



Česká metrologická společnost, z.s.

Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1

tel/fax: 221 082 254

e-mail: cms-zk@csvts.cz

www.csvts.cz/cms

Kalibrační postup

KP 4.1.2/17/16

ETALONY INDUKČNOSTI

Praha
Říjen 2016

Vzorový kalibrační postup byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie 2016.

Číslo úkolu: VII/1/16.

Zadavatel: Česká republika – Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, organizační složka státu.

Řešitel: Česká metrologická společnost.

Zpracoval: Doc. Ing. Jiří Horský, CSc.

© ÚNMZ, ČMS.

Neprodejné: Metodika je volně k dispozici na stránkách ÚNMZ a ČMS. Nesmí však být dále komerčně šířena.



1 Předmět kalibrace

Uvedený pracovní postup zahrnuje oblast měření etalonů indukčnosti pro dvousvorkové připojení a s přístrojovými svorkami od 1 μH do 10 H na frekvenci 1 kHz (udává se pro sériové náhradní zapojení). Je vhodný také pro oblast měření etalonů indukčnosti, provedených koaxiálními svorkami (BNC) od 10 H do 20 kH na frekvenci 1 kHz (udává se pro paralelní náhradní zapojení).

Zásady a postupy uvedené v této metodice je možné použít pro oblast měření etalonů indukčnosti s přístrojovými svorkami od 1 μH do 10 H na frekvenci od 20 Hz do 10 kHz (udává se pro sériové náhradní zapojení).

2 Související normy a metrologické předpisy

Agilent- Keysifht	Impedance Measurement Handbook A guide to measurement technology and techniques 4th Edition	[1]
Quad Tech	LCR measurement primer,	[2]
NPL	A Guide to measuring resistance and impedance below 1 MHz,	[3]
Centro Español de Metrología, Tres Cantos,	PROCEDIMIENTO EL-013 PARA LA CALIBRACIÓN DE INDUCTANCIAS PATRÓN, Madrid Španělsko	[4]
MSL Technical Guide 27	Impedance (RLC) Standards, Measurement Standards Laboratory of New Zealand	[5]
KP 4.1.2/18/16	Etalony kapacity	[6]
KP 4.1.2/16/16	Etalony odporu pro střídavý proud AC R	[7]

3 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci etalonů indukčnosti je dána příslušným předpisem organizace. Tito pracovníci se seznámí s kalibračním postupem upraveným na konkrétní podmínky kalibrační laboratoře nebo obdobného pracoviště provádějícího kontroly měřidel a souvisejícími předpisy. Proces udržování a rozvoje kvalifikace má být soustavný a dokumentovaný, jak to předepisuje ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 bod 5.2.2 i revize CD2 ISO/IEC 17025.

Doporučuje se potvrzení odborné způsobilosti těchto pracovníků prokázat vhodným způsobem, například osvědčením o odborné způsobilosti, osobním certifikátem apod.

4 Názvosloví, definice

Používané názvosloví musí být používáno podle VIM 3 a slovníku IEV, speciální pojmy pro názvosloví pro měřiče indukčnosti jsou uvedeny v příloze 1.

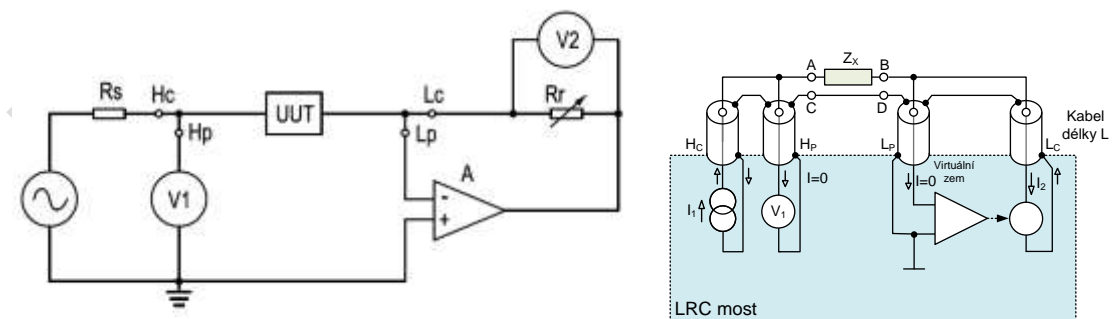
Názvosloví pro měřiče

Klasický impedanční most - přístroj mostového typu obsahující nejméně čtyři ramena tvořená impedančními prvky, ve kterém měříme impedanci vyvážením mostu pro měřenou reálnou a imaginární složku měřené impedance.

Transformátorový most - mostové zapojení, ve kterém poměrová ramena jsou nahrazena měřicími transformátorovými děliči.

Autobalanční most - elektronický měřicí přístroj pro měření impedancí, kde neznámá impedance je zapojena mezi zdroj měřicího signálu a virtuální zem. Ta je na nízkých kmitočtech tvořena převodníkem proudu na napětí s inventujícím operačním zesilovačem. Na inventujícím vstupu tohoto zesilovače je virtuální zem, přepínáním odporu ve zpětné vazbě se mění rozsahy přístroje. Přístroj měří reálnou a imaginární složku impedance a podle nastavené funkce měření z nich počítá požadovaný parametr (R, L, C, G, Q, D, \dots) pro sériové nebo paralelní náhradní zapojení. Měřená impedance se obvykle připojuje čtyřsvorkově nebo čtyřpárově.

Prakticky všechny průmyslově vyráběné měřiče impedancí jsou řešeny na tomto principu.



Obrázek č. 1: Základní princip činnosti autobalančního mostu

Názvosloví pro připojení měřeného prvku

Dvousvorkové připojení - měřený prvek je připojen pouze svými dvěma svorkami. Pokud obsahuje i stínění, pak je připojeno k jedné ze svorek, zpravidla k té, která je připojena ke zdroji měřicího signálu. Dvousvorkově se nejčastěji připojují etalony indukčnosti. Měřený prvek musí být co nejdále od zdrojů rušení a ovlivňujících veličin (kovových předmětů u měřených indukčností). Toto zapojení je ze všech způsobů připojení nejvíce ovlivňováno okolím a nejméně vhodné pro přesné měření. Není zde potlačen vliv přívodů. Používají se

například u kapesních multimetrů při měření R . Při střídavém měření se nejčastěji používají zkroucené vodiče, aby byl omezen vliv rušení.

Další možnosti připojení se u měření indukčnosti převážně nepoužívají.

Trojsvorkové připojení - měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu, který je připojen na třetí svorku. Používá se nejčastěji u etalonu kapacity malých a středních hodnot. Je vhodné pro měření středních a velkých hodnot impedance. Nejčastěji se při střídavém měření používají k připojení koaxiální kabely s přechody na dva vývody.

Pro AC R s hodnotou pod $10\text{k}\Omega$ není doporučeno.

Čtyřsvorkové připojení - na prvek jsou připojeny měřící proudové a napěťové přívody. Smyslem čtyřsvorkového připojení je odstranit vliv přechodového odporu a odporu připojovacích kabelů. Je vhodné pro měření malých a středních hodnot impedance. Nejčastěji se při střídavém měření starých klasických typů etalonů R při měření na 50 Hz používají zkroucené nebo stíněné vodiče.

Pětisvorkové připojení - obdobně jako u čtyřsvorkového připojení jsou na měřený prvek připojeny napěťové a proudové přívody. Měřený prvek je ale navíc opatřen stíněním vyvedeným na pátou svorku. Toto připojení má lepší vlastnosti než čtyřsvorkové zapojení, protože měřený prvek je stíněný. Nejčastěji se při střídavém měření používají čtyři koaxiální kabely nebo stíněné vodiče, při čemž alespoň jeden vodič je spojen se stíněním měřeného objektu.

Dvoupárové připojení - používaná zkratka 2TP

připojení se dvěma koaxiálními kabely, časté v odporové termometrii nebo pro oblast revizních přístrojů.

Čtyřpárové připojení - používaná zkratka 4TP (Terminal Pair). Nejdůležitější a nejčastěji používané připojení pro měření impedance k autobalančním mostům. Je vhodné pro nejširší rozsah měření impedancí ze všech uvedených zapojení. Měřený prvek je umístěn ve stínícím krytu a vyveden čtyřsvorkově na čtyři koaxiální kabely. Vnější vodiče koaxiálních kabelů musí být propojeny i na straně měřené impedance.

Měřicí svorky autobalančního mostu

Hi Drive - ($H_i I$) svorka, na kterou je připojen zdroj měřícího signálu. U důsledně čtyřpárových mostů je vyvedena na koaxiální konektor (BNC). Vnitřním vodičem je napájen měřený objekt, vnějším vodičem se měřený proud vrací. Na této svorce měříme signál, napájející měřený objekt.

Lo Drive - ($L_o I$) svorka vytvářející virtuální zem, do které vtéká měřený proud určený připojenou impedancí. Proud se vrací vnějším vodičem a stínícím krytem připojené impedance ke svorce Hi Drive.

Hi Sense - ($H_i V$) - svorka pro měření napětí na napájecí straně měřeného objektu.

Lo Sense - ($L_o V$) napěťová svorka, kterou se kontroluje napětí na straně virtuální země. Potlačuje vliv odporu přívodu a nedokonalosti virtuální země.

Příklad LCR metrů se čtyřpárovým připojením svorek

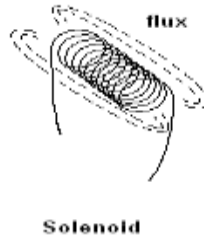
- HP / Agilent 4263B, 4268A, 4275A, 4274A, 4284A, 4276A, 4277A, E4980A,
- WAYNE-KERR 3255B, 6425, 6430, 6440, 6450.

Etalony indukčnosti

Etalon s otevřeným polem

je tvořen válcovou cívkou na neferromagnetickém jádře, (obvykle porcelán).

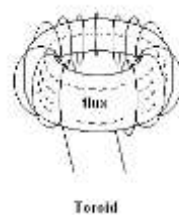
Magnetické pole zasahuje vně cívky etalonu.



Obrázek č. 2: Cívka s otevřeným polem

Toroidní etalon

Skládá se z toroidu navinutého rovnoměrně na keramickém, nebo jiném isolačním a nemagnetickém jádře, které mají vnější magnetické pole prakticky zanedbatelné, takže interference s vnějšími magnetickými poli je zanedbatelná. S cílem zajistit stabilitu a omezit závislost na vlhkosti je cívka impregnována voskem nebo obklopena směsí korku a silikagelu, a nakonec se zapouzdří do kovového pouzdra z hliníku, který má naplněný pojivový materiál udržet suchý a brání vlivům na cívku. Toroidní etalon obvykle mívá menší Q, než etalon s otevřeným polem.



Obrázek č. 3: Toroidní cívka

Toroidní etalon v kovovém pouzdře lze měřit na dvou nebo třech svorkách, i když obecně se používá jen indukčnost udaná pro dvousvorkové zapojení, kdy je svorka "GND" vždy připojen k "LOW" svorce přes zkratovací pásek dodaný výrobcem s každým etalonem indukčnosti.

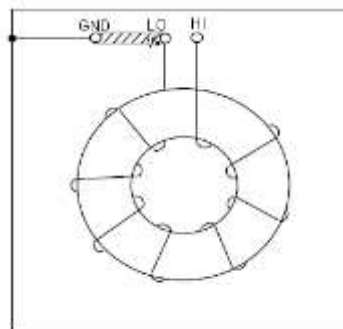


Figura 2: Inductancia patrón

Obrázek č. 4: Svorky toroidního etalonu indukčnosti

Toroidní etalony malých hodnot indukčnosti

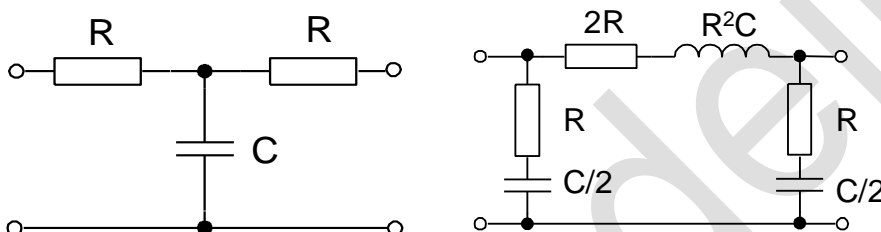
Pro hodnoty indukčnosti pod 1 mH bývají etalony opatřeny další sadou svorek se zkratovacím páskem, hodnota indukčnosti je rozdíl mezi hodnotami zkratovacího pásku v obou polohách.



Obrázek č. 5: Svorky toroidního etalonu malých indukčnosti

Simulovaný etalon

Etalon je tvořen elektrickým obvodem, který se při měření chová jako indukčnost. Je mnoho možností simulace indukčnosti, například gyrátory, ale nejčastěji se používá k simulaci pasivní T článek s podélnými odpory a příčnou kapacitou.



Obrázek č. 6: Simulovaný etalon indukčnosti

Etalon indukčnosti vestavěný v kalibrátoru

Etalon může být vestavěn v kalibrátoru. Například kalibrátor impedance Meatest M 550 je přístroj určený ke kalibraci a nastavování měřičů RLC a obsahuje simulované etalony L s hodnotami 10 μ H až 10 H. Jinou možností je vestavět cívku etalonu do kalibrátoru, například Transmille 3010A má vestavěnou sadu L 1 mH až 10 H, případně ještě 19 mH a 29mH. V tomto případě není vyvedeno stínění za. Proto jsou etalony použitelné většinou jen pro měřiče napájené z baterií (u napájení ze sítě se často projeví rušení).

