

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Bezdrátový přenos elektrické energie

**vedoucí práce: Ing. Jaroslav Šnajdr
autor: Libor Machan**

2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Libor MACHAN**
Osobní číslo: **E12B0067K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Bezdrátový přenos elektrické energie**
Zadávající 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 :

1. Zpracujte rešerši aktuálního stavu problematiky.
2. Srovnajte výhody a nevýhody různých způsobů přenosu elektrické energie a zhodnoťte jejich účinnost.
3. Sestavte funkční model zvoleného způsobu přenosu elektřiny.
4. Zhodnoťte navržené zařízení a uveďte možnosti dalšího vylepšení či rozšíření.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

1. Russell W.: The Universal One, Univ of Science & Philosophy, 1974.
2. Johnson H.: The Secret World of Magnets, Cheniere Press, 2006.
3. Tesla, N.: Patenty, odborné články.
4. Meyl, K.: Scalar Wave Transponder, příručka předváděcí sady pro bezdrátový přenos.

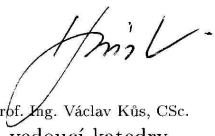
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaroslav Šnajdr
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na možnosti přenášet elektrickou energii bez vodičů nebo s využitím zemského povrchu jako vodiče. Obsahuje informace o popisu elektromagnetických jevů pomocí Maxwellových rovnic a jejich mechanickou analogii. Uvádí stručný přehled aktuálních technologií oboru, jejich porovnání a podrobné informace o Teslově metodě přenosu, včetně konstrukce a měření účinnosti modelu této technologie.

Klíčová slova

Bezdrátový přenos, Maxwellovy rovnice, induktivní vazba, plochý transformátor.

Abstract

The theses presents known principles of wireless electricity transmission, including the possibility to use Earth as conductor, brings summary of Maxwell's electromagnetic fields equations and its mechanical analogy, describes the principles of Tesla's Wireless Energy Transmission, shows the results of measured efficiency of attached experimental circuit based on Tesla's patents for wireless energy transmission.

Key words

Wireless energy transmission, Maxwell's equations, inductive coupling, flat spiral transformer.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 8.6.2015

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavu Šnajdrovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1. ELEKTROMAGNETICKÉ POLE A MAXWELLOVY ROVNICE	11
1.1 MAXWELLOVA FORMULACE FARADAYOVA A AMPEROVA ZÁKONA	11
1.2 MAXWELLOVY ROVNICE	11
1.2.1 První Maxwelllova rovnice (zákon celkového proudu, zobecněný Ampérův zákon)	11
1.2.2 Druhá Maxwelllova rovnice (Zákon elektromagnetické indukce, Faradayův indukční zákon)	12
1.2.3 Třetí Maxwelllova rovnice (Gaussův zákon elektrostatiky)	12
1.2.4 Čtvrtá Maxwelllova rovnice (Zákon spojitosti indukčního toku)	13
1.3 MECHANIZMUS JEVŮ V ELEKTRONOVÉ TEORII	14
1.3.1 Cattův paradox	15
1.3.2 Cattovo porovnání standardního popisu přenosu po klasickém vedení s modelem kondenzátoru v RC obvodu	16
1.3.3 Mechanická analogie Maxwellových rovnic	18
1.3.4 Porovnání Maxwellových rovnic s rovnicemi pro pohybující se lať	19
2 PŘENOS ELEKTRICKÉ ENERGIE	22
2.1 SOUČASNÁ TECHNOLOGIE S VODIČI	22
2.2 MOŽNOSTI BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU ELEKTRICKÉ ENERGIE	22
2.2.1 Motivace pro bezdrátový přenos elektřiny	22
2.2.2 Známé možnosti bezdrátového přenosu elektrické energie	23
2.3 PODROBNÉ SROVNÁNÍ AKTUÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ PRO BEZDRÁTOVÝ PŘENOS EL. ENERGIE	24
2.3.1 Přenos induktivní vazbou	24
2.3.2 Přenos induktivní vazbou s rezonancí	25
2.4 PŘENOS KAPACITNÍ VAZBOU	27
2.5 PŘENOS MIKROVLNAMI	29
2.6 BEZDRÁTOVÝ PŘENOS ELEKTRICKÉ ENERGIE DLE NIKOLY TESLY	30
2.6.1 Historie vzniku	30
2.6.2 Teslovy patenty	31
2.6.3 Popis Teslovy technologie pro bezdrátový přenos elektrické energie	35
2.6.4 Současné ověřování Teslovy technologie	35
3 NÁVRH A OVĚŘENÍ FUNKCE EXPERIMENTÁLNÍ SADY PRO BEZDRÁTOVÝ PŘENOS ELEKTRINY	37
3.1 NÁVRH VYSÍLAČE A PŘIJÍMAČE, VOLBA ZDROJE A ZÁTĚŽE	37
3.2 KONTROLA FUNKCE A MĚŘENÍ ÚČINNOSTI NÁVRHU	42
4 ZÁVĚR	45
POUŽITÁ LITERATURA	1
PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA 1 FOTOGRAFIE Z VÝROBY VNITŘNÍHO VINUTÍ PLOCHÉHO TRANSFORMÁTORU	2
PŘÍLOHA 2 DOKONČENÝ PLOCHÝ TRANSFORMÁTOR S VNĚJŠÍM VINUTÍM Z KOAXIÁLNÍHO KABELU	3
PŘÍLOHA 3 FOTOGRAFIE VYSÍLAČE (RESP. PŘIJÍMAČE) S PLOCHÝM TRANSFORMÁTOREM A VYVÝŠENOU ELEKTRODOU NA PODPĚRCE	4

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na principy přenosu elektrické energie bez vodičů, resp. s využitím zemského povrchu jako vedení.

Text je rozdělen do tří částí; první obsahuje stručný souhrn z teorie elektromagnetického pole, druhá uvádí historii a rešerši aktuálního stavu problematiky včetně komerčních aplikací. Třetí část je věnována experimentálnímu ověření zvoleného typu bezdrátového přenosu, dokumentaci návrhu a popisu měření účinnosti realizovaného zapojení.

Seznam symbolů

H	intenzita magnetického pole
Ψ	tok elektrického pole plochou
j	proudová hustota
D	elektrická indukce
Φ	magnetický tok
E	intenzita elektrického pole
B	magnetická indukce
ρ	hustota volného náboje
λ	vlnová délka
η	účinnost
c	rychlost šíření světla ve vakuu
f	frekvence

1. Elektromagnetické pole a Maxwellovy rovnice

1.1 Maxwellova formulace Faradayova a Amperova zákona

Fyzikové mají pro volbu přístupu k jevu relativní volnost, pokud je přístup opodstatněný experimenty. V případě rovnic J. Clerka Maxwella sloužily jako základ dvě experimentálně ověřitelné zákonitosti:

- Amperův zákon proudu
- Faradayův zákon indukce

Matematik Maxwell vyjádřil závěry experimentů analyticky, zavedl posuvný proud a doplnil Amperův zákon, i když v době vzniku rovnic nebylo technické vybavení pro ověření jeho teoretických závěrů. To bylo možné až po smrti Maxwella. Pro Faradaye, rozeného experimentátora, byly matematické interpretace druhotné.

Pro Faradaye bylo důležitější provádět prezentace indukce zájemcům naživo. Jeho o 40 let mladší kolega, matematik Maxwell, naproti tomu usiloval o popis světla jako elektromagnetické vlny. Aby ke svému záměru mohl využít tehdejšího (Laplaceova) popisu vlny s nezbytnými derivacemi, zavedl do Amperova zákona tzv. posuvný proud. Jak to s novými teoriemi bývá, i Maxwellova vyvolala zpočátku kontroverzi.

1.2 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice jsou základní zákony v makroskopické teorii elektromagnetického pole, které zformuloval James Clerk Maxwell v roce 1865. Lze je zapsat buď v integrálním, nebo diferenciálním tvaru. V integrálním tvaru popisují elektromagnetické pole v jisté oblasti, kdežto v diferenciálním tvaru v určitém bodu této oblasti [1].

Níže uvedený zápis je platný v jednotkách soustavy SI.

1.2.1 První Maxwellova rovnice (zákon celkového proudu, zobecněný Ampérův zákon)

Integrální tvar:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (1.1)$$

Cirkulace vektoru intenzity magnetického pole \mathbf{H} po libovolně orientované uzavřené křivce c je rovna součtu celkového vodivého proudu I a posuvného proudu (Ψ je tok elektrického

pole plochou S). Křivka c a libovolná plocha S , jež křivku obepíná, jsou vzájemně orientovány pravotočivě.

Diferenciální tvar:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\delta \mathbf{D}}{\delta t} \quad (1.2)$$

Rotace vektoru intenzity magnetického pole \mathbf{H} je rovna hustotě vodivého proudu \mathbf{j} a hustotě posuvného (Maxwellova) proudu.

1.2.2 Druhá Maxwellova rovnice (Zákon elektromagnetické indukce, Faradayův indukční zákon)

Integrální tvar:

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1.3)$$

Cirkulace vektoru \mathbf{E} po libovolně orientované uzavřené křivce c je rovna záporně vzaté časové derivaci magnetického indukčního toku spřaženého křivkou c . Křivka c a libovolná plocha S , jíž křivka obepíná, jsou vzájemně orientovány pravotočivě.

Diferenciální tvar:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\delta \mathbf{B}}{\delta t} \quad (1.4)$$

Rotace vektoru intenzity elektrického pole \mathbf{E} je rovna záporně vzaté derivaci magnetické indukce \mathbf{B} .

1.2.3 Třetí Maxwellova rovnice (Gaussův zákon elektrostatiky)

Integrální tvar:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q \quad (1.5)$$

Elektrický indukční tok \mathbf{D} libovolnou vně orientovanou plochou S je roven celkovému volnému náboji Q v prostorové oblasti ohraničené plochou S .

Diferenciální tvar:

$$\operatorname{div}\mathbf{D} = \rho \quad (1.6)$$

Divergence vektoru elektrické indukce \mathbf{D} je rovna objemové hustotě volného náboje ρ .
Ekvivalentní formulace: siločáry elektrické indukce začínají nebo končí tam, kde je přítomen elektrický náboj.

1.2.4 Čtvrtá Maxwellova rovnice (Zákon spojitosti indukčního toku)

Integrální tvar:

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1.7)$$

Magnetický indukční tok \mathbf{B} libovolnou uzavřenou orientovanou plochou S je roven nule.

Diferenciální tvar:

$$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0 \quad (1.8)$$

Divergence vektoru magnetické indukce \mathbf{B} je rovna nule.

Ekvivalentní formulace: Neexistují magnetické monopóly (hypotetická elementární částice, která nese magnetický náboj).

Fyzikální proměnné použité v Maxwellových rovnicích shrnuje tabulka 1.

Tabulka 1 Definice proměnných v Maxwellových rovnicích

Označení	Význam	Jednotka SI
E	vektor intenzity elektrického pole	$V \cdot m^{-1}$
H	vektor intenzity magnetického pole	$A \cdot m$
D	vektor elektrické indukce	$C \cdot m^2$
B	vektor magnetické indukce	Tesla
ρ	hustota volného náboje	$C \cdot m^3$
j	vektor hustoty elektrického proudu	$A \cdot m^2$

1.3 Mechanismus jevů v elektronové teorii

Současný stav techniky pro přenos elektrické energie odráží teoretické a prakticky ověřené poznatky nashromážděné od dob před i po sestavení Maxwellových rovnic. Pro další vývoj je nutné podrobit koncept důkladnější analýze, popř. mít modifikovaný, rozšířený či jiný model pro elektromagnetické jevy, samozřejmě v souladu s experimentálně ověřenými výsledky. Tato nutnost souvisí se základními otázkami, na něž aktuální koncept poskytuje neúplné, žádné nebo od praktické reality vzdálené odpovědi. Co je elektrický náboj, energie, elektřina, magnetismus? Ohýbáme definice dle potřeby - jsme schopni na tentýž mechanismus nahlížet z více než jednoho úhlu pohledu: Světlo je vlna i částice.

