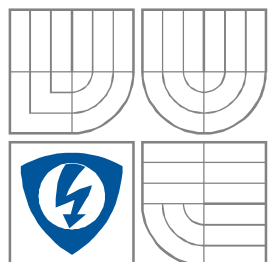


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

BEZDRÁTOVÝ PŘENOS VÝKONU

THE WIRELESS TRANSFER OF POWER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

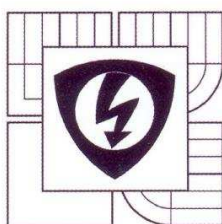
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. David Varga

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. David Varga

Ročník: 2

ID: 83164

Akademický rok: 2010/11

NÁZEV TÉMATU:

Bezdrátový přenos výkonu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte způsob ověření přenosu elektromagnetické energie pomocí reaktivní vazby dvou antén a zvolte vhodný matematický aparát k syntéze těchto antén. Tímto postupem dále vytvořte analytický a numerický model antén.

Na základě výpočtu dle zvolených parametrů, tyto antény realizujte a proveďte ověřovací měření. Z výsledků měření vytvořte skutečný stav procesů při přenosu, a graficky vynesete hlavní závislost přenosu výkonu na vzdálenosti obou zařízení. Porovnejte výsledek experimentu s matematickými modely, diskutujte možnosti využití takového přenosu energie.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] TESLA, N. U.S. patent 1,119,732 Apparatus for transmitting of electrical energy.
- [2] DĚDKOVÁ, J. Modelování elektromagnetických polí. Elektronická skripta. Brno: FEKT VUT, 2007.
- [3] NOVÁČEK, Z. Elektromagnetické vlny a vedení, antény a šíření vln. Elektronická skripta. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 20.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

BEZDRÁTOVÝ PŘENOS VÝKONU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

Bc. DAVID VARGA

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. MILOSLAV STEINBAUER, Ph.D.

ABSTRAKT

Tento projekt je zaměřen na ověření přenosu elektromagnetické energie pomocí reaktivní vazby dvou kapacitních antén. Základní přístup spočívá v nedokončené práci Nikoly Tesly zejména jeho myšlenky o možnosti bezdrátového dálkového přenosu elektrické energie tímto způsobem. Na tuto velmi zajímavou, rozpracovanou teorii je navázáno.

V projektu je na základě výpočtu podle zvolených parametrů navržen aparát pro ověřovací měření, přitom je kladen důraz na principiální dodržení původní koncepce. Výsledek experimentu je srovnán s výchozí hypotézou a matematickými modely. Z experimentu je následně stanoveno, jestli je tento způsob přenosu energie možný a jestli je využitelný v praxi.

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

WIRELESS TRANSFER OF ENERGY

MASTER'S THESIS

AUTHOR Bc. DAVID VARGA

SUPERVISOR Ing. MILOSLAV STEINBAUER, Ph.D.

ABSTRACT

This project is focused on the test of transmission electromagnetic energy via reactive coupling of two capacitive antennas. Basic approach is in unfinished work of Nicola Tesla emphasize his idea about possibilities the distant wireless transfer of energy in this way. Upon this interesting, theory is that joined.

In project is on the basis calculation after choosing parameters designed apparatus for test measuring, whereat is emphasized fundamental compliance original conception. The result of experiment is compared with hypothesis and mathematical model. From experiment is subsequently given, if this mode of transmission energy is possible and if usable practically is or not.

Klíčová slova

Rezonance, Nikola Tesla, bezdrátový přenos , Maxwellovy rovnice, numerické metody.

Keywords

Resonance, Nicola Tesla, wireless transmission of power, Maxwell equations, numerical methods.

Bibliografická citace

VARGA, D. *Bezdrátový přenos výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Bezdrátový přenos výkonu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 16. května 2011

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu. Ing. Miloslavu Steinbauerovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 16. května 2011

.....

podpis autora

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratky

EM	elektromagnetický
FFT	rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform)
TC	Teslacoil – teslova cívka užívaná obvykle k výrobě střídavého VVN
MT	Magnifying transmitter – název pro TC složený z transformátoru a LC obvodu
MKD	metoda konečných diferencí
VF	vysokofrekvenční
VVN	velmi vysoké napětí
EMP	elektromagnetický puls
TEM	Transversálně elektromagnetická vlna
TE	Transversálně elektrická vlna
TM	Transversálně magnetická vlna
LEM	Longitudinální plasmová elektromagnetická vlna
PSV	Poměr stojatých vln

Symboly

E	intenzita elektrického pole	(V·m ⁻¹)
D	elektrické indukce	(C·m ⁻²)
H	intenzita magnetického pole	(A·m ⁻¹)
B	magnetická indukce	(T)
μ	permeabilita	(H·m ⁻¹)
μ_r	relativní permeabilita	(SI)
ε	permitivita	(F·m ⁻¹)
ε_r	relativní permitivita	(SI)
<i>L</i>	indukčnost	(H)
<i>C</i>	kapacita	(F)
<i>q</i>	elektrický náboj	(C)
<i>U</i>	elektrické napětí (efektivní hodnota)	(V)
<i>I</i>	elektrický proud (efektivní hodnota)	(A)
<i>j</i>	hustota elektrického proudu (časově proměnná)	(A·m ⁻²)
Φ	magnetický indukční tok	(Wb)
φ_e	skalární elektrický potenciál	(V)

Obsah

1	ÚVOD.....	10
2	CÍL PRÁCE.....	10
3	BEZDRÁTOVÝ PŘENOS ENERGIE	11
3.1	3.1 ROZDĚLENÍ BEZDRÁTOVÝCH SYSTÉMŮ PŘENOSU ENERGIE	11
3.2	3.2 KLASICKÝ TESLŮV TRANSFORMÁTOR	12
3.3	3.3 TESLŮV TRANSFORMÁTOR JAKO VYSÍLAČ NEBO PŘIJÍMAČ	16
3.4	3.4 SOUVISEJÍCÍ PROJEKT K. MEYLA	17
4	TEORETICKÝ MODEL.....	20
4.1	4.1 PRINCIP NAVRŽENÉ METODY	20
4.2	4.2 ODVOZENÍ Z MAXWELLOVÝCH ROVNIC PRO KANÁL	22
4.3	4.3 ANALÝZA RLC MODELU V ČASOVÉ OBLASTI	24
4.4	4.4 POSTUPU PŘI SYNTÉZE MODELU V PROSTORU	29
5	NÁVRH EXPERIMENTU	30
5.1	5.1 ZÁKLADNÍ KONCEPCE PŘÍSTROJE	30
5.2	5.2 ANALÝZA NÁVRHU	32
6	POPIS PRVNÍHO REALIZOVANÉHO EXPERIMENTU.....	33
6.1	6.1 ZÁKLADNÍ OBVODOVÁ KONCEPCE PŘÍSTROJE.....	33
6.2	KONCEPCE SPOTŘEBIČE NA VÝSTUPU Z PŘIJÍMAČE	37
7	POPIS DRUHÉHO REALIZOVANÉHO EXPERIMENTU	39
7.1	MĚŘENÍ NA PŘÍMOU VAZBU.....	41
7.2	MĚŘENÍ NA KAPACITNÍ VAZBU.....	42
7.3	OTEVŘENÍ OBVODU A SPOJENÍ S PEN A VELKÝM VODIVÝM IZOLOVANÝM <u>TĚLESEM</u>	43
8	ZÁVĚR.....	44
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ODKAZY	45
10	PŘÍLOHY	46

Seznam obrázků a tabulek

- obr. 3.1 Pokus o přenos elektromagnetické energie MIT
- obr. 3.2 Induktivně vázaná dvojice rezonančních obvodů
- obr. 3.3 Průběhy napětí a proudů OrCad simulace z projektu THOR
- obr. 3.4 Rezonanční obvod je induktivně vázán k okolním obvodům
- obr. 3.5 Experimentální souprava pro ověření přenosu (Meyl)
- obr. 4.1 Nákresy z Teslových patentů a jeho vysílač na Long islandu
- obr. 4.2 Prvé schéma zobrazuje obecný model
- obr. 4.3 Zjednodušení modelu celého obvodu
- obr. 4.4 Obvod modelovaný pro případ rezonance linkovými transformátory
- obr. 4.5 Kanál ve zředěném plynu plasma koule
- obr. 5.1 Schéma budiče (první samokmitající verze)
- obr. 5.2 Jádru je typ US 5972, feritový materiál CF196, ekvivalent H21.
- obr. 6.1 Štítek PC zdroje pro napájení experimentálního obvodu
- obr. 6.2 Schéma a fotografie budiče a usměrňovače
- obr. 6.3 Tvar napětí měřený na kolektorech proti sobě
- obr. 6.4 Fotografie testu na transformátoru při stlačení mezery jádra
- obr. 6.5 Fotografie jednoho článku cívky při testech a celé sestavy i s izolátory
- obr. 6.6 Fotografie dvou induktorových sloupců s izolovanými kulovými kondenzátory
- obr. 6.7 schéma zobrazuje obecný model zohledňující skutečnou podobu přístroje
- obr. 6.8 Závislost parazitní rezonance a indukčnosti na rezonanční kapacitě
- obr. 6.9 První experiment - napětí naprázdno měřené na výstupu
- obr. 7.1 Schéma budiče – signál generovaný klopným obvodem spíná budící stupeň
- obr. 7.2 Signál měřený na jednom z tvarovacích výstupů na báze
- obr. 7.3 Budič v provozu
- obr. 7.9 Schéma měřícího pracoviště na příkladu s kapacitním mostem
- obr. 7.4 Schéma zapojení napájecí linky s přímou vazbou
- obr. 7.5 Schéma zapojení napájecí linky pro obvod za překážkou
- obr. 7.7 Průběh napětí na budiči $U(B)$
- obr. 7.8 Měření na kapacitním oddělení
- obr. 7.6 Schéma zapojení napájecí linky s otevřeným obvodem
- obr. 10.1 Měřící pracoviště
- obr. 10.2 Linka s kapacitní překážkou v modelové podobě dvou kondenzátorů
- tab. 6.1 Tabulka změřených hodnot indukčností .

1 Úvod

Princip bezdrátového přenosu elektrické energie byl poprvé zkoumán na konci minulého století největšími vynálezci v oboru elektrotechniky té doby. Hlavními soupeři byli v Americe N. Tesla a v Evropě G. Marconi. Oba měli za úkol přenést signalizaci přes Atlantský oceán. Zatímco Marconi vycházel z experimentů Heinricha Herze, Tesla měl vlastní přístup a svůj aparát koncipoval úplně jinak. Marconi sklídil nebývalý ohlas tisku a investorů za úspěšný přenos zprávy v morseovce, na druhé straně nedostavěnou anténu Nikoly Tesly nechala strhnout americká armáda oficiálně kvůli nařknutí z toho, že posílal zprávy Němcům. Z našeho úhlu pohledu je Marconiho systém nezajímavý, protože neslouží k významnému přenosu energie, ale k vysílání modulované elektromagnetické vlny. Naproti tomu systém Nikoly Tesly je přímo určen k vysílání energie. Teslovým největším ideálem bylo vytvořit celosvětový bezdrátový napájecí systém, který umožní i letadlům elektrický pohon bez nutnosti těžkých baterií.

Náš zájem je zaměřen právě na přenos energie, ne EM. vlny jako nosiče informace. Kvůli tomu je uvedený přístup vhodnější. Vývoj pokračuje různými směry jako je klasická elektromagnetická transformace na malou vzdálenost při napájení drobné elektroniky, vysílání úzce směřovaného rádiového svazku mikrovln pro přenos energie sluneční elektrárny z oběžné dráhy planety, a použitím rezonančních prvků jako jsou magneticky vázané smyčkové rezonátory a elektricky navázané dielektrické prvky. V projektu se budeme zabývat poslední jmenovanou variantou s mírnou úpravou.

2 Cíl práce

Obecným účelem projektu je ověřit původní myšlenku N. Tesly, jeho US. patentu 1 119 732 podaného 1.12.1914: Apparatus for transmitting electrical energy, a sestavit vlastní kvalifikovanou zprávu o využití rezonančních obvodů k bezdrátovému přenosu energie. Přitom se budeme co nejvíce držet původní koncepce. Rozdíl bude v použití moderní součástkové základny a moderního matematického popisu.

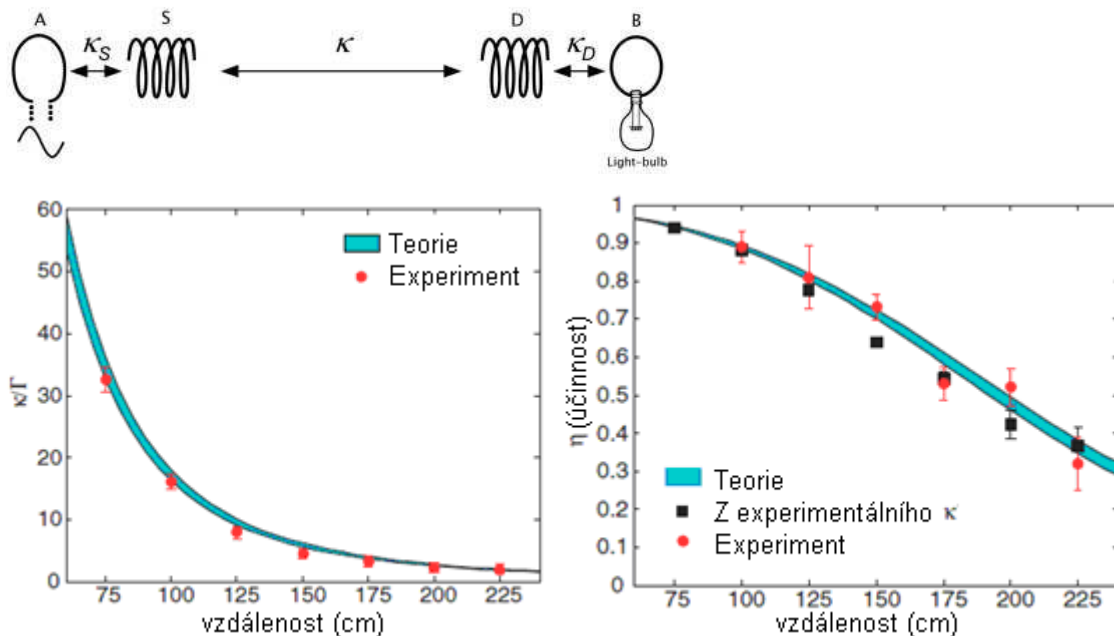
Princip samotného zařízení bude zmíněn v teoretické části a s využitím Maxwellových rovnic bude odvozen obecný způsob výpočtu výkonové přenosové charakteristiky v závislosti na vzdálenosti. V experimentální části práce bude aplikován model do praxe, a také bude určen systém jednotlivých ověřovacích měření.

3 Bezdrátový přenos energie

3.1 Rozdělení bezdrátových systémů přenosu energie

Bezdrátový přenos je možno provést jen prostřednictvím elektromagnetického pole, a podle toho jaké má toto pole vlastnosti, se rozděluje do několika skupin.

- o První velká skupina tvoří transformátory se vzduchovou mezerou podobně jako indukční vařič. V podstatě se jedná o přenos pomocí jednoduché magnetické rezonance (firmy SONY, INTEL, APPLE). Problém je s nečistotami, která omezuje tuto metodu na vzdálenost pouhých 50 cm. Navíc tento přenos pracuje pouze s účinností 80 %, při použití usměrňovače 60 %. V nedávné době byla vyvinuta jednotka, která bez poklesu efektivity prodlouží možnost přenosu až na vzdálenost 80 cm. Výhodou této metody by měl být fakt, že nezáleží na tom, co stojí v cestě. Nezastaví ji ani kovový materiál, pouze zeslabí.
- o Dále skupina vědců z MIT pod vedením Marina Soljačiče experimentálně zkoumá slibné možnosti přenosu pomocí magnetické rezonance dvou magneticky buzených spirálových antén. Obsáhlá dokumentace s matematickým modelem je volně k dispozici na internetu, detailní popis je mimo rámec projektu. Pro ilustraci jsou vhodnější výsledky než teorie.



obr. 3.1 Pokus o přenos elektromagnetické energie, který provedl tým vědců pod prof. Marinem Soljačičem. Nahoře je princip buzení a navázání obou antén přes činitel vazby κ , který je jako funkce vzdálenosti spolu s činitelem přenosu vyneseno v grafech. Obrázky pochází z publikované práce *Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances*.pdf

- o Třetí možnost spočívá v úzce směřovaném svazku mikrovln. Tuto variantu zkoumá americká NASA z důvodu spojení vysílající solární elektrárny na oběžné dráze a přijímací soustavy na zemi. Tento princip, i když na nižším kmitočtu využívá i ionosférická laboratoř HAARP na Aljašce. Také U.S. armáda zjišťuje možnosti přenosu EM. energie pomocí mikrovln ve zbraních využívajících tepelných ničivých účinků, popřípadě EMP, které zneškodní elektronické přístroje.

