

# UNIT FOR CONTACTLESS TRANSFER OF ELECTRICAL ENERGY

Aleš Jelínek

Master Degree Programme (2), FEEC BUT

E-mail: xjelin08@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Luděk Žalud

E-mail: zalud@feec.vutbr.cz

**Abstract:** The aim of my work is to prove the practical applicability of the concept of contactless energy transfer using induction coils. The first part deals with the mathematical model and theoretical proof of the concept being able to work in practice. Next chapter describes the process of detecting resonance of receiver circuit on transmitter side. The last part contains measurement results of a coupling coefficient of coils and discusses how such a device could be constructed and put into practice.

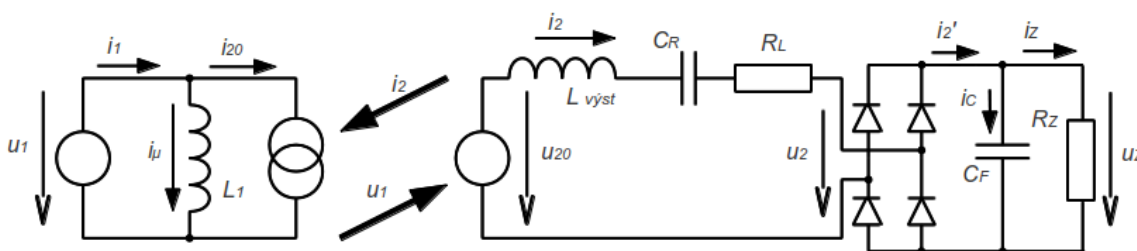
**Keywords:** contactless, wireless, energy, transfer, induction, coil, transformer, resonance

## 1. ÚVOD

Myšlenka bezkontaktního přenosu elektrické energie pomocí indukce není nová a například v asynchronních motorech je požívána již řadu let. Méně běžně se využívá pro nabíjení zařízení, která z různých důvodů nemohou být připojena k elektrické síti. Lze vyhledat aplikace používající indukci pro dobíjení malé spotřební elektroniky (mobilní telefony, fotoaparáty, ...), nebo naopak pro velmi výkonná zařízení, například elektromobily, případně elektrobuses. Z oblasti středních výkonů (o níž jde v této práci) je praktických aplikací velmi málo a článků věnujících se konstrukci takových zařízení je mizivé množství. V dalším textu proto vyjdeme z obecného popisu dvou cívek se vzájemnou vazbou a odvodíme teoretické výsledky, z nichž přímo vyplynou podmínky pro praktickou realizaci.

## 2. MATEMATICKÝ POPIS SYSTÉMU

Přenos energie pomocí elektromagnetické indukce můžeme realizovat pomocí dvou cívek, které mezi sebou mají určitou vazbu závislou na konkrétní vzájemné poloze (k tomuto tématu se dostaneme dále). Z pohledu elektrotechnické teorie jde tedy o transformátor, a proto budeme vycházet z jeho modelu. Zde je třeba zdůraznit, že takový model musí být maximálně obecný, náš transformátor je díky špatné vazbě mezi cívkami poněkud nestandardní. Použijeme náhradní zapojení transformátoru napětí z [1], které neobsahuje žádné zjednodušení.



**Obrázek 1:** Principiální schéma systému bezkontaktního přenosu elektrické energie s nejdůležitějšími součástkami

Model transformátoru je tvořen indukčností vysílací cívky  $L_1$ , zdrojem proudu  $i_{20}$ , zdrojem napětí  $u_{20}$  a indukčností  $L_{výst}$ . Platí pro něj následující vztahy:

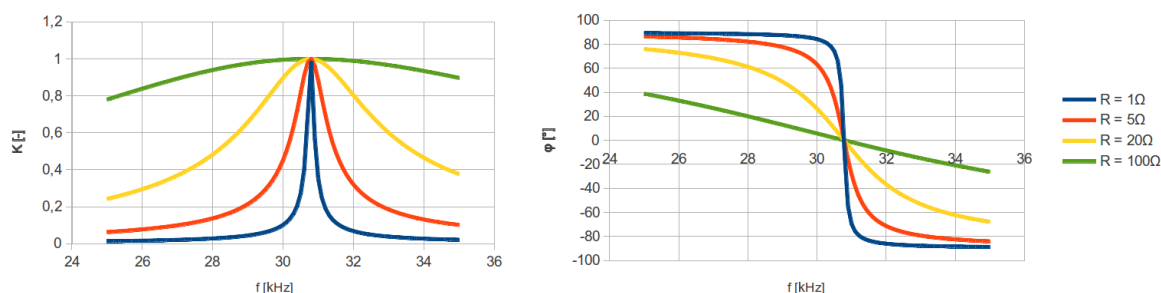
$$L_{výst} = (1 - k^2)L_2 \quad i_{20} = i_2 k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad u_{20} = u_1 k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (1)$$