Bylo by neúplné současný model elektrodynamických jevů hanit bez konkrétnější zmínky o nezodpovězených tématech elektrotechniky. Jako první příklad může sloužit experiment Boyda Bushmana, bývalého inženýra výrobce letecké techniky Lockheed Martin. Jeho pokus demonstroval neplatnost Galileova zákona pro objekty s magnetickými vlastnostmi a zvláštním uspořádáním. Geometrie, odpor vzduchu atd. jsou při spouštění těchto testovacích předmětů respektovány. Bushman spojil při stavbě předmětů experimentu dva silné neodymové magnety stejnými póly k sobě pomocí šroubů a nechal je volně padat z výškové budovy. Tyto dva magnety vzápětí nechal padat spojené opačnými póly k sobě. Pokus opakoval několikrát a statisticky jej vyhodnotil. V prvním případě byla doba, za níž magnety dosáhly paty budovy, delší než ve druhém případě.

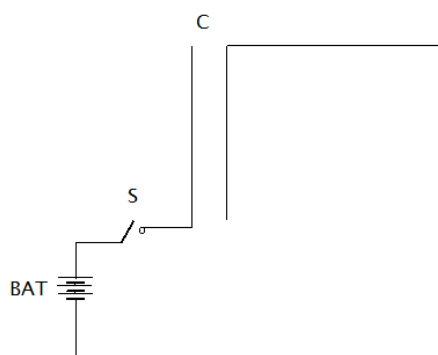
Druhým snadno realizovatelným příkladem je experiment s magnety, které lze souhlasnými póly přiblížit bez vynaložené energie k sobě. Vezmeme-li dva feritové magnety ve tvaru kvádrů o třetí straně výrazně tenčí ke zbývajícím dvěma, lze je souhlasnými póly přibližovat k sobě až se úplně spojí bez přítomnosti odpudivých sil (magnety jsou natočené kolem osy magnetizace o 90°).

Přehnané až fanatické nadnášení Maxwellova pojednání o elektromagnetizmu nesdílel anglický konstruktér číslicových obvodů Ivor Catt. V 70. letech vznikla potřeba konstruovat pokročilými metodami plošné spoje pro číslicové obvody, jinak by docházelo k značným rušením a nefunkčnosti logických celků. Catt se při konstrukci věnoval hlubší úvaze o obsahu Maxwellových rovnic.

1.3.1 Cattův paradox

Ivor Catt (pův. z VB) je od 60. let minulého stol. konstruktérem obvodů pro číslicové zpracování signálů. Na počátku své konstruktérské kariéry musel čelit do té doby neznámým jevům spojeným s rychlými změnami napěťových úrovní na deskách s plošnými spoji osazenými stále se zrychlujícími TTL logickými obvody. Pro překonání tehdejších technických překážek při návrzích obvodů Catt analyzoval měřitelné přechodné děje a vyvodil z nich několik závěrů, k nimž nenašel vysvětlení v Maxwellových rovnicích [2]. Zavedl tzv. Cattův paradox přítomný při nabíjení kondenzátoru stejnosměrným (ss) proudem.

Dosud platná teorie popisuje nabíjení kondenzátoru přesunem nosičů náboje na jeho elektrody (desky) umístěné blízko sebe a oddělené dielektrikem. Otázkou pro Catta je, jak první nosič náboje vstupující na desku kondenzátoru například ze zdola (obr. 1) dosáhne ve stejném čase nejuvzdálenější horní konec elektrody nebo jak je možné bez překonání rychlosti šíření světla, aby se náboje na elektrodách kondenzátoru rozmísťovaly dle platného modelu elektromagnetizmu spojitě.



Obrázek 1 Ilustrace situace při vstupu prvního nosiče náboje na elektrodu kondenzátoru, BAT – ss zdroj nosičů náboje, S - spínač pro uzavření obvodu, C - kondenzátor

Elektronová teorie s elementárními nosiči náboje odpověď neposkytuje. Najdeme v ní zavedení tzv. posuvného proudu, který sám sebe popírá již v definici, kdy tzv. posuvný proud mezi elektrodami kondenzátoru uzavírající obvod je stále přítomen i při ideálním vakuu mezi

elektrodami kondenzátoru, přestože tehdy by neměla existovat možnost uskladnění náboje, protože nejsou přítomny polarizovatelné elementy:

"Vidíme, že vztah zahrnuje hustotu volného (kondukčního a konvekčního) proudu, která popisuje transport volných nábojů, dále se v něm objevuje člen označovaný jako hustota polarizačního proudu, který popisuje transport vázaných nábojů v látce při změně její elektrické polarizace a konečně obsahuje člen nazývaný hustota Maxwellova proudu (někdy také hustota posuvného proudu ve vakuu)." [3]

V elektrotechnice najdeme jen málo protiřečících si tvrzení: *hustota Maxwellova proudu ve vakuu:*

"Hustota Maxwellova proudu má skutečně fyzikální rozměr proudové hustoty. Jde o zvláštní, nový typ proudu, který není přímo spojen s pohybem elektrických nábojů (!), nýbrž s časovou změnou elektrického pole. Právě tento Maxwellův proud umožňuje uzavřít obvod střídavého proudu, v němž je zapojen kondenzátor s vakuovou mezerou mezi deskami, podobně jako kmity pružné nepropustné membrány v trubici s kapalinou mohou zprostředkovat proměnný tok kapaliny trubicí. Maxwellův proud zřejmě tedy může (a musí) existovat pouze v případě nestacionárního elektrického pole." [3]

Předchozí teze z učebních materiálů vakuum připodobňuje ke kapalině. Dále v definici není uvažován případ, kdy je kondenzátor zařazen v obou větvích vedení od zdroje k zátěži.

Pro dokončení úvahy o nosiči náboje, který se vydá na cestu ku konci elektrody kondenzátoru, Catt navrhuje buď stanovit jeho rychlost pohybu za vyšší, než je rychlost šíření světla (v rozporu s předpokladem Teorie relativity) nebo považovat současný model elektromagnetizmu za neúplný. Následuje několik zkrácených úvah I. Catta, jež by měly být při nahrazení současných způsobů přenosu elektrické energie vzaty v úvahu.

1.3.2 Cattovo porovnání standardního popisu přenosu po klasickém vedení s modelem kondenzátoru v RC obvodu

Mějme vedení dle obr. 2 s charakteristickou impedancí Z_0 naprázdno [2]. Předpokládejme $R \gg Z_0$, kde R je vnitřní odpor zdroje napětí (BAT) a Z_0 je impedance vedení naprázdno.



Obrázek 2 Schéma pro myšlenkovou úvahu o šíření elektromagnetizmu po vedení [2]

Po sepnutí spínače ($t=0$) je elektromagnetická (EM) změna detekovaná na levé straně vedení šířena doprava. Tato změna se odrazí na konci vedení a přičte se k iniciační EM změně. Odraz vlevo dále přispěje k navýšení změny a tento děj pokračuje. Obecně je výsledné napětí po n odrazech V_n a suma napětí pro $(n+1)$ -tou iteraci:

$$V_{n+1} = V_n + 2V \frac{Z_0}{R + Z_0} \cdot \left[\frac{R - Z_0}{R + Z_0} \right]^n \quad (1.3.1)$$

Pro vyvarování složitější integraci je možné řadu n výrazů sečíst dle vztahu:

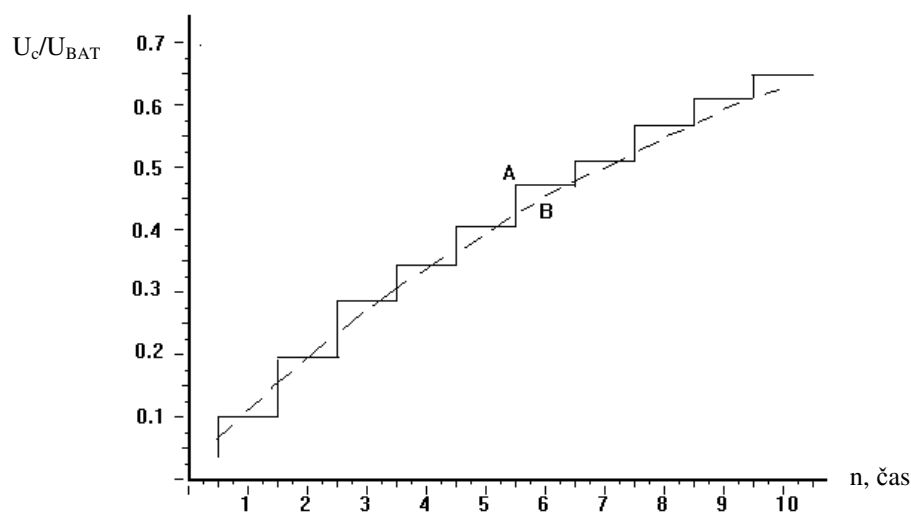
$$\sum V = a \frac{1 - v^n}{1 - v} \quad (1.3.2)$$

"Kde a je první člen geometrické řady a v násobitel mezi výrazy. (toto zjednodušení je možné ověřit matematickou indukcí)" [2]

V Cattově úvaze je podrobně je popsána matematická cesta ukazující, že napětí kondenzátoru je postupným skládáním odražených a postupných EM vln:

$$U_C(t) = U_{BAT} \left[1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right] \quad (1.3.3)$$

Což je obvyklý vztah, k němuž lze dospět standardními cestami pro řešení přechodových jevů v obvodech. Tento Cattův způsob popisu šíření EM změny vedením nevyžaduje model náboje. Na obr. 3 je grafické porovnání výsledků obou druhů řešení RC obvodu.



Obrázek 3 Grafické porovnání přístupů pro analýzu šíření EM změn v RC obvodu, graf A – Cattův model, B – standardní exponenciála získaná klasickou metodou řešení[2]

1.3.3 Mechanická analogie Maxwellových rovnic

O vyčerpávající výpovědní hodnotě Maxwellových rovnic nebyl Catt přesvědčen, protože našel ekvivalenci v celkem odlišné fyzikální sféře – běžném plavení lati na vodě. Jde o důkaz, že naše berná mince je jakýmsi zobecněným pohledem na mechaniku těles platným minimálně pro další jev v přírodě. Catt dokazuje matematicky, že Maxwellovy rovnice mohou stejně dobře popisovat jevy nesouvisející s elektromagnetizmem.

Úvahou o pohybu lati vhodného tvaru (obr. 4) lze získat vztahy definující relaci mezi jejím pohybem a délkovými parametry viděnými statickým pozorovatelem [4]:

$$\frac{dh}{dx} = -\frac{z}{v} \cdot \frac{dw}{dt} \quad (1.3.4)$$

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{1}{v \cdot z} \cdot \frac{dh}{dt} \quad (1.3.5)$$

kde

h – výška lati,

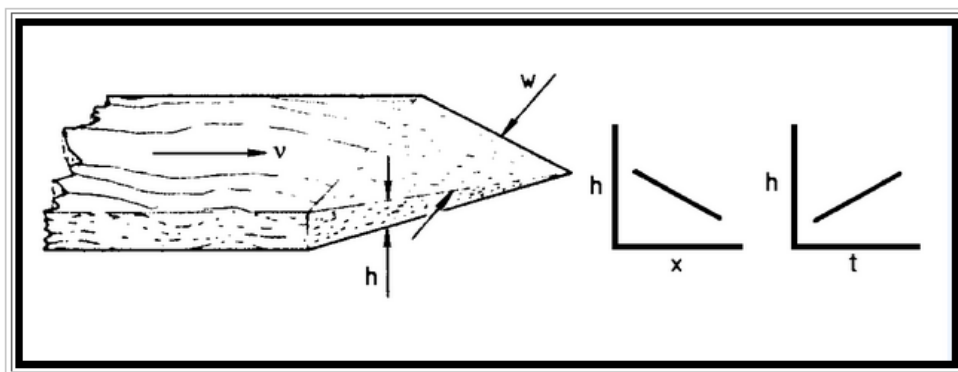
x – dráha uražená latí,

z – poměr výšky a šířky lati,

v – rychlost pohybu lati,

w – šířka lati,

t – čas.