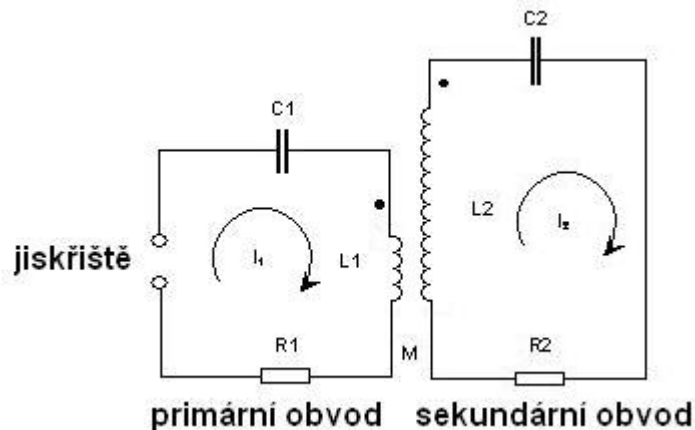
- o Čtvrtou variantou je elektricky vázaná dvojice rezonátorů na shodném kmitočtu. Obvody jsou spojeny prostřednictvím kapacitního posuvného proudu, který je zmiňován v dokumentech Nikoly Tesly. Náš projekt se zabývá právě tímto způsobem spojení.

3.2 Klasický Teslův transformátor

Klasický Teslův transformátor obvykle slouží k dosažení maximálního napětového zisku, v pokud možno co nejkratším čase.

Popis Teslova transformátoru pomocí metody smyčkových proudů

TC může být považován za dva induktivně vázané, tlumené sériové kmitavé obvody:



obr. 3.2 Induktivně vázaná dvojice rezonančních obvodů

Vytvoření primárního obvodu spouští jiskřiště nebo jiný spínač. Spínač propojí sériově zapojený primární kondensátor C_1 , primární vinutí L_1 a jeho náhradní odpor R_1 . Sekundární obvod je vytvořen sériovým sekundárním vinutím L_2 , jeho náhradním odporem R_2 a vrcholovým kapacitním koncem C_2 smyčka je uzavřena skrz uzemnění. Sekundární cívka je na spodním konci uzemněna a vrcholový kondensátor vykazuje kapacitu k zemi. Primární a sekundární vinutí jsou induktivně spojeny vzájemnou indukčností M .

Podle prvního Kirchhoffova zákona je suma napětí kolem uzavřené smyčky nulová, tedy:

$$R_1 i_1 + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = 0$$

$$R_2 i_2 + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0$$

Jestliže je q_i okamžitý náboj na kapacitách C_1 a C_2 , pro každý obvod je dáno:

$$i_i = \frac{dq_i}{dt} \quad i = 1, 2$$

Zavedením substituce v prvních dvou rovnicích dostáváme:

$$R_1 \frac{dq_1}{dt} + \frac{1}{C_1} q_1 + L_1 \frac{d^2 q_1}{dt^2} + M \frac{d^2 q_2}{dt^2} = 0$$

$$R_2 \frac{dq_2}{dt} + \frac{1}{C_2} q_2 + L_2 \frac{d^2 q_2}{dt^2} + M \frac{d^2 q_1}{dt^2} = 0$$

Vhodně upravíme a zavedeme diferenciální operátor podle času λ :

$$\left[\lambda^2 + \frac{R_1}{L_1} \lambda + \frac{1}{L_1 C_1} \right] q_1 + \frac{M}{L_1} \lambda^2 q_2 = 0$$

$$\left[\lambda^2 + \frac{R_2}{L_2} \lambda + \frac{1}{L_2 C_2} \right] q_2 + \frac{M}{L_2} \lambda^2 q_1 = 0$$

Pomocí determinantu sloučíme výraz výše cramerovým pravidlem na charakteristickou rovnici:

$$(1 - k^2) \lambda^4 + \left(\frac{R_1}{L_1} + \frac{R_2}{L_2} \right) \lambda^3 + \left(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \frac{R_1 R_2}{L_1 L_2} \right) \lambda^2 + \left(\frac{R_1}{L_1} \omega_2^2 + \frac{R_2}{L_2} \omega_1^2 \right) \lambda + \omega_1^2 \omega_2^2 = 0$$

kde:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad \omega_i = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} \quad i = 1, 2$$

k je koeficient vazby ($0 < k < 1$), kde ω_1 a ω_2 jsou, úhlové rezonanční frekvence samostatných obvodů (tedy tzv. rezonance oddělených obvodů).

Rovnice je čtvrtého řádu (bikvadratická), lineární, homogenní, diferenciální s konstantními koeficienty, která bude mít dva páry komplexně sdružených kořenů λ_i , $i=1..4$, a tyto kořeny nám dají čtyři funkce.

$$y_i = e^{\lambda_i t} \quad i = 1..4$$

Tyto představují základ řešení systému dvou rovnic definovaného na začátku. Obecné řešení je tedy:

$$q_1 = \sum_{i=1}^4 A_i e^{\lambda_i t} \quad q_2 = \sum_{i=1}^4 B_i e^{\lambda_i t}$$

Konstanty A_i a B_i jsou dosazeny z počáteční podmínky pro $t=0$

$$q_1 = q_0$$

$$q_2 = 0$$

$$\lambda q_1 = \lambda q_2 = 0$$

kde q_0 je počáteční náboj na primárním kondensátoru. Primární a sekundární napětí na kondensátorech jsou pak:

$$u_1 = \frac{1}{C_1} q_1 = \frac{1}{C_1} \sum_{i=1}^4 A_i e^{\lambda_i t} \quad u_2 = \frac{1}{C_2} q_2 = \frac{1}{C_2} \sum_{i=1}^4 B_i e^{\lambda_i t}$$

Řešení v jednoduchém tvaru pro u_1 a u_2 mohou být nalezeny pouze pro nulové tlumení ($R_1=R_2=0$), kořeny λ_i charakteristické rovnice pak mají pouze imaginární části.

Sekundární průběh napětí může být vyjádřeno jako:

$$u_2(t) = \frac{2kU_1}{\sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \sin\left(\frac{w_2 + w_1}{2}t\right) \sin\left(\frac{w_2 - w_1}{2}t\right)$$

kde:

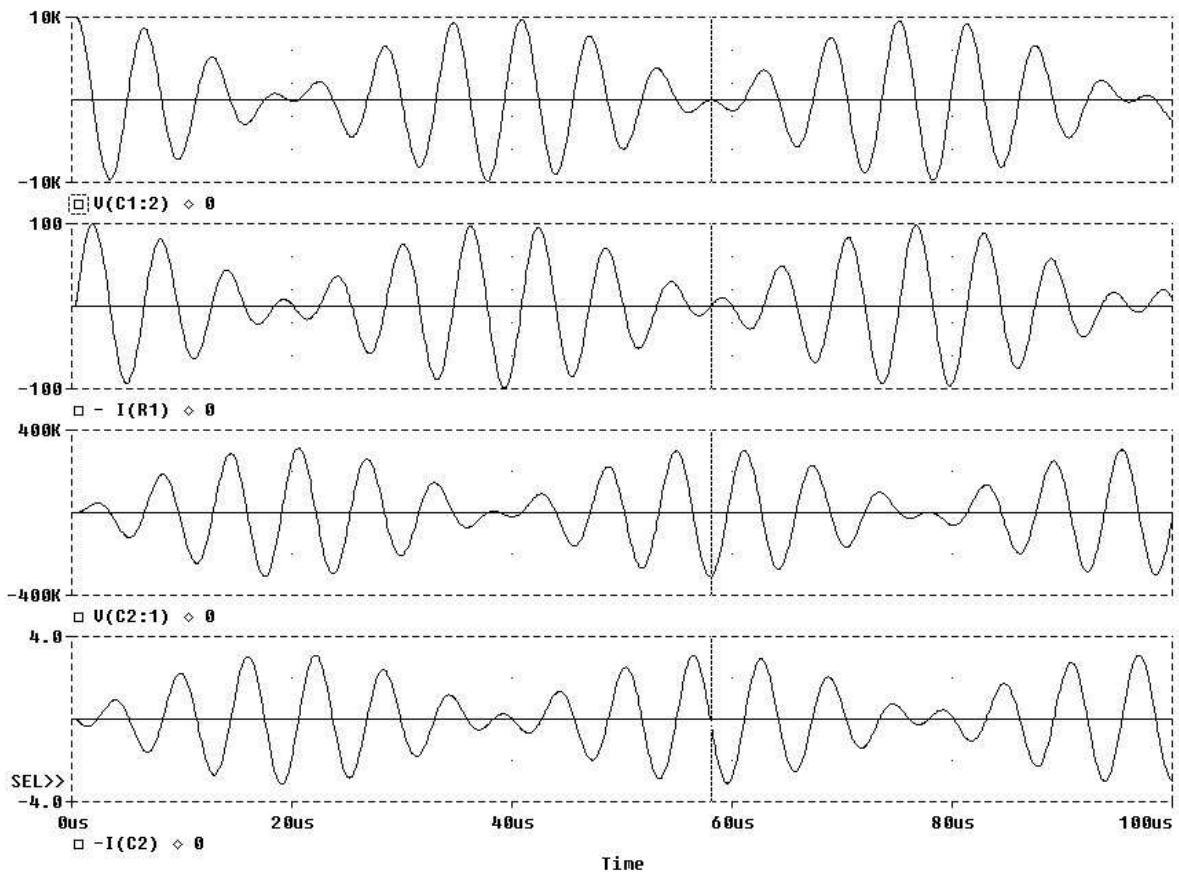
$$T = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1}$$

$$w_1 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) - \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}}{2(1-k^2)}}$$

$$w_2 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) + \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}}{2(1-k^2)}}$$

T je ladící poměr, definovaný jako čtverec poměru nevzájemných rezonančních frekvencí, zatímco U_1 je počáteční napětí na C_1 , w_1 a w_2 jsou rezonanční frekvence obvodů při vazbě. Fyzikální omezení na hodnoty k a T zajistí, že w_1 a w_2 jsou vždy reálné. Dále je také nutný předpoklad že $w_2 > w_1$.

Poslední dvojice vztahů je důležitá, protože ukazuje jak je sekundární napětí vysokofrekvenčních oscilací $(w_2 + w_1)/2$ modulováno další nízkofrekvenční oscilací $(w_2 - w_1)/2$.



obr. 3.3 Průběhy napětí a proudů OrCad simulace z projektu THOR, Marco Denicolai. Funkce jsou vždy superpozicemi dvou kmitočtů, zajímavé jsou fázové posuny mezi napětími a proudy.

Popis Teslova transformátoru metodou postupu energetického množství

Na začátku definujeme energii na vstupním prvku, což je v našem případě kondensátor C_1 , a energie je uložena v jeho náboji $Q_1 = C_1 \cdot U_1$, pak energie na kapacitě je $W_{C1} = \frac{1}{2} C_1 \cdot U_1^2$. Nyní uzavřeme primární obvod jiskřištěm, a energie se začne přeskupovat z elektrického pole kondensátoru C_1 na energii magnetického pole cívky L_1 proudem i_1 , $W_{C1} \rightarrow W_{L1}$ odtud $i_1^2 = \frac{C_1}{L_1} \cdot U_1^2$, odmocníme $i_1 = \sqrt{\frac{C_1}{L_1}} \cdot U_1$, dále dosadíme vlnový odpor $Z_0 = \sqrt{\frac{C_1}{L_1}}$, a dostaneme efektivní hodnotu primárního proudu $I_{L1} = \frac{1}{Z_{01}} \cdot U_1$, který budí v primární cívce indukční tok $\Phi_1 = L_1 \cdot I_{L1}$ pak $\Phi_1 = L_1 \cdot \sqrt{\frac{C_1}{L_1}} \cdot U_1 = \sqrt{L_1 \cdot C_1} \cdot U_1$. I pro tento případ parazitní odpor ignorujeme, a zavedeme jako v předchozím přístupu úhlový rezonanční kmitočet obvodu $\omega_i = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}}$ $i = 1, 2$, a opět dosadíme do předchozího, a dostaneme $\Phi_1 = \frac{U_1}{\omega_0}$. Indukční tok je zčásti společný pro primární i sekundární vinutí vzájemnou indukčností M . A tedy můžeme položit $\Phi_{12} = M \cdot I_1$ a také $\Phi_{12} = B_1 \cdot S_2 = \mu_0 \cdot H_1 \cdot S_2 = \mu_0 \cdot H_1 \cdot S_2 = \mu_0 \cdot \frac{N_1 \cdot I_1}{l} \cdot S_2$. Nyní nazveme počet závitů primárního vinutí N_1 a sekundárního N_2 a dostaneme $M = N_2 \cdot \frac{\Phi_{12}}{I_1} = \mu_0 \cdot \frac{N_1 \cdot I_1}{l_1} \cdot S_2$, takže máme známý vztah $\frac{\Phi_{12}}{\Phi_1} = \frac{M}{L_1}$ který nám udává rozptyl.

Energie primární cívky je definována jako $W_{L1} = \frac{1}{2} L_1 \cdot I_1^2 = \frac{1}{2} \Phi_1 \cdot I_1$,

a sekundární cívky podobně jako předchozí $W_{L2} = \frac{1}{2} L_2 \cdot I_2^2 = \frac{1}{2} \Phi_2 \cdot I_2$

Zavedeme zjednodušení, ve kterém nebude sekundární LC rezonátor zatížen a nedojde ke zpětnému ovlivnění indukčního toku, proto se dá sekundární proud odvodit z jen indukčního toku $I_2 = \frac{\Phi_{12}}{L_2}$, ale musí platit že $\Phi_2 = \Phi_{12}$, pak je zajištěn jednosměrný postup. Tato podmínka se v praxi u skutečného teslova transformátoru nedá splnit, ale pro hlavní balík přenesené energie je zjednodušení přijatelné. Tedy dosadíme do vztahů pro energii cívek $W_{L1} = \frac{1}{2} \Phi_2 \cdot I_2 = \frac{1}{2} \frac{\Phi_{12}}{L_2}$ a za $\Phi_{12} = \frac{M}{L_1} \cdot \Phi_1$ což je rozptyl. Zaměříme se nyní na požadovanou hodnotu napětí na sekundárním kondensátoru $W_{L2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{M^2 \cdot \Phi_1^2}{L_1^2 \cdot L_2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{L_2} \cdot \frac{M^2}{L_1^2} \cdot L_1^2 \cdot I_1^2 = \frac{M^2}{2 \cdot L_2} \cdot I_1^2$. Výše je určen $I_1 = \sqrt{\frac{C_1}{L_1}} \cdot U_1$

Dostáváme transfer energie násobený čtvercem činitele k $W_{L_2} = \frac{M^2}{L_1 \cdot L_2} \cdot \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot U_1^2 = k^2 \cdot W_{C_1}$.

Vzájemnou indukčnost bychom pak zjistili ze vztahu, který je v podstatě zjednodušený determinant z prvního přístupu MSP: $k^2 \cdot L_1 \cdot L_2 - M = 0$.

Energie původně uložená v kondensátoru C_1 je na sekundárním vinutí L_2 , a víme, že rezonátor $L_2 C_2$ musí mít energie na prvcích střídavě shodné, proto můžeme položit $W_{L_2} = W_{C_2}$ a znovu

dosadíme $\left(\frac{M^2}{L_1 \cdot L_2}\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot U_1^2 = \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot U_2^2$ a odtud je napětí na sekundárním vinutí zřejmě

$$U_2 = \sqrt{\left(\frac{M^2}{L_1 \cdot L_2}\right) \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)} \cdot U_1. \text{ Nyní použijeme činitel vazby, tedy } U_2 = k \cdot \sqrt{\left(\frac{C_1}{C_2}\right)} \cdot U_1.$$

Izolujeme přenos napětí $K = \frac{U_2}{U_1} = k \cdot \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$ a definujme požadavky, o které nám půjde.

Nejdůležitější je samozřejmě sekundární napětí U_2 , pak bychom měli zajistit maximální poměr

kapacit $\left(\frac{C_1}{C_2}\right) \gg 1$ a činitel vazby $k \rightarrow 1$. U běžně stavěných teslových transformátorů bývá poměr

kapacit až 1000 a činitel vazby okolo 0,4, účinnost dobře navrženého Teslova transformátoru se pohybuje okolo 10 %.

3.3 Teslův transformátor jako vysílač nebo přijímač

Samotný systém dvou Teslových transformátorů k přenosu energie není vůbec vhodný. Matematický model celého obvodu jednotkovým skokem vede na systém dvou bikvadratických charakteristických rovnic, harmonický popis a přenosové funkce jsou závislé na příliš mnoha parametrech. Navíc při změně zátěže, nebo budícího výkonu bude soustava reagovat nejméně čtyřmi druhy modulovaných zákmitů, takže celý řetězec bude dost špatně regulovatelný. Experimenty potvrdily, že díky čtyřem rezonančním obvodům v cestě je i tak dost složitá odezva dále zhoršována interharmonickými rezonancemi. Dva klasické Teslovy transformátory se budou spíše rezonančně napojovat na vše ostatní včetně vlastního uzemnění. Jeden rezonátor v rámci transformátoru bude oscilovat s druhým, místo toho, aby energetický balík předal vysílač přijímači. Popis modelu Teslova transformátoru je zmíněn z důvodu nezbytné a přímé logické návaznosti. Teslův transformátor vede na bezdrátový přenosový systém, i když je k tomu obecně nevhodný.

