

Chování neideálních cívek a kondenzátorů, využití LC obvodů v moderních technologiích

J. Olšan*, T. Trajhan**

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1

*olsanja2@jfifi.cvut.cz, **trajhtom@jfifi.cvut.cz

Abstrakt

Hlavním cílem naší práce bylo pomocí praktické ukázky přiblížit ostatním studentům neobvyklé chování cívek a kondenzátorů při vysokých frekvencích, kdy se cívka může chovat jako kondenzátor a naopak. Druhým cílem bylo seznámení s fyzikální veličinou impedance a vlastnostmi RLC obvodů, včetně praktické ukázky ověření vztahu pro výpočet jejich rezonanční frekvence a možností jejich využití v moderních technologiích.

1 Teoretický úvod

1.1 Impedance

Impedance je skalární fyzikální veličina udávající celkový odpor kladený součástkou či celým obvodem při dané frekvenci. Značí se písmenem Z a její jednotkou je jednotka odporu Ohm (značka Ω). Je vyjádřena komplexním číslem ve tvaru $Z = R + iX$. Reálná část R se nazývá odpor a imaginární složka X reaktance. Impedanci lze tedy ekvivalentně vyjádřit jako sériové zapojení rezistoru s odporem R a součásky s reaktancí X . V polárních souřadnicích lze impedanci zapsat pomocí její velikosti $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ a polárního úhlu φ , který se v případě impedance nazývá fáze.

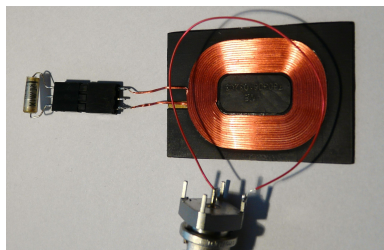
1.2 Induktance a kapacitance

Induktance a kapacitance jsou dvě formy reaktance, přičemž jako induktance se označuje reaktance cívky a jako kapacitance reaktance kondenzátoru. Velikost induktance X_L je dána vztahem $X_L = 2\pi fL = \omega L$ a kapacitance X_C vztahem $X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C}$, kde f je frekvence napětí v daném obvodu, L indukčnost cívky a C kapacita kondenzátoru. Kapacitance se bere se záporným znaménkem, induktance s kladným.

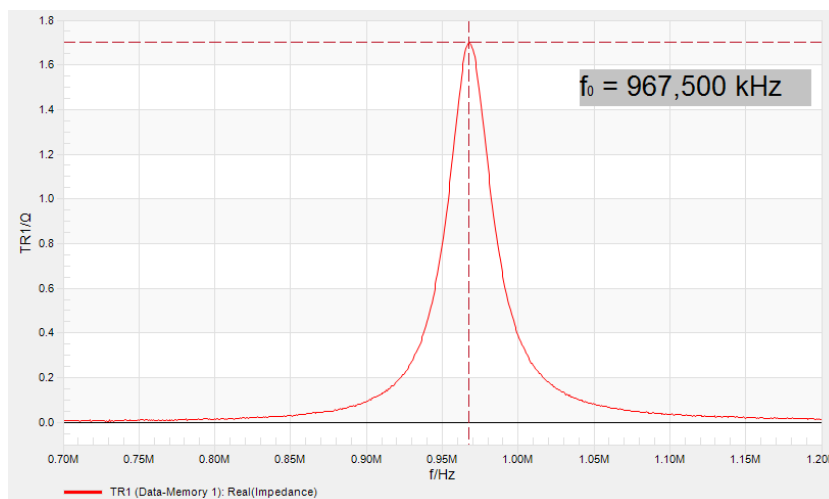
Impedance ideálních cívek a kondenzátorů je tvořena pouze reaktancí a mají tedy nulový odpor. Fáze φ ideálního kondenzátoru je tedy $-\frac{\pi}{2}$ a ideální cívky $\frac{\pi}{2}$. Reálné součásky mají však i nějaký parazitní odpor.

1.3 RLC obvod

RLC obvod je obvod tvořený cívkou, kondenzátorem a odporem v sériovém zapojení se zdrojem střídavého proudu. Odpor se často nevyskytuje jako diskrétní součástka, ale jako parazitní prvek ostatních součástí. Pracuje na principu přelévání energie mezi energií náboje v



