



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra elektrických pohonů a trakce**

**Bezdrátový přenos energie indukční vazbou**

**Wireless power transfer**

Bakalářská práce

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Vedoucí práce: **Ing. Petr Kočárník, Ph.D.**

**Lukáš Pacák**

**Praha 2020**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pacák** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **466207**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Bezdrátový přenos energie indukční vazbou**

Název bakalářské práce anglicky:

**Wireless power transfer**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši dostupných technologií, jejich parametrů a možností využití.
- 2) Analyzujte základní vlastnosti možných uspořádání, nalezněte omezující faktory a způsob optimalizace.
- 3) Navrhněte neřízený harmonický budič a změňte chování soustavy s pasivní zátěží.
- 4) Navrhněte řízený budič včetně obvodů pro stabilizaci výstupního napětí a adaptivního nastavení pracovního bodu, změňte charakteristiky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] PAVELKA, Jiří a Pavel KOBRLÉ. Elektrické pohony a jejich řízení. 3. přepracované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016.
- [2] LETTL, Jiří, Jiří PAVELKA a Jan BAUER. Výkonová elektronika. 4. přepracované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019.
- [3] MOHAN, Ned. Power electronics: a first course. Hoboken: Wiley, 2012.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Petr Kočárník, Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **12.09.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **22.05.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Ing. Petr Kočárník, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Dále prohlašuji, že předložená tištěná verze bakalářské práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do KOS a že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne:

.....

podpis

## **Poděkování:**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Petru Kočárníkovi, Ph.D. za velmi vstřícný přístup při vedení práce a za cenné rady při psaní bakalářské práce.

## **Anotace:**

Práce se zabývá bezdrátovým přenosem energie pomocí indukční vazby. Jsou zde představeny základní technologická řešení, oblasti využití a používané standardy. Je popsán fyzikální princip a chování soustavy v harmonickém ustáleném stavu. Dále jsou rozebrány způsoby buzení, zapojení měničů a stabilizace výstupního napětí.

Druhá část práce obsahuje návrhy obvodů a experimentální ověření předpokládaných vlastností. Je zde představeno zapojení samokmitajícího i řízeného budiče. Pro příjem energie je testováno zapojení s pasivním usměrňovačem a zapojení s měničem napětí. Je zde porovnání vlastností systémů s prostou indukční vazbou a rezonančními obvody v různých zapojeních.

## **Klíčová slova:**

indukční vazba, magnetické pole, rezonanční obvod, rezonanční frekvence, buzení, vnitřní impedance, měnič napětí

## **Summary:**

The thesis deals with wireless energy transmission using inductive coupling. The basic technological solutions, areas of use and accepted standards are presented here. The physical principle and attributes of the system in the harmonic steady state are described. The methods of excitation, structure of inverters and the stabilization of output voltage are discussed.

The second part of the task contains circuit designs and experimental verification of the assumed properties. The circuit of self-oscillating and controlled driver is presented here. The connection with a passive rectifier and the connection with a voltage converter are tested. There is a comparison of the properties of systems with simple inductive coupling and resonant circuits in different topologies.

## **Index terms:**

inductive coupling, magnetic field, resonant circuit, resonant frequency, excitation, internal impedance, voltage converter

# OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	8
SEZNAM TABULEK .....	9
SEZNAM FYZIKÁLNÍCH SYMBOLŮ .....	10
SEZNAM ZKRATEK .....	10
ÚVOD .....	11
<b>1 TECHNOLOGIE A VYUŽITÍ BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU .....</b>	<b>12</b>
1.1 Indukční vazba .....	12
1.1.1 Využití indukčního přenosu .....	12
1.1.2 Standardy pro indukční přenos .....	14
1.1.2.1 Qi-standard .....	14
1.1.2.2 Další používané standardy .....	16
<b>2 ANALÝZA INDUKČNÍHO PŘENOSU .....</b>	<b>17</b>
2.1 Lineární režim .....	19
2.2 Rezonanční režim .....	21
2.3 Zapojení obvodů .....	23
2.3.1 Zapojení budiče .....	23
2.3.2 Zapojení střídače .....	25
2.3.3 Zapojení přijímače .....	27
<b>3 KONSTRUKCE CÍVEK .....</b>	<b>28</b>
<b>4 SAMOKMITAJÍCÍ HARMONICKÝ BUDIČ .....</b>	<b>30</b>
4.1 Návrh zapojení budiče .....	30
4.2 Návrh zapojení přijímače .....	31
4.3 Popis měření .....	32
4.4 Měření charakteristik .....	33
4.4.1 Měření při konstantní vzdálenosti .....	33
4.4.2 Měření charakteristik v závislosti na vzdálenosti .....	35
4.4.3 Měření v rezonanci při konstantní vzdálenosti .....	37
4.5 Vyhodnocení měření .....	39
<b>5 ŘÍZENÝ BUDIČ .....</b>	<b>40</b>
5.1 Návrh zapojení .....	40
5.2 Popis měření .....	41

5.3	Měření charakteristik .....	43
5.3.1	Měření napětí naprázdno .....	43
5.3.2	Měření rezonanční frekvence .....	44
5.3.3	Měření závislosti proudu na pracovní frekvenci .....	45
5.3.4	Měření závislosti proudu v rezonanci na vzdálenosti .....	47
5.3.5	Měření závislosti proudu na vzdálenosti při konstantní frekvenci .....	48
5.3.6	Měření zatěžovacích charakteristik .....	50
5.4	Vyhodnocení měření .....	52
<b>6</b>	<b>MĚŘENÍ SE SPÍNANÝM MĚNIČEM .....</b>	<b>53</b>
6.1	Popis zapojení a postup měření .....	54
6.2	Měření charakteristik .....	55
6.4	Vyhodnocení měření .....	57
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>58</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>60</b>
	<b>PŘÍLOHA .....</b>	<b>62</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 : Komunikační protokol Qi [7] .....	15
Obr. 1-2 : Zapojení zařízení pro bezdrátový přenos s více standardy [20] .....	16
Obr. 2-1 : Rozdělení indukčních toků .....	17
Obr. 2-2 : Náhradní schéma .....	18
Obr. 2-3 : Zjednodušené náhradní schéma .....	19
Obr. 2-4 : Fázorový diagram bez zatížením .....	19
Obr. 2-5 : Fázorový diagram s činnou zátěží .....	20
Obr. 2-6 : Zjednodušení obvodu .....	21
Obr. 2-7 : Kompenzace vnitřní impedance .....	22
Obr. 2-8 : Zjednodušení kompenzovaného obvodu .....	22
Obr. 2-9 : Paralelní budič .....	24
Obr. 2-10 : Sériový budič .....	24
Obr. 2-11 : Příklady zapojení střídače.....	25
Obr. 2-12 : Blokové schéma přijímače .....	27
Obr. 3-1: Provedení cívek .....	28
Obr. 4-1 : ZVS driver .....	30
Obr. 4-2 : Zapojení přijímače - ZVS .....	32
Obr. 4-3 : Schéma měření - ZVS .....	33
Obr. 4-4 : VA charakteristika pro různé vzdálenosti - ZVS .....	33
Obr. 4-5 : Výkonové křivky pro různé vzdálenosti - ZVS .....	34
Obr. 4-6 : Závislost proudu nakrátko na vzdálenosti - ZVS .....	35
Obr. 4-7 : Závislost maximálního výkonu na vzdálenosti - ZVS .....	36
Obr. 4-8 : Závislost účinnosti na vzdálenosti - ZVS .....	36
Obr. 4-9 : VA charakteristika při 8 cm, v rezonanci - ZVS .....	37
Obr. 4-10 : Výkonová křivka při 8 cm, porovnání - ZVS .....	38
Obr. 4-11 : Křivka účinnosti při 8 cm, porovnání - ZVS .....	38
Obr. 5-1 : Schéma zapojení zesilovače - řízený budič .....	40
Obr. 5-2 : Schéma měření - řízený budič .....	42
Obr. 5-3 : Závislost napětí naprázdno na vzdálenosti - řízený budič .....	43
Obr. 5-4 : Závislost činitele vazby na poměrné vzdálenosti - řízený budič .....	44
Obr. 5-5 : Závislost změny rezonanční frekvence na vzdálenosti - řízený budič .....	45
Obr. 5-6 : Závislost proudu nakrátko na pracovní frekvenci - řízený budič .....	46
Obr. 5-7 : Závislost vnitřní impedance na pracovní frekvenci - řízený budič .....	47
Obr. 5-8 : Závislost proudu nakrátko na vzdálenosti při udržování rezonance- řízený budič .....	48
Obr. 5-9 : Závislost proudu nakrátko na vzdálenosti při konstantní frekvenci- řízený budič .....	49
Obr. 5-10 : VA charakteristika v rezonanci pro různé vzdálenosti - řízený budič .....	50
Obr. 5-11 : Závislost výkonu na odporu zátěže pro různé vzdálenosti - řízený budič .....	51
Obr. 5-12 : Závislost účinnosti přenosu na odporu zátěže - řízený budič .....	51
Obr. 6-1 : Zapojení sekundární strany s měničem .....	54
Obr. 6-2 : Závislost proudu rezonančním obvodem na zatížení - měření s měničem .....	55
Obr. 6-3 : Závislost vstupního napětí měniče na zatížení - měření s měničem .....	56
Obr. 6-4 : Závislost výkonu na vzdálenosti při konstantní frekvenci - měření s měničem .....	57
Obr. 0-1 : Soustava se samokmitajícím budičem .....	62
Obr. 0-2 : Měřící pracoviště se zapojením řízeného budiče .....	62



# SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1-1 : Příklady využití indukčního přenosu v elektromobilitě [6] .....</i>	<i>13</i>
<i>Tab. 3-1 : Parametry cívek - Plošné .....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 3-2 : Parametry cívek - Kruhové .....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 3-1 : Parametry součástek - ZVS .....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 4-2 : Parametry součástek - Přijímač - ZVS .....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 5-1 : Parametry součástek - řízený budič .....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 6-1 : Parametry součástek - měření s měničem .....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 0-1 : Měření při změně vzdálenosti cívek - ZVS .....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 0-2 : Měření při 1cm - ZVS .....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 0-3 : Měření při 4cm - ZVS .....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 0-4 : Měření 7cm - ZVS .....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 0-5 : Měření při 10cm - ZVS .....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 0-6 : Měření při 8cm v rezonanci - ZVS .....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 0-7 : Měření naprázdno - řízený budič .....</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 0-8 : Měření vlivu vzdálenosti na frekvenci - řízený budič .....</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 0-9 : Měření vlivu vzdálenosti na proud nakrátko - řízený budič .....</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 0-10 : Měření vlivu frekvence na proud nakrátko - řízený budič .....</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 0-11 : Měření při konstantní frekvenci - řízený budič .....</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 0-12 : Měření při zatěžování odporem - řízený budič .....</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 0-13 : Měření s měničem při optimální frekvenci .....</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 0-14 : Měření s měničem při konstantní frekvenci .....</i>	<i>70</i>

## SEZNAM FYZIKÁLNÍCH SYMBOLŮ

B	(T)	magnetická indukce
C	(F)	elektrická kapacita
E	(V/m)	intenzita elektrického pole
f	(Hz)	frekvence
I	(A)	elektrický proud
l	(m)	délka
L	(H)	indukčnost
M	(H)	vzájemná indukčnost
N	(1)	počet závitů
P	(W)	výkon
R	( $\Omega$ )	elektrický odpor
S	(m <sup>2</sup> )	plocha
t	(s)	čas
U	(V)	napětí
X	( $\Omega$ )	reaktance
Z	( $\Omega$ )	impedance
$\Phi$	(Wb)	magnetický indukční tok
$\kappa$	(1)	činitel vazby
$\eta$	(%)	účinnost
$\omega$	(rad/s)	úhlová frekvence
$\Psi$	(Wb)	spřažený indukční tok

## SEZNAM ZKRATEK

AC	střídavý proud
A4WP	Alliance for Wireless Power
D	polovodičová dioda
DC	stejnoseměrný proud
EMC	elektromagnetická kompatibilita
j	imaginární jednotka
LC	obvod s kondenzátorem a cívkou
PMA	Power Matters Alliance
Qi	standard pro bezdrátový přenos energie
T	tranzistor
WPC	Wireless Power Consortium
ZVS	zero voltage switching

# ÚVOD

Elektrická energie je v současné době považována za formu energie s nejvyšší užitnou hodnotou. Je to dáno především tím, že ji lze přeměnit na libovolný jiný druh energie a to poměrně snadno a s velkou účinností. Druhou klíčovou výhodou je možnost přenášet elektrickou energii na velké vzdálenosti a to vysokou rychlostí. V porovnání s jinými zdroji energie, ať jsou to tuhá paliva, plyn, nebo pára, je transport elektrické energie nejjednodušší. Přesto se mnozí vědci už od počátků elektrifikace snažili najít způsob, jak elektřinu přenášet bez nutnosti budování dlouhých vedení.

Pro bezdrátový přenos energie byla vyvinuta celá řada technologií. Zařízení na principu indukční vazby jsou již dokonce komerčně využívány, například v bezdrátových nabíječkách. Na krátké vzdálenosti taková zařízení pracují poměrně efektivně. Při vzdálenostech řádově větších než jsou rozměry samotného přístroje se už potýkají se značnými problémy.

Pro přenos na delší vzdálenosti již nestačí indukční ani kapacitní vazba, místo toho lze však využít energii elektromagnetického vlnění. Byly prováděny experimenty na vlnových délkách odpovídajícím rádiovým vlnám až do optického spektra. Žádná bezdrátová technologie pro přenos energie se však v současné době nemůže svým výkonem a účinností rovnat energetické přenosové soustavě.

Existují však aplikace, kde by mohlo být využití bezdrátového přenosu vhodné. Jedná se například o drobné domácí spotřebiče s minimálním příkonem, kde by odstranění napájecích vodičů zvýšilo uživatelský komfort, nebo v průmyslu či dopravě, kde je potřeba přenášet energii na pohyblivé části strojů.

# 1 TECHNOLOGIE A VYUŽITÍ BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU

Bezdrátovým přenosem se rozumí přenos energie ze zdroje na zátěž bez galvanického propojení metalickým či jiným vodičem. Většina technologií je založena na využití elektrického, nebo magnetického pole. Pro krátké vzdálenosti, kdy je vzdálenost přenosu menší nežli vlnová délka, se jedná o indukční nebo kapacitní vazbu. Při větších vzdálenostech je již potřeba uvažovat o systému jako o obvodu s rozprostřenými parametry a energie je nesena elektromagnetickou vlnou.

Podle vlnové délky se značně liší vlastnosti systému. Zařízení pracující na dlouhých vlnách vysílají energii všemi směry, výhodou může být plošné pokrytí nějaké oblasti. Vzhledem k tomu, že je energie rozptýlena do velkého prostoru, je dosažitelný výkon velmi malý a většina energie je pohlcena prostředím. Při vyšších frekvencích je již možné použití směrových antén a zvýšení hustoty energie v jednom směru. Zejména v mikrovlnné oblasti lze vysílanou energii dobře směřovat a zároveň se stále ještě jedná o frekvenci, při které lze získat elektrickou energii pouhým usměrněním indukovaného napětí.

Dalším zvyšováním frekvence se dostáváme do oblasti tepelného záření, které není pro bezdrátovou technologii vhodné, především proto, že nejde jednoduchým způsobem přeměnit na elektrickou energii. Viditelná část spektra jistý potenciál má. Jde však o zcela odlišnou technologii, elektromagnetické vlny mají při takto vysokých frekvencích spíše částicový charakter. Proto už nefunguje elektromagnetická indukce, lze však využít fotoelektrického jevu. Ještě vyšší frekvence z oblasti RTG a gamma záření nejsou použitelné především kvůli nežádoucím vlivům na živé organismy.

## 1.1 Indukční vazba

Zařízení pro bezdrátový přenos na indukčním principu využívají skutečnosti, že dvě cívky umístěné v prostoru mají určitou vzájemnou indukčnost. Přivedení střídavého proudu na jednu cívku potom indukuje napětí v druhé cívce, čímž lze přenášet určité množství energie mezerou mezi cívkami. Indukční přenos je výhodný zejména pro krátké vzdálenosti, když je indukční vazba těsná, tedy když je malá rozptylová indukčnost. Potom lze dosáhnout velkých výkonů za přijatelné účinnosti.

### 1.1.1 Využití indukčního přenosu

Intenzivní výzkum technologie indukčního přenosu energie nyní probíhá především v oblasti elektromobility. Umístění plochých cívek pod vozovku, autobusy na zastávkách, nebo pod parkovací místa umožní průběžné dobíjení akumulátorů. Tím lze v městském provozu částečně řešit největší problém akumulátorového napájení vozidel, kterým je krátký dojezd a dlouhá doba nabíjení. Induktivní bezdrátový přenos se v těchto vozidlech jeví jako vhodné řešení, protože vzduchová mezera pod vozidlem je vzhledem k možnému průměru cívek poměrně malá a také víceméně konstantní. Díky tomu lze systém dobíjení dobře optimalizovat na jednotnou přenosovou vzdálenost a dosáhnout vysoké účinnosti přenosu.

Potřebný výkon pro dobíjení se pohybuje v řádu jednotek až desítek kW, přičemž je možné dosáhnout účinnosti mezi 70 až 90 %. Používá se napájení sinusovým proudem o frekvenci 10 až 100 kHz, kdy lze dosáhnou dobrého poměru mezi výkonem a ztrátami, které jsou spojeny s použitím vyšších frekvencí. Mezera mezi cívkami je většinou v řádu jednotek cm, max. 20-30 cm. K přenesení takto velkých výkonů se používá přenos energie pomocí rezonančních obvodů [6].

V tab. 1-1 je uveden přehled experimentálních i komerčních aplikací bezdrátového napájení vozidel, převzatý ze sborníku z konference „World Electric Vehicle Symposium and Exhibition“[6].