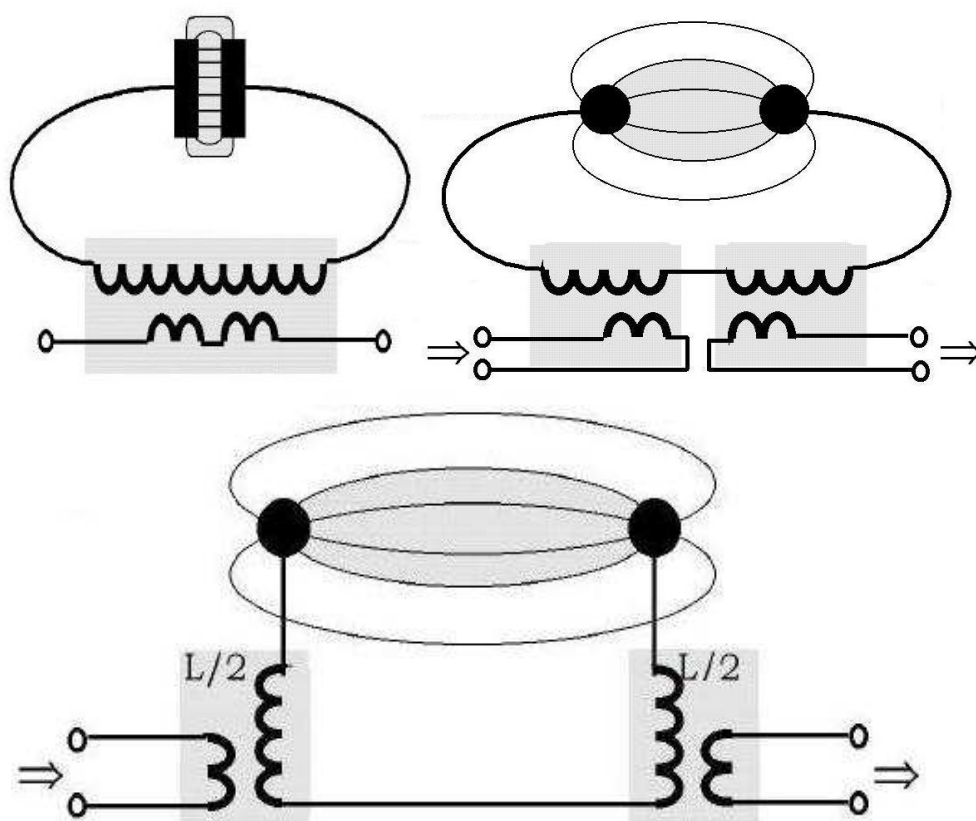
Proto Tesla navrhl svůj vysílač v patentu 1 119 732 jako obyčejný sériový LC rezonátor buzený VN nerezonujícím transformátorem. Pak přejde model přenosového systému třemi kroky ve dva kapacitně vázané paralelní LC rezonátory s jednoduchou přenosovou funkcí a relativní minimalizací vlastních kapacit přejde v jednoduchý LC rezonátor na vstupu buzený zdrojem a na výstupu tlumený zátěží. Pokud se z obvodu vypustí reálné prvky, přejde v obyčejný sériový rezonanční obvod. Přechodem od dvou bikvadratických prvků k jednomu kvadratickému se zjednoduší nejen matematický popis, ale i rychlost odezvy na regulační zásah a větší jednoznačnost přenosové charakteristiky. Činitel vazby pak určuje množství přenesené energie stejně jako v magnetickém rezonančním principu skupiny vědců z MIT. Jelikož používáme elektrickou vazbu místo magnetické, měl by být přenos lepší, důvod je zmíněn v části 77103192.

3.4 Související projekt K. Meyla

Obdobný projekt jako ten náš, provedl profesor Konstantin Meyl z university v německém Darmstadtu. Jeho smyslem bylo dokázat a rozdělit účinky podélných a příčných vln na jednom přístroji. Kmitočet byl volen vyšší, aby mohl být aparát malý a přitom splnil účel obou typů přenosů. Výkonové úrovně byly voleny nízké kvůli omezení vysílaného výkonu normou. Na téma přenosu energie natočil mnoho hodin přednášek a napsal několik publikací. V poslední době se věnuje projektům v oblasti EM biologické kompatibility a studiem vlivu podobných oblastí jako je například vliv mobilního telefonu na živý organismus.

Princip

Obecný přístup je velmi podobný rezonančnímu obvodu a jeho následné rozdělení napůl a oddálení – tím se sníží kapacita a činitel vazby. Obrázek z Meylova modelu ukazuje prostor mezi elektrodami vyplněný elektrostatickým tvarem rozložení siločar. Indukčnost se rozdělí na dvě poloviny a tvoří transformátory se svými vzájemnými indukčnostmi. V podstatě tu jde o co největší přenos výkonu z vysílací cívky na přijímací kapacitním a zpětným proudem přes zemnicí vodič. V obvodu není zahrnuta kapacita země ani kapacita nekonečna, celý okruh je uzavřen přes mezeru mezi kapacitními konci. V blízkém reaktivním poli má anténní funkce vzájemný tvar násobený převrácenou hodnotou třetí mocniny vzdálenosti r , která platí pro oba konce. Takže když jsou kondensátory relativně blízko sebe, přenos je přibližně polovina, ale když se začnou vzdalovat, přenos poklesne na průběh charakteristický pro blízkou zónu záření, tedy převrácenou hodnotu druhé mocniny vzdálenosti r , a už je převážná část energie vyzářena ve formě Poyntingova vektoru ven do prostoru.



obr. 3.4 Rezonanční obvod je induktivně vázán k okolním obvodům. Tříkrokovým přechodem od uzavřeného obvodu k otevřenému se obvod rozdělí. Tento postup je známý z otevření dipólu, je zde však rozdíl že nedojde k rozprostření parametrů a obvod se budí v impedančně přizpůsobeném místě k tlumení.

Teorie a odvození pro případ plasmové vlny

Základní nehomogenní vlnová rovnice je pro tento případ odvozena jako dvě identity Laplaceova operátoru:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \vec{B} &= \mu \cdot \vec{H} & \vec{J} &= 0 & \vec{D} &= \varepsilon \cdot \vec{E} \end{aligned}$$

Dosadíme z druhé rovnice do první a nahradíme indukce intenzitou:

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \cdot \left(\frac{\partial (\operatorname{rot} \vec{H})}{\partial t} \right) = -\mu \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\Delta \vec{E} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{E} - \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

V TEM přenosu je uvažována pouze rotační část identity, protože popisuje elektrickou složku ve vzdálené zóně, kde je vlna již zcela reálná. V LEM přenosu musíme uvažovat obě identity a pro tento případ je rozhodující právě gradientní část, která popisuje pole jako odvození vektoru od zdroje v blízké reaktivní zóně antény. Můžeme zavést dvě kalibrace pro blízkou a vzdálenou zónu: $\operatorname{rot} \vec{E} = 0$ LEM pro blízkou zónu, a $\operatorname{div} \vec{E} = 0$ TEM pro vzdálenou zónu, abychom vyšetřovali jen tu část identit, která nás zrovna zajímá. V experimentu K. Meyla je možný přenos oběma variantami, k tomu byl navržen, tedy položíme $\operatorname{rot} \vec{E} = 0$, $\operatorname{div} \vec{E} \neq 0$ a přejdeme ke skalárnímu elektrickému potenciálu: $\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi_e$ pak můžeme dosadit do kalibrované Laplaceovy rovnice:

$$\operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{E} = \operatorname{grad} \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi_e}{\partial t^2} \quad \Rightarrow \quad \operatorname{div} \vec{E} = -\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi_e,$$

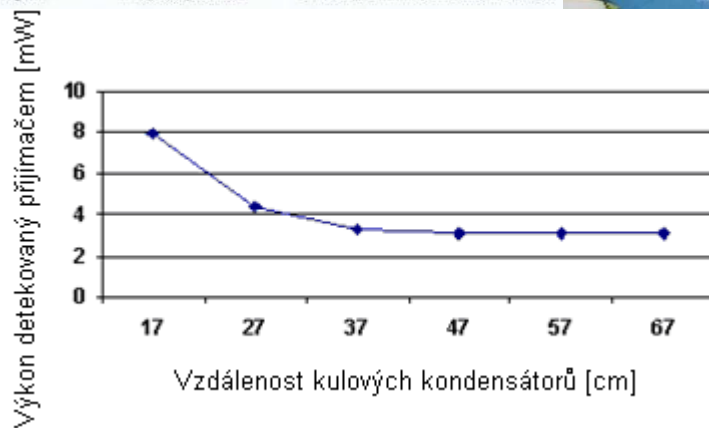
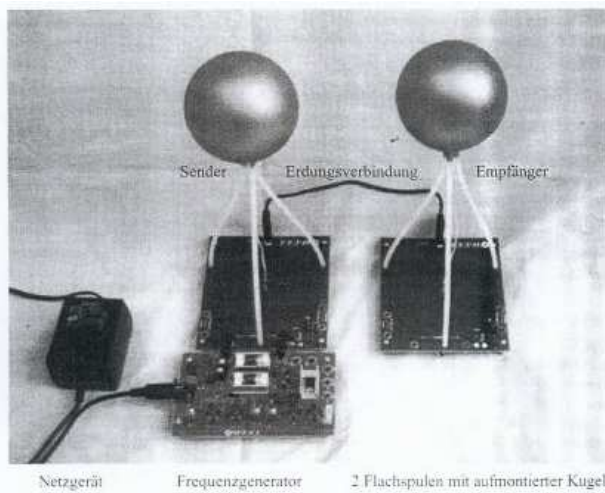
Protože platí zákon zachování elektrického náboje $\operatorname{div} \vec{J} = \varepsilon \cdot \frac{\partial \rho_e}{\partial t}$

dosadíme a získáme dynamickou vlnovou rovnici pro podélnou plasmovou vlnu:

$$\Delta \varphi_e = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi_e}{\partial t^2} - \frac{\rho}{\varepsilon}$$

Ta nás bude zajímat v dalším přiblížení v části 0, nicméně popisem pomocí plasmové vlny se začne přenos podobat spíše zvuku, kde vyvstávají problémy odlišné od TEM vln – kupříkladu plasmové vlny se nešíří rychlostí světla, nemohou mít jednoznačně popsán princip šíření ve volném prostoru, protože vstupem do vzdálené zóny přechází v kolmé TEM vlny, navíc dochází k podivnostem jako magnetohydrodynamické nelineární nestability a solitony. Tyto jevy nechává experiment Konstantina Meyla bez odpovědi, ostatně je to volné pole působnosti pro náš pokus. Meylův systém je zaměřen na rozdíly mezi přenosem oběma typy vln a tento účel je splněn.

Experiment



obr. 3.5 Experimentální souprava pro ověření přenosu: generátor je napájen síťovým adaptérem a pro potřeby měření je nastaven na 4,7MHz nebo 7MHz. Antény jsou vyrobeny z leptané ploché cívky a kulového terminálu. Průběh poklesu přijatého výkonu je v závislosti na vzdálenosti obou terminálů v centimetrech, vstupní výkon byl 19 mW a maximální spotřebovaný na LED přijímače 8,5 mW tedy dosažená účinnost 45 %. Experiment proveden na univerzitě v Darmstadtu týmem vědců vedených Konstantinem Meylem.

Použité měřicí přístroje

Digitální stolní multimetr Fluke 45

Digitální stolní multimetr Fluke 85-4

Digitální Osciloskop, čtyřkanálový, 500MHz Tektronix TDS 3054

Anténní měřič Kathrein MFK 55

Signální generátor Fluke 6062 A

Spektrální Analyzátor Hewlett Packard 8594 EMRCL-Meter Fluke PM 6304

4 Teoretický model

4.1 Princip navržené metody

Tesla upravil svůj rezonanční transformátor pro potřeby rozptylování nebo stahování energie z původně magneticky vázané dvojice LC obvodů spínané jiskřištěm na jeden zvyšující transformátor a proudově navázaný jednoduchý LC obvod, vše buzeno jeho rotačním spínačem, který pracoval na rezonančním kmitočtu.

Pokud by byl aparát konstruován jako dvojice magneticky vázaných LC obvodů, byl by činitel vazby k nízký, a účinnost by poklesla pod 10 %. Když se vynásobí takhle neúčinný přenos vysílače s přijímačem a ještě se odečte ztráta v přenosu mezi terminálními kapacitami, na samotnou zátěž by nezbyla ani tisícinová původně vložené energie.

Dále se naskytá myšlenka, proč Tesla navrhl vysílač a přijímač s elektrickou anténou místo magnetické. Zmíníme opět experiment vědců z MIT, antény pro příjem dlouhých vln se navrhují jako magnetické, RFID technologie také využívá ploché cívkové antény. Důvod pro tuto volbu je jednoduchý: magnetické pole se vyskytuje jen v rotačním tvaru – dosud nebyla zjištěna existence magnetického monopólu. Elektrické pole může mít topologii podle typu antény – může být také rotační ze zdroje typu magnetického dipólu, nebo může být ve tvaru elektrického dipólu, anebo jako v tomto případě unipolární elektrodynamická indukce, která se jakoby pokouší porušit zachování náboje a střídá jej na vrcholovém kondensátoru proti zemi, a země slouží jako nulová vztažná ekvipotenciála s velkou kapacitou. Teslův systém není určen k vysílání TEM vln a tedy nemůže být nikdy navržen jako magnetický.

Unipolární elektrodynamická indukce – tedy postupná, nebo stojatá plasmová vlna v blízké zóně je buzena v prostředí, kde kmitá energetické množství LEM nerotačního člene Laplaceovy identické rovnice. Platí zde nenulová divergence elektrického pole, což je právě elektrodynamická indukce. Když spojíme vysílač a přijímač přes zemi a mezi kapacitními klobouky definujeme kapacitu C_v , napojí se tato vlna k přijímači a s určitým fázovým posuvem začne kmitat také i v přijímači. Tato část bude také náplní měření. Přijímač je impedančně přizpůsoben k vysílači a prostředím je veden kapacitní proud. Pokud začneme budit přijímač rezonančním kmitočtem s malou amplitudou, opačnou polaritou elektrického pole a když je fázový posuv proti vysílači přesně 180° , vysílá přijímač vstřícnou stahovací LEM vlnu, která zvětšuje účinný dosah a usnadňuje průchod plasmové vlny přes kanál.



obr. 4.1 Nákreby z Teslových patentů a jeho vysílač na Long islandu: vysílač je tvořen LC obvodem, zespodu napájeným kruhovým transformátorem a spínač je nastaven na rezonanční kmitočet

Hypotéza:

Hertzovy elektromagnetické vlny se vytváří v blízké zóně vysílače, přes vzdálenou zónu doputují k blízké zóně přijímače a jsou zachyceny. Celý vnější systém je přizpůsoben impedanci prostředí 120π , které má roli rezonančního nosného média s permitivitou a permeabilitou, kde se tato vlna může šířit. Po celé trase je vlna transversální, tak jsou konstruovány a nastaveny antény. Přenos reálné energie probíhá řetězcem: vysílač – prostředí – přijímač.

Systém Nikoly Tesly je odlišný, nesnaží se obě antény přizpůsobit impedanci prostředí, ale přijímač k vysílači, které mají vlnový odpor ve stovkách $k\Omega$. Dále systém nepoužívá prostředí jako rezonanční médium, ale vodič podélného posuvného proudu ve směru spojnice vysílač – přijímač, a to odpovídá poměru odporů klasického drátového přenosu. Použitá kmitočtová pásma jsou vždy 10 kHz až 600 kHz tedy dlouhé a střední vlny, kde se může uplatnit vliv protnutí blízkých reaktivních zón. Příčné – TEM elektromagnetické vlny mají ve volném prostředí elektrickou složku vždy kolmou na směr šíření a magnetickou složku kolmou na směr šíření i na elektrickou složku. Elektromagnetické vlny, které používá Teslův systém jsou podélné – LEM, podobně jako křížové složky ve vlnovodech (TE, TM), které se obvykle definují hertzovými vektory, nebo odraz vertikálně polarizované dlouhé vlny od ionosféry, který je možné zachytit elektrickou anténou v horizontálním podélném směru. Elektrická složka LEM má shodný směr s vektorem, kterým dochází k přenosu, přičemž magnetická složka tvoří rotaci okolo tohoto směru. Teslovy podélné vlny, jak by se daly nazvat, jsou elektrické a tvoří kanál maximální hustoty posuvného proudu mezi vysílačem a přijímačem. Magnetická rotace je okolo maxima jako kolem vodiče s elektrickým proudem.

O těchto podélných vlnách se dále nedá tvrdit, že by se šířily, protože bez přijímače bude blízké pole vysílače generovat TEM vlnu, a už není možné mluvit o energetickém spojení, ale o vysílání dlouhých TEM vln. Soustavu vysílače a přijímače lze také chápat jako dvojici opačných pólů, které kmitají podobně jako kmitají konce klasického dipólu. Dále podélné elektromagnetické vlny musí splňovat obecné principy jako zákon zachování elektrického náboje, tedy když jde posuvný proud ve směru vysílač – přijímač musí jít protiproud i v opačném směru aby se uzavřel pomyslný elektrický obvod. Pata vysílače i přijímače je uzemněna a tvoří studený konec s nulovou hladinou elektrického potenciálu a také konec, připojený na zemní kapacitu s velkým množstvím volných nábojů. V obvodu by se tato velká kapacita dala považovat za vysokofrekvenční zkrat, anebo rezervoár elektronů, ze kterého se ekvipotenciální elektrická hladina odvodí. Vysoké napětí je u těchto vysílačů ze stejného důvodu jako u ostatních VN aplikací – minimalizace ztrát v tepelných účincích, které rostou s kvadrátem proudu, navíc při malém proudu nemusí být nutně dobrá vodivost uzemnění.

