměrnému odporu čili $Z_0 = R$. Elektrickým obvodem protéká největší možný elektrický proud, což způsobí pokles elektrického napětí téměř k nule. Pokud by byly použity ideální prvky, impedance by byla nulová a elektrický proud by byl teoreticky nekonečný, elektrické napětí by se blížilo nulové hodnotě.[21]

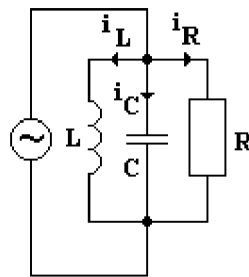
Z Thomsonova vztahu definovaného vztahem (2.4) jednoduchým vyjádřením zjistíme rezonanční kmitočet f_R , ze kterého lze snadným způsobem vyjádřit indukčnost cívky.[21]

$$f_R = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \Rightarrow L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_R^2 \cdot C} \quad (2.9)$$

Činitel jakosti je možný vypočítat ze vztahu definovaného níže.[21]

$$Q = \frac{2\pi f_R L}{R} \quad (2.10)$$

Schéma zapojení paralelního rezonančního obvodu je zachyceno na obr. 12.[21]



Obrázek 12 Paralelní rezonanční obvod

U paralelního rezonančního obvodu mluvíme o tzv. admitanci, která je převrácenou hodnotou impedance. Při tzv. stavu rezonance paralelního rezonančního obvodu vzrůstá impedance do teoreticky nekonečné hodnoty. Tedy i napětí vzrůstá teoreticky do nekonečna. Admitance paralelního rezonančního obvodu je definována vztahem.[21]

$$Y = j\omega C + \frac{1}{R + j\omega L} \quad (2.11)$$

Při stavu rezonance je imaginární složka admitance rovna nule, lze tedy získat vztah pro rezonanční kmitočet úpravou vztahu, který je definován níže.[21]

$$\omega C - \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} = 0 \quad (2.12)$$

Zde se provede jednoduchá matematická úprava, díky které již vznikne vztah pro rezonanční kmitočet.[21]

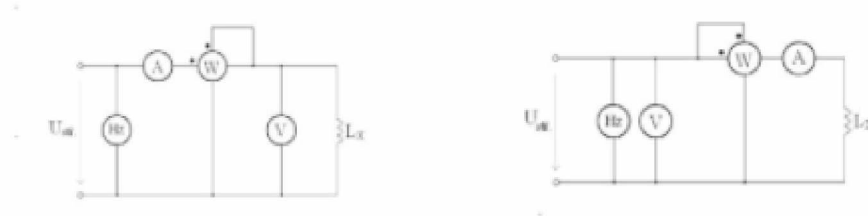
$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} \quad (2.13)$$

Druhý člen pod odmocninou je zanedbatelný, proto jej dále neuvažujeme a vyjádřením L z prvního členu je možné dostat vztah pro indukčnost cívky, který je stejný jako u sériového rezonančního obvodu.[21]

2.2.3 Měření indukčnosti pomocí voltmetru ampérmetru a wattmetru

Tato měřicí metoda je vhodná pro cívky s feromagnetickým jádrem. Protože u takovýchto typů cívek je činný odpor podstatně větší než odpor stejnosměrný, který vzniká vlivem ztrát v jádře. Proto je nutné použít měřicí metodu ze které lze jednoznačně určit skutečný odpor.

Tato měřicí metoda využívá dříve stanovenou impedanci k určení indukčnosti. Zde také rozlišujeme dva druhy zapojení, a to z hlediska velikosti impedance cívky. Na obr. 13. vlevo je zapojení pro malé hodnoty impedance cívky a vpravo je zapojení pro velké hodnoty impedance cívky.[11]



Obrázek 13 Schéma zapojení pro měření indukčnosti pomocí voltmetru, ampérmetru a wattmetru

Je potřebné definovat vztah pro určení tzv. hraniční impedance cívky, tento vztah usnadňuje volbu vhodného zapojení.[11]

$$|\bar{z}| \approx \sqrt{(R_a + R_{wp}) \cdot \frac{R_v \cdot R_{wn}}{R_v + R_{wn}}} \quad (2.14)$$

Kde R_a je vnitřní odpor ampérmetru, R_v je vnitřní odpor voltmetru, R_{wp} je vnitřní odpor proudové cívky wattmetru a R_{wn} je vnitřní odpor napěťové cívky wattmetru.[11]

Tato měřicí metoda umožňuje dopočítat indukčnost cívky z naměřených hodnot napětí a proudu a činného výkonu, který lze změřit pomocí wattmetru. Lze tedy určitou elektrický odpor.[19]

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (2.15)$$

Kde P je činný výkon, a I je protékající proud.[19]

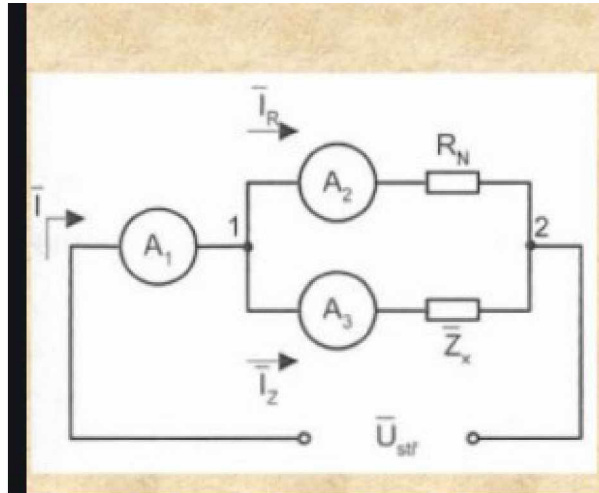
Nyní je možné dle vztahu (2.15) dopočítat indukčnost cívky.[19]

$$L = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (2.16)$$

Kde ω je úhlová frekvence, Z je impedance a R je elektrický odpor.[19]

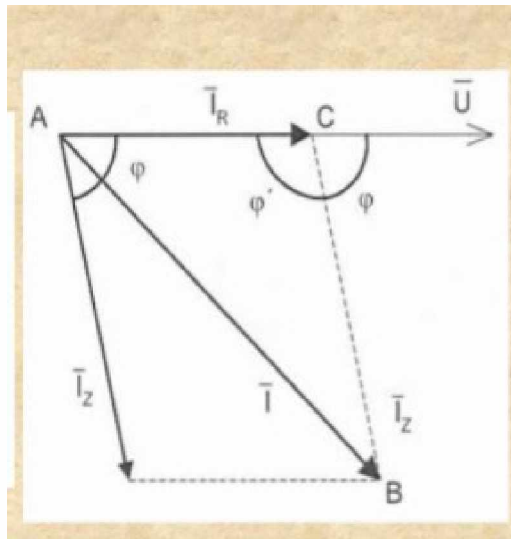
2.2.4 Měření indukčnosti třemi ampérmetry

V této měřicí metodě je zapojován induktor paralelně ke známému odporovému normálu a pomocí třech ampérmetrů jsou měřeny efektivní hodnoty elektrických proudů jak v jednotlivých větvích, tak i celkový elektrický proud tekoucí obvodem. Zde je uvažováno pouze jedno zapojení, které je na obr. 14.[11]



Obrázek 14 Schéma zapojení pro měření indukčnosti třemi ampérmetry

Pro snazší porozumění této metody je příhodné uvést fázorový diagram, který je zobrazený na obr. 15. Zanedbáme-li velikost vlastní impedance ampérmetru.[11]



Obrázek 15 Fázorový diagram pro měření indukčnosti metodou tři ampérmetrů

Pro velikost napětí na paralelní kombinaci platí vztah definovaný níže.[11]

$$\bar{U} = \bar{z}_L \bar{I}_L = R \bar{I}_R \quad (2.17)$$

Ze vzorce (2.17) lze snadno dojít k absolutní hodnotě impedance.[11]

$$|\bar{z}| = \frac{R I_R}{I_L} \quad (2.18)$$

Z tzv. prvního Kirchhoffova zákona pro první uzel lze vydedukovat vztah, který je možný napsat tímto způsobem, $I = I_r + I_z$. [11]

Pro trojúhelník ABC ve fázorovém diagramu lze sestavit kosinovou větu pro úhel φ' . [19]

$$I^2 = I_L^2 + I_R^2 - 2I_R I_L \cos \varphi' \quad (2.19)$$

Pro kosinus úhlu φ bude platit za předpokladu, že $\cos \varphi = -\cos \varphi'$ vztah.[19]

$$\cos \varphi = \frac{I^2 - I_L^2 - I_R^2}{2 \cdot I_R \cdot I_L} \quad (2.20)$$

Zde je možné konečné stanovení impedančních složek podle vztahu (2.21) a (2.22) definovaných níže.[11]

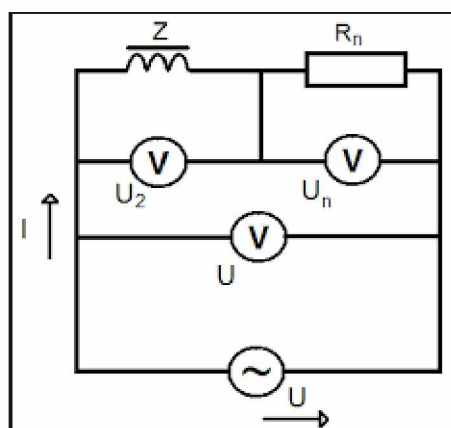
$$R_L = |\bar{z}| \cos \varphi \quad (2.21)$$

$$x_L = |\bar{z}| \sin \varphi \quad (2.22)$$

Měřicí metoda pomocí tří ampérmetrů je relativně přesnou měřicí metodou, pokud jsou proudy I_r a I_z přibližně stejně velké a fázový posun způsobený měřenou impedancí je velký. Měřicí metodou lze měřit i nelineární indukčnosti, jelikož je možné měřit indukčnost při různých hodnotách protékajícího proudu.[11]

2.2.5 Měření indukčnosti třemi voltmetry

V této měřicí metodě je měřená indukčnost zapojena v sérii s odporovým normálem. Pomocí tří voltmetrů měříme efektivní hodnoty úbytků napětí na odporovém normálu, úbytek napětí na měřené indukčnosti a napětí v celém elektrickém obvodu. Měřicí metoda je velmi podobná jako metoda tří ampérmetrů, jen v tomto případě bude fázorový diagram zohledňovat úbytky napětí. Početně jsou obě měřicí metody stejně náročné. Schéma zapojení metody tří voltmetrů je uvedeno na obr. 16.[19]

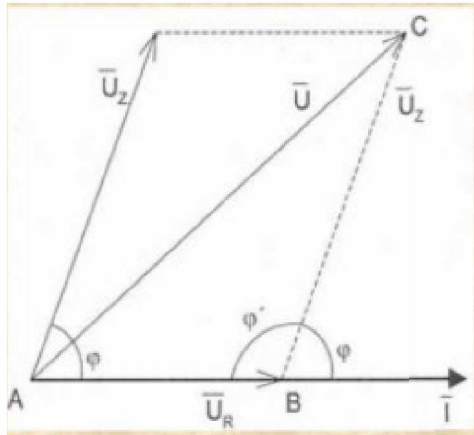


Obrázek 16 Schéma zapojení pro měření indukčnosti třemi voltmetry

V této měřicí metodě je vhodné nejprve stanovit vztah pro impedanci v elektrickém obvodu.[19]

$$|\bar{z}_L| = R_N \frac{U_L}{U_R} \quad (2.23)$$

Fázorový diagram je zobrazený na obr. 17. je nezbytné zanedbat vnitřní spotřebu voltmetrů.[11]



Obrázek 17 Fázorový diagram pro měření indukčnosti třemi voltmetry

Pro trojúhelník ABC ve fázorovém diagramu lze sestavit tzv. kosinovou větu pro úhel φ' . [11]

$$U^2 = U_R^2 + U_L^2 - 2U_R U_L \cos \varphi' \quad (2.24)$$

Pro kosinus úhlu φ bude platit za předpokladu, že $\cos \varphi = -\cos \varphi'$ následující vztah. [19]

$$\cos \varphi = \frac{U^2 - U_R^2 - U_L^2}{2U_R U_L} \quad (2.25)$$

Zde je možné konečné stanovení jednotlivých impedančních složek podle vztahu (2.26) a (2.27), které jsou definovány níže. [19]

$$R_L = |z| \cos \varphi \quad (2.26)$$

$$x_L = |z| \sin \varphi \quad (2.27)$$

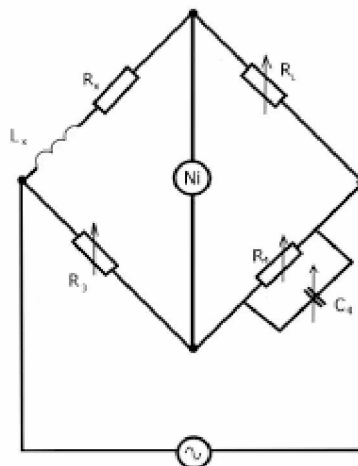
2.3 Můstkové metody měření indukčnosti

Tato podkapitola se zabývá rozborem Maxwell-Wienova můstku a Owenova můstku, které vycházejí z obecného můstku Wheatstoneova typu. Také bude uveden rezonanční můstek. Všechny tyto měřicí metody využívají můstkového zapojení a kombinaci pasivních prvků. Pomocí prvních dvou typů můstku lze stanovit i činitel jakosti cívky Q. [11]

2.3.1 Maxwell-Wienův můstek

V zapojení se vyskytují paralelní kombinace R_4 a C_4 , což je v podstatě odporová dekáda, respektive kapacitní dekáda, která slouží pro vyvážení můstku. V dalších větvích můstku jsou zapojeny odporové normály R_2 a R_3 a měřená cívka reprezentována L_x a R_x . Tyto odporové normály jsou obvykle realizovány jednoduchými dekádami s několika rezistory. Označení NI ve schématu zapojení označuje tzv. nulový indikátor, který bývá většinou u střídavých můstků realizován osciloskopem. Pokud je můstek vyvážený, nulový indikátor zobrazuje nulovou

výchylku. Schéma zapojení můstku je zobrazeno na obr. 18. Tato měřicí metoda je považována za relativně přesnou metodu měření indukčnosti.[11]



Obrázek 18 Schéma zapojení Maxwell-Wienova můstku

Pro rovnovážný stav můstku musí platit následující vztah definovaný níže.[19]

$$R_x + j\omega L_x = R_2 R_3 \left(\frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right) \quad (2.28)$$

Oddělením reálné a imaginární složky vzniknou dva vztahy, první pro určení L_x a druhý pro určení R_x . [11]

$$L_x = R_2 R_3 C_4 \quad (2.29)$$

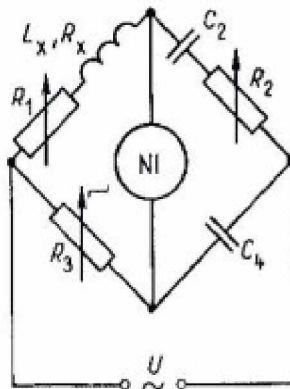
$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (2.30)$$

Jak bylo již uvedeno lze tímto můstkem stanovit i činitel jakosti Q , definovaný níže.[19]

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega R_4 C_4 \quad (2.31)$$

2.3.2 Owenův můstek

Tento typ můstku je vhodný pro měření indukčností téměř všech hodnot, ale i pro měření velkých indukčností. Jeho výhodou je kmitočtová nezávislost a vyvažování pouze pomocí odporových dekád. Nejsou tedy potřebné kapacitní sádky. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 19.[11]