Institute / corporation	Year of Installation	Location	Project Type	Vehicle Type	Power	Air Gap	Efficiency
Auckland University & Conductix-Wampfler	1997	Auckland	Public Demonstration (Stationary)	5 Golf buses	20kW	50mm	90-91%
	2002-2003	Italy		8-23 mini buses	60kW	30mm	-
Auckland University & Qualcomm Halo	2010	Auckland	Evaluation kits (Stationary)	Private vehicles	3kW	180mm	85%
	2012	UK	Public Demonstration (Stationary/ Dynamic)	-	-	-	-
ORNL	2010	US	Prototype (Dynamic)	-	4.2kW	254mm	92% (coil-to-coil)
	2012	US	Prototype (Stationary)	-	7.7kW	200mm	93% (coil-to-coil)
	2012	US	Prototype (Stationary/ Dynamic)	GEM EV	2kW	75mm	91% (coil-to-coil)
KAIST	2009	Korea	Prototype (Dynamic)	Golf Bus	3kW	10mm	80%
				Bus	6kW	170mm	72%
				SUV	17kW	170mm	71%
	2010	Korea	Public Demonstration (Dynamic)	Tram	62kW	130mm	74%
2012	Korea	Public Demonstration (Dynamic)	Bus	100kW	200mm	75%	
MIT WiTricity & Delphi	2010	US	Commercial kits (Stationary)	Private vehicles	3.3kW	180mm	90%
Evatran	2010	US	Commercial Product (Stationary)	Private vehicles	3.3kW	100mm	90%

Tab. 1-1 : Příklady využití indukčního přenosu v elektromobilitě [6]

Druhou oblastí, kde se poslední dobou stále častěji využívá indukční přenos energie je bezdrátové nabíjení mobilních zařízení. Hlavním důvodem jejich použití je zejména uživatelský komfort a flexibilita i také řada technických výhod. U mnoha zařízení je napájecí kabel s konektory tou nejporuchovější částí a bezdrátová technologie tak umožní zvýšit jejich spolehlivost. Jinde zase není možné mít na zařízení jakékoliv konektory, například v případě vodotěsných, nebo prachotěsných přístrojů. Potom je bezdrátový přenos efektivní možností, jak zařízení napájet. Za předpokladu, že bude existovat jednotný standard, kterým se budou všichni výrobci řídit, získáváme další velkou výhodu, kterou je kompatibilita všech zařízení. V případě bezdrátových nabíječek není hlavním cílem přenášet výkon na co největší vzdálenost, zařízení může přímo ležet na nabíjecí podložce. Díky tomu nejsou cívky tak zatěžovány a zařízení je možné vyrobit velice levně. Proto se

také předpokládá, že používání bezdrátových technologií v komerčních produktech bude brzy zcela běžné [11].

Bezdrátové nabíječky většinou pracují na principu lineárního indukčního přenosu - bez rezonančních obvodů [7]. To je možné proto, že cívky mají mezi sebou těsnou indukční vazbu. Zařízení potom pracuje jen na malou vzdálenost, která je počítaná s rezervou maximálně 5 mm pro kryt přístroje [8].

Kromě zmíněného omezení vzdálenosti zařízení od podložky, je pro správnou funkci přenosu energie také důležité umístění stranové. Indukční vazba je nejsilnější, pokud jsou cívky souosé, vyosením vazba rychle klesá a při posunu o poloměr cívky je už nulová. Je proto nutné zajistit správnou polohu vysílače a přijímače. Nejjednodušším řešením, které komerčně vyráběné produkty používají, je uchycení cívek pomocí magnetů. Existují i pokročilejší technologie využívající cívkové pole, ve kterém se sepne taková kombinace cívek, aby byl v dané poloze přijímače indukční tok maximální. Informace o stavu přijímače potom musí být přenášena na vysílač pomocí určitého protokolu [13].

Nenahraditelnou úlohu má indukční přenos v různých biomedicínských aplikacích. Zejména pro napájení implantátů, u kterých by jinak každá výměna baterií vyžadovala chirurgický zákrok. Výkon potřebný pro napájení zařízení je sice malý, řádově jednotky až desítky mW, ale uspořádání přenosové soustavy není zdaleka optimální. Zaprvé jde o to, že přijímací cívka musí být velice malá, aby ji bylo možné do organismu zabudovat. Aby bylo indukované napětí dostatečné, vychází pak primární cívka mnohem větší. Z toho důvodu se přijímací cívka nachází v téměř homogenním magnetickém poli. Tak je možné vyřešit i druhý problém, kterým je proměnlivá poloha cívek. Vzhledem k malé indukční vazbě se v těchto aplikacích používá rezonanční systém. Díky značnému rozdílu ve velikosti cívek sice nelze dosáhnout těsné vazby, to ale na druhou stranu přináší určitou výhodu, protože nemůže dojít k rozladění vlivem blízkosti. Proto v takovémto uspořádání postačí, když se systém naladí na jednu frekvenci [10].

### **1.1.2 Standardy pro indukční přenos**

Aby byla zajištěna kompatibilita různých zařízení pro bezdrátový přenos energie, je nutné aby vysílající a přijímající část zařízení mezi sebou komunikovaly. Přijímač musí být schopen předat vysílači informace o výkonu, který je potřeba dodat a o aktuální konfiguraci přenosové soustavy. Na základě obdržené zprávy vysílač nastaví potřebné parametry a také rozpozná přijímač od náhodného předmětu. Sériově vyráběná zařízení proto používají několik základních standardů. Prvním všeobecně přijímaným standardem je Wireless Power Consortium [WPC], které poskytuje Qi-Standard. Dalšími standardy jsou PMA [Power Matter Alliance] a A4WP.

#### **1.1.2.1 Qi-standard**

Qi-standard je specifikace pro bezdrátový přenos energie s nízkým výkonem pomocí indukční vazby. Mezi hlavní rysy zařízení kompatibilního s Qi patří volné umístění nabíjeného zařízení nad vysílačem a detekce cizích objektů mezi vysílačem a přijímačem. Maximální výkon je 5W a je navržen pro zařízení s plošnými cívkami se vzdáleností max. 5mm. Řízení výstupního napětí zajišťuje regulační smyčka využívající komunikační protokol viz obr. 1-2. Komunikační protokol

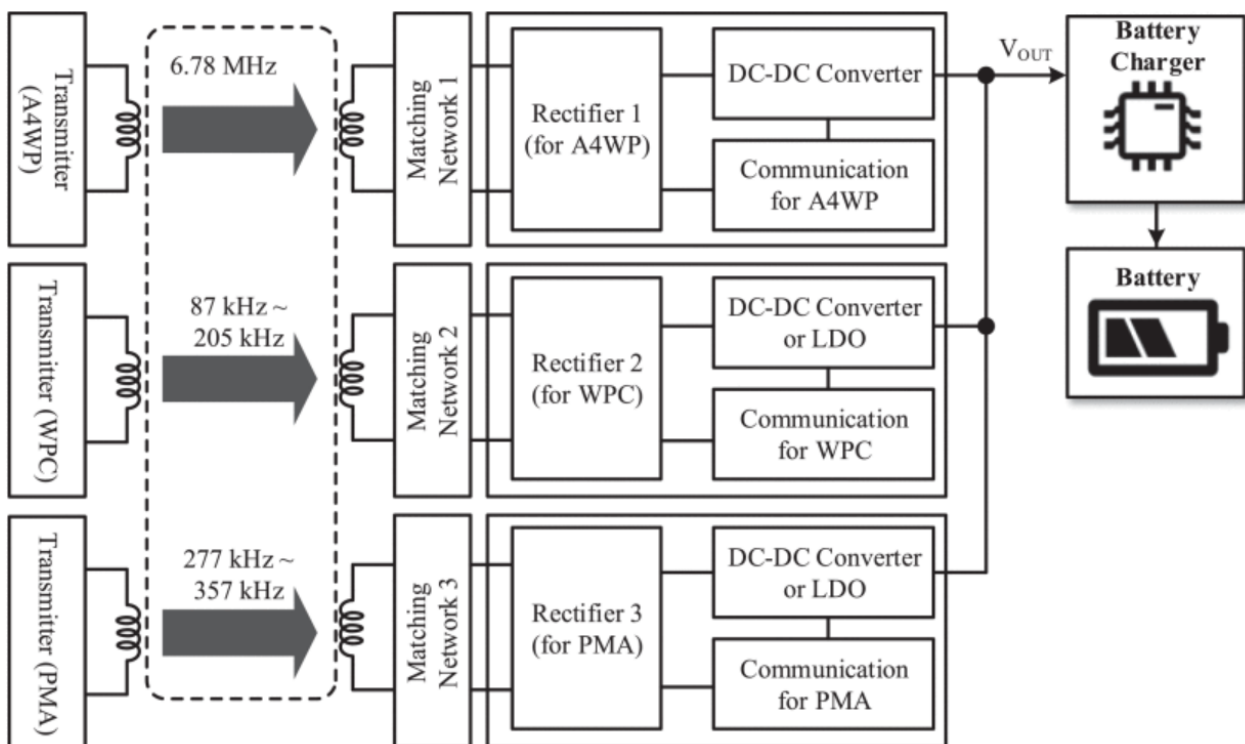


### 1.1.2.2 Další používané standardy

Norma rozhraní Power Matter Alliance (PMA), označovaná „P“, popisuje induktivní přenos výkonu lineární i rezonanční, dále digitální komunikaci, cloudovou správu napájení a udržitelnost životního prostředí. Standard PMA je nejčastěji využíván pro systémy bezdrátového nabíjení pracující s prostou indukční vazbou. Jedná se o konkurenční systém ke standardu Qi. Ve standardu PMA je frekvence bezdrátového přenosu nastavitelná od 87 do 357 kHz, oproti tomu u Qi od 100 do 200kHz. Zapojení výkonových částí obvodů je proto u obou standardů podobné, liší se pouze strukturou digitální komunikace. Na základě toho je možné navrhnout přijímač kompatibilní s vysílači pracujícími na základě standardu Qi i PMA. Oproti Qi přináší PMA navíc možnost přenášet data, která může poskytovatel služby dále zpracovávat. Tutu funkci využívají například majitelé veřejných nabíjecích míst pro získání informace o využití služby [13].

Třetím všeobecně přijímaným standardem je Rezence, vyvinutý Aliancí pro bezdrátový přenos energie (A4WP). Standard rozhraní podporuje přenos energie až 50 W na vzdálenost až 5 cm. Přenos energie probíhá na pevné frekvenci 6,78 MHz, proto nemůže být kompatibilní s výše uvedenými standardy. Hlavním rysem zařízení pracujícího na základě A4WP je využití rezonančních obvodů a systémů pro přesné naladění. Díky tomu dosahuje systém bezdrátového přenosu znatelně vyšších výkonů. Využití A4WP je plánováno zejména pro systémy nabíjení mobilních zařízení, které vyžadují vyšší nabíjecí výkon, nebo pro přenos energie na delší vzdálenosti [20].