Solitonový model: Použití matematického popisu pomocí solitonového modelu a stojatého vlnění k vytvoření kanálu se použije jen v případě pokud se potvrdí hypotéza a měření těchto nelineárních magnetohydrodynamických jevů bude na 100 % průkazné a číselně nezvratitelné. Popis seznamu měření je v části **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

Jako poslední část hypotézy je nutno zmínit, že navázané spojení tvoří velký obyčejný nebo skládaný dipól (skládaný bude pokud se uplatní zemní proud). Dipól je tím větší, čím dál jsou unipóly od sebe. Takhle velká, i když jenom indukovaná anténa musí zachycovat měřitelné množství energie v prostředí plném elektrosmogu. Na různých kmitočtech je v prostředí provozována spousta elektromagneticky nekompatibilních strojů s okolními harmonickými a zákmity se spektrální složkou právě v pásmu použité frekvence. Dále elektromagnetické pozadí obsahuje různé složky šumu a na tomto pásmu jsou silné ruchy. Z toho plyne, že není zaručeno, zda

údaj změřený na některém z přístrojů bude objektivní, a jestli se tím neovlivní chyba. Samozřejmě, že měření pozadí bude použito jako počáteční vztažná hodnota pro SINAD.

4.2 Odvození z Maxwellových rovnic pro kanál

Maxwellovy rovnice budeme odvozovat pro kvazistacionární případ a připojíme ještě kontinuitu proudu a Lorenzovu sílu. Vztahy níže budeme sestavovat pro účel přenosu energie.

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} & \operatorname{div} \vec{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon} & \operatorname{div} \vec{H} &= 0 \\ \vec{B} &= \mu \cdot \vec{H} & \vec{D} &= \varepsilon \cdot \vec{E} & \vec{J} &= 0 \text{ nebo } \vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} & \text{podle prostředí} \\ \operatorname{div} \vec{J} &= \varepsilon \cdot \frac{\partial \varphi_e}{\partial t} & \vec{F} &= Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) & \vec{E} &= \vec{v} \times \vec{B} & \vec{H} &= -\vec{v} \times \vec{D} \end{aligned}$$

Pro objemovou hustotu energie platí prostorové derivace

$$w_E = \frac{\partial W_E}{\partial V} = \frac{1}{2} \cdot \vec{E} \cdot \vec{D} \quad w_H = \frac{\partial W_H}{\partial V} = \frac{1}{2} \cdot \vec{H} \cdot \vec{B}$$

Pro přenos definujeme změnu objemové hustoty energie a časové derivace

$$\frac{\partial w_E}{\partial t} = \vec{E} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \frac{\partial w_H}{\partial t} = \vec{H} \cdot \mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Nyní složíme Maxwellovy rovnice tak, abychom dostali ekvivalentně platné energetické vztahy výše. Proto rovnici pro magnetickou $\operatorname{rot} \vec{H}$ násobíme skalárně vektorem $\vec{E}$, a rovnici $\operatorname{rot} \vec{E}$ také násobíme vektorem $\vec{H}$.

$$\vec{E} \cdot \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \vec{H} \cdot \operatorname{rot} \vec{E} = -\vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Odečteme druhou rovnici od první,

$$\vec{E} \cdot \operatorname{rot} \vec{H} - \vec{H} \cdot \operatorname{rot} \vec{E} = \vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

A pro levou stranu platí známá identita Poyntingova vektoru

$$\vec{E} \cdot \operatorname{rot} \vec{H} - \vec{H} \cdot \operatorname{rot} \vec{E} = -\operatorname{div}(\vec{E} \times \vec{H})$$

Vložíme identitu do nového vztahu, a upravíme do homogenního implicitního tvaru

$$-\operatorname{div}(\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \Rightarrow \vec{E} \cdot \vec{J} + \left(\vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) + \operatorname{div}(\vec{E} \times \vec{H}) = 0$$

Nyní vložíme zdroj elektrického výkonu, který bude krýt ztráty a výkon zátěže

$$\frac{\partial w_{ant}}{\partial t} = \vec{E} \cdot \vec{J} + \left(\vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) + \operatorname{div}(\vec{E} \times \vec{H})$$

Na levé straně vztahu je dodávaný výkon měřený na svorkách antény. První člen na pravé straně představuje ztráty v tepelných účincích proudu v anténě a v blízké zóně antény, druhý člen je výkon blízkého pole, který v tomto tvaru neopouští reaktivní zónu, a konečně třetí člen obsahuje

Poyntingův vektor elektromagnetické vlny opouštějící blízkou zónu. Pro přesné vyšetření bilance přenosu bude nutné uvažovat všechny členy, ale pro předběžný návrh můžeme zanedbat členy které se nepodílí na přenosu.

Na rozdíl od elektromagnetického přenosu TEM, kde je Poyntingův vektor ve směru šíření vlny, je tento vektor při LEM přenosu kolmý ke směru spojnice. Jakoby vysílač byl spíše rozptylovač a přijímač spíše stahovač. Podobně i při přenosu energie pomocí dvou vodičů energie neběží v drátech, ale zdroj musí rozptýlit ekvivalentní množství energie které se stáhne z prostředí právě pomocí komplexního Poyntingova vektoru v rezistoru, který rozptyluje teplo. Vodiče slouží jen pro vytvoření geometrie obvodu. Nyní rozdělíme vztahy na užitečný přenos a ztráty. Náš systém charakterizuje energetický člen pro přímou intenzitu elektrického pole a rotaci magnetického pole. Vztah přechází na pravé straně do ztrát teplem a střídavou změnu elektrické indukce. Zdrojová veličina je zde elektrické pole a rotace magnetického pole je způsobena právě členy na pravé straně.

$$\vec{E} \cdot \text{rot} \vec{H} = \vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \text{ Ve zdroji dosadíme } \vec{E} = -\text{grad } \varphi_e, \text{ a výkony } P_J, \text{ změnu elektrické}$$

indukce a dostáváme vztah:

$$-\text{grad } \varphi_e \cdot \text{rot} \vec{H} = P_J + \frac{\partial w_E}{\partial t}$$

Vztah nejlépe popisuje situaci v přenosovém kanálu. Zdrojem pole je rozdíl dvou silných střídavě opačných potenciálů v částečně vodivém vzduchu – $\text{grad } \varphi_e$. Následkem toho se proudem uvolňuje tepelná energie P_J a ničí kvalitu přenosu, a zároveň se posuvným proudem $\partial \vec{D} / \partial t$ vytváří polarizovaný sektor mezi elektrodami, který tvoří rezonanční užitečný proud. Celkový proud tekoucí kanálem budí rotaci magnetického pole, jako okolo vodiče. Magnetická rotace $\text{rot } \vec{H}$ jejímž zdrojem je právě proud v kanálu, stlačuje kanál do proudovlákná, a tvoří s časově následujícím rozdílem potenciálů magnetické dynamo. Následující směr polarizace který je opačný, má stejný směr proudu jako je magneticky indukovaný z původního směru polarizace. Tedy nový, opačný směr elektrické polarizace je opět Hallovým jevem znovu stlačován do kanálu. Pokud situaci zobrazíme na dipólu, vrací se energie pole zpět, a ve formě PSV komplikuje buzení. U přenosu mezi dvěma střídavě opačnými monopóly je využit právě faktor stlačování a stojatá vlna je v návrhu záměrně použita ke stabilizaci kanálu.

Stlačující funkce magnetického dynama je odvozena z Lorenzovy síly. Náboj je v tomto případě nahrazen proudem jako v Hallově jevu a ten můžeme odvodit jako silový impuls gradientu nového potenciálu s indukci z předchozího. Síla na náboj bude působit ve směru elektrického pole a také ve směru magnetohydrodynamické síly působící na proud, stlačující jej do pinčového kanálu, který kromě zachovávání tvaru bude způsobovat také nestabilitu. Elektrodynamické pole mezi dvěma kapacitními terminály má jiný tvar než elektrostatické, protože statické pole má přirozenou tendenci zaujmout nejnižší energetický stav a el. siločáry se co nejvíce roztáhnou, zatímco dynamické pole je ovlivněno svojí změnou a tvar je upraven indukovaným magnetickým polem.

$$\frac{\partial \vec{F}}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} (-\text{grad } \varphi_e + \vec{v} \times \vec{B})$$

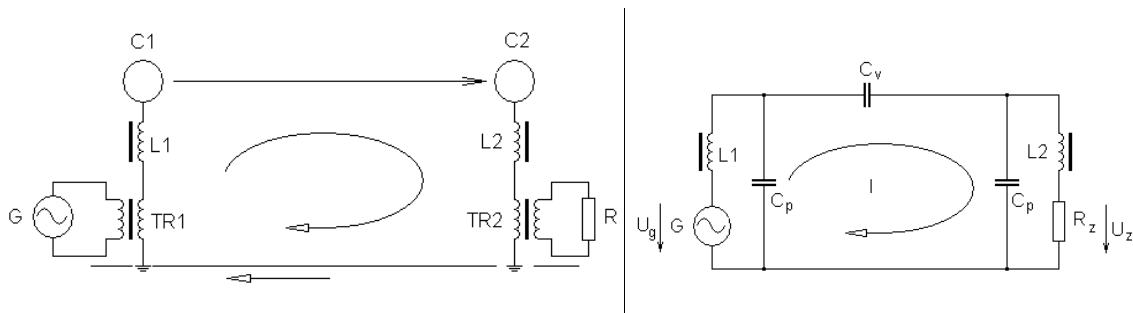
Tím jsme zjistili, že magnetická indukce je v rotaci okolo kanálu vytvořena posuvným proudem a působí zpětnou indukcí proti příčině změny a spojení původního kanálu zeslabuje. Jakoby změna elektrického pole v kruhovém kondensátoru působila elektromagneticky proti další vlastní změně a naopak vynášela tuto změnu ven z kondensátoru – tento princip je základem elektromagnetických antén a je využíván v praxi. My naopak tuto indukci použijeme při tvorbě další stojaté vlny tak, že stáhneme indukci již polarizovaného prostředí ke tvorbě nové vrstvy kanálu. Nakolik je tento jev silný, nám ukáže správně navržený experiment.

Šířku a vodivost kanálu definovanou jako kombinaci několika indukčních jevů můžeme dále sloučit do jednoho parametru vzájemné kapacity, která bude nelineární, ale jak moc zjistíme v měření. Kanál by měl být modelován kombinací prvků RLC, a to jako sériový rezonanční obvod s některými charakteristikami studeného doutnavého výboje.

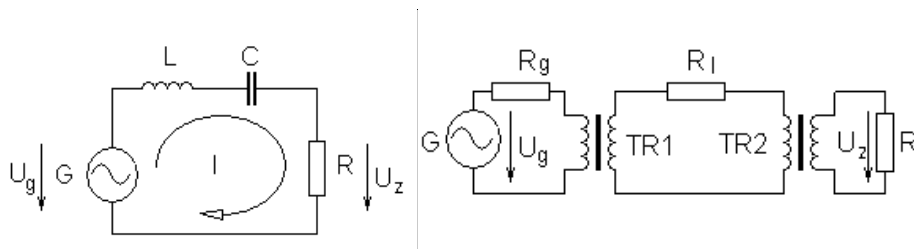
4.3 Analýza RLC modelu v časové oblasti

Obvodový model už je v částečně zjednodušené formě podobný LC filtru typu pásmová propust. Na vstupu je spínač s filtrem, který sice není úplně rezonanční, ale filtruje hrany ze spínače. Vstup tedy budeme modelovat harmonickým zdrojem sinusového napětí. Transformátor v daném režimu budeme modelovat lineárně a to je stejné jako bychom jej vložili zdroj do proudové smyčky, stejnou úpravu můžeme udělat na přijímací straně vložением impedance zátěže. Parazitní kapacity k zemi jsou tím menší, čím více se projeví tvorba vazebního kanálu se stojatým vlněním. Spotřebič modelujeme jako lineární odpor přizpůsobený ke zdroji a tak jeho impedanční obraz ve smyčce bude odpovídat obrazu zdroje.

Velkou nesnáz bude v obvodu představovat náhlé připojení nebo vyřazení zdroje a zátěže během provozu. Nejen, že se změní rezonanční kmitočet, ale také jelikož je cívka součástí transformátoru naprázdno také akumulací prvek, bude se na nebuzené nebo nezátěžené cívice indukovat poměrné rezonanční napětí. Toto napětí bude mnohem větší než je nejvyšší transformované, proto nedílnou součástí obvodu musí být regulátor, rekuperační obvod, a přepět'ová ochrana. Jinak dojde automaticky ke zničení polovodičů a nepomůže ani rozptylové řešení transformátoru. V téhle vlastnosti je princip podobný blokujícímu měniči.



obr. 4.2 Prvé schéma zobrazuje obecný model zohledňující skutečnou podobu přístroje, druhý náčrt slučuje neakumulační prvky, a zavádí vazební kapacitu C_v a dvě parazitní kapacity vůči zemi C_p , veškerý odpor je sloučen a transformován do R_z .



obr. 4.3 Zjednodušení modelu celého obvodu umožní induktivní přístup k průběhu analýzy – model výše se dá řešit pro speciální případy jako RLC buzený obvod a zvlášť jako linku bez akumulacích prvků pro případ rezonance. Pokud pro případ rezonance zavedeme transformace impedancí, můžeme použít Theveninovu větu o náhradních zdrojích a činitel přenosu energie dostaneme také.

Řešení modelu jako RLC rezonančního obvodu

V prvním přiblížení budeme modelovat přenosový řetězec jako jednoduchý rezonanční LC obvod se zdrojem harmonického napětí o rezonanční frekvenci, ideálním induktorem, ideálním kapacitorem a odporem bez parazitních vlastností. Předběžně uvažujeme prvky se soustředěnými parametry a později se můžeme vrátit k parametrizaci a rozprostírání. Použijeme analýzu pomocí přechodných jevů, která přejde v harmonickou analýzu. Model neslouží k optimalizaci, ale pouze k nastínění situace a zobrazení časového průběhu v ideálním stavu.

Uvažujme tedy popsany sériový rezonanční obvod. Počítejme jednotlivá napětí od cívky přes kondensátor, odpor až ke generátoru. Sledujeme napětí na kondensátoru u_C .

$$u_L(t) + u_C(t) + u_R(t) + u_G(t) = 0 \quad \Rightarrow \quad L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + Ri + u_G = 0$$

Nyní zavedeme substituci smyčkového proudu napětím na kondensátoru a upravíme tak, aby v prvním členu byla jen derivace a buzení dáme napravo

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C + u_G = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{LC} = -u_G$$

Nyní určíme napětí zdroje, kterým budíme obvod a označíme

$$u_G = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha) \text{ napětí budícího zdroje}$$

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad \text{činitel tlumení obvodu}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{rezonanční kruhový kmitočet obvodu}$$

$$Q = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r RC} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{činitel kvality obvodu}$$

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + 2\delta \frac{du_C}{dt} + \omega_0^2 \cdot u_C = -u_G$$

Najdeme nejdříve obecné řešení homogenní části, charakteristická rovnice je pak:

$$\lambda^2 + 2\delta\lambda + \omega_0^2 = 0, \text{ výpočet pomocí kvadratického diskriminantu } \lambda_{1,2} = \frac{-(2\delta) \pm \sqrt{(2\delta)^2 - 4 \cdot 1 \cdot \omega_0^2}}{2 \cdot 1}$$

a následná metoda neurčitých koeficientů pro počáteční podmínky $u_C(0) = U_0 = 0$, $i(0) = I_0 = 0$,

$$u_C = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t}, \quad \frac{du_C}{dt} = \lambda_1 A_1 e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 A_2 e^{\lambda_2 t}$$

a máme napětí na začátku, přičemž cívka zajistí, že na začátku obvodem nepoteče proud

$$u_C(0+) = A_1 + A_2 = U_0 \quad \frac{du_C(0+)}{dt} = \lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 = 0$$