Vedlejší složka měřené impedance

Žádná skutečná elektrická součástka nemá charakter jen odporu, kapacity nebo indukčnosti, vždy má parazitní vlastnosti. Mimo hlavní měřenou složku má etalon indukčnosti i nezanedbatelnou vedlejší složku vlivem odporu vinutí. Etalony tvořené cívkami z měděného drátu mají teplotní závislost vedlejší složky, v tomto případě odporu danou vlastnostmi drátu, ze kterého jsou navinuty, to znamená pro měď +0,4 %/°C.

Činitel jakosti "Q"

Vztah mezi induktivní reaktancí indukčnosti a odporem. Z naměřených hodnot odporu a indukčnosti se faktorem kvality Q vypočte ze vztahu:

$$Q = \omega L / R_s = 2 \pi f L / R_s$$

kde:

L : naměřená hodnota indukčnosti na kmitočtu f ,

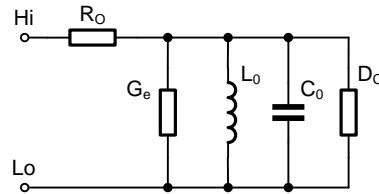
R_s : hodnota odporu pro sériové náhradní zapojení,

f : frekvence, při které L a R naměřeno.

Nf etalony indukčnosti mají často malé Q , obvykle menší než jedna.

Náhradní zapojení etalonu indukčnosti

Obvykle měříme etalony indukčnosti od 1 μH do 10 H pro sériové náhradní zapojení (L_s a R_s v sérii) a pro L nad 10 H pro paralelní náhradní zapojení (L_p paralelně s R_p).



Obrázek č. 7: Náhradní schéma (Ekvivalentní obvod etalonu indukčnosti)

Kde:

R_o : odpor vinutí cívky.

G_e : parazitní vodivost.

L_o : indukčnost etalonu.

C_o : rozložená kapacita vinutí.

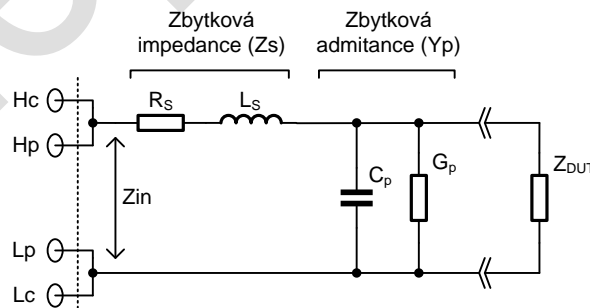
D_o : ztrátový činitel rozložené kapacity vinutí.

Etalony L_{as} mají obvykle tři svorky, z nichž dvě připojené přímo na koncích vnitřní cívky a označené "HI" a "LOW" a třetí je vývod pláště stínění a označený je "GND".

Kompenzace open a short pro střídavá měření impedancí

Kompenzaci *open* je především důležité provést při měření velké hodnoty impedance, kdy se projeví nejčastěji vliv kapacity mezi přívody. V tomto případě je důležité zachovat vzdálenosti mezi přívody měřeného prvku při měření stejné jako při provedení kompenzace *open*.

Měření malých impedancí je závislé na správné a stabilní kompenzaci *short*. Její správné provedení záleží mimo jiné také na frekvenci měření. Zkrat je nutné definovat v rovině měření, to je buď na svorkách přístroje, nebo na konci přívodů k měřenému prvku. Je také nutné zachovat způsob provedení připojení měřené součástky.



Obrázek č. 8: Open a short kompenzace. $Z_{dut} = 0$ (short), $Z_{dut} \rightarrow \infty$ (open), náhradní schéma

Dvousvorkový zkrat: Dvousvorkový zkrat je spojení dvou svorek s nulovým odporem. Pokud jsou svorky v určité vzdálenosti od sebe (a to je vždy), má každý vodič mezi nimi, pokud nepracujeme v supravodivém stavu při velmi nízkých teplotách, vždy nějaký odpor

a ideální dvousvorkový zkrat tedy není realizovatelný. Pro běžné provedení mostů je obvyklá vzdálenost svorek od sebe kolem 22 mm, a pokud je propojíme drátem o průměru nejméně 1 mm má propojka zbytkovou indukčnost cca 20 nH.

Specifické vlastnosti etalonů indukčnosti

Etalony indukčnosti s otevřeným polem

Etalony indukčnosti s otevřeným polem nesmí mít do vzdálenosti cca 60 cm žádný ferromagnetický předmět.

Etalony indukčnosti s otevřeným polem fungují jako rámová anténa a mohou do měřicího mostu indukovat rušení. To prověříme změnou polohy etalonu. Ve správných laboratorních podmínkách by neměl měřený údaj záviset na poloze a orientaci etalonu.

Etalony indukčnosti s otevřeným polem mají vždy v oblasti blízkého pole přívody k měření. Pokud jsou to 4 koaxiální kabely s přechody, je v okolí etalonu příliš mnoho odlišného od volného prostoru. Proto se někdy měřicí přívody převedou na dva zkroucené izolované dráty. Obvykle není přínos tohoto provedení podstatný.

Svorky etalonů

Převážná část etalonů má obyčejné přístrojové svorky pro banánky 4 mm. Pro měření indukčnosti od 1H na 1 kHz výše je nutné dbát, aby přívodní kabely nezvyšovaly kapacitu mezi přívody. Pokud provedeme nulování s přívody zasunutými do sousedních zdírek (stejných jako při měření) a tyto zdírky spojíme zkratem, pak je potřeba respektovat, že zkrat má také indukčnost mezi 10nH až 20 nH, při čemž nižší hodnota odpovídá kvalitnějšímu zkratu (silnějším drátem nebo tlustším plíškem).

5 Prostředky potřebné pro kalibraci

Pro kalibrace popsané v tomto postupu, je nutné mít k dispozici:

Impedanční most s rozlišením nejméně 5 digit při měření indukčnosti s kalibrační nejistotou, ne více než třetina specifikace indukčnosti, která má být kalibrována. Tento můstek musí být schopen měřit indukčnosti v kmitočtovém rozsahu kalibrace. Je žádoucí, aby můstek mohl měřit indukčnost s nejistotou měření zhruba 0,02 % z čtení na referenční frekvenci 1 kHz. Pokud bude měření provedeno porovnáním s etalony L , musí být tyto etalony k dispozici ve stejných jmenovitých hodnotách nebo se použijí korekční data pole kalibrace etalonového můstku.

4 kusy připojovací kabely s kvalitními konektory BNC-BNC, délka 1m, tato sada kabelů je obvykle příslušenství impedančních mostů.



Obrázek č. 9: T kus BNC v provedení Y (podle GES.cz)

2 kusy T článek BNC, přednostně typu Y (například GES BNC T Y).



Obrázek č. 10: Přechod BNC-banánek

2 kusy přechod BNC/ banánek.

Přechod od banánku na vidličku, která umožní připojení pod šroubovací svorky u etalonu Zkratovací plech cca šířky 10 mm, a délky mezi svorky etalonu.

DMM, nejméně 6,5 digit pro měření DC R.

Zapisovače teploty a relativní vlhkosti.

Poznámka: Všechna použitá měřidla a pomocná měřicí zařízení musí být navázána na etalon vhodného rozsahu a přesnosti a musí mít platnou kalibraci.

Zvláště je potřeba sledovat vliv vlhkosti u etalonů, vinutých drátem opředeným textilní nití.



Obrázek č. 11: Přechod od banánku na vidličku, která umožní připojení pod šroubovací svorky u etalonu *L*

6 Obecné podmínky kalibrace

Měření probíhá v laboratoři, obvykle klimatizované teplota i vlhkost je, pokud je to možné, udržována automaticky na hodnotách:

Teplota $t = (23 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$,

Relativní vlhkost $RH = (50 \pm 20) \%$.

Referenční i kalibrovaný etalon se zpravidla umísťuje na vzduchu.

Podmínky jsou monitorovány a zaznamenávány.

Pro přesné stanovení teploty etalonu mezi jednotlivými rekalibracemi je možné použít měření DC R etalonu pomocí DMM s nastavenou velikostí proudu, která nezvýší nezanedbatelně tepotu etalonu nebo teploměr umístěný na krytu u toroidních etalonů.

Vlhkost může ovlivnit parametry etalonu, takže pro přesná měření se doporučuje etalon uložit před měřením nejméně 1 týden do prostředí se stálou a monitorovanou vlhkostí $RH = (50 \pm 20) \%$. Pokud to není možné, je vhodné měřit pokud možno v období, kdy se vlhkost mění méně a nemá extrémní hodnoty (malé v zimním období a velké v létě, takže se v laboratořích bez regulace vlhkosti vyskytují optimální podmínky vlhkosti na jaře a na podzim). Pokud má laboratoř stabilizaci vlhkosti na $RH = (50 \pm 20) \%$, je možné měřit kdykoliv po ustálení měřené indukčnosti v prostředí kontrolované vlhkosti nejméně 1 týden. (Pronikání vlhkosti do etalonu je pomalé, většina etalonů je impregnována).

7 Rozsah kalibrace

Princip kalibrace

K stanovení hodnoty neznámé indukčnosti (dále jen indukčnosti) se v laboratoři používá:

- **Substituční metoda**, kdy referenční etalon (L_E) se známou hodnotou indukčnosti je změřen RLC mostem a stejné měření je provedeno i s kalibrovaným etalonem (L_X) při požadovaném kmitočtu a velikosti měřicího napětí. Hodnota kalibrovaného etalonu se určí ze známé hodnoty referenčního etalonu a poměru změřených indukčností na referenční a kalibrované indukčnosti. Metoda je vhodná pro nejpřesnější měření.
- **Metoda přímého odečtu indukčnosti** kalibrovaného etalonu na vhodném RLC mostu.

Rozsah kalibrace zahrnuje přímé měření na RLC mostu nebo porovnání s referenčním etalonem indukčnosti pro etalony, jejichž hodnoty indukčnosti se neliší o více než 5%). Kalibrovaná indukčnost (L_X), ve vzoru indukčnost se měří jako podle vztahu:

$$L_X = L_M - L_0.$$

Hodnotu L_0 můžeme odečíst podle měření se zkratem na svorkách měřené L po vynulování mostu v poloze pro měření L_0 .

Protože indukčnost se obvykle mění s frekvencí a může se měnit ohřevem vlivem měřicího proudu, je třeba i měření proudu, kalibrace vyžaduje zadání frekvence a proudu, při které se měřilo.

8 Kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

8.1 Přezkoumání smlouvy

Zakázka na kalibraci se při přebírání přezkoumává podle ČSN EN ISO/IEC 17025, odst. 4.4 nebo po revizi normy v WD2 ISO/IEC 17025 kapitola 7.

Přezkoumání má potvrdit, že laboratoř má nezbytné fyzické, lidské a informační zdroje, a že pracovníci laboratoře mají dovednosti a odborné znalosti potřebné k provádění příslušných kalibrací. Laboratoř musí vytvořit a udržovat postupy pro přezkoumávání požávek, nabídek a smluv. Jakékoli rozdíly mezi požávkou nebo nabídkou a smlouvou musí být dořešeny před zahájením prací. Každá smlouva musí být přijatelná jak pro laboratoř, tak pro zákazníka. Kontroluje se mechanická nepoškozenost připojovacích konektorů a jejich čistota (v případě potřeby se vyčistí).

Při přebírání etalonu ke kalibraci je třeba, aby odpovědný pracovník kalibrační laboratoře posoudil, zda typ, výrobní číslo a příslušenství dodaného etalonu odpovídá údajům uvedeným na objednávce nebo dodacím listu. Současně se provede přezkoumání smlouvy z pohledu požadavků zákazníka a možností laboratoře.

Současně se provede předběžná kontrola, spočívající ve vnější prohlídce etalonu.

Podle WD2 ISO/IEC 17025 kapitola 7a body:

7.1.1.1 Laboratoř musí vytvořit a udržovat postupy pro přezkoumání žádostí, výběrových řízení a smluv. Zásady a postupy pro tyto názory vedoucích ke smlouvě pro testování a/nebo kalibrace zajistí, aby:

- a) požadavky jsou odpovídajícím způsobem definovány, zdokumentovány a pochopeny (viz 7.2.2.2),
- b) laboratoř má schopnosti a zdroje, aby splňovaly požadavky,
- c) příslušná kalibrační procedura je vybrána a je schopna vyhovět požadavkům zákazníků (viz 7.2.2.2). Jakékoli rozdíly mezi žádostí nebo nabídky a smlouvy musí být vyřešeny před započítím práce. Každá smlouva musí být přijatelné jak pro laboratoř i pro zákazníka.

Odchytky přání zákazníka nesmí ohrozit laboratorní integritu.

Poznámka: Pro interní zákazníky, hodnocení žádostí, výběrových řízení a smluv mohou být provedeny zjednodušeným způsobem.

7.1.1.2 Záznamy o hodnocení, včetně jakýchkoli významných změn, musí být udržovány. Záznamy musí být zachovány i z případných jednání se zákazníkem týkajících se požadavků zákazníka nebo výsledků práce během období plnění smlouvy.

Poznámka: Pro posouzení rutinních a jiných jednoduchých úkolů, datum a identifikace (např. iniciály) osoby odpovědné v laboratoři za provedení sjednané práce jsou považovány za dostatečné. V případě opakovaných rutinních úkolů, přezkoumání nemusí být provedeno pouze v počáteční fázi šetření nebo o udělení zakázky na pokračující rutinní práci vykonanou v rámci obecné dohody se zákazníkem za předpokladu, že požadavky zákazníka zůstávají nezměněny. Pro nové, složité nebo pokročilou kalibrační činnost, by měl být zachován obsáhlejší záznam.