Snahou některých výrobců, může také být vytvoření systému kompatibilního se všemi používanými standardy. Na obr. 1-3 je uvedeno zapojení takového systému, který lze napájet z vysílače pracujícího na standardu Rezence (A4WP), Qi (WPC) i P (PMA).



Obr. 1-2 : Zapojení zařízení pro bezdrátový přenos s více standardy, převzato z IEEE Transactions on Power Electronics ( Volume: 33 , Issue: 4 , April 2018 ) [20]



## 2 ANALÝZA INDUKČNÍHO PŘENOSU

Soustava se skládá ze dvou vzduchových cívek, přenos energie je možný díky vzájemné indukčnosti. Primární cívka je napájena střídavým proudem o vysoké frekvenci. Proud ve vinutí vybudí v okolí cívky magnetické pole, které je proměnlivé v závislosti na průběhu budícího proudu.

Z Maxwellových rovnic vyplývá

$$\oint_l E \, dl = -\oint_s \frac{\partial B}{\partial t} \, dS. \quad (2.1)$$

Změnou magnetické indukce  $\partial B/\partial t$  se každou plochou  $S$  indukuje elektrické pole o intenzitě  $E$ , kde integrál po uzavřené křivce  $l$  obepínající plochu  $S$  odpovídá indukovanému napětí v závitě cívky ležící na křivce  $l$ . Okamžitá hodnota napětí indukovaného v cívce je potom

$$u_i = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.2)$$

kde  $\Phi$  je magnetický indukční tok cívkou a  $N$  je počet závitů. Z rovnice plyne, že pro maximalizaci indukovaného napětí je zapotřebí co největší magnetický indukční tok. Ten je dán magnetickou indukcí  $B$  a plochou cívky  $S$ . Výsledný magnetický indukční tok

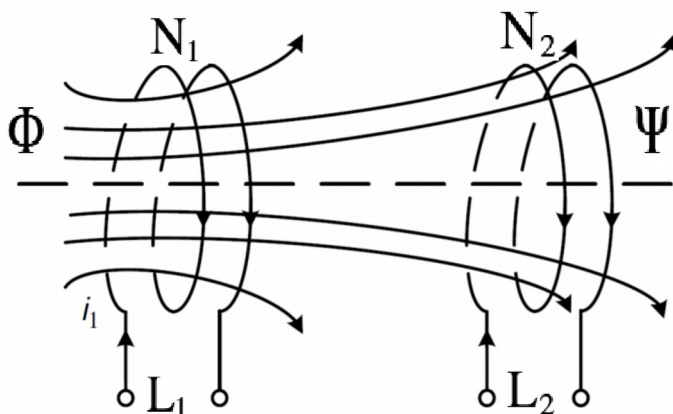
$$\Phi = \int_s B \, dS \quad (2.3)$$

je integrál dílčích toků jednotlivými elementy plochy  $dS$ .

Pro indukci napětí je potřeba dostatečná magnetická indukce a magnetické indukční siločáry vstupující do plochy cívky v ideálním případě kolmo. Dále je indukované napětí tím větší, čím větší je frekvence. Za předpokladu harmonických průběhů je efektivní hodnota indukovaného napětí

$$U_i = \sqrt{2} \pi f N \Phi_{max}. \quad (2.4)$$

Problémem je, že magnetická indukce se vzdáleností rychle klesá, a tak sekundární cívkou prochází jen malá část indukčního toku vybuzeného primární cívkou, jak znázorňuje obr. 2-1.



Obr. 2-1 : Rozdělení indukčních toků

Magnetický indukční tok v primárním vinutí označme  $\Phi$ . Část tohoto toku procházející sekundárním vinutím označme  $\Psi$ . Vztah dvou cívek potom charakterizuje činitel vazby

$$\kappa = \frac{\Psi}{\Phi}. \quad (2.5)$$

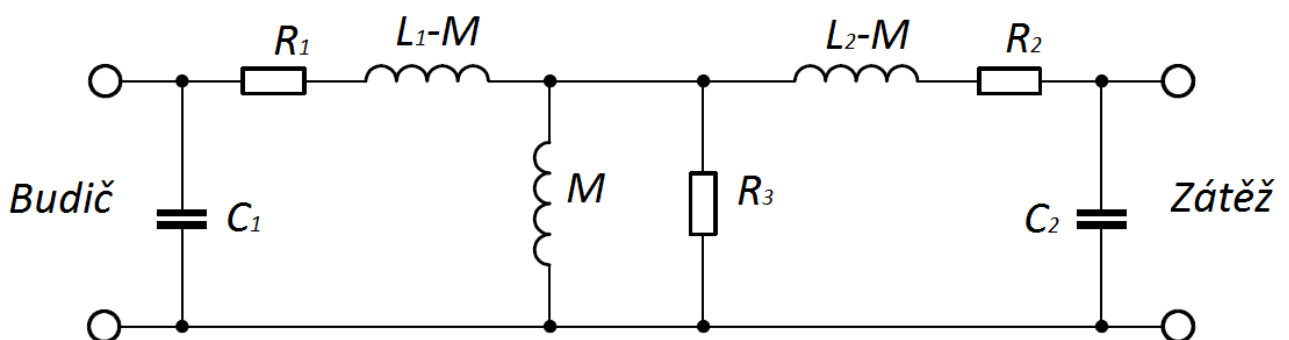
Pokud má primární cívka indukčnost  $L_1$  a sekundární cívka indukčnost  $L_2$ , potom definujeme vzájemnou indukčnost

$$M = \kappa \sqrt{L_1 L_2}. \quad (2.6)$$

Vzájemná indukčnost představuje pomyslnou část vinutí, které by mělo  $\kappa=1$ , zbytek vinutí představuje část, kde je  $\kappa=0$ , a nazýváme jej rozptylová indukčnost. Situaci dobře ilustruje náhradní schéma.

Vlastnosti soustavy cívek lze popsat náhradním schématem, viz obr. 2-2. Spřažený magnetický indukční tok obou cívek tvoří vzájemnou indukčnost  $M$ . Magnetický indukční tok od primárního vinutí, který se uzavírá mimo plochu sekundární cívky, tvoří rozptylovou indukčnost  $L_1-M$ . Proud indukovaný v sekundární cívce opět vytváří magnetický indukční tok, jeho část prochází zpátky primární cívkou. Tok od sekundární cívky, který se uzavírá okolím, vytváří druhou část rozptylové indukčnosti  $L_2-M$ .

Odpor  $R_1$  a  $R_2$  představují činné ztráty na primární a sekundární cívce. Jde především o činný odpor vodičů stanovený při pracovním kmitočtu (včetně vlivu povrchového jevu a vlivu blízkosti). Vzhledem k tomu, že jde prakticky o transformátor bez jádra, jsou ztráty v příčné větvi velmi malé, do odporu  $R_3$  by se však mohly promítnout vířivé proudy indukované do okolních předmětů, případně hysterezní nebo dielektrické ztráty. Kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  představují mezizávitové kapacity vinutí.

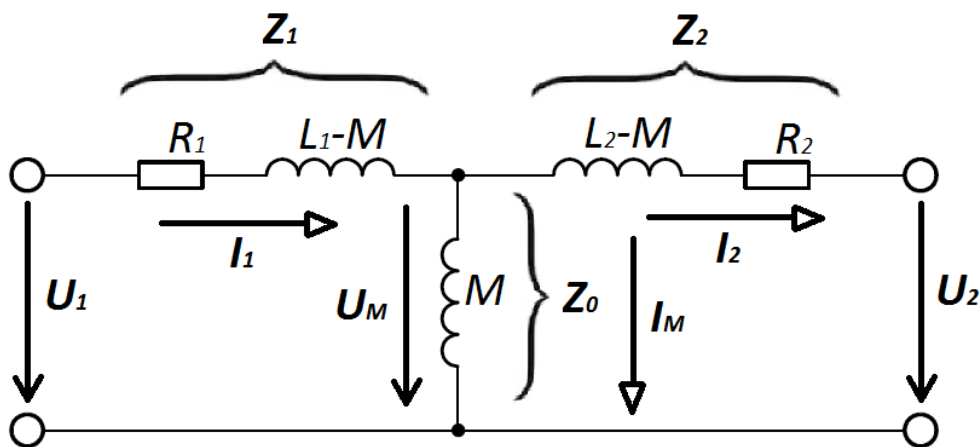


Obr. 2-2 :Náhradní schéma

## 2.1 Lineární režim

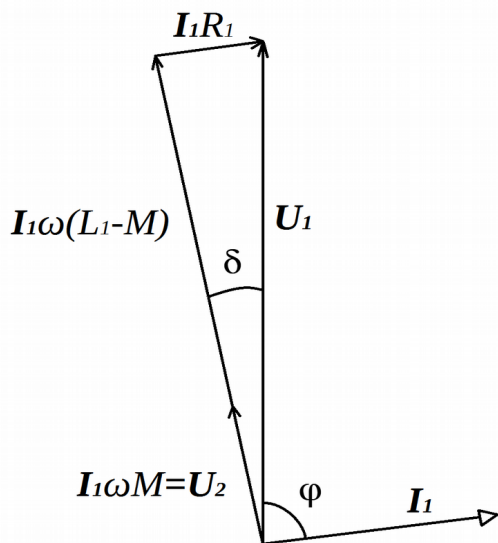
Nejjednodušším způsobem jak přenášet energii pomocí popsaného obvodu je prostá indukční vazba. Primární cívka je napájena ze zdroje střídavého napětí a na sekundární cívku je přímo zapojená činná zátěž. Soustava se potom chová jako běžný transformátor, jen s tím rozdílem, že rozptylová indukčnost je podstatně větší než indukčnost vzájemná, což je důsledek nízkého činitele vazby.