Adiční metodou sloučíme $A_1 + A_2 = U_0$, $\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 = 0$ vynásobením $-(\lambda_1)$, $-(\lambda_2)$

$$\text{dostaneme} \quad \lambda_2 A_2 - \lambda_1 A_2 = -\lambda_1 U_0 \quad \lambda_1 A_1 - \lambda_2 A_1 = -\lambda_2 U_0$$

$$\text{izolujeme} \quad A_1 = \frac{-\lambda_2 U_0}{(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad A_2 = \frac{-\lambda_1 U_0}{(\lambda_2 - \lambda_1)}$$

$$\text{a dosadíme} \quad u_C(t) = \frac{-\lambda_2 U_0}{(\lambda_1 - \lambda_2)} e^{\lambda_1 t} - \frac{-\lambda_1 U_0}{(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{\lambda_2 t}$$

$$\text{upravíme na} \quad u_C(t) = \frac{U_0}{(\lambda_2 - \lambda_1)} (\lambda_2 e^{\lambda_1 t} + \lambda_1 e^{\lambda_2 t})$$

pro kmitavý děj máme definováno, že $\delta < \omega_0$, $Q > 0,5$

$$\text{proto } \lambda_{1,2} = -\delta \pm j\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = -\delta \pm j\omega_V, \quad \omega_V = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \text{ nebo } \omega_V = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

$$u_C(t) = \frac{U_0}{((- \delta - j\omega_V) - (- \delta + j\omega_V))} ((- \delta - j\omega_V) e^{(-\delta + j\omega_V)t} + (- \delta + j\omega_V) e^{(-\delta - j\omega_V)t})$$

$$u_C(t) = \frac{U_0 e^{-\delta t}}{-2j\omega_V} (-\delta e^{j\omega_V t} - j\omega e^{j\omega_V t} - \delta e^{-j\omega_V t} + j\omega e^{-j\omega_V t})$$

$$u_C(t) = U_0 e^{-\delta t} \left(\frac{-j\omega(e^{j\omega_V t} - e^{-j\omega_V t}) - \delta(e^{j\omega_V t} + e^{-j\omega_V t})}{-2j\omega_V} \right)$$

$$u_C(t) = U_0 e^{-\delta t} \left(\frac{(e^{j\omega_V t} - e^{-j\omega_V t})}{2j} - \frac{\delta}{\omega_V} \cdot \frac{(e^{j\omega_V t} + e^{-j\omega_V t})}{-2} \right)$$

$$u_C(t) = U_0 e^{-\delta t} \left(\sin(\omega_V t) - \frac{\delta}{\omega_V} \cdot \cos(\omega_V t) \right)$$

Nyní vložíme do homogenního řešení budící zdroj, a přibývá nám tím druhý kmitočet, který označíme jako u_G , zároveň určíme tvar obecného řešení, pro buzení harmonickou funkcí.

$$u_G = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha),$$

$$u_C = B_1 \cdot \sin(\omega t + \alpha) + B_2 \cdot \cos(\omega t + \alpha) \quad \frac{du_C}{dt} = \omega \cdot B_1 \cdot \cos(\omega t + \alpha) - \omega \cdot B_2 \cdot \sin(\omega t + \alpha),$$

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} = -\omega^2 \cdot B_1 \cdot \sin(\omega t + \alpha) - \omega^2 \cdot B_2 \cdot \cos(\omega t + \alpha)$$

derivace dosadíme a separujeme

$$\begin{aligned} & (-\omega^2 \cdot B_1 \cdot \sin(\omega t + \alpha) - \omega^2 \cdot B_2 \cdot \cos(\omega t + \alpha)) + \frac{R}{L} (\omega \cdot B_1 \cdot \cos(\omega t + \alpha) - \omega \cdot B_2 \cdot \sin(\omega t + \alpha)) + \\ & + \frac{1}{LC} (B_1 \cdot \sin(\omega t + \alpha) + B_2 \cdot \cos(\omega t + \alpha)) = \left(\frac{U_m}{LC} \right) \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha) \end{aligned}$$

Sloučíme,

$$\left(-\omega^2 \cdot B_1 - \frac{\omega R}{L} \cdot B_2 + \frac{B_1}{LC}\right) \cdot \sin(\omega t + \alpha) + \left(-\omega^2 \cdot B_2 - \frac{\omega R}{L} \cdot B_1 + \frac{B_2}{LC}\right) \cdot \cos(\omega t + \alpha) = \left(\frac{U_m}{LC}\right) \cdot \cos(\omega t + \alpha)$$

na pravé straně je jen funkce zdroje $\cos$, tedy sinová funkce bude nulová. Zbude nám

$$\left(-\omega^2 \cdot B_2 - \frac{\omega R}{L} \cdot B_1 + \frac{B_2}{LC}\right) = \left(\frac{U_m}{LC}\right) \text{ a to je rovnice o dvou neznámých } B_1, B_2$$

Zjednodušíme na reaktanci, a dosadíme

$$\left(\frac{1}{LC} - \omega^2\right) = -\frac{\omega}{L} \cdot \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = -\frac{\omega}{L} \cdot X, \quad \begin{aligned} -\frac{\omega}{L} \cdot X \cdot B_1 - \frac{\omega}{L} \cdot R \cdot B_2 &= 0 & X \cdot A_1 + R \cdot A_2 &= 0 \\ -\frac{\omega}{L} \cdot X \cdot B_2 - \frac{\omega}{L} \cdot R \cdot B_1 &= \frac{U_m}{LC} & R \cdot A_2 - X \cdot A_1 &= \frac{U_m}{LC} \end{aligned}$$

Vytvoříme výpočetní matici

$$\begin{pmatrix} X & R \\ R & -X \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{U_m}{LC} \end{pmatrix} \text{ a dosazením } B_2 = -\frac{X}{R} \cdot B_1, \text{ pak } R \cdot B_1 - X \left(-\frac{X}{R}\right) \cdot B_1 = \frac{U_m}{LC}$$

a odtud zjednodušením dostaneme celkovou impedanci obvodu $Z^2 = R^2 + X^2$, proto

$$B_1 = \frac{R}{\omega C \cdot Z^2} \cdot U_m, \quad B_2 = -\frac{X}{\omega C \cdot Z^2} \cdot U_m$$

Koeficienty dosadíme do obecného řešení

$$u_C = \frac{R}{\omega C \cdot Z^2} \cdot U_m \cdot \sin(\omega t + \alpha) - \frac{X}{\omega C \cdot Z^2} \cdot U_m \cdot \cos(\omega t + \alpha) = \frac{U_m}{\omega C \cdot Z^2} \cdot (R \cdot \sin(\omega t + \alpha) - X \cdot \cos(\omega t + \alpha))$$

pro reálnou část impedance $R = Z \cdot \cos \phi$, a $X = Z \cdot \sin \phi$, kde ϕ je fázový úhel mezi Z a R

Nahradíme podle pravidla, a ve jmenovateli prvního člene zmizí mocnina Z

$$u_C = \frac{U_m}{\omega C \cdot Z} (\cos \phi \cdot \sin(\omega t + \alpha) - \sin \phi \cdot \cos(\omega t + \alpha))$$

Upravíme podle součtového úhlu $\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta$, a dostaneme

$$u_C = \frac{U_m}{\omega C \cdot Z} \sin(\omega t + \alpha - \phi)$$

Nyní toto partikulární řešení dosadíme do obecného integrálu diferenciální rovnice pro obvod RLC

$$u_C = u_C(hmg) + u_C(part) = e^{-\delta} \cdot (A_1 \cdot \sin(\omega_v t + \alpha) + A_2 \cdot \cos(\omega_v t)) + \frac{U_m}{\omega C \cdot Z} \sin(\omega t + \alpha - \phi)$$

Konstanty A_1, A_2 vyřešíme pro počáteční podmínky $i(0+) = 0, u_C(0+) = 0$

$$A_1 = -\frac{U_m}{\omega C \cdot Z} \sin(\alpha - \phi) \text{ a dosadíme}$$

$$u_C = e^{-\delta} \cdot \left(-\frac{U_m}{\omega C \cdot Z} \cdot \sin(\alpha - \phi) \cdot \cos(\omega_v t) + A_2 \cdot \sin(\omega_v t)\right) + \frac{U_m}{\omega C \cdot Z} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \phi)$$

Proud i bude protékat i kondensátorem C , takže platí i vztah, který můžeme dosadit do předchozího a derivujeme

$$i(t) = i_C(t) = C \cdot \frac{du_C}{dt}$$

$$i(t) = -\delta \cdot e^{-\delta t} \cdot \left(-\frac{U_m}{\omega \cdot Z} \cdot \sin(\alpha - \phi) \cdot \cos(\omega_V t) + C \cdot A_2 \cdot \sin(\omega_V t) \right) + \\ + e^{-\delta t} \cdot \left(-\frac{\omega_V \cdot U_m}{\omega \cdot Z} \cdot \sin(\alpha - \phi) \cdot \sin(\omega_V t) + \omega_V \cdot C \cdot A_2 \cdot \cos(\omega_V t) \right) + \frac{U_m}{Z} \cdot \cos(\omega t + \alpha - \phi)$$

Opět pro počáteční podmínky $i(0+) = 0$ platí

$$0 = \frac{\delta \cdot U_m}{\omega \cdot Z} \cdot \sin(\alpha - \phi) + \omega_V \cdot C \cdot A_2 + \frac{U_m}{Z} \cdot \cos(\alpha - \phi), \quad A_2 = -\frac{U_m}{\omega_V \cdot C \cdot Z} \cdot \left(\frac{\delta}{\omega} \cdot \sin(\alpha - \phi) + \cos(\alpha - \phi) \right)$$

Dosadíme druhou konstantu A_2 do smyčkového proudu v obvodu RLC s nucenými kmity

$$i(t) = -\delta \cdot e^{-\delta t} \cdot \left(-\frac{U_m}{\omega \cdot Z} \cdot \sin(\alpha - \phi) \cdot \cos(\omega_V t) - \frac{U_m}{\omega_V \cdot Z} \cdot \left(\frac{\delta}{\omega} \cdot \sin(\alpha - \phi) + \cos(\alpha - \phi) \right) \cdot \sin(\omega_V t) \right) + \\ + e^{-\delta t} \cdot \left(-\frac{\omega_V \cdot U_m}{\omega \cdot Z} \cdot \sin(\alpha - \phi) \cdot \sin(\omega_V t) - \omega_V \cdot \frac{U_m}{\omega_V \cdot Z} \cdot \left(\frac{\delta}{\omega} \cdot \sin(\alpha - \phi) + \cos(\alpha - \phi) \right) \cdot \cos(\omega_V t) \right) + \\ + \frac{U_m}{Z} \cdot \cos(\omega t + \alpha - \phi)$$

A konečně vložíme A_2 do průběhu napětí na kapacitě

$$u_C(t) = e^{-\delta t} \cdot \left(-\frac{U_m}{\omega C \cdot Z} \cdot \sin(\alpha - \phi) \cdot \cos(\omega_V t) - \frac{U_m}{\omega_V \cdot C \cdot Z} \cdot \left(\frac{\delta}{\omega} \cdot \sin(\alpha - \phi) + \cos(\alpha - \phi) \right) \cdot \sin(\omega_V t) \right) + \\ + \frac{U_m}{Z} \cdot \cos(\omega t + \alpha - \phi)$$

Výsledný průběh napětí se skládá ze dvou důležitých funkcí a to z přechodného a ustáleného děje. Uvažujme případ $(\alpha - \phi) = 0$, což je stav nulového fázového posunu kmitů obvodu RLC a zdroje. Ve skutečné situaci se tento stav dá docílit jen záměrným nastavením fáze zdroje.

$$i(t) = -\frac{U_m}{Z} \cdot e^{-\delta t} \cdot \left(\cos(\omega_V t) - \frac{\delta}{\omega} \sin(\omega_V t) \right) + \frac{U_m}{Z} \cdot \cos(\omega t)$$

$$u_C(t) = -\frac{U_m}{\omega_V \cdot C \cdot Z} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_V t) + \frac{U_m}{\omega \cdot C \cdot Z} \cdot \sin(\omega_V t)$$

Napětí na kondensátoru je tedy po připojení zdroje složeno ze dvou částí. První člen je charakterizován vlastní rezonanční frekvencí a přechodným tlumeným průběhem, druhý člen je vyvolán budícím průběhem který zůstane na kondensátoru i po odeznění přechodného děje. Když definujeme činitel rozladění jako:

$$F = \frac{\omega}{\omega_v} - \frac{\omega_v}{\omega} = \frac{\omega_v + \Delta\omega}{\omega_v} - \frac{\omega_v}{\omega_v + \Delta\omega}, \quad \Delta\omega \text{ je absolutní rozladění } \omega \text{ od } \omega_v$$

Čím větší je rozladění, tím menší je rozkmit ustáleného napětí na kondensátoru i na induktoru.

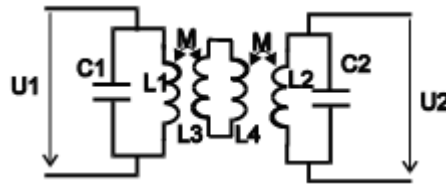
Rezonanční křivka amplitudové závislosti na kmitočtu a šířka pásma je:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 F^2}} \Rightarrow QF = 1 = Q \frac{2 \cdot \Delta f}{f_r} = Q \frac{B}{f_r}, \quad f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow B = \frac{f_r}{Q}$$

Samotná podrobná analýza rezonančního RLC obvodu bude sloužit jako detailní popis funkce, vhodný pro indukci a vkládání nelinearit, nebo pro případ ujždění rezonancí definovaných dále jako parametr. Základní zdroj budícího signálu bude zpětnovazebně řízený dvojčinný oscilátor na vysílací straně a základní spotřebič bude dvojčinný usměrňovač, filtr a žárovka. Napájení bude zajišťovat baterie monočláňkových akumulátorů nebo adaptér.

Řešení modelu jako linkového filtru

Vázané rezonanční obvody patří do skupiny selektivních dvojbranů, které mají charakter pásmové propusti. Jsou tvořeny dvěma rezonančními obvody upravenými konstrukčně tak, aby část signálu primárního obvodu pronikala do sekundárního a naopak. Linková vazba je v našem případě vhodná pro případ ustálení průběhu a zároveň činitel rozladění z předchozího modelu musí být 1. Linkové transformátory můžeme v dalším zkoumání ještě zjednodušit pro potřeby výkonového přenosu. Tento model bude využit pro návrh vstupně výstupních parametrů.



obr. 4.4 Obvod modelovaný pro případ rezonance linkovými transformátory. Místo rezonančního obvodu jsme zařadili parazitní kapacity k zemi, zde C1 a C2.

Velikost signálu pronikajícího z primárního do sekundárního obvodu a naopak je posuzována velikostí činitele vazby k . Šířku pásma B dvojice vázaných obvodů určujeme zpravidla vzhledem k vrcholům křivek rezonance. Pro pokles impedance o 3 dB je pak možné říci, že dvojice vázaných obvodů má při kritické vazbě šířku pásma $\sqrt{2}$ krát větší než je pásmo jednotlivých obvodů dvojice určené pro stejnou změnu impedance.

$$k = \frac{M_1 M_2}{\sqrt{L_1 L_2 L_3 L_4}} \quad B(3dB) = \frac{f_0}{Q} \sqrt{2}$$

4.4 Postupu při syntéze modelu v prostoru

Pro návrh předběžného časoprostorového modelu je nevhodná aplikace analytického aparátu přímo, ale technická praxe umožňuje zjednodušení pomocí numerických metod.

Klasické simulátory na principu FEM, FDM a podobných numerických metod neumožňují sdruženou úlohu všech nutných analýz, tj. Maxwellovy rovnice, magnetohydrodynamické vztahy, Poissonova nehomogenní rovnice, vývin tepelných ztrát v kanálu. Elektrostatická analýza se pro

tento případ vůbec nedá použít. Vektorový potenciál je v programech s numerickými metodami vždy pevně kalibrován na Coulombovu nebo Lorenzovu podmínku divergence, a nedá se změnit.

$$\operatorname{div} \vec{A} = 0 \text{ Coulombova kalibrace} \quad \operatorname{div} \vec{A} + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \varphi_e}{\partial t} = 0 \text{ Lorenzova kalibrace}$$

Proto bude vhodné předběžně určit tvar kanálu pomocí rozdělené numerické analýzy a příspěvkům ke tvaru. Tato analýza je hlavním tématem druhé části práce.



obr. 4.5 Kanál ve zředěném plynu plasma koule, je stejný jako ve vzduchu, ale v kouli je menší průrazné napětí a nejvýznamnější detail je zde izolovaný, elektricky vysoce pevný obal kolem kapacitního konce rezonančního obvodu, třetí koule obal nemá proto srší

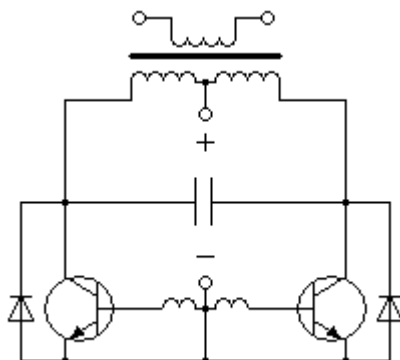
5 Návrh experimentu

5.1 Základní koncepce přístroje

Experimentální přístroj je složen, stejně jako podobné předchozí pokusy s přenosem energie, z vysílače a přijímače. Poněkud jiný přístup byl zvolen při konstrukci rezonátorů a vrcholových kapacit. Klasický Teslův transformátor je vždy poměrně složitý rezonanční obvod, dokonce i varianta K.Meyla, nebo Soljačičův magnetický přenos obsahují dosti komplikované rezonanční přenosové řetězce. Náš systém je jednoduchý otevřený LC rezonanční obvod, buzený feritovými transformátory s činitelem vazby velmi blízkým jedné, tedy budící transformátory je možné v rozsahu aplikovaných výkonů v modelu snadno nahradit zdroji napětí nebo proudu. Řadu feritových cívek je možné v modelu nahradit lineární aproximací jedné cívky s jádrem. Řada byla navržena tak, aby magnetické pole bylo uzavřeno v jádrech a nepronikalo ven. Venkovní magnetické pole je jen indukce ze zdrojové změny elektrického pole, ale ne z budícího proudu. Dále vrcholová kapacita v provedení kulového terminálu je opatřena velmi odolnou izolací, aby elektrický náboj neunikal ven, jako je tomu u Teslových transformátorů použitých ke generaci VVN. Díky této úpravě by mělo být možné dosahovat takových potenciálů, kterých obvyklé přístroje nikdy nedosáhnou, zároveň by se měla zlepšit linearita a tím krátkodobá stabilita kmitočtu.

