

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Bezdrátové indukční dobíjení pro elektromobil

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek MÁZOR**
Osobní číslo: **E10B0384P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Bezdrátové indukční dobíjení pro elektromobil**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Bezdrátové indukční dobíjení pro elektromobil.

1. Proveďte základní analýzu trhu v možnostech indukčního dobíjení elektromobilů.
2. Detailně popište některé Vámi vybrané způsoby a uveďte jejich výhody a nevýhody.
3. Porovnejte jednotlivá řešení z hlediska jejich účinnosti, nároků na technologii a cenu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

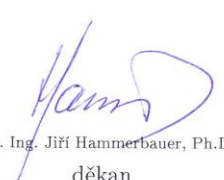
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.

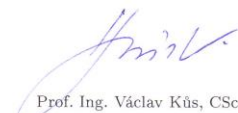
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis bezdrátového dobíjení elektromobilů. Jejím cílem je nastínit princip jednotlivých metod bezdrátového dobíjení a vytvořit tak náhled na vývoj a následné praktické využití těchto technologií v běžném životě a zároveň nastínit jejich výhody a nevýhody. Práce obsahuje popis principu, charakteristiky důležité pro koncového uživatele a výčet výhod a nevýhod dvou základních metod bezdrátového indukčního nabíjení.

Klíčová slova

Bezdrátové dobíjení, indukční vazba, rezonanční vazba, účinnost, vzduchová mezera, WiTricity, indukčnost, rezonanční frekvence, rezonance, cívka

Abstract

My thesis deals with a description of wireless charging of electric vehicles. My first aim is to outline the principles of wireless recharging methods. My second aim is to create an insight into the development and subsequent practical use of these technologies in everyday life. My third aim is to outline advantages and disadvantages of these technologies. In general, this thesis contains a description of the principle of wireless charging, characteristics which are important for the end user and finally, the list of the advantages and disadvantages of two basic methods of wireless inductive charging.

Key words

wireless charging, inductive coupling, resonant coupling, efficiency, air gap, WiTricity, inductance, resonant frequency, resonance, coil

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 6.6.2013

Radek Mázor

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladimíru Kindlovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce a Bc. Evě Aubrechtové za profesionální pomoc při překladu anglických textů.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
BEZDRÁTOVÉ DOBÍJENÍ PRO ELEKTROMOBIL	11
1.1 HISTORIE BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU ENERGIE	11
1.1.1 <i>Historie elektromobilu</i>	11
1.1.2 <i>Vývoj bezdrátového přenosu energie</i>	13
1.2 VÝHODY BEZDRÁTOVÉHO DOBÍJENÍ	13
1.3 NEVÝHODY BEZDRÁTOVÉHO DOBÍJENÍ	14
2 ZPŮSOBY BEZDRÁTOVÉHO DOBÍJENÍ	14
2.1 METODA BEZKONTAKTNÍHO DOBÍJENÍ S INDUKČNÍ VAZBOU.....	16
2.1.1 <i>Základní princip</i>	17
2.1.2 <i>Parametry systému</i>	20
2.1.3 <i>Charakteristiky a strategie nabíjení</i>	24
2.1.4 <i>Výhody a nevýhody</i>	26
2.2 METODA BEZKONTAKTNÍHO DOBÍJENÍ S REZONANČNÍ VAZBOU.....	28
2.2.1 <i>Základní princip a technické parametry</i>	29
2.2.2 <i>Charakteristiky rezonanční spojky</i>	32
2.2.3 <i>Výhody a nevýhody</i>	41
3 MĚŘENÍ BEZDRÁTOVÉHO DOBÍJENÍ	42
ZÁVĚR	48
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	49

Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Veličina	Jednotka
C	Kapacita	[F]
\vec{dB}	Element magnetické indukce	
\vec{dt}	Element času	
d	průměr závitů	[m]
f	Frekvence	[Hz]
I	Elektrický proud	[A]
K	Poměr závitů vysílací/přijímací cívky	[-]
L	Vlastní indukčnost	[H]
M	Vzájemná indukčnost	[H]
N	Počet závitů	[-]
P	Činný výkon	[W]
r	Poloměr závitů	[m]
R_m	Magnetický odpor	[H ⁻¹]
U	Elektrické napětí	[V]
X	Reaktance	[Ω]
Z	Impedance	[Ω]
η	Účinnost	[%]
Φ	Magnetický tok	[Wb]
ω_0	Rezonanční frekvence	[Hz]
FEMM	2D software pro analýzu parametrů magnetických polí	
IGBT	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem	
MATLAB	Matrix laboratory	

Úvod

Princip bezdrátového přenosu elektrické energie byl poprvé zkoumán již v 19. století. Výzkumy byly prováděny zejména největšími vynálezci v oblasti elektroniky té doby. Hlavními průkopníky byli v Americe Nikola Tesla a v Evropě Guglielmo Marconi. A právě na jejich myšlenku začínají navazovat vědecké týmy v 90. letech 20. století.

Vědecké týmy po celém světě navazují na trend, který je například v telekomunikaci již delší dobu používán. Jedná se o bezdrátové spojení, respektive komunikaci mezi elektrickými zařízeními. Technologie jako WiFi již všichni dobře znají a velice lidem usnadňují život tím, že je zbavují potřeby kabelového propojení elektronických zařízení, čímž zvyšují komfort, který je v dnešní době tak žádaným artiklem.

Vzhledem k čím dál většímu rozvoji elektromobilů, je zapotřebí také řešit jejich největší slabinu, kterou je bezpochyby dojezd a doba dobíjení. Již zavedené kabelové přípojky nejsou tak pohodlné a nabíjení takovým způsobem je zdlouhavé a nešikovné. Z tohoto důvodu se začalo průmyslově řešit bezdrátové dobíjení pro elektromobil a právě tento způsob dobíjení bude nastíněn v této bakalářské práci.

V první řadě zde bude popsána samotná historie elektromobilů. Počínaje prvními historickými pokusy v 19. století bude dále nastíněn vývoj revolučních technologií využívaných pro bezdrátové dobíjení elektromobilů. Mimo jiné zde budou přiblíženy jednotlivé metody bezdrátového dobíjení. Dalším krokem pak bude objektivní zhodnocení výhod a nevýhod těchto metod například z hlediska technických parametrů a ceny. V následujících částech této práce bude zmíněno i měření bezdrátového přenosu výkonu, který byl proveden na Západočeské univerzitě s pomocí vedoucího mé bakalářské práce Ing. Vladimírem Kindlem, Ph.D.

1 Bezdrátové dobíjení pro elektromobil

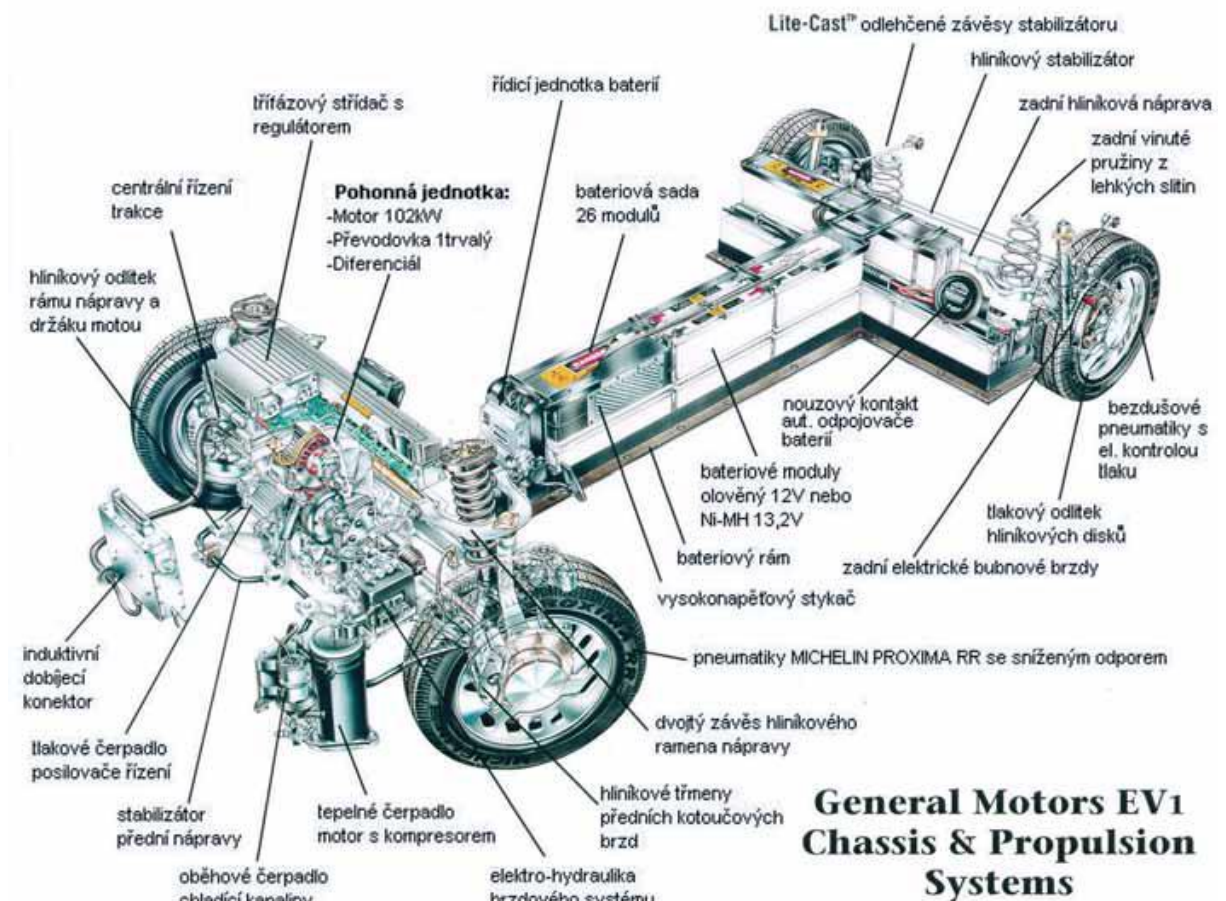
1.1 Historie bezdrátového přenosu energie

1.1.1 Historie elektromobilu

V roce 1835 profesor Sibrandus Stratingh z Groningenu v Holandsku navrhl první elektromobil, který následně zkonstruoval jeho asistent Christopher Becker. První silniční vozidlo, které dokázalo dosáhnout a dokonce překonat rychlost 100 km/h, byl elektromobil Belgičana Camilla Jenatzyho v roce 1899. V roce 1902 pak elektromobil Torpédo KID dosáhl dokonce rychlosti téměř 170 km/h. V této době se už také používaly automobily se spalovacím motorem. Nedosahovaly však takové tichosti, bezpečnosti a spolehlivosti jako elektromobil, o rychlosti výše uvedené ani nemluvě. Český vynálezce Ing. František Křížík postavil v roce 1895 svůj první elektromobil poháněný stejnosměrným elektromotorem o výkonu 3,6 kW, druhý realizovaný typ byl opatřen v každém zadním kole elektromotorem 2,2 kW. Třetí vůz jím postavený měl hybridní pohon pro prodloužení dojezdu. V té době byly ve Vídni běžně k vidění kočáry s elektrickým pohonem. Tyto vozy nabíjely své akumulátory ze zásuvek, které byly instalovány v plůtku na chodníku u známé Vídeňské Sacharovy cukrárny. Například v USA jezdilo v roce 1900 víc elektromobilů než vozů se spalovacím motorem a získaly velikou popularitu pro jednoduchost ovládání, hlavně nebylo nutné fyzicky náročné startování klikou. V tomto roce bylo vyrobeno o třetinu více elektromobilů než automobilů. Zásadní zvrat ale přinesl velký Fordův nápor, když zavedl sériovou výrobu modelu „T“, který brzy ovládl trh díky nízkým pořizovacím nákladům, ale i spolehlivosti. Tím byl elektromobil na dlouhou dobu vytlačen z výroby i dalšího vývoje.

V České republice již během první světové války proběhlo několik pokusů o využití elektromobilů, kdy Škodovy závody v Plzni vyrobily několik nákladních elektromobilů pro Plzeňské pivovary. Další výzkum a vývoj elektromobilů v České republice byl veden pouze samočinnými skupinkami tzv. „amatérů“, což ve skutečnosti byly týmy prvotřídních odborníků rozesté po celé republice. Tito jedinci se danou problematikou zabývali jen ve vlastním volném čase a na své vlastní náklady. Tento stav trval až do roku 1989, kdy se do problematiky elektromobilů začaly angažovat státní orgány.

Ve světě má ve vývoji elektromobilů nejdelší tradici automobilka Citroën, která v roce 1974 navázala na své zkušenosti ze 40. let 20. století, kdy vyrobila zhruba 100 kusů elektromobilů inspirovaných prototypem nákladního vozu TUB. V témže roce byl po spojení s automobilkou Peugeot vytvořen nový koncern s názvem PSA, který vytvořil samostatnou divizi zaměřenou na výrobu elektromobilů nazvanou PSA Electric. Stejná automobilka spustila v roce 1995 patrně největší sériovou výrobu elektromobilů všech dob. Ostatní výrobci většinou nepřekročili hranici 100 kusů ročně. Velkých pokroků ovšem dosahovaly i další velké automobilky jako například FIAT, který první zavedl sériovou výrobu elektromobilů, i když ne v takové míře jako výše zmíněný PSA. Do vývoje elektromobilů se za posledních 20 let investuje více a více finančních prostředků. Mezi největší výhody elektromobilů patří možnost využívat obnovitelnou energii s vysokou účinností, možnost okamžitého maximálního výkonu, možnost opakovaného a mnohonásobného přetížení, rekuperace energie a přesnost a jednoduchost ovládání. [1]



Obrázek 1: Průhledové schéma rámu karoserie a podvozkových součástí [1]

1.1.2 Vývoj bezdrátového přenosu energie

V roce 1820 by André Ampérem stanoven Ampérův zákon. Tento zákon říká, že elektrický proud, který prochází vodičem, vytváří kolem vodiče magnetické pole. V roce 1831 pak bylo dokázáno, že změnou indukčního toku v uzavřeném elektrickém obvodu vzniká v tomto obvodu elektrické napětí. Tomuto jevu říkáme Faradayův zákon elektromagnetické indukce. Roku 1836 zkonstruoval Nicolas Calle první elektrický transformátor. V roce 1888 pak Heinrich Hertz svými experimenty dokázal existenci rádiových vln. Mimo jiné už od roku 1891 zkoumal americký vynálezce s chorvatskými kořeny Nicola Tesla problém bezdrátového přenosu energie. V roce 1893 tak dokázal bezdrátově rozsvítit lampu a o tři roky později, tedy v roce 1896, zvládl při svých pokusech přenést energii na vzdálenost 48 kilometrů. Tyto úspěchy mu vynesly titul „Otec bezdrátového přenosu energie“. [1]

1.2 Výhody bezdrátového dobíjení

Mezi největší výhody bezdrátového dobíjení elektromobilů bezesporu patří eliminace problémů nabíjení pomocí kabelové elektrické přípojky. Další výhodou je komfort, spočívající v jednoduchém najetí na nabíjecí stanici, například na parkovišti oblíbeného obchodního domu. Navíc v České republice plánuje největší místní dodavatel elektrické energie (ČEZ) zakomponování těchto nabíjecích stanic do obchodních domů prozatím v největších českých městech jako je Praha, Brno, Ostrava, Plzeň a pár dalších. Ve Vrchlabí již skoro rok probíhají intenzivní testy právě i s těmito stanicemi. Mezi další výhody patří poměr hmotnosti nabíjecího aparátu zabudovaného ve vozidle k přenesenému výkonu. Mimořádných úspěchů se dosahuje ve vývoji rezonančních metod bezdrátového přenosu energie, kterými byl při úspěšném praktickém testu přenesen výkon 5 kW, přičemž hmotnost nabíjecího aparátu zabudovaného v podvozku elektromobilu byla pouhé 2 kg. Hmotnost byla zvýšena zanedbatelným způsobem. Jednalo se však pouze o laboratorní aparát, proto je nutné brát dosažené výsledky s rezervou. Velikou výhodou je určitě i doba dobíjení. Zatímco nabíjení pomocí kabelové nabíječky trvá podle potřebného dojezdu elektromobilu od pěti do jedenácti hodin. Při použití tzv. rychlonabíječky se dostaneme maximálně na polovinu těchto časů.[4] Bezdrátové dobíjecí stanice nám slibují dobu úplného nabití akumulátoru maximálně hodinu a půl, přičemž doba nabití na hodnotu 80% kapacity akumulátoru se pohybuje mezi 30 až 40 minutami. V neposlední řadě bychom také měli zmínit propojenost bezdrátového nabíjení, nejen elektromobilů, ale i dalších zařízení v domácnosti, které jsou součástí tzv. chytrých domů.