Obrázek 4 Předmět popisu chování – dřevěná lať [4]

Výrazy (1.3.4) a (1.3.5) jsou prvním krokem k formulaci tzv. *Cattových rovnic pro pohyb dřevěné lati*. Zavedením teploty lati Catt dospěl po úpravě vztahů k rovnicím popisujícím pohyb horké lati:

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{z}{v} \cdot \frac{dr}{dt} \quad (1.3.6)$$

$$\frac{dr}{dx} = -\frac{1}{v \cdot z} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (1.3.7)$$

kde

T - teplota lati,

x - dráha uražená latí,

z - poměr teploty a hustoty lati T/r,

v - rychlost pohybu lati,

r - hustota lati,

t - čas.

Tyto rovnice jsou platné pro dvě silnější krátké latě pohybující se současně dopředu.

1.3.4 Porovnání Maxwellových rovnic s rovnicemi pro pohybující se lať

"Abychom si byli vědomi možné záměny elektrodynamiky s říční plavbou, následuje porovnání. Uveďme dva známé tvary Maxwellových rovnic (pro vakuum)." [4]:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{dB}{dt} \quad (1.3.8)$$

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{dD}{dt} \quad (1.3.9)$$

kde

E – intenzita el. pole,

x – vzdálenost,

B – intenzita magnetického pole (alt.)

H – intenzita magnetického pole,

D – intenzita el. pole (alt.)

t – čas.

"V rovnicích (1.3.8), (1.3.9) byly veličiny pro magnetické a elektrické pole nahrazeny alternativními symboly B a D . Uvedme pro lepší názornost méně známé tvary rovnic:" [4]

$$\frac{dE}{dx} = -\mu_0 \frac{dH}{dt} \quad (1.3.10)$$

$$\frac{dH}{dx} = -\varepsilon_0 \frac{dE}{dt} \quad (1.3.11)$$

kde

E – intenzita el. pole,

x – vzdálenost,

μ_0 – permeabilita vakua,

H – intenzita magnetického pole,

t – čas,

ε_0 – permitivita vakua.

Vidíme, že výrazy (1.3.10) a (1.3.11) jsou ekvivalentní výrazům pro popis pohybu latí (1.3.8) a (1.3.9) a neobsahují žádné informace o dynamice elektromagnetizmu. Následující tvary rovnic, z nichž jsou odvozeny často publikované tvary Maxwellových rovnic, nejsou v literatuře prakticky uvedeny:

$$\frac{dE}{dx} = -Z_0 \varepsilon_0 \frac{dE}{dt} \quad (1.3.12)$$

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{\mu_0}{Z_0} \frac{dH}{dt} \quad (1.3.13)$$

Dle vztahu (1.3.12) el. pole způsobuje el. pole, dle vztahu (1.3.13) mag. pole způsobuje mag. pole.

"Z těchto tvarů rovnic plyne, že vzájemná relace mezi veličinami E a H pouze zamlžuje princip probíhajících jevů. Neexistuje žádná interakce mezi E a H poli, stejně jako šířka cihly neinteraguje s její délkou." [5]

2 Přenos elektrické energie

2.1 Současná technologie s vodiči

Pro úplný vhled do problematiky přenosu elektrické energie je uveden stručně současný způsob výroby, přenosu a využívání elektrické energie. Z ekonomických důvodů jsou nejčastějšími způsoby výroby el. energie v našem evropském regionu:

- výroba tepelnými elektrárnami
- výroba jadernými elektrárnami.

Obě technologie mají na konci technologického řetězce generátor střídavého napětí, v tomto případě je ponechán stranou původ mechanické energie pohánějící osu generátoru. Funkce generátoru tkví dle elektronové teorie v separaci nosičů náboje pomocí vložené externí práce. Tuto formu energie uloženou v separovaných nosičích je třeba dále přenést ke spotřebiteli, kde se uvolní za konání mechanické, tepelné či jiné práce. Vždy však je přítomna anihilace separovaných nábojů (dosažení neutrálního stavu mezi nosiči náboje). V mechanické analogii tak elektrárna může představovat dělníka darujícího mechanické síly pro natažení pružiny coby zásobníku práce jeho úsilí. Mechanické napětí pružiny odpovídá napětí mezi separovanými nosiči náboje. Přenos elektřiny po vodičích má analogii v přepravě stlačených pružin - při dopravě zamezujeme ztrátě energie v nich uložené. Uvolnění práce z pružiny u spotřebitele může být přirovnáno k povolení mechanické patky pružiny – v elektrickém obvodu je spínačem uzavřen obvod. Vidíme, že náboj existuje sám o sobě, nikdy jsme nepotřebovali žádnou energii pro jeho nabití, pouze pro jeho posun v prostoru, resp. narušení rovnovážného stavu nábojů.

2.2 Možnosti bezdrátového přenosu elektrické energie

2.2.1 Motivace pro bezdrátový přenos elektřiny

Dohledáme-li počet subjektů, které profitují z přenosové a distribuční činnosti v energetickém sektoru, kdo najde způsob, jak si ukrojit několik haléřů z každé kilowatthodiny, je navždy finančně zabezpečen. Malou motivaci ke změnám tak mohou ovlivnit jen:

- problémy s kritickým množstvím materiálu sítí (mědi, hliníku) s tím, jak bude docházet k postupné elektrifikaci větších a větších ploch expandující lidské civilizace
- zásadní změna v pohledu na environmentální vlivy – kácení lesů pro trasy vedení, přehuštní inženýrských sítí v zalidněných oblastech

- kolapsy (tzv. blackouty) způsobené snahou centralizovat a kontrolovat výrobu el. energie

Druhořadými faktory pro hledání jiného přístupu distribuce elektřiny jsou:

- elektromagnetické rušení, včetně vlivu na živé organizmy a floru
- přímé nebezpečí ohrožení zdraví a života vlivem povětrnostních podmínek či neznalosti osob v blízkosti vedení
- přechod z ropného na elektrický pohon vozidel, plavidel, letadel
- vyprázdnění ložisek uhlí, zemního plynu a materiálu pro atomové elektrárny

2.2.2 Známé možnosti bezdrátového přenosu elektrické energie

Dle vzdálenosti, na jakou umožňují energii přenášet, rozdělujeme technologie pro:

- krátký (do 50 cm)
- střední (0,5 až 20 m)
- dlouhý přenos (nad 20 m)

V současnosti jsou experimentálně prověřovány a vyvíjeny technologie uvedené souhrnně v tabulce 2.

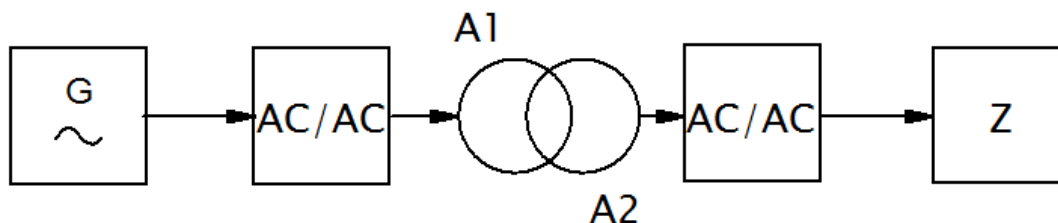
Tabulka 2 Přehled hlavních technologií pro bezdrátový přenos el. energie, zdroj: [5]

Technologie	Vzdálenost	Směrnost	Frekvence	Typy antén	Výkony a možné budoucí využití
Induktivní vazba	krátká	malá	Hz - MHz	smyčky z vodičů	elektrické zubní kartáčky, holící strojky, nabíječky baterií, průmyslové topení
Resonanční vazba	střední	malá	MHz - GHz	laditelné smyčky z vodičů, rezonátory	nabíjení přenosných spotřebičů (WiTricity), medicínské implantáty, elektromobily, elektro vlaky, čipy RFID, osobní identifikační karty
Kapacitní vazba	krátká	malá	kHz - MHz	elektrody	nabíjení přenosných spotřebičů, integrované obvody, osobní identifikační karty
Magnetodynamická technologie	krátká	není defin.	Hz	rotující magnety	nabíjení elektromobilů
Mikrovlny	dlouhá	vysoká	GHz	paraboly, pole antén	solární napájení satelitů, napájení vznášedel (tzv. drony)
Světelné vlny	dlouhá	vysoká	\geq THz	laserové přijímače světla, fotocitlivé součástky, teleskopy	napájení vznášedel, napájení kosmických výtahů

2.3 Podrobné srovnání aktuálních technologií pro bezdrátový přenos el. energie

2.3.1 Přenos induktivní vazbou

Obecný princip přenosu je uveden na obr. 5. Zdroj napájí vysílač produkující magnetické pole. Skrze pole šířené prostředím se energie ocitne v přijímači transformujícím pole do formy využitelné spotřebičem.



Obrázek 5 Obecné blokové schéma induktivně vázaného bezdrátového přenosu, G – zdroj energie, AC/AC – převodníky upravující kmitočet pro maximální vazbu antén A1 (vysílací) a A2 (přijímací), Z – napájené zařízení

Tento způsob přenosu je nejjednodušší formou bezdrátového přenosu elektrické energie. Primární cívka a sekundární cívka transformátoru nejsou galvanicky spojeny, každá cívka je součástí samostatného obvodu. Přenos energie probíhá na principu Faradayova indukčního zákona. Roli hraje vzájemná indukce vodičů, z nichž jeden je protékán proudem. Hlavní funkce oddělení je možnost zvýšení/snížení primárního napětí a galvanické oddělení.

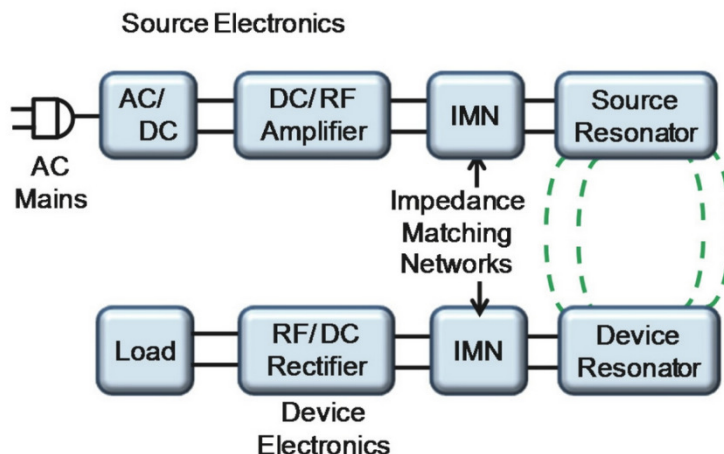
Magnetické pole generované elektrickým proudem protékajícím primární stranou indukuje napětí ve vodičích sekundární strany a při připojené zátěži jí teče indukovaný proud. Tento účinek se vyskytuje v blízkosti elektromagnetického pole, tedy se sekundárním vodičem v těsné blízkosti primárního.

Frekvence pro přenos nerespektují geometrické a elektrické vlastnosti antén, proto lze přenos realizovat v pásmu Hz až řádově MHz. Se zvyšující se vzdáleností sekundárního vodiče od primárního klesá účinnost technologie (obecně méně než 30 %). I přes relativně krátkou vzdálenost indukční vazby je systém velmi neefektivní, velká část přenášené energie je vyzařena do okolí. Technologie v této podobě není předmětem vývoje.