kde  $L_2$  je indukčnost přijímací cívky a  $k$  je činitel vazby obou cívek v rozmezí od nuly do jedné. Právě tento koeficient má radikální vliv jak na přenos napětí, tak na výstupní indukčnost, kterou se snažíme udržet minimální, neboť způsobuje "měkkost" zdroje  $u_{20}$  (u transformátorů  $L_{výst} \rightarrow 0$  H).

Cívky bezkontaktního přenosu budou mít činitel vazby malý, a proto je třeba výstupní indukčnost kompenzovat rezonančním kondenzátorem  $C_R$  (viz Obrázek 1). Pro jednu konkrétní frekvenci jsme takto schopni výstupní impedanci systému zredukovat až na neodstranitelný parazitní odpor přijímací cívky  $R_L$ , který je dostatečně malý.

Vzniklý rezonanční obvod je tlumen součtem odporů  $R = R_L + R_Z$ . Toto tvrzení platí stoprocentně pouze kdybychom vynechali usměrňovací můstek s vyhlazovacím kondenzátorem, ale s dostatečnou přesností ho lze aplikovat i na obvod z Obrázku 1. Pro zesílení a fázový posun mezi napětími  $u_{20}$  a  $u_2$  platí (pro případ z Obrázku 1 přibližně) tyto vztahy:

$$K = \frac{R}{\sqrt{R^2 - \left( \omega L_{výst} - \frac{1}{\omega C_R} \right)^2}} \quad \varphi = \arctan \left( \frac{1}{\omega R C_R} - \omega \frac{L_{výst}}{R} \right) \quad (2)$$



**Obrázek 2:** Přenos a fázový posun napětí  $u_{20} \rightarrow u_2$  v rezonančním obvodu podle Obrázku 1

Křivky na Obrázku 2 mají všeobecně známý tvar, ale pro nás je důležitý jejich výklad z hlediska výkonového, které není tolik obvyklé. Chceme-li z výstupu odebírat hodně energie, je zřejmé, že  $R$  bude malé. Odtud plyne, že čím větší výkon přenášíme, tím přesněji je třeba dosáhnout rezonanční frekvence, protože už malá odchylka způsobí nepřijatelné snížení přenosu. Požadavky na frekvenční měnič napájející vysílač budou tím pádem poněkud nestandardní – je třeba frekvenci přeladovat v relativně malém rozsahu, ale s velmi jemným rozlišením. Dále je třeba zajistit co nejmenší odpor přijímací cívky, protože při klesajícím  $R_Z$  bude ztráta na něm nabývat na významu – má tedy přímý vliv na účinnost.

### 3. DETEKCE REZONANCE PŘIJÍMACÍHO OBVODU NA STRANĚ VYSÍLAČE

Udržet systém v rezonanci je kritické pro funkci celého zařízení. Měřit na straně přijímače se nabízí jako snadné řešení, ale znamenalo by to potřebu bezdrátového přenosu získaných informací zpět na přijímač, což je nepříjemná komplikace.