1.3 Nevýhody bezdrátového dobíjení

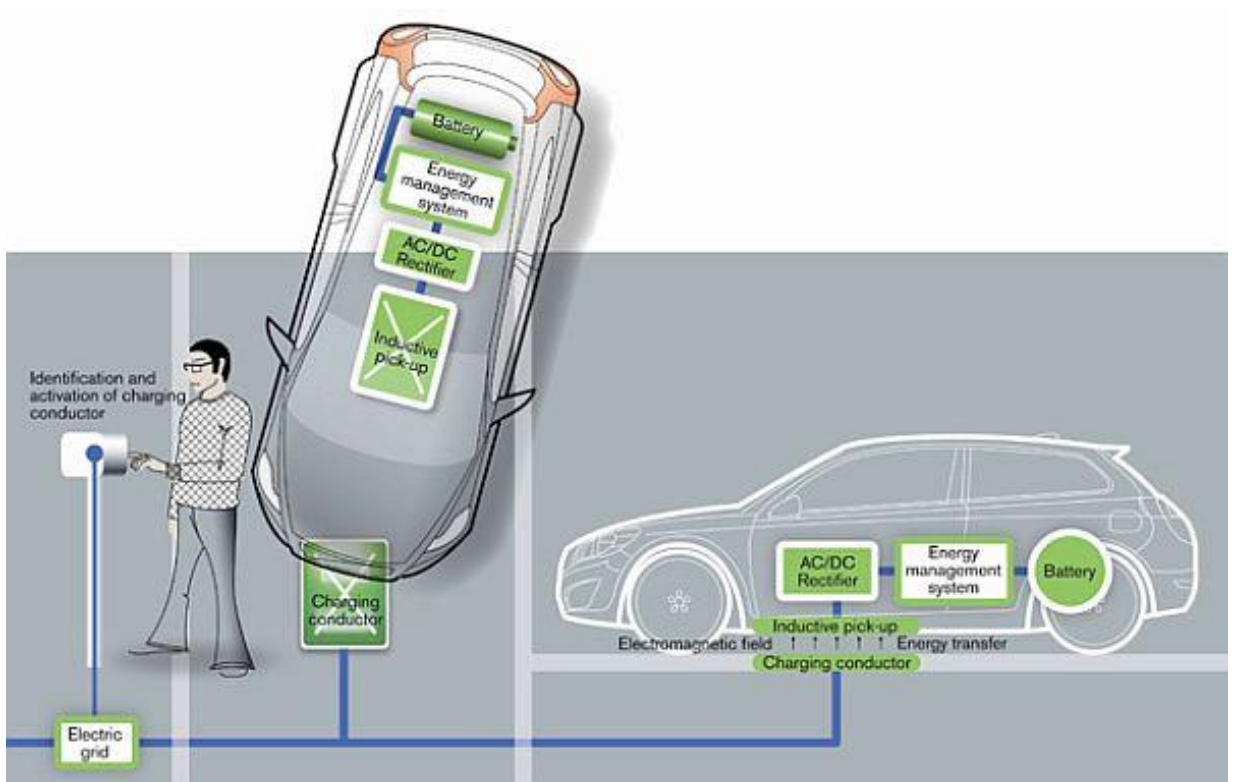
Jako zřejmě největší nevýhodu bezdrátového dobíjení pro elektromobily je nutné zmínit jejich nedostupnost. Jedná se o velice mladou technologii, která je ještě stále ve fázi výzkumu, a nikdo nedokáže se stoprocentní jistotou říci, zda bude možné tuto technologii bez větších problémů zavést do našich domácností během příštího roku či až během příštího desetiletí. Avšak výsledky jednotlivých výzkumů naznačují, že bychom měli spíše počítat s kratší z těchto variant. Překážkou bezdrátového dobíjení je také nepřipravenost městských elektrických sítí na bezdrátové nabíjecí stanice. Na tomto problému usilovně pracuje právě skupina ČEZ při již výše zmíněných testech ve městě Vrchlabí. Mezi další nevýhody (alespoň do nedávné doby) patřila bezpečnost. I když testy vyznívají zatím pozitivně z hlediska krátkodobého působení magnetického pole na člověka či zvíře, z dlouhodobého hlediska jsou bohužel prokázány negativní účinky na zdraví člověka. Proto je nutné chránit bezpečnost nejen lidí obsluhujících nabíjecí stanici, ale například i bezpečnost zvířat při nabíjení například v garáži rodinného domu. Ale i na této problematice se zapracovalo a vše je hlídáno čidly pohybu, váhy a dalšími, která kontrolují přítomnost lidí nebo zvířat v prostoru nabíjecí stanice.

2 Způsoby bezdrátového dobíjení

Bezdrátové indukční dobíjení využívá jednu ze dvou základních metod bezdrátové přenosu energie. Jedná se o využití rezonance pro přenos energie nebo o využití vzájemných indukčních vazeb mezi cívkami v systému indukčního dobíjení. Bezdrátovým dobíjením se nezabývají pouze samotné automobilky, ale také externí společnosti, které s automobilkami spolupracují.

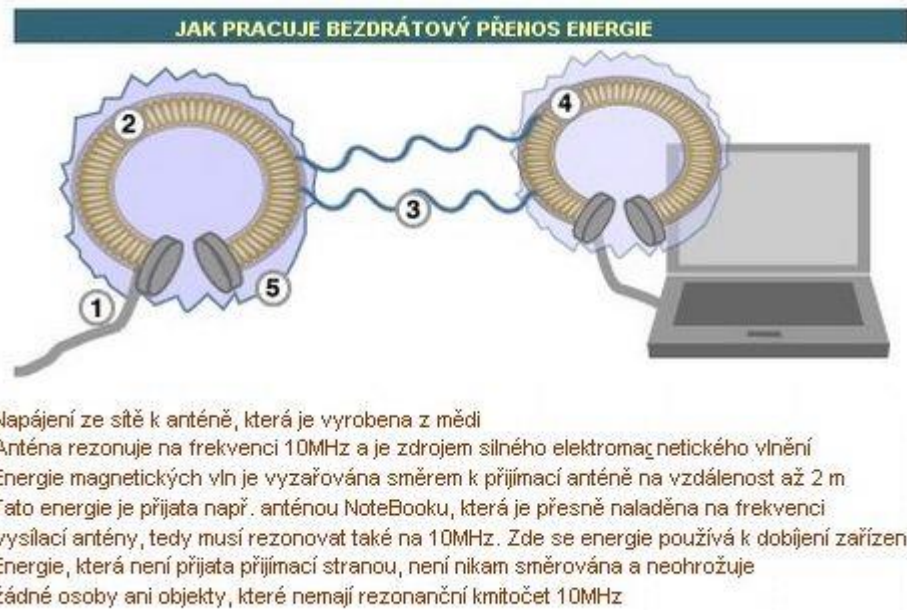
První metodou, kterou se v současné době vědci zabývají, je metoda indukčního dobíjení. Základ pro bezdrátové indukční dobíjení tvoří princip, jenž je hojně využíván v domácnostech. Jde například o indukční podložky pro dobíjení mobilních telefonů nebo elektronických zubních kartáčků. Touto metodou se zabývá společnost HaloIPT, která spolupracuje především s automobilkou Citroën čili společností PSA.[7] Do experimentu spojeným s indukční metodou přenosu elektrické energie se pustila také společnost Google, která zkouší projekt nazvaný Plugless Power.[8] Tato metoda je již v praxi využívána v automatizovaných výrobních halách automobilky Citroën. V podlaze těchto hal je umístěno vedení, které tvoří vodivou cestu pro osazovací roboty. Tito roboti jsou napájeni

prostřednictvím elektromagnetického pole, produkovaného vodivou cestou. Právě tímto systémem se inspirovali vědci při návrhu dobíjecího aparátu.



Obrázek 2: zjednodušené blokové schéma stanice Plugless Power [2]

Další metoda je založena na principu elektrické rezonance. Tato metoda se kromě dobíjení elektromobilů používá také pro dobíjení notebooků a domácích spotřebičů. Blíže se jí zabývá společnost WiTricity [3] spolupracující s automobilkou Toyota.



Obrázek 3: princip rezonančního bezdrátového přenosu energie použitý pro nabíjení notebooku [3]

V této bakalářské práci se budeme zabývat dvěma výše zmíněnými způsoby. Mimo jiné bude část této práce věnována nastínění přelomové technologie, která je již testována. Jedná se o nabíjení elektromobilu za jízdy.[9] V této technologii bylo již také dosaženo nejednoho úspěchu. Jako například můžeme uvést pokus z léta 2011, kdy se podařilo vědcům z japonské technické univerzity Toyohashi provést bezdrátový přenos elektrické energie skrze deseticentimetrový betonový blok a rozsvítit tak žárovku.[10] Jedná se zatím o nejmladší odvětví už tak velmi mladé technologie, a proto k němu zatím není dostatek literárních podkladů. Z dalších možností bezdrátového přenosu elektrické energie můžeme také zmínit využití laseru. V nedávné době proběhl praktický test s modelem vrtulníku, který se dokázal 24 hodin v kuse vznášet v jedné poloze nad zemí a byl dobíjen pomocí paprsku laserového záření, který dopadal na článek přeměňující světelnou energii laseru na energii elektrickou. Tato metoda však zatím nemá praktické využití z důvodu potřeby vysoké směrovosti pro získání přijatelné účinnosti přeměny elektrické energie, a proto se metodou použití laseru nebudeme blíže zabývat v této bakalářské práci.

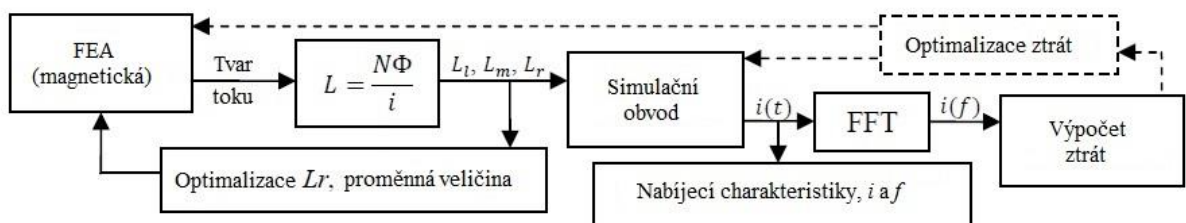
2.1 Metoda bezkontaktního dobíjení s indukční vazbou

Tato metoda je založena na principu bezdrátového přenosu elektrického výkonu přes malou vzduchovou mezeru pomocí indukční vazby mezi vysílací a přijímací cívkou.

Díky praktickým testům systémů využívajících tento přenos energie můžeme tyto systémy rozdělit na dvě skupiny. První skupinu tvoří systémy využívající přenos s vyššími frekvencemi, druhou skupinu pak tvoří systémy vycházející z principu trolejového vedení. Metoda využívající přenos na vyšších frekvencích se neobejde bez frekvenčních měničů. Tyto systémy jsou napájeny z trojfázové soustavy, baterie elektromobilu však potřebují stejnosměrné napětí, proto jsou zapotřebí také usměrňovače. Systémy založené na principu trolejového vedení zase využívají sběrací cívku. Vedení zabudované v zemi slouží jako vysílací část, která produkuje elektromagnetické pole. Sběrací cívka poté díky tomuto poli indukuje napětí do svého vinutí. V souvislosti s tímto systémem již probíhají také testy napájení elektromobilu za jízdy. Důležitými parametry této metody jsou jednak šíře vzduchové mezery mezi vysílací a přijímací stranou aparátu, a současně i jakost použitých cívek, do které musíme započítat také vliv skin efektu. Samozřejmě nesmíme opomenout nejdůležitější parametr, a to samotnou účinnost aparátu. Na celkovou účinnost mají vliv účinnosti všech měničů použitých pro přenos energie, ztráty ve vzduchové mezeře a ztráty ve vodivých cestách.

2.1.1 Základní princip

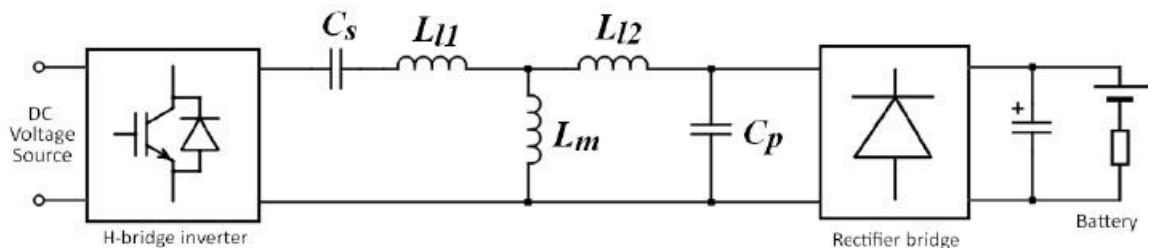
Pro bezdrátový přenos energie přes relativně velkou vzduchovou mezeru je nejprve nutné navrhnout vhodnou indukční vazbu mezi vysílací a přijímací cívkou. Neméně důležitá je potom i minimalizace výčnělků mezi vozovkou a podvozkem vozidla pro poskytnutí volného prostoru, ať už z důvodu zvýšení účinnosti přenosu anebo ochrany částí systému před poškozením. Na obrázku 4 je znázorněn vývojový diagram použitý pro analýzu a modelování při praktických testech na Durhamské univerzitě, kde se touto problematikou již dlouhodobě zabývají.



Obrázek 4: Vývojový diagram procesu použitého pro analýzu a modelování indukčního měniče [5]

Při postupu vývoje prototypů těchto technologií je nutné vycházet z parametrů odvozených z počítačového modelování a simulace systému. Pro softwarovou modelaci byl využit program FEMM, který je volně dostupný 2D software pro analýzu parametrů magnetických

polí, modelování magnetického toku a zjištění parametrů zkoušeného zařízení. Na obrázku 4 je zobrazen vývojový diagram popisující postup modelace. Modelace je provedena metodou konečných prvků, pomocí které je určen tvar magnetického pole. Následně jsou početní metodou určeny hodnoty indukčností L_b , L_r a L_m . Pro optimalizaci parametru poměrné rozptylové indukčnosti je zde zavedena zpětná vazba. Po určení těchto parametrů je možné systém simulovat. Ze simulací získáme tvar nabíjecích charakteristik proudu a frekvence. Nakonec je pomocí Fourierovy transformace proveden výpočet ztrát a následnou zpětnou vazbou pomocí opakování celého procesu je provedena optimalizace ztrát. Testovací systém je navinut na centrální části E-jádra jak na vysílací, tak na přijímací straně. Pro laboratorní test postačí cívka s 20 závitů, ovšem pro praktické využití by tento systém nebyl dostačující. Jádra jsou vyrobena z materiálu známého pod technickým názvem N27, jehož základ tvoří mangan a zinek. Jádra jsou také ošetřena práškovou laminací, což výrazně tlumí velikost vířivých proudů, a tudíž i ztráty těmito proudy jsou natolik malé, že je možné je zanedbat. Pro matematický popis systému bylo využito náhradního schématu zobrazeného na obrázku 5.



Obrázek 5: Ekvivalentní obvod pro systém použitý v testech Darnhamské univerzity [5]

Z náhradního obvodu určíme rozptylové indukčnosti obou cívek a jejich vzájemnou indukčnost. Oba tyto parametry jsou důležité pro odvození poměru rozptylové indukčnosti k indukčnosti vzájemné a jsou dány tvarem spojky, tudíž se budou lišit velikostí vzduchové mezery a jejím magnetickým odporem.[5]

Poměrnou rozptylovou indukčnost značíme L_r . Jedná se o velikost rozptylové indukčnosti, která je vztažena k indukčnosti vzájemné. Toto je možné využít místo činitele vazby, ale poměr je zde vyjádřen jako „soustředný“ poměr rozptylové indukčnosti, což je součet rozptylové indukčnosti primární cívky a rozptylové indukčnosti cívky sekundární. Tento součet je vyšší než indukčnost vzájemná. Pro testy provedené Durhamskou univerzitou byla L_r počítána jako rozptylová indukčnost jen jedné strany systému, tedy pouze strany vysílací. Poměrná rozptylová indukčnost L_r je považována za důležitější parametr než indukčnost

absolutní, a to je hlavním faktorem pro určení výstupního napětí naprázdno přijímacích cívek. Hodnoty absolutní indukčnosti mohou být doladěny počtem závitů, ale poměr indukčnosti bude stále stejný. Vlastní indukčnosti testovaného systému byly změřeny LRC metrem a pro vyjádření rozptylové indukčnosti L_l a vzájemné indukčnosti L_M bylo použito početních metod.

$$L_l = L_{l1} = L_{l2} \quad (1)$$

$$L_{OCself} = L_{l1} + L_M \quad (2)$$

$$L_{SCself} = L_{l1} + \frac{1}{\frac{1}{L_{l2}} + \frac{1}{L_M}} \quad (3)$$

$$L_l^2 - 2L_{OCself}L_l + L_{OCself}L_{SCself} = 0 \quad (4)$$

Indukční parametry získané z modelu v programu FEMM a opravdové parametry změřené a spočítané na testovaném aparátu jsou zobrazeny v tabulce 1, kde je také uvedena procentuální odchylka reálných parametrů od modelu. Rozdíly mezi modelem a testovaným systémem jsou dány zanedbáním efektů magnetického toku v rohových oblastech a rozptylovou indukčností vedení, které je v těsné blízkosti jádra.