Budící zdroj a návrh měniče

Zdroj pro napájení je dimenzován na 12V a výkon podle zátěže na 50W. zdroj může být tvořen baterií vhodného napětí, nebo síťovým adaptérem. Realizace spočívá v použití feritového jádra ze dvou C typů. Na primární straně je vstupní vinutí dvojčinného budiče a zpětnovazební měřící vinutí, na sekundární je výstup napětí navrženého na 240Vef. Vstupní napájecí napětí 12V je budičem zdvojeno na 24V a převodní poměr transformátoru je 1:10. Na budiči jsou rekuperační zpětné diody, které jej mají chránit.

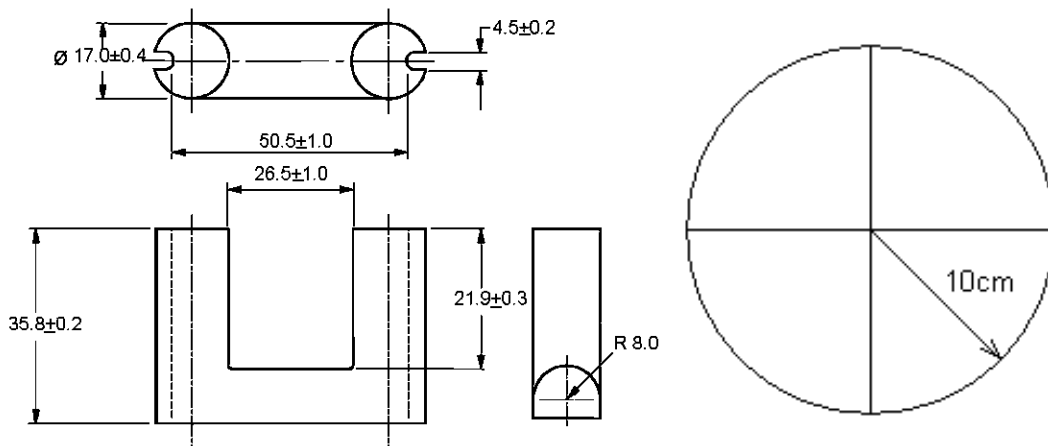


obr. 5.1 Schéma budiče (první samokmitající verze) je jednoduché: dvojčinné budící vinutí je připojeno ke dvojici tranzistorů a rekuperačních diod. Měřící vinutí na bázích tranzistorů je navinuto paralelně s budícím. Zdroj je připojen ke svorkám + a -. Obvod se sám takhle nespustí, proto bude obsahovat ještě pomocný spouštěč, který na okamžik zkratuje některý tranzistor. Výstupní vinutí transformátoru je jedním koncem navázáno k LC rezonátoru a druhý konec bude uzemněn. Kondensátor mezi konci vinutí není rezonanční, ale jako ochranný proti velmi rychlým překmitům.

Tranzistory jsou výkonové, shodné s jakýmkoliv typem z PC zdroje nad 150W, diody jsou Schottkyho pro rychlou reakci. Vstupní napájecí napětí 12V bude budičem zdvojeno na 24V a převodní poměr transformátoru bude zvýšení 1:10 tedy výstup bude 240Vef. Na budiči budou rekuperační zpětné diody, které mají chránit obvody a zároveň vracet nevyužitou energii do zdroje. Na straně přijímače mají plnit tyto diody hlavní úlohu usměrňovače a tranzistory budou k impulsnímu řízení rezonance.

Návrh rezonančního článku

Rezonanční obvod je složen ze dvou prostorově vzdálených článků. Přičemž jeden článek je složen ze sedmi jader stejných jako transformátor se 150 závitů CYA 0.75 PVC izolovaného lanka, které je navíc mezi vrstvami prokládáno elektricky zpevňujícími páskami. Celý induktor je sedmi sektorový s izolátory mezi sekcemi a horní díl je zakončen průchodkou na připojení kulového terminálu. Kulový terminál o průměru 20cm je vytvořen z elektricky pevného materiálu a požadavek na pevnost izolační vrstvy na povrchu je předběžně stanovena na 600 kV. Jelikož je kapacita mezi terminály pro náš experiment bezpředmětná veličina, budeme se řídit sériovou kombinací dvou izolací na terminálech s kanálem mezi nimi, který má relativně vysokou vodivost.



obr. 5.2 Jádru je typ US 5972, feritový materiál CF196, ekvivalent H21. Parametry: efektivní délka siločáry L_e je 189mm, efektivní plocha A_e je 210mm², objem V_e 39700mm³, A_L činitel indukčnosti je pro tento materiál 2650nH. Kapacitní konec je koule o poloměru 10cm a na povrchu je chráněna silnou vrstvou izolace.

Výpočet indukčnosti pro 7 jader:

$$L(1/7) = A_L (nH) \cdot (150z)^2 = 2650 \cdot 22500 = 0,059H \Rightarrow L = 7 \cdot 0,059H = 0,42H$$

pro celý obvod potom platí dvě indukčnosti $2L = 0,84H$ - plně stlačeno, vzduchová mezera nulová. Pro další řešení budeme počítat indukčnost celku jako nastavitelnou.

Výpočet kapacity pro poloměr koule 10 cm. Kapacita se vztahuje k nekonečnu – je to tedy nejmenší možná kapacita bez dalších vzájemných složek a přidavného dielektrika, skutečná vlastní a vzájemná kapacita bude upřesněna v měření. Elektrostatická vzájemná kapacita se nedá použít kvůli zavádějícímu rozdílnému tvaru statického pole.

$$C_{sphere} = 4\pi\epsilon_0 r = 4\pi\epsilon_0 \cdot 0,1 = 11pF$$

Nyní vyčíslíme rezonanční kmitočet před spojením

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,42 \cdot 11 \cdot 10^{-12}}} = 74kHz,$$

Vypočítaná indukčnost, kapacita a rezonanční kmitočet po spojení:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,84 \cdot 11 \cdot 10^{-12}}} = 52kHz,$$

Blízká zóna $\lambda/(2\pi)$ předběžně určena na přibližně 800m aktivního dosahu.

Koncepcie spotřebiče na výstupu z přijímače

Spotřebič bude obyčejná autožárovka 12V, 50W a napětí bude od přijímače přivedeno přes usměrňovač a filtr kvůli snadnějšímu měření. Usměrňovač sice kazí účinnost, ale měření není vystaveno chybám, které způsobují jalové složky výkonu. V dalších fázích experimentu může být na výstup přijímače za filtr vložen stabilizátor a napětí bude dosahovat lepších kvalit.

5.2 Analýza návrhu

Prvním příznakem správného navázání energetického spojení by měl být skok rezonančního kmitočtu na mírně jiný. Je to kvůli tomu, že dojde ke změně obvodu. Původně jeden LC obvod

s indukčností L_1 je nyní složen ze dvou cívek $L_1 + L_2$, a původně kulový kondensátor s kapacitou vztaženou k nekonečnu a k zemi má vzájemnou kapacitu s jiným podobným C_v .

6 Popis prvního realizovaného experimentu

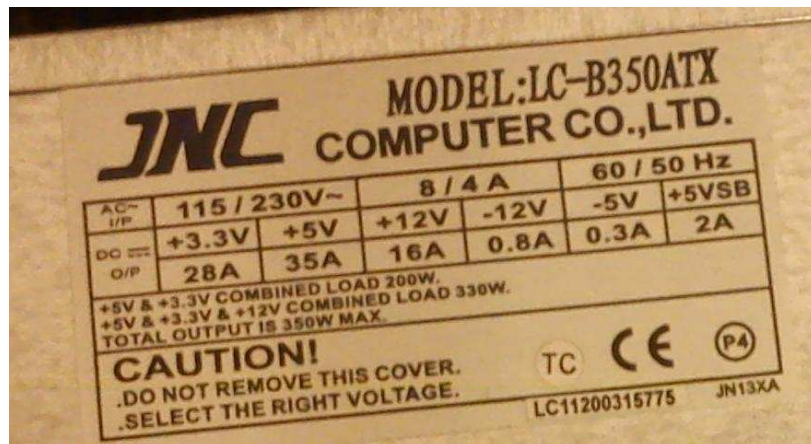
6.1 Základní obvodová koncepce přístroje

Experimentální sestava je složena ze zdrojového adaptéru, vysílače, přijímače a zátěže.

Vlastní přístup byl zvolen při konstrukci induktorových sérií a vrcholových kapacit. Klasický Teslův transformátor je vždy složitý rezonanční obvod, se spoustou různých požadovaných i parazitních vlastností. Náš systém je jednoduchý otevřený LC rezonanční obvod, buzený feritovými transformátory s činitelem vazby velmi blízkým jedné. Řada byla navržena tak, aby magnetické pole bylo pokud možno co nejvíce uzavřeno v jádrech a nepronikalo ven. Venkovní magnetické pole je jen kruhová indukce z vertikální zdrojové změny elektrického pole, ale ne z budícího proudu. Vrcholová kapacita v provedení kulového terminálu je opatřena velmi odolnou izolací, aby elektrický náboj neunikal ven, jako je tomu u Teslových transformátorů použitých ke generaci VVN. Díky této úpravě bude možné dosahovat takových potenciálů, kterých obvyklé přístroje nikdy nedosáhnou, zároveň je lepší linearita a tím krátkodobá stabilita kmitočtu. Tloušťka izolace je 5mm PVC, což by podle elektrické pevnosti 50kV/mm mělo stačit k udržení 250kV, ale vzhledem k tomu, že je závislost elektrické pevnosti na tloušťce dielektrika mírně nelineární, je to jen informativní údaj.

Budící zdroj:

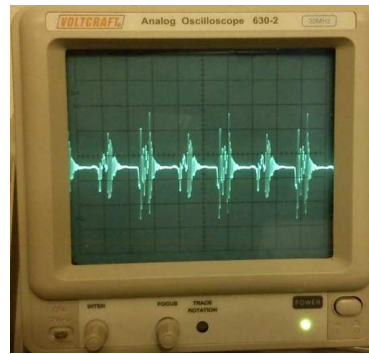
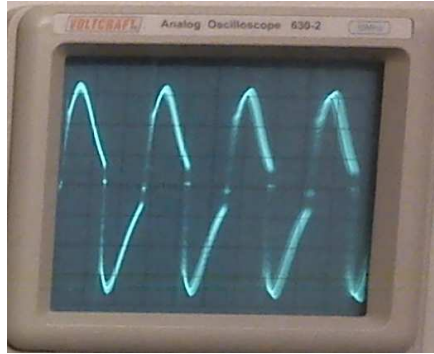
Adaptér pro napájení vysílače je spínaný PC ATX zdroj 350W JNC. Využíváme jen výstup 12VDC maximální proud 16A.



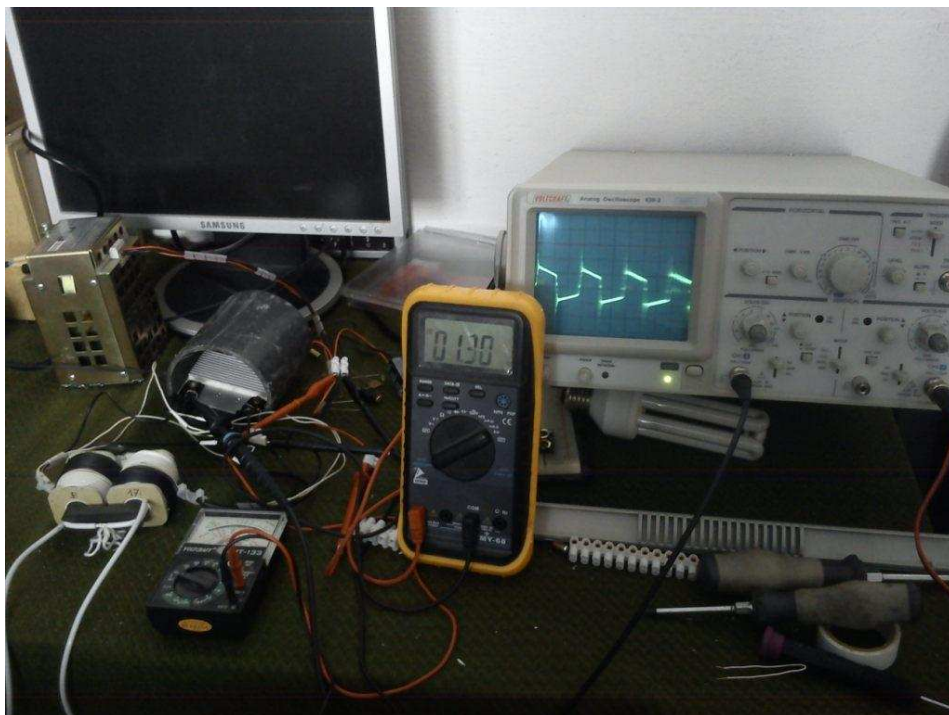
obr. 6.1 Štítek PC zdroje pro napájení experimentálního obvodu

Provedení měniče:

Transformátor měniče má sekundární vinutí dělené do dvou polovin – realizace bude spočívat v použití feritového jádra ze dvou C typů. Na obou stranách jsou také poloviny vstupního vinutí dvojčinného budiče a zpětnovazební měřicí vinutí, na druhé bude výstup napětí navrženého na 240Vef. Vstupní napájecí napětí 12V bude budičem zdvojeno na 24V a převodní poměr transformátoru bude zvýšení 1:10. Na budiči budou rekuperační zpětné diody, které jej mají chránit.



obr. 6.3 Tvar napětí měřený na kolektorech proti sobě. Budič generuje pulsy 60kHz a tyto se v síti rezonančních prvků rozkmitají na všech rezonančních kmitočtech, které obvod má. Pak vypadá průběh jako na obrázku. Cívky se nastavují tloušťkou vzduchové mezery, rozsah je stejný jako u transformátoru 7kHz – 70kHz



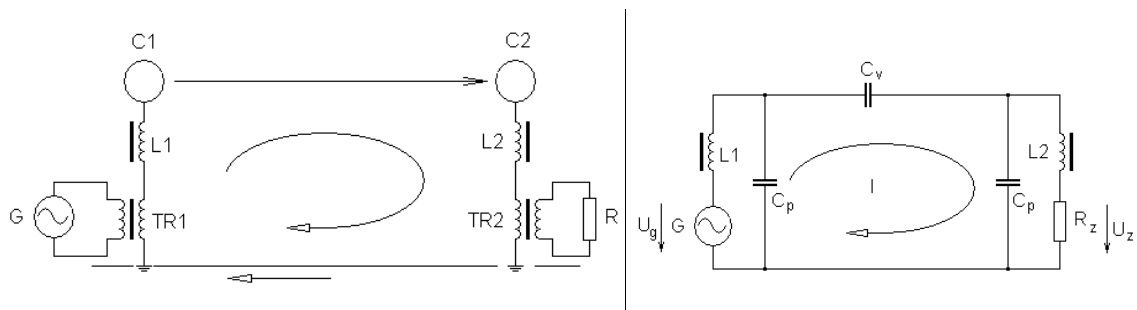
obr. 6.4 Fotografie testu na transformátoru při stlačení mezery jádra, kmitočet na osciloskopu je 7kHz . Při prvních testech byl použit měkký lineární zdroj 12VDC, proto je hodnota proudu na digitálním multimetru 1,3A. Kmitočet volnoběhu je zde dán maximální magnetizační a demagnetizační energií. Není připojen rezonátor, takže jádro určuje kmitočet na kterém kmitá celý budič a to je 7kHz.



obr. 6.5 Fotografie jednoho článku cívky při testech a celé sestavy i s izolátory



obr. 6.6 Fotografie dvou induktorových sloupců s izolovanými kulovými kondenzátory.



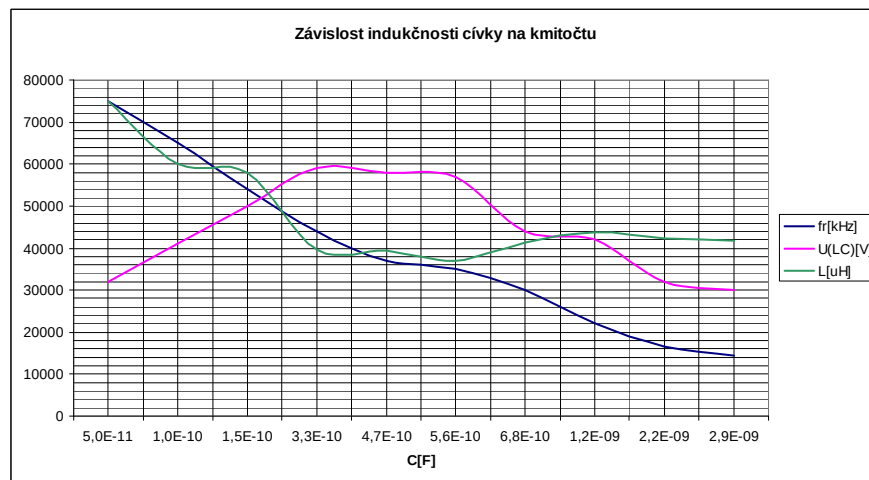
obr. 6.7 schéma zobrazuje obecný model zohledňující skutečnou podobu přístroje, druhý náčrt slučuje neakumulační prvky, a zavádí vazební kapacitu C_v a dvě parazitní kapacity vůči zemi C_p , veškerý odpor je sloučen a transformován do R_z . Ve výpočetním modelu jsou nahrazeny kapacity proti zemi a vzájemná C_v kapacitami proti nekonečnu.