Za předpokladu, že zanedbáme parazitní kapacity a nepatrné ztráty v příčné větvi, můžeme uvažovat zjednodušené schéma, viz obr. 2-3. Zanedbání je možné, protože při frekvencích v řádu desítek kHz a pouhých několika desítek závitů je kapacitní reaktance oproti induktivní o několik řádů slabší.



Obr. 2-3 : Zjednodušené náhradní schéma

Nyní je možné vyjádřit jednoduché vztahy popisující chování soustavy v harmonickém ustáleném stavu. Situaci při chodu naprázdno znázorňuje fázorový diagram obr. 2-4.



Obr. 2-4 : Fázorový diagram bez zatížení

Napájecí napětí  $U_1$  se dělí mezi reálnou a imaginární část impedance na úbytek na odporu vinutí a napětí na vlastní indukčnosti  $L_1$ . Poměr těchto napětí je dán poměrem indukční reaktance ku činnému odporu, který nazýváme činitel jakosti cívky

$$Q = \frac{X_l}{R} = \frac{\omega L}{R}. \quad (2.7)$$

Vzhledem k tomu, že se používají cívky s vysokým činitelem jakosti a fázory napětí na indukčnosti a na odporu svírají pravý úhel, je vliv činného odporu na napětí na indukčnostech téměř zanedbatelný. Mnohem větší vliv na výstupní napětí mají rozptylové indukčnosti. Vlastní indukčnost  $L_1$  je rozdělena na dvě části - vzájemnou indukčnost  $M$  a rozptylovou indukčnost  $L_1-M$ . Tyto dvě části tvoří dělič napětí. Výstupní napětí  $U_2$  se odebírá na vzájemné indukčnosti, z toho je možné určit napětí naprázdno

$$U_{2_0} = \frac{M}{L_1} U_{L_1} = \kappa \frac{U_1}{\sqrt{1 + \frac{R_1^2}{(\omega L_1)^2}}}. \quad (2.8)$$

Ze zdroje napětí je odebírán proud  $I_1$ , který má velikost a fázový posun

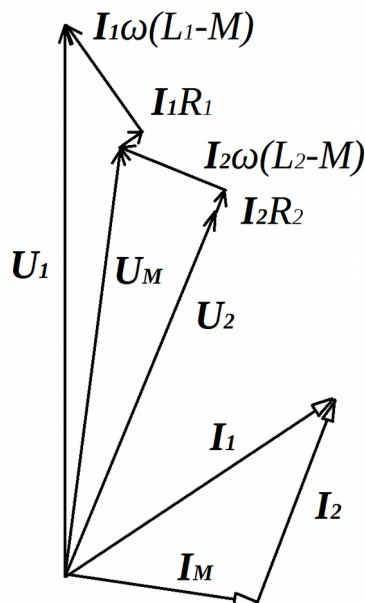
$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}}, \quad (2.9)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega L_1}{R_1}\right). \quad (2.10)$$

Výstupní napětí předbíhá napájecí o úhel

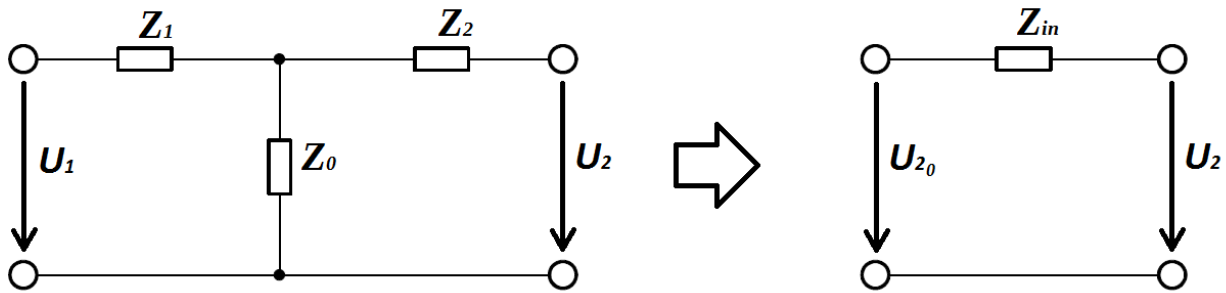
$$\delta = \operatorname{arccotg}\left(\frac{\omega L_1}{R_1}\right). \quad (2.11)$$

V zatíženém stavu se dále projevuje činný odpor zátěže, rozptylová indukčnost a odpor sekundární cívky. Fázorový diagram je uveden na obr. 2-5.



Obr. 2-5 : Fázorový diagram s činnou zátěží

Pro přenos energie jsou podstatné především parametry na svorkách primární a sekundární cívky, proto provedeme zjednodušení pomocí Théveninova teorému, viz obr. 2-6.



Obr. 2-6 : Zjednodušení obvodu

Hodnoty jednotlivých impedancí vypočteme z parametrů cívek jako

$$Z_1 = Z_2 = R_1 + j\omega L_1(1 - \kappa), \quad (2.12)$$

$$Z_0 = j\omega L\kappa. \quad (2.13)$$

V upraveném schématu potom uvažujeme vstupní napětí jako napětí naprázdno  $U_{2o}$  a výslednou vnitřní impedanci  $Z_{in}$  určíme jako paralelní spojení  $Z_1$  a  $Z_0$  v sérii se  $Z_2$

$$U_{2o} = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_1} U_1, \quad (2.14)$$

$$Z_{in} = \frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_1}} + Z_2. \quad (2.15)$$

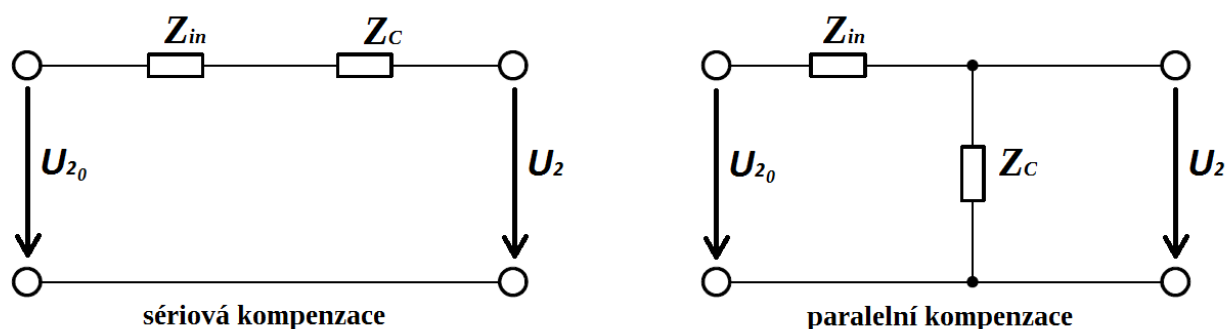
Po dosazení složek impedancí dostáváme (pro dvě stejné cívky)

$$U_{2o} = \kappa \frac{U_1}{\sqrt{1 + \frac{R_1^2}{(\omega L_1)^2}}}, \quad (2.16)$$

$$Z_{in} = 2R + j\left(\frac{-1}{\kappa\omega L_1} + 2(1 - \kappa)\omega L_1\right). \quad (2.17)$$

## 2.2 Rezonanční režim

Použitím rezonančního obvodu se snažíme odstranit hlavní problém prosté indukční vazby, kterým je velká vnitřní impedance. Ze vztahu 2.17, který byl odvozen pro náhradní schéma v harmonickém ustáleném stavu je problém dobře patrný. Reálná část impedance je tvořena pouze součtem odporů vinutí, imaginární část je ale mnohem větší. To je příčinou toho, že napětí  $U_2$  je velice měkké. Imaginární část impedance je však možné snadno kompenzovat pomocí opačné reaktance, a to buď v sériovém, nebo paralelním zapojení, viz obr. 2-7.

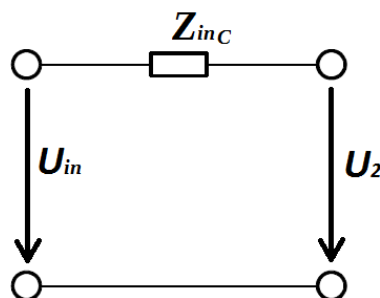


Obr. 2-7 : Kompenzace vnitřní impedance

Vnitřní impedance má vždy induktivní charakter, proto ji kompenzujeme kondenzátorem, jehož kapacitu volíme tak, aby se reaktance v absolutní hodnotě rovnala imaginární části vnitřní impedance zdroje. Odtud můžeme psát

$$C = \frac{1}{\frac{-1}{\kappa L_1} + 2(1 - \kappa)\omega^2 L_1}. \quad (2.18)$$

Zapojení je možné opět zjednodušit pomocí Théveninova teorému, viz obr 2-8.



Obr. 2-8 : Zjednodušení kompenzovaného obvodu

Nyní je v obvodu pouze jedna náhradní impedance. Podle toho jestli se jedná o sériový, nebo paralelní rezonanční obvod, jsou parametry výstupu zcela odlišné.