7.1.1.3 Do přezkoumání bude nutné rovněž zahrnovat všechny práce zadané subdodavatelům laboratoře.

7.1.1.4 Zákazník musí být informován o každé odchylce od smlouvy.

7.1.1.5 Pokud je potřeba informovat zákazníka o změně smlouvy, která má být změněna poté, co zahájila činnost, musí být stejný proces přezkoumání smlouvy opakovat, a případné změny se sdělují všem zainteresovaným pracovníkům.

8.2 Kontrola dodávky

Při převzetí etalonů ke kalibraci od uživatele je třeba provést vnější prohlídku (úplnost štítkových údajů jmenovitá hodnota, mechanická pevnost svorek, poškození, nečistota atd.).

U etalonů s otevřeným polem je obvykle povrch vinutí méně chráněný a nesmí být poškozený ani žádný závit cívky etalonu uvolněný. Etalon, u kterého se zjistí závada vylučující kalibraci, se nepřijme na kalibraci. Postup kontroly zahrnuje:

- a) Zkontrolujte, že kalibrovaná indukčnost je identifikována značkou, číslem modelu a příslušné série, nebo na základě jedinečného interního kódu vlastníka indukčnosti. Kdyby to nebylo, tak bude přidělen identifikační kód kalibrační laboratoři, obvykle identifikovaný štítkem bezpečně přilepeným na kalibrovanou indukčnost,
- b) návod k obsluze ke kalibrované indukčnosti tak, aby osoba provádějící kalibraci se

mohla seznámit s jeho vlastnostmi a mohla být prozkoumána možnost splnění požadavků při kalibraci,

c) indukčnosti, na které se používá tento kalibrační postup, se nejustují,

d) stav a pevnost přípojovacích svorek musí být kontrolovány, v případě potřeby se provádí jejich čištění. Zkontrolujte, že je umístěn zkrat mezi svorkami "LOW" a "GND" na kalibrovaném toroidním etalonu a že zkratovací plíšek ani odpovídající kontaktní plochy svorek nejsou zkorodovány.

Indukčnost, která nevyhověla při vnější prohlídce a konstrukčnímu provedení dle výrobce, se vyřadí z dalších zkoušek,

e) referenční i kalibrované etalony a kalibrované pro kalibraci a indukčnosti, musí zůstat v kalibrační místnosti nejméně čtyři hodiny před začátkem kalibrace,

f) napájení indukčního mostu a multimetru při kalibraci se před spuštěním provede pro tepelnou stabilizaci. Doba tepelná časová stabilizace závisí na typu přístroje, obvykle vyhoví nejméně 1 hodina,

g) kalibrace se provádí tím, že se udržuje normální okolní teplotu mezi 22°C a 24°C, včetně vlivu nejistoty měření teploty etalonu a v indukčních mostech a multimetrech pro udržení jejich optimální specifikace. Pokud není známa teplotní závislost L kalibrovaného etalonu, použijeme koeficient $3 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Pokud je známa, použijeme známou hodnotu při výpočtu nejistoty. Je možné provádět kalibraci v jiných, než při výše uvedených teplotách, ale v tomto případě bude třeba vzít v úvahu při přidělování kalibračních nejistot,

h) relativní vlhkost nesmí přesáhnout 70 %, i když v některých výjimečných případech může povolit hodnoty až 80 %, pokud zákazník souhlasí (viz specifikace kalibrované indukčnosti, mostu a multimetru). Kalibrovaný toroidní etalon by měl být hermeticky uzavřen, aby nebyl ovlivněn vlhkostí,

i) zkontrolujte, zda je most pro měření indukčnosti a multimetr jsou připojeny ke stejné síťové zásuvce (stejně fázi), která obsahuje ochranný vodič nebo země, jako základní míru ochrany. Síťové kabely musí být nepoškozené a procházet pravidelnými revizemi.

9 Postup kalibrace

Postup kalibračního procesu, je stanoven pro měření bez možnosti justace a zahrnuje pouze přímé kalibrační korekce vyplývající z nominální hodnoty, spojené s nejistotou výpočtu kalibračních bodů.

Kalibrované etalony indukčností se používají v laboratořích, které mají být kalibrovány v tomto procesu a jsou kalibrovány ve frekvenčním bodu, obvykle 1 kHz a pro nastavení používané pro měření indukčnosti je $L_{\text{seriové}}$ dvousvorkově, při čemž u toroidních etalonů svorka " Low "etalonu indukčnosti musí být připojena ke svorce" GND ", krátkou spojkou, která je obvykle součástí etalonu indukčnosti.

Obvykle se nastavuje most na $L_{\text{seriové}}$, na frekvenci 1 kHz, signál zdroje 1V a na pomalý režim a průměrování z nejméně 10 měření, pokud to použitý most umožňuje.

Je možné provádět měření v jiných kmitočtových bodech, například 100 Hz, způsob měření je přesně stejný, jak je zde popsáno, ale musí nejprve nastavit měřicí most na požadovanou frekvenci měření, se všemi kroky, včetně nastavení short a open a tato úprava musí být v rozsahu použitelnosti měřiče, viz technické podklady výrobce.

9.1 DC R

Měření DC R je náhrada za měření ACR, pro snazší dostupnost a dosažitelnou vyšší přesnost.

Vždy uvedeme do kalibračního listu rozsah DMM, na kterém bylo DC R měřeno. Hodnoty DC R můžeme využívat i k upřesnění teploty etalonu v době měření, zvláště při sledování

trendů driftu kalibrovaného etalonu.

Při měření DC R můžeme použít normální proud měření, který umožňuje použitý DMM. Vliv ohřevu vzhledem k maximálnímu výkonu, který umožňuje kalibrovaná indukčnost, (200 mW) je malý, rozptýlený výkon při měření není větší než 1/10 z povoleného maximálního výkonu. Vzhledem k tomu, že koeficient závislosti hodnoty indukčnosti na příkonu je obvykle velmi malý, je i příspěvek k nejistotě malý. Měření odporu multimetrem se provede čtyřsvorkově a v případě, že DMM umožňuje vybrat si mezi dvěma intenzitami proudu pro měření odporu, normální a nízké, vyberte normální, protože v každém případě je ztrátový výkon mnohem menší než povolený.

Nominální hodnota etalonu L	Doporučený rozsah DMM pro měření DC R
10H	10 kΩ
1H	1kΩ
0,1H	100Ω
10mH	10Ω
1 mH	1Ω
0,1 mH	1Ω

9.2 Připojení etalonů

Spojení mezi svorkami měřicího mostu a měřené indukčnosti musí být provedeno stíněnými koaxiálními kabely. Obvykle mosty k měření indukčnosti mají své vlastní měřicí kabely, které se připojují přímo k indukčnosti.

- Kabely připojené ke svorkám P_H a I_H jsou na konci spojeny T článkem BNC (typ Y),
- kabely připojené ke svorkám P_L a I_L jsou na konci spojeny T článkem BNC (typ Y),
- na T články na konci kabelů je připojen adaptor BNC- banánky,
- banánek vnitřního vodiče (červený) je měřicí svorka zapojení,
- banánky vnějšího vodiče (černý) musí být u mostů specifikovaných propojeny jako čtyřpárové,
- připojení ke čtyřsvorkovému nebo čtyřpárovému mostu je takové, že 4 svorkové připojení koaxiálními kabely je pomocí 2 kusu T kusu převedeno na 2 svorkové,
- korekce Open a Short se provádí v místě připojení na svorkách etalonu.

9.3 Nejčastěji se používá RLC most a kroky měření, jsou:

- a) zapněte přístroje a počkejte po dobu stanovenou v technické dokumentaci pro stabilizaci teploty,
- b) nastavit měření $L_{seriové}$ měřit frekvenci 1 kHz. Režim slow, průměrování nejméně z 10 měření (pokud to most umožňuje),
- c) provést korekce pro open (otevřený okruh) kabely jsou v poloze jako při měření, ale měřený etalon není připojen,
- d) provést korekce pro short (krátké spojení),
- e) provést měření L_o , kabely jsou v poloze jako při měření, měřený etalon je připojen a na svorkách tohoto etalonu je proveden zkrat,
- f) zkratovací spojka má obvyklé rozměry etalonů indukčnosti. Indukčnost zkratovací svorky je podle provedení 10 nH až 30 nH (v případě potřeby je možné vypočítat podle podkladů v příloze) a je možné ji při malých hodnotách měřené indukčnosti započítat jako korekci.

Poznámka: Je velmi důležité, že relativní poloha měřicích kabelů, se nemění v průběhu procesu měření,

- g) měřená indukčnost pro toroidní etalony musí být oddělena od kovových předmětů alespoň 40 cm. Etalon s otevřeným polem při měření umístíme nejméně 60 cm od vodivých předmětů nejjednodušeji položením na papírovou krabici. (Pozor i na kovové

konstrukce pracovních stolů),

h) všechny údaje měření se vztahují k referenční rovině. Ta je na koncích připojovacích kabelů, případně na svorkách měřicích adaptérů. Kalibrovaná indukčnost (L_X), se měří jako rozdíl indukčnosti, která se vyskytuje na konci měřicích kabelů pro měřicí můstek (L_M) a při zkratu na svorkách indukčnost (L_0), která se měří tak, že:

$$L_X = L_M - L_0.$$

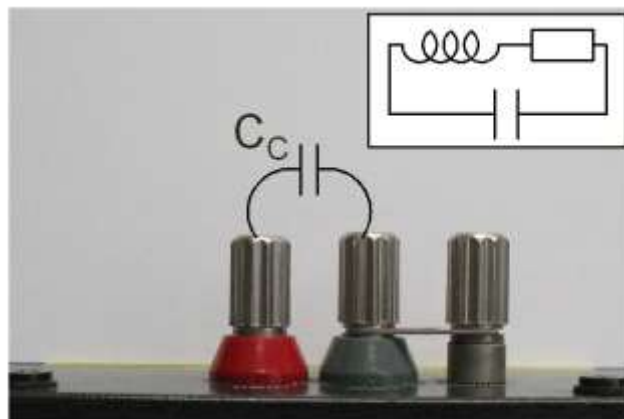
Protože indukčnost se obvykle mění s frekvencí a může se měnit ohřevem vlivem měřicího proudu, kalibrace vyžaduje zadání frekvence a proudu, při které se měřilo i uvedení tohoto nastavení do kalibračního listu.

Etalony indukčnosti hrají při kalibraci RLC mostů obvykle menší úlohu a často mohou být nahrazeny simulovanými induktory. Obvykle se při kalibraci univerzálních RLC mostů používá pouze jedna hodnota indukčnosti pro ověření funkčnosti indukční funkce mostu. Kalibrace v celém rozsahu vychází z kalibračních etalonů kapacity nebo odporu. Měří se obvykle tam, kde dosahují etalony optimálních vlastností 1 H až 10 H na 100 Hz, nižší hodnoty od 1 mH do 1 H na 1 kHz, hodnoty pod 1 mH na pracovní frekvenci, která bývá od 10 kHz výše.

Etalony indukčnosti v toroidním provedení mají obvykle výraznou frekvenční závislost a nejsou vhodné pro práce v širším frekvenčním rozsahu.

Etalony s otevřeným polem válcové konstrukce mají lépe sledovatelnou frekvenční závislost, mohou se používat v rozsahu nejméně jedné dekády frekvence.

9.4 Vliv kapacity mezi přívody

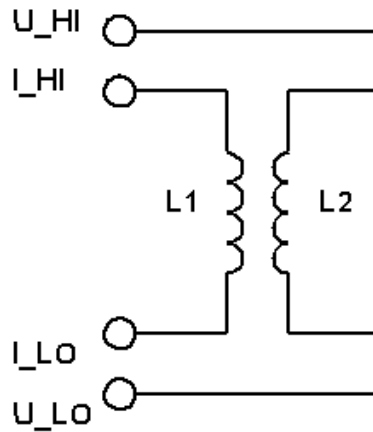


Obrázek č. 12: Vliv parazitní kapacity

Při kalibraci etalonů indukčnosti nad 1 H je třeba věnovat velkou pozornost kapacitě mezi přívody, protože například kapacita 1 pF změní hodnotu etalonu 10 H na frekvenci 1 kHz o 40 ppm.

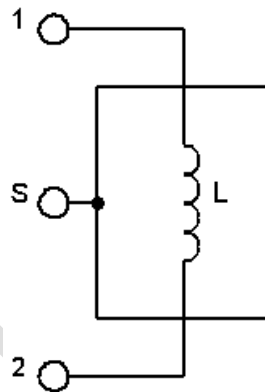
9.5 Etalony a měření vzájemné indukčnosti

Pro měření vzájemné indukčnosti pomocí autobalančních RLC metrů je možno použít zapojení podle obr. č. 13.



Obrázek č. 13: Etalon vzájemné indukčnosti se skládá z 2 cívek na jednom jádře

Jednou cívkou je pouštěn proud z RLCG měřiče a je vyhodnocováno napětí indukované do druhé z cívek. Druhá možnost je použít dvě měření s oběma vinutími v sérii a s obráceným pořadím sekundárního vinutí



Obrázek č. 14: Toroidní etalony se vyrábí se stíněním a podle zapojení stínění je možné je měřit jako dvou nebo tří svorkové



Obrázek č. 15: Ukázka provedení etalonů

9.5 Opakování měření.

Obvyklé je jen jedna sada měření, ale doporučuje se provést několik sad měření, kdy každá sada měření sestává nejméně z 10 měření.