Obrázek 19 Schéma zapojení Owenova můstku

Nezbytnou součástí je stanovení vztahů pro určení R_x a pro určení L_x . [19]

$$R_x = R_3 \frac{C_4}{C_2} - R_1 \quad (2.32)$$

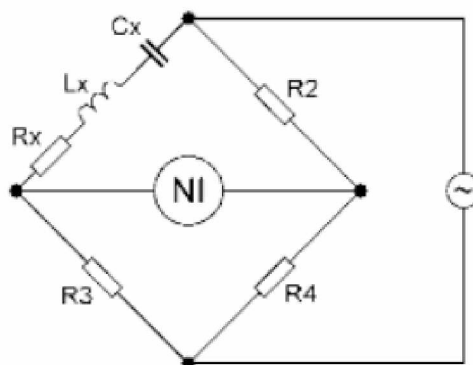
$$L_x = R_2 R_3 C_4 \quad (2.33)$$

Jak již bylo uvedeno lze pomocí tohoto druhu můstku stanovit činitel jakosti Q , definovaný níže. [11]

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \frac{\omega C_2 C_4 R_2 R_3}{R_3 C_4 - R_1 C_2} \quad (2.34)$$

2.3.3 Rezonanční můstek

Schéma zapojení rezonančního můstku je zobrazeno na obr. 20. Ve schématu zapojení reprezentuje NI tzv. nulový indikátor. [19]



Obrázek 20 Schéma zapojení rezonančního můstku

Z názvu tohoto typu můstku vyplývá i jeho princip. Můstek je kmitočtově závislý, tudíž musí být kmitočet známé hodnoty a konstantního průběhu. Můstek využívá dříve zmíněnou rezonanci. Je potřebné stanovení podmínky pro rovnováhu tohoto typu můstku, které jsou definovány níže.[19]

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4} \quad (2.35)$$

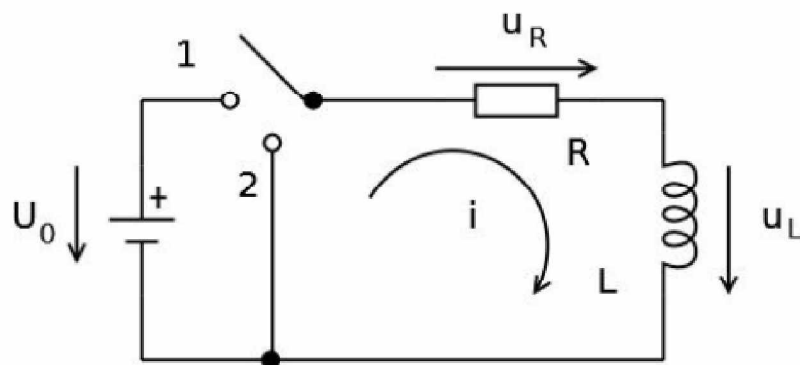
$$L_x = \frac{1}{\omega^2 C} \quad (2.36)$$

Ze vztahu (2.35) je patrné, že ve vyváženém stavu je první větev můstku v tzv. stavu rezonance. Pokud by místo cívky byl zapojen normál indukčnosti L_n , bylo by poté možné můstek použít pro měření kmitočtu. Přepínáním normálů indukčnosti lze získat několik rozsahů, ze kterých je možné stupnici kondenzátoru očíslovat v jednotkách kmitočtu. Pro snadnější vyvážení můstku lze v určitých případech vložit do první větve rezistor.[19]

2.4 Přejchodný jev v elektrickém obvodu s cívkou

Před uvedením této měřicí metody je nutné, aby byla teoreticky rozvedena. Přejchodný jev se v elektrických obvodech vyznačuje vlivem změny vstupních veličin či změnou struktury v elektrickém obvodu, způsobenou připojením nebo odpojením zdroje elektrické energie, přerušením části obvodu, změnou parametrů elektrických prvků atd. Jedná se o situace odezvy elektrického systému na skokovou funkci. Elektromagnetická energie, která je nahromaděna v induktoru se nemůže měnit skokem, jelikož by bylo nutné dodat nekonečný elektrický výkon. Tedy je-li v elektrickém obvodu přítomna cívka obecně řečeno akumulací prvek, bude obvod reagovat na změnu, která odpovídá novému energetickému stavu a způsobila tak energetický konflikt, přechodným jevem, kdy se elektrický obvod uvede do přechodného stavu, po jehož časový okamžik probíhá přechodný děj, který vyrovnává vzniklý energetický rozdíl mezi předchozím a stávajícím stavem a postupně směřuje opět do ustáleného stavu, který odpovídá novým energetickým podmínkám.[22]

K řešení přechodných jevů v lineárních obvodech se v první části sestaví obvodové rovnice. Obecně získané soustavy diferenciálních rovnic, jejichž výsledkem je řešení v časové oblasti. Schéma zapojení elektrického obvodu, na němž lze přechodný jev představit je uveden na obr. 21.[22]



Obrázek 21 Schéma zapojení elektrického obvodu s cívkou pro představení přechodného jevu

Nejvhodnější představení přechodového jevu lze provést na elektrických obvodech, které jsou buzeny stejnosměrnými zdroji energie. Přechodové jevy prvního řádu, jsou takto nazývány proto, že obsahují pouze jeden prvek akumulárního charakteru. Tedy pouze induktor nebo nahrazením induktoru kapacitorem, což je druhý typ přechodového jevu prvního řádu.[22]

V elektrickém obvodu s induktorem probíhá vznik a zánik elektrického proudu. Jak lze vidět na obr. 21, má elektrický obvod dva stavy. Poloha přepínače v poloze 1 a poloha přepínače v poloze 2.[22]

V prvním stavu, pokud bude přepínač přepnut do polohy 1 se k obvodu připojí zdroj stejnosměrného napětí U_0 . Předpokládaná podmínka je, že byl přepínač přepnut do polohy 1 v čase $t_0 = 0$ a před jeho přepnutím nebyla v obvodu nahromaděna žádná elektromagnetická energie. Po připojení zdroje k obvodu se část energie spotřebovala na vytvoření magnetického pole induktoru. Jelikož se nemůže energie induktoru měnit skokově, obvod reaguje právě tzv. přechodným jevem, při kterém postupně narůstá proud až dosáhne zcela hodnoty proudu vnuceného zdrojem. Po skončení přechodného jevu se obvod dostane opět do ustáleného stavu a induktor se bude chovat jako zkrat, tedy ustálená složka proudu bude.[22]

$$i_L = \frac{U_0}{R} \quad (2.37)$$

Časová konstanta v obvodu je rovna $\tau = L / R$. Dosazením zjištěných hodnot dostáváme proud induktoru.[22]

$$i_L = \frac{U_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) (t \geq 0) \quad (2.38)$$

Zbylé veličiny určíme již snadným způsobem, a to z vypočteného proudu induktoru.[22]

$$u_L = U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \quad (2.39)$$

Rezistorem prochází stejný proud jako induktorem, proto napětí na rezistoru získáme pomocí tzv. Ohmova zákona.[22]

$$u_R = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad (2.40)$$

Závěrem lze poukázat, že v okamžiku připojení zdroje napětí k obvodu se skokově změní napětí na induktoru z nulové hodnoty na plné napětí zdroje U_0 . Tuto skokovou změnu lze vysvětlit takovým způsobem, že úplně vybitý induktor se v okamžiku připojení zdroje „brání“ náhle změně svého stavu elektromotorickou silou a jeví se jako nekonečně velký odpor, tedy na něm vzniká právě plné napětí zdroje. Po vybudování magnetického pole v induktoru tzv. elektromotorická síla zaniká a induktor se chová jako zkrat.[22]

Ve druhém stavu je přepínač v poloze 2. Tedy došlo k přepnutí přepínače z polohy 1 do polohy 2. Tímto přepnutím se změnila struktura původního obvodu a tím vznikl přechodný jev. Je evidentní, že bude odpojený zdroj napětí od obvodu a bude probíhat odezva energetické podmínky v počátku vzniku přechodného jevu. Proud induktoru bude protékat obvodem až do vyčerpání magnetické energie induktoru, kdy zanikne. Z toho lze vydedukovat, že v ustáleném stavu po odeznění přechodného jevu nepoteče induktorem žádný proud.[22]

Energetickou počáteční podmínku stanovíme z předpokladu, že se obvod před přepnutím přepínače dostal do ustáleného stavu, kde se induktor jeví jako zkrat. Časová konstanta zůstává shodná jako v předchozím stavu. Nyní je tedy možné stanovit průběh proudu tekoucí induktorem.[22]

$$i_L = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-(t-t_0) \cdot \frac{R}{L}} \quad (2.41)$$

Je zřejmé, že proud, který protéká přes induktor, protéká také přes rezistor. Tedy jejich hodnoty se shodují, a proto lze říci, že napětí na rezistoru bude stejné hodnoty jako napětí na induktoru pouze s opačným znaménkem. Čili bude platit $-u_L(t) = u_R(t)$. [22]

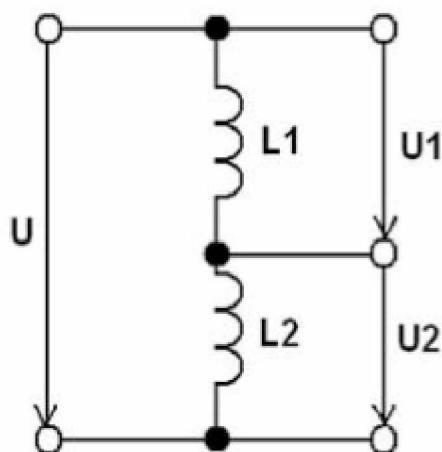
$$u_L = -U_0 \cdot e^{-(t-t_0) \cdot \frac{R}{L}} \quad (2.42)$$

Také je důležité zmínit, že lze přechodný jev v elektrickém v obvodu s cívku analyzovat pomocí Laplaceovy transformace, která celkové řešení poměrně zjednoduší, jelikož vlivem transformace se převádí reálné funkce na funkce komplexní, a tudíž se převážná část složitějších vztahů poměrně zjednoduší.[22]

2.5 Indukční dělič

Poslední částí této kapitoly je měřicí metoda vycházející z indukčního děliče. Je patrné, že tento typ děliče spadá do tzv. lineárních děličů. Obecný dělič napětí lze vnímat jako zapojení, které umožňuje „rozdělit“ napětí zdroje tak, aby na zátěži (spotřebiči) bylo požadované napětí.[8]

Indukční dělič tvoří sériové spojení dvou cívek. Jedna z cívek, u níž známe přesnou hodnotu je považována za etalon indukčnosti. Tedy za cívku, u níž známe přesnou hodnotu indukčnosti a její přesnou hodnotu vnitřního odporu někdy též nazývaného stejnosměrný odpor cívky. Schéma zapojení indukčního děliče je zobrazeno na obr. 22.[18]



Obrázek 22 Schéma zapojení indukčního děliče

Indukční reaktance cívky je definována vztahem (1.35). Tedy je zřejmé, že indukční reaktance vzrůstá úměrně s frekvencí. Lze sestavit rovnice pro indukční dělič. Konkrétně rovnici pro napětí na první cívce.[18]

$$U_{L_1} = U_z \cdot \frac{L_1}{(L_1 + L_2)} \quad (2.43)$$

Rovněž lze sestavit rovnici pro napětí na cívce druhé, které je definováno vztahem (2.44).[18]

$$U_{L_2} = U_z \cdot \frac{L_2}{(L_1 + L_2)} \quad (2.44)$$

Pokud by byl požadavek použít indukční dělič pro měření indukčnosti muselo by se uvažovat několik základních faktorů. Prvním je, že se jedná o sériové spojení dvou cívek, tudíž oběma cívkami protéká stejný proud, tedy $I_{L1} = I_{L2}$. Dalším faktorem je to, že se prohlásí jedna z cívek za etalon indukčnosti. Měření probíhá způsobem, že se nastaví na generátoru požadovaná frekvence nejlépe však taková, aby indukční reaktance etalonu byla alespoň 10krát vyšší, než je její stejnosměrný odpor. Elektrický obvod se zapojí podle schématu. Jelikož je měřeno napětí na obou cívkách může se pro měření napětí použít voltmetr nebo digitální osciloskop. Poté se odečtou hodnoty napětí na etalonu a na neznámé cívce. Jelikož se jedná o poměrové měření indukčnosti, bude také tímto způsobem probíhat její výpočet. Tedy poměr napětí dává i poměr velikostí cívek.[8]

3 PRAKTICKÁ REALIZACE DOSTUPNÝCH METOD

V této části bakalářské práce přecházíme k praktickému měření indukčností. Na základě teoretických poznatků byla realizována vlastní měření. Jednotlivé metody byly otestovány na vybraných indukčnostech a bylo provedeno jejich zhodnocení. Výsledky jsou částečně ovlivněny kvalitou použitých měřících přístrojů.

3.1 Kalibrační měření jednotlivých cívek

Hodnota elektrotechnických součástek je definována výrobcem vždy s určitou tolerancí. Proto je třeba před zahájením testování metod potřeba provést tzv. kalibrační měření, které stanoví přesnou hodnotu součástky. Kalibrační měření je ovlivněno přesností měřícího přístroje. Použitý měřící přístroj MT4080A disponuje přesností 0,2 %. Tento přístroj umožňuje získat i hodnotu činitele jakosti cívky Q . Měření je provedeno na frekvenci 1 kHz pro všechny cívky. V tabulce 1 jsou uvedeny získané hodnoty indukčností cívek a jejich činitele jakosti Q .

	$L_{j1} = 0,22 \mu\text{H}$	$L_{j2} = 1 \mu\text{H}$	$L_{j3} = 2,2 \mu\text{H}$	$L_{j4} = 15 \mu\text{H}$	$L_{j5} = 33 \mu\text{H}$	$L_{j6} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j7} = 220 \mu\text{H}$	$L_{j8} = 1000 \mu\text{H}$	$L_{j9} = 3900 \mu\text{H}$
$Q[-]$	0,022	0,057	0,124	0,165	0,262	0,424	0,5	0,61	0,628
$L_s [\mu\text{H}]$	0,247	1,038	2,291	14,98	33,33	99,58	223,8	1011	4 006

Tabulka 1 Skutečné hodnoty indukčností cívek

Pro úplnost je žádoucí poznamenat, že L_j značí jmenovitou hodnotu cívek a L_s skutečnou hodnotu cívek.

3.2 Měření stejnosměrných odporů jednotlivých cívek

Před samotným měřením indukčností je třeba provést měření ohmického odporu indukčností, jelikož je nutné tuto hodnotu zahrnout do výpočtu za účelem zpřesnění výsledků. Měření ohmického odporu cívky bylo provedeno Ohmovou metodou. Jelikož multimetry, které byly k dispozici mají nejnižší rozsah pro měření odporu 200 Ω a přesnost na dvě desetinná místa. Jednotlivé hodnoty stejnosměrných odporů cívek jsou uvedeny v tabulce 2.