V sériovém zapojení se reaktance dokonale kompenzují a vnitřní impedance má pouze reálnou část, ke které přibýly navíc ztráty v kondenzátoru reprezentované  $R_c$ . Napětí naprázdno odpovídá napětí indukovanému prostou indukční vazbou

$$U_{in} = U_{2_0}, \quad (2.19)$$

$$Z_{in} = 2R + R_c. \quad (2.20)$$

V paralelním obvodu se indukčnost ideálně kompenzuje pouze při chodu naprázdno. Napětí na výstupu je v tomto stavu mnohonásobně větší nežli v předchozím případě. Se zatížením účinek

kondenzátoru slábně a ve stavu nakrátko teče stejný proud jako v lineárním režimu. Pro náhradní schéma počítáme parametry

$$U_{in} = \frac{U_{2_0}}{(2R + R_c)\omega C}, \quad (2.21)$$

$$Z_{inc} = \frac{(jR_c + \frac{1}{\omega C})(-j2R + \frac{1}{\omega C})}{2R + R_c}. \quad (2.22)$$

## 2.3 Zapojení obvodů

Kromě samotné soustavy cívek, jejíž vlastnosti byly popsány v předchozí kapitole, musí zařízení pro indukční přenos obsahovat další obvody výkonové elektroniky a obvody řídicí. Na primární straně je třeba zajistit napájení cívky střídavým proudem požadovaných parametrů. Na sekundární straně je nezbytná elektronika pro úpravu a stabilizaci napětí, aby bylo zařízení použitelné pro napájení spotřebičů, které vyžadují konstantní napětí. Pro zajištění správného nastavení je také potřeba, aby řídicí obvody obou stran mohly nějakým způsobem komunikovat. Komunikace může probíhat například pomocí modulace samotného magnetického pole přenášejícího energii, jak bylo popsáno u standardu Qi.

### 2.3.1 Zapojení budiče

Budič je obvod, který dodává do primární cívky napětí požadované frekvence, tvaru a amplitudy. V ideálním případě je požadován sinusový průběh napětí, vyšší harmonické sice nemají na samotný přenos velký vliv, protože neprojdou rozptylovou indukčností, mohou ale být problematické s ohledem na EMC. Druhou výhodou která plyne z harmonického napájení, je možnost kompenzace účinníku.

Vzhledem k tomu, že cívky jsou vzduchové- bez jádra, je indukčnost na svorkách primární cívky poměrně nízká, proto bude soustava odebírat značný jalový proud. Dodávat proud včetně jalové složky z polovodičového střídače by bylo neefektivní, proto je paralelně k indukčnosti primární cívky připojen kondenzátor. Tak je vytvořen rezonanční obvod, který při naladění na pracovní kmitočet odebírá pouze činný proud.

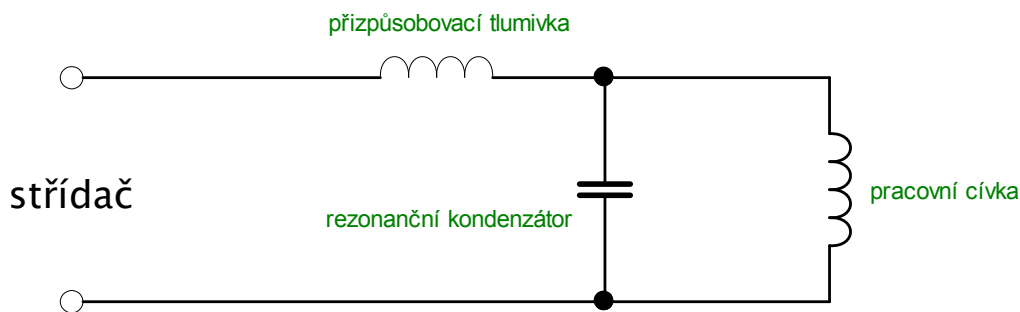
Další otázkou je, jak dodávat energii do rezonančního obvodu. Jedna možnost je napájení z harmonického oscilátoru. U takového zapojení však bývá problematické jeho řízení, proto se častěji využívají spínané měniče. Pokud má přenos probíhat na frekvencích v řádu desítek až stovek kHz, tak pro modulaci sinusové vlny by byla zapotřebí spínací frekvence řádově vyšší. Při takto velkých frekvencích se ale začínají silně projevovat spínací ztráty a další problémy související s parazitními vlastnostmi součástek.

Výhodnějším způsobem proto může být naspínat obdélníkové napětí na pracovní frekvenci a vhodným zapojením odfiltrovat vyšší harmonické. Existují dva základní způsoby buzení rezonančního obvodu - paralelní a sériové.

### Paralelní budič:

Paralelní buzení spočívá v přivedení napětí přímo na cívku a paralelně připojený kondenzátor. Ten v tomto případě způsobuje problémy, protože na spínacích hranách by tekla teoreticky nekonečný proud. Proto se musí mezi obdélníkový budič a rezonanční obvod zapojit přizpůsobovací tlumivka, viz. obr 2-9. Na té se potom bude objevovat napětí způsobené rozdílnými tvary signálu.

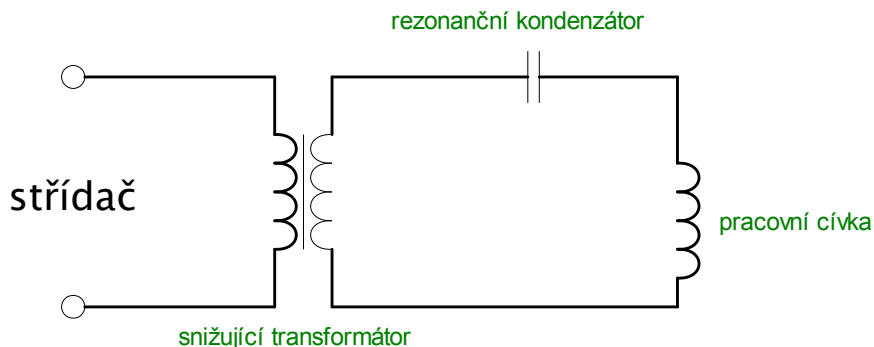
Toto zapojení je poměrně jednoduché, má však určité nepříjemné vlastnosti. Indukčnost přizpůsobovací tlumivky musí být volena tak, aby omezila strmé hrany a zároveň dokázala přenášet pracovní frekvenci. Je nutné zvolit kompromis mezi špičkami proudu a úbytkem na tlumivce. Průběh proudu je integrálem rozdílového napětí na tlumivce, tudíž na konci každé půlperrody proud neklesne k nule, protože je udržován indukčností. Tento proud musí střídač rozepnout, což je spojeno se ztrátami. Za zmínku také stojí, že přizpůsobovací tlumivka ovlivňuje rezonanční obvod. Přestože je její indukčnost podstatně větší, než indukčnost pracovní cívky, posouvá rezonanční frekvenci. Narozdíl od pracovní cívky je ke kondenzátoru připojena sériově, takže zvyšuje napětí v obvodu.



Obr. 2-9 : Paralelní budič

### Sériový budič:

Při sériovém buzení je do rezonančního obvodu dodáván pracovní proud o nízkém napětí. Napětí v obvodu se potom zvyšuje rezonancí. Vzhledem tomu že obvod rezonuje jen na jedné frekvenci, zesílí se pouze základní harmonická z dodávaného napětí. Výsledkem je harmonicky kmitající obvod, který odebírá harmonický proud, nehledě na tvar napájecího napětí. Tvar napájecího napětí se příliš neprojeví, protože napětí kmitajícího obvodu je řádově vyšší než napětí napájecí, které bývá zavedeno přes snižující transformátor, jak znázorňuje obr. 2-10. Výhodou zapojení je stabilní rezonanční frekvence a sinusový proud, který při spínání i rozepínání tranzistorů prochází nulou, díky čemuž jsou nízké spínací ztráty.



Obr. 2-10 : Sériový budič

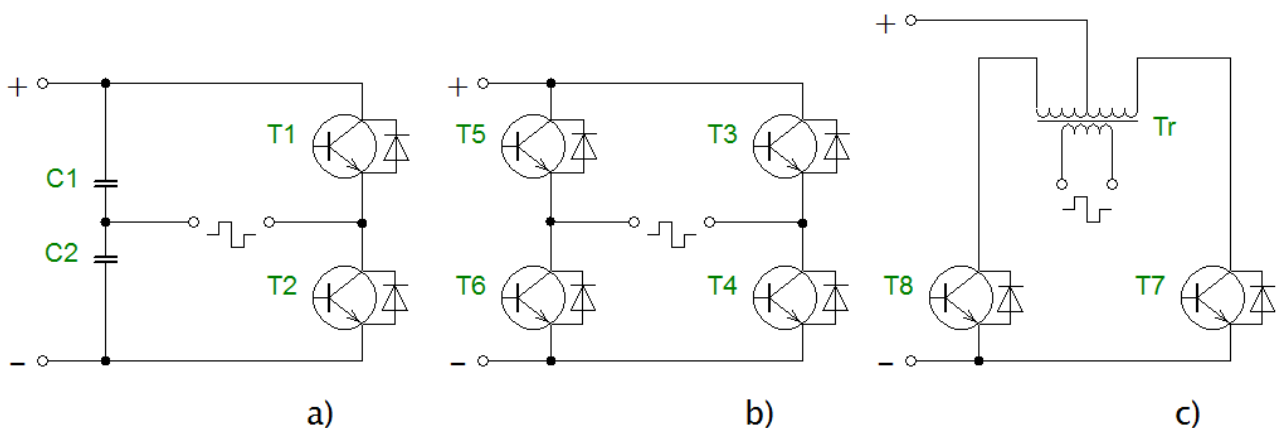


### 2.3.2 Zapojení střídače

Střídač dodává obdélníkové napětí o požadované frekvenci, napětí a střídě. Pomocí těchto veličin lze řídit rezonanční obvod. Střídač může být v nejjednodušším případě samokmitající, využívající zpětnou vazbu na rezonanční obvod. Výhodou takového zapojení je hlavně jednoduchost a automatické nastavení frekvence do rezonance. Nevýhodou může být horší stabilita, nemožnost řízení a absence nadproudových ochran.