Pro každou sadu měření zaznamenáváme výsledky měření indukčnosti a podmínky prostředí, v nichž byla provedena měření. Mezi každým měřením musí být minimálně dvě hodiny s maximálně pěti sadami měření za den. Vzhledem k tomu, že hmotnosti etalonů indukčnosti jsou relativně velké, změna teploty v něm je pomalá, takže se doporučuje minimální čas mezi měřeními. Měření se má opakovat nejméně 2 dny.

Pokud aplikujeme kritéria přijetí/zamítnutí Chauvenet, pak podle tohoto kritéria může jen jedno měření být odmítnuto. Pokud by se mělo odmítnout více než jedno, je třeba opakovat celou sadu měření (toto je nad rozsah požadavků EA4/02).

V případě, že měřicí můstek umožňuje automatizaci měření, například počítačem a komunikace " IEEE bus", pak se musí ověřit software používaný pro kalibraci a datové soubory, které umožňují automatické kalibrace provádět.

K validaci softwaru se mohou provádět jednou výpočty ručně, na základě stejných dat, který používá software, a pro kontrolu, že výsledky jsou stejné jako výsledky získané pomocí programu.

Výpočty získané oběma metodami, stejně jako záznamy získané zadáním pro všechny podmínky měření musí být uvedeny frekvence měření a intenzita proudu a podmínky prostředí, atd.

Výpočet střední hodnoty naměřených hodnot pro R_X a L_X se vztahují na průměr teplot v průběhu měření.

10 Vyhodnocení kalibrace

Kalibrační list se musí vztahovat pouze k veličinám a výsledkům kalibrací. Jestliže bylo vypracováno vyjádření o souladu se specifikací, musí být identifikováno, které články specifikace jsou splněny a které nejsou splněny, podle ILAC-G08:03/2009 Pokyny k uvádění shody se specifikací (Guidelines on the Reporting of Compliance with Specification, 2009).

Pokud je vypracováno vyjádření o shodě se specifikací, přičemž jsou vynechány výsledky měření a s nimi spojené nejistoty, musí laboratoř tyto výsledky zaznamenat a udržovat jejich záznamy pro další možnou potřebu.

Pokud jsou vypracována vyjádření o shodě, musí být vzata v úvahu nejistota měření. Tato metodika neuvažuje možnost justování. Jestliže se přesto etalon, který se má kalibrovat, bude justovat nebo opravovat, musí být uvedeny výsledky kalibrace získané před a po justování nebo opravě, pokud jsou k dispozici.

Kalibrační list nesmí obsahovat žádné doporučení týkající se intervalu kalibrace s výjimkou doporučení, které bylo odsouhlaseno zákazníkem.

10.1 Postup vyhodnocení

Kalibrační laboratoř vede záznamy, v nichž kromě jiného uvádí:

- konkrétní udání použitého zdroje specifikace,
- náhradní zapojení, na nichž je kalibrace prováděna,
- frekvence a výstupní napětí nastavené na kalibrovaném etalonu,
- nejistota kalibrace.

10.2 Rozhodnutí o výsledku kalibrace

V organizacích, v nichž vedoucí kalibrační laboratoře vykonává současně funkci metrologa organizace, na základě vyhodnocení zkoušených bodů uvedených v kapitole 7 rozhodne vedoucí kalibrační laboratoře, zda kalibrovaný přístroj vyhovuje nebo nevyhovuje všem požadavkům na něj kladeným. Výsledek rozhodnutí je uveden v kalibračním listu.

10.3 Postup v případě neshody

V případě, že kalibrovaný etalon čerpal na některém měřicím rozsahu více než 70 % specifikace, při interních kalibracích rozhoduje vedoucí kalibrační laboratoře, zda je možná a vhodná justace nebo zda je možné etalon dále provozovat, ale doporučuje se zkrátit dobu do recalibrace. Při kalibraci externímu zákazníkovi má být zákazník informován.

Nejsou-li splněny výše uvedené podmínky nebo nevyhověl-li kalibrovaný etalon jiným požadavkům, předává vedoucí kalibrační laboratoře objednateli kalibrace návrh na opravu nebo na vyřazení etalonu.

Postup uváděný v bodech 10.2 a 10.3 se používá v organizacích, v nichž vedoucí kalibrační laboratoře vykonává současně funkci metrologa organizace. V jiných případech provádí příslušná rozhodnutí zástupce (obvykle metrolog) organizace, která objednala kalibraci etalonu.

11 Kalibrační list

Výsledky měření by měly být uváděny v souladu s normou ČSN EN ISO 17025 a jejího článku 5.10 – Uvádění výsledků.

11.1 Náležitosti kalibračního listu

Kalibrační list by měl obsahovat tyto údaje:

- a) název a adresu kalibrační laboratoře,
- b) pořadové číslo kalibračního listu, očíslování jednotlivých stran, celkový počet stran,
- c) jméno a adresu zadavatele, popř. zákazníka,
- d) název, typ, výrobce a identifikační číslo kalibrovaného etalonu,
- e) datum přijetí etalonu ke kalibraci (nepovinné), datum provedení kalibrace a datum vystavení kalibračního listu,
- f) určení specifikace uplatněné při kalibraci nebo označení kalibračního postupu (v tomto případě KP 4.1.2/17/16),
- g) podmínky, za nichž byla kalibrace provedena (hodnoty ovlivňujících veličin apod.),
- h) měřidla použita při kalibraci,
- i) obecné vyjádření o návaznosti výsledků měření (etalony použité při kalibraci),
- j) výsledky měření a s nimi spjatou rozšířenou nejistotu měření a/nebo prohlášení o shodě s určitou metrologickou specifikací,

- k) jméno pracovníka, který měřidlo kalibroval, jméno a podpis odpovědného (vedoucího) pracovníka, razítko kalibrační laboratoře.

Vyjádření o nejistotě měření, které podle ILAC-P14:01/2013 bod 6.3 může mít tvar:

„Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %.“

Akreditovaná kalibrační laboratoř navíc uvede přidělenou kalibrační značku, číslo laboratoře a odkaz na osvědčení o akreditaci. Součástí kalibračního listu je též prohlášení, že uvedené výsledky se týkají pouze kalibrovaného předmětu a kalibrační list nesmí být bez předběžného písemného souhlasu kalibrační laboratoře publikován jinak než celý.

Pokud provádí kalibrační, resp. metrologická laboratoř kalibraci pro vlastní organizaci, může být kalibrační list zjednodušen, případně vůbec nevystavován (výsledky kalibrace mohou být uvedeny např. v kalibrační kartě měřidla nebo na vhodném nosiči, popř. v elektronické paměti). V tomto případě je vhodné kalibrační laboratoř zpracovala záznam o měření (s uvedenými měřeními hodnotami) a archivovat jej.

11.2 Protokolování

Originál kalibračního listu se předá zadavateli kalibrace. Kopii kalibračního listu si ponechá kalibrační laboratoř a archivuje ji po dobu nejméně pěti let nebo po dobu stanovenou zadavatelem zároveň se záznamem o kalibraci. Doporučuje se archivovat záznamy a kalibrační listy chronologicky. Výsledky kalibrace se mohou v souladu s případnými podnikovými metrologickými dokumenty zanášet do kalibrační karty měřidla nebo ukládat do vhodné elektronické paměti.

11.3 Umístění kalibrační značky

Po provedení kalibrace se přístroj opatří kalibrační značkou – štítkem. Kalibrační štítek je třeba na přístroj umístit viditelně.

Na štítku je **uvedeno číslo kalibračního listu, datum provedené kalibrace podpis pracovníka, který prováděl kalibraci a identifikace kalibrační laboratoře.**

V případě, že je výsledek kalibrace nevyhovující, označí se měřidlo štítkem - **NEVYHOVUJE.**

Pokud to není výslovně uvedeno v některém interním podnikovém metrologickém předpisu pro interní kalibrace nebo ve smlouvě se zákazníkem, nesmí kalibrační laboratoř uvádět na svém kalibračním štítku datum příští kalibrace. Stanovení kalibrační lhůty měřidla je právem a povinností uživatele.

11.4 Převzetí ke kalibraci a předání kalibrovaného etalonu

Převzetí etalonu ke kalibraci stvrzuje pracovník kalibrační laboratoře svým podpisem na kopii objednávky nebo na formuláři k tomu určenému. Po skončení kalibrace etalonu stvrzuje zákazník svým podpisem na příslušném formuláři nebo do knihy zakázek jeho převzetí. V obou případech se k podpisům připojují příslušná data.

11.5 Reklamacce

V případě, že objednatel kalibrace podá stížnost na provedenou kalibraci, tuto přebírá vedoucí kalibrační laboratoře, v době nepřítomnosti jeho zástupce. Stížnost se může týkat rozsahu nebo správnosti provedené kalibrace, úplnosti nebo správnosti předaného kalibračního listu, úplnosti vráceného etalonu, případně výše fakturace za provedenou kalibraci.

Povinností vedoucího kalibrační laboratoře je analyzovat stížnost, na jejím základě učinit

příslušná opatření a s nimi bez prodlení seznámit objednatel kalibrace.
 Nebyly-li při analýze shledány závady, je o tom objednatel kalibrace informován také.
 Pokud je stížnost oprávněná a jedná se o rozsah nebo správnost kalibrace, provede laboratoř novou, bezplatnou kalibraci a vystaví nový kalibrační list. V ostatních případech oprávněné stížnosti se provedou příslušná opatření.

11.6 Neshodné výsledky kalibrace

Pokud laboratoř zjistí, například při rekalibraci etalonu, že prováděla chybné (neshodné) kalibrace, je její povinnost provést nápravná opatření a informovat také zákazníka, pro kterého mohly být neshodné práce provedeny, viz také ČSN EN ISO/IEC 17025 bod 4.9 a 4.11.

12 Péče o kalibrační postup

Originál kalibračního postupu je uložen u jeho zpracovatele, další vyhotovení jsou předána příslušným pracovníkům podle rozdělovníku (viz čl. 13.1 tohoto postupu).
 Změny, popř. revize kalibračního postupu provádí obvykle jeho zpracovatel. Změny schvaluje vedoucí zpracovatele (vedoucí kalibrační laboratoře nebo metrolog organizace).

13 Rozdělovník, úprava a schválení, revize

Uvedený příklad je pouze orientační a subjekt si může tuto dokumentaci upravit podle interních předpisů o řízení dokumentů.

13.1 Rozdělovník

Kalibrační postup		Převzal		
Výtisk číslo	Obdrží útvar	Jméno	Podpis	Datum

13.2 Úprava a schválení

Kalibrační postup	Jméno	Podpis	Datum
Upravil			
Úpravu schválil			

13.3 Revize

Strana	Popis změny	Zpracoval	Schválil	Datum

14 Stanovení nejistoty měření (příklad výpočtu)

14.1 Nejistoty měření obecně

Nejistoty jsou uváděny v souladu s předpisem EA 4/02.

Výsledná nejistota měření popisující výsledek měření se skládá ze dvou složek – nejistoty typu **A** a nejistoty typu **B**.

Nejistota typu A popisuje měření při provádění několika nezávislých odečtů za stejných okolních podmínek. Při měření s dostatečným rozlišením je patrný rozptyl získaných hodnot. Pro stanovení nejistoty typu A nejprve vyčíslíme průměr r z jednotlivých odečtů x_i ($i = 1, \dots, n$):

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i .$$

Dále stanovíme výběrovou standardní odchylku $s(r)$ jako druhou odmocninu z výběrového rozptylu:

$$s(r) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - r)^2} .$$

Standardní nejistota $u(r)$ je pak vypočtena jako druhá odmocnina z výběrového rozptylu aritmetického průměru:

$$u(r) = \sqrt{\frac{s^2(r)}{n}} = \frac{s(r)}{\sqrt{n}} .$$

Po úpravě:

$$u(r) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - r)^2} .$$

Standardní nejistota $u_A = u(r)$ a je tedy vypočtena podle vztahu uvedeného výše.

Nejistota typu B je jako u_B určena na základě:

- údajů z dříve provedených měření,
- zkušeností s vlastnostmi příslušného zařízení,
- údajů výrobce etalonu,
- údajů uváděných v kalibračních listech.
- U etalonů L se uplatní vliv nejistoty stanovení teploty a u nehermetických i vlhkosti.

Výsledná nejistota měření je uváděna jako rozšířená kombinovaná nejistota měření U stanovená vynásobením kombinované nejistoty u koeficientem rozšíření k :

$$U = k \cdot u = k \sqrt{u_A^2 + u_B^2} .$$

Pro případ normálního rozdělení měřené veličiny je použit koeficient rozšíření $k = 2$. Takto stanovená rozšířená nejistota měření odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %.

Pro účely tohoto kalibračního postupu jsou nejistoty měření stanoveny takto:

Nejistota typu A vychází z popisu algoritmu sběru a zpracování jednotlivých odečtů (viz výše).

Základem pro stanovení nejistoty typu B jsou kalibrační listy použitých etalonů obsahující jejich výsledné nejistoty měření, technické specifikace výrobce a dále zkušenosti s vlastnostmi zařízení při měřeních v minulosti. Tyto nejistoty jsou pak po zadání do používaného měřicího systému jeho pevnou součástí a slouží jako výchozí podklady pro stanovení výstupních výsledných nejistot měření daného měřicího systému při kalibracích pro již výše uvedenou hladinu pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %.

9.2 Výpočet nejistoty

Výsledky nejistoty zadání a vyjádření nejistot musí splňovat kritéria EA4/02 .