2.3.2 Přenos induktivní vazbou s rezonancí

Vyšší účinnosti (40-60 % [6]) u induktivně vázaných antén lze dosáhnout, pokud obvodové parametry upravíme pro vznik a udržení rezonance mezi vysílací a přijímací stranou přenosového řetězce. Cílem je optimalizovat výměnu energií podobně jako při naladění LC rezonančního obvodu na rezonanční kmitočet. Z důvodu respektování rezonančních parametrů antén je pásmo antén v řádech MHz až GHz.

První komerční výrobky této technologie dodává na trh firma WiTricity. Blokové schéma konceptu fy WiTricity je na obr. 6.

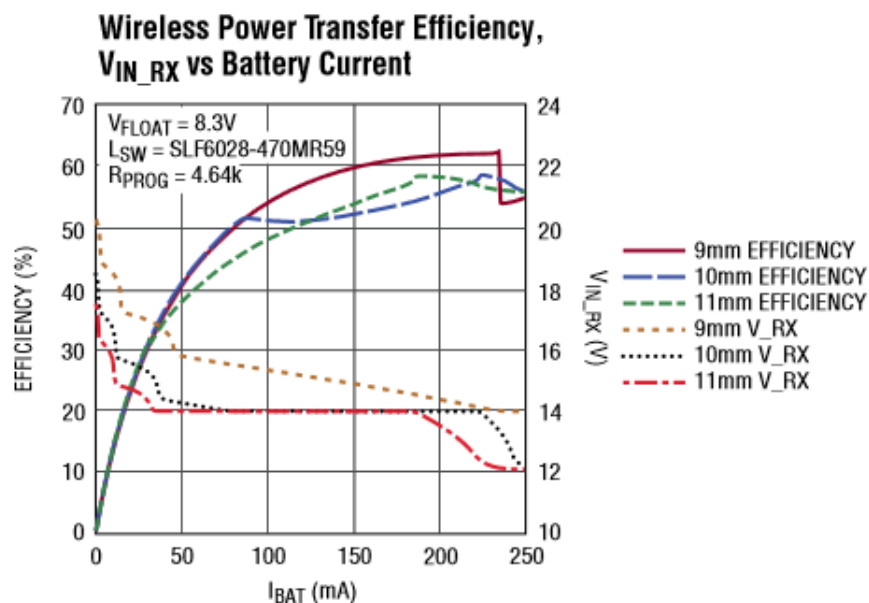


Obrázek 6 Blokové schéma komerční aplikace Witricity, Source electronics – vysílací část, Device electronics – napájené zařízení, AC mains – přívod zdroje napájení, DC/RF amplifier – převodník ss napětí na střídavé o vhodném kmitočtu, IMN – obvody pro impedanční přizpůsobení zdroje/spotřebiče anténám, Source resonator – induktivně vázané antény, zdroj:www.witricity.com

Oproti obecnému schématu (obr. 5) pro induktivně vázaný přenos el. energie přibyly v konceptu WiTricity obvody pro přizpůsobení impedance (IMN bloky, obr. 6) usnadňující rezonanční chod vysílací a přijímací části.

Hlavní nevýhodou této metody bezdrátového přenosu je krátký dosah. Přijímač musí být v bezprostřední blízkosti vysílače. Metoda využívá plochých spirálových tvarů antén. V Teslově sbírce patentů i v jeho dále popisovaném konceptu přenosu nalezneme široké využití plochých spirálových cívek. Jejich zajímavé aplikační možnosti ve formě jádrových i bezjádrových plochých transformátorů jsou testovány pro jejich vysokou účinnost. Současné moderní DC/DC měniče přecházejí kvůli úspoře materiálu a objemu zařízení při zvýšení účinnosti na toto uspořádání transformátorů.

Induktivní, popř. induktivně vázaný rezonanční přenos el. energie – shrnutí poskytuje tabulka 3. Reálná aplikace technologie existuje např. od fy Linear Technologies. Společnost známá svými integrovanými obvody pro nabíječky baterií v aplikační poznámce obvodu LTC1420 [7] udává v přehledu účinnosti max. hodnotu kolem 50%.



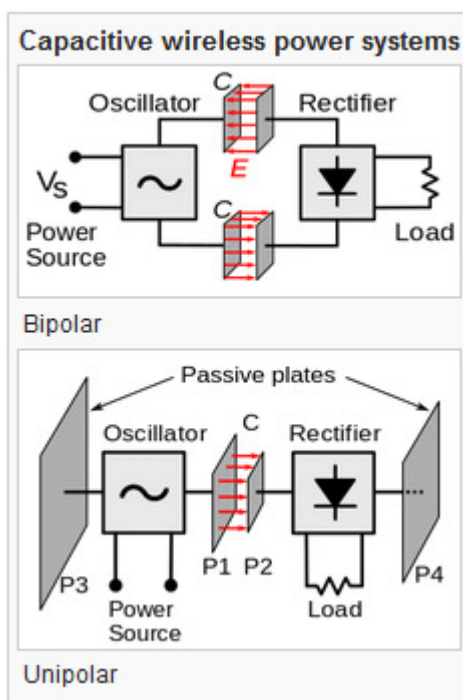
Obrázek 7 Účinnost sestavy pro bezdrátové nabíjení s obvodem LTC1420 v závislosti na nabíjecím proudu baterie v přijímači

Tabulka 3 Souhrn induktivně vázané technologie přenosu

Účinnost do 65 %	
Výhody	Nevýhody
jednodušší konstrukce	krátká vzdálenost (max. jednotky cm)
bezpečnost	menší účinnost
	napájení malých zařízení (jednotky wattů)

2.4 Přenos kapacitní vazbou

Metoda využívá elektrické kapacitní vazby mezi elektrodami kondenzátoru. Elektrody jsou od sebe vzdáleny max. několik centimetrů. Obr. 8 ilustruje koncept: Power source – zdroj energie, C – kondenzátory s vysílacími/přijímacími elektrodami, Rectifier – usměrňovač pro zátěž (Load) vyžadující ss napájení. U technologie lze využít tzv. bipolární (dva kondenzátory) nebo unipolární (jeden kondenzátor) vedení el. energie. Unipolární konstrukce vyžaduje druhý kondenzátor ve formě pasivních elektrod (obr. 8, spodní část).



Obrázek 8 Princip přenosu el. energie kapacitní vazbou, zdroj: [5]

Popsaný typ vedení el. energie je určen spíše pro menší spotřebiče (do 10 W). Pro dosažení této účinnosti je obvykle nutné použít vysoké napětí, což má za následek produkci ozonu. Tok energie je sice koncentrovanější než u induktivní vazby, takže nedochází k takovému rušení, vznikají však interakce s prostředím, v němž probíhá polarizace přítomných dielektrik.

Praktické využití je dnes např. v oblasti integrovaných obvodů (IO), kdy je energie přenášena mezi vrstvami IO.

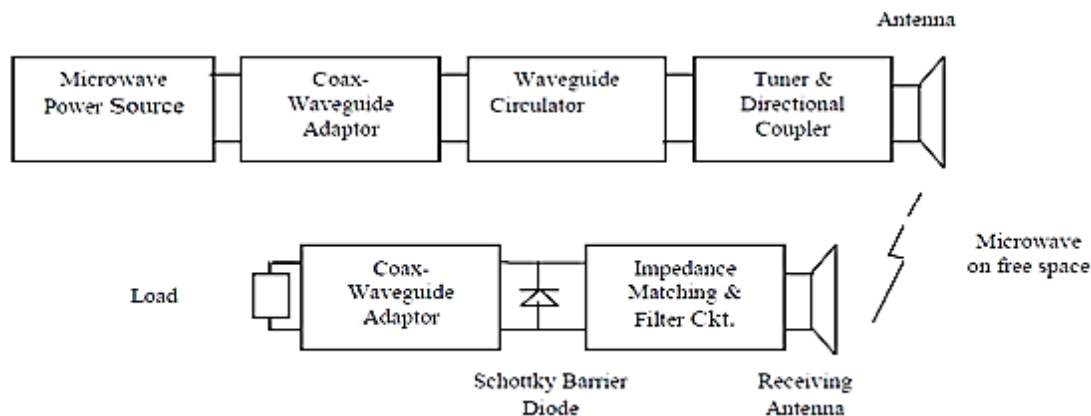
Účinnost zařízení prudce klesá se vzdáleností, na níž chceme el. energii přenést. Např. u zařízení LXWS fy Murata s přenášeným výkonem 10 W je dosaženo účinnosti 70 % [8].

Tabulka 4 Souhrn vlastností přenosu pomocí kapacitní vazby

Účinnost – v závislosti na vzdálenosti, prakticky do 75 %	
Výhody	Nevýhody
směrovost, malý rozptyl	krátká vzdálenost (max. jednotky cm)
	prudká závislost účinnosti na vzdálenosti
	napájení malých zařízení (jednotky wattů)
	potřeba vyšších napětí zdroje
	polarizace dielektrik v přenosové cestě

2.5 Přenos mikrovlnami

Mikrovlnami se v současnosti přenáší spojení mezi mobilními zařízeními (GSM) v pásmu např. 2,45 GHz. Pro využití mikrovln pro nabíjení je nutno nabíjené zařízení doplnit snímačem mikrovln, usměrňovací anténou (rectenna) a nabíjecí elektronikou [9].



Obrázek 9 Koncept přenosu el. energie mikrovlnami dle W.C. Browna, zdroj: [5]

Obrázek 9 ilustruje blokově princip přenosu el. energie mikrovlnami. Zdroj mikrovln (Microwave Power Source) dodává energii o mikrovlnné frekvenci (0.3 až 300 GHz) přes adaptér (Coax-Waveguide Adaptor) do kruhového vlnovodu (Waveguide Circulator), který po volbě pásma a nasměrování v bloku Tuner & Directional Coupler vysílá energii směrem k přijímači (Receiving Antenna). Po příjmu a filtraci je energie vedena obdobným adaptérem jako na vysílací straně k zátěži (Load).

Účinnost technologie je do 60 % [10]. Experimentální ověření principu [11] je shrnuto do tabulky 5, tabulka 6 podává celkový sumář hlavních parametrů s výhodami/nevýhodami technologie.

Tabulka 5 Souhrn experimentálního ověření přenosu el. energie pomocí mikrovln, zdroj [5]

Přijímaný výkon	10 kW
Poloměr přijímací antény	17 m
Poloměr vysílací antény	3 m
Příkon vysílače	17.5 kW
Účinnost (celková)	57 %

Tabulka 6 Souhrn vlastností přenosu pomocí mikrovln

Účinnost: < 60 %	
Výhody	Nevýhody
větší vzdálenosti	zdravotní rizika
	EMC (rušení)
	rozměry vysílače a přijímače

2.6 Bezdrátový přenos elektrické energie dle Nikoly Tesly

Následující text obsahuje detailnější pohled na technologii bezdrátového přenosu el. energie dle N. Tesly. Podrobnější úvaha je uvedena z důvodu zařazení návrhu a stavby zkušebního modelu technologie a měření její účinnosti v této práci.