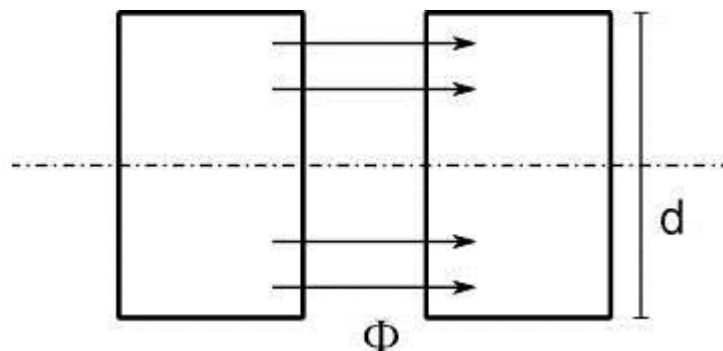
Vzduchová mezera (mm)	FEMM L_{OCself} (μH)	Měřená vlastní indukčnost obvodu naprázdno	
		L_{OCself} (μH)	Odchylka (%)
10	132,0	145,0	+9,8
50	91,2	111,0	+21,7
100	88,5	109,3	+23,5

Tabulka 1: Indukční parametry modelu systému a měřeného systému

Testovaný systém se vzduchovou mezerou o velikosti 100 mm má příliš vysokou poměrnou rozptylovou indukčnost na to, aby bylo pomocí něj přeneseno dostatečné množství energie (dokonce i program FEMM vytvořil model s velmi vysokým poměrem rozptylové indukčnosti k indukčnosti vzájemné $L_r=12$). Je tedy doporučeno, že by poměr rozptylové indukčnosti k indukčnosti vzájemné měl být nízký, tedy ideálně $L_r=0,5$.

2.1.2 Parametry systému

Důležitými parametry systému pro bezdrátové indukční dobíjení elektromobilu jsou určité geometrické parametry, respektive rozměry součástí, které jsou zabudovány do elektromobilu. Prvním takový parametrem je šířka jádra cívek. Při zvýšení šířky cívky a sousosti jádra dochází ke snížení poměrné rozptylové indukčnosti. Nicméně, velikost druhé strany je omezena fyzickými rozměry vozidla, takže design bude muset být širší a plošší, což platí i pro design plochého E-jádra. Užití maximální šířky na obou stranách spojky by bylo nutné, jen v případě vylepšení vazby. Proto nejsou potřebné mechanismy automatických oprav zarovnání a komplexnosti. Ceně a pravděpodobnosti selhání není věnováno tolik prostoru. Při testech bylo také zjištěno, že není nezbytně nutné absolutně perfektní vystředění pro optimální účinnost nižší než 10% odchylky, což znamená 10 mm odchýlení pro E-jádro široké 100 mm, při kterém účinnost významně nepoklesne. Z toho důvodu by pro řidiče stačil jednoduchý návod a jednoduché indikátory, aby připojil elektromobil k nabíjecímu systému.[5]

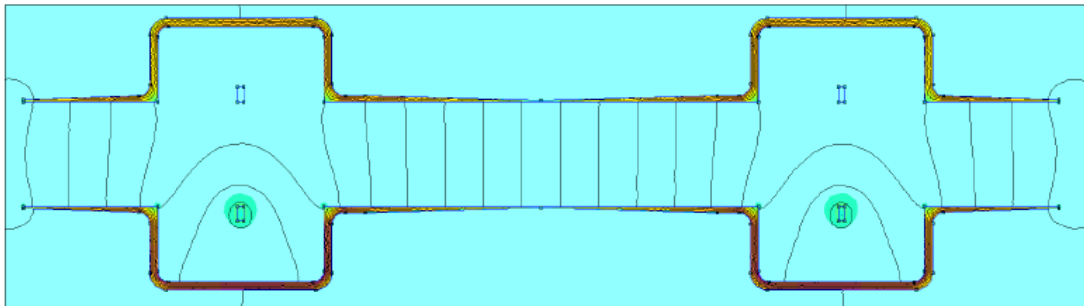


Obrázek 6: Znázornění sousosti jader cívek

Vzduchová mezera (mm)	FEMM			První metoda			Druhá metoda		
	L_l (μH)	L_m (μH)	L_r	L_l (μH)	L_m (μH)	L_r	L_l (μH)	L_m (μH)	L_r
10	56,4	75,6	0,75	108,0	37,0	2,92	104,8	40,2	1,68
50	73,9	17,3	4,27	101,6	9,41	10,8	104,9	6,11	10,7
100	81,8	6,66	12,3	106,1	3,22	32,9	107,2	2,09	40,3

Tabulka 2: Rozptylová, vzájemná a poměrná indukčnost pro různé vzduchové mezery

Při výpočtech v programu FEMM, která se týkaly umístění cívky a její blízkosti k jádru, bylo zjištěno, že se mění poměrná rozptylová indukčnost. Ideálně by cívka neměla být příliš blízko u jádra, protože to vytváří špatnou magnetickou dráhu pro rozptylový tok. Z tohoto důvodu jsou cívky umísťovány přímo uprostřed mezi rameny jádra a dál od základny, jak je ukázáno na obrázku 4.



Obrázek 7: Optimalizovaný design jádra s rozložením magnetického pole [5]

Širší jádro bude větší a těžší, což může způsobit problémy při konstrukci vozidla. Hmotnost jádra může totiž ovlivnit výkon samotného vozidla. Vysílací část systému se s tímto problémem nepotýká, protože je umístěna v podlaze místnosti. Je tedy nutné snížit hmotnost jádra. Při výpočtech v programu FEMM bylo zjištěno, že jádro může být redukováno, když sundáme jeho plášť a zachováme jen plochu povrchu na straně vzduchové mezery, jak je vidět na obrázku 4, a to bez přílišného ovlivnění poměrné rozptylové indukčnosti. Z hlediska výroby je design pláště jednodušší, protože může být sestaven z feritových desek namontovaných na podložce. V tomto případě je ocenění hodná jejich snadná dostupnost. Efekt malých vzduchových mezer mezi spáry desek bude bezvýznamný oproti velikosti hlavní vzduchové mezery. Šířka jádra je dána potřebným magnetickým tokem, který dále závisí na provozní frekvenci, proudu a počtu závitů. Šířka jádra může být optimalizována danou maximální provozní frekvencí, proudem, počtem závitů a indukci, při které je materiál jádra nasycen. Navíc bylo zjištěno, že indukce v jádru se koncentruje nejvíce u cívek, takže šířka se může zužovat směrem ke středu a koncům, aby se ještě více ušetřil materiál a šířka. [5]

Při geometrickém uspořádání zobrazeném na obrázku 7 se významně vylepšil parametr poměrná rozptylová indukčnost u vzduchové mezery o velikosti 100 mm oproti původnímu modelu zkušebního zařízení, a to 17 krát z $L_r= 12,3$ na $L_r= 0,725$, což je trochu lepší než L_r testovacího modelu zařízení s 10 mm mezerou, jak je vidět v tabulce 2. Přestože nebylo dosaženo požadované poměrné indukčnosti $L_r= 0,5$, ukázalo se, že indukční spojka byla

pro tento design jádra skvěle vylepšena. Optimální rozměry jádra včetně samotného parametru L_r jsou zobrazeny v tabulce 3. [5]

L_r poměrná ztrátová indukčnost (s koncovými efekty)	0,73
L_r (bez koncových efektů)	0,57
Šířka prostřední větve	40 cm
Šířka cívky	56 cm
Šířka vzduchové mezery	16 cm
Šířka vnější větve	14 cm
Výška jádra (pevný limit)	8 cm
Šířka jádra (pevný limit)	100 cm
Vytlačovaná hloubka (pevný limit)	100 cm

Tabulka 3: Optimalizované parametry cívek

Pokud je v zařízení použito vzduchové jádro, znamená to, že se jedná o zařízení bez pevného jádra. Toto řešení je mnohem levnější, lehčí a materiál je chráněn, ale spojky se vzduchovými jádry mají vyšší poměr rozptylové indukčnosti. Když byla šířka cívky rozšířena na maximální šířku nově navrhovaného jádra o 1 m, poměrná rozptylová indukce L_r se pohybovala okolo hodnoty 1,54, což je 2,1 krát větší hodnota, než jaké bylo dosaženo u optimalizovaného jádra s menší šířkou cívky. Proto je u jádra nutné redukovat poměrnou rozptylovou indukčnost, aby bylo maximalizováno propojení a přenos energie. Indukčnost závisí na magnetickém toku a odporu magnetického obvodu, který závisí na geometrickém tvaru jádra a vzájemném umístění cívek. Pro maximalizaci oboustranného magnetického toku mezi cívkami je vyžadován co nejmenší magnetický odpor cesty, který získáme ze vztahu:

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (5)$$

Právě tento parametr minimalizuje typický tvar E-jádra. Proto je tento tvar jádra základem použitého designu. Navíc, odpor vzduchové mezery je mnohem významnější u případu s jádrem a trvanlivost jádra nemusí být tak vysoká. Další výhodou pevného jádra je, že působí jako štít a minimalizuje tak možnost vystavení lidí rizikům působení magnetického pole, a také snižuje rizika rušení dalších elektronických zařízení. Současně kontroluje proudění toků uvnitř hranic spojky a pomáhá redukovat ztráty vířivými proudy indukovanými v jiných vodivých tělesech. [6] [18]

Rozptylové indukčnosti musí být vykompenzovány kondenzátory, aby byla maximalizována propustnost činného výkonu a zlepšeno elektromagnetické pole indukované na sekundárních

cívkách. Zvolená topologie kondenzátorů je taková, že jeden z nich (C_s) je v sérii s primární stranou rozptylové indukčnosti a druhý (C_p) je zapojen paralelně a posunut na sekundární stranu pro vzájemnou indukčnost, jak je ukázáno na obrázku 2, jako rezonanční měnič. Rezonanční frekvence LC obvodu pro sériové a paralelní zapojení je vyjádřena jako:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (6)$$

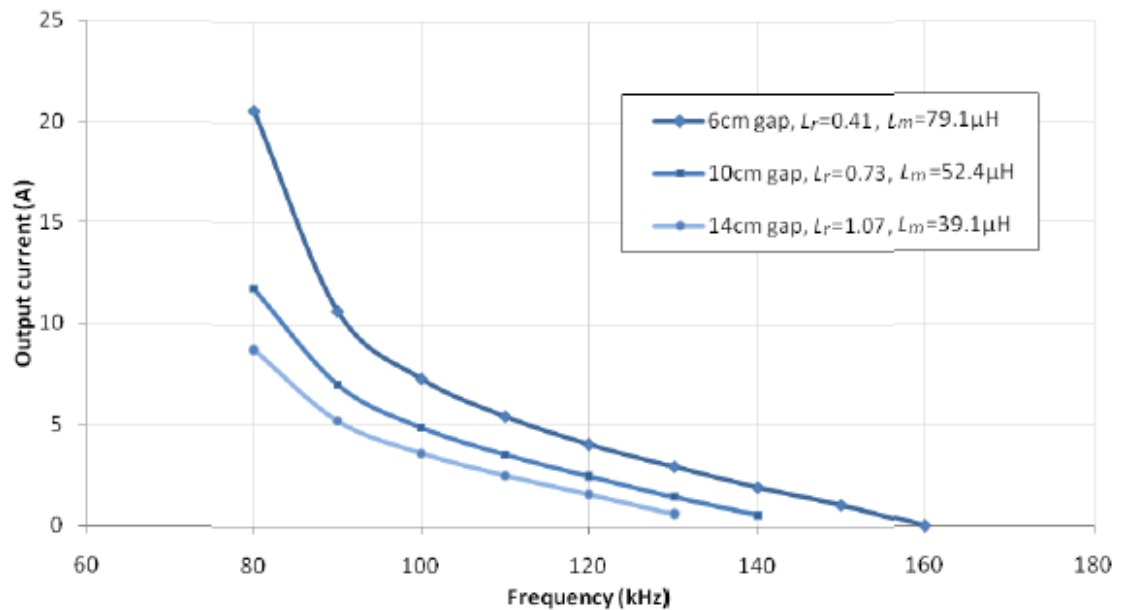
Pokud se zvýší frekvence, je zvýšena také velikost indukční reaktance ($X_L = j\omega L$) a zároveň snížena kapacitní reaktance ($X_C = 1/j\omega C$). Rezonanční frekvence vzniká, když je reaktance induktoru rovna reaktanci kondenzátoru a oba se pak v sérii vzájemně vyruší. Sériová indukčnost, která je předpokládána jako součet rozptylových indukčností, zahrnuje sekundární rozptylové indukčnosti za účelem odhadu rezonanční frekvence v sériovém zapojení. Kondenzátor v sérii také blokuje jakékoliv zpětné stejnosměrné vyvážení a slouží jako prevence před stejnosměrným nasycením jádra. V paralelním zapojení se vzájemnou indukčností se stává efektivním rozpojený obvod, protože impedance dosahuje maximálních hodnot. Nicméně by se měl brát ohled na nestabilitu, obzvláště u přepětí kondenzátorů v sériovém zapojení, což zeslabuje činnost mimo rezonanční frekvenci. Obvod funguje induktivně, pokud je operační frekvence vyšší než frekvence rezonanční. V této situaci je pak využíváno zaostávání proudu pro přepínání nulového proudu na měniči IGBT a to za pomoci tlumících diod při spuštění přechodu. Rovnice (6) také ukazuje, že menší kapacita může být využita, pokud se pracuje s vyššími rezonančními frekvencemi. [5]

Důležitým parametrem je také počet závitů a použitých cívek a jejich poměr. Poměrná rozptylová indukčnost zůstává neměnná s ohledem na počet závitů, tudíž počet závitů může být přizpůsoben požadované indukčnosti s ohledem na odporové ztráty a ztráty vířivými proudy. Zvýšením počtu závitů je dosaženo vyšších hodnot indukčností, což vede k získání lepšího magnetického pole již při nižších frekvencích, nebo k redukci velikosti vyrovnávací kapacity pro stejné rezonanční frekvence (6). Nicméně, více závitů a vyšší hodnota indukčnosti vede k většímu odporu vinutí, vyšší indukci a vyšším ztrátám vířivými proudy indukovanými do vinutí (7). Pro optimalizaci systému je tedy nutné určení vhodného počtu závitů pro lepší rozsah provozní frekvence a pro co nejmenší ztráty. Širší cívka pak bude mít větší indukčnost na jeden závit. [5] [18]

2.1.3 Charakteristiky a strategie nabíjení

Všechny kondenzátory byly nastaveny tak, že rezonanční frekvence je ovlivněna hlavně indukčností. Při simulačním experimentu bylo postupováno tak, aby bylo zjištěno, jak se mění výkon a charakteristiky v ustáleném stavu při změně vzduchové mezery, která způsobuje změnu indukčnosti, zatímco kapacity zůstávají konstantní. Ve skutečnosti velikost vzduchové mezery nezůstane vždycky konstantní, dokonce ani při nabíjení, protože závisí na váze vozidla, podvozku vozidla, kolech a hmotnosti nákladu. Parametry nové spojky použité pro tento test byly převzaty přímo z výsledků programu FEMM pro vzduchové mezery s odchylkou ± 40 mm z nominálních velikostí vzduchových mezer 100 mm a ztráty na odporu vedení a vířivé ztráty byly při tomto testu ignorovány. Kapacity byly zvoleny tak, aby byl sériový a paralelní poměr rezonančních frekvencí 0,55 pro indukčnost mezery 100 mm. Dále bylo zvoleno stejnosměrné napětí 230 V pro obě strany a energetický výkon 3 kW může být dosažen s proudem 13 A. Dokonce může být dosaženo vyšších energetických výkonů jmenovitého stejnosměrného napětí a hodnocení za předpokladu, že jádro nebude nasyceno.