První výraz výstupní veličiny se stanoví (což je korekce, které se použijí k indukčnosti měření v každém kalibračním bodě), v závislosti na různých velikostech frekvence měření.

Obecně

Při měření L údaj získaný v indukčním mostě, vyžaduje dva kroky, nejprve s testovacím zkratem na konci kabelů a druhý s měřenou indukčností připojenou k elektrodám mostu.

Odchylka ΔL_{IX} hodnoty etalonu od jmenovité hodnoty je:

$$\Delta L_{IX} = (\bar{L}_{IX} + \delta L_{IX\text{res}} + \delta L_{IX\text{cal}} + \delta L_{IX\text{lin}} + \delta L_{IX\text{čas}} + \delta L_{IXT}) - (L_{nom} + \delta L_{IXT\text{ind}} + \delta L_{IXP\text{ind}} + \bar{L}_{IO} + L_{IO\text{res}} + \delta L_{IO\text{cal}} + \delta L_{IO\text{lin}} + \delta L_{IO\text{časr}} + \delta L_{IO\text{T}})$$

Kde:

ΔL_{IX} je korekce hodnoty indukčnosti

\bar{L}_{IX} střední hodnota indukčnosti

Význam označení:

	Měření etalonu
$\delta L_{IX\text{res}}$	korekce vlivem konečného rozlišení mostu při měření \bar{L}_{IX}
$\delta L_{IX\text{cal}}$	korekce indukčnosti vzhledem k nejistotě kalibrace mostu
$\delta L_{IX\text{lin}}$	korekce v důsledku nelinearity mostu. Kalibrační křivka mostu je funkce získaná z kalibračních bodů pro můstek a slouží ke korekci jeho čtení
$\delta L_{IX\text{čas}}$	korekce měření indukčnosti v důsledku driftu mostu v průběhu času. Získává se ze známé historie přístroje, nebo pokud to není možné, jeho specifikace. To závisí na době od posledního kalibračního měření a od měřeného bodu
δL_{IXT}	korekční indukčnost v důsledku vlivu teploty na jmenovitou hodnotu L_{nom} indukčnosti L_{ixT}
L_{nom}	nominální hodnota indukčnosti. Nevytváří další nejistotu.
$\delta L_{IXT\text{ind}}$	korekční hodnota indukčnosti v důsledku vlivu teploty k , které je vystaven, se vypočte ze specifikací indukčnosti a teploty

δL_{IXPind}	korekce hodnoty indukčnosti z důvodu výkonu rozptýleného v etalonu během měření. To se vypočte ze specifikace indukčnosti a pro proud aplikovaný během měření
\bar{L}_{I0}	průměrná hodnota naměřených údajů mostu, kdy se měří indukčnost nakrátko (kabelu, short)
δL_{I0res}	korekce měření indukčnosti v důsledku konečného rozlišení mostu, pokud je indukčnost kabelu měřena zkratován (short)
δL_{I0cal}	korekce měření indukčnosti vodičů podle nejistoty mostu pro malé hodnoty L (nakrátko, short)
δL_{I0lin}	korekce v důsledku nelinearity mostu. Kalibrační křivka mostu je funkce získaná z kalibračních bodů pro můstek a slouží ke korekci jeho čtení. Použije se korekce měření indukčnosti vodičů pro měření nakrátko (short) tak, že se vypočítá podle stejného postupu jako δL_{IXclim} v bodě L_{I0}
$\delta L_{I0časr}$	korekce měření indukčnosti vodičů při zkratu v důsledku časového driftu mostu. Je vypočítána jako $\delta L_{IXčas}$ aplikovat to na místě L_{i0}
δL_{I0T}	korekce měření indukčnosti kabelů v důsledku vlivu teploty na můstek je vypočítána jako δL_{IXT} v aplikaci na bod L_{i0}

Tomu odpovídají složky nejistoty.

Kombinovaná nejistota se vypočte podle následující rovnice:

$$u^2(\Delta L_{IX}) = u^2(\bar{L}_{IX}) + u^2(\delta L_{IXres}) + u^2(\delta L_{IXcal}) + u^2(\delta L_{IXlin}) + u^2(\delta L_{IXder}) + u^2(\delta L_{IXT}) + u^2(\delta L_{IXTind}) + u^2(\delta L_{IXPind}) + u^2(\bar{L}_{I0}) + u^2(\delta L_{res}) + u^2(\delta L_{I0cal}) + u^2(\delta L_{I0lin}) + u^2(\delta L_{I0der}) + u^2(\delta L_{I0T}).$$

Příklad kalibrace pro toroidní etalon indukčnosti 100mH, typu P 5013

Příklad je číselně obdobný jako v literatuře [4].



Obrázek č. 16: Etalon indukčnosti 100mH, typu P 5013

Poznámka - impedance cívky etalonu 100 mH na 1 kHz je 638 Ω , jedná se tedy o poměrně nízkokoimpedanční měření.

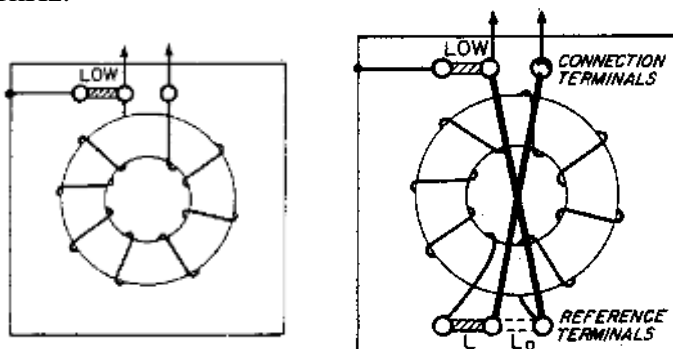
Etalon indukčnosti P 5113, je určen pro použití jako součást měřicích obvodů střídavého proudu frekvence od 80 Hz do 100 kHz v mírných klimatických podmínkách v uzavřených vytápěných místnostech při okolní teplotě 10°C až 35°C a relativní vlhkosti do 80 % při 25°C. Etalon má rozměry 170 x 170 x 205 mm a hmotnost 4 kg.

Základní (orientační katalogové) vlastnosti etalonu:

P 5013	výroba Rusko
nominální hodnota	100 mH
přesnost na 1 kHz	0,02 %
DC R	81 Ω
rezonanční frekvence	70 kHz
činitel jakosti "Q" na 1 kHz	7.8
maximální výkon	200 mW (efektivní hodnota)
teplotní závislost L	30 $\mu\text{H}/^\circ\text{C}$
závislost L na příkonu	$\pm 0,03 \mu\text{H}/\text{mW}$
závislost R na příkonu	$\pm 0,04 \Omega/\text{mW}$
teplotní závislost R	$\pm 0,03 \Omega/^\circ\text{C}$

Měření

Vzhledem k plánovanému využití indukčnosti je nutné ji kalibrovat pouze na frekvenci 1kHz.



Obrázek č. 17: Etalony s hodnotou nad 0,1 mH jsou provedeny jako třísvorkové, (obrázek č. 17 vlevo), etalony malých hodnot obsahují ještě další 3 svorky pro usnadnění odečtu nuly

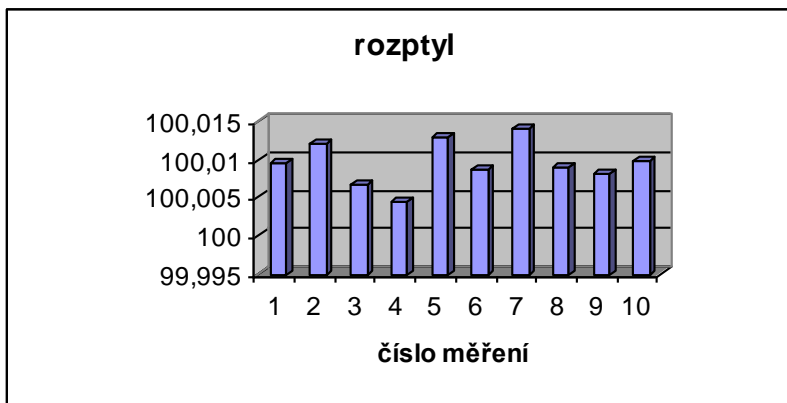
Byla provedena sada 10 měření L_x a L_o viz tabulka

Pořadové číslo měření	L_{ix} mH	L_o mH	$L_{ix} - L_o$ mH
1	100,0135	0,0041	100,0094
2	100,0180	0,0060	100,0120
3	100,0155	0,0088	100,0067
4	100,0140	0,0095	100,0045
5	100,0175	0,0047	100,0128
6	100,0185	0,0099	100,0086
7	100,0190	0,0050	100,0140
8	100,0195	0,0105	100,0090
9	100,0160	0,0080	100,0080
10	100,0150	0,0052	100,0098
Průměr	100,0167	0,00717	100,0095

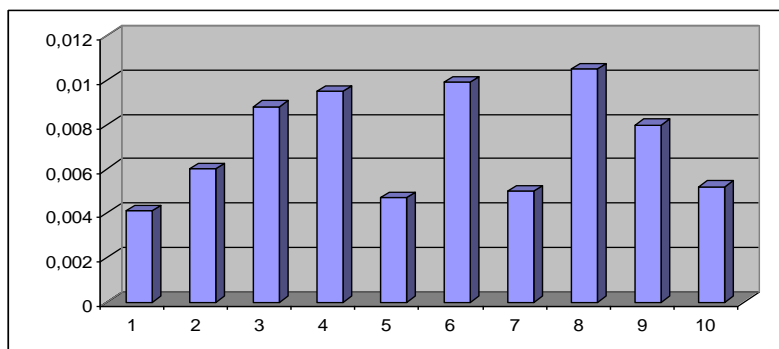
Kontrola

Bylo provedeno 10 měření, a jak ukazuje graf, všechna mohou být použita.

Rozptyl měření, který ukazují grafy, neukazuje žádnou systematickou složku driftu, vyhovuje, sada měření se může použít.



Měření L_{ix}



Měření L_o

Odlehlé výsledky

V teorii Gaussova rozdělení, mohou být výsledky měření výjimečně i velmi odlišné od průměrné hodnoty, ale ve skutečnosti je pravděpodobnost této možnosti velmi malá. Chauvenetovo kritérium je jedním ze způsobů, který může být použit pro "zahazení" jedné nebo více z hodnot výsledků měření, které se odchyľují příliš daleko od průměrné hodnoty. Není podle EA4/02 povinný, ale v případě, že měření pobíhá automaticky bez vizuální kontroly metrologa, může být užitečné toto kritérium použít. (Používaly ho už před desítkami let metrologické instituty SSSR při měření s velkým šumem). Informace viz například: https://en.wikipedia.org/wiki/Chauvenet's_criterion.

Také při aplikaci Chauvenetova kritéria jsou všechny výsledky jednotlivých měření v tomto příkladu použitelné.

Naměřená indukčnost včetně přívodů:

$$\bar{L}_{IX} = 100,016\ 65\ \text{mH}.$$

Naměřený vliv přívodů (pro zkrat na konci přívodů):

$$\bar{L}_{I0} = 000,007\ 17\ \text{mH}.$$

Indukčnost etalonu po odečtení vlivu přívodů:

$$L_X = \bar{L}_{IX} - \bar{L}_{I0} = 100,016\ 65\ \text{mH} - 000,007\ 17\ \text{mH} = 100,009\ 48\ \text{mH}.$$

Nejistota A

Pro měření indukčnosti včetně přívodů:

$$u(\bar{L}_{1x}) = \frac{s(L_{1x})}{\sqrt{10}} = 0,00067 \text{ mH}$$

Pro měření indukčnosti přívodů:

$$u(\bar{L}_{10}) = \frac{s(L_{10})}{\sqrt{10}} = 0,00076 \text{ mH}$$

Vliv rozlišení mostu

při měření indukčnosti je na rozsahu 100 mH rozlišení 0,000 1mH, a to jak při měření etalonu, tak i při měření zbytkové indukčnosti při zkratu na konci kabelů, což vede k nejistotě:

$$u(\delta L_{1x, \text{res}}) = u(\delta L_{10, \text{res}}) = \frac{0,0001}{\sqrt{12}} = 0,000029 \text{ mH}$$

Kalibrační certifikát mostu

K měření indukčnosti se na rozsahu mostu pro 100 mH podle kalibrace pro použitý most udává specifikaci (0,03 % ze čtení + 0,005 mH), s koeficientem rozšíření $k = 2$ pro úroveň spolehlivosti 95,45 %.

Proto se pro kalibrovaný most použije standardní nejistota:
100 mH včetně přívodů:

$$u(\delta L_{1x, \text{cal}}) = \frac{0,03\% \cdot 100 \text{ mH} + 0,005 \text{ mH}}{2} = 0,0175 \text{ mH}$$

Pro vliv přívodů:

$$u(\delta L_{10, \text{cal}}) = \frac{0,03\% \cdot 0 \text{ mH} + 0,005 \text{ mH}}{2} = 0,0025 \text{ mH}$$

Linearita mostu

Podle stejného kalibračního listu je kalibrační křivka mostu lineární, (viz požadavky v ČSN EN 60359) a má tento tvar:

$$F_{\text{křivky}} = G \cdot L_{\text{nalezená}} + L_K$$

Kde:

G je korekce zesílení mostu a L_K je korekce nuly mostu při měření indukčnosti

$$G = (5 \pm 2) \cdot 10^{-6}$$

$$L_K = (0,000 3 \pm 0,000 1) \text{ mH.}$$

Poznámka:

Hodnoty nejistoty jsou považovány za standardní nejistoty typické pro tento most:

$$L_{IXlin} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \text{ mH} + 0,000 \text{ 3 mH} = 0,000 \text{ 8 mH},$$

$$L_{I0lin} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 0 \text{ mH} + 0,000 \text{ 3 mH} = 0,000 \text{ 3 mH},$$

a s tím spojené nejistoty

$$u(\bar{L}_{IXlin}) = (2 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \text{ mH} + 0,000 \text{ 1 mH}) / \sqrt{3} = 0,000 \text{ 17 mH}$$

$$u(\bar{L}_{I0lin}) = (2 \cdot 10^{-6} \cdot 0 \text{ mH} + 0,000 \text{ 1 mH}) / \sqrt{3} = 0,000 \text{ 06 mH}$$

Navíc, podle měření historie mostu označující trend driftu pro měření indukčnosti v průběhu času - $(9 \cdot 10^{-6}$ ze čtení + 0,0005 mH)/rok se standardní nejistotou $(4 \cdot 10^{-6}$ ze čtení + 0,0002 mH/rok).