	$L_{j1} = 0,22 \mu\text{H}$	$L_{j2} = 1 \mu\text{H}$	$L_{j3} = 2,2 \mu\text{H}$	$L_{j4} = 15 \mu\text{H}$	$L_{j5} = 33 \mu\text{H}$	$L_{j6} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j7} = 220 \mu\text{H}$	$L_{j8} = 1000 \mu\text{H}$	$L_{j9} = 3900 \mu\text{H}$
	$L_{s1} = 0,247 \mu\text{H}$	$L_{s2} = 1,038 \mu\text{H}$	$L_{s3} = 2,291 \mu\text{H}$	$L_{s4} = 14,98 \mu\text{H}$	$L_{s5} = 33,33 \mu\text{H}$	$L_{s6} = 99,58 \mu\text{H}$	$L_{s7} = 223,8 \mu\text{H}$	$L_{s8} = 1 011 \mu\text{H}$	$L_{s9} = 4 006 \mu\text{H}$
$I [\text{A}]$	0,62	0,69	0,61	0,51	0,45	0,37	0,026	0,093	0,026
$U [\text{V}]$	0,063	0,955	0,783	0,281	0,378	0,566	0,0684	0,934	1,06
$R_i [\Omega]$	0,101	0,138	0,131	0,55	0,84	1,53	2,63	10,04	40,8

Tabulka 2 Hodnoty stejnosměrných odporů cívek

3.3 Měření pomocí rezonanční metody

Mezi metody pro měření indukčností patří též rezonanční metoda. V této metodě je klíčové nalezení tzv. rezonanční frekvence a následné dopočítání indukčností cívky z dříve definovaného tzv. Thomsonova vztahu. Nejprve je potřeba zkonstruovat sériový rezonanční obvod a jako indikátor rezonance se použije analogový měřící přístroj. Jako zdroj elektrické energie se použije generátor sinusového průběhu. Pomocí generátoru se měnila frekvence krokem 1 Hz a rezonanční frekvence byla nalezena v okamžiku kdy bylo dosaženo maximální výchylky. Poté se dopočítala indukčnost cívky z odvozeného tzv. Thomsonova vztahu. Jelikož generátor střídavého průběhu umožňuje měnit frekvenci krokem 1 Hz byly dosažené hodnoty přesné. Samozřejmostí této metody je také získání činitele jakosti cívky Q . Pro

kompletnost metody měření je uveden konkrétní výpočet touto metodou pro sériový rezonanční obvod včetně činitele jakosti Q. Hodnoty pro další indukčnosti jsou přiloženy v tabulce 3. Následně se metoda opakovala pro paralelní rezonanční obvod. Použité nastavení přístrojů zůstalo nezměněné, při rezonančním kmitočtu klesla výchylka ručkového měřicího přístroje na minimum. Nalezená frekvence se zaznamenala do tabulky 4 a byla použita pro výpočet indukčnosti a její jakosti Q. Tento výpočet byl proveden obdobně jako v případě použití sériového rezonančního obvodu.

Při zapojení sériového rezonančního obvodu byl použit kondenzátor $C_j = 1 \mu\text{F}$, který měl reálnou hodnotu $C_x = 0,98 \mu\text{F}$. Konkrétní výpočet touto metodou v případě **sériového rezonančního obvodu** pro velikost jmenovité indukčnosti $L_j = 100 \mu\text{H}$ a $R_s = 1,53 \Omega$.

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_R^2 \cdot C_x} \Rightarrow \frac{1}{4\pi^2 \cdot 15539^2 \cdot 0,98 \cdot 10^{-6}} = 107,04 \mu\text{H} \quad (3.1)$$

Nyní je možné stanovení činitele jakosti cívky, jelikož jsou známy všechny potřebné proměnné.

$$Q = \frac{2\pi \cdot f_R \cdot L}{R_s} \Rightarrow \frac{2\pi \cdot 15539 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{1,53} = 6,381 \quad (3.2)$$

Při zapojení paralelního rezonančního obvodu byl použit kondenzátor $C_j = 1 \mu\text{F}$, který měl reálnou hodnotu $C_x = 0,98 \mu\text{F}$. Konkrétní výpočet touto metodou v případě **paralelního rezonančního obvodu** pro velikost jmenovité indukčnosti $L_j = 100 \mu\text{H}$ a $R_s = 1,53 \Omega$.

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 15611^2 \cdot 0,98 \cdot 10^{-6}} = 106,06 \mu\text{H} \quad (3.3)$$

Nyní je možné stanovení činitele jakosti cívky, jelikož jsou známy všechny potřebné proměnné.

$$Q = \frac{2\pi \cdot f_R \cdot L}{R_s} \Rightarrow \frac{2\pi \cdot 15611 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{1,53} = 6,410 \quad (3.4)$$

Závěrem této měřicí metody by bylo vhodné podotknout, že dosažené výsledky jak v případě sériového, tak v případě paralelního rezonančního obvodu jsou přesné, i přes to, že se jako indikátor rezonance použil analogový měřicí přístroj, který pracuje na principu magnetoelektrického měřicího systému. U paralelního rezonančního obvodu jsou dosažené hodnoty nepatrně odlišné od sériového rezonančního obvodu z důvodu, že se projeví parazitní indukčnosti a kapacity. Použití změny frekvence o 1 Hz, umožnilo přesně zaznamenat stav rezonance. Všechny použité součástky byly kontrolně změřeny za účelem zmenšení chyby měření.

	Lj1 = 0,22 μH	Lj2 = 1 μH	Lj3 = 2,2 μH	Lj4 = 15 μH	Lj5 = 33 μH	Lj6 = 100 μH	Lj7 = 220 μH	Lj8 = 1000 μH	Lj9 = 3900 μH
	Rs1 = 0,247 Ω	Rs2 = 1,038 Ω	Rs3 = 2,291 Ω	Rs4 = 14,98 Ω	Rs5 = 33,33 Ω	Rs6 = 99,58 Ω	Rs7 = 223,8 Ω	Rs8 = 1 011 Ω	Rs9 = 4 006 Ω
$R_s [\Omega]$	0,101	0,138	0,131	0,55	0,84	1,53	2,63	10,04	40,8
$C_x [F]$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$
$f_{\text{rez}} [\text{Hz}]$	340 274	160 496	118 724	40 118	29 678	15 539	10 306	4 812	2 493
$Q [-]$	4,657	7,307	12,527	6,874	7,325	6,381	5,416	3,011	1,497
$L_x [\mu\text{H}]$	0,223	1,003	1,833	16,059	29,345	107,045	243,351	1 116,25	4 158,82

Tabulka 3 Výsledné hodnoty pro rezonanční metodu pomocí sériového rezonančního obvodu

	Lj1 = 0,22 μ H	Lj2 = 1 μ H	Lj3 = 2,2 μ H	Lj4 = 15 μ H	Lj5 = 33 μ H	Lj6 = 100 μ H	Lj7 = 220 μ H	Lj8 = 1000 μ H	Lj9 = 3900 μ H
	LS1 = 0,247 μ H	LS2 = 1,038 μ H	LS3 = 2,291 μ H	LS4 = 14,98 μ H	LS5 = 33,33 μ H	LS6 = 99,58 μ H	LS7 = 223,8 μ H	LS8 = 1 011 μ H	LS9 = 4 006 μ H
R_s [Ω]	0,101	0,138	0,131	0,55	0,84	1,53	2,63	10,04	40,8
C_x [F]	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$	$0,98 \cdot 10^{-6}$
f_{res} [Hz]	282 306	168 551	97 313	43 986	29 108	15 611	10 375	5 107	2 491
Q [-]	3,863	7,674	10,268	7,537	7,185	6,41	5,452	3,196	1,496
L_x [μ H]	0,324	0,909	2,729	13,359	30,506	106,06	240,125	991,02	4 165,50

Tabulka 4 Výsledné hodnoty pro rezonanční metodu pomocí paralelního rezonančního obvodu

3.4 Měření pomocí Ohmovy metody pro malé indukčnosti realizované osciloskopem a ampérmetrem

Jako další měřicí metoda se realizovala tzv. Ohmova metoda pro malé indukčnosti pomocí osciloskopu a analogového měřícího přístroje. Jako ampérmetr se použil analogový měřicí přístroj, který se nastavil na měření střídavého proudu, pro měření napětí se použil digitální osciloskop. Na osciloskopu bylo odečteno napětí špička-špička, efektivní hodnotu napětí bylo třeba dopočítat. Nejprve se samostatně změřila hodnota proudu, a poté hodnota napětí. Z naměřených hodnot napětí a proudu se vypočítala impedance, z této impedance a ohmického odporu cívky se vypočítala její indukčnost. Určené indukčnosti testovacích cívek jsou uloženy v tabulce 5. Dosažené výsledky jsou relevantní na celém rozsahu.

	Lj1 = 0,22 μ H	Lj2 = 1 μ H	Lj3 = 2,2 μ H	Lj4 = 15 μ H	Lj5 = 33 μ H	Lj6 = 100 μ H	Lj7 = 220 μ H	Lj8 = 1000 μ H	Lj9 = 3900 μ H
	LS1 = 0,247 μ H	LS2 = 1,038 μ H	LS3 = 2,291 μ H	LS4 = 14,98 μ H	LS5 = 33,33 μ H	LS6 = 99,58 μ H	LS7 = 223,8 μ H	LS8 = 1 011 μ H	LS9 = 4 006 μ H
R_s [Ω]	0,101	0,138	0,131	0,55	0,84	1,53	2,63	10,04	40,8
f [Hz]	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000
I [mA]	26	26	26	26	24	19	13	0,95	0,95
U_{p-p} [mV]	14,8	58,6	123,2	796,5	1 580	3 680	5 740	1 720	6 807
U_{ef} [mV]	5,232	20,718	43,557	281,605	558,614	1 301	2 029	608,111	2 406
Z [Ω]	0,201	0,796	1,675	10,83	23,275	68,473	156,076	640,116	2 532
X_L [Ω]	0,173	0,783	1,669	10,816	23,259	68,455	156,053	640,037	2 531
L_x [μ H]	0,275	1,246	2,656	17,214	37,017	108,95	248,366	1 018,65	4 028,21

Tabulka 5 Výsledné hodnoty pro Ohmovu metodu realizovanou pomocí osciloskopu a ampérmetru

3.5 Měření pomocí metody tří voltmetrů realizované osciloskopem

Další metoda, která je vhodná pro měření indukčností je metoda tří voltmetrů. Pomocí sondy osciloskopu se může postupně měřit napětí na normálovém rezistoru, napětí na cívce a také napětí na generátoru tedy v podstatě napětí v elektrickém obvodu. Čílí se jedná o velmi jednoduché zapojení (sériové zapojení referenčního rezistoru a neznámé cívky napájené generátorem). Odečtené hodnoty napětí z osciloskopu byly následně použity pro výpočet indukčností. Indukčností stanovené metodou třech voltmetrů jsou umístěny v tabulce 6. Metoda třech ampérmetrů je obdobná a nebyla odměřena z důvodu absence vhodných ampérmetrů. Metoda tří voltmetrů je jednoduchá na zapojení, ale složitější na výpočet indukčností měřené cívky. Dosažené výsledky jsou relevantní na celém rozsahu měření.

	Lj1 = 0,22 μH	Lj2 = 1 μH	Lj3 = 2,2 μH	Lj4 = 15 μH	Lj5 = 33 μH	Lj6 = 100 μH	Lj7 = 220 μH	Lj8 = 1000 μH	Lj9 = 3900 μH
	LS1 = 0,247 μH	LS2 = 1,038 μH	LS3 = 2,291 μH	LS4 = 14,98 μH	LS5 = 33,33 μH	LS6 = 99,58 μH	LS7 = 223,8 μH	LS8 = 1 011 μH	LS9 = 4 006 μH
R _s [Ω]	0,101	0,138	0,131	0,55	0,84	1,53	2,63	10,04	40,8
R _N [Ω]	2	2	2	2,3	5	20	39,9	198	655
f [Hz]	1 000 000	1 000 000	1 000 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000
U _N [V]	0,212	0,22	0,21	0,257	0,492	1,7	2,8	5,1	5,18
U _G [V]	0,332	0,9	1,66	0,586	1,16	2,9	4,7	7,18	7,96
U _Z [V]	0,164	0,768	1,54	0,458	0,93	2,07	3,35	4,9	5,86
cos φ [-]	0,552	0,508	0,525	0,287	0,26	0,175	0,161	0,03	0,036
φ [°]	56,495	59,469	58,331	73,321	74,929	79,921	80,735	88,28	87,936
sin φ [-]	0,833	0,861	0,851	0,957	0,965	0,984	0,986	0,999	0,999
Z [Ω]	1,625	7,463	14,666	4,098	9,451	24,352	47,7375	190,235	740,98
R _L [Ω]	0,897	3,791	7,699	1,176	2,457	4,2616	7,685	5,707	26,675
X _L [Ω]	1,353	6,425	12,48	3,921	9,12	23,962	47,069	190,044	740,239
L _x [μH]	0,215	1,022	1,986	20,8	48,38	127,12	249,7	1 008	3 927

Tabulka 6 Výsledné hodnoty pro metodu tří voltmetrů realizovanou osciloskopem

3.6 Měření pomocí můstkové metody

Jako další měřicí metoda je realizována můstková metoda. Z hlediska náročnosti můstkových metod, byl vybrán pouze můstek Owenův. Schéma zapojení odpovídá obr. 22. Jelikož u tohoto typu můstku nejsou potřeba kapacitní dekády probíhá vyvažování pouze pomocí dekád odporových. Tedy pomocí lineárních potenciometrů. Nulový indikátor reprezentoval digitální osciloskop a jako generátor byl použit generátor střídavého průběhu s možností nastavení frekvence. Jak je známo z teorie tento typ můstku je kmitočtově nezávislý. Sonda digitálního osciloskopu se připojila mezi požadované uzly elektrického obvodu. Vhodným laděním potenciometrů a sledováním obrazovky osciloskopu bylo možno jednoduše můstek vyvážit. Odpojením generátoru a sondy osciloskopu a pomocí digitálního multimetru se odečetla aktuální hodnota potenciometrů. Tedy jejich hodnota elektrického odporu. Problém můstkové metody je složitější nastavení, získané výsledky jsou relevantní na celém rozsahu. Indukčnosti stanovené můstkovou metodou jsou umístěny v tabulce 7.