- o První měření se týká návrhu samotného LC rezonátoru. Bylo změřeno a spočítáno, že jednotlivé cívky mají nezanedbatelnou parazitní kapacitu. Proto je nutné tento aspekt brát v úvahu. Rezonance samotných cívek s touto parazitní kapacitou je blízka kmitočtu 800kHz, tj. ovlivňuje průběh. Proto je signál složen z mnoha harmonických frekvencí, zákrmitů a tlumených přechodných dějů, což je právě nevýhodou klasického Teslova transformátoru.

Měření nelinearity jádra podle rezonance se známou kapacitou

C	fr	U(LC)	L
pF	kHz	V	H
50	75	32	0,062
100	65	41	0,060
150	54	50	0,058
330	44	59	0,039
470	37	58	0,039
560	35	57	0,037
680	30	44	0,04
1200	22	42	0,044
2200	16,5	32	0,043
2880	14,5	30	0,042

tab. 6.1 Tabulka změřených hodnot indukčností .



obr. 6.8 Závislost parazitní rezonance a indukčnosti na rezonanční kapacitě. Číselná stupnice odpovídá všem třem zobrazeným průběhům

Kapacita vrcholové koule byla změřena podle rezonance se známou indukčností sloupce cívek a její hodnota je 28pF, ale velmi se mění podle blízkosti předmětů okolo, což je pochopitelné, protože se jedná o kapacitu vůči okolí.

Koncepce spotřebiče na výstupu z přijímače

Spotřebič je obyčejná autožárovka 12V, výkon zátěže je 30W a napětí bude od výstupu přivedeno přes usměrňovač a filtr kvůli snadnějšímu měření. Usměrňovač kazí účinnost, ale měření pak není vystaveno chybám, které bývají při střídavém měření.

- o Druhé měření je samotný přenos. Vzhledem k tomu, že přenosová větev velmi tlumí, nedostává obvod přijímače dost energie na to aby rozsvítil 30W žárovku na 12V. na výstupu bylo změřeno stabilních 6V naprázdno, které je navíc velmi měkké. Vstupní napětí budiče bylo 12VDC, kmitočet okolo 50 kHz. Pro úspěšný přenos celých 12V při zátěži na požadovaném výkonu by musela tato větev více propouštět. Od dalších testů bylo z převážně časových důvodů upuštěno, jelikož je přenos stejně zanedbatelný jako efektivita klasického Teslova transformátoru.

Byly provedeny různé varianty experimentu:

- Test zapojení otevřeného vodiče, kdy byl studený konec uzemněn na PEN vodič sítě a druhý konec připojen na libovolné větší izolované vodivé těleso (použity různá tělesa) – přenos byl minimální, nejspíš vinou nízkého kmitočtu, ale byl větší než při použití rezonátorů. Při zapojení zatěžovací žárovky 12V, 30W bylo naměřeno 6V a přijatý výkon byl okolo 15W . Test bude v části 7 v rámci měření přeneseného výkonu při otevření obvodu.
- Zapojení jen vysílacího modulu na oba rezonátory bez připojení na zemi – obvod má kupodivu stejný kmitočet jako při jednom rezonátoru, budič se přehřívá a průběh na spektrálním analyzátoru měřený na jedné z cívek ukazuje šum o amplitudě 1kV.
- Připojení jen vrcholových kapacit na otevřené horké konce vysílacího a přijímacího transformátoru – výkon na žárovce byl stejný jako v případě připojení na PEN a těleso, ale mírně se zvětšoval při přibližování kapacitních koulí.

Pro větší propustnost by bylo nutné zvýšit kmitočet a to nemůžeme udělat kvůli daným feritovým materiálům. Navíc při vyšším kmitočtu roste záření ven. Zmenšováním blízké zóny postupně přejde dvojice unipólů v dipól a opět se energie vyzáří do prostoru dlouhými vlnami. Přijímač opět přijme jen minimum energie i když je v blízké zóně. Zdá se že tento způsob přenosu energie je použitelný také jen pro sdělovací účely, nikoliv pro energii samotnou.

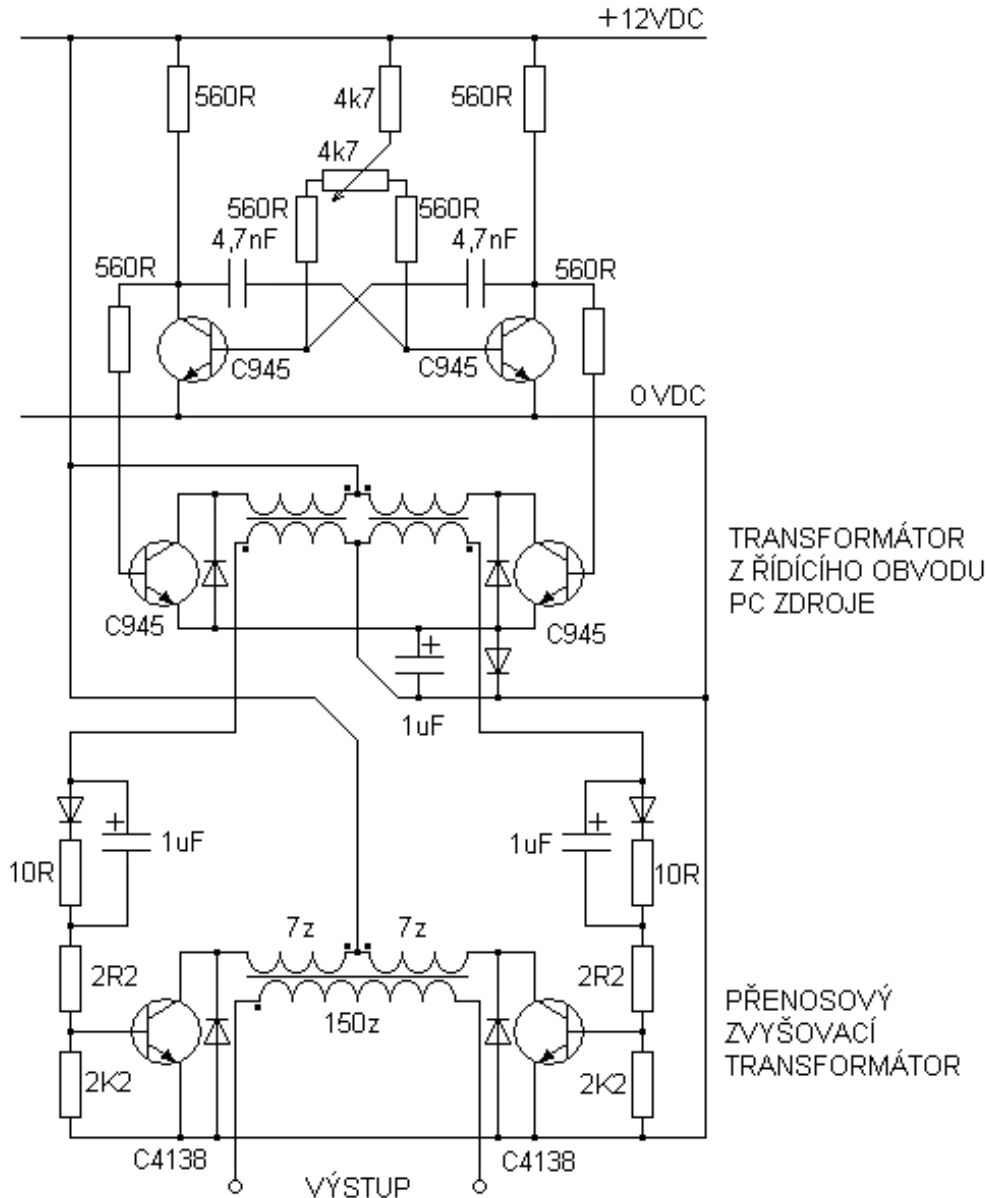


obr. 6.9 První experiment - napětí naprázdno měřené na výstupu. Z transformátoru vede cesta proudu na usměrňovač dvou Schottkyho diod a filtr 560uF.

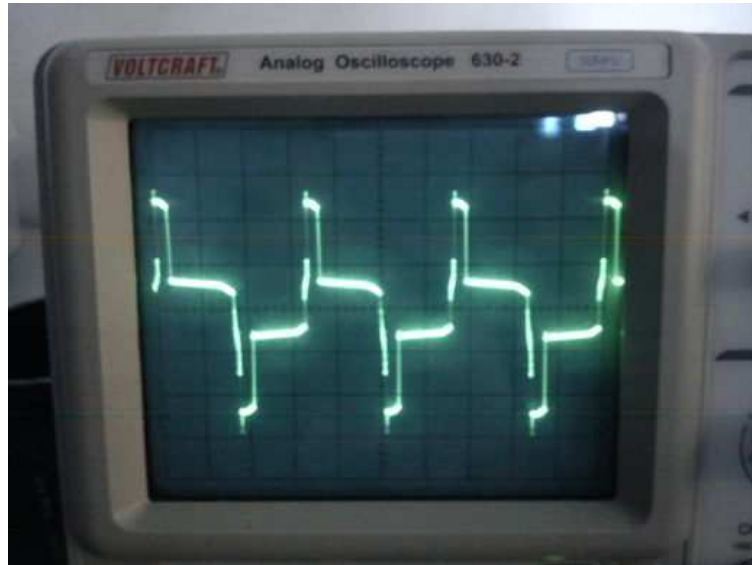
7 Popis druhého realizovaného experimentu

7.1 Návrh budiče

Řídící budič je navržen kvůli nevyhovujícím parametrům volnoběžného režimu. Budič je určen k vnucení požadovaného kmitočtu kvůli zjišťování různých parametrů přenosového obvodu.



obr. 7.1 Schéma budiče – signál generovaný klopným obvodem spíná budící stupeň, který odděluje a tvaruje pulsy na transformátorek. Ten přes tvarovací obvody spíná a rozpíná výkonový stupeň. Koncový díl je připojen na výstupní transformátor a odtud je výkon veden dále. Klopný obvod a spínač s tvarovačem pulsů je jeden celek, spínač s rekuperačními diodami je druhý výkonový celek. Transistory mají maximální výkon 80W, takže dovolené zatížení odpovídá přibližně 150W. Kmitočet a střída se dá nastavit na trimrech 4,7kΩ. Kmitočet se dá nastavit od 50kHz do 70kHz.



obr. 7.2 Signál měřený na jednom z tvarovacích výstupů na báze výkonových tranzistorů. Kondensátory slouží k vytvoření otevíracího a zavíracího impulsu, zbytek času je odpory nastaveno přídržné nebo blokovací napětí.



obr. 7.3 Budič v provozu. Deska řídicího obvodu je našroubována k druhé straně chladiče výkonového stupně. Před transformátorkem je vidět dvojice trimrů pro nastavení kmitočtu a střídý.

7.2 Měření efektivity přenosu přímé vazby a přes kapacitní oddělení s různou mezerou

Přímá vazba je zapojena podle modelu linkového transformátoru jen s tím rozdílem, že mezi první a druhý transformátor je možné vložit kapacitního napojení přes izolační překážku. Izolační bariéra je modelována kondensátory dvakrát 4,7 nF tedy 2,3nF. Kapacita se může měnit, ale k tomu není připraven budič (musel by mít zpětnou vazbu). Napětí na výstupu je časově vyhlazené, ale při odlehčení vystoupá na 50V, je nutná předzátěž. Původně takhle měl fungovat bezdrátový přenos pomocí dvou rezonančně napojených obvodů s vysokonapětovými kapacitními klobouky. Vzhledem k tomu, že realizace prvního experimentu není schopná generovat vysoké napětí, nebylo možné prve přenést požadovaný výkon.

Bilance přenosových vlastností obvodů s kapacitní vazbou

Výpočet přenosu:

Napájecí a výstupní napětí měřené na svorkách zdroje

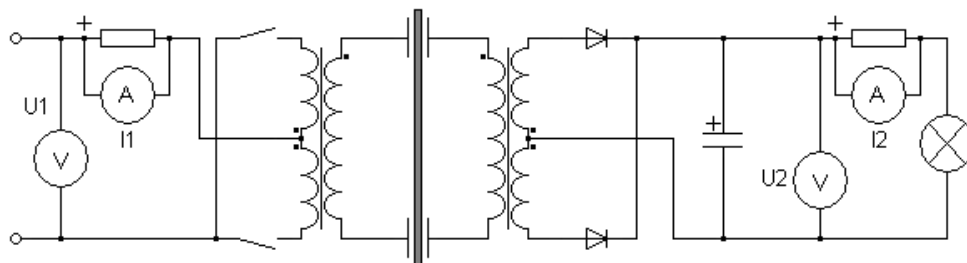
U_1, U_2

Stejnoseměrný vstupní a výstupní proud a výkon

I_1, I_2, P_1, P_2

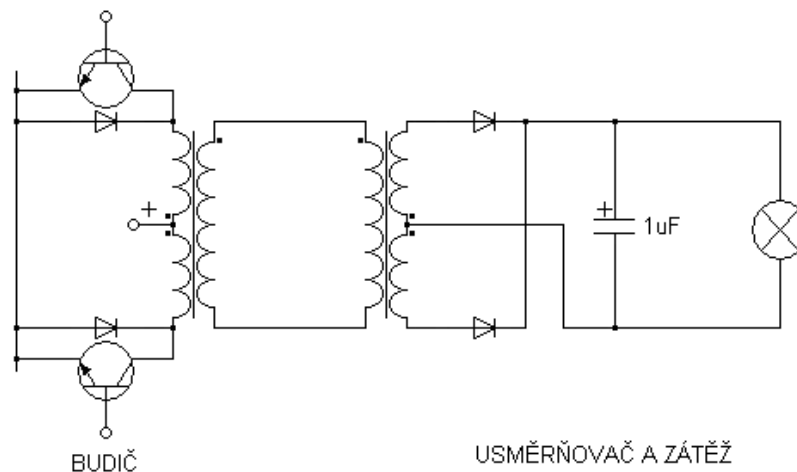
Účinnost přenosu

η



obr. 7.9 Schéma měřícího pracoviště na příkladu s kapacitním mostem měřící odpory proudu mají hodnotu $0,22\Omega$

1. měření na přímou vazbu



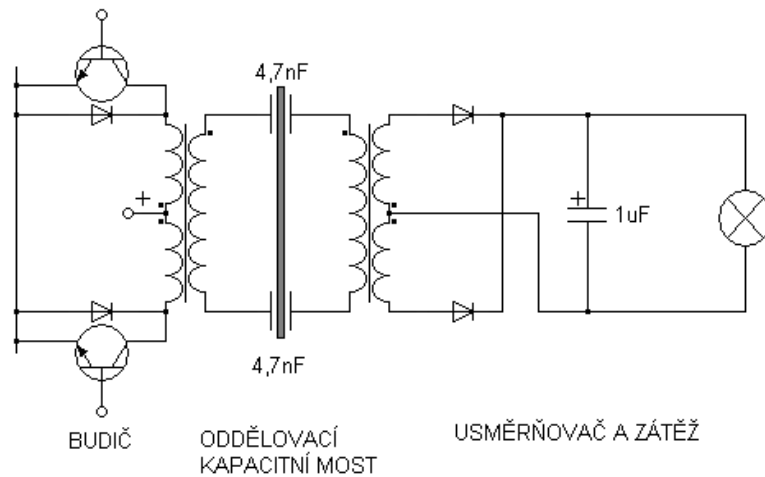
obr. 7.4 Schéma zapojení napájecí linky s přímou vazbou

$U_1 = 12\text{VDC}$, $U_2 = 12\text{VDC}$, $I_1 = 0,8\text{V}/0,22\Omega = 3,6\text{A}$, $I_2 = 0,6\text{V}/0,22\Omega = 2,7\text{A}$,

$P_1 = 12\text{V} \cdot 3,6\text{A} = 43,2\text{W}$, $P_2 = 12\text{V} \cdot 2,7\text{A} = 33\text{W}$, $\eta = P_2/P_1 \cdot 100 = 33\text{W}/43,2\text{W} \cdot 100 = 76\%$

Žárovka svítí. Chladič na budiči je studený ve všech třech případech.