Výsledky proudu v závislosti na frekvenci jsou ukázány na obrázku 8. Charakteristiky výstupního výkonu nabíjení ukazují, že výstupní výkon je se zvyšující se frekvencí nižší, což může být využito pro řízení proudu pomocí frekvence. Komunikační kanál může také poskytnout zpětnou vazbu pro informace o frekvenci a energii, a pokud je u autorizovaných vozidel aktivován, může zabránit ztrátám energie a zajistit kompatibilitu. Pokud vozidlo opustí nabíjecí prostor, měla by být nabíječka deaktivována, aby byly při pohotovostním režimu redukovány ztráty naprázdno. Měly by být použity určité limity, aby se zabránilo tomu, že by se kontrolor frekvence stal nestabilním, což by znemožnilo plnění požadavků výkonu. [5]



Obrázek 8: graf závislosti proudu na frekvenci [5]

Když se snižuje vzduchová mezera, začne klesat rozptylová indukčnost, takže sériová rezonanční frekvence stoupá a blíží se k paralelní rezonanční frekvenci a zvyšuje tak riziko nestability. Ale když se zvyšuje vzájemná indukčnost, tak paralelní rezonanční frekvence klesá, aby pomohla vyrovnat stabilitu a udržela tak výkon v potřebném rozsahu. Naopak, když se vzduchová mezera zvyšuje, roste také rozptylová indukčnost a systém se stává stabilnějším při poklesu sériové rezonanční frekvence. To je důležité kvůli vyšší pravděpodobnosti vychýlení šířky vzduchové mezery a použití vyšší rozptylové indukčnosti. Pro 60, 100 a 140 mm vzduchové mezery jsou paralelní rezonanční frekvence 90 kHz, 110 kHz a 127 kHz a posouvají se výš v závislosti na poklesu vzájemné indukčnosti. Překročení operační frekvence proudu není nebezpečné, protože sériová rezonanční frekvence je mnoho nižší, a tudíž je sériová reaktance vyšší. To také udržuje požadovanou úroveň výkonu o stejné frekvenci, proto je potřeba jen malé upravení frekvence k řízení požadavků výkonu. Rozsah simulované odchylky šířky vzduchové mezery ± 40 mm je dostatečný na to, aby byly vzaty v potaz rozdíly ve váze vozidla, a tak může systém v tomto rozsahu zůstat stabilní. [5] [6]

Bez kontroly frekvence by se zvýšila úroveň napětí na sériovém kondenzátoru C_s , a ten by se při snížení vzduchové mezery mohl stát nestabilním. Na druhou stranu, kontrolor se musí přizpůsobit vyšší frekvenci, aby bylo dosaženo stejných požadavků na výkon. Při této nové frekvenci je napětí na kondenzátoru na nižší úrovni, než na jaké bylo u původní vzduchové mezery a frekvence. [5]

2.1.4 Výhody a nevýhody

Mezi velké nevýhody těchto systémů zcela jistě patří ztráty energie. Redukce energetických ztrát zvyšuje nejen účinnost, ale také udržuje stabilní ztrátu tepla a teploty. Maximální výkon a povolené ztráty budou záviset na rychlosti chlazení. Vysoká teplota zvyšuje odpor vedení, poškozuje součástky a snižuje jejich životnost. V těchto systémech, které fungují přerušovaně, způsobují vysoké teplotní cykly tepelné namáhání, které může vést k únavě materiálu. Kontrola teploty je obzvláště důležitá u polovodičových modulů, kde se ztráty zvyšují s frekvencí při přepínání stejně tak, jako se zvyšuje ztráta vodivosti. Z toho důvodu bývá využíváno techniky soft-switchingu, aby se minimalizovala ztráta při přepínání na cykly pro vysokofrekvenční operace.

U měděných cívek se objevují významné ztráty vířivými proudy, které cirkulují v těle drátu při provozu na vysokých frekvencích z důvodu vysoké vodivosti měděného materiálu. Rovnice (7) ukazuje, že tyto ztráty mohou být významně redukovány snížením průměru drátu, jelikož je při výpočtu ztrát použita čtvrtá mocnina průměru. Stejně tak je významně omezíme rozštěpením drátu do menších dílčích vodičů vláken. Vlákná by měla být od sebe izolována, aby byl vytvořen tzv. litz wire, a aby došlo ke ztlumení vířivých proudů proudících kolmo k ose drátu. Povrchové efekty budou tedy redukovány, protože byla zvětšena povrchová oblast. [5]

$$P_{eddy} = \frac{\pi l N_t N_s d^4}{64\rho} \overline{\left(\frac{dB}{dt}\right)^2} \quad (7)$$

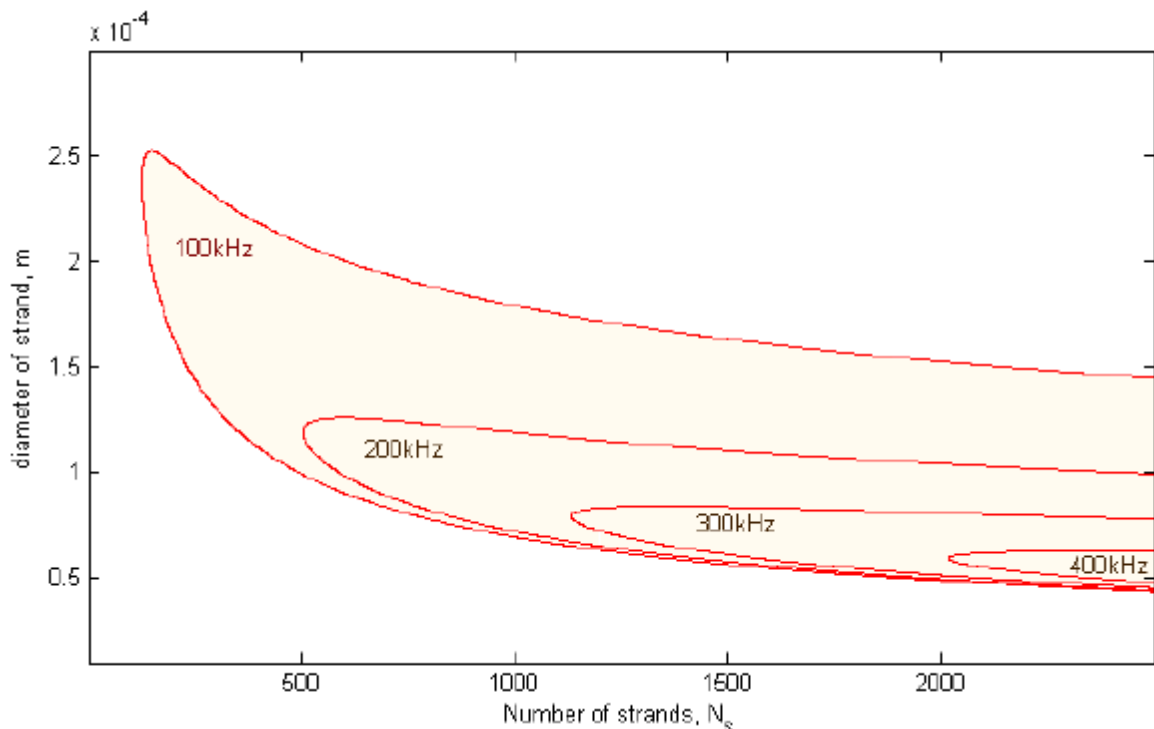
kde: l délka závitu ρ rezistivita
 N_t počet závitů B indukce kolmo k ose válce
 N_s počet vláken $\langle \cdot \rangle$ prostorový průměr oblasti vinutí
 d průměr dílčích vodičů $\overline{\cdot}$ časový průměr na základní cykly
Prostorový průměr čtvercového derivátu pole v oblasti vinutí je dán :

$$\overline{\left(\frac{dB}{dt}\right)^2} = \frac{1}{2} (2\pi f)^2 B^2 (N_t l)^2 \quad (8)$$

Křivky na obrázku 8 znázorňují tvary konstantních ztrát energie vinutí, spočítané a nakreslené v MATLABu. V potaz byly brány jak odporové ztráty vedení, tak ztráty vířivými proudy a je předpokládán výběr vysokých frekvencí s nejhorsím případem proudu o velikosti 25A. Tento obrázek ilustruje rozložení ztrát pro různé průměry a počty polovodičů, které

mohou pomoci při návrhu litz wire kabelu. V oblasti křivek je ztráta energie menší, než je velikost definované konstantní energie 25 W, a proto bez ohledu na průměr je ztráta akceptovatelná a bod, který je nejvýše vlevo na grafu, je požadovanou volbou pro systém bezdrátového dobíjení s indukční vazbou. Pro frekvence vyšší než 300 kHz je doporučen kabel litz wire o průměru 0,08 mm a 1200 vlákních. Provoz na nižších frekvencích a amplitudách proudu bude vést k zanedbatelným vířivým ztrátám. Křivka má také stejný tvar, pokud se mění proud při konstantní frekvenci. Pro další experimenty a optimalizace je doporučeno vzít v potaz faktory, jako jsou cenový limit a vyrobiteľnosť. Čím jsou užší vlákna, tím jsou dražší kabely. Průměr 0,04 mm je nejtenčí komerčně dostupný průměr u většiny výrobců litz wire. Pro určení maximálního rozpětí ztrátové energie ve vinutí by mělo být také použito tepelného modelování. [5] [18]

Použití vysokých frekvencí je nezbytné, aby systém pracoval induktivně nad hranicí rezonančních frekvencí. To napomůže k redukci velikosti kondenzátorů a snížení indukce kvůli použití menších a lehčích cívek a užších ferritových jader. Nicméně, takto vysoké požadavky na frekvenci vedou ke zvýšení hysterezních ztrát jádra, které jsou přímo úměrné frekvenci v jádře a stejně tak v měděném vinutí (8). Všechny ztráty závislé na frekvenci je třeba posuzovat v provozním rozsahu, aby byla určena proveditelnost kontroly použitých frekvencí. K těmto ztrátám je také nutné připočítat ztráty přepínáním měniče. [6]

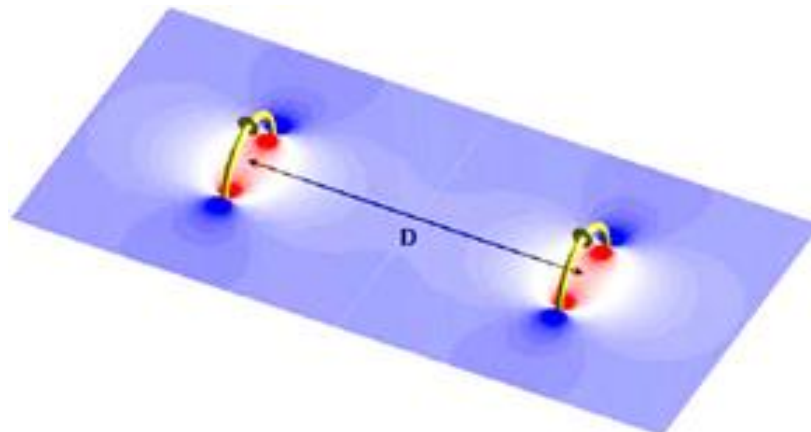


Obrázek 9: Distribuce ztrát pro různé průměry vláken Litz wire [5]

Velké vzduchové mezery mají nevýhodu ve větší rozptylové indukčnosti, a tím pádem také v nižších přenosech energie. Ovšem jádro navržené specificky pro danou velikost vzduchové mezery již dokáže značně redukovat rozptylovou indukčnost a zlepšit vzájemnou indukčnost cívek použitých v systému při zohlednění poměru mezi nimi. Tím pádem bude dosaženo i zvýšení účinnosti samotného systému. Nabíjecí charakteristiky pro E-jádro použité při testech prototypů těchto systém, které byly získány počítačovou simulací, ukazují, že ani změna vzduchové mezery až o 40%, což bylo způsobeno například změnou hmotnosti, vozidla není již problémem, což je velké pozitivum. Systém může dosáhnout přenosu výkonu až 3 kW do baterie, a to je již dostatečný výkon pro nabíjení elektromobilů. Pro systém je nutností práce s vysokými frekvencemi, které jsou ale omezeny ztrátami s nimi souvisejícími. Je tedy nutné ještě zapracovat na získání optimálních parametrů tak, aby se vyvážily výhody a nevýhody, a také, aby se maximalizovala cenová efektivita a bylo docíleno maximálního možného výkonu s ohledem na maximální přípustné tepelné ztráty a samotné tepelné namáhání součástí systému. [5]

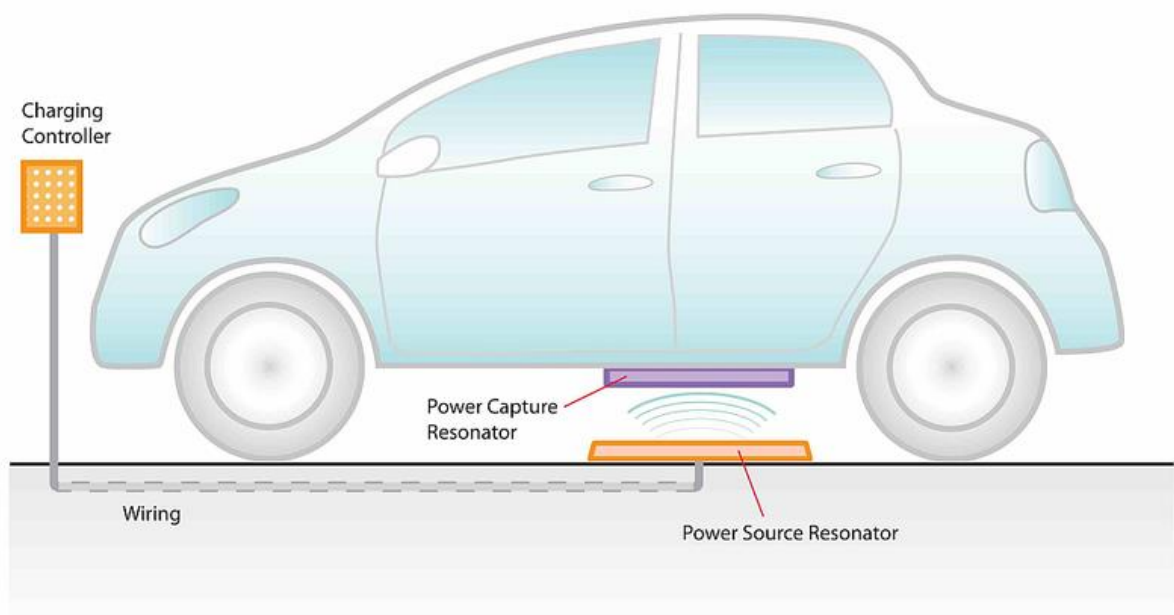
2.2 Metoda bezkontaktního dobíjení s rezonanční vazbou

Další metodou bezdrátového přenosu energie je metoda využívající rezonanční vazby mezi vysílací a přijímací cívkou. Základem této metody je rezonance. Rezonanční magnetická vazba nastane, když si dva objekty vymění energii pomocí oscilujícího magnetického pole, jak je vidět na obrázku 10. K rezonančnímu spojení dochází tehdy, když vlastní frekvence obou objektů jsou přibližně stejné.