	Lj1 = 0,22 μH	Lj2 = 1 μH	Lj3 = 2,2 μH	Lj4 = 15 μH	Lj5 = 33 μH	Lj6 = 100 μH	Lj7 = 220 μH	Lj8 = 1000 μH	Lj9 = 3900 μH
	LS1 = 0,247 μH	LS2 = 1,038 μH	LS3 = 2,291 μH	LS4 = 14,98 μH	LS5 = 33,33 μH	LS6 = 99,58 μH	LS7 = 223,8 μH	LS8 = 1 011 μH	LS9 = 4 006 μH
R _s [Ω]	0,101	0,138	0,131	0,55	0,84	1,53	2,63	10,04	40,8
f [Hz]	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000
C ₁ [F]	2,2 * 10 ⁻¹²	1,03 * 10 ⁻⁹	1,03 * 10 ⁻⁹	1,03 * 10 ⁻⁹	3,33 * 10 ⁻⁹	9,75 * 10 ⁻⁹	20,9 * 10 ⁻⁹	0,98 * 10 ⁻⁶	1,96 * 10 ⁻⁶
C ₂ [F]	2,2 * 10 ⁻¹²	0,98 * 10 ⁻⁹	0,98 * 10 ⁻⁹	0,98 * 10 ⁻⁹	3,24 * 10 ⁻⁹	9,4 * 10 ⁻⁹	20,7 * 10 ⁻⁹	0,96 * 10 ⁻⁶	1,92 * 10 ⁻⁶
R ₁ [Ω]	1046,4	136,9	115,4	150,1	104,8	99,2	114,9	85,2	62,7
R ₂ [Ω]	120,5	8,8	25,5	92,7	101,6	109,6	90,2	10,4	18,3
R ₃ [Ω]	1046,7	130,5	110,4	144,4	103,9	97,7	118,1	98,8	107,2
R _x [Ω]	0,3	0,258	0,632	1,667	1,986	2,137	4,341	15,658	46,733
L _x [μH]	0,277	1,182	2,899	13,78	35,152	104,402	222,639	1 007	3 845

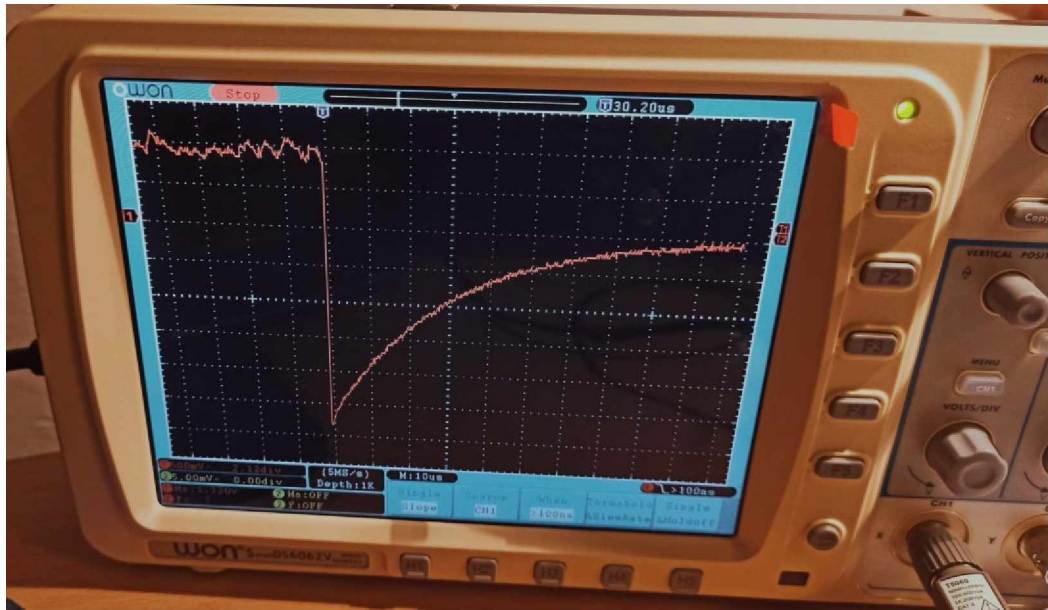
Tabulka 7 Výsledné hodnoty můstkové metody

3.7 Měření indukčnosti pomocí přechodových jevů

Další měřená metoda je realizace přechodného jevu v elektrickém obvodu s cívkou. Zde nastal jeden zásadní problém, generátor střídavých pulzů, se kterým se pracovalo již dříve by měl generovat průběhy sinusové, obdélníkové a pilové. Ovšem po připojení tohoto generátoru, který se nastavil tak aby generoval obdélníkový signál na sondu osciloskopu se zjistilo, že definovaný tvar signálu se podobá do značné míry sinusovému průběhu, a to je pro přechodný jev nepoužitelné. Tudíž se použila jako zdroj elektrické energie tužková baterie,

kteřá má napětí 1,5 V. Také se použilo tlačítko, díky kterému bylo možné vygenerovat v podstatě jednotkový skok.

Paralelně k tužkové baterii se připojily dva elektrolytické kondenzátory s kapacitou $C_j = 470 \mu\text{F}$. Aby se zajistilo, že bude k dispozici dostatečně tvrdý zdroj napětí. Poté se zapojila na výstup měřená cívka paralelně s rezistorem požadované hodnoty. Trigger byl nastaven na sestupnou hranu, a ze zaznamenaného průběhu byla odečtena časová konstanta τ . Uvedený záznam obrazovky osciloskopu, na kterém je zaznamenán přechodný jev je na obr. 23. Indukčnosti určené pomocí přechodného jevu jsou umístěny v tabulce 8.



Obrázek 23 Zaznamenaný průběh přechodného jevu na osciloskopu

U této měřicí metody je zapojení elektrického obvodu poměrně jednoduché, avšak náročnější je vhodné nastavení digitálního osciloskopu. Získané výsledky jsou relevantní na celém měřicím rozsahu.

	Lj1 = 0,22 μH	Lj2 = 1 μH	Lj3 = 2,2 μH	Lj4 = 15 μH	Lj5 = 33 μH	Lj6 = 100 μH	Lj7 = 220 μH	Lj8 = 1000 μH	Lj9 = 3900 μH
	LS1 = 0,247 μH	LS2 = 1,038 μH	LS3 = 2,291 μH	LS4 = 14,98 μH	LS5 = 33,33 μH	LS6 = 99,58 μH	LS7 = 223,8 μH	LS8 = 1 011 μH	LS9 = 4 006 μH
$R_s [\Omega]$	0,101	0,138	0,131	0,55	0,84	1,53	2,63	10,04	40,8
$R_p [\Omega]$	0,5	0,5	0,5	2	2	10	10	20	100
$R_{spin} [\Omega]$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$R_{CELK} [\Omega]$	0,701	0,738	0,731	2,65	2,94	11,63	12,73	30,14	140,9
$\tau [\mu\text{s}]$	0,4	1	2,8	5	10	11	19,5	31	30
$L_x [\mu\text{H}]$	0,28	0,738	2,0468	13,25	29,4	127,93	248,24	934,34	4 227

Tabulka 8 Výsledné hodnoty přechodného jevu v obvodu s cívkou

Jako další měřicí metoda se znovu realizovala metoda přechodného jevu v elektrickém obvodu s cívkou. A to v prostorách školních laboratoří. Jako zdroj se použil generátor střídavých pulzů a digitální osciloskop pro zobrazení přechodného jevu. Po několika různých variantách nastavení osciloskopu a výměně generátoru za obdobný typ se nepodařilo přechodný jev zachytit. A to z důvodu, že nelze vyrobit dostatečně tvrdý zdroj, který by generoval opravdu ostrý impuls. Jak je ukázáno na obr. 24.



Obrázek 24 Průběh vstupního signálu na osciloskopu

Měření přechodného jevu v elektrickém obvodu s cívkou pomocí zdroje střídavých pulzů nevedlo k získání relevantních hodnot indukčností.

3.8 Měření pomocí indukčního děliče

Jako poslední testovaná metoda pro měření indukčností byla použita metoda pomocí indukčního děliče. Pro testovací měření této metody se zapojil elektrický obvod dle obr. 22. Jako etalon indukčnosti se zvolila cívka známé hodnoty a jako měřič napětí se použil digitální osciloskop. Nejprve se měřilo napětí na etalonu indukčnosti poté na neznáme cívce. Jelikož se jedná o poměrové měření bude i tímto způsobem probíhat výpočet neznámé indukčnosti. A to jako poměr napětí na etalonu indukčnosti a poměr napětí na neznáme cívce. Všechny získané hodnoty indukčností jsou uvedeny v tabulce 9.

Měřicí metoda pomocí indukčního děliče je realizovatelná s relevantní přesností na celém měřícím rozsahu. Ovšem měřicí metoda je řazena mezi informativní metody měření indukčností.

	Lj1 = 0,22 μH	Lj2 = 1 μH	Lj3 = 2,2 μH	Lj4 = 15 μH	Lj5 = 33 μH	Lj6 = 100 μH	Lj7 = 220 μH	Lj8 = 1000 μH	Lj9 = 3900 μH
	Le1 = 0,247 μH	Le2 = 1,038 μH	Le3 = 2,291 μH	Le4 = 14,98 μH	Le5 = 33,33 μH	Le6 = 99,58 μH	Le7 = 223,8 μH	Le8 = 1 011 μH	Le9 = 4 006 μH
R _s [Ω]	0,101	0,138	0,131	0,55	0,84	1,53	2,63	10,04	40,8
f [Hz]	500 000	500 000	100 000	100 000	100 000	20 000	20 000	20 000	20 000
L _{etalon} [μH]	1 011	1 011	1 011	1 011	1 011	1 011	1 011	1 011	1 011
U _{etalon} [V]	8,135	8,13	8,1	8,04	7,96	6,84	6,26	4,055	1,7
U _{Lx} [V]	0,006	0,012	0,02	0,118	0,26	0,676	1,372	4,1	6,48
U _{poměr} [-]	1355,833	678,33	405	68,135	30,615	10,118	4,562	0,989	0,262
L _x [μH]	0,74	1,47	2,47	14,68	32,66	98,83	219,2	1 011,12	3 816,79

Tabulka 9 Výsledné hodnoty indukčního děliče

3.9 Zhodnocení měřených metod a výběr metody pro navrhované zařízení

Výsledky jednotlivých metod jsou sepsány v tabulce 10, kde každá metoda je reprezentována jinou barvou. Při výběru principu měření se zohledňují dva faktory. Prvním faktorem je

přesnost měření indukčností a druhým faktorem je komplikovanost zapojení a obsluhy při měření.

	Lj1 = 0,22 μH	Lj2 = 1 μH	Lj3 = 2,2 μH	Lj4 = 15 μH	Lj5 = 33 μH	Lj6 = 100 μH	Lj7 = 220 μH	Lj8 = 1000 μH	Lj9 = 3900 μH
	LS1 = 0,247 μH	LS2 = 1,038 μH	LS3 = 2,291 μH	LS4 = 14,98 μH	LS5 = 33,33 μH	LS6 = 99,58 μH	LS7 = 223,8 μH	LS8 = 1 011 μH	LS9 = 4 006 μH
L _{rez-seriov.} [μH]	0,218	0,983	1,803	15,738	28,758	104,904	238,484	1 093,90	4 075,63
L _{rez-paralel.} [μH]	0,317	0,891	2,674	13,092	29,896	103,939	235,322	971,2	4 082,19
L _{ohmov.m.} [μH]	0,281	1,246	2,692	16,942	39,363	106,37	256,55	1 025	3 974
L _{3-voltm.} [μH]	0,338	0,474	1,437	20,8	48,38	127,12	249,7	1 008	3 927
L _{přech.děj} [μH]	0,28	0,738	2,0468	13,25	29,4	127,93	248,24	934,34	4 227
L _{můstek} [μH]	0,277	1,148	2,815	13,38	34,83	107,08	234,35	1 027,52	3 923,50
L _{dělič} [μH]	0,74	1,47	2,47	14,68	32,66	98,83	219,2	1 011,12	3 816,79

Tabulka 10 Přehled výsledků všech měřených metod

- Fialová** Rezonanční metoda (vrchní řádek sériový rezonanční obvod, spodní paralelní)
- Modrá** Ohmova metoda pomocí osciloskopu a ampérmetru
- Černá** Metoda tří voltmetrů realizována pomocí osciloskopu
- Zelená** Přechodný děj v obvodu s cívku
- Červená** Můstková metoda (Owenův můstek)
- Oranžová** Indukční dělič

Tabulka 11 zobrazuje relativní chybu jednotlivých metod. Také obsahuje medián každé metody. Relativní chyba je definována jako absolutní chyba vztahovaná ke skutečné hodnotě. Nejvhodnější vyjádření této chyby je procentuální, proto se musí hodnota vynásobit stovkou.[11]

$$\delta_R = \frac{L_x - L_s}{L_s} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Kde L_x značí naměřenou hodnotu indukčnosti cívek a L_s skutečnou hodnotu indukčnosti cívek.[11]

	Lj1 = 0,22 μH	Lj2 = 1 μH	Lj3 = 2,2 μH	Lj4 = 15 μH	Lj5 = 33 μH	Lj6 = 100 μH	Lj7 = 220 μH	Lj8 = 1000 μH	Lj9 = 3900 μH	Největší chyba
	LS1 = 0,247 μH	LS2 = 1,038 μH	LS3 = 2,291 μH	LS4 = 14,98 μH	LS5 = 33,33 μH	LS6 = 99,58 μH	LS7 = 223,8 μH	LS8 = 1 011 μH	LS9 = 4 006 μH	$\delta_{MAX}[\%]$
L _{rez-seriov.} [μH]	0,218	0,983	1,803	15,738	28,758	104,904	238,484	1 093,90	4 075,63	-
$\delta_{r-serie} [\%]$	-11,74	-5,298	-21,3	5,06	-13,717	5,346	6,561	8,199	1,738	-21,3
L _{rez-paralel.} [μH]	0,317	0,891	2,674	13,092	29,896	103,939	235,322	971,2	4 082,19	-
$\delta_{r-paralel} [\%]$	28,34	-14,161	16,717	-12,603	-10,303	4,377	5,148	-3,936	1,90	28,34
L _{ohmov.m.} [μH]	0,281	1,246	2,692	16,942	39,363	106,37	256,55	1 025	3 974	-
$\delta_{r-ohmov.m.} [\%]$	13,765	20,03	17,5	10,09	18,1	6,818	14,633	1,384	-0,798	20,03
L _{3-voltm.} [μH]	0,338	0,474	1,437	20,8	48,38	127,12	249,7	1 008	3 927	-
$\delta_{r-3-voltm.} [\%]$	36,842	-54,335	-37,276	38,851	45,154	27,656	11,572	-0,296	-1,972	-54,335
L _{přech.děj} [μH]	0,28	0,738	2,0468	13,25	29,4	127,93	248,24	934,34	4 227	-
$\delta_{r-přech.děj} [\%]$	13,36	-28,9	-10,659	-11,54	-11,791	28,469	10,92	-7,582	5,516	-28,9
L _{můstek} [μH]	0,277	1,148	2,815	13,38	34,83	107,08	234,35	1 027,52	3 923,50	-
$\delta_{r-můstek} [\%]$	12,145	10,597	22,872	-10,68	4,5	7,531	4,714	1,634	-2,059	22,872
L _{dělič} [μH]	0,74	1,47	2,47	14,68	32,66	98,83	219,2	1 011,12	3 816,79	-
$\delta_{r-dělič} [\%]$	199,595	41,618	7,813	-2,002	-2,01	-0,753	-2,055	0,011	-4,723	199,595

Tabulka 11 Přehled výsledků všech měřených metod včetně jejich chyb

Z tabulky 11 lze vyčíst, že největší chyba měření je u metody indukčního děliče, to je způsobeno volbou nevhodné předřadné indukčnosti, kdy předřadná indukčnost byla nepoměrně větší než indukčnost neznámá. Toto lze odstranit použitím vhodné předřadné indukčnosti. Zautomatizování této metody není vhodnou volbou, jelikož by elektronický

přepínač předřadných indukčností byl příliš složitý. Z tohoto důvodu nebude princip této metody implementován do výsledného zařízení.

Další metodou je rezonanční metoda. U této metody jsou výsledky měření srovnatelné s můstkovou metodou. Což je zajímavé z hlediska náročnosti obou metod. Pokud se vezme v potaz náročnost vyvažování můstku a celková realizace můstkové metody, a porovná-li se to s realizací rezonanční metody, a porovnáme-li dosažené výsledky obou metod je daleko výhodnější a efektivnější provést automatizaci rezonanční metody.

Z výše zmíněného bylo rozhodnuto, že do výsledného zařízení bude implementován princip rezonanční metody, jelikož metoda není tak obvyklou variantou z hlediska automatizace a dá se předpokládat, že by to mohl být zajímavý způsob měření. A především rezonanční metoda vykazovala přesné výsledky v předchozích měřeních, a to jak v podobě sériového rezonančního obvodu, tak i paralelního rezonančního obvodu. Je to nejvhodnější výběr z měřených metod a zároveň je metoda vhodná k automatizaci. Měření bude provedeno automatizovaně pomocí mikrokontroleru Arduino. Změřená hodnota bude vypsána na displej.