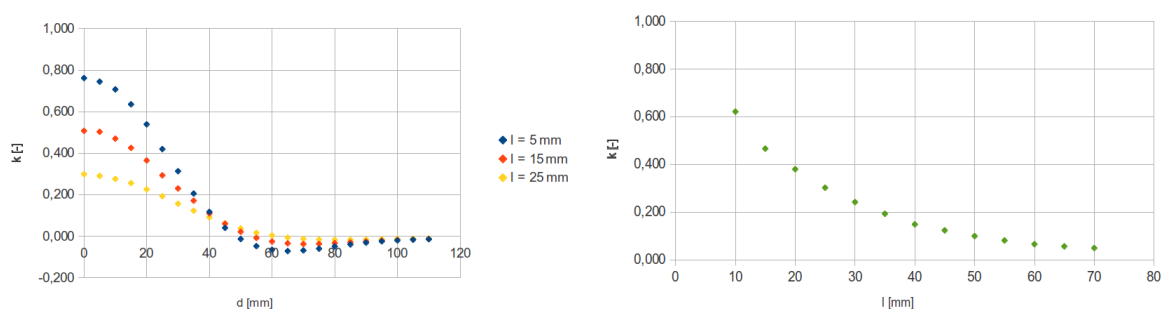
Ze schématu na Obrázku 1 a vzcrců (1) vyplývá, že proud i napětí ze sekundární strany mají své fázově přesné ekvivalenty na primární straně. Konkrétně jde o napětí  $u_1$  a  $u_{20}$  a proudy  $i_{20}$  a  $i_2$ , mezi nimiž není žádná dynamika, pouze přímá úměra. Měřením fázového posunu  $i_{20}$  oproti  $u_1$  je tedy možné zjistit, jestli přijímač rezonuje. Navíc se vyhneme problémům hledání maxima na křivce

přenosu, ale budeme regulovat podle monotónní křivky fázového posunu (viz Obrázek 2), takže je možné použít k udržení nulového fázového rozdílu běžné nástroje známé z teorie řízení dynamických systémů.

Poněkud nepříjemná skutečnost je, že proud  $i_{20}$  nelze přímo měřit. Do primární cívky teče proud  $i_1$ , který neoddelitelně obsahuje i magnetizační proud  $i_\mu$ , který má sice stejnou základní frekvenci jako  $i_1$ , ale je fázově posunut.  $i_\mu$  je však závislý pouze na indukčnosti primární cívky a napájecím napětí  $u_1$ , což nám umožní vytvořit jeho ekvivalent, který od  $i_1$  odečteme, takže princip měření z předchozího odstavce může být použit.

#### 4. ČINITEL VAZBY MEZI VINUTÍMI

Pravděpodobně neexistuje přesný výpočet, který by na základě parametrů cívek a jejich prostorového uspořádání, dokázal určit přesnou velikost jejich činitele vazby. Odhad velikosti  $k$  je proto založen buď na simulacích, nebo na empirických zkušenostech. Z toho důvodu bylo provedeno následující měření na dvou totožných plochých cívkách o průměru 85 mm.



**Obrázek 3:** Závislost činitele vazby na horizontálním a vertikálním posunutí plochých cívek

Graf nalevo ukazuje závislost pro horizontální vychýlení při různých vertikálních vzdálenostech. Zde stojí za povšimnutí, že nezávisle na počáteční vazbě se všechny průběhy protínají přibližně při posunutí o  $r/2$  a následuje oblast otočené polaroty, kterou jsem si, navzdory definici  $k \in (0;1)$ , dovolil vyznačit záporným znaménkem. Odtud plyne poučení pro praxi, že malé horizontální vychýlení má malý vliv a pokud překročí kritickou mez  $r/2$ , dojde k otočení polaroty (fázovému posunu o  $180^\circ$ ), což by mohlo mít fatální vliv na regulaci.

Pravý graf ukazuje, že při oddalování cívek činitel vazby zpočátku klesá rychle, poté zpomalí a asymptoticky se blíží k nule. Ještě ve vzdálenosti 50 mm je jeho velikost 0,1, což je číslo s úspěchem používané v simulacích. Lze tedy říci, že pokud je vzdálenost mezi rovnoběžnými plochými cívkami menší než jejich poloměr, lze přenos uskutečnit.

#### 5. ZÁVĚR

Cílem tohoto textu bylo popsat alespoň nejzákladnější principy spojené s bezkontaktním přenosem energie. Praktická realizace dále zahrnuje návrh obecně známých prvků (frekvenční měnič na vstupu a DC/DC měnič na výstupu) a mnohem detailnější výpočty a simulace. Laditelný generátor signálu pro vysílač a detektor rezonance jsou již prakticky otestovány a plně funkční. Finální prototyp, včetně postupu návrhu a hlubších teoretických základů, bude popsán v diplomové práci na dané téma.

#### REFERENCE

- [1] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody*. 1. vyd. Brno: Vutium, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.