2.6.1 Historie vzniku

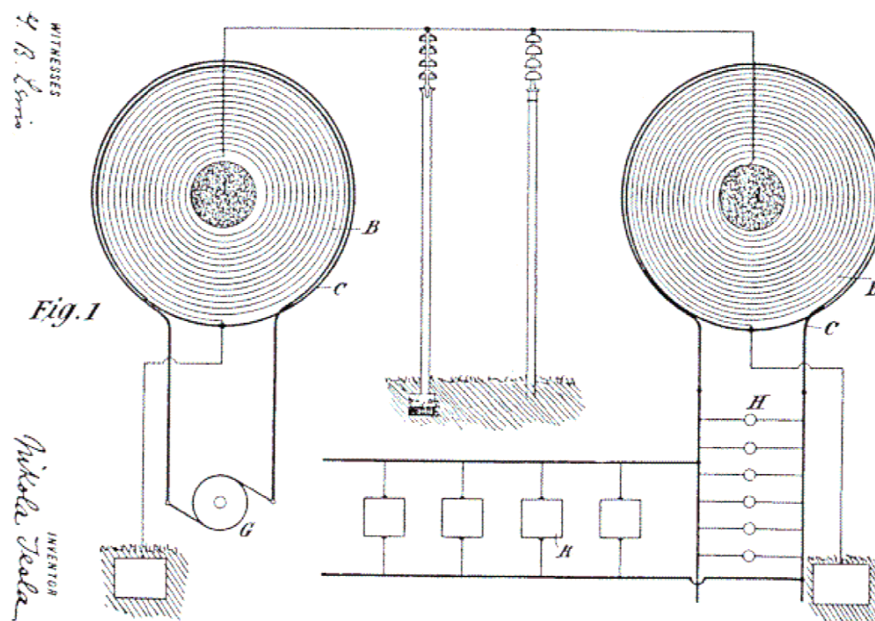
Tesla se velkou měrou podílel na zavedení střídavé soustavy, která začátkem 19. století musela podstoupit souboj s Edisonovým stejnosměrným systémem. Paradoxní je, že v době masivního budování střídavé soustavy pro výrobu a přenos elektřiny vypracoval Tesla třetí variantu – bezdrátový přenos.

Na tomto místě je nutné definovat význam slova *bezdrátový*. V intencích této práce je uvažován jako bezdrátový přenos takový, který může jako vodiče využívat zemi. Jde tedy o jednovodičový přenos zemí.

Sledujeme-li vývoj Teslovy technologie pro přenos elektřiny bez drátů, nemůžeme přehlédnout využití konceptů jeho blízkého přítele Waltera Russella. Russell, všestranný badatel, umělec a vizionář, sepsal již ve dvacátých letech 20. století své poznatky o fyzikální podstatě kosmu. Popisuje vesmír pomocí světelných efektů různé hustoty, které se zdají pozorovateli hmotné. V jeho teziích pak nevystupují částice, atomy, hmota, ale oktávově dělený jeden a týž gyroskopický mechanismus vytvářející dojem hmoty a prostoru. Veškerý pohyb má svůj původ, průběh a zánik v přesně definovaných spirálových trajektoriích, nekonečně se pohybujících v cyklech regulovaných magnetickým polem. Tesla kromě konstrukce zařízení patentoval také metodu pro přenos el. energie a některé součásti obsažené v hlavním patentu US645576.

2.6.2 Teslovy patenty

Jeden z prvních patentů (US593138) po éře střídavých strojů Tesly již využívá spirálovou trajektorii pro vedení elektromagnetických vzruchů.

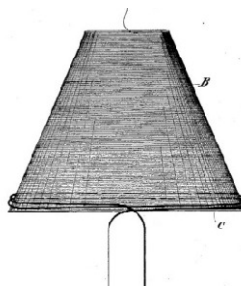


Obrázek 10 Jedna z prvních aplikací spirálového vedení elektřiny Teslou (zdroj: patent US593138)

Tesla komentuje použití spirálové trajektorie jako přínosné pro malou vlastní indukčnost tohoto závitového uspořádání. Z tezí W. Russella [12] plyne princip radiální komprese při dostředivém pohybu, kdy se ve středu vinutí zvyšuje hustota radiace přítomných polí. Pro zachování rovnováhy elementů vytvářejících dojem hmoty, musí v případě komprese ve středu vinutí okolní prostředí reagovat odpovídající měrou v podobě radiace. Na obr. 10 je v levé části vysílací stranu přenosové soustavy buzenou generátorem G, zásobujícím primární vinutí transformátoru C. V sekundárním vinutím téhož transformátoru je indukováno napětí umožňující vznik proudu tekoucího horním vodičem - Tesla v horním vedení využívá vodič podepřený izolovanými vzpěrami. Obvod se uzavírá skrze zemi (obdélníkové elektrody v dolní části), protože Teslovy bylo známo, že zemská kůra je při vhodném buzení schopna vést elektrický proud stejně dobře jako vodiče. Pojem vhodné buzení lze definovat tak, že forma elektřiny nezpůsobuje ohřev vodiči, kterými protéká, a nepůsobí negativně na živé organizmy. Na sekundární straně najdeme v pravé části obdobný transformátor pro zpětnou konverzi a využití energie spotřebiči H, zde je však primárním vinutím spirálová cívka, sekundární, tj. spotřebiče napájecí vinutí, tvoří relativně kratší vinutí silnějšího vodiče. Tato konverze je nutná pro využití energie elektrickými stroji napájenými dvouvodičově. Motory, které je možno napájet jedním vodičem, nebyly Teslou prosazeny kvůli značným finančním

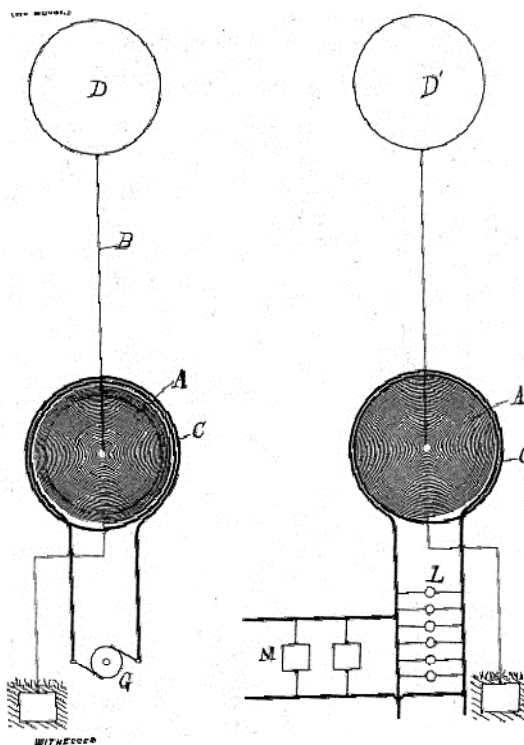
investicím do patentů na klasické indukční motory, jež chtěli tehdejší finanční spekulantůi zhodnotit.

Stopy Russellova modelu kosmu aplikované ve zmiňovaném patentu potvrzuje také náčrt možného provedení transformátorů na obr. 11. Russell popisuje veškerý elementární pohyb nahrazující atomovou teorii právě pomocí kuželovitých povrchů obepínaných spirálovými dostředivými či odstředivými trajektoriemi gyroskopických "stavebních kamenů", jež jsou v současnosti považovány za atomy [12].



Obrázek 11 Kónický tvar transformátorů pro přenos elektřiny (zdroj: patent US593138)

Dalším krokem ve vývoji bezdrátového přenosu el. energie Teslou bylo vypuštění horního vodiče – patent US645576 (obr. 12).

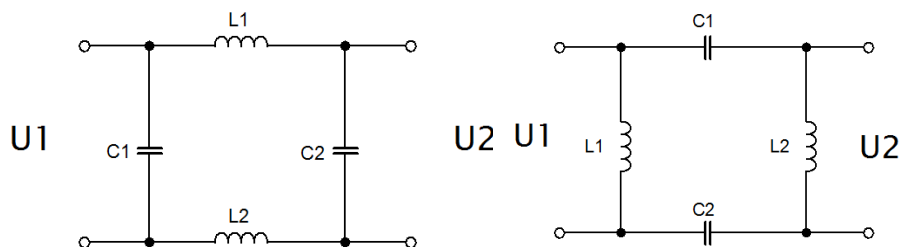


Obrázek 12 Teslova pozdější verze systému pro přenos elektřiny (zdroj: patent US645576)

Tento systém se již blíží teoretickému modelu pro ortogonální vedení – tj. duálnímu dvojbranu ke klasickému modelu vedení popisovaného telegrafními rovnicemi. Navíc využívá tvarování EM vzruchů do podoby vhodné pro bezdrátový přenos (bez ohřevu vodičů, kolem

nichž energie teče - neměřitelné současnými voltmetry navrženými pro standardní destruktivní ohřívající formu elektrického proudu).

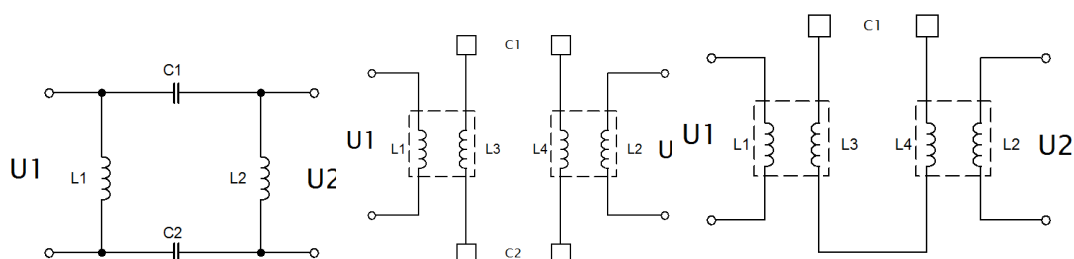
Pro pochopení mechanismů odehrávajících se v Teslově systému je potřeba představit ortogonální typ vedení.



Obrázek 13 Schéma běžného (vlevo) a modifikovaného idealizovaného vedení (vpravo)

Na obr. 13 je schéma zapojení idealizovaného vedení používaného pro přenos elektřiny dnes (levá část obr. 13) a modifikované, ortogonální vedení (pravá část obr. 13). U obou vedení jsou pro názornost rezistivní a vodivostní délkové elementy zanedbány.

Porovnání ortogonálního vedení a Teslova systému z patentu US645576 ilustruje obr. 14.



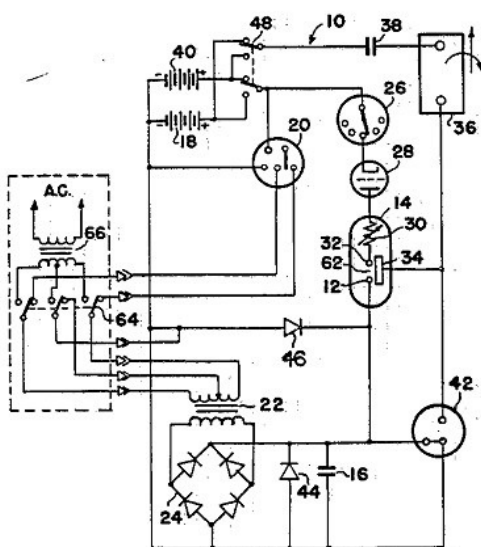
Obrázek 14 Model vedení (vlevo), možná aplikace modelu (uprostřed) a Teslův návrh v patentu US645576

Z obr. 14 plyne, že Teslův návrh připomíná metodu pro přenos el. energie kapacitní vazbou (kap. 2.4 dříve v textu), rozdíl je však ve formě elektřiny a nahrazení kondenzátoru ve spodní větvi vodičem tvořeným zemí. Napětí U1 (obr. 14 vpravo) generuje cyklicky buzené elektrické pole naplňující (resp. vyprazdňující) zásobníky v podobě vyvýšených elektrod kondenzátoru C1. Aby mohl být tento princip použit v praxi, je nutno dodržet několik podmínek:

- frekvence a střída zdroje budícího napětí musí odpovídat parametrům celého vedení
- na vysílací straně musí být zajištěna elektrická, nikoliv magnetická, indukce z budiče do sekundárního spirálovitého vinutí

- elektrody kondenzátoru by měly mít přívody chráněny atmosférou blízko vakuu nebo co nejvyšším podtlakem (pro co nejmenší interakci s molekulami atmosférických plynů).