Obrázek 10: Dvě idealizované rezonanční magnetické cívky (zobrazeny žlutě) a znázornění jejich magnetických polí (červená a modrá) [12]

Systémy využívající této vazby jsou známy pod patentovaným označením WiTricity. Označení WiTricity vzniklo ze spojení anglických slov wireless (bezdrátová) a elektricity (elektrina). Technologie WiTricity spočívá ve speciálně navrženém vysílači a přijímači energie, který představují magnetické rezonátory schopné účinně přenášet výkon na velké vzdálenosti pomocí magnetického pole. Samotný systém bezdrátového dobíjení využívající princip technologie WiTricity je velice podobný systému využívajícímu indukční vazbu, který byl popsán výše. [12] [15]

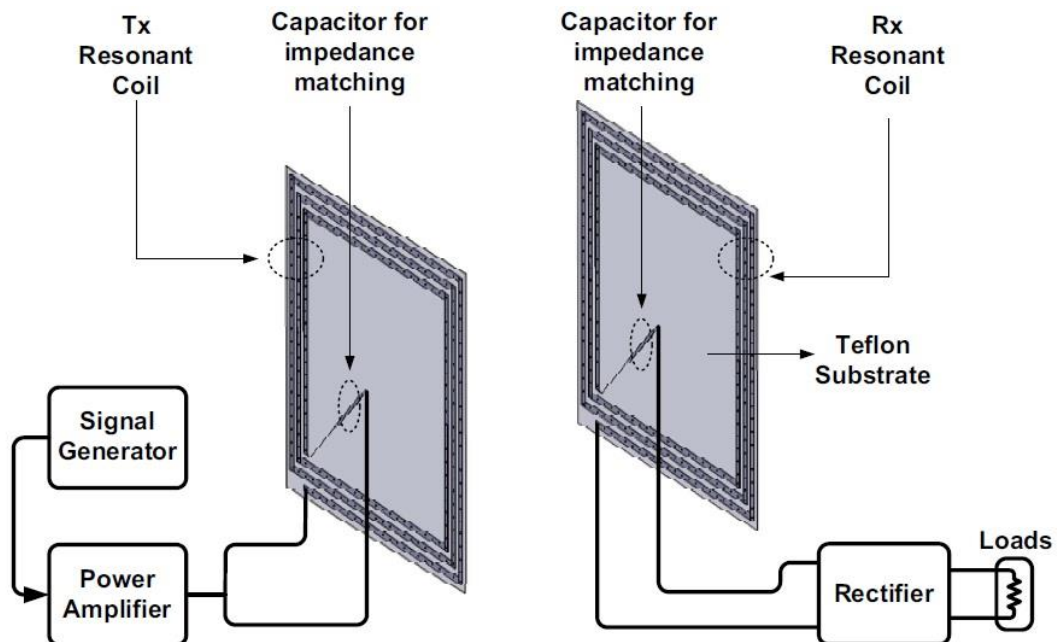


Obrázek 11: Zjednodušené blokové schéma nabíjecí stanice WiTricity [11]

2.2.1 Základní princip a technické parametry

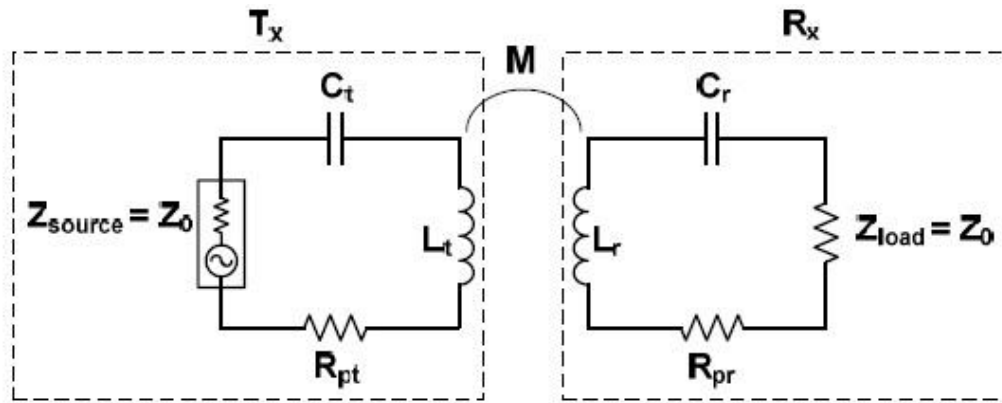
Aby bylo dosaženo vysoké účinnosti přenosu, musí být brán ohled na několik faktorů, například na polarizaci vysílací a přijímací antény, rezonanční frekvence, uspořádání a vzdálenost. Na krátké vzdálenosti je doporučeno induktivní spojení, protože se jedná o přenos na vzdálenosti menší, než je vlnová délka vlny. Tato technologie má velmi dobrou přenosovou účinnost v rámci několika centimetrů. Nicméně, účinnost ve vzdálenostech vyšších než pár centimetrů se rapidně snižuje, pokud je přijímací cívka posouvána dále od cívky vysílací. Poté je nutné vedení vlnově přizpůsobit. Tímto problémem se zabýval tým vědců na Tokijské univerzitě. [17]

Systém využívající rezonanční vazbu pro výzkumné účely se skládá ze zdroje energie, hlavní cívky, vzduchové mezery mezi hlavní cívkou a vysílací rezonanční cívkou Tx, samotné rezonanční cívky Tx, vzduchové mezery mezi Tx a přijímací rezonanční cívkou Rx, rezonanční cívky Rx, nabíjecí cívky a zátěže. Tokijská universita pro své testy nepoužila systém pro nabíjení elektromobilu, ale pro nastínění problematiky použila jinou zátěž, proto stačil přenos menších výkonů. Avšak z teoretických předpokladů se dá usoudit, že systém bude možné použít i pro praktické testy právě s elektromobilem. Testovací zařízení je zobrazeno na obrázku 12. Cívky byly vyrobeny z teflonových substrátů, které byly zvoleny pro jejich dobrou dostupnost, proto se dá předpokládat značné zlepšení vlastností při použití lepších materiálů.



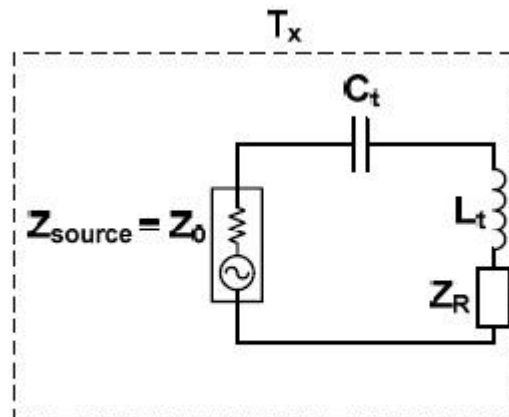
Obrázek 12: Systém pro bezdrátový přenos energie s užitím magneticky spojených rezonančních cívek [17]

Vysílač se skládá z více závitové spirálovité cívky zahrnující také kondenzátory pro nastavení rezonančního kmitočtu. Generátor signálu vytváří energii při určité frekvenci, a ta je následně zesílena v zesilovači. Poté zesilovač energie vybudí vysílací rezonanční cívku spojenou s kondenzátorem vyrobeným ze stejného substrátu. Je nutné podotknout, že přijímací rezonanční cívka je totožná s cívkou vysílací.[17]



Obrázek 13: Náhradní obvod pro systém zobrazený na obr. 11 [17]

Na obrázku 13 je zobrazen náhradní obvod systému použitého tokijskou univerzitou. Kde C_t je kapacita pro vyrovnání impedance vysílače, C_r je kapacita pro vyrovnání impedance přijímače, L_t je indukčnost vysílací cívky, L_r pak indukčnost cívky přijímací, M představuje vzájemnou indukčnost mezi vysílací a přijímací cívkou, R_{pt} je parazitní odpor vysílače a R_{pr} je parazitní odpor přijímače. Nicméně, R_{pt} a R_{pr} jsou zanedbávány, protože jsou obvykle mnohem menší než Z_{load} . Pro analýzu základního modelu ukázaného na obrázku 13 bylo použito modelu modifikovaného s odraženou impedancí, jak je vidět na obrázku 14, který zahrnuje také efekt nabíjení přijímače ve vysílacím obvodu. [17]



Obrázek 14: Modifikovaný model pro analýzu systému [17]

Tato impedance se potom vypočítá ze vztahu:

$$Z_R = \frac{\omega^2 M^2}{Z_{Rx}} \quad (9)$$

kde Z_{Rx} je výsledná impedance přijímače a může být vyjádřena jako:

$$Z_{Rx} = j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r} + Z_{Load} \quad (10)$$

a M je vzájemná indukčnost [17] a může být zapsána jako:

$$M = \frac{2k\sqrt{L_1}\sqrt{L_2}}{\omega} \quad (11)$$

kde k je činitel vazby [17] a je definován jako:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1}\sqrt{L_2}} = \frac{f_{even}^2 - f_{odd}^2}{f_{even}^2 + f_{odd}^2} \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (12)$$

kde f_{even} a f_{odd} jsou rezonanční frekvence sudých a lichých módů.

Dosazením (10) do (9) je odražená impedance přeepsána:

$$Z_R = \frac{\omega^4 C_r^2 M^2 (Z_{Load}) - j\omega^3 C_r M^2 (\omega^2 C_r L_r - 1)}{(\omega^2 C_r L_r - 1)^2 + \omega^2 C_r^2 (Z_{Load})^2} \quad (13)$$

kde Z_R na rezonační frekvenci (viz. str. 22) se stává jednoduchou následující rovnicí

$$Z_R = \frac{\omega^2 M^2}{Z_{Load}} \quad (14)$$

Z těchto vztahů můžeme získat podmínku optimalizace rezonance a maximalizace přenosu.

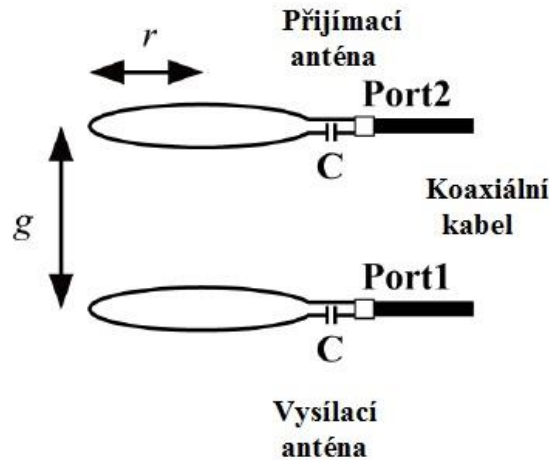
2.2.2 Charakteristiky rezonanční spojky

Je důležité navrhnout takové parametry systému, aby byla co nejvíce maximalizována účinnost i vzdálenost mezi vysílací a přijímací cívkou. Tímto problémem se v minulosti také zabývalo více vědeckých týmů. Za použití indukční vazby byla překonána vzduchová mezera

o velikosti jen několik centimetrů s požadovanou účinností. V současné době se vzduchová mezera pohybuje okolo 10 cm při frekvenci 20-40 kHz. Z tohoto důvodu byla navržena technologie elektromagnetické rezonanční spojky. Tato technologie dokáže uskutečnit bezdrátový přenos energie při vysoké účinnosti přes velké vzduchové mezery. Účinnost se pohybuje okolo 90% uvnitř 1 metru šířky vzduchové mezery a 45-50% u dvoumetrové vzduchové mezery. Tato technologie se nazývá WiTricity a byla teoreticky navržena v roce 2006 a ověřena v roce 2007. Tokijská univerzita se soustředila na efekt změny parametrů antén pro magnetickou rezonanční spojku. Pro výzkum byly vytvořeny náhradní obvody pro obě rezonanční spojky, jak magnetickou, tak elektrickou. Na dalších řádcích bude přiblížena problematika získání maximální účinnosti ve vztahu ke změně vzduchové mezery, a to pomocí použití náhradního schématu a analýzy elektromagnetického pole. [15]

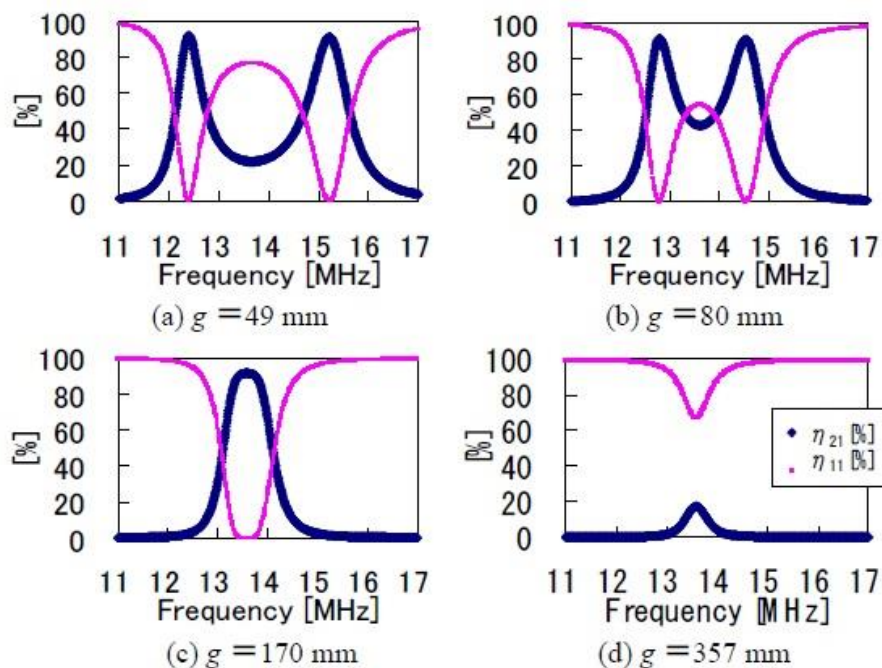
Bezdrátový přenos energie pomocí magnetické rezonanční spojky funguje, pokud jsou vysílací a přijímací antény v rezonanci, a pokud jsou jejich rezonanční frekvence stejné. Tento systém vytváří perspektivní přenos energie přes relativně velké vzduchové mezery při zachování vysoké účinnosti. Bezdrátový přenos energie je dosažen použitím spojek magnetického pole, proto je možné předejít radiaci, a tím pádem je přenos naprosto bezpečný. Systém využívá spirálové antény. Jedná se o otevřený typ antény, která je sama o sobě rezonanční a využívá vlastní indukčnost a kapacitu. Proto jsou tyto její parametry velice důležité pro návrh těchto systémů. Antény pro magnetické rezonanční spojky mají velmi vysoké Q , které je ovlivněno impedancemi spojenými s anténou. [15] [17]

Systém, který je používán pro analýzy elektromagnetického pole tokijskou univerzitou, využívá model s malým typem spirálových antén. Tyto antény jsou složeny ze dvou prvků, kdy vysílací a přijímací anténa jsou stejné. Parametry těchto antén jsou ukázány na obrázku 15. K obvodu antény je sériově zapojen kondenzátor pro vyrovnání impedance. Rádus r je 150 mm a parametr velikosti vzduchové mezery je nazván g . [15]



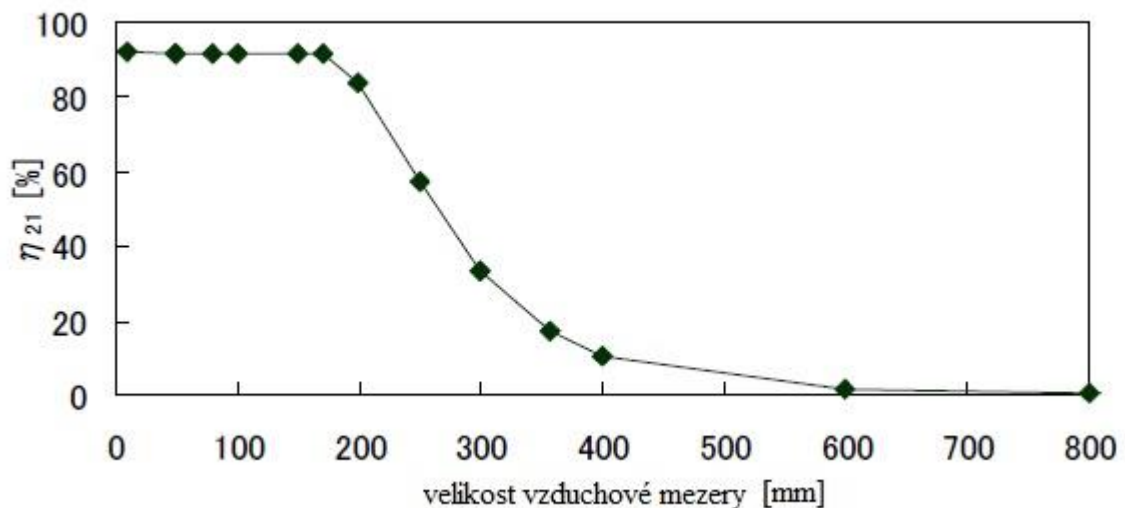
Obrázek 15: Parametry spirálových antén [15]

Pomocí analýzy elektromagnetického pole je zkoumána závislost použité frekvence a získaná účinnost na velikosti vzduchové mezery. Pro analýzu byla použita metoda momentu. Velikosti vzduchových mezer jsou stanoveny na 49 mm, 80 mm, 170 mm a 357 mm. Charakteristiky popisující tuto závislost jsou zobrazeny na obrázku 16. Při jejich vykreslení byla použita charakteristická impedance 5Ω . Výstup napájení je na portu 1 a proudí od vysílací antény přes vzduchovou mezeru k anténě přijímací a vstupuje do portu 2, který vysílá energii. Účinnost je reprezentována η_{21} . Část energie A se odrazí a vrací se zpět k portu 1. Poměr odražené energie je popsán parametrem η_{11} . [16]



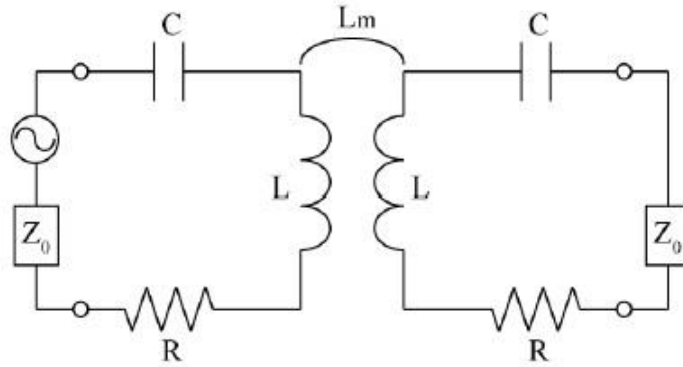
Obrázek 16: Závislost účinnosti na frekvenci pro různé vzduchové mezery [15]