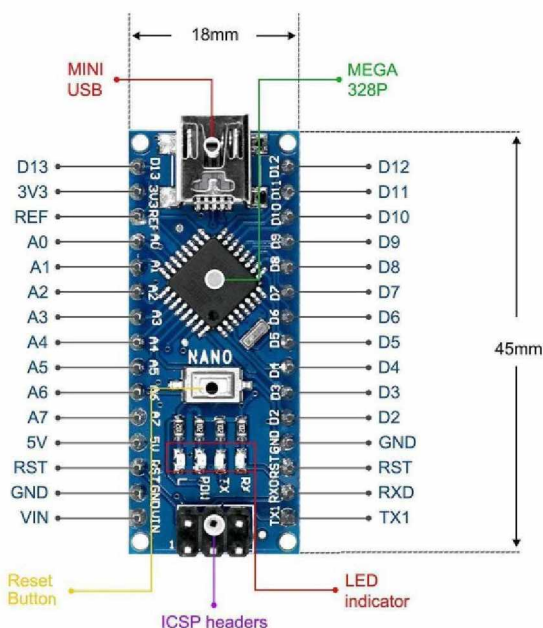
4 Návrh konceptu zařízení a popis jednotlivých elementů

V této kapitole závěrečné práce se provede rozbor jednotlivých elementů sestavovaného zařízení a jejich podrobný popis v Hardwarovém rozhraní. Také se provede analýza Softwarové části, která bude realizována v programovém prostředí Arduino IDE.

4.1 Hardwarová část zařízení

Sestavované zařízení se skládá z řídicí jednotky, která je tvořena mikrokontrolerem Arduino nano, poté je tu samozřejmě zobrazovač, kterým je LCD modul 16x2 znaků (I2C). A převodník indukčnosti cívky na frekvenci.

Srdcem zařízení je Arduino nano. Jedná se o vývojovou desku s mikrokontrolerem AVR ATmega328. Programovatelné prostředí se nazývá Arduino IDE, ve kterém se velmi dobře pracuje a je dostupné ke stažení zdarma. Tato deska se zvolila z několika prostých důvodů, prvním důvodem je předchozí zkušenost s Arduinem, druhým je přijatelná cena a malé rozměry, dalším důvodem je snadné připojení rozšiřujících shieldů (desek), a nespornou výhodou je také existence mnoha rozšiřujících knihoven, které usnadňují práci. Tento typ desky je přizpůsobený ke snadnému připojení k nepájivému poli nebo patice zařízení. Jelikož má piny vstupů a výstupů vyvedeny na spodní straně desky. Obsahuje 14 digitálních vstupů/výstupů a 8 analogových. Na obr. 25. je zobrazen použitý typ Arduina včetně popisu vývodů a jednotlivých pinů.[23]



Obrázek 25 Arduino nano

Jako další se v zařízení nachází zobrazovací jednotka. Konkrétně LCD I2C modul 16x2 znaků, jelikož lze snadno připojit k Arduinu pomocí integrovaného obvodu PCF8574, který pracuje jako 8bitový převodník na I2C sběrnici. Tudíž k připojení zobrazovací jednotky budou stačit pouze čtyři vodiče, Vcc, SDA, SCL, GND. Je zřejmé, že je přednastavený určitý kontrast displeje což může vyvolat potíže s viditelností znaků na displeji po prvním nahrání programu. Tento problém, lze elegantně vyřešit pomocí trimru, který je umístěn přímo na

modulu displeje a díky kterému se přesně nastaví vyhovující kontrast. Knihovna pro zobrazovací jednotku nese název LiquidCrystal_I2C a je volně dostupná ke stažení. Samozřejmě se provede podrobné nastavení jednotky v programovatelném rozhraní Arduino IDE, které bude popsáno v Softwarové části závěrečné práce. Obr. 26. zachycuje použitý LCD modul.[24]



Obrázek 26 LCD modul 16x2 znaků

4.2 Podrobný popis principu zařízení a schéma zapojení

Schéma převodníku indukčnosti cívky na frekvenci kmitů je implementováno v zařízení, které je ukázáno na obr. 27. Princip převodníku je následující, v prvním kroku je nabit kondenzátor C_1 na napětí +5 V. Odpor R_1 slouží k limitaci proudu nabíjecího kondenzátor C_1 . Dioda D_1 brání v okamžiku přepnutí pinu D2 do nuly, aby se kondenzátor vybil do tohoto pinu. V okamžiku změny stavu pinu D2 z log. 1 do log. 0 se kondenzátor začne vybíjet přes indukčnost. V okolí indukčnosti se vytvoří magnetické pole a po vybití kondenzátoru začne cívka dodávat proud do obvodu a tím nabíjet C_1 . V ideálním případě by došlo k nekonečné oscilaci, avšak vlivem parazitních odporů je signál postupně utlumován. Operační zesilovač je zapojen jako komparátor a slouží ke generování pulzů pro vstup D3, kde se měří čas mezi dvěma po sobě jdoucími náběžnými hranami. Z tohoto času je určena rezonanční frekvence. Z rezonanční frekvence je pomocí tzv. Thompsonova vztahu (4.2) určena indukčnost neznáme cívky (4.3).

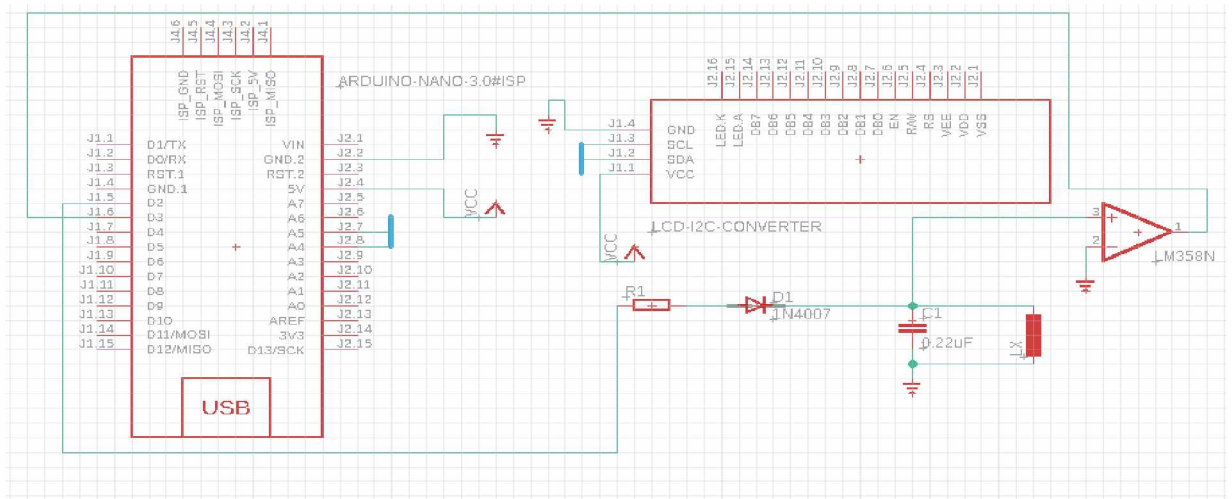
$$f = \frac{1}{T} \quad (4.1)$$

Rezonanční frekvence je dána vztahem (2.4), který se již definoval dříve, pro úplnost se zde uvádí znovu.[21]

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.2)$$

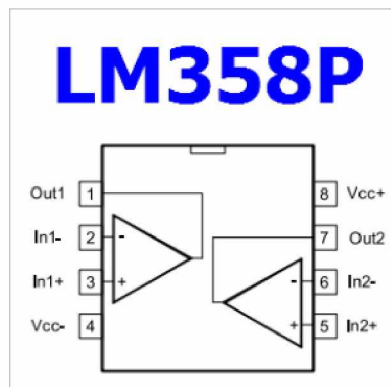
Výslednou hodnotu indukčnosti lze získat drobnou úpravou vztahu výše. Jak to ukazuje následující vztah (2.4).[21]

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_R^2 \cdot C} \quad (4.3)$$



Obrázek 27 Schéma zapojení výsledného zařízení

Jako operační zesilovač byl použit OZ (LM358P), jehož zapojení v pouzdře je ukázáno na obr. 28.

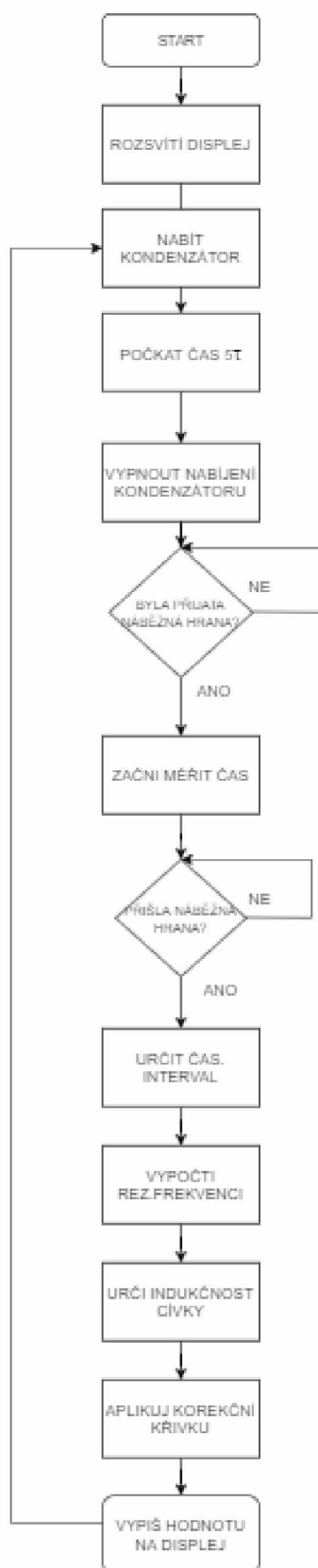


Obrázek 28 Rozložení pinů na použitém OZ

4.3 Softwarová část zařízení

Softwarová část závěrečné práce je vytvořena v programovém prostředí Arduino. V tomto programu se píše jazykem Wiring, který je velmi úzce spjatý s jazykem C++. V prostředí programu se dobře orientuje a vše je velmi přehledné. V prostředí nechybí též velké množství knihoven, které usnadňují uživateli práci. Program, který se vytvoří v jazyce Wiring nese název sketch a vždy obsahuje dvě základní části. První částí je void setup(), tato funkce se vždy spustí při počátečním načtení programu a slouží výhradně pro základní nastavení. Jako jsou třeba volby pinů na Arduinou atd. Druhou základní funkcí je void loop(), jak už název předeseílá zde se jedná o nekonečnou smyčku, která ve svém vnitřním prostoru obsahuje programový kód. Jedná se tedy o funkci, která je přímo spojena s chodem Arduino.[23]

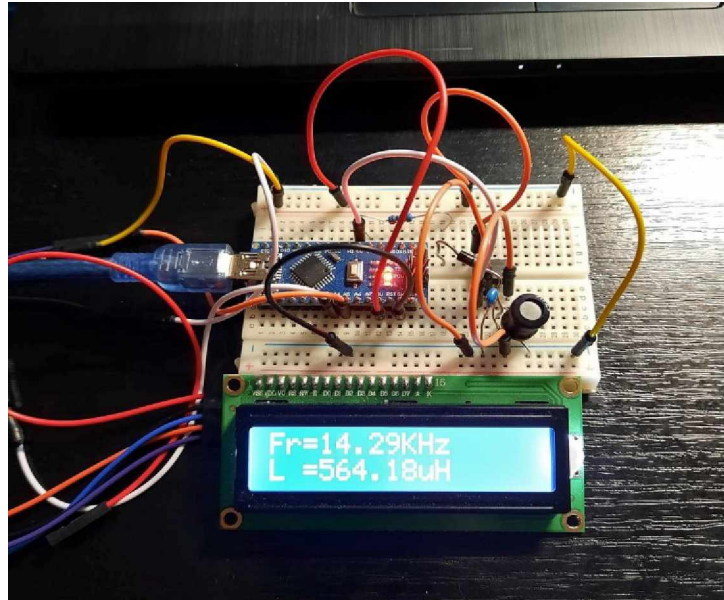
Algoritmus programu je ukázán na obr. 29. Po zapnutí programu se inicializuje displej, který je ovládán pomocí knihovny Liquid-krystal. Následně program spustí nabíjení kondenzátoru v rezonančním obvodu (nabíjení je prováděno z pinu D2). Po uplynutí času pěti τ je nabíjení kondenzátoru ukončeno. Nyní program kontroluje příchod náběžné hrany na pin D3, po příchodu náběžné hrany začne program měřit čas. V okamžiku příchodu druhé náběžné hrany je ukončeno měření času a ze změřeného času mezi dvěma po sobě jdoucími náběžnými hranami program určí periodu signálu. Následně z periody signálu určí jeho frekvenci a z frekvence vypočítá indukčnost. Jelikož po testovacích měření byl odhalen trend chyby v závislosti na velikosti indukčnosti, bylo do programu implementován krok provedení korekce. Hodnota indukčnosti po provedení korekce je zobrazena na displeji.



Obrázek 29 Ukázka algoritmu softwarové části

4.4 Testovací měření na nepájivém poli a návrh DPS

Na obr. 30 je ukázáno zapojení obvodu dle navrženého schématu realizované na nepájivém poli. Testovací měření prokázalo schopnost zařízení změřit indukčnost. Příklady změřených vybraných indukčností pomocí obvodu realizovaného na nepájivém poli jsou umístěny v tabulce 12. Jelikož na nepájivém poli se velmi silně uplatňují parazitní indukčnosti a kapacity, bylo třeba navrhnout DPS.



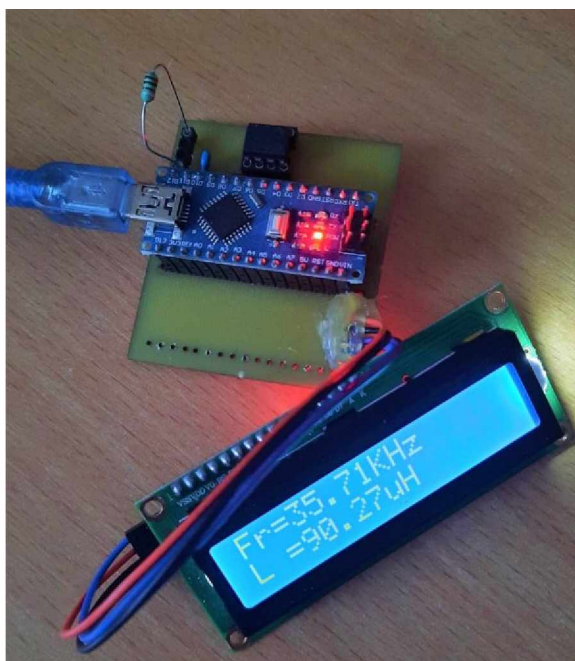
Obrázek 30 Výsledné zařízení na nepájivém poli

$L_{j1} = 470 \mu\text{H}$	$L_{j2} = 560 \mu\text{H}$	$L_{j3} = 680 \mu\text{H}$	$L_{j4} = 1,5 \text{ mH}$
$L_{x1_1} = 428,08 \mu\text{H}$	$L_{x2_1} = 554,84 \mu\text{H}$	$L_{x3_1} = 664,77 \mu\text{H}$	$L_{x4_1} = 1,53 \text{ mH}$
$L_{x1_2} = 441,36 \mu\text{H}$	$L_{x2_2} = 539,94 \mu\text{H}$	$L_{x3_2} = 648,46 \mu\text{H}$	$L_{x4_2} = 1,39 \text{ mH}$
$f_{r1_1} = 7,69\text{kHz}$	$f_{r2_1} = 6,76\text{kHz}$	$f_{r3_1} = 6,17\text{kHz}$	$f_{r4_1} = 4,07\text{kHz}$
$f_{r1_2} = 7,58\text{kHz}$	$f_{r2_2} = 6,85\text{kHz}$	$f_{r3_2} = 6,25\text{kHz}$	$f_{r4_2} = 4,27\text{kHz}$

Tabulka 12 Hodnoty zkušebního měření na výsledném zařízení

Kde L_x značí naměřenou hodnotu indukčnosti cívek, L_s skutečnou hodnotu indukčnosti cívek a f_r naměřenou rezonanční frekvenci.