V době měření byl most užíván devět měsíců (3/4 roku) od poslední kalibrace mostu.

Předpokládáme pro zjednodušení lineární průběh časového driftu:

S těmito údaji oprav a L_{I0der} jsou:

$$\bar{L}_{IXder} = (-9 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \text{ mH} - 0,000 \text{ 5 mH}) \cdot 0,75 = -0,001 \text{ 05 mH}$$

$$\bar{L}_{I0der} = (-9 \cdot 10^{-6} \cdot 0 \text{ mH} - 0,000 \text{ 5 mH}) \cdot 0,75 = -0,000 \text{ 37 mH}$$

a jejich nejistota:

$$u(\bar{L}_{IXder}) = (4 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \text{ mH} + 0,000 \text{ 2 mH}) \cdot 0,75 = 0,000 \text{ 45 mH}$$

$$u(\bar{L}_{I0der}) = (4 \cdot 10^{-6} \cdot 0 \text{ mH} + 0,000 \text{ 2 mH}) \cdot 0,75 = 0,000 \text{ 15 mH}$$

Specifikace

Most pro měření indukčnosti má teplotní koeficient roven nule, s nejistotou:

$$\pm u = (4 \cdot 10^{-6} \cdot \text{ze čtení} + 0,000 \text{ 7 mH}) \cdot (T - T_{cal})$$

Kde:

T_{cal} referenční teplota kalibrace, $T_{cal} = 23^\circ\text{C}$

T teplota, při které byla prováděna měření, mezi $22,0^\circ\text{C}$ a $24,0^\circ\text{C}$

K_{cal} referenční kalibrace teploty most, $t_{CAL} = 23^\circ\text{C}$. Teplota v době měření byla mezi $22,0^\circ\text{C}$ až $24,0^\circ\text{C}$.

Z výše uvedených údajů vyplývá, že korekce \bar{L}_{IXT} a L_{I0T} jsou nula:

$$\bar{L}_{IXT} = L_{I0T} = 0$$

a jejich příslušné nejistoty:

$$u(\delta L_{IXT}) = \frac{(4 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \text{ mH} + 0,0007 \text{ mH}) \cdot 1}{\sqrt{3}} = 0,00063 \text{ mH}$$

$$u(\delta L_{I0T}) = \frac{(4 \cdot 10^{-6} \cdot 0 \text{ mH} + 0,0007 \text{ mH}) \cdot 1}{\sqrt{3}} = 0,00040 \text{ mH}$$

Specifikace indukčnosti dává teplotní koeficient rovný nule, s nejistotou $\pm 0,003$ 0 mH/°C
Měření byla prováděna při teplotě v rozmezí 22,0 °C a 24,0 °C. korekce indukčnosti
 $\bar{L}_{IXTind} = 0$.

Nejistota vlivem teploty

$$u(\delta L_{IXTind}) = \frac{30 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \text{ mH} \cdot 1}{\sqrt{3}} = 0,00173 \text{ mH}$$

Specifikace indukčnosti vlivem ohřevu výkonem při měření

Je nula, s nejistotou ± 0.03 $\mu\text{H}/\text{mW}$. Během opatření indukčnost můstek dává intenzitu proudu 15 mA. Výkon, který rozptyluje v odporu indukčnosti a odpor indukčnosti 100 mH je 81 Ω , Výkon rozptýlený je tedy 0,018 2 W, to je 18,2 mW. Pro které je korekce indukčnosti s ohledem na rozptýlený výkon

L_{IXPind} = nejistota 0

$$u(\delta L_{IXPind}) = \frac{0,03 \frac{\mu\text{H}}{\text{mW}} \cdot 18,2 \text{ mW}}{\sqrt{3}} = 0,315 \mu\text{H} = 0,000315 \text{ mH}$$

kombinovaná nejistota se vypočte podle následující rovnice:

$$u^2(\Delta L_{IX}) = u^2(\bar{L}_{IX}) + u^2(\delta L_{IXres}) + u^2(\delta L_{IXcal}) + u^2(\delta L_{IXlin}) + u^2(\delta L_{IXder}) + u^2(\delta L_{IXT}) + u^2(\delta L_{IXTind}) + u^2(\delta L_{IXPind}) + u^2(\bar{L}_{IO}) + u^2(\delta L_{IOres}) + u^2(\delta L_{IOcal}) + u^2(\delta L_{IOlin}) + u^2(\delta L_{IOder}) + u^2(\delta L_{IOT})$$

Souhrn všech analýzy nejistoty je vyjádřen ve formě tabulky:

Veličina X_i	odhad x_i	nejistota $u(x_i)$	koeficient citlivosti c_i	příspěvek k nejistotě $u_i(y)$
\bar{L}_{IX}	100,016 65	0,00067	1	0,00067
L_{IXres}	0	0,00003	1	0,00003
L_{IXcal}	0	0,0175	1	0,0175
L_{IXlin}	0,000 8	0,00017	1	0,00017
$L_{IXčas}$	-0,001 05	0,0045	1	0,00045
L_{IXT}	0	0,0063	-1	0,00063
L_{nom}	100	0	-1	0
L_{IXTind}	0	0,00173	-1	-0,000173
L_{IXPind}	0	0,000315	-1	-0,0003
\bar{L}_{IO}	0,00717	0,00076	-1	-0,00076
L_{IOres}	0	0,00003	-1	-0,00003
L_{IOcal}	0	0,0025	-1	-0,0025
L_{IOlin}	0,0003	0,00006	-1	-0,00006
$L_{IOčasr}$	-0,00037	0,00015	-1	-0,00015
L_{IOT}	0	0,0004	-1	-0,0004
ΔL_{IX}	0,0093			0,01782

Nejistota a efektivní počet stupňů volnosti:

$$v_{eff} = \frac{0,01782^4}{\frac{0,00067^4}{9} + \frac{0,00076^4}{9}} = 1695944$$

Počet efektivních stupňů volnosti získané na hladině spolehlivosti 95,45%, odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.

Rozšířená nejistota je tedy:

$$U(\bar{L}_{IX}) = k \cdot u(\bar{L}_{IX}) = 2 \cdot 0,01782 \text{ mH} = 0,03564 \text{ mH}$$

konečný výsledek kalibrace indukčnosti 100 mH, za podmínek a frekvenci 1 kHz při napájení 1 V a teplotě okolí mezi 22°C až 24°C:

$$\Delta \bar{L}_{IX}(100 \text{ mH}) = (0,0093 \pm 0,0360) \text{ mH} (k = 2)$$

Protože podle ILAC udáváme nejistotu nejvýše na 2 platná místa a uvedené 0,0360 mH má platná místa 3, použijeme zaokrouhlení:

$$\Delta \bar{L}_{IX}(100 \text{ mH}) = (0,009 \pm 0,036) \text{ mH} (k = 2).$$

Výsledek se stanoví v závislosti na zamýšleném použití kalibrace. S tolerancí indukčnosti podle specifikace se určí limity, z nichž musí být považováno za vhodné, nebo nevhodné k uvažovanému použití. V závislosti na mezích a oprav a nejistot tolerance získaných můžeme rozlišovat následující případy:

- součet absolutních hodnot korekce a nejistoty je pod limitem tolerance pro kalibraci. V tomto případě může být indukčnost používána pro jeho zamýšlené použití, aniž byla použita korekce.
- Nejistota je menší než tolerance, ale součet absolutních hodnot korekce a nejistota je větší.

V tomto případě použití další korekce k indukčnosti (mohou být použity v jejich zamýšleném použití) je nutné. V případě, že aplikace oprav je nevyhovující pro další komplikaci, musí být indukčnost odstraněna či použita pro jiné aplikace, která umožňuje větší toleranci indukčnosti.

- Nejistota je větší než tolerance pro zamýšlené použití. V tomto případě musí být indukčnost oddělena od služeb nebo pro aplikace, ve kterých jsou požadavky na přiměřenou kalibrační nejistotu. Rekalibrační interval na etalon indukčnosti se bude pohybovat mezi 12 a 24 měsíců, i když to bude záviset především na využití Z indukčnost a sledování změny v průběhu času. Uživatel etalonu bude vždy odpovědný za přidělování doby rekalibrace a musí ho revidovat ho tam, kde je to nezbytné, s ohledem na výsledky získané z předchozích kalibrací tolerance Stabilita etalonů indukčnosti bývá dobrá, protože je to pasivní prvek, pokud je správně používán, změny v hodnotě mezi kalibrací, musí být velmi malé, takže obecně je dostačující provést jen jednu kontrolu mezi kalibracemi.

Etalon indukčnosti P113:

$$L_{ix} = (100,009 \pm 0,036) \text{ mH}$$

Určených za podmínek měření při 1 kHz, 15 mA a teplotě okolí $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %.

14.3 Závěry

Výsledek měření se stanoví v závislosti na zamýšleném použití kalibrace s tolerancí indukčnosti. Podle specifikace se určí limity, podle kterých musí být považováno za vhodné nebo nevhodné k uvažovanému použití. V závislosti na mezích a oprav a nejistot specifikace můžeme rozlišovat následující případy:

a) součet absolutních hodnot korekce a nejistoty je pod limitem specifikace pro kalibraci. V tomto případě může být indukčnost používána pro jeho zamýšlené použití, aniž byla použita korekce.

b) Nejistota je menší než specifikace, ale součet absolutních hodnot korekce a nejistoty je větší než specifikace.

V tomto případě použití mohou být použity korekce k indukčnosti a pro jejich zamýšlené použití je nutné. V případě, že aplikace oprav je nevyhovující pro další komplikaci, musí být indukčnost odstraněna či použita pro jiné aplikace, která umožňuje větší toleranci hodnoty indukčnosti.

c) Nejistota je větší než specifikace pro zamýšlené použití. V tomto případě musí být indukčnost oddělena od služeb nebo pro aplikace, ve kterých jsou požadavky na přiměřenou kalibrační nejistotu.

Rekalibrační interval na etalon indukčnosti se bude pohybovat obvykle mezi 12 a 24 měsíci, i když to bude záviset především na využití z indukčnosti a sledování změny v průběhu času. Uživatel etalonu bude vždy odpovědný za přidělování doby rekalibrace a musí ho revidovat tam, kde je to nezbytné, s ohledem na výsledky získané z předchozích kalibrací. Stabilita etalonů indukčnosti bývá dobrá, protože je to pasivní prvek, pokud je správně používán, změny v hodnotě mezi kalibracemi, musí být velmi malé, takže obecně je dostačující provést jen jednu mezilhůtovou kontrolu mezi kalibracemi.

15 Validace

Kalibrační metody podléhají validaci v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 čl. 5.4. Validační zpráva je uložena v archivu sekretariátu ČMS.

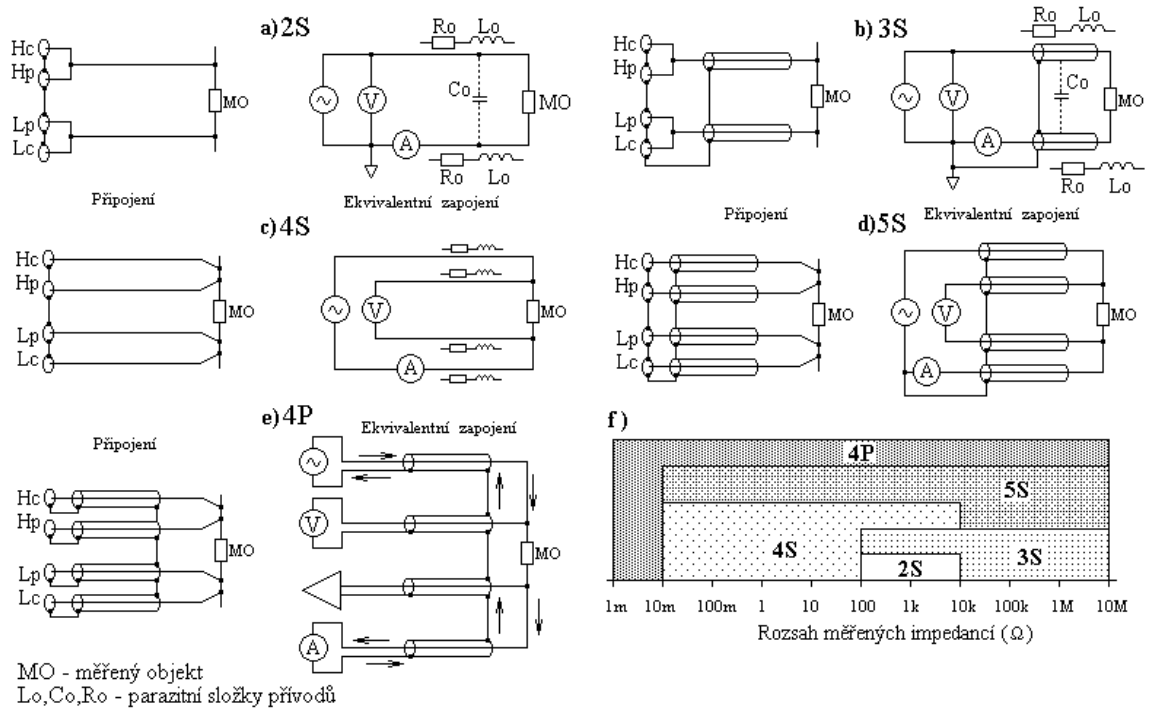
Upozornění

Tento kalibrační postup byl zpracován, revidován a posouzen v rámci úkolu rozvoje metrologie, řešeném pro Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví pod číslem VII/1/16. Nesmí být rozmnožován ani předáván jiným organizacím a subjektům bez souhlasu ÚNMZ a ČMS.