Z grafů vyplývá, že pokud je velikost vzduchových mezer malá ($g=49$ mm nebo 80 mm), tak je možné přenos uskutečnit při rezonančních frekvencích f_m, f_e , kdy $f_m < f_e$. Frekvence f_m je rezonanční frekvence magnetického pole a frekvence f_e je rezonanční frekvence pole elektrického. Většina energie, která není přenesena, je odražena zpět k portu 1. Zbytek energie, která není ani přenesena, ani odražena, je ztracena ve vnitřním odporu systému. Když se vzduchová mezera zvětší z $g=49$ mm na $g=80$ mm, jsou si hodnoty rezonanční frekvence velmi blízké. Pokud se ale vzduchová mezera zvětší na $g=170$ mm, stává se ze dvou rezonančních frekvencí jedna a účinnost s touto rezonanční frekvencí je stejná jako účinnosti u menších vzduchových mezer. Jednotná rezonanční frekvence je stejná pro obě antény. Když je vzduchová mezera zvětšena na $g=357$ mm, účinnost se rapidně zhorší. Tyto výsledky jsou potvrzeny také na obrázku 17, který popisuje účinnost systému při rezonančních frekvencích v závislosti na šířce vzduchové mezery. [15]



Obrázek 17: Závislost účinnosti na velikosti vzduchové mezery [15]

Rozlišujeme dva druhy rezonance. První je vlastní rezonance řízená, kterou řídíme vlastní indukčností s parazitní a vlastní kapacitou antény a druhý typ je externě vybuzená rezonance řízená vlastní indukčností antény a připojenou kapacitou. Anténu nahradíme ekvivalentním obvodem, a jak anténa, tak jev jsou reprezentovány sériovou rezonancí L a C , jak je vidět na obrázku 18.[15]



Obrázek 18: Náhradní obvod magnetické rezonantní spojky [15]

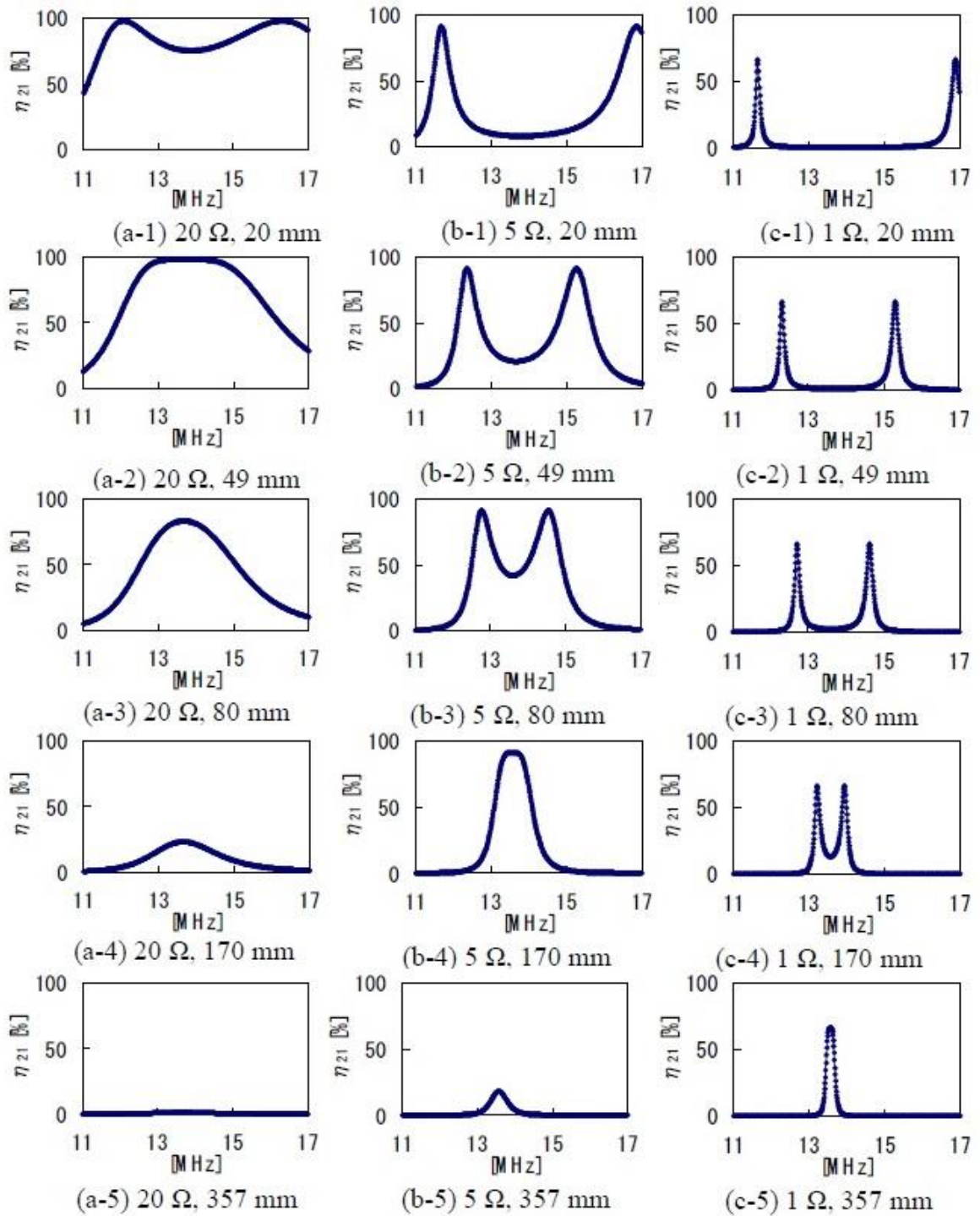
Rovnice (14) vyjadřuje samotný přenos systému. Vztah přenosu a účinnosti vyjadřuje rovnice (15) a rovnice (16) odraženou energii. Parametry L a C jsou stejné pro obě antény. Hodnoty vlastní indukčnosti L antén jsou 1115 nH, vnitřní odpory R jsou 0,22 Ω a připojené kondenzátory mají kapacitu 120 pF.

$$S_{21}(\omega) = \frac{2jL_m Z_0 \omega}{L_m^2 \omega^2 + \left\{ (Z_0 + R) + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \right\}^2} \quad (15)$$

$$\eta_{21} = |S_{21}|^2 \times 100 [\%] \quad (16)$$

$$\eta_{11} = |S_{11}|^2 \times 100 [\%] \quad (17)$$

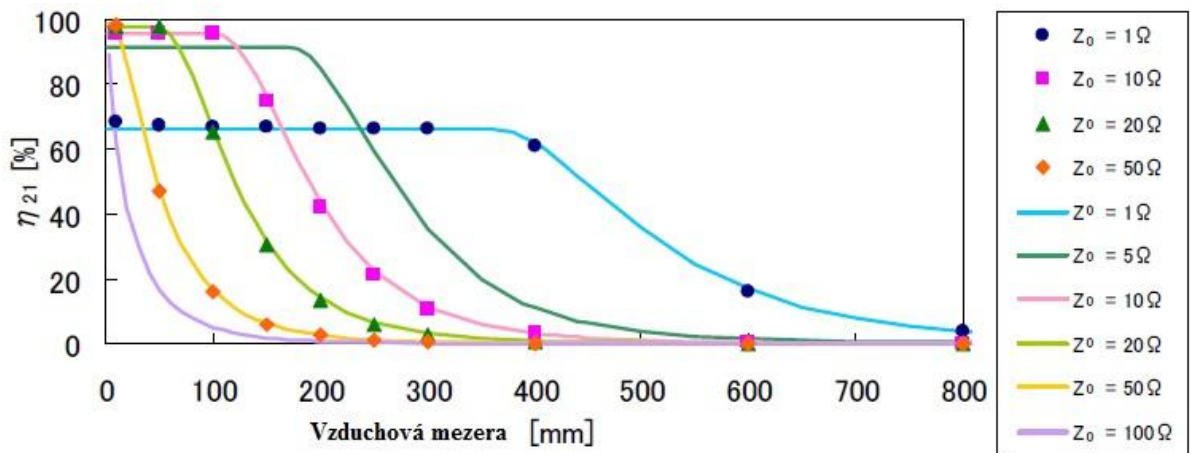
Stejně důležitý jako vliv změny velikosti vzduchové mezery mezi anténami je také vliv změny vlnové impedance, které určují obvody připojované k anténám. Tyto parametry totiž také velice ovlivňují konečnou kvalitu přenosu. Na obrázku 19 jsou pro reprezentaci vlivů změny velikosti vzduchové mezery a změny velikosti vlnové impedance zobrazeny charakteristiky závislosti účinnosti na frekvenci pro všechny testované hodnoty. Vlnová impedance se pohybuje mezi hodnotami 20 Ω , 5 Ω a 1 Ω a vzduchové mezery jsou nastavovány na 20 mm, 49 mm, 170 mm až na 357 mm. Pro každou z uvedených vlnových impedancí se při zvětšení vzduchové mezer dvě rezonanční frekvence přiblíží a následně se spojí v jednu rezonanční frekvenci. Po spojení rezonančních frekvencí získáváme vysokou účinnost přenosu energie. Pokud je i nadále zvyšována velikost vzduchové mezery, účinnost systému rapidně klesá. Tomuto jevu zabráníme zvýšením vlnové impedance připojené k anténám. Ale pokud připojíme vysokou vlnovou impedanci pro menší vzduchovou mezeru, účinnost také klesá. To dokazuje, že je nutné měnit vlnovou impedanci podle velikosti vzduchové mezery. [15] [16]



Obrázek 19: Grafy závislosti účinnosti na frekvenci pro různé velikosti vzduchové mezery a vlnové impedance [15]

Detailní vztah účinností dvou rezonančních frekvencí a vzduchových mezer (obr. 7) je ukázán na obrázku 20. Na obrázku 20 jsou vykresleny nejen výsledky při užití náhradních obvodů, ale i výsledky analýzy elektromagnetického pole, aby byla ověřena přesnost výsledků náhradních obvodů. Křivky reprezentují výsledky náhradních obvodů a body

výsledky analýzy elektromagnetického pole. To dokazuje přesnost měření, protože body náležejí jednotlivým křivkám a potvrzuje výsledky z obrázku 19. [16]



Obrázek 20: Graf závislosti účinnosti na vzduchové mezeře [15]

Jak vyplývá z výsledných grafů, maximální účinnosti u systémů s magnetickou rezonanční spojkou je dosaženo po spojení rezonančních frekvencí. Z rovnice (18) vyplývá, že po spojení rezonančních frekvencí je tato frekvence rovna rezonanční frekvenci jednoho prvku. Rovnice (19) popisuje účinnost při rezonanční frekvenci ω_0 , která je definována rovnicemi (15) a (18). Maximum v rovnici (18) je maximum jedné rezonanční frekvence. Podmínka maximální účinnosti při jedné rezonanční frekvenci je definována rovnicí (22) z (20) a (21). Rovnice (22) je definována jen čtyřmi parametry: L_m , Z_0 , R , ω_0 , které definují podmínku maximální účinnosti. Podmínkou pro rovnici (23) je použití dvou rezonančních frekvencí a (24) je podmínkou rovnice po sjednocení rezonančních frekvencí s horší účinností. Rovnice maximální účinnosti je definována (25) nebo (26) z (19) a (22). Rovnice (25) a (26) jsou stejné. Rovnice (25) je definována vztahem R a Z_0 . Rovnice (26) je definována vztahem Z_0 , ω_0 a L_m , kdy L_m je vztaženo k vzduchové mezeře. Rovnice (26) vyjadřuje vztah vzduchové mezery k maximální účinnosti. Druhá mocnina vzájemné indukčnosti L_m je nepřímo úměrná maximu rovnice. [15] [16]

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Leftrightarrow \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (18)$$

$$S_{21}(\omega_0) = \frac{2jL_m Z_0 \omega_0}{L_m^2 \omega_0^2 + (Z_0 + R)^2} \quad (19)$$

$$\frac{\partial |S_{21}(Z_0)|}{\partial Z_0} = \frac{2L_m \omega_0 (R^2 + L_m^2 \omega_0^2 - Z_0^2)}{(Z_0^2 + 2RZ_0 + R^2 + L_m^2 \omega_0^2)^2} \quad (20)$$

$$\frac{\partial |S_{21}(Z_0)|}{\partial Z_0} = 0 \quad (21)$$

$$L_m^2 = \frac{Z_0^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (22)$$

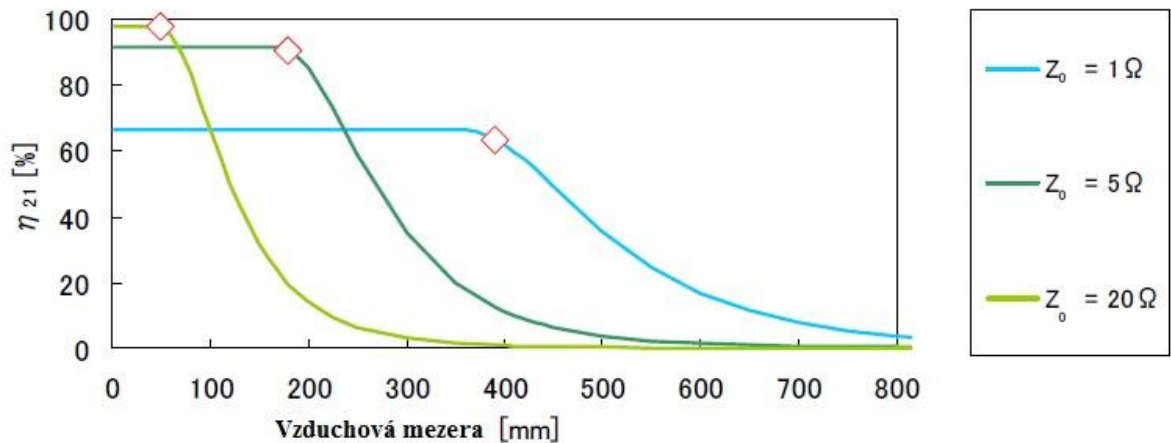
$$L_m^2 > \frac{Z_0^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (23)$$

$$L_m^2 < \frac{Z_0^2 - R^2}{\omega_0^2} \quad (24)$$

$$\eta_{21}(\omega_0) = \frac{Z_0 - R}{Z_0 + R} \quad (25)$$

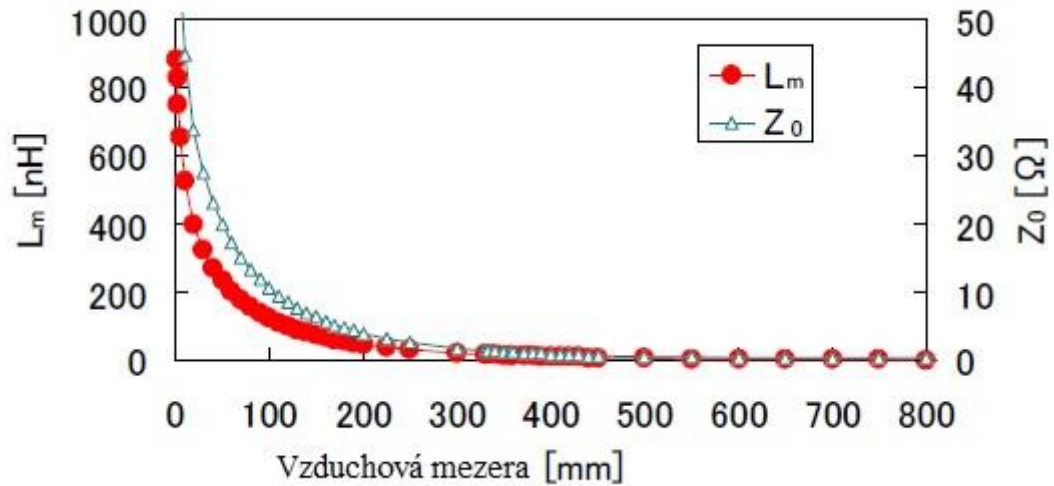
$$\eta_{21}(\omega_0) = \frac{Z_0 - R}{L_m^2 \omega_0^2} = \frac{L_m^2 \omega_0^2}{(Z_0 + R)^2} \quad (26)$$

Grafy závislosti účinnosti na velikosti vzduchových mezer pro vlnové impedance o velikostech 1 Ω , 5 Ω a 20 Ω z obrázku 20 jsou vykresleny znovu na obrázku 21.