2. měření na kapacitní vazbu



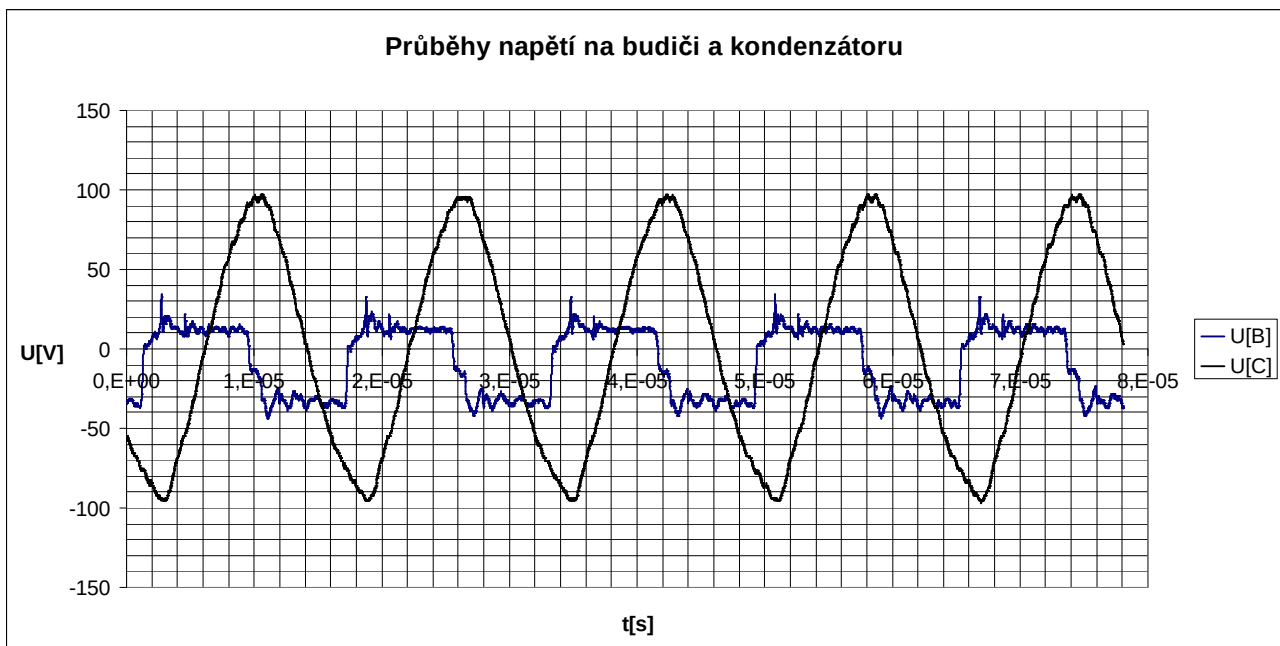
obr. 7.5 Schéma zapojení napájecí linky pro obvod za překážkou

$$U_1 = 12\text{VDC}, U_2 = 12\text{VDC}, I_1 = 0,8\text{V}/0,22\Omega = 3,6\text{A}, I_2 = 0,7\text{V}/0,22\Omega = 3,2\text{A},$$

$$P_1 = 12\text{V} \cdot 3,6\text{A} = 43,2\text{W}, P_2 = 12\text{V} \cdot 3,2\text{A} = 38,4\text{W}, \eta = P_2/P_1 \cdot 100 = 38,4\text{W}/43,2\text{W} \cdot 100 = \mathbf{89\%}$$

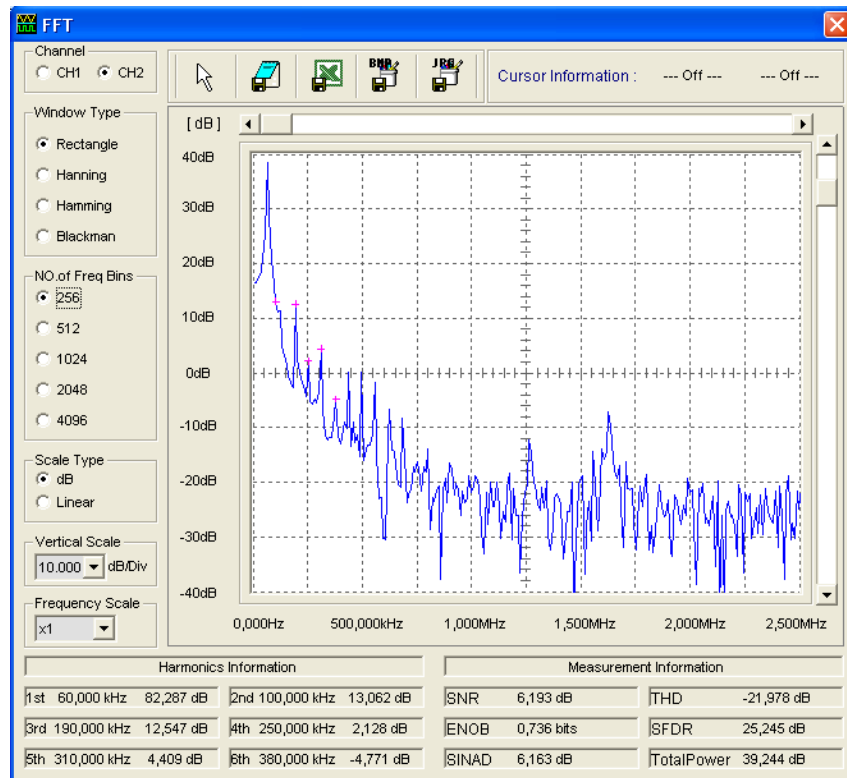
Žárovka svítí více, kapacitní vazba má jak se zdá nejlepší průchodnost. Pokud bychom použili vyšší kmitočet, dalo by se projít přes silnější překážku se stejnou účinností.

Změřené hodnoty střídavých napětí na přenosu s kapacitním oddělením



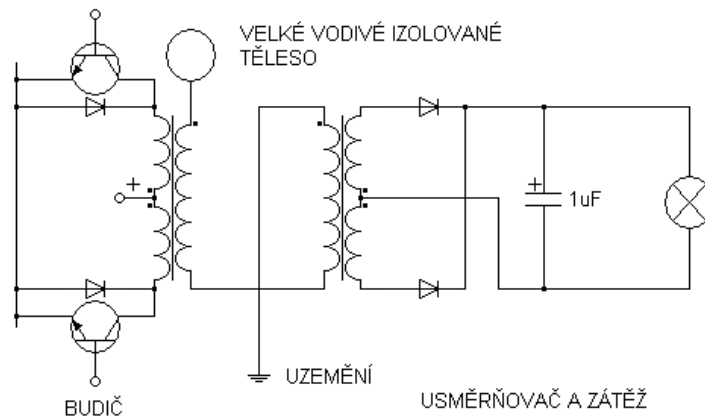
obr. 7.7 Průběh napětí na budiči $U(B)$ – zde se projevuje zpětný vliv parazitní kapacity vinutí transformátorů zatímco napětí na kondensátorech $U(C)$ je přibližně sinus

$$CH1: U(B)_{PP} = 7\text{V} \quad CH2: U(C)_{PP} = 200\text{V}, f = 60\text{kHz}$$



obr. 7.8 Měření na kapacitním oddělení - frekvenční rozptyl a harmonické napětí na jednom z kondenzátorů 4,7nF.

3. otevření obvodu a spojení s PEN a velkým vodivým izolovaným tělesem



obr. 7.6 Schéma zapojení napájecí linky s otevřeným obvodem

$$U_1 = 12\text{VDC}, U_2 = 6\text{VDC}, I_1 = 0,6\text{V}/0,22\Omega = 2,7\text{A}, I_2 = 0,6\text{V}/0,22\Omega = 2,7\text{A},$$

$$P_1 = 12\text{V} \cdot 2,7\text{A} = 32,4\text{W}, P_2 = 6\text{V} \cdot 2,7\text{A} = 16,2\text{W}, \eta = P_2/P_1 \cdot 100 = 16,2\text{W}/32,4\text{W} \cdot 100 = 50\%$$

Žárovka žhne a při změně kapacity tělesa se mění proud. Mezi oběma transformátory je navíc vzdálenost 2 metry zemní linky jako propojka transformátorů. Při tomto způsobu propojení je dodatečně změřený přenos až překvapivě velký, pokud by byly použity transformátory s vyšším možným kmitočtem než 100kHz, byl by možná úspěšný i první experiment se skutečnou zemí.

Ve všech případech je kmitočet nastaven na 60kHz a použita stejná žárovka. Pokud se kmitočet nastaví větší nebo menší, začne mírně klesat přenos.

8 Závěr

Teoretická část

Hlavní účel projektu je poukázat na možnost přenosu elektrické energie bez použití vodičů. Přestože existuje více využitelných možností, technologie přenosu podle Teslova patentu v základní podobě dosud nebyla nikdy zadána ke zkoumání z několika důvodů: celý systém je životu nebezpečný, potřebuje robustní a výkonná koncová zařízení, zatímco ostatní principy se dají realizovat jako relativně malé. Dále mezi kapacitními konci by měl být vytvořen přenosový kanál, který omezí jinou aktivitu v tomto prostoru, což u ostatních není v tak významné míře. Naopak potenciálními výhodami systému by měla být údajně vysoká efektivita přenosu srovnatelná s drátovým přenosem a na nesrovnatelně větší vzdálenosti.

Realizace

V této práci je provedeno experimentální měření bezdrátového přenosu elektrické energie. Přitom je kladen důraz na dodržení původní koncepce přes kapacitu rezonančního napojení. Spojení bylo navázáno, i když velmi nekvalitně.

Kvůli nemožnosti přenést výkon i na minimální vzdálenost by měření závislosti přijatého a vyslaného výkonu na větší vzdálenosti nemělo smysl. Na primárním i sekundárním rezonátoru bylo očekáváno vysoké napětí cca 400kV, nicméně nebylo tak vysoké jak bylo potřeba 4kV nejspíš kvůli malému Q cívek a harmonickým kmitočtům. Negativní výsledek experimentu potvrzuje, že bezdrátový přenos elektrické energie na větší vzdálenosti tímto způsobem není možný. Experimenty byly provedeny v rámci testování přístroje zvaného Teslův transformátor – zesilující vysílač (TCMT), tedy schematicky zcela podle původní předlohy. Některé zprávy na internetu a výsledky experimentů amatérských nadšenců se sice snaží dokládat, že se podařilo přenést určité množství energie. Bývá to ale fyzikální nesmysl, nebo je přenos taktéž zanedbatelný jako v našem případě.

Zhodnocení experimentu

Hlavní důvod zanedbatelného přenosu je vysoký útlum přenosové cesty. Rezananční obvod se sice zčásti kapacitně propojí, ale činitel vazby je tak nízký, že dochází k velkému rozptylu okolo terminálů. Dalším významným důvodem je velká spotřeba energie v samotných rezonančních obvodech tzn. v činných odporech cívek, hysterezích jader, harmonických na vinutí,

K samotnému spotřebiči se dostane jen minimum vstupního výkonu (3%). Verdikt tohoto principu je dán také z teorie antén, podle které funkce intenzity záření antény klesá v blízkém reaktivním poli se třetí mocninou vzdálenosti od antény. V tomto projektu měl být také prokázán efekt stahování siločar elektrodynamického pole, ale nic takového se nestalo, takže nemá smysl vytvářet simulační model.

Místo toho byl prozkoumán model krátkého kapacitního napojení přes kondensátory (použití např. pro napájení přes dielektrickou překážku). U tohoto typu přenosu se ukázala vysoká účinnost, naměřeno téměř 90% i s usměrňovačem. Na malou vzdálenost se uzavřený obvod chová úplně jinak než s některým otevřeným koncem se siločarami nataženými ven. Mezera mezi kapacitními polepy dokonce může být proměnná pokud se pohybuje v mezích nízké reaktance.

Přenos elektrické energie na velké vzdálenosti pomocí vodičů tedy zřejmě zůstane jediný možný a rentabilní.

Výpočty v tomto projektu mají charakter ne úplně přesných, ale přibližných čísel s odchylkou měřících přístrojů a odchylkou na zaokrouhlování. Důvod je ten, že nejde o exaktně přesný návrh konkrétní věci, ale prozkoumání nového technologického principu, sesbírání základních údajů a stanovení jestli teoretické základy pro antény pro mají nějakou váhu i v případě bezdrátového přenosu výkonu jako takového. I když se na aplikaci teorie v úvodu z velké části nedostalo,

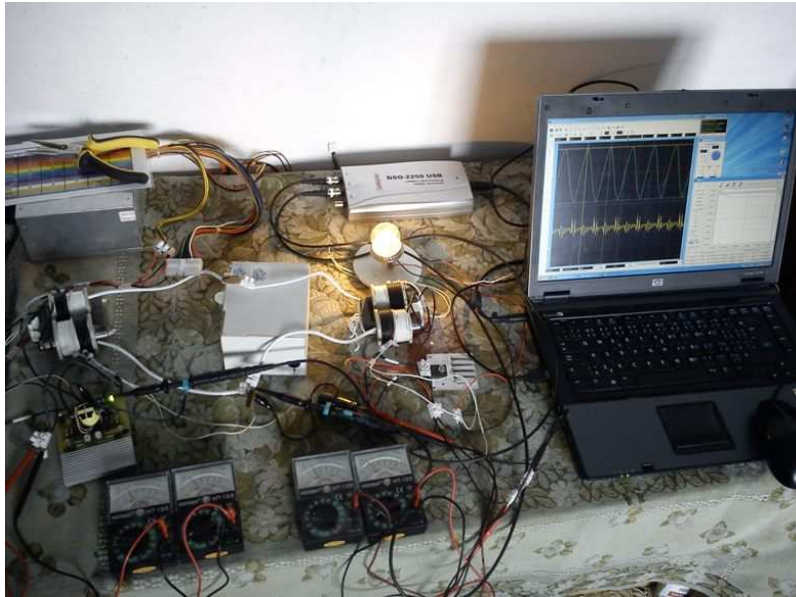
výsledky obou experimentů mají velkou váhu. Na otázku jestli může skutečně existovat kapacitní bezdrátový přenos energie na velké vzdálenosti je sice negativní odpověď, ale poslední experimenty ukázaly, že na malou vzdálenost je to možné.

9 Seznam použité literatury a odkazy

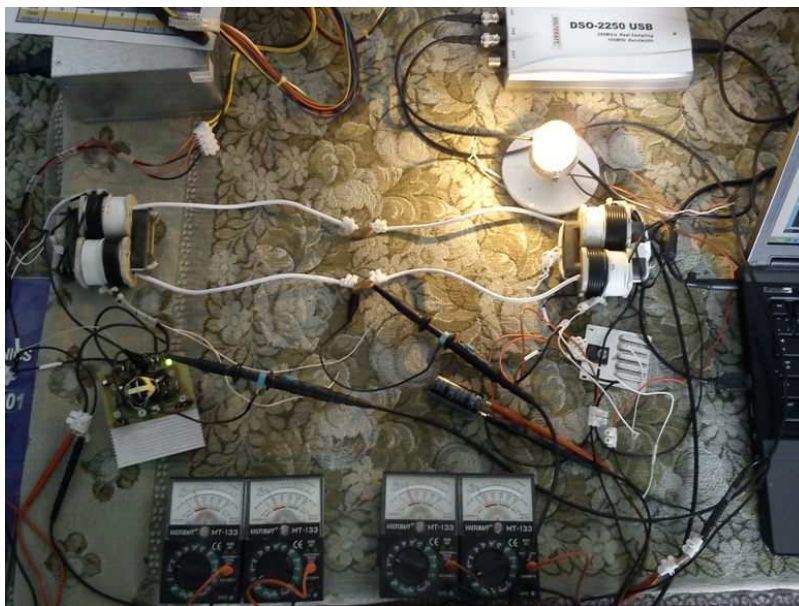
- [1] U.S. patent 1 119 732 Apparatus for transmitting electrical energy, Nicola Tesla
- [2] [http://www.plasma.uu.se/CED/Electromagnetic field theory.pdf](http://www.plasma.uu.se/CED/Electromagnetic%20field%20theory.pdf) , Bo Thidé, Swedish institute of Space Physics, Uppsala, Sweden, UPSILON BOOKS UPPSALA, 2008
- [3] <http://www.k-meyl.de/> , prof. Konstantin Meyl, Scalar Waves.pdf, Darmstadt, 2010
- [4] <http://www.mit.edu/~soljagic/> Assistant Professor of Physics at MIT, wireless power
- [5] <http://www.elisanet.fi/dncmrc/> Project THOR, Marco Denicolai: Tesla Transformer for Experimentation and Research (ithesis.pdf)
- [6] Vladimír Lysenko – kniha VN zdroje plus pomocné soubory knihy na <http://www.ben.cz/> , BEN – technická literatura, Praha 2008, ISBN 978-80-7300-235-0
- [7] J. Dědková – Modelování elektromagnetických polí, skripta + PC cvičení UTEE FEKT VUT, 2005
- [8] J.Díblík – Diferenciální rovnice a jejich použití v elektrotechnice, skripta UMAT 2005
- [9] Z. Nováček– Elektromagnetické vlny, antény a vedení. Brno: FEKT VUT v Brně, 2003
- [10] J. Sedláček, J.Valsa – Elektrotechnika II. Brno: FEKT VUT v Brně, Vutium 2004, ISBN-80-214-2573-3
- [11] Dataheety k tranzistorům výkonový 2SC4138, spínací obyčejný C945
- [12] Návod k programům a přístrojům

10 Přílohy

Obrázky z měření:



obr. 10.1 Měřící pracoviště



obr. 10.2 Linka s kapacitní překážkou v modelové podobě dvou kondenzátorů

Použitý materiál a přístroje:

1. Polovodičové součástky C4138 a C945, odpory, kondensátory, cívky a transformátory
2. Notebook, analogový osciloskop, USB osciloskop DSO 2250 se spektrální analýzou
3. 4 malé univerzální analogové multimetry MT-133, 2 digitální multimetry MY-68
4. AT zdroj 12VDC, žárovka 30W na 12V