V příloze E je ukázána navržená deska plošných spojů měřícího přístroje. Na obr. 31 je ukázáno sestavené finální měřící zařízení. Na displeji je zobrazena ukázka měření indukčnosti o velikosti přibližně $100\mu\text{H}$, která je uchycena v DPS.



Obrázek 31 Sestavené zařízení při finálním měření

4.5 Testovací měření

V důsledku použití fixní hodnoty kondenzátoru je měřicí rozsah přístroje limitován. Navržené zařízení je schopné měřit indukčnosti v rozsahu hodnot od cca 100 μ H do cca 16mH. Na základě zvoleného rozsahu se nadále bude počítat relativní redukováná chyba, z níž se určí třída přesnosti přístroje podle rovnice níže.

$$\sigma_P = \frac{|\Delta M|}{x_R} \cdot 100 \quad (4.4)$$

Aby bylo možno určit relativní redukovanou chybu je třeba provést testovací měření na celém měřícím rozsahu. Hodnoty změřených indukčností jsou ukázány v příloze C, vybrané hodnoty indukčností jsou ukázány v tabulce 13. Z tabulky 13 je patrné, že pro vyšší hodnoty indukčností dochází k podhodnocení velikosti indukčností. V příloze D byl vykreslen trend pro změřené hodnoty a byla zjištěna rovnice tohoto trendu.

Lj1_5 = 100 μ H	Lj4_3 = 470 μ H	Lj7_1 = 1,5 mH	Lj10_3 = 3,9 mH
Ls1_5 = 99,44 μ H	Ls4_3 = 480,2 μ H	Ls7_1 = 1,515 mH	Ls10_3 = 4,205 mH
Lx1_5 = 103,62 μ H	Lx4_3 = 517,20 μ H	Lx7_1 = 1,42 mH	Lx10_3 = 3,02 mH
fr1_5 = 33,33 kHz	fr4_3 = 114,92 kHz	fr7_1 = 9,07 kHz	fr10_3 = 6,17 kHz
δ_{AB1_5} [μ H] = \pm (4,18 μ H)	δ_{AB4_3} [μ H] = \pm (37 μ H)	δ_{AB7_1} [mH] = \pm (0,095 mH)	δ_{AB10_3} [mH] = \pm (1,185 mH)
Axiální tlumívka	Radiální tlumívka	Axiální tlumívka	Axiální tlumívka

Tabulka 13 Naměřené hodnoty před kalibrací

Po implementaci korekční funkce byly hodnoty indukčností znovu přeměřeny. Výsledky z tohoto měření jsou v příloze F. Vybrané hodnoty změřené měřícím přístrojem po implementaci korekční křivky jsou ukázány v tabulce 14. Z hodnot je patrné, že se chyba v případě vyšších indukčností snížila.

$L_{j1_5} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j4_3} = 470 \mu\text{H}$	$L_{j7_2} = 1,5 \text{ mH}$	$L_{j10_3} = 3,9 \text{ mH}$
$L_{s1_5} = 99,44 \mu\text{H}$	$L_{s4_3} = 480,2 \mu\text{H}$	$L_{s7_2} = 1,519 \text{ mH}$	$L_{s10_3} = 4,205 \text{ mH}$
$L_{x1_5} = 96,945 \mu\text{H}$	$L_{x4_3} = 509,37 \mu\text{H}$	$L_{x7_2} = 1,455 \text{ mH}$	$L_{x10_3} = 3,051 \text{ mH}$
$f_{r1_5} = 34,46 \text{ kHz}$	$f_{r4_3} = 15,04 \text{ kHz}$	$f_{r7_2} = 8,89 \text{ kHz}$	$f_{r10_3} = 6,14 \text{ kHz}$
$\delta_{AB1_5} [\mu\text{H}] = \pm (2,495 \mu\text{H})$	$\delta_{AB4_3} [\mu\text{H}] = \pm (29,17 \mu\text{H})$	$\delta_{AB7_2} [\text{mH}] = \pm (0,064 \text{ mH})$	$\delta_{AB10_3} [\text{mH}] = \pm (1,154 \text{ mH})$
Axiální tlumivka	Radiální tlumivka	Axiální tlumivka	Axiální tlumivka

Tabulka 14 Naměřené hodnoty po kalibraci

Relativní redukovaná chyba před implementací korekčního výpočtu byla více než 10 %. Z toho plyne, že zařízení nesplňovalo třídu přesnosti ani 5 % a bylo tedy nevhodné pro měření. Po implementaci korekčního algoritmu byla relativní redukovaná chyba 4,78 %. Díky čemuž zařízení vyhovuje na měřeném rozsahu třídě přesnosti 5 %. A lze jej tedy pro přibližná měření použít.

ZÁVĚR

Cílem závěrečné práce bylo navrhnout a sestavit měřič indukčností, který bude měřit automatizovaně pomocí mikrokontroleru Arduino a bude vypisovat měřenou veličinu na displej.

V první kapitole byl čtenář seznámen se základními prvky elektrotechniky a podrobným popisem pasivních prvků, zejména však induktorů. Ve druhé kapitole, bylo cílem popsat a podrobně rozebrat principy a měřicí metody, kterými lze induktory měřit. Každá z popisovaných metod byla příslušně okomentována včetně principiálního schématu zapojení a vzorců pro výpočet samotné indukčnosti. Ve třetí kapitole, která již patřila mezi praktickou část práce probíhalo postupné měření jednotlivých měřících metod. Každá z dostupných metod byla měřena samostatně. Metoda měření, která vykazovala příznivé výsledky a zároveň byla vhodná k automatizaci byla implementována do závěrečného zařízení. Ve čtvrté a také poslední kapitole závěrečné práce proběhlo zvolení principu měření indukčnosti a následná realizace zařízení včetně výroby DPS. Poté bylo provedeno závěrečné měření, které potvrdilo funkčnost zařízení, tím bylo prokázáno, že zadání bakalářské práce bylo splněno.

Během tvoření práce bylo odhaleno několik omezujících faktorů. Prvním byl zvolený princip měření indukčnosti, který se zpočátku zdál jako vhodný nicméně postupem času vznikaly potíže a bylo zřejmé, že zvolený princip není až tak vyhovující. Druhým faktorem byl měřicí rozsah přístroje a třída přesnosti přístroje, která je velmi úzce spjata se zvoleným principem měření. Vylepšení by se dalo realizovat několika způsoby, například by se mohl zvolit jiný princip měření indukčnosti, nebo by se stávající zařízení mohlo upravit a připojit k němu na nepájivém poli řadu kapacit, které by se měnily podle měřené hodnoty indukčnosti. V poslední řadě by se mohl upravit napsaný program a rozšířit tak rozsah měřen

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BRTNÍK, Bohumil. *Základy obvodové techniky 1*. 1. Praha: BEN – technická literatura, 2014. ISBN 978-80-7300-523-8.
- [2] BRTNÍK, Bohumil. *Teoretická elektrotechnika*. 1. Praha: BEN – technická literatura, 2017. DOI: 80-01-02466-0. ISBN 978-80-7300-547-4.
- [3] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika II*. 5., nezměn. vyd. Praha: Informatorium, 2005. ISBN 80-733-3044-X.
- [4] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika I*. 5., nezměn. vyd. Praha: Informatorium, 2005. ISBN 80-733-3043-1.
- [5] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické obvody a elektronika*. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-2466-0.
- [6] LÁNÍČEK, Robert. *Elektronika: obvody, součástky, děje*. 1. Praha: BEN – technická literatura, 1998. ISBN 80-860-5625-2.
- [7] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. 1. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0146-2.
- [8] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. 1. Praha: BEN – technická literatura, 1999. ISBN 80-860-5649-X.
- [9] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-860-5691-0.
- [10] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika III: (příklady a úlohy)*. 5., nezměn. vyd. Praha: Informatorium, 2005. ISBN 80-733-3045-8.
- [11] *Elektrotechnická měření*. 1. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0022-9.
- [12] PEČEK, Jiří. *Elektronika v kostce*. 1. Praha: BEN – technická literatura, 1999. ISBN 80-860-5680-5.
- [13] DIETMEIER, Ulrich. *Vzorce pro elektroniku*. 1. Praha: BEN – technická literatura, 1999. ISBN 80-860-5653-8.
- [14] MYSLÍK, Jiří. *Elektrické obvody: (příručka pro praxi a učebnice pro střední a vysoké školy)*. 2. Praha: BEN – technická literatura, 1998. ISBN 80-860-5619-8.
- [15] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika III: (příklady a úlohy)*. 5., nezměn. vyd. Praha: Informatorium, 2005. ISBN 80-733-3045-8.

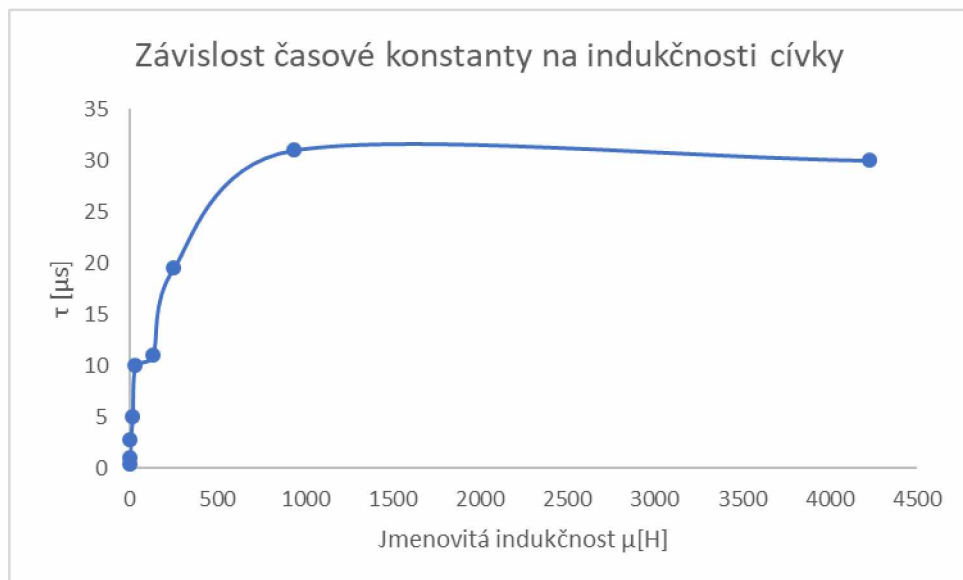
- [16] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: Součástky a obvody, principy a příklady*. Třetí, rozšířené vydání. Praha: Grada Publishing, 2015. ISBN 978-80-247-1241-3.
- [17] HAASZ, Vladimír, Jan HOLUB, Michal JANOŠEK, Petr KAŠPAR a Vojtěch PETRUCHA. *Elektrická měření: přístroje a metody*. 3. přepracované vydání. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06412-2.
- [18] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky: Elektřina a magnetismus. [Http://fyzika.jreichl.com/](http://fyzika.jreichl.com/) [online]. Praha: Creative commons, 2006 [cit. 2020-09-17]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/219-elektřina-a-magnetismus>
- [19] FIALA, Miloš, Milan VROŽINA a Jiří HERCIK. *Elektrotechnická měření I: pro 3. ročník SPŠE*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [20] FEYNMAN, Richard Phillips, Matthew SANDS a Robert B. LEIGHTON. *Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady*. 1. Havlíčkův Brod: Fragment, 2006. ISBN 80-720-0420-4.
- [21] KESL, Jan. *Elektronika: učebnice : základní studijní materiál pro střední školy*. 2., aktualiz. a rozš. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0143-8.
- [22] MALÝ, Karel. *Elektrotechnika*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04866-5.
- [23] [Bastlirna.hwkitcheen.cz](https://bastlirna.hwkitcheen.cz) [online]. [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: <https://bastlirna.hwkitcheen.cz/co-je-to-arduino/>
- [24] [Navody.drateg.cz](https://navody.drateg.cz) [online]. 2016 [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: <https://navody.drateg.cz/zaciname-s-arduinem/lcd-displej.html>
- [25] Elprocus.com. *Elprocus.com* [online]. [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/pull-up-and-pull-down-resistors-with-applications/>

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA A – Seznam použitých přístrojů

UNIVERZÁLNÍ MULTIMETER	FK8250
ANALOGOVÝ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ	DU20
DIGITÁLNÍ OSCILOSKOP	OWON SD 6062(V)
KAPESNÍ GENERÁTOR	BPHPS140
DIGITÁLNÍ MULTIMETER	DT-830 B
STOLNÍ MĚŘIČ RLC	MT4080A-RLC METER

PŘÍLOHA B – Graf závislosti časové konstanty τ na indukčnosti cívky



PŘÍLOHA C – Tabulky hodnot výsledného měření před kalibrací

$L_{j1_1} = 100 \mu H$	$L_{j1_2} = 100 \mu H$	$L_{j1_3} = 100 \mu H$	$L_{j1_4} = 100 \mu H$
$L_{s1_1} = 97,1 \mu H$	$L_{s1_2} = 97,7 \mu H$	$L_{s1_3} = 99,35 \mu H$	$L_{s1_4} = 99,40 \mu H$
$L_{x1_1} = 90,27 \mu H$	$L_{x1_2} = 90,27 \mu H$	$L_{x1_3} = 90,27 \mu H$	$L_{x1_4} = 90,27 \mu H$
$fr1_1 = 35,71 \text{ kHz}$	$fr1_2 = 35,71 \text{ kHz}$	$fr1_3 = 35,71 \text{ kHz}$	$fr1_4 = 35,71 \text{ kHz}$
$\delta_{AB1_1} [\mu H] = \pm (6,83 \mu H)$	$\delta_{AB1_2} [\mu H] = \pm (7,43 \mu H)$	$\delta_{AB1_3} [\mu H] = \pm (9,08 \mu H)$	$\delta_{AB1_4} [\mu H] = \pm (9,13 \mu H)$
Axiální tlumivka	Axiální tlumivka	Axiální tlumivka	Axiální tlumivka