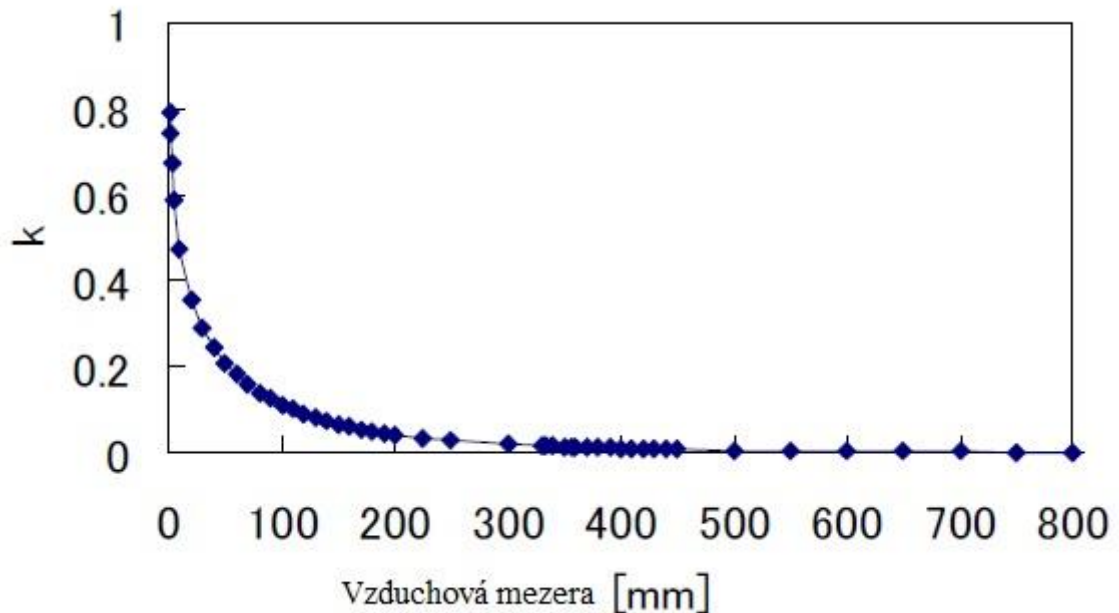
Obrázek 21: Graf závislosti účinnosti na velikosti vzduchové mezery pro jednotlivé hodnoty vlnové impedance [15]

Zvýrazněné body na obrázku 21 jsou maximální dosažené vzduchové mezery při získání maximální účinnosti jednotlivých vlnových impedancí. Tato podmínka je definována (22) a parametry obvodu jsou určeny následovně: vnitřní odpor R je 0,22 Ω a rezonanční frekvence je 13,56 MHz. Velikosti L_m a Z_0 vzhledem k velikosti vzduchové mezery jsou zobrazeny na obrázku 22 a jsou odvozeny z rovnic (22) a (26). [15]



Obrázek 22: Graf parametřů vzájemné indukce a vlnové impedance v závislosti na velikosti vzduchové mezery [15]

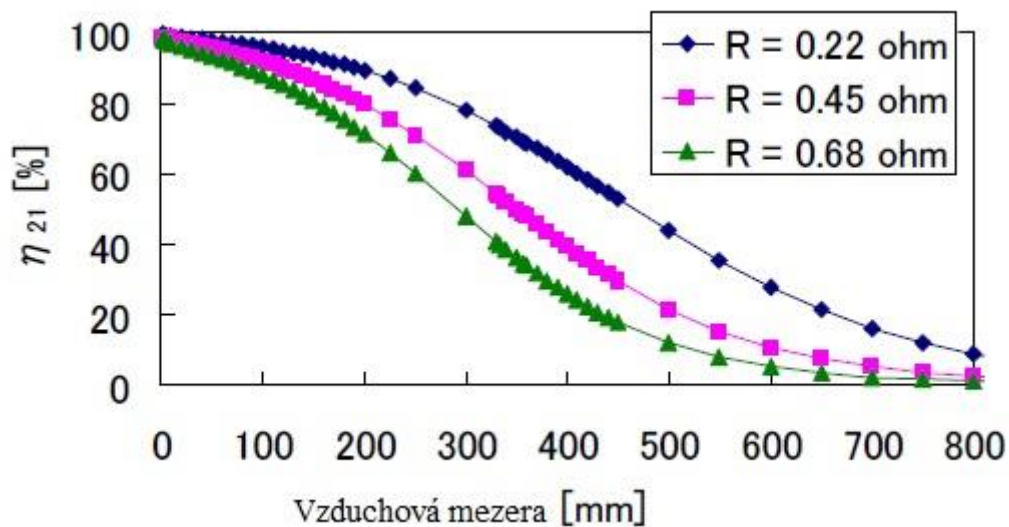
Činitel vazby k je ukázán na obrázku 23. Vysoká účinnost bezdrátového přenosu energie je podmíněna vysokou hodnotou vzájemné indukčnosti. Činitel vazby je pro velké vzduchové mezery pod hranicí 0,1. [15]



Obrázek 23: Graf závislosti činitele vazby na velikosti vzduchové mezery [15]

Posledním z parametrů ovlivňujících výše uvedenou rovnici pro určení maximální účinnosti je vnitřní odpor R . Na obrázku 24 je zobrazen vliv změny vnitřního odporu spojky na maximální dosažitelnou účinnost. S rostoucím vnitřním odporem se účinnost samozřejmě

snižuje a to jen potvrzuje teoretické předpoklady, že vnitřní odpor drátů by měl být co nejnižší. [15]



Obrázek 24: Graf závislosti účinnosti na vzduchové mezeře pro různé hodnoty vnitřního odporu vedení [15]

Rezonanční frekvenci ω_0 je možné variovat změnou L a C , které je spojené s anténou. Vzduchové mezery se zvětšují, pokud se zvětšuje rezonanční frekvence, ale na druhou stranu se vzduchové mezery zmenšují, pokud se snižuje rezonanční frekvence. [16]

2.2.3 Výhody a nevýhody

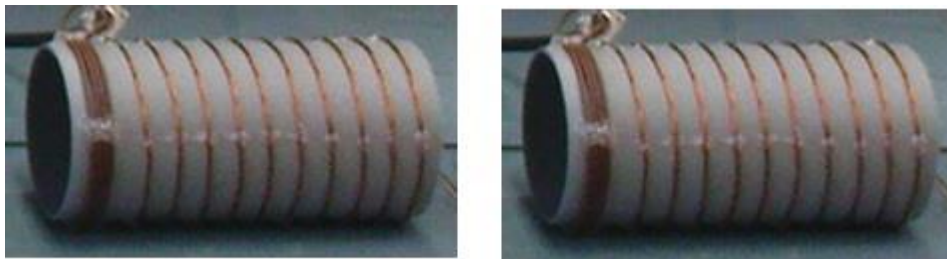
Velikou výhodou technologií využívajících rezonanční vazbu oproti technologiím, které využívají vazbu indukční, je určité přenosová vzdálenost, která se v dnešní době u technologií WiTricity pohybuje okolo hranice 1 m s účinností více než 95%. Pro maximalizaci účinnosti systému byly pomocí provedených testů stanoveny čtyři důležité parametry: vzájemná indukce L_m , vlnová impedance Z_0 , vnitřní odpor R a rezonanční frekvence ω_0 . Maximální účinnosti u všech vzduchových mezer bylo dosaženo při nastavení optimalizovaných vlnových impedancí.

Jako nevýhodu tohoto systému musíme určitě zmínit potřeby vyšších frekvencí, než jakých bylo zapotřebí u systémů s indukční vazbou. Účinnost systémů WiTricity je zhruba o 3 až 5% vyšší než u systémů využívajících indukční vazbu. Testy nabíjecích podložek využívajících technologii WiTricity již probíhají a jsou známy i technické parametry těchto systémů. Velmi

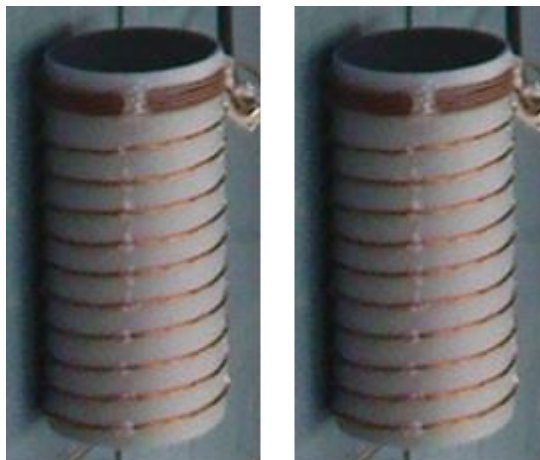
příjemným zjištěním bylo, že tyto aparáty snížily provozní frekvenci na 145 kHz, což je velký pokrok oproti teoretickým předpokladům získaným z výzkumů vědeckých týmů. [14] [15]

3 Měření bezdrátového dobíjení

I na Západočeské univerzitě byl již zhotoven prototyp pro testování přenosu energie pomocí rezonanční vazby. Zapojení se skládá z wattmetru, radiostanice sloužící jako zdroj výkonu, můstku pro přizpůsobení zátěže, z dalšího wattmetru pro měření přeneseného výkonu a z vysílací a přijímací cívky. První wattmetr obsahuje dvě stupnice. Na pravé stupnici je měřen vstupní výkon a na levé stupnici je měřen odražený výkon. Radiostanice je schopna dodávat výkon 100 W, ale měření probíhalo zatím s podstatně nižšími výkony. Přizpůsobením vedení se dosahuje snížení odraženého výkonu a zvýšení přeneseného výkonu, a tím pádem také zvýšení účinnosti přenosu. Vysílací a přijímací cívky měly nejdříve převod $K=1/4$. Měření proběhlo jak s cívkami řazenými sériově (obr. 25), tak s paralelním řazením cívek (obr. 26).



Obrázek 25: Sériové řazení cívek



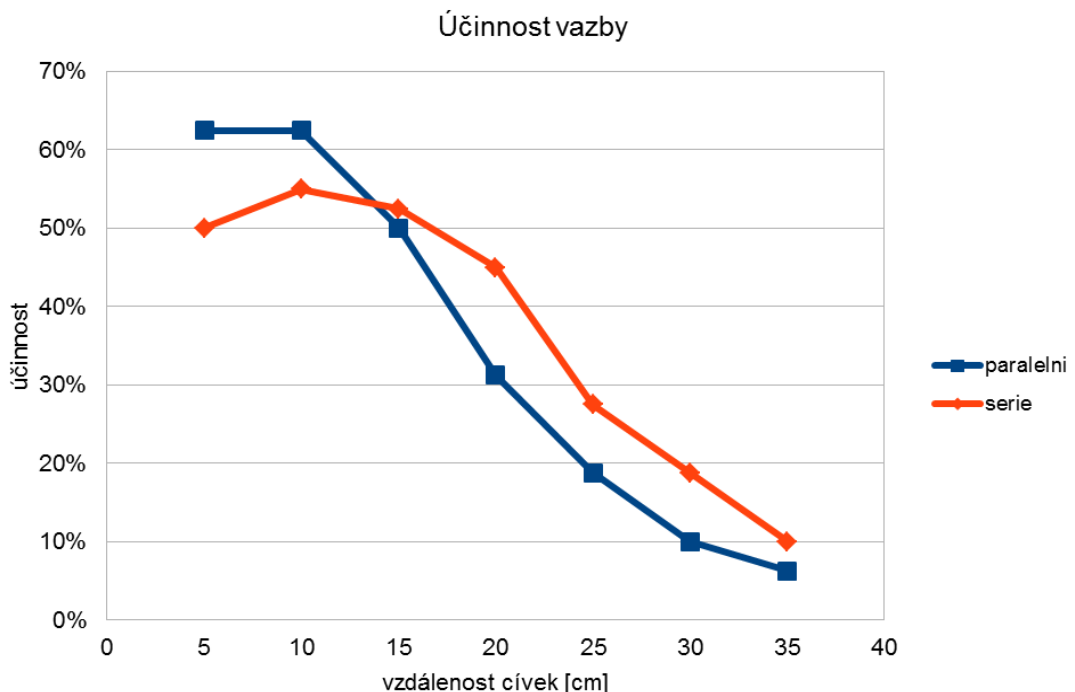
Obrázek 26: Paralelní řazení cívek

Měřením s $K= 1/4$ bylo dosaženo pouze 50% účinnosti v sériovém řazení cívek, respektive 63% účinnosti s paralelním řazením. Naměřené hodnoty jsou uvedené v tabulce 4 a z nich je vytvořen graf účinnosti, který je zobrazen na obrázku 27.

K=1/4		Paralelní řazení		
vzdálenost [cm]	P1[W]	P2[W]	f[MHz]	η
5	4	2,5	6,31	63%
10	4	2,5	6,258	63%
15	4	2	6,24	50%
20	4	1,25	6,241	31%
25	4	0,75	6,24	19%
30	4	0,4	6,24	10%
35	4	0,25	6,24	6%

K=1/4		Sériové řazení		
vzdálenost [cm]	P1[W]	P2[W]	f[MHz]	η
5	4	2	6,1	50%
10	4	2,2	6,155	55%
15	4	2,1	6,2	53%
20	4	1,8	6,22	45%
25	4	1,1	6,23	28%
30	4	0,75	6,23	19%
35	4	0,4	6,23	10%

Tabulka 4: Naměřené hodnoty pro $K=1/4$



Obrázek 27: Graf účinnost přenosu pro $K=1/4$

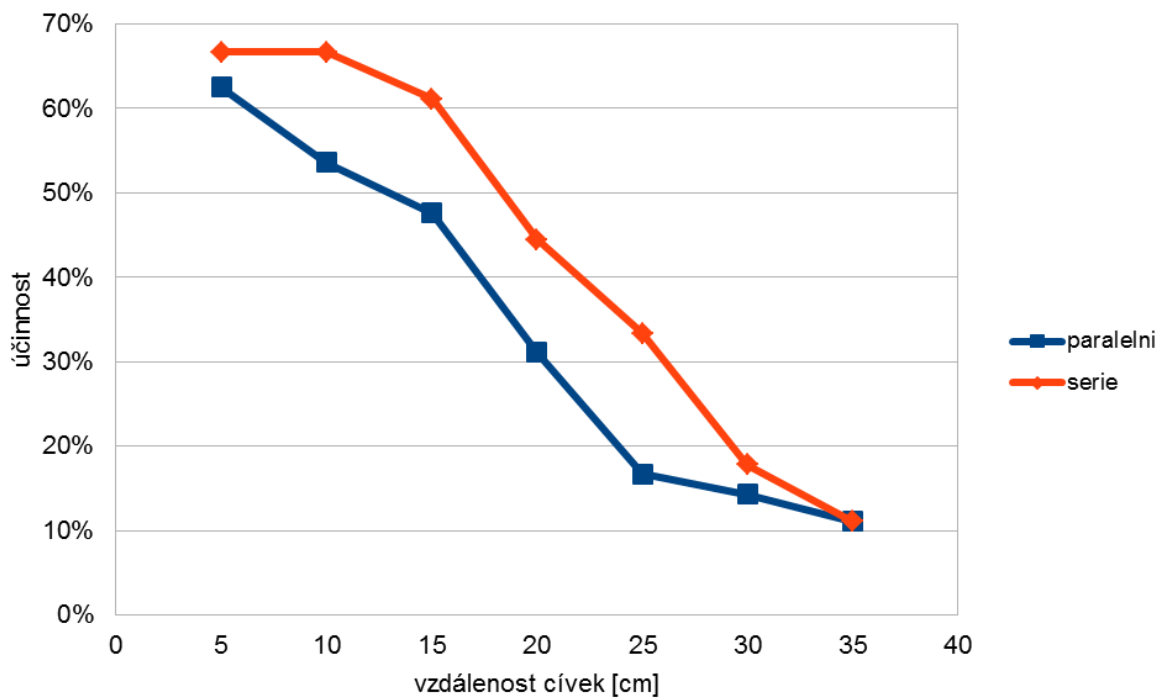
Pro zlepšení účinnosti byl zvýšen parametr K na $K= 4/4$. Tím bylo dosaženo hlavně zlepšení účinnosti u sériového řazení cívek, jak je vidět v tabulce 5 a grafu na obrázku 28.