Obr. 1: Zapojení pro měření rezonanční frekvence



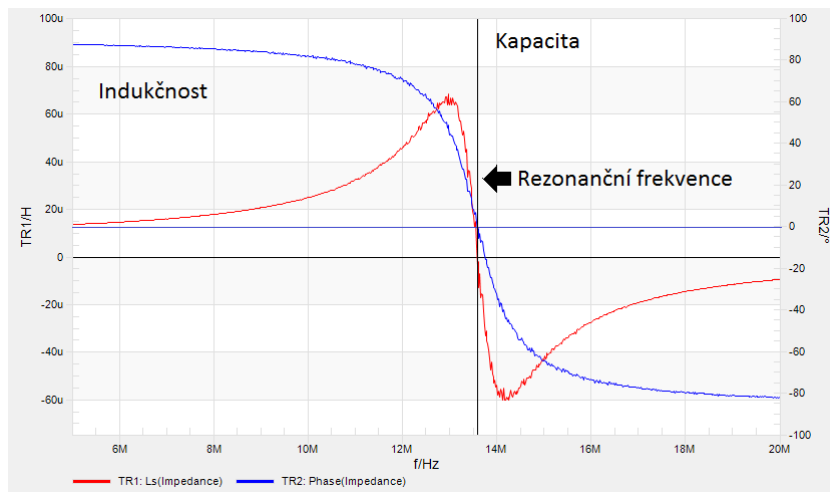
Obr. 2: Naměřená reálná část impedance

kondenzátoru a energií magnetického pole cívky. Platí zde analogie s mechanickým oscilátorem, přičemž například náboj v kondenzátoru hraje roli výchylky z rovnovážné polohy, indukčnost je analogická s hmotností a rychlost pohybu má svůj ekvivalent v protékajícím proudu. Rezonanční frekvence f_0 je dána vztahem $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (1).

2 Ověření vztahu pro rezonanční frekvenci LC obvodu.

Naším prvním cílem byla názorná ukázka experimentálního ověření platnosti vztahu pro rezonanční frekvenci LC obvodu. K tomu byl použit vektorový analyzátor Bode 100 určený pro měření impedance při různých frekvencích. Z naměřené impedance dokáže následně určit například kapacitu, indukčnost nebo fázi. Námí zvolená cívka měla výrobcem udávanou indukčnost $12 \mu\text{H}$ a kondenzátor kapacitou $2,2 \text{ nF}$. Podle námí provedeného měření vektorovým analyzátoru při frekvenci 1 MHz je kapacita kondenzátoru skutečně $2,2 \text{ nF}$ a indukčnost cívky poněkud větší, přibližně $12,176 \mu\text{H}$. Pro tyto hodnoty by podle vztahu (1) měla být rezonanční frekvence přibližně $972,4 \text{ kHz}$.

Na obrázku 1 je zachyceno zapojení pro měření rezonanční frekvence LC obvodu. Cívka s kondenzátorem je spojena v sérii do obvodu a k závitům cívky je přiložena anténa tvořená smyčkou drátu. Anténa je připojena k vektorovému analyzátoru, který do ní postupně přivádí střídavé napětí o frekvencích od $0,7$ do $1,2 \text{ MHz}$. Toto napětí vyvolává v okolí antény proměnné magnetické pole, které následně v cívkce LC obvodu indukuje střídavý proud. Přístroj pro každou frekvenci změří impedanci a její reálnou složku zobrazí do grafu 2. Jak se frekvence napětí z vektorového analyzátoru blíží rezonanční frekvenci LC obvodu, je tímto obvodem pohlcováno stále více energie, což se projeví nárůstem změřené impedance. Frekvence, které odpovídá maximální naměřené impedance, by měla zhruba odpovídat rezonanční frekvenci LC obvodu. V našem případě odpovídá maximální impedance frekvenci $967,5 \text{ kHz}$, která přibližně odpovídá námí předpovězené rezonanční frekvenci.



Obr. 3: Frekvenční závislost indukčnosti cívky

3 Frekvenční závislost kapacity a indukčnosti neideálních součástek

Dalším námi provedeným experimentem bylo měření kapacity a indukčnosti námi zvoleného kondenzátoru a cívky pro různé frekvence. Naměřená data pro cívku jsou v grafu 3. Červená čára znázorňuje naměřenou indukčnost a modrá čára fázi impedance ve stupních. Z grafu je jasně patrné, že pro měření při nižších frekvencích je naměřená indukčnost přibližně rovná hodnotě udávané výrobcem. Při zvyšování frekvence ale tato hodnota roste, až do okamžiku, kdy je dosaženo jisté kritické úrovně, při které dojde k prudkému poklesu do záporných hodnot. Při dalším růstu frekvence se naměřená hodnota opět zvyšuje, ale je stále záporná. Záporná indukčnost je vlastně kapacita. Cívka se tedy od určité frekvence začne projevovat jako kondenzátor. Tomu odpovídá i změřená fáze vyznačená modrou čarou. Pro nízkou frekvenci se u cívky blíží $\frac{\pi}{2}$, tedy hodnotě odpovídající ideální cívce. Se vzrůstající frekvencí se fáze pomalu snižuje, až při přiblížení ke kritické frekvenci klesne poměrně strmě na nulu. Nulovou osu protne při stejné frekvenci, jako změřená indukčnost. V tomto okamžiku se tedy součástka chová čistě jako odpor - má pouze reálnou složku impedance a nulovou indukčnost. Pro frekvence nad kritickou frekvencí fáze dále klesá téměř až k $-\frac{\pi}{2}$, tedy hodnotě, která odpovídá kondenzátoru. Kondenzátor vykazuje stejné chování, pouze s opačnými znaménky.