V současnosti není známa úspěšná replikace – patrně z důvodu nesplnění všech podmínek provozu. Dosud je známo pouze lokální využití tohoto typu vedení Edwinem Grayem (patent US4595975). Grayova aplikace (obr. 15) obsahuje prvky pro zajištění základních podmínek ortogonálního vedení, vyjma podmínky atmosféry kolem přívodů kondenzátoru (při okamžitém využití a krátké přenosové cestě není zapotřebí).



Obrázek 15 Schéma obvodu pro napájení indukční zátěže E. Graye (zdroj: patent US4595975)

Grayův návrh obvodu pro napájení indukční zátěže má kondenzátor pro vedení ve tvaru zvláštní spínací jednotky (CSET, patent US4661747), část 14 na obr. 15). Druhou větev s kapacitní vazbou tvoří kondenzátor (část 38). Grayovi přinesla modifikace kondenzátoru do podoby spínací jednotky CSET možnost elektricky indukovat EM rázy do indukční zátěže interagující s permanentními magnety a konat tak mechanickou práci. Tímto obvodem tedy Gray napájel indukční motor. Gray hovoří o podobě elektřiny získané z jeho obvodu [13] jako o životu



Obrázek 16 Fotodokumentace charakteru elektřiny generované technologií E. Graye - rozsvícená Edisonova žárovka ponořená do vody (zdroj: <http://free-energy.ws/edwin-gray/>)

bezpečné, vodiče neohřívající formě, kterou je možno napájet např. žárovku ponořenou do vody (obr. 16). Ostatní prvky Grayova obvodu (obr. 15) slouží pro zajištění elektrické indukce s potřebnou frekvencí, střídou a intenzitou pomocí DC/DC měniče (prvky 40, 18, 20, 22, 24) a VN kondenzátoru (16), vybíjeného zpět do primární strany zvyšujícího DC/DC měniče.

2.6.3 Popis Teslovy technologie pro bezdrátový přenos elektrické energie

Tesla se po neúspěšném prosazení svého bezdrátového přenosu vyjadřuje s odstupem času následovně:

"Převažující nesprávný úsudek o mechanismu, týkajícího se bezdrátového přenosu, je zodpovědný za různá neopodstatněná oznámení, která uvedla v omyl veřejnost a způsobila mnoho škod. Když budeme mít stále na mysli, že přenos elektrické energie zemí je v každém ohledu identický s přenosem elektřiny přímým drátem, jasně pochopíme tento fenomén a budeme schopni správně posoudit hodnotu jakéhokoliv nového návrhu." [14]

Od doby, kdy Tesla zažíval se svými okázalými prezentacemi vysokonapěťových úkazů úspěch zejména u laické veřejnosti, uplynulo minimálně sto let. Přesto to nebyla dostatečně dlouhá doba na to, aby seriózní experimentátor překročil rámec efektnosti a pokusil se vytěžit ze zařízení více. Zatímco u Tesly bylo hlavním důvodem prezentací prokázat možnost, že elektrické stroje mohou být napájeny jedním vodičem, a přesto si publikum spíše zapamatovalo světelné výboje, dnešní experimentátoři se ani nenamáhají s ověřováním principu Teslovy technologie a spokojí se pouze s "vizuální podívanou".

2.6.4 Současné ověřování Teslovy technologie

Předváděcí sadu Teslovy technologie pro přenos elektřiny sestavil (2009) německý profesor Furtwangenské university Konstantin Meyl. Meyl se domnívá, že našel nedostatky v Maxwellových rovnicích, doplnil je a vysvětluje princip Teslova přenosu pomocí napěťových vírů šířících se podélnými vlnami [15]. Prof. Meyl dále uskutečnil experiment, kterým se snaží poukázat na povahu vln vystupujících v Teslově vysílači. Horní elektrodu umístil do Faradayovy klece a vyslovil tezi, že jestliže přenos stále probíhá, musí tyto vlny procházet i Faradayovou klecí. Z Teslova popisu systému je patrné, že přenos se neuskutečňuje mezi vyvýšenými elektrodami, jak se prof. Meyl domnívá, ale vodičem tvořeným zemí (v Meylově modelu Teslova patentu je země nahrazena měděným vodičem). Buzení u Meyla obstarává v experimentální sadě obdélníkový generátor TTL impulzů naladěný na rezonanční parametry soustavy vysílač-přijímač. O plnohodnotném ověření

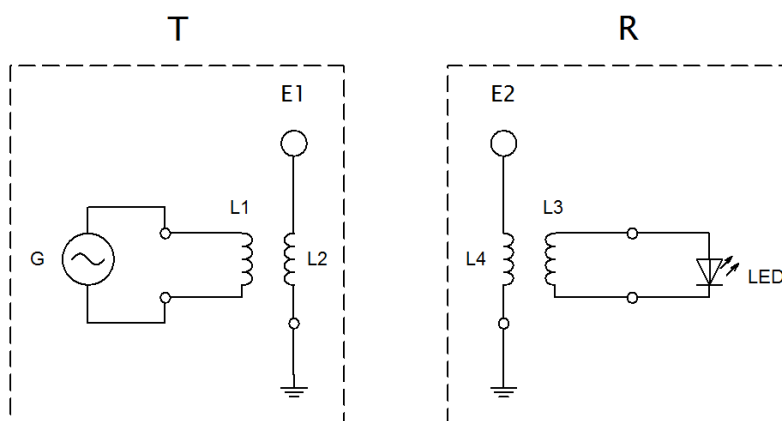
technologie Meylem nemůže být řeč z důvodu nesplnění podmínek definovaných pro úspěšný přenos Teslou v patentu.

Pro nalezení správného pracovního režimu soustavy pro bezdrátový přenos elektřiny dle N. Tesly je třeba přihlídnout k povaze přenosu: Vždy, když je při provozu detekován ohřev vodičů, plášťů elektrických strojů nebo negativní reakce živých organismů na přenášenou energii, nejedná se o správný režim přenosu.

3 Návrh a ověření funkce experimentální sady pro bezdrátový přenos elektřiny

3.1 Návrh vysílače a přijímače, volba zdroje a zátěže

Pro experimentální ověření funkce jsem vybral Teslovu metodu. Zdrojem informací byl patent US645576 popisující základní geometrické uspořádání plochého transformátorů ve vysílací a přijímací části (transformátor přijímací části je identický transformátoru vysílací části), typ elektrod, jejich umístění, povahu zdroje pro buzení vysílací části a další nutné podmínky pro úspěšnou realizaci modelu zařízení. Schéma návrhu je na obr. 17.



Obrázek 17 Schéma zapojení realizované sestavy pro bezdrátový přenos, G – zdroj signálu, L1 – primární vinutí vysílacího transformátoru vysílače T, L2 – sekundární vinutí transformátoru vysílače, E1 – vyvýšená elektroda vysílače, L4 – primární vinutí transformátoru přijímače R, L3 – sekundární vinutí transformátoru přijímače, E2 – vyvýšená elektroda přijímače, LED – zátěž přijímače

Při postupu návrhu plochého spirálového transformátoru jsem zohlednil podmínku přizpůsobení zdroje signálu geometrii vinutí. Pro maximální využití energie zdroje signálu (použit generátor Tesla BM492, sinusový výstup, max. 10 MHz) je nutno navrhnout délku vinutí sekundárního vinutí vysílacího transformátoru s ohledem na vlnovou délku nosné frekvence. Platí (US645576), že tato délka má být rovna jedné čtvrtině vlnové délky budících kmitů. S ohledem na možnosti použitého generátoru jsem zvolil pracovní frekvenci kolem 5 MHz. Délka vlny zvolené frekvence dle:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

kde

λ – vlnová délka kmitů [m]

c – rychlost šíření světla ve vakuu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

f – frekvence napětí zdroje [Hz],

je 60 m. Pak čtvrtina vlnové délky, tedy délka sekundárního vinutí vysílacího transformátoru, resp. délka primárního vinutí přijímacího transformátoru, je 15 m. Tuto teoretickou hodnotu jsem korigoval z důvodu zavedení indukční vazby sekundárního vinutí s primárním, které má být dle doporučení v patentu tvořeno několika závity relativně silnějšího vodiče. Korekci konečné délky vinutí vysílacího (přijímacího) transformátoru jsem dosáhnul pomocí generátoru a osciloskopu. Při příliš vysoko posazeném rezonančním kmitočtu vnitřního (tvoří delší spirálu) vinutí transformátoru jsem přidal počet závitů. Rezonance je na vf voltmetru (osciloskopu) indikována max. napětím. Změnou délky vinutí jsem zajistil pracovní oblast transformátoru v dosažitelném pásmu generátoru (4 - 6 MHz).

Pro sekundární vinutí vysílače (resp. primární vinutí přijímače) jsem zvolil izolovanou dvojlinku CYH 2 X 0,75, průřez mědi 2 x 0,75 mm, 2 žíly (lanka), průhledná PVC izolace do 50 V. Využita je pouze jedna žíla, druhá je pro účely budoucího testování chování bifilárního vinutí.



Obrázek 18 Materiál vnitřních vinutí transformátorů

Metodu pro určení parametrů transformátorů analyticky se mi nepodařilo v dostupné literatuře nalézt, řešení s využitím numerických metod konečných prvků a simulace pole by přesahovalo rámec této práce. Parametry dle doporučení patentu mnou korigované pro praktickou realizaci shrnuje tabulka 7.

Jako první zátěž přijímače byla zvolena LED dioda (červená, tělo s půdorysem 2×1 mm), tato varianta umožňuje snadnou vizuální kontrolu přenosu. Po úspěšném přenosu bude LED nahrazena činnou zátěží (metalizovaným rezistorem).

Tabulka 7 Vysílací/přijímací transformátor - parametry

Prvek	Délka [m]	Indukčnost [uH]	Průměr [mm]	Počet závitů [-]	Typ, pozn.	Průřez [mm]
L1, L3	1	-	195	3	TV koax 75Ω	-
L2, L4	12	90	165	20	izol. Cu vodič	0,75
E1, E2	0,35	-	65	-	Al povrch ukončení	-

Vinutí plochých cívek jsem realizoval na připravenou pevnou dřevotřískovou podložku, na níž jsem co nejtěsněji navíjel jednotlivé závity od vnitřního nejkratšího po nejdelší vnější. Celkem 20 závitů bylo kladeno ve vodorovné ose za sebe do konečného vnějšího průměru 165 mm. Konce vinutí jsem pocínoval, aby bylo možné je snadno spojit s ostatními částmi.

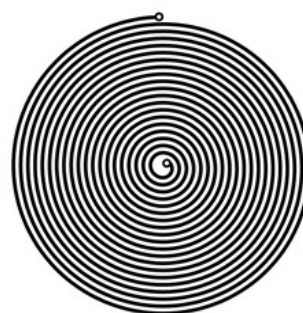
Výsledný tvar ilustruje obr. 19. Výška vinutí odpovídá šířce použité dvojlinky – jde o plochý transformátor. Vinutí jsem po dokončení dočasně zafixoval průhlednou lepenkou (pro možnost další korekce počtu závitů). Fotografie vnitřního vinutí je v příloze 1.

Pro primární vinutí vysílače (resp. sekundární vinutí přijímače) jsem zvolil stínící část koaxiálního TV kabelu RG K100 s impedancí 75 Ω obsahujícího vnější PVC izolaci a stínění Al folií (obr. 20).

Podrobné parametry RG K100 kabelu: průměr 6,6 mm, Al folie, impedance 75 Ω, útlum při 50 MHz: 4,4 dB/100 m, při 500 MHz: 14,7 dB/100 m.

Důvodem pro zvolení stínění jako vodivého prvku bylo patentové doporučení. V původním vynálezu je použit budící zdroj lépe kompatibilní s následnou indukcí v elektromagnetických vzruchů do sekundární strany vysílače (kompenzace skin-efektu, snaha o větší plochu indukujícího primárního vinutí vysílače z důvodu preference elektrické indukce).