K=4/4		Paralelní řazení			
vzdálenost [cm]	P1[W]	P2[W]	f[MHz]	η	
5	4	2,5	6,31	63%	
10	4,2	2,25	6,258	54%	
15	4,2	2	6,24	48%	
20	4,5	1,4	6,241	31%	
25	4,5	0,75	6,24	17%	
30	4,2	0,6	6,24	14%	
35	4,5	0,5	6,24	11%	

K=4/4		Sériové řazení			
vzdálenost [cm]	P1[W]	P2[W]	f[MHz]	η	
5	4,5	3	6,074	67%	
10	4,5	3	6,32	67%	
15	4,5	2,75	6,24	61%	
20	4,5	2	6,23	44%	
25	4,5	1,5	6,23	33%	
30	4,5	0,8	6,23	18%	
35	4,5	0,5	6,23	11%	

Tabulka 5: Naměřené hodnoty pro K= 4/4

Účinnost vazby



Obrázek 28: Graf účinnosti přenosu pro K= 4/4

Ještě lepší účinnosti bude dosaženo například zlepšením parametru Q , kterým je značena jakost. Celková jakost prototypu se spočte ze vztahu:

$$Q = \frac{Q_L Q_C}{Q_L + Q_C}$$

(27)

Kde Q_L je jakost cívky a Q_C je jakost použitého kondenzátoru. Tyto parametry spočteme ze vztahu:

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega RC} \quad (28)$$

Pro výpočet indukčnosti L je použit vztah:

$$L = \frac{\mu N^2}{l} S \quad (29)$$

Kde μ značí permeabilitu prostředí, N počet závitů, l délku cívky a S obsah průřezu cívky. Takto vypočítaná vlastní indukčnost je však pouze přibližnou hodnotou a pro přesnější výpočet bychom museli využít vyšší matematiky. Pro výpočet odporu drátu je použit vzorec počítající i s vlivem skinefektu:

$$R = R_{ss} \xi \quad (30)$$

Kde R_{ss} je stejnosměrný odpor a ξ je spočítáno ze vztahu:

$$\xi = r_v \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}} \quad (31)$$

Celková jakost je tedy zlepšena pouze vylepšením jedné její složky, a to složky Q_C . Celková účinnost prototypu se potom spočte ze vztahu:

$$\eta = \frac{k Q_V k Q_P M_{V-P}^2}{1 + k Q_V k Q_P M_{V-T}^2} \left(1 - \frac{k Q_{LP}}{k Q_P} \right) \quad (32)$$

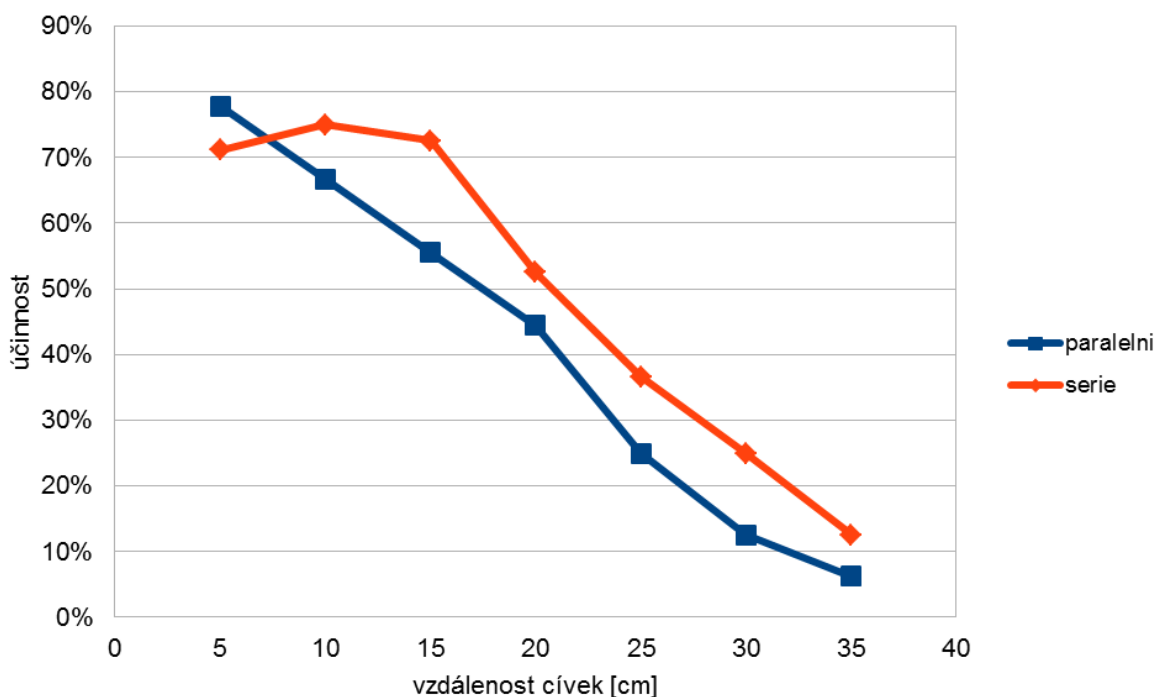
Kde k je činitel vazby, Q_V je činitel vysílací jakosti vysílací cívky, Q_P je činitel jakosti přijímací cívky, M je vzájemná indukčnost mezi vysílací a přijímací cívkou. [21]

Po vylepšení jakosti proběhlo měření znovu a dosažené hodnoty byly znatelně lepší jak pro paralelní, tak pro sériové řazení cívek, jak je vidět z tabulky 6 a obrázku 29.

K=4/4		Paralelní řazení			
vzdálenost [cm]	P1	P2	f[MHz]	η	
5	4,5	3,5	6,92	78%	
10	4,5	3	6,92	67%	
15	4,5	2,5	6,92	56%	
20	4,5	2	6,92	44%	
25	4	1	6,92	25%	
30	4	0,5	6,92	13%	
35	4	0,25	6,92	6%	
K=4/4		Sériové řazení			
vzdálenost [cm]	P1[W]	P2[W]	f[MHz]	η	
5	4,5	3,2	6,92	71%	
10	4	3	6,92	75%	
15	4	2,9	6,92	73%	
20	4	2,1	6,92	53%	
25	4,1	1,5	6,92	37%	
30	4	1	6,92	25%	
35	4	0,5	6,92	13%	

Tabulka 6: Naměřené hodnoty pro $K=4/4$ a vyšší jakost cívky

Účinnost vazby



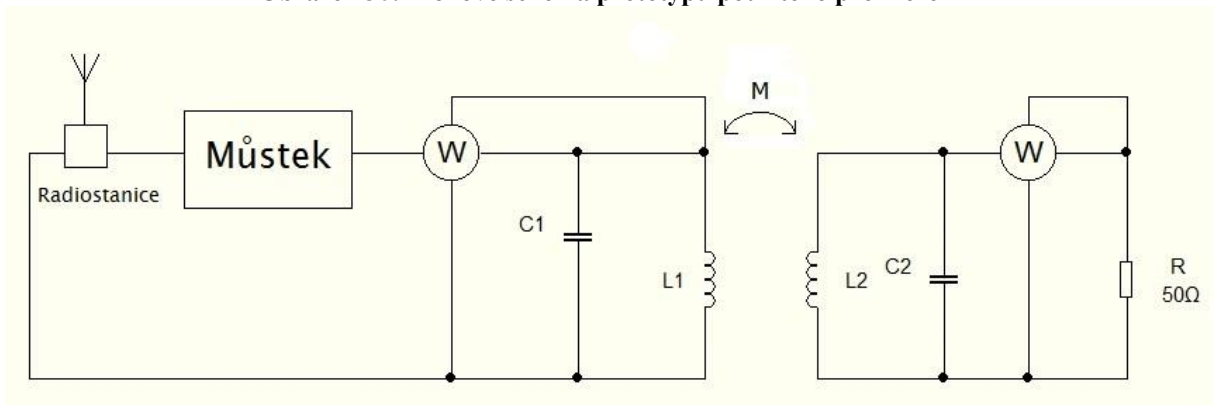
Obrázek 29: Graf účinnosti pro $K=4/4$ a vyšší jakost cívky

Z tohoto měření vyplývá, jak důležitý je parametr Q , který by se dal ještě vylepšit, například použitím dutých vodičů, díky potlačení vlivu korony, použitím vodičů s lepšími elektrickými

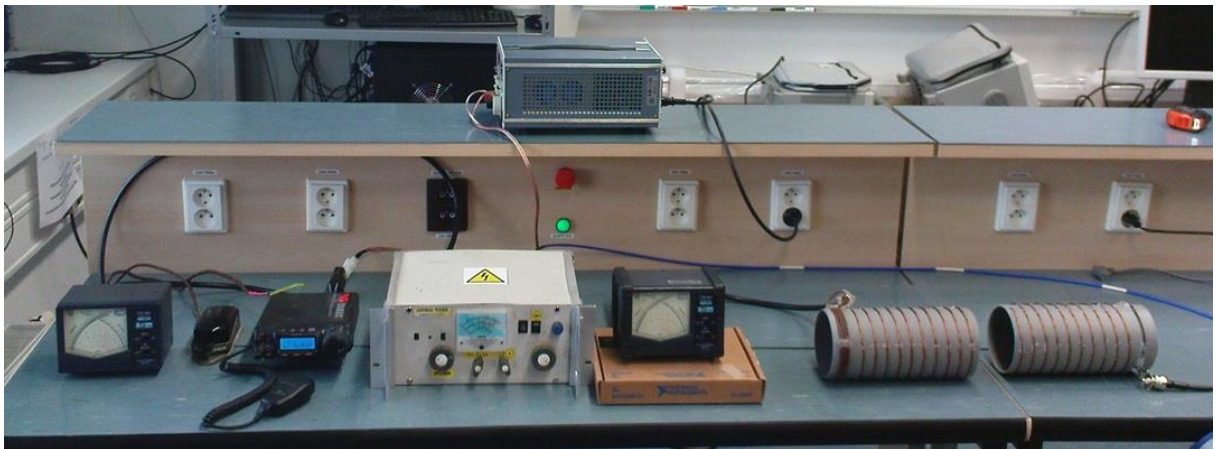
vlastnostmi nebo lepším kondenzátorem či cívkou. Na obrázku 30 je k vidění blokové schéma prototypu použitého pro měření na Západočeské univerzitě a na obrázku 31 je vyobrazeno elektrické schéma tohoto prototypu.



Obrázek 30: Blokové schéma prototypu použitého pro měření



Obrázek 31: Elektrické schéma prototypu použitého pro měření



Obrázek 32: Fotografie z měření

Na závěr ještě na obrázku 32 uvedena fotka z měřicího pracoviště. Na obrázku jsou zleva wattmetr 1, radiostanice, můstek pro přizpůsobení zátěže, druhý wattmetr, vysílací cívka a přijímací cívka. [21]

Závěr

V této práci jsou popsány dva způsoby bezdrátového indukčního dobíjení. Jedná se o indukční vazbu a rezonanční vazbu. Hlavním cílem této práce bylo především nastínit výhody a nevýhody samotného bezdrátového dobíjení elektromobilů a zhodnotit vazby z několika hledisek.

Nejdříve byla pozornost věnována indukční vazbě, jejíž největší nevýhodou je bezpochyby vzdálenost, díky které je systém použitelný s přijatelnou účinností. Nevýhodu nízké vazby minimalizují systémy s rezonanční vazbou. Ty dosahují vysoké účinnosti i na vzdálenosti přes 40 cm a i to je nejspíše důvodem, proč se již dají zakoupit bezdrátové rezonanční nabíječky využívající technologii WiTricity. [3] [13]

Technologie bezdrátového dobíjení se od svých počátků, které nastolili velikáni elektrického průmyslu již předminulého století, jakými byli Nikola Tesla a Guglielmo Marconi, dočkaly velkého zájmu a pokroku ve svém vývoji a to hlavně z důvodu zvýšení komfortu spojeného s jednoduchým napojením, ale také například z důvodu bezpečnosti a úspory místa oproti nevzhledným a velikým drátovým nabíjecím stanicím.

Abychom však úplně neopomenuli využití vazby indukční, je potřeba uvést její využití v technologii nabíjení elektromobilů přímo za jízdy v podobě tzv. elektrifikovaných silnic. Jedná se nejnovější směr, kterému se věnují vědecké týmy celého světa, a který je sám o sobě velmi obsáhlým tématem.

Z výsledků výzkumů vyplývá, že pro komerční využití je výhodnější vazba rezonanční, která má také proto lehký náskok ve vývoji. Zatím jsou však tyto systémy využitelné pouze pro menší výkony, jako je nabíjení mobilních zařízení, notebooků nebo kardiostimulátorů. Pro přenos vyšších výkonů máme na frekvencích, které vazba vyžaduje, velké spínací ztráty. Další velkou nevýhodou celého systému je naprostá nekompatibilita mezi systémy s rozdílným druhem vazby. A právě tomuto problému by měla být v budoucnu věnována velká pozornost.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Mgr. Jaromír Vegr. *Elektromobily – historie a současnost* [online]. c2008, poslední revize 24. 9. 2008 [cit. 26. 4. 2013]. Dostupné z: <<http://www.pro-energy.cz/clanky7/3.pdf>>
- [2] Ivo Hradil. *Volvo otestuje na elektromobilu C30 bezdrátové dobíjení* [online] c2011, poslední revize 19. 5. 2011 [cit. 26. 4. 2013]. Dostupné z: <<http://www.hybrid.cz/volvo-bude-testovat-indukcni-dobijeni-elektromobilu-c30>>
- [3] Luděk Srb. *WiTricity – bezdrátové nabíjení elektromobilů* [online]. c2013, poslední revize 7. 4. 2013 [cit. 26. 4. 2013]. Dostupné z: <<http://elektrickevozy.cz/clanky/witricity-bezdratove-nabijeni-elektromobilu-pokracovani/>>
- [4] *často kladené otázky* [online]. c2011, poslední revize 8. 6. 2011. Dostupné z: <<http://www.evcgroup.cz/cs/caste-otazky.html>>
- [5] Terry Chi Young Ho. *Contactless Charging for Electric Vehicles with a Large Air Gap* [online]. c2011, poslední revize 13. 9. 2011. Dostupné z: <www.ieee.com>
- [6] Joshua Le-Wei Li. *Wireless Power Transmission: State-of-the-Arts in Technologies and Potential Applications* [online]. c2011, poslední revize 4. 11. 2011. Dostupné z: <www.ieee.com>
- [7] Pavel Vachtl. *Bezdrátové nabíjení elektromobil* [online]. c2012, poslední revize 25. 1. 2012 [cit. 27. 4. 2013]. Dostupné z: <http://www.rozhlas.cz/leonardo/technologie/_zprava/1008001>
- [8] Jan Horčík. *Google testuje bezdrátové dobíjení elektromobilů* [online]. c2011, poslední revize 22. 3. 2011 [cit. 27. 4. 2013]. Dostupné z: <<http://www.hybrid.cz/google-testuje-bezdratove-dobijeni-elektromobilu>>
- [9] Jan Horčík. *Bezdrátové dobíjení elektromobilů skrz závodní dráhu* [online]. c2011, poslední revize 28. 7. 2011 [cit. 28. 4. 2013]. Dostupné z: <<http://www.hybrid.cz/halo-ipt-drayson-racing-vyviiji-dynamicke-bezdratove-dobijeni-elektromobilu>>
- [10] Ivo Hradil. *Japonští vědci rozsvítili žárovku bez drátů skrze pneumatiky* [online]. c2012, poslední revize 14. 4. 2012 [cit. 28. 4. 2013]. Dostupné z: <<http://www.hybrid.cz/japonsti-vedci-rozsvitili-zarovku-bez-dratu-skrze-pneumatiky>>
- [11] Ovidiu Sandru *Toyota Invests in WiTricity's Wireless Charging Technology, Probably Seeking to Embed It* [online]. c2011, poslední revize 29. 4. 2011 [cit. 18. 5. 2013]. Dostupné z: <<http://www.greenoptimistic.com/2011/04/29/toyota-witricity/#.UZe1Dz6FUa>>

- [12] Luděk Srb *eTechnologie WiTricity: přenos elektrické energie a dálku* [online]. c2013, poslední revize 3. 4. 2013 [cit. 18. 5. 2013]. Dostupné z: <<http://elektrickevozy.cz/clanky/technologie-witricity-prenos-elektricke-energie-a-dalku/>>
- [13] Luděk Srb *WiTricity: WIT-3300 Deployment Kit* [online]. c2013, poslední revize 15. 3. 2013 [cit. 18. 5. 2013]. Dostupné z: <<http://elektrickevozy.cz/clanky/witricity-wit-3300-deployment-kit/>>
- [14] Luděk Srb *WiTricity – bezdrátové nabíjení elektromobilů* [online]. c2012, poslední revize 7. 1. 2012 [cit. 18. 5. 2013]. Dostupné z: <<http://elektrickevozy.cz/clanky/witricity-bezdratove-nabijeni-elektromobilu/>>
- [15] Takehiro Imura *Study on Maximum Air-gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit* [online]. c2010, poslední revize 11. 11. 2010. Dostupné z: <www.ieee.com>
- [16] Xiu Zhang *Quantitative Design and Analysis of Relay Resonators in Wireless Power Transfer System* [online]. c2012, poslední revize 17. 10. 2012. Dostupné z: <www.ieee.com>
- [17] Hyungrak Kim, Hong-Min Lee *Design of an Integrated Wireless Power Transfer System with High Power Transfer Efficiency and Compact Structure* [online]. c2012, poslední revize 29. 5. 2012. Dostupné z: <www.ieee.com>
- [18] Albert Esser *Contactless charging and communication for electric vehicles* [online]. c2004, poslední revize 10. 4. 2004. Dostupné z: <www.ieee.com>
- [19] G. A. J. Elliott *Magnetically Coupled Systems for Power Transfer to Electric Vehicles* [online]. c2004, poslední revize 5. 3. 2004. Dostupné z: <www.ieee.com>
- [20] Young-Sik Seo *Investigation of Wireless Power Transfer in Through-wall Applications* [online]. c2013, poslední revize 25. 1. 2013. Dostupné z: <www.ieee.cz>
- [21] Kindl, V., spol.; "Metodika návrhu rezonátoru ve tvaru solenoidu pro bezdrátové nabíjení", výzkumná zpráva, RICE, č.z. 22160-012-2013