$L_{j1_5} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j1_6} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j1_7} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j1_8} = 100 \mu\text{H}$
$L_{s1_5} = 99,44 \mu\text{H}$	$L_{s1_6} = 99,61 \mu\text{H}$	$L_{s1_7} = 99,65 \mu\text{H}$	$L_{s1_8} = 100,3 \mu\text{H}$
$L_{x1_5} = 103,62 \mu\text{H}$	$L_{x1_6} = 103,62 \mu\text{H}$	$L_{x1_7} = 103,62 \mu\text{H}$	$L_{x1_8} = 103,62 \mu\text{H}$
$fr1_5 = 33,33 \text{ kHz}$	$fr1_6 = 33,33 \text{ kHz}$	$fr1_7 = 33,33 \text{ kHz}$	$fr1_8 = 33,33 \text{ kHz}$
$\delta_{AB1_5} [\mu\text{H}] = \pm (4,18 \mu\text{H})$	$\delta_{AB1_6} [\mu\text{H}] = \pm (4,01 \mu\text{H})$	$\delta_{AB1_7} [\mu\text{H}] = \pm (3,97 \mu\text{H})$	$\delta_{AB1_8} [\mu\text{H}] = \pm (3,32 \mu\text{H})$
Axiální tlumivka	Axiální tlumivka	Axiální tlumivka	Axiální tlumivka

$L_{j1_9} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j1_10} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j2_1} = 100 \mu\text{H}, L_{j2_2} = 100 \mu\text{H} = 200 \mu\text{H}$
$L_{s1_9} = 115,4 \mu\text{H}$	$L_{s1_10} = 152,3 \mu\text{H}$	$L_{s2_1} + L_{s2_2} = (100,3 \mu\text{H} + 99,35 \mu\text{H}) = 199,35 \mu\text{H}$
$L_{x1_9} = 117,9 \mu\text{H}$	$L_{x1_10} = 149,22 \mu\text{H}$	$L_{x2} = 185,2 \mu\text{H}$
$fr1_9 = 31,25 \text{ kHz}$	$fr1_10 = 27,78 \text{ kHz}$	$fr2 = 24,93 \text{ kHz}$
$\delta_{AB1_9} [\mu\text{H}] = \pm (2,5 \mu\text{H})$	$\delta_{AB1_10} [\mu\text{H}] = \pm (3,08 \mu\text{H})$	$\delta_{AB2} [\mu\text{H}] = \pm (14,15 \mu\text{H})$
Toroidní tlumivka malá	Toroidní tlumivka velká	Axiální tlumivky v sérii

$L_{j3_1} = 100 \mu\text{H}, L_{j3_2} = 100 \mu\text{H}, L_{j3_3} = 100 \mu\text{H} = 300 \mu\text{H}$	$L_{j4_1} = 470 \mu\text{H}$	$L_{j4_2} = 470 \mu\text{H}$
$L_{s3_1} + L_{s3_2} + L_{s3_3} = (100,3 \mu\text{H} + 99,35 \mu\text{H} + 99,44) = 299,09 \mu\text{H}$	$L_{s4_1} = 479,5 \mu\text{H}$	$L_{s4_2} = 479,9 \mu\text{H}$
$L_{x3} = 280,4 \mu\text{H}$	$L_{x4_1} = 501,54 \mu\text{H}$	$L_{x4_2} = 501,54 \mu\text{H}$
$fr3 = 21,25 \text{ kHz}$	$fr4_1 = 15,15 \text{ kHz}$	$fr4_2 = 15,15 \text{ kHz}$
$\delta_{AB3} [\mu\text{H}] = \pm (18,69 \mu\text{H})$	$\delta_{AB4_1} [\mu\text{H}] = \pm (22,04 \mu\text{H})$	$\delta_{AB4_2} [\mu\text{H}] = \pm (22,04 \mu\text{H})$
Axiální tlumivky v sérii	Radiální tlumivka	Radiální tlumivka

$L_{j4_3} = 470 \mu\text{H}$	$L_{j4_4} = 470 \mu\text{H}$	$L_{j4_5} = 470 \mu\text{H}$	$L_{j5_1} = 560 \mu\text{H}$
$L_{s4_3} = 480,2 \mu\text{H}$	$L_{s4_4} = 481,4 \mu\text{H}$	$L_{s4_5} = 482,4 \mu\text{H}$	$L_{s5_1} = 550,1 \mu\text{H}$
$L_{x4_3} = 517,20 \mu\text{H}$	$L_{x4_4} = 519,6 \mu\text{H}$	$L_{x4_5} = 532,40 \mu\text{H}$	$L_{x5_1} = 471,50 \mu\text{H}$
$fr4_3 = 114,92 \text{ kHz}$	$fr4_4 = 14,88 \text{ kHz}$	$fr4_5 = 14,71 \text{ kHz}$	$fr5_1 = 15,63 \text{ kHz}$
$\delta_{AB4_3} [\mu\text{H}] = \pm (37 \mu\text{H})$	$\delta_{AB4_4} [\mu\text{H}] = \pm (38,20 \mu\text{H})$	$\delta_{AB4_5} [\mu\text{H}] = \pm (50 \mu\text{H})$	$\delta_{AB5_1} [\mu\text{H}] = \pm (78,6 \mu\text{H})$
Radiální tlumivka	Radiální tlumivka	Radiální tlumivka	Radiální tlumivka

$L_{j5_2} = 560 \mu\text{H}$	$L_{j5_3} = 560 \mu\text{H}$	$L_{j6_1} = 680 \mu\text{H}$	$L_{j6_2} = 680 \mu\text{H}$
$L_{s5_2} = 551,5 \mu\text{H}$	$L_{s5_3} = 551,8 \mu\text{H}$	$L_{s6_1} = 692,5 \mu\text{H}$	$L_{s6_2} = 693,3 \mu\text{H}$
$L_{x5_2} = 564,18 \mu\text{H}$	$L_{x5_3} = 596,87 \mu\text{H}$	$L_{x6_1} = 700,50 \mu\text{H}$	$L_{x6_2} = 724,50 \mu\text{H}$
$fr5_2 = 14,29 \text{ kHz}$	$fr5_3 = 13,88 \text{ kHz}$	$fr6_1 = 12,82 \text{ kHz}$	$fr6_2 = 12,60 \text{ kHz}$
$\delta_{AB5_2} [\mu\text{H}] = \pm (12,68 \mu\text{H})$	$\delta_{AB5_3} [\mu\text{H}] = \pm (45,07 \mu\text{H})$	$\delta_{AB6_1} [\mu\text{H}] = \pm (8 \mu\text{H})$	$\delta_{AB6_2} [\mu\text{H}] = \pm (31,20 \mu\text{H})$
Radiální tlumivka	Radiální tlumivka	Radiální tlumivka	Radiální tlumivka

$L_{j6_3} = 680 \mu\text{H}$	$L_{j6_4} = 680 \mu\text{H}$	$L_{j6_5} = 680 \mu\text{H}$	$L_{j7_1} = 1,5 \text{ mH}$
$L_{s6_3} = 695,7 \mu\text{H}$	$L_{s6_4} = 696,1 \mu\text{H}$	$L_{s6_5} = 696,9 \mu\text{H}$	$L_{s7_1} = 1,515 \text{ mH}$
$L_{x6_3} = 706,32 \mu\text{H}$	$L_{x6_4} = 700,50 \mu\text{H}$	$L_{x6_5} = 736,88 \mu\text{H}$	$L_{x7_1} = 1,42 \text{ mH}$
$fr6_3 = 12,76 \text{ kHz}$	$fr6_4 = 12,82 \text{ kHz}$	$fr6_5 = 12,50 \text{ kHz}$	$fr7_1 = 9,07 \text{ kHz}$
$\delta_{AB6_3} [\mu\text{H}] = \pm (10,62 \mu\text{H})$	$\delta_{AB6_4} [\mu\text{H}] = \pm (4,40 \mu\text{H})$	$\delta_{AB6_5} [\mu\text{H}] = \pm (39,98 \mu\text{H})$	$\delta_{AB7_1} [\text{mH}] = \pm (0,095 \text{ mH})$
Radiální tlumivka	Radiální tlumivka	Radiální tlumivka	Axiální tlumivka

$L_{j7_2} = 1,5 \text{ mH}$	$L_{j7_3} = 1,5 \text{ mH}$	$L_{j8_1} = 1,5 \text{ mH}, L_{j8_2} = 0,680 \text{ mH}$
$L_{s7_2} = 1,519 \text{ mH}$	$L_{s7_3} = 1,566 \text{ mH}$	$L_{s8_1} + L_{s8_2} = (1,566 \text{ mH} + 0,692,5 \text{ mH}) = 2,258 \text{ mH}$
$L_{x7_2} = 1,49 \text{ mH}$	$L_{x7_3} = 1,53 \text{ mH}$	$L_{x8} = 2,23 \text{ mH}$
$fr7_2 = 8,80 \text{ kHz}$	$fr7_3 = 8,68 \text{ kHz}$	$fr8 = 7,19 \text{ kHz}$
$\delta_{AB7_2} [\text{mH}] = \pm (0,029 \text{ mH})$	$\delta_{AB7_3} [\text{mH}] = \pm (0,036 \text{ mH})$	$\delta_{AB8} [\text{mH}] = \pm (0,028 \text{ mH})$
Axiální tlumivka	Radiální tlumivka	Radiální tlumivky v sérii

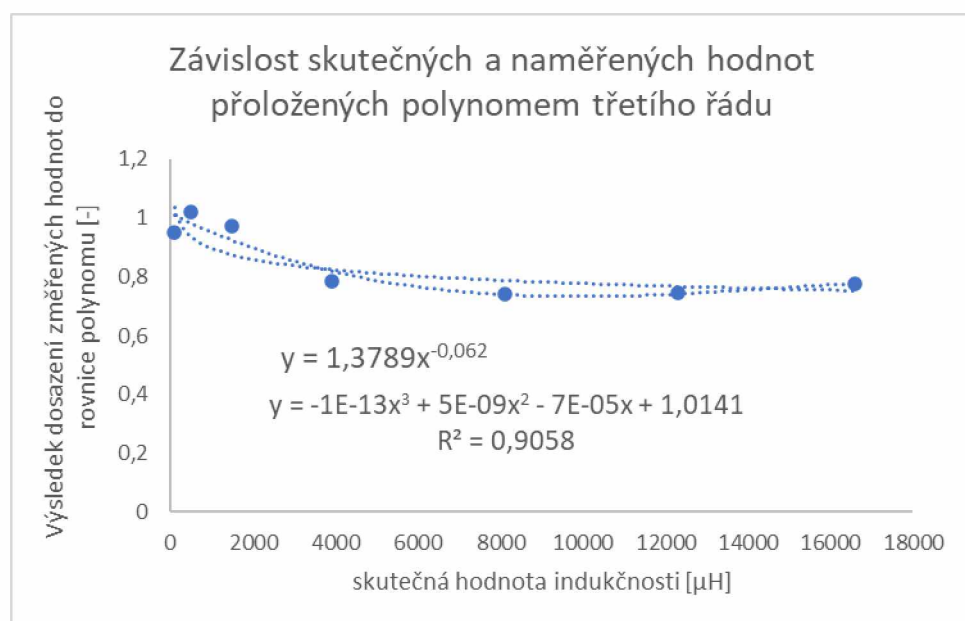
Lj9_1 = 1,5 mH, Lj9_2 = 1,5mH	Lj10_1 = 3,9 mH	Lj10_2 = 3,9 mH
Ls9_1 + Ls9_2 = (1,515 mH + 1,519 mH) = 3,034 mH	Ls10_1 = 3,978 mH	Ls10_2 = 4,160 mH
Lx9 = 2,73 mH	Lx10_1 = 3,10 mH	Lx10_2 = 2,95 mH
fr9 = 6,49 kHz	fr10_1 = 6,10 kHz	fr10_2 = 6,25 kHz
δ_{AB9} [mH] = \pm (0,304 mH)	δ_{AB10_1} [mH] = \pm (0,878 mH)	δ_{AB10_2} [mH] = \pm (1,21 mH)
Axiální tlumivky v sérii	Axiální tlumivka	Axiální tlumivka

Lj10_3 = 3,9 mH	Lj10_4 = 3,9 mH	Lj11_1 = 3,9 mH, Lj11_2 = 1,5mH
Ls10_3 = 4,205 mH	Ls10_4 = 4,263 mH	Ls11_1 + Ls11_2 = (3,978 mH + 1,519 mH) = 5,497 mH
Lx10_3 = 3,02 mH	Lx10_4 = 3,15 mH	Lx11 = 4,98 mH
fr10_3 = 6,17 kHz	fr10_4 = 5,95 kHz	fr11 = 4,81 kHz
δ_{AB10_3} [mH] = \pm (1,185 mH)	δ_{AB10_4} [mH] = \pm (1,113 mH)	δ_{AB11} [mH] = \pm (0,517 mH)
Axiální tlumivka	Axiální tlumivka	Axiální tlumivky v sérii

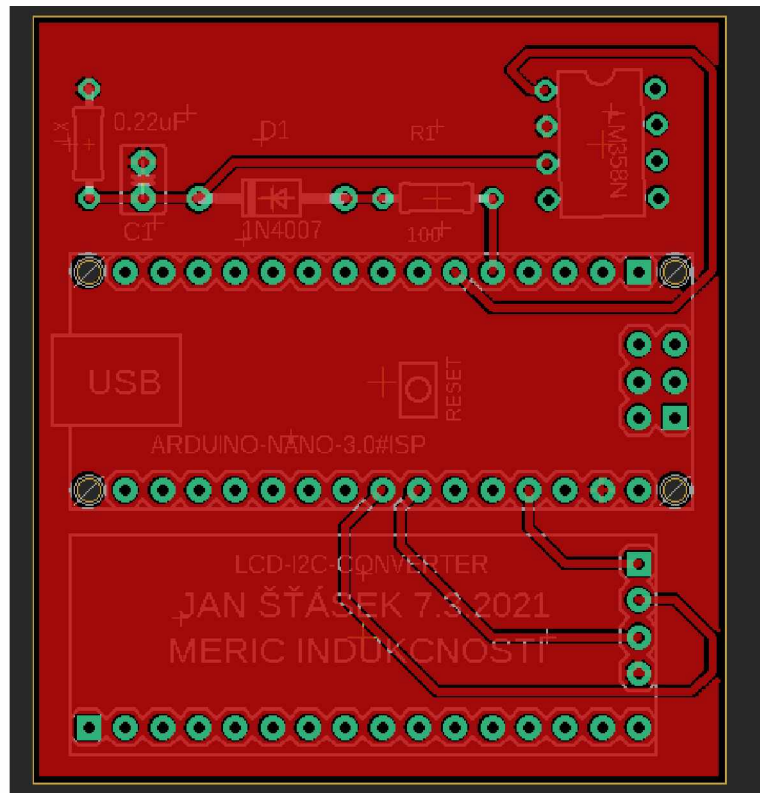
Lj12_1 = 3,9 mH, Lj12_2 = 3,9 mH	Lj13_1 = 3,9 mH, Lj13_2 = 3,9 mH, Lj13_3 = 3,9 mH
Ls12_1 + Ls12_2 = (3,978 mH + 4,156 mH) = 8,134 mH	Ls13_1 + Ls13_2 + Ls13_3 = (3,978 mH + 4,156 mH + 4,205mH) = 12,339 mH
Lx12 = 6,09 mH	Lx13 = 9,17 mH
fr12 = 4,35 kHz	fr13 = 3,54 kHz
δ_{AB12} [mH] = \pm (2,044 mH)	δ_{AB13} [mH] = \pm (3,169 mH)
Axiální tlumivky v sérii	Axiální tlumivky v sérii

Lj14_1 = 3,9 mH, Lj14_2 = 3,9 mH, Lj14_3 = 3,9 mH, Lj14_4 = 3,9 mH
Ls14_1 + Ls14_2 + Ls14_3 + Lj14_4 = (3,978 mH + 4,156 mH + 4,205 mH + 4,263 mH) = 16,602 mH
Lx14 = 12,87 mH
fr14 = 2,99 kHz
δ_{AB14} [mH] = \pm (3,732 mH)
Axiální tlumivky v sérii