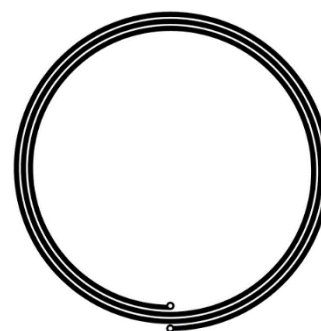
Tři závity vnějších vinutí transformátorů jsem navínel kolem vnitřních vinutí opět ve vodorovné ose těsně za sebe a jejich konce



Obrázek 19 Uspořádání vnitřních vinutí transformátorů



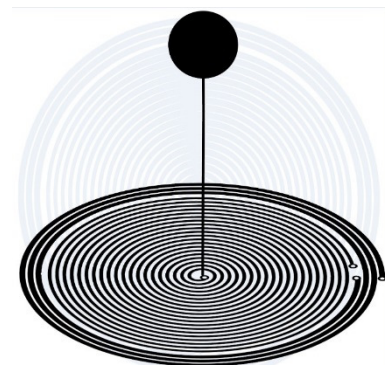
Obrázek 20 Materiál vnějších vinutí transformátorů



Obrázek 21 Uspořádání vnějšího vinutí transformátorů

pocínoval. Výsledný vnější průměr vinutí je 195 mm. Cívku jsem zafixoval proti případnému povolení závitů kovovou svorkou nezasahující do magnetického obvodu. Fotografie detailu vnitřního i vnějšího vinutí je v příloze 2.

Kulové vyvýšené elektrody zajišťující kontakt s okolním prostředím jsem vyrobil z měkčených PVC koulí o průměru 65 mm. Povrch jsem potáhl Al fólií. Hliník je vhodný pro své magnetické vlastnosti a přijatelnou rezistivitu. Do připravených elektrod jsem vrtem připevnil opěrky v podobě izolovaného Cu vodiče průměru 1,2 mm. Skrze opěrky jsem elektrody vodivě spojil s pocínovanými konci nejkratších závitů vnitřních vinutí transformátorů. Mechanickou stabilitu opěrek s podložkou jsem zajistil mírným zapuštěním konců opěrek do dřevotřískové podložky. Fotografie sestaveného vysílače (přijímače) je v příloze 3.



Obrázek 22 Kompletní plochý transformátor s vyvýšenou kulovitou elektrodou

Po konstrukci transformátorů jsem změřil rezonanční vlastnosti vnitřního i vnějšího vinutí v očekávaném pásmu použití. Tyto parametry jsou ovlivněny parazitní kapacitou vinutí, vlastní indukčností a sériovým odporem použitého vodiče. Na přeladitelném generátoru jsem pro vybrané frekvence zaznamenal úroveň napětí $U(f)$ a vyjádřil je pomocí poměrného útlumu A :

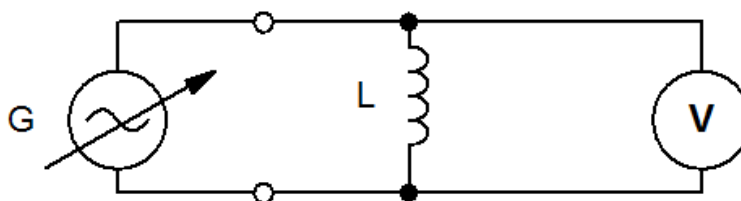
$$A = 20 \log \frac{U(f)}{U_{fr}} [\text{dB}] \quad (3.2)$$

kde

U_{fr} - největší naměřené napětí na vinutí, tj. napětí při rezonančním kmitočtu (0 dB)

$U(f)$ - napětí příslušná vybraným frekvencím f .

Schéma zapojení měření rezonanční křivky vnějšího vinutí je na obr. 23.



Obrázek 23 Schéma zapojení pro měření rezonančních křivek vinutí transformátoru, G – přeladitelný generátor sinusového průběhu, L – měřené vinutí, V – vf voltmetr (osciloskop)

Tabulka 8 Hodnoty veličin z měření rezonanční křivky vnějšího vinutí transformátoru

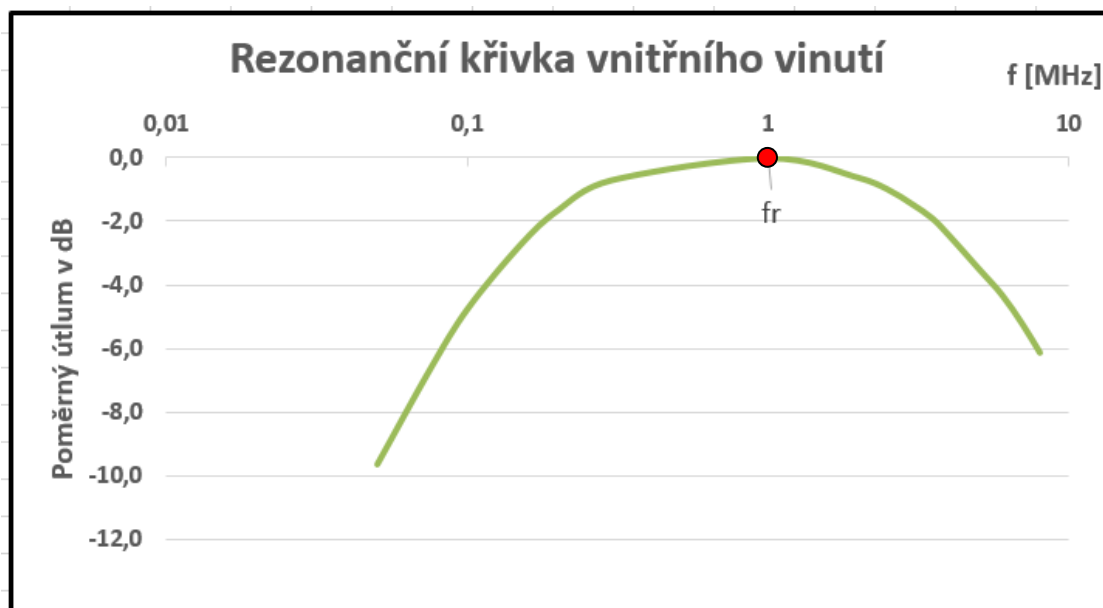
f [MHz]	1	2	2	3	3,5	4	5	6	6,25	6,5	6,75	7	8	9	10
U(f) [V]	1,56	2,82	3,33	3,75	4,11	4,2	4	2,63	1,68	0,8	0,9	1,43	2,46	2,45	2,3
A [dB]	-8,6	-3,5	-2,0	-1,0	-0,2	0,0	-0,4	-4,1	-8,0	-14,4	-13,4	-9,4	-4,6	-4,7	-5,2



Obrázek 24 Změřená rezonanční křivka vnějšího vinutí transformátoru, bod f_r odpovídá rezonančnímu kmitočtu, tj. 0 dB

Tabulka 9 Hodnoty veličin z měření rezonanční křivky vnitřního vinutí transformátoru

f [MHz]	0,05	0,075	0,1	0,15	0,2	0,3	1	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8
U(f) [V]	1,97	2,78	3,46	4,36	4,94	5,5	5,96	5,55	5,32	5,05	4,8	4,5	4	3,63	3,27	2,95
A [dB]	-9,6	-6,6	-4,7	-2,7	-1,6	-0,7	0,0	-0,6	-1,0	-1,4	-1,9	-2,4	-3,5	-4,3	-5,2	-6,1

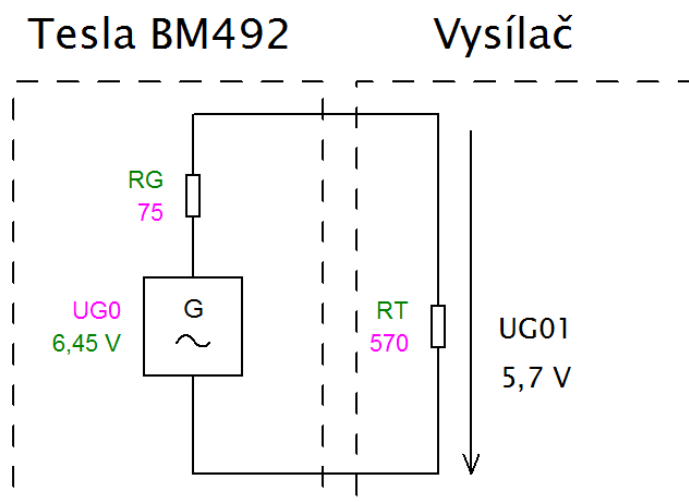


Obrázek 25 Změřená rezonanční křivka vnitřního vinutí transformátoru, bod f_r odpovídá nejmenšímu útlumu, tj. 0 dB

3.2 Kontrola funkce a měření účinnosti návrhu

Před měřením je třeba propojit zemnicí svorky přijímače a vysílače, aby bylo simulováno vedení skrze zemský povrch. Vyvýšené elektrody byly při měření od sebe vzdáleny asi 0,7 m. Po připojení zátěže na sekundární vinutí přijímače a generátoru na primární vinutí vysílače jsem přeladováním generátoru v mezích 4 až 6 MHz našel rezonanční režim zařízení. Tehdy se rozsvítí LED na přijímači. Frekvence rezonančního módu byla asi 5,4 MHz.

Pro měření přeneseného výkonu by byl vhodný spektrální analyzátor schopný pomocí softwarové vnitřní nadstavby spočítat výkon sumací výkonů jednotlivých harmonických. Bez spektrálního analyzátoru ve výbavě jsem použil pro stanovení výkonu vstupujícího do vysílače nepřímou metodu se známým napětím na vstupu vysílače a proudem tekoucím do vysílače. Vnitřní impedance R_G generátoru BM492 při volbě zdířky 75Ω je právě 75Ω , jeho napětí naprázdno U_{G0} jsem nastavil zabudovaným děličem na $6,45 \text{ V}$. Po připojení samotného vysílače (přijímač nepřipojen) na generátor napětí na generátoru kleslo na hodnotu $U_{G01} = 5,7 \text{ V}$ vlivem úbytku na vnitřní impedanci generátoru BM492 R_G , který se vytvořil proudovým požadavkem vysílače s vnitřní impedancí R_T (obr. 26).



Obrázek 26 Schéma ilustrující připojení vysílače na generátor signálu

Generátor BM492 i připojený vysílač nyní lze sloučit do jednoho bloku s novým napětím naprázdno U_{G01} a vnitřní impedancí R_{G1} , definovanými dle Thaveninovy poučky:

$$U_{G01} = 5,7 \text{ V}$$

$$R_T = \frac{U_{G01}}{U_{G0} - U_{G01}} \cdot 75 \Omega = 570 \Omega$$

$$R_{G1} = \frac{R_T \cdot R_G}{R_T + R_G} = \frac{570 \cdot 75}{570 + 75} = 66 \Omega$$

kde

R_T – impedance vysílače připojená na generátor BM492

U_{G01} – napětí naprázdno po sloučení zdroje BM492 a připojené impedance vysílače

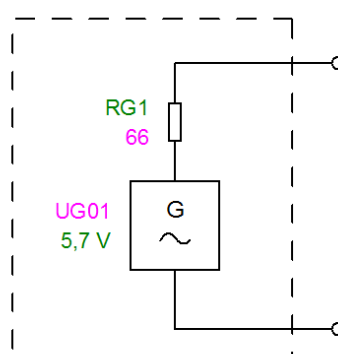
U_{G0} – původní napětí generátoru BM492 naprázdno

R_{G1} – vnitřní impedance sloučeného zdroje

R_G – původní vnitřní impedance generátoru BM492.