Pro sofistikovanější zařízení pracující při velkých výkonech, je nezbytné použít elektronicky řízené střídače, které mají zpětnou vazbu na proud spínači a napětí v rezonančním obvodu. Dále je možné monitorovat fázový posun proudu vzhledem k napětí, a na základě toho udržovat obvod v rezonanci. Regulaci lze provádět změnou střídy (PWM), nebo rozlaďováním obvodu posunem frekvence směrem k indukčnímu charakteru zátěže (pro sériové buzení).

Výkonová část střídače může být zapojena více způsoby, základní zapojení dvojitých střídačů jsou na obr. 2-11.



Obr. 2-11 : Příklady zapojení střídače

#### a) Poloviční můstek

Jedna elektroda zátěže je připojena mezi dva tranzistory, které mohou být ve třech stavech - horní sepnutý, dolní sepnutý, oba rozepnuté. Druhá elektroda je zapojena na poloviční napětí, které se získá kapacitním děličem, nebo z půleného vinutí napájecího transformátoru. Výstupní napětí se potom může nacházet ve třech stavech -  $+U/2$ ,  $-U/2$  a nedefinovaný stav při rozepnutí obou tranzistorů. Pokud zátěž obsahuje reaktance, proud rozepnutím tranzistorů nezanikne, teče dál ochrannými diodami a napětí se potom překmitne na  $+U/2$ , nebo  $-U/2$  podle fázového posunu.

Výhodou zapojení je jednoduchost, snadné řízení a možnost uzemnit jednu elektrodu zátěže, nevýhodou je poloviční výstupní napětí a nemožnost sepnutí na nulové napětí v definovaný okamžik. Zapojení se využívá pro zařízení malého a středního výkonu v celé řadě měničů a spínaných zdrojů.

## b) Plný můstek

Můstkové zapojení je možné řídit dokonaleji. Existuje zde celkem pět provozních stavů - T5 a T4 sepnuté pro jednu polaritu, T3 a T6 sepnuté pro druhou polaritu. Nulového napětí může být dosaženo sepnutím obou horních, nebo obou spodních spínačů. Tyto varianty se výkonových měničích pravidelně střídají, aby bylo zatížení spínačů rovnoměrné. Pátým stavem je opět nedefinované napětí při všech tranzistorech rozepnutých. Tento stav se používá jako deadtime mezi provozními stavy, aby se zamezilo současnému sepnutí spodního i horního spínače vlivem zpoždění při odpínání proudu. Deadtime je potřeba ve všech zapojeních a jeho trvání bývá v řádu jednotek  $\mu\text{s}$ .

Výhodou můstkového střídače je dokonalejší řízení a plné výstupní napětí, nevýhodou je nutnost generování řídicího signálu pro dvě dvojice tranzistorů a střídavý potenciál na obou elektrodách zátěže. Zapojení je použitelné pro všechny hladiny výkonu.

## c) Střídač s transformátorem

Zde jsou oba tranzistory na společném potenciálu a pro převrácení polarity výstupu se používají dvě cívky s opačným smyslem vinutí na společném jádře. Tento střídač může být ve třech stavech stejně jako polomůstek, jen s tím rozdílem, že výstupní napětí může být jakékoliv, podle počtu závitů sekundární cívky.

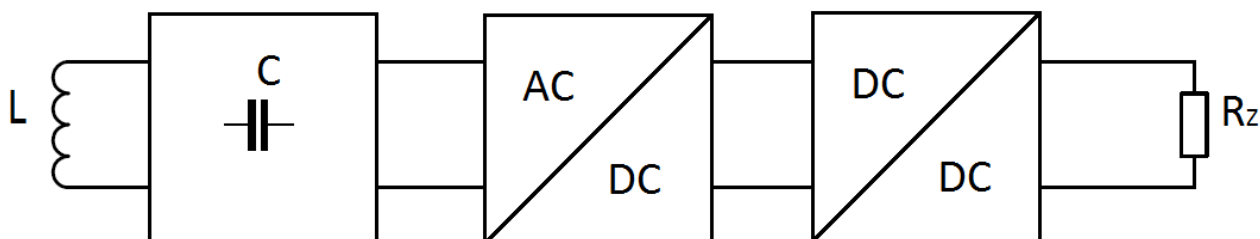
Hlavní výhodou zapojení je, že oba emitory leží na nulovém potenciálu a není proto potřeba plovoucí buzení jako u ostatních střídačů. Druhou velkou výhodou je galvanické oddělení výstupního napětí od napájení.

Problemetické je v tomto střídači napěťové dimenzování spínačů. Vlivem indukovaného napětí v závěrné půlperiodě každého z tranzistorů se na kolektoru objevuje dvojnásobek napájecího napětí. Závažnějším problémem jsou rozptylové indukčnosti mezi polovinami vinutí. Po rozepnutí tranzistoru energie uložená v rozptylovém poli indukuje zvýšené napětí na kolektoru, které se musí omezovat, aby nedošlo k destruktivnímu průrazu polovodiče. Při malých výkonech je možné omezovat napětí ztrátovým způsobem pomocí RC, nebo RDC článku. U zařízení větších výkonů by byla energie ohřívající odpor příliš velká, proto se používá bezztrátové zapojení. Přepětí je nejprve uloženo do kondenzátoru, následně toto napětí vybudí proud pomocnou tlumivkou a napětí indukované v tlumivce přepóluje kondenzátor. Následným přepnutím se potom energie z kondenzátoru vrací zpátky do zdroje.

Z důvodu popsanych nevýhod se toto zapojení používá méně, nebo spíše v nízkofrekvenčních aplikacích.

### 2.3.3 Zapojení přijímače

Elektronika na straně přijímače musí zajistit impedanční přizpůsobení, aby přenos probíhal co nejefektivněji a dále zajistit stabilizaci výstupního napětí. Přijímač je možné rozdělit do několika základních funkčních bloků, viz obr. 2-12.



Obr. 2-12 : Blokové schéma přijímače

K přijímací cívce jsou nejprve připojeny obvody impedančního přizpůsobení. Ty jsou realizovány pomocí rezonančních obvodů. Zapojení je sériové, paralelní, nebo kombinované podle parametrů napětí, které je požadováno. Následuje usměrňovač, jehož zapojení je potřeba přizpůsobit úrovni napětí. Při dostatečném napětí postačí usměrnění pomocí křemíkových diod. Pokud je napětí příliš nízké, potom se musí použít řízený usměrňovač využívající součástky s malým úbytkem napětí. Napětí získané z usměrňovače se mění ve velkém rozsahu v závislosti na zatížení, vzdálenosti cívek, naladění obvodu a řadě dalších vlivů. Proto následuje DC/DC měnič, který zajistí stabilní napětí pro spotřebič.

### 3 KONSTRUKCE CÍVEK

Při návrhu cívek byl kladen důraz především na dva důležité parametry. Zaprvé na dostatečné proudové dimenzování, protože zejména odpor primární cívky je hlavním faktorem omezujícím celkovou účinnost systému. Je potřeba zvolit vhodný průřez a rozložení vinutí s ohledem na nežádoucí skin efekt a vliv blízkosti, protože tyto jevy na frekvencích v řádu desítek až stovek kHz nelze zanedbat. Druhým parametrem, který je potřeba správně zvolit je geometrické uspořádání vinutí, tak aby se dosáhlo co nejvyššího činitele vazby při co nejvyšší vlastní indukčnosti.

V následujících měřeních budou porovnány vlastnosti dvou typů vinutí - plošné a kruhové cívky. Provedení cívek ilustruje obr. 3-1.



Obr. 3-1: Provedení cívek



Obr. 3-2 : Přípravek pro nastavení vzdálenosti cívek

### Plošné cívky:

Vinutí je tvořeno měděným lakovaným drátem vinutým do spirály závit vedle závitů. Je připevněno na pertinaxovou destičku, tak aby nebylo magnetické pole ovlivněno feromagnetickými materiály. Obě cívky jsou umístěny v přípravku, viz obr. 3-2, který umožňuje měnit vzdálenost při zachování soustřednosti cívky. Změřené parametry jsou uvedeny v tabulce 3-1.

průměr vnější	d1 [mm]	118
průměr vnitřní	d2 [mm]	27
průřez drátu	S [mm <sup>2</sup> ]	0.5
počet závitů	n [-]	56
délka drátu	l [m]	11.5
indukčnost	L [mH]	180
odpor ss.	R [Ω]	0,46
odpor (50 kHz)	R [Ω]	1,02
parazitní kapacita	C [pF]	1,4
vlastní rezonance	f [MHz]	10

Tab. 3-1 : Parametry cívek - Plošné

### Kruhové cívky:

Na výrobu kruhových cívek byl použit stejný průřez i délku drátu, tak aby bylo možné porovnat které uspořádání dosahuje lepších parametrů při stejné spotřebě materiálu. Vinutí je koncentrované do svazku kruhového průřezu s vnějším poloměrem odpovídajícím plošné cívce. Změřené parametry jsou uvedeny v tabulce 3-2.

průměr cívky (vnější)	d1 [mm]	118
průměr svazku	d2 [mm]	5
průřez drátu	S [mm <sup>2</sup> ]	0.5
počet závitů	n [-]	33
délka drátu	l [m]	11.5
indukčnost	L [mH]	260
odpor ss.	R [Ω]	0,46
odpor (50 kHz)	R [Ω]	1,026
parazitní kapacita	C [pF]	1,7
vlastní rezonance	f [MHz]	7,5