PŘÍLOHA D – Graf závislosti skutečných a naměřených hodnot proložených polynomem třetího řádu



PŘÍLOHA E – Plošný spoj závěrečného zařízení



PŘÍLOHA F – Tabulky hodnot výsledného měření po kalibraci

$L_{j1_1} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j1_2} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j1_3} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j1_4} = 100 \mu\text{H}$
$L_{s1_1} = 97,1 \mu\text{H}$	$L_{s1_2} = 97,7 \mu\text{H}$	$L_{s1_3} = 99,35 \mu\text{H}$	$L_{s1_4} = 99,40 \mu\text{H}$
$L_{x1_1} = 96,945 \mu\text{H}$	$L_{x1_2} = 96,945 \mu\text{H}$	$L_{x1_3} = 96,945 \mu\text{H}$	$L_{x1_4} = 96,945 \mu\text{H}$
$fr_{1_1} = 35,71 \text{ kHz}$	$fr_{1_2} = 35,71 \text{ kHz}$	$fr_{1_3} = 35,71 \text{ kHz}$	$fr_{1_4} = 35,71 \text{ kHz}$
$\delta_{AB1_1} [\mu\text{H}] = \pm (0,155 \mu\text{H})$	$\delta_{AB1_2} [\mu\text{H}] = \pm (0,755 \mu\text{H})$	$\delta_{AB1_3} [\mu\text{H}] = \pm (2,405 \mu\text{H})$	$\delta_{AB1_4} [\mu\text{H}] = \pm (2,455 \mu\text{H})$
Axiální tlumivka	Axiální tlumivka	Axiální tlumivka	Axiální tlumivka
$L_{j1_5} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j1_6} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j1_7} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j1_8} = 100 \mu\text{H}$
$L_{s1_5} = 99,44 \mu\text{H}$	$L_{s1_6} = 99,61 \mu\text{H}$	$L_{s1_7} = 99,65 \mu\text{H}$	$L_{s1_8} = 100,3 \mu\text{H}$
$L_{x1_5} = 96,945 \mu\text{H}$	$L_{x1_6} = 96,945 \mu\text{H}$	$L_{x1_7} = 96,945 \mu\text{H}$	$L_{x1_8} = 96,945 \mu\text{H}$
$fr_{1_5} = 34,46 \text{ kHz}$	$fr_{1_6} = 34,46 \text{ kHz}$	$fr_{1_7} = 34,46 \text{ kHz}$	$fr_{1_8} = 34,46 \text{ kHz}$
$\delta_{AB1_5} [\mu\text{H}] = \pm (2,495 \mu\text{H})$	$\delta_{AB1_6} [\mu\text{H}] = \pm (2,665 \mu\text{H})$	$\delta_{AB1_7} [\mu\text{H}] = \pm (2,705 \mu\text{H})$	$\delta_{AB1_8} [\mu\text{H}] = \pm (3,355 \mu\text{H})$
Axiální tlumivka	Axiální tlumivka	Axiální tlumivka	Axiální tlumivka
$L_{j1_9} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j1_10} = 100 \mu\text{H}$	$L_{j2_1} = 100 \mu\text{H}, L_{j2_2} = 100 \mu\text{H} = 200 \mu\text{H}$	
$L_{s1_9} = 115,4 \mu\text{H}$	$L_{s1_10} = 152,3 \mu\text{H}$	$L_{s2_1} + L_{s2_2} = (100,3 \mu\text{H} + 99,35 \mu\text{H}) = 199,35 \mu\text{H}$	
$L_{x1_9} = 117,9 \mu\text{H}$	$L_{x1_10} = 149,22 \mu\text{H}$	$L_{x2} = 185,2 \mu\text{H}$	
$fr_{1_9} = 31,25 \text{ kHz}$	$fr_{1_10} = 27,78 \text{ kHz}$	$fr_2 = 24,93 \text{ kHz}$	
$\delta_{AB1_9} [\mu\text{H}] = \pm (2,5 \mu\text{H})$	$\delta_{AB1_10} [\mu\text{H}] = \pm (3,08 \mu\text{H})$	$\delta_{AB2} [\mu\text{H}] = \pm (14,15 \mu\text{H})$	
Toroidní tlumivka malá	Toroidní tlumivka velká	Axiální tlumivky v sérii	

$L_{j3_1} = 100 \mu\text{H}$, $L_{j3_2} = 100 \mu\text{H}$, $L_{j3_3} = 100 \mu\text{H} = 300 \mu\text{H}$	$L_{j4_1} = 470 \mu\text{H}$	$L_{j4_2} = 470 \mu\text{H}$
$L_{s3_1} + L_{s3_2} + L_{s3_3} = (100,3 \mu\text{H} + 99,35 \mu\text{H} + 99,44) = 299,09 \mu\text{H}$	$L_{s4_1} = 479,5 \mu\text{H}$	$L_{s4_2} = 479,9 \mu\text{H}$
$L_{x3} = 286,4 \mu\text{H}$	$L_{x4_1} = 491,7 \mu\text{H}$	$L_{x4_2} = 491,7 \mu\text{H}$
$f_{r3} = 20,06 \text{ kHz}$	$f_{r4_1} = 15,30 \text{ kHz}$	$f_{r4_2} = 15,30 \text{ kHz}$
$\delta_{AB3} [\mu\text{H}] = \pm (12,69\mu\text{H})$	$\delta_{AB4_1} [\mu\text{H}] = \pm (12,2 \mu\text{H})$	$\delta_{AB4_2} [\mu\text{H}] = \pm (12,2 \mu\text{H})$
Axiální tlumivky v sérii	Radiální tlumivka	Radiální tlumivka

$L_{j4_3} = 470 \mu\text{H}$	$L_{j4_4} = 470 \mu\text{H}$	$L_{j4_5} = 470 \mu\text{H}$	$L_{j5_1} = 560 \mu\text{H}$
$L_{s4_3} = 480,2 \mu\text{H}$	$L_{s4_4} = 481,4 \mu\text{H}$	$L_{s4_5} = 482,4 \mu\text{H}$	$L_{s5_1} = 550,1 \mu\text{H}$
$L_{x4_3} = 506,65 \mu\text{H}$	$L_{x4_4} = 509,24 \mu\text{H}$	$L_{x4_5} = 515,28 \mu\text{H}$	$L_{x5_1} = 526,11 \mu\text{H}$
$f_{r4_3} = 15,07 \text{ kHz}$	$f_{r4_4} = 15,03 \text{ kHz}$	$f_{r4_5} = 14,94 \text{ kHz}$	$f_{r5_1} = 14,79 \text{ kHz}$
$\delta_{AB4_3} [\mu\text{H}] = \pm (26,45 \mu\text{H})$	$\delta_{AB4_4} [\mu\text{H}] = \pm (27,84 \mu\text{H})$	$\delta_{AB4_5} [\mu\text{H}] = \pm (32,88 \mu\text{H})$	$\delta_{AB5_1} [\mu\text{H}] = \pm (23,99 \mu\text{H})$
Radiální tlumivka	Radiální tlumivka	Radiální tlumivka	Radiální tlumivka

$L_{j5_2} = 560 \mu\text{H}$	$L_{j5_3} = 560 \mu\text{H}$	$L_{j6_1} = 680 \mu\text{H}$	$L_{j6_2} = 680 \mu\text{H}$
$L_{s5_2} = 551,5 \mu\text{H}$	$L_{s5_3} = 551,8 \mu\text{H}$	$L_{s6_1} = 692,5 \mu\text{H}$	$L_{s6_2} = 693,3 \mu\text{H}$
$L_{x5_2} = 560,66 \mu\text{H}$	$L_{x5_3} = 579,23\mu\text{H}$	$L_{x6_1} = 696,77 \mu\text{H}$	$L_{x6_2} = 708,21 \mu\text{H}$
$f_{r5_2} = 14,33 \text{ kHz}$	$f_{r5_3} = 14,09 \text{ kHz}$	$f_{r6_1} = 12,85 \text{ kHz}$	$f_{r6_2} = 12,75 \text{ kHz}$
$\delta_{AB5_2} [\mu\text{H}] = \pm (9,16 \mu\text{H})$	$\delta_{AB5_3} [\mu\text{H}] = \pm (27,95 \mu\text{H})$	$\delta_{AB6_1} [\mu\text{H}] = \pm (4,27 \mu\text{H})$	$\delta_{AB6_2} [\mu\text{H}] = \pm (14,91 \mu\text{H})$
Radiální tlumivka	Radiální tlumivka	Radiální tlumivka	Radiální tlumivka

$L_{j6_3} = 680 \mu\text{H}$	$L_{j6_4} = 680 \mu\text{H}$	$L_{j6_5} = 680 \mu\text{H}$	$L_{j7_1} = 1,5 \text{ mH}$
$L_{s6_3} = 695,7 \mu\text{H}$	$L_{s6_4} = 696,1 \mu\text{H}$	$L_{s6_5} = 696,9 \mu\text{H}$	$L_{s7_1} = 1,515 \text{ mH}$
$L_{x6_3} = 704,12 \mu\text{H}$	$L_{x6_4} = 702,63 \mu\text{H}$	$L_{x6_5} = 724,99 \mu\text{H}$	$L_{x7_1} = 1,43 \text{ mH}$
$f_{r6_3} = 12,78 \text{ kHz}$	$f_{r6_4} = 12,80 \text{ kHz}$	$f_{r6_5} = 12,60 \text{ kHz}$	$f_{r7_1} = 8,97 \text{ kHz}$
$\delta_{AB6_3} [\mu\text{H}] = \pm (8,42 \mu\text{H})$	$\delta_{AB6_4} [\mu\text{H}] = \pm (6,53 \mu\text{H})$	$\delta_{AB6_5} [\mu\text{H}] = \pm (28,09 \mu\text{H})$	$\delta_{AB7_1} [\text{mH}] = \pm (0,085 \text{ mH})$
Radiální tlumivka	Radiální tlumivka	Radiální tlumivka	Axiální tlumivka

$L_{j7_2} = 1,5 \text{ mH}$	$L_{j7_3} = 1,5 \text{ mH}$	$L_{j8_1} = 1,5 \text{ mH}$, $L_{j8_2} = 0,680 \text{ mH}$
$L_{s7_2} = 1,519 \text{ mH}$	$L_{s7_3} = 1,566 \text{ mH}$	$L_{s8_1} + L_{s8_2} = (1,566 \text{ mH} + 0,692,5 \text{ mH}) = 2,258 \text{ mH}$
$L_{x7_2} = 1,50 \text{ mH}$	$L_{x7_3} = 1,54 \text{ mH}$	$L_{x8} = 2,27 \text{ mH}$
$f_{r7_2} = 8,76 \text{ kHz}$	$f_{r7_3} = 8,64 \text{ kHz}$	$f_{r8} = 7,12 \text{ kHz}$
$\delta_{AB7_2} [\text{mH}] = \pm (0,019 \text{ mH})$	$\delta_{AB7_3} [\text{mH}] = \pm (0,026 \text{ mH})$	$\delta_{AB8} [\text{mH}] = \pm (0,012 \text{ mH})$
Axiální tlumivka	Radiální tlumivka	Radiální tlumivky v sérii

$L_{j9_1} = 1,5 \text{ mH}$, $L_{j9_2} = 1,5\text{mH}$	$L_{j10_1} = 3,9 \text{ mH}$	$L_{j10_2} = 3,9 \text{ mH}$
$L_{s9_1} + L_{s9_2} = (1,515 \text{ mH} + 1,519 \text{ mH}) = 3,034 \text{ mH}$	$L_{s10_1} = 3,978 \text{ mH}$	$L_{s10_2} = 4,160 \text{ mH}$
$L_{x9} = 2,84 \text{ mH}$	$L_{x10_1} = 3,75 \text{ mH}$	$L_{x10_2} = 3,83 \text{ mH}$
$f_{r9} = 6,36 \text{ kHz}$	$f_{r10_1} = 5,54 \text{ kHz}$	$f_{r10_2} = 5,48 \text{ kHz}$
$\delta_{AB9} [\text{mH}] = \pm (0,194 \text{ mH})$	$\delta_{AB10_1} [\text{mH}] = \pm (0,228 \text{ mH})$	$\delta_{AB10_2} [\text{mH}] = \pm (0,33 \text{ mH})$
Axiální tlumivky v sérii	Axiální tlumivka	Axiální tlumivka

$L_{j10_3} = 3,9 \text{ mH}$	$L_{j10_4} = 3,9 \text{ mH}$	$L_{j11_1} = 3,9 \text{ mH}$, $L_{j11_2} = 1,5\text{mH}$
$L_{s10_3} = 4,205 \text{ mH}$	$L_{s10_4} = 4,263 \text{ mH}$	$L_{s11_1} + L_{s11_2} = (3,978 \text{ mH} + 1,519 \text{ mH}) = 5,497 \text{ mH}$
$L_{x10_3} = 3,89 \text{ mH}$	$L_{x10_4} = 3,94 \text{ mH}$	$L_{x11} = 5,01 \text{ mH}$
$f_{r10_3} = 5,23 \text{ kHz}$	$f_{r10_4} = 5,40 \text{ kHz}$	$f_{r11} = 4,79 \text{ kHz}$
$\delta_{AB10_3} [\text{mH}] = \pm (0,315 \text{ mH})$	$\delta_{AB10_4} [\text{mH}] = \pm (0,323 \text{ mH})$	$\delta_{AB11} [\text{mH}] = \pm (0,487 \text{ mH})$
Axiální tlumivka	Axiální tlumivka	Axiální tlumivky v sérii

$L_{j12_1} = 3,9 \text{ mH}, L_{j12_2} = 3,9 \text{ mH}$	$L_{j13_1} = 3,9 \text{ mH}, L_{j13_2} = 3,9 \text{ mH}, L_{j13_3} = 3,9 \text{ mH}$
$L_{s12_1} + L_{s12_2} = (3,978 \text{ mH} + 4,156 \text{ mH}) = 8,134 \text{ mH}$	$L_{s13_1} + L_{s13_2} + L_{s13_3} = (3,978 \text{ mH} + 4,156 \text{ mH} + 4,205 \text{ mH}) = 12,339 \text{ mH}$
$L_{x12} = 7,67 \text{ mH}$	$L_{x13} = 11,55 \text{ mH}$
$f_{r12} = 3,87 \text{ kHz}$	$f_{r13} = 3,15 \text{ kHz}$
$\delta_{AB,12} [\text{mH}] = \pm (0,464 \text{ mH})$	$\delta_{AB,13} [\text{mH}] = \pm (0,789 \text{ mH})$
Axiální tlumivky v sérii	Axiální tlumivky v sérii

$L_{j14_1} = 3,9 \text{ mH}, L_{j14_2} = 3,9 \text{ mH}, L_{j14_3} = 3,9 \text{ mH}, L_{j14_4} = 3,9 \text{ mH}$
$L_{s14_1} + L_{s14_2} + L_{s14_3} + L_{s14_4} = (3,978 \text{ mH} + 4,156 \text{ mH} + 4,205 \text{ mH} + 4,263 \text{ mH}) = 16,602 \text{ mH}$
$L_{x14} = 15,95 \text{ mH}$
$f_{r14} = 2,68 \text{ kHz}$
$\delta_{AB,14} [\text{mH}] = \pm (0,652 \text{ mH})$
Axiální tlumivky v sérii