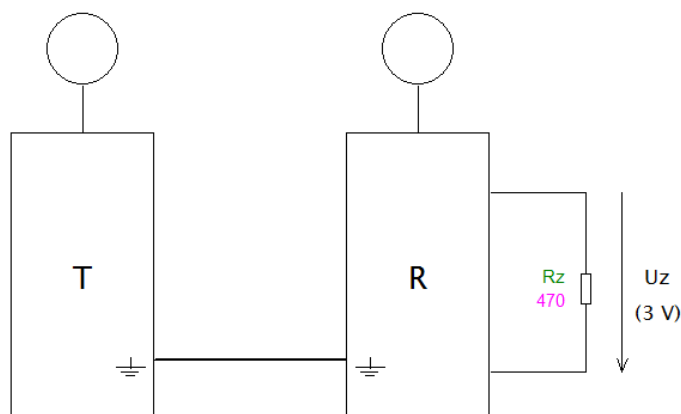
Výsledný nový zdroj signálu s přepočítanými parametry je na obr. 27.

Zdroj signálu pro přijímač



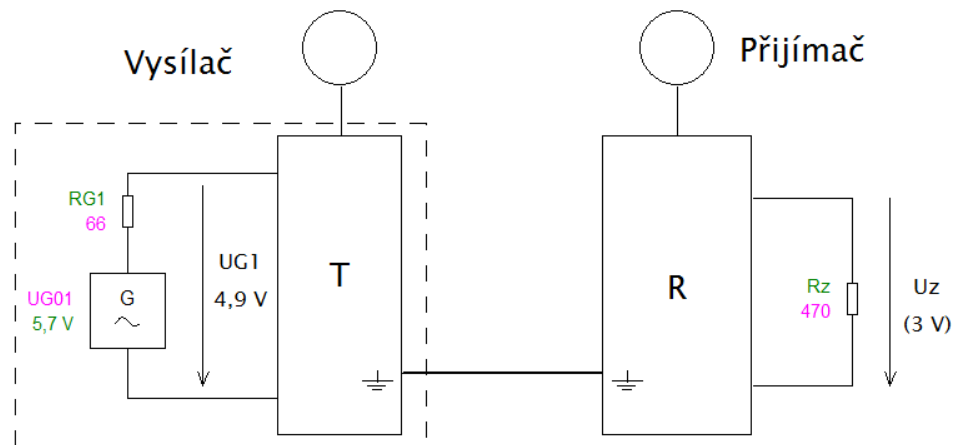
Obrázek 27 Výsledné parametry zdroje signálu pro přijímač

Na nově definovaný zdroj signálu jsem poté připojil přijímač zatížený na svém výstupu činnou zátěží 470Ω . Pro toto spojení a tedy zahájení přenosu energie z vysílače do přijímače stačilo propojit zemnicí svorky obou transformátorů dle obr. 28.



Obrázek 28 Zahájení přenosu - propojení přijímače R se zdrojem signálu T pomocí zemnicích svorek

Na generátoru signálu jsem jemným nastavením našel frekvenci, pro níž bylo na zátěži R_Z největší napětí (3 V). Tehdy byla frekvence přenosu 5,45 MHz. Napětí na vstupu vysílače U_{G1} kleslo na hodnotu 4,9 V (obr. 29), tedy na vnitřní impedanci R_{G1} vlivem proudových nároků přijímače vzniknul úbytek 0,8 V.



Obrázek 29 Parametry po zahájení přenosu elektrické energie

Vysílačem emitovaný výkon P_{IN} jsem stanovil dle součinu napětí na vstupu vysílače a proudu I_G tekoucího do něj:

$$I_G = \frac{U_{G01} - U_{G1}}{R_{G1}} = \frac{5,7 - 4,9}{66} = 12,1 \text{ mA}$$

$$P_{IN} = U_{G1} \cdot I_G = 4,9 \cdot 0,0121 = 59 \text{ mW}$$

kde

I_G – proud z generátoru do vysílače T

U_{G01} – napětí naprázdno po sloučení zdroje BM492 a připojené impedance vysílače

U_{G1} – napětí sloučeného zdroje signálu po zatížení přijímačem R

R_{G1} – vnitřní impedance sloučeného zdroje

P_{IN} – vysílačem emitovaný výkon.

Výkon P_{OUT} přenesený do zátěže je dán podílem druhé mocniny napětí zátěže U_Z a odporu zátěže R_Z :

$$P_{OUT} = \frac{U_Z^2}{R_Z} = \frac{3^2}{470} = 19 \text{ mW}$$

Účinnost přenosu v navrženém zařízení η tedy je:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \cdot 100 = \frac{19}{59} \cdot 100 = 32 \%$$

4 Závěr

Předkládaná práce měla za cíl zjistit možnosti bezdrátově přenášet elektrickou energii. Od sestavení funkčního modelu jednoho typu z výčtu možných technologií přenosu v této práci uplynulo nepoměrně méně času vzhledem k více než stoletému vývoji a zájmu o elektromagnetické fenomény, jež byly nepochybně iniciovány sepsáním rovnic Maxwellem. Přestože ne vždy se k těmto základním vztahům v konstrukční praxi vracíme, byly uvedeny jako výchozí bod pro úvahu o možnostech šíření elektřiny. Spatřením vztahu mezi magnetickým a elektrickým polem je možno lépe rozhodnout, jaké veličiny a v jaké míře lze pro přenos využít.

V práci měl uvedený přehled aktuálních technologií pro bezdrátový přenos přinést povědomí o možnostech, omezeních a výhodách různých technologií pro další experimenty. I když není výčet vyčerpávající, poskytuje přehledné informace a odkazy, pomocí nichž lze vyhledat detaily konkrétních aplikací a existujících experimentálních výstupů.

Zvolená metoda přenosu byla vybrána, protože existují spory o její funkci a není známa prokazatelně funkční replika odpovídající patentovým prohlášením o přenosu tisíců kW na desítky kilometrů.

Zhotovení modelu pro ověření zvolené metody bezdrátového přenosu elektřiny přineslo poznatky o nutnosti plnění podmínek pro správnou funkci takto koncipovaných zařízení. I bez plnění těchto podmínek však je zřejmý potenciál této technologie – soudě podle slušné účinnosti i v relativně jednoduché praktické realizaci přenosu zdokumentované předkládanou prací. Ukázalo se, že je nezbytné pro lepší výsledky použít pro napájení tohoto typu zařízení jiný typ zdroje, tj. vysokofrekvenční vysokonapěťový obvod s jiskřištěm zajišťujícím strmé elektrické rázy do primárního vinutí vysílače spolu s ortogonálním typem vedení. Použitím běžného generátoru dochází v testovaném zařízení k jevům spojeným s destruktivními účinky zkratových proudů - magnetická induktivní vazba se všemi jejími nedostatky, rušením a nízkým potenciálem pro šíření na větší vzdálenosti.

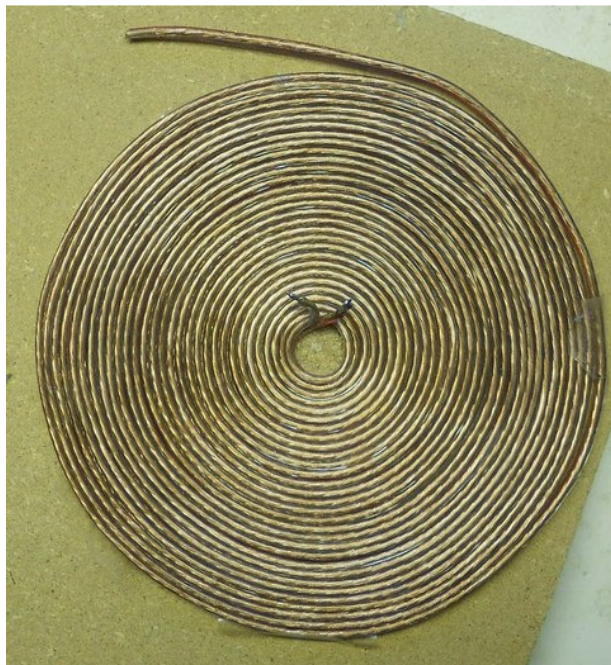
Pro lepší využití původní myšlenky přenosu elektrické energie zemí tak práce poskytuje dobrý ideový směr a přináší také kroky pro plnohodnotnou realizaci celé technologie.

Použitá literatura

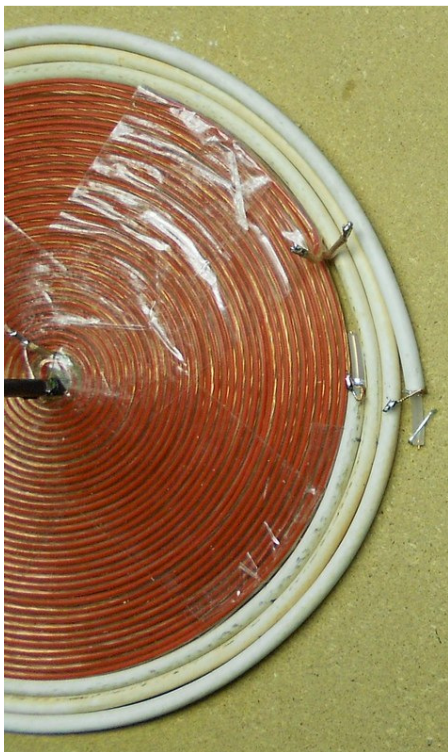
- [1] Szántó, L.: Maxwellovy rovnice a jejich názorné odvození, BEN - technická literatura, Praha 2003, ISBN 80-7300-096-2
- [2] Catt, I., *Maxwell's equations revisited*, ročenka magazínu Wireless World, 1980, str. 77
- [3] Online Kurz fyziky Univerzity Karlovy, kapitola 5.1.2, dostupné [22.2.2014] na http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/5_1
- [4] Catt, I.: *The Hidden Message in Maxwell's Equations*, magazín Electronics and Wireless World, listopadové vydání 1985, dostupné [28.2.2014] na <http://www.ivorcatt.co.uk/2804.htm>
- [5] Online zdroj WikiPedia, dostupné http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_power
- [6] Aristeidis, Joannopoulos, Karalis, Soljačić, M.: Efficient wireless non-radiative midrange energy transfer, *Annals of Physics*, leden 2008, č. 323, str. 34–48, dostupné [3.3.2015] na http://www.mit.edu/~soljadic/wireless-power_AoP.pdf
- [7] Barcelo, T.: Application Note 138, Linear Technology, Říjen 2013, dostupné na www.linear.com
- [8] Murata, T.: World's first production starts for Capacitive Coupling Wireless Power Transmission Module, firemní buletin Murata, 2011 dostupné [16.2.2015] na <http://www.murata.com/en-eu/about/newsroom/news/application/energy/2011/0928>
- [9] Patel A.: *International Journal of Scientific & Engineering Research*, svazek 4, čl. 3, březen 2013, ISSN 2229-5518
- [10] Brown, W.C.: An experimental Microwave-Powered Helicopter, *IEEE*, svazek 13, část 5, str. 225-235
- [11] Lan Sun Luk, Celeste, Romanacce, Chane Kuang Sang, Gatina: Equivalent circuit modelling of a point to point wireless power transmission system, *Antennas and Propagation Conference, 2006, IEEE*, ISBN:978-92-9092-937-6
- [12] Russell, W.: *The Universal One*, Univ. of Science & Philosophy, 1974, ISBN:978-1879605084
- [13] *Development of First Fuelless Engine*, National Tattler, Speciální edice, 1984, dostupné [25.5.2015] na http://www.free-energy.ws/pdf/various_articles.pdf
- [14] Tesla, N.: *The True Wireless*, technický magazín Electrical Experimenter, Experimenter Publishing, 1919
- [15] Meyl, K.: *Scalar Waves*, Indel GmbH, 2003, ISBN: 978-3980254243

Přílohy

Příloha 1 Fotografie z výroby vnitřního vinutí plochého transformátoru



Příloha 2 Dokončený plochý transformátor s vnějším vinutím z koaxiálního kabelu



Příloha 3 Fotografie vysílače (resp. přijímače) s plochým transformátorem a vyvýšenou elektrodou na podpěře