Toho chování je způsobeno tím, že součástky nejsou ideální a vyskytují se na nich i parazitní součástky. Tyto parazitní prvky se při různých frekvencích projevují různým způsobem, což určuje výsledné chování součástky. Například přívodní vodiče kondenzátoru vytváří cívku s velmi malou indukčností a naopak mezi závity cívky je určitá kapacita. Z toho je zřejmé, že pro modelování takovéto součástky při vyšších frekvencích nelze použít pouze dvouprvkový ekvivalentní obvod, ale je nutné použít tříprvkový, který se skládá ze sériově zapojené indukčnosti, kapacity a odporu [3].

4 Moderní technologie a LC obvody

4.1 Bezdrátové nabíjení

Bezdrátové nabíjení funguje na principu rezonančního transformátoru bez jádra, kde primární cívka je umístěna v nabíjecí podložce a sekundární v nabíjeném mobilním zařízení. Nabíjené zařízení s nabíjecí podložkou dokáže digitálně komunikovat rychlostí až 2 kbps. Možnost komunikace je nutná z důvodu potřeby regulace dodávaného výkonu a také možnosti ukončení

nabíjení po nabití baterie. Tato komunikace může fungovat buď na principu modulace rezonanční frekvence pomocí připojování malého kondenzátoru k LC obvodu, případně modulací amplitudy připojením odporu. Běžné bezdrátové nabíječky určené pro mobilní telefony dokáží poskytnout maximální výkon až 5 W [6].

Mezi výhody bezdrátového nabíjení patří absence kabelu a tedy možnost celé zařízení hermeticky uzavřít. Nevýhody jsou vyšší cena bezdrátové nabíječky a také nižší účinnost nabíjení, z čehož plynou i delší časy nutné k úplnému nabití [5].

4.2 NFC

Technologie NFC (Near Field Communication) umožňuje bezdrátovou komunikaci na krátkou vzdálenost pomocí magnetického pole. Technicky vychází z technologie RFID (Radio Frequency Identification) [7]. NFC zařízení se dělí na aktivní, tedy zařízení s vlastním zdrojem energie, což může být například mobilní telefon, a pasivní, která vlastní napájení nemají a jsou napájena proudem indukovaným polem vyvolaným aktivním zařízením. Pasivní zařízení tak mohou mít podobu například chytré nálepky, klíčenky, nebo čipové karty. Přitom ale může takové pasivní zařízení obsahovat až 8192 bytů nonvolatilní paměti jednoduše přístupné například z mobilního telefonu. NFC pracuje na frekvenci 13,56 MHz a rychlost komunikace může dosahovat hodnot 106 – 848 kbps [8].

5 Poděkování

Děkujeme ing. Vladimíru Olšanovi, PhD. za zapůjčení potřebného vybavení a rady. Dále také ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. za poskytnutí napěťového zdroje.

Reference

- [1] R. P. Feynman, R. B. Leighton a M. Sands, *Feynmanovy přednášky z fyziky: revidované vydání s řešenými příklady – 1. díl*, Fragment, Praha (2013), 314-325, ISBN 9788025316429
- [2]] R. P. Feynman, R. B. Leighton a M. Sands, *Feynmanovy přednášky z fyziky: revidované vydání s řešenými příklady – 2. díl*, Fragment, Praha (2013), 304-306, ISBN 9788025316436
- [3] kol. autorů, *Agilent Impedance Measurement Handbook*, Agilent Technologies (2013), <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>
- [4] kol. autorů, *Resonant Wireless Power How it Works*, <http://powerbyproxi.com/about/wireless-standards/>
- [5] K. Siddabattula, *Why Not A Wire?: The case for wireless power*, <http://www.wirelesspowerconsortium.com/technology/why-not-a-wire-the-case-for-wireless-power.html/>
- [6] kol. autorů, *System Description Wireless Power Transfer, Volume I: Low Power*, Wireless Power Consortium (2013), <http://www.wirelesspowerconsortium.com/developers/specification.html>
- [7] kol. autorů, *Near field communication*, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Near_field_communication&oldid=684890260
- [8] anonym, *Inside NFC: how near field communication works*, APC magazine (2011), <http://apcmag.com/inside-nfc-how-near-field-communication-works.htm/>