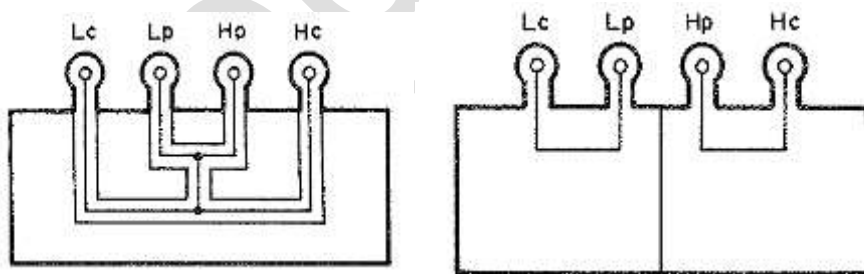
Kalibrační postup je třeba považovat za vzorový. Doporučuje se, aby jej organizace přizpůsobila svým požadavkům s ohledem na své metrologické vybavení a konkrétní podmínky. V tomto případě je třeba kalibrační postup znovu validovat.

16 Přílohy

Příloha č. 1 - Přehled připojení a jejich vlastnosti ukazuje obrázek č. 18.



Obrázek č. 18: Propojení měřeného objektu a měřicího přístroje
a) dvojsvorkové b) trojsvorkové c) čtyřsvorkové d) pětisvorkové e) čtyřpárové



Obrázek č. 19: Propojení vývodů u open a short

Příloha 2 - Etalony indukčnosti

Etalon odporu nebo etalon kapacity je možné vyrobit s velmi malými parazitními složkami, tedy blízký ideálnímu odporu nebo ideálnímu kondenzátoru. U etalonu indukčnosti to není možné. Etalon je realizován cívkou a její reálný odpor není zanedbatelný a navíc je teplotně značně závislý, protože cívka je vinuta z měděného drátu, který má teplotní závislost odporu přibližně 0,39%/°C. Etalon indukčnosti může být válcová cívka z měděného drátu na vhodné, například keramické kostře. Elektromagnetické pole takového etalonu otevřeným polem však zasahuje do prostoru mimo etalon. Tím může být hodnota etalonu ovlivněna předměty, přívody a zejména magnetickými materiály v okolí etalonu. Etalon nemůže být účinně stíněn, protože stínění blízko od cívky by bylo v oblasti magnetického pole etalonu a ovlivnilo by hodnotu etalonu. Při vzdáleném umístění stínění by byl etalon příliš velký. Z toho plyne také, že etalon působí jako rámová anténa, která přenáší rušení z okolí do měřícího zařízení, na které je etalon připojen.

Výhodou etalonů s otevřeným polem je jednoduchá konstrukce, nižší cena a hlavně jednodušší a lépe postižitelné frekvenční charakteristiky. Etalony s otevřeným polem se vyrábějí pro hodnoty indukčnosti od 1 μH do 10 H. Etalony s otevřeným polem válcové konstrukce mají lépe sledovatelnou frekvenční závislost, mohou se používat v rozsahu nejméně jedné dekády frekvence.

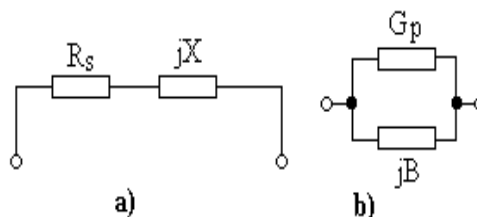
Toroidní etalon indukčnosti vznikl jako výsledek snahy potlačit některé nepříznivé vlastnosti etalonu s otevřeným polem. Navinutím cívky do toroidního tvaru se převážná část elektromagnetického pole soustředí dovnitř toroidu. To znamená, že etalon je méně závislý na předmětech v okolí a toroidní cívka etalonu může být umístěna i v kovovém stínícím pouzdře.

Velkou nevýhodou etalonů indukčnosti je, že u obou provedení, s otevřeným polem i toroidních, jsou komerčně dostupné etalony prakticky všechny provedeny s vývody na přístrojové svorky nebo zdířky. To je připojení, které není stíněné a vedení přívodů při měření může mít vliv na hodnotu indukčnosti.

Náhradní obvod reálného induktoru (obr. č. 20) můžeme překreslit na sériové zapojení rezistance R_S a reaktance X . Ekvivalentní sériové složky R_S a X impedance náhradního obvodu cívky jsou:

$$R_S = \frac{R_o}{(1 - \omega L C_p)^2 + (\omega C_p R_o)^2} \quad (1)$$

$$X = \omega \frac{L - C_p R_o^2 - \omega^2 L^2 C_p}{(1 - \omega L C_p)^2 + (\omega C_p R_o)^2} \quad (2)$$



Obrázek č. 20: Zapojení náhradního modelu reálné indukčnosti sériové a paralelní

Poznámka: Složky R_S a X byly získány rozkladem celkové impedance Z obvodu z obr. č. 20 na reálnou a imaginární část. U etalonů indukčnosti se omezíme na případy, kdy $X > 0$ (převládá indukčnost nad kapacitou), Výraz pro X nahradíme ekvivalentní sériovou indukčností cívky L_S podle vztahu $X = j\omega L_S$.

$$L_S = \frac{L - C_p R_o^2 - \omega^2 L^2 C_p}{(1 - \omega L C_p)^2 + (\omega C_p R_o)^2} \quad (3)$$

Odpor R_o je tvořen hlavně odporem měděného drátu, použitého provinutí cívky indukčnosti. Použitým měděným drátem je určena teplotní závislost reálné složky impedance, která je cca 0,39 %/°C. Cívka se navíc může ohřívat vlivem proudu protékajícím odporem cívky. To jsou velmi nepříjemné vlastnosti etalonů indukčnosti, omezující možnosti přesného měření reálné složky impedance etalonu indukčnosti.

Kapacita C_p se skládá z rozptylové kapacity vinutí a kapacity přívodů a svorek. Typické přístrojové svorky používané u etalonů indukčnosti, jak bývá u toroidních etalonů indukčnosti obvyklé, jsou vzdálené od sebe 26 mm, mají mezi částmi nad panelem kapacitu cca 0,17 pF, pod panelem mezi sebou cca 0,11 pF a kapacita svorky proti panelu je cca 6,7 pF.

Vliv kapacity svorek lze odvodit ze vztahu (3) a po zjednodušení dostaneme přibližný vztah

$$L_S = L + \omega^2 L C_p \quad (4)$$

Kapacitu mezi svorkami může ovlivnit připojení přívodů při měření. Pro indukčnost 1 H se například změna kapacity o 1 pF projevuje jako změna indukčnosti o 40 $\mu\text{H}/\text{H}$, pro 10 H je to již 0,04 % a pro 10 kH je to již dokonce 40 %. Z toho plyne, že pro přesné etalony indukčnosti s hodnotou nad 10 H není možné používat přístrojové svorky a u etalonu 1 H a 10 H musíme věnovat velkou pozornost vedení přívodů při měření.

Pro velké indukčnosti nad 10 H jsou přístrojové svorky nevhodné. Vyhovující je připojení přes konektory BNC, etalon je pak třísvorkový. Pro velké indukčnosti, které mají velkou impedanci již čtyřsvorkové připojení není podstatným přínosem. Třísvorkové zapojení umožní měření etalonu při jeho kalibraci na přesných transformátorových mostech, které jsou obvykle zapojeny pro třísvorkové připojení měřeného objektu.

Ideální indukčnost

Ideální indukčnost je charakterizována závislostí mezi elektrickým proudem a spřaženým (ekvivalentním) magnetickým tokem, tj. buď ampérwebrovou (A-Wb) $i = (\psi)$ nebo weberampérovou (Wb-A) charakteristikou ψ .

$$\psi = Li \quad (1)$$

Nelineární indukčnost je možné pro malé změny proudu v okolí klidového pracovního bodu Q popsat diferenciální neboli dynamickou indukčností:

$$L_d = \frac{d\psi}{di} \quad (2)$$

Pro svorkové napětí cívky platí:

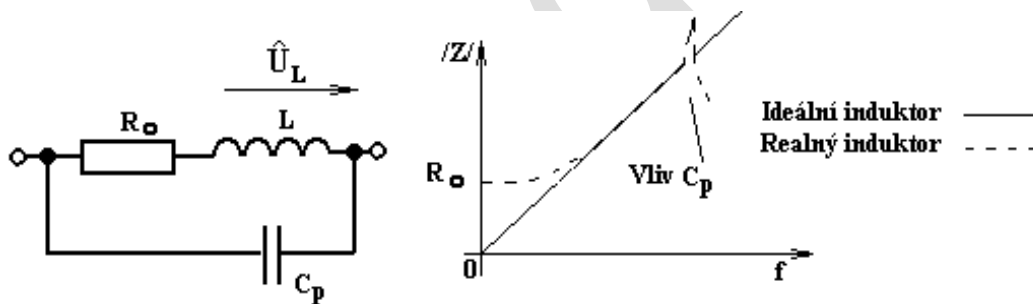
$$u_L = \frac{L di}{dt} \quad (3)$$

Ideální cívka hromadí (akumuluje) elektromagnetickou energii ve formě pole $W_L = \frac{1}{2} Li^2$. U klasické cívky je to magnetické pole vytvořené v prostředí, kde se cívka nachází. Připojíme-li ideální indukčnost ke zdroji střídavého napětí harmonického průběhu, vznikne fázový posun mezi napětím a proudem $+90^\circ$.

Reálná indukčnost

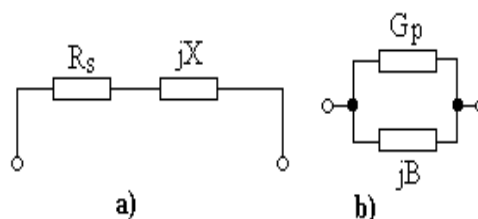
V technické praxi nelze vyrobit prvek (impedanci), který by měl čistě reaktanční nebo rezistivní vlastnosti. Každý reálný prvek obsahuje soustředěné nebo rozložené žádoucí či parazitní složky. Strukturu takového reálného prvku v sériovém zapojení vidíme na obr. č. 21. Zde L představuje induktivní reaktanci cívky (je přímo úměrná hodnotě indukčnosti), R_O tu zastupuje ztrátový odpor a C_P vlastní kapacitu (zbytkové parametry). Formálně je tento obvod shodný s náhradním obvodem reálného rezistoru.

Náhradní obvod reálného induktoru (obr. č. 21) můžeme překreslit na sériové resp. paralelní zapojení rezistance R_S a reaktance X resp. konduktance G_P a susceptance B_P . Ekvivalentní sériové složky R_S a B impedance náhradního obvodu cívky jsou:



$$R_S = \frac{R_O}{(1 - \omega L C_P)^2 + (\omega C_P R_O)^2} \quad (4)$$

$$X = \omega \frac{L - C_P R_O^2 - \omega^2 L^2 C_P}{(1 - \omega L C_P)^2 + (\omega C_P R_O)^2} \quad (5)$$



Obrázek č. 21: Sériové a paralelní zapojení náhradního modelu reálné indukčnosti

Složky R_S a X byly získány pouhým rozkladem celkové impedance v obvodu na reálnou a imaginární část. U cívek se omezíme na případy, kdy $X > 0$ (povaha indukčnosti), nahradíme výraz X ekvivalentní sériovou indukčností cívky L_S podle vztahu $X = j\omega L_S$.

$$L_S = \frac{L - C_p R_o^2 - \omega^2 L^2 C_p}{(1 - \omega L C_p)^2 + (\omega C_p R_o)^2} \quad (6)$$

Aby výraz (6) mohl nabývat kladných hodnot, musí být splněna podmínka $L > C_p (R_o)^2$. Vlastní rezonanční kmitočet cívky ω_r vypočteme tak, že položíme imaginární složku $X = 0$. Poté platí:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC_p} - \frac{R_o^2}{L^2}} \quad (7)$$

L_S nabývá v intervalu $0 < \omega < \omega_p$ kladných hodnot tj. jeví se jako indukčnost. Ztráty v cívkách vyjadřujeme dvěma pojmy a to:

Činitel jakosti cívky:

$$Q_L = \frac{\omega L}{R_o} \quad (8)$$

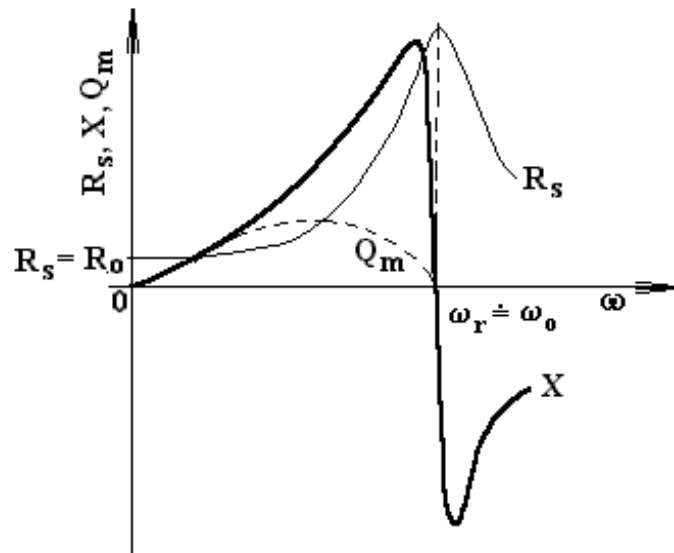
Činitel převýšení cívky:

$$Q_m = \frac{\omega L_S}{R_S} \quad (9)$$

Tato dualita je v oblasti vyšších kmitočetů nevyhnutelná (vliv C_p) a vždy platí $Q_L > Q_m$. Při nízkých kmitočtech $\omega_p \ll \omega$, můžeme položit $Q_m = Q_L$ aniž bychom se tím dopustili značných nepřesností.

Činitel jakosti Q tohoto induktoru je dán elektrickými ztrátami, jako jsou např. ztráty na ohmickém odporu cívky (zvětšuje se při vysokofrekvenčním proudu povrchovým jevem), ztráty vířivými proudy v jádru, ztráty hysterezní v jádru, ztráty dielektrické (v parazitních kapacitách).

Veškeré ztráty v cívce pak zahrnujeme do ekvivalentního ztrátového odporu R_S . Na obr. č. 22 je znázorněn průběh R_S , Q_m a X .



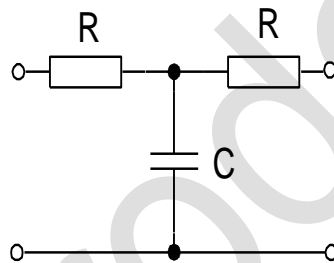
Obrázek č. 22: Přibližné kmitočtové průběhy ekvivalentních sériových složek a činitele převýšení cívky.

Příloha 3 - Etalony velkých hodnot indukčnosti

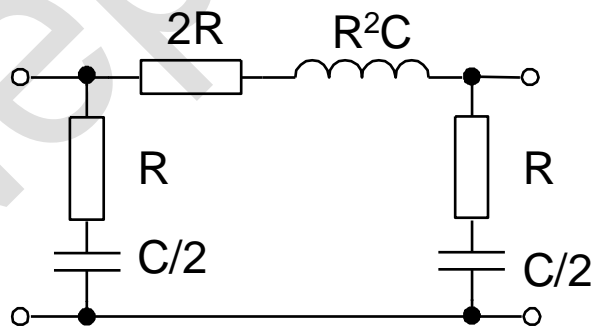
Jednou z těchto oblastí měření, zvláště obtížně zjistitelnou, je kalibrace pro měření velkých hodnot indukčnosti nad 10 H.

Především je nutno si uvědomit, o jaký rozsah impedance se při kalibraci indukčnosti nad 10H na frekvenci 1 kHz jedná. Jedná se o impedance středních a velkých hodnot. Indukčnost 1H na frekvenci 1 kHz má reaktanci 6280Ω , pro 10 kH je to již $63 \text{ M}\Omega$ a pro 100 kH dokonce $630 \text{ M}\Omega$. Protože většina měřičů indukčnosti umožňuje nastavit korekci open nejvýše v oblasti kolem $100 \text{ M}\Omega$ případně níže, je použitelná oblast měření omezena blízko do oblasti nad 10 kH. Je žádoucí mít možnost vlastnosti kalibrovaného měřiče prověřit při kalibraci v celém rozsahu.

Etalony indukčnosti pro hodnoty nad 1 H je obtížné realizovat klasickými principy. Cívky vychází již příliš velké a vlivem kapacity vinutí při velkých hodnotách indukčnosti se snižuje rezonanční kmitočet etalonu. Pro kalibraci měřičů impedancí pro velké hodnoty indukčnosti je nejlépe volit řešení etalonu se simulovanými induktory z odporů a kapacit. Klasickým řešením je T článek s odpory v podélné větvi a kapacitou v příčné větvi, viz obrázek č. 23.



Obrázek č. 23: Simulovaná indukčnost



Obrázek č. 24: Pasivní simulovaný induktor po transformaci náhradního zapojení z T na Π

Pro simulovanou indukčnost s T článkem se dvěma rezistory stejné hodnoty a bezztrátovou kapacitou C platí po transformaci z článku T na článek Π pro impedanci Z_{12} mezi vstupem a výstupem

$$Z_{12} = U_1 / I_2. \tag{5}$$

Indukčnost je při měření v autobalanční mostu zapojená mezi zdroj signálu a virtuální zem, pro simulovaný induktor při výstupu nakrátko, kdy platí $U_2 = 0$ je:

$$Z_{12} = 2R + j\omega RC, \quad (6)$$

To znamená, že zapojení má při sériovém náhradním zapojení indukčnost L_s , sériový odpor R_s a činitel jakosti Q_s dané vztahy:

$$L_s = R^2 C \quad R_s = 2R \quad Q_s = \omega RC \quad . \quad (7)$$

Vliv ztrát kondenzátoru C

Vztahy (7) platily pro bezztrátový kondenzátor. Nahradíme-li skutečný kondenzátor sériovým zapojením kapacity C a odporu R_C pak se vztahy změni na:

$$L_s = \frac{CR^2}{1 + \omega^2 C^2 R_C} \quad (8)$$

$$R_s = 2R + \frac{\omega^2 C^2 R^2 R_C}{1 + \omega^2 C^2 R_C} \quad (9)$$

$$Q_s = \frac{\omega CR^2}{2R + \omega^2 C^2 R_C [R^2 + 2RR_C]} \quad (10)$$

Ztrátový odpor R_C poněkud, ale ne příliš podstatně, ovlivňuje hodnotu etalonu a zavádí jeho kmitočtovou závislost, která je větší pro R a Q , menší pro L .

Příloha 4 - Komerční typy etalonů indukčnosti

Etalony s otevřeným polem

Etalony válcové konstrukce s otevřeným polem, v ČR velmi rozšířené v počtu několika desítek sad jsou například etalony RFT 0187. V praxi našich laboratoří jsou nejdůležitější. Pro konstrukci s otevřeným polem jsou však nevhodné pro přesná měření.



Obrázek č. 25: Etalon s otevřeným polem RFT 0187

Vlastnosti kalibrovaných etalonů

V ČR je omezený počet typů etalonů. Toroidní etalony ruské výroby P597 a P5115 se vyskytují jen v omezeném množství několika sad. Všechny ostatní používané etalony jsou etalony s otevřeným polem RFT 0187, případně malé množství RFT 0186 a RFT 0199. Etalonů RFT 0187 je velmi velké množství, asi vzhledem k jejich snadné dostupnosti v minulosti a velmi dlouhé době výroby. U etalonů indukčnosti je zvykem udávat indukčnost pro sérové náhradní zapojení. Odpor nebo činitel jakosti se obvykle neudávají, protože cívky etalonů jsou vinuty měděným drátem, potom sériový odpor cívky se stává teplotně závislým a jeho smysl je pouze při umístění etalonu v termostatu.

Základní vlastnosti etalonů RFT 0187

Etalony RFT 0187 jsou etalony s otevřeným polem, vinuté na porcelánové kostře. Vzhledem k otevřenému poli se musí při měření umísťovat na vhodnou nekovovou podložku dostatečně daleko od kovových a feromagnetických předmětů. Základní vlastnosti etalonů ukazuje následující tabulka. Tabulka ukazuje parazitní kapacitu etalonu C , sériový odpor R a max. přípustný proud cívkou I_{max} .

L	C [pF]	R [Ω]	I_{max} [A]
2 mH	60	1,9	0,5
5 mH	55	3,7	0,5
10 mH	56	13	0,5
20 mH	50	28	0,35
50 mH	60	43	0,3
100 mH	50	120	0,15
200 mH	55	190	0,15
500 mH	66	120	0,15
1 H	70	250	0,12
2 H	60	680	0,07
5 H	70	1 k	0,05
10 H	60	4 k2	0,03

Základní vlastnosti etalonů RFT 0187

Tyto etalony tvoří převážnou část požadavků na kalibraci.

Teplotní závislost výrobce neudával, podle orientačního měření je v oblasti desítek ppm/°C. Pro velké hodnoty L se naměřená teplotní závislost blížila 100 ppm/°C. (Naměřeno bylo u jedné sady +18ppm/°C pro 10 mH, -28ppm/°C pro 100 mH, -13ppm/°C pro 1H, +95ppm/°C pro 10 H).

Základní vlastnosti etalonu RFT 0199

K etalonům RFT 0199 se nezachovala v žádné laboratoři dokumentace. Podle provedení jde zřejmě o toroidní etalony, vinuté asi na feromagnetické kostře. Pro měřicí signál do 10 mA není zřejmá závislost indukčnosti na signálu, ale pro 100 mA je již zřetelná nelinearita.

Toroidní etalony indukčnosti

Toroidní etalony IET labs a Ruské etalony toroidní konstrukce vysoké kvality, jako jsou například etalony typu P5115 ukazuje obr. č. 26. Jsou umístěny v robustním kovovém pouzdře, které stabilizuje teplotu a stíní etalon. Některé konstrukce mají cívku zalitou, například do korkové drti v asfaltovém kompaundu.



Obrázek č. 26: Konstrukce toroidního etalonu indukčnosti typu P5115

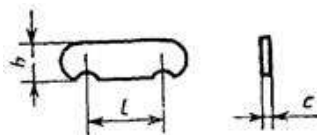
Etalony indukčnosti pod $100\mu\text{H}$ mají další svorky se zkratovací spojkou, viz obr. č. 27 vpravo. Měření v první poloze umožní změřit zbytkové indukčnosti a po přepnutí do druhé polohy se hodnota etalonu změní o hodnotu, definovanou tímto etalonem.

Etalony nad 10H je lépe realizovat jako simulované indukčnosti s T s články R a C

Etalony velkých hodnot indukčnosti

Etalony indukčnosti pro hodnoty nad 1 H pro frekvenci 1 kHz je obtížné realizovat klasickými principy. Cívky vychází již příliš velké a vlivem kapacity vinutí při velkých hodnotách indukčnosti se příliš snižuje rezonanční kmitočet etalonu. Pro kalibraci měřičů impedancí pro velké hodnoty indukčnosti je nejlépe použít etalony se simulovanými indukčnostmi složenými z odporů a kapacit. Klasickým řešením je T článek s odpory v podélné větvi a kapacitou v příčné větvi.

Zkratovací spojka



Obrázek č. 27: Zkratovací spojka

Indukčnost propojek se vypočítá podle vzorce:

$$l_n = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(l_n \frac{2l}{b+c} + 0,5 \right).$$

Kde:

l - délka můstku mezi svorkami, m;

B a C - rozměry stran desky

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H / m}$$

Kalibrátory

Kalibrátory určené pro DMM

Univerzální kalibrátory multimetru mají velmi výjimečně vestavěny etalony indukčnosti (Transmille), určený hlavně pro kalibraci odporových rozsahů multimetru a použitelný obvykle i pro AC R na nízkých frekvencích. Podrobněji viz specifikace jednotlivých typů kalibrátorů.

Kalibrátor určený pro kalibraci měřičů impedance Meatest M 550

Jediný univerzální kalibrátor na světě s rozsahy AC R, L, C je Meatest M 550. Umožňuje kalibraci pro různé zapojení v širokém rozsahu funkcí i hodnot.



Obrázek č. 28: Kalibrátor impedance Meatest M 550

Kalibrátor impedance M550 je přístroj určený ke kalibraci a nastavování měřičů RLC v kmitočtovém pásmu do 1 MHz. Obsahuje sady odporových, kapacitních a induktivních etalonů diskretních dekadických hodnot. Obsahuje:

- sadu etalonů odporu 0.1 Ω - 100 M Ω ,
- sadu etalonů kapacity 10 pF - 100 uF,
- **sadu etalonů indukčnosti 1 uH - 10 H,**
- umožňuje čtyřpárové, čtyřsvorkové a dvousvorkové připojení,
- uchovává kalibrační data do 1 MHz,
- Přesnost: 0,005 % ... 0,1 %,
- má sběrnice GPIB a RS-232.

Kalibrátor impedance M550 je přístroj určený ke kalibraci a nastavování měřičů RLC. Pro vyloučení vlivu přívodních kabelů a vlastního pozadí kontrolovaného měřiče RLC je kalibrátor vybaven referenčními polohami svorek nakrátko "SHORT" a naprázdno

"OPEN". Kalibrátor M-550 lze připojit ke kontrolovanému měřiči koaxiálně **čtyřpárově** nebo **čtyřsvorkově** a **dvousvorkově**. Velký LCD displej umožňuje zobrazit všechny potřebné informace o nastavení kalibrátoru. Kalibrační data jsou uchována v interní paměti, včetně historie a jejich přepis při recalibraci se provádí přímo z klávesnice přístroje. Všechny funkce přístroje lze ovládat po sběrnici GPIB nebo RS-232. Jedná se o jediný univerzální kalibrátor impedancí na světě.



Obrázek č. 29: Kalibrace 4TP mostu s kalibrátorem impedance Meatest M 550