Tab. 3-2 : Parametry cívek - Kruhové

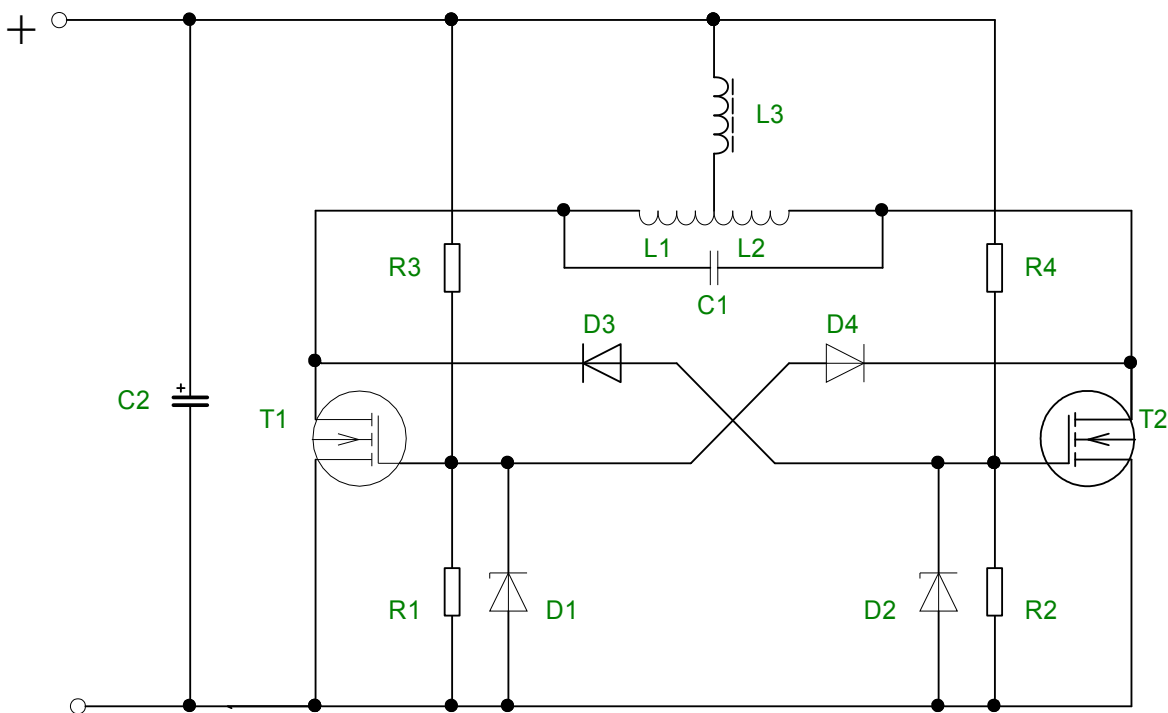
## 4 SAMOKMITAJÍCÍ HARMONICKÝ BUDIČ

Samokmitající obvod je typ zapojení, které neobsahuje žádné obvody řízení. K oscilacím dochází vlivem kladné zpětné vazby, která je vyvedena přímo z výkonové části obvodu. Samokmitající obvody jsou využívány v celé řadě elektrických zařízení, jako jsou například spínané měniče, nebo elektronické předřadníky. Hlavní výhodou proč se používají, je jejich jednoduchost, minimální počet součástek a s tím související spolehlivost. Nevýhodou je obtížnější řešení nadproudových a zkratových ochran a stabilizace požadovaných parametrů.

### 4.1 Návrh zapojení budiče

Pro první experiment s bezdrátovým přenosem byl použit obvod známý pod názvem ZVS driver (zero voltage switching driver). Jedná se o střídač s transformátorem, který je vzduchový a plní roli přímo vysílací cívky (cívka má půlené vinutí). Řídící napětí do tranzistorů je odebíráno přímo z rezonančního obvodu. Korekci tvaru vlny provádí přibúsobovací tlumivka, která musí být vzhledem k typu střídače zapojena na stejnosměrné straně. Zde je potřeba použít takovou tlumivku, která se nepřesytí stejnosměrnou složkou proudu. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 4-1 a parametry použitých součástek jsou shrnuty v tabulce 4-1.

Výhodou tohoto zapojení je především jeho jednoduchost, nepotřebuje žádné řídicí signály, frekvence se automaticky nastavuje do rezonance. Z toho vyplývá, že ke spínání a rozepínání tranzistorů dochází v nule proudu. Nevýhodou je měkké řídicí napětí do tranzistorů, především zapínání trvá poměrně dlouho. Dále absence nadproudových ochran - obvod se nesmí přetížít, jinak rezonanční energie nepostačí k překlopení obvodu a sepnou se oba tranzistory zároveň, což povede k destrukci.



Obr. 4-1 : ZVS driver

R1,R2	10k, 0.5W
R3,R4	560R, 3W
D1,D2	Zenerovy diody 15V, 5W
D3,D4	HER108 - 1000V, 1A, 75ns
T1,T2	IRFP250N - 200V, 30A, 75mΩ
L1	54μH, Q(50kHz)=37, R(50kHz)=0,46Ω
L2	52μH, Q(50kHz)=36.5, R(50kHz)=0,45Ω
L3	200μH, 50mΩ, toridní jádro železoprachové
C1	Kondenzátorová baterie 1-142 nF
C2	1000μF, 50V

Tab. 4-1 : Parametry součástek - ZVS

### Popis činnosti obvodu:

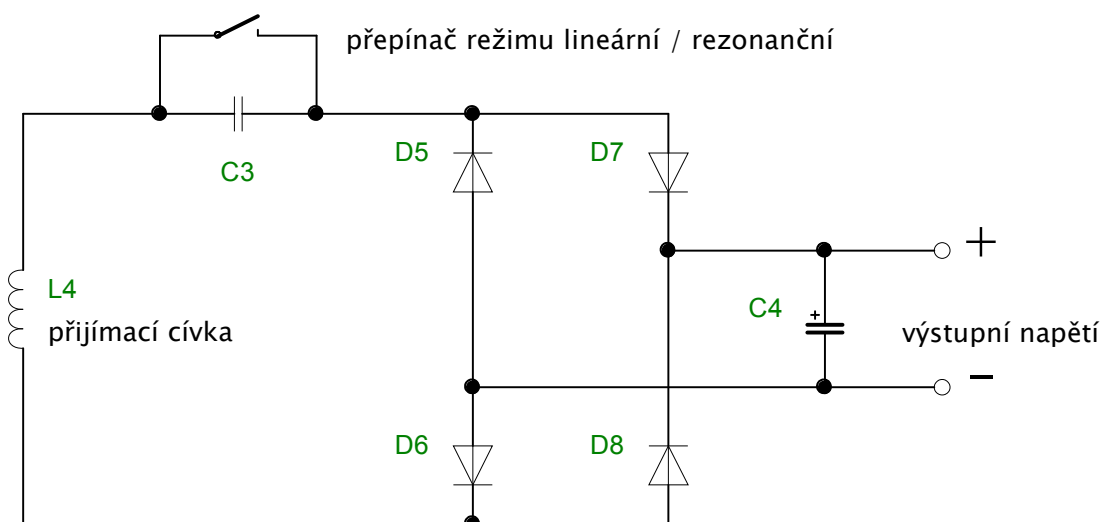
Při zapnutí napájení se začínají přes rezistory R3 a R4 nabíjet hradla tranzistorů T1 a T2. V momentě, kdy se začne jeden z tranzistorů otevírat (např. T1), napětí na něm se začne snižovat a přes diodu D3 se hradlo druhého tranzistoru T2 vybije. Tranzistor T1 je již zcela sepnutý a proud cívkami L1 a L3 narůstá, vlivem indukční vazby mezi L1 a L2 se na tranzistoru T2 objevuje zvýšené napětí a dioda D4 je polarizována závěrně. Rezonanční kondenzátor C1 se nabíjí na dvojnásobek napájecího napětí a v momentě kdy je již nabitý, proud tlumivkou L3 poklesne a energie z kondenzátoru se začíná přelévát zpátky do cívek L1 a L2. Když se kondenzátor vybije, je jeho energie uložena v magnetickém poli cívek, indukované napětí v cívkách pozvolna nabíjí kondenzátor opačným napětím, až napětí na T2 poklesne natolik, že se otevře dioda D4 a tranzistor T1 se vypne. Hradlo tranzistoru T2 se nyní může nabíjet, protože dioda D3 je zvýšeným napětím na T1 polarizována závěrně. Takto se cyklus opakuje. Zenerovy diody D1 a D2 omezují napětí na hradlech tranzistorů v případě, že je obvod napájen napětím vyšším, nežli je dovolené napětí hradla.

## 4.2 Návrh zapojení přijímače

Aby bylo zapojení co nejjednodušší, pro sekundární stranu byl zvolen Graetzův můstek s vyhlazovacím kondenzátorem. Pro měření v rezonančním režimu je zařazen do série k přijímací cívce kondenzátor, viz obr. 4-2. Parametry použitých součástek jsou shrnuty v tabulce 4-2. Po usměrnění je možné snadno měřit činný výkon, vzhledem k nízkým napětím však nelze zanedbat úbytek na usměrňovači. Pro získání informací vypovídajících o samotném přenosu je proto potřeba v některých měřeních uvažovat diferenciální odpor diod jako součást zátěže.

Diferenciální odpor dvou diod v sérii, které vždy stojí v cestě proudu, je

$$R_{D_{dif}} = \frac{1,5}{I} + 0,6. \quad (4.1)$$



Obr. 4-2 : Zapojení přijímače - ZVS

L4	180.5 $\mu$ H, Q(50kHz)=55.7, R(50kHz)=0,45 $\Omega$
C3	64.7nF, 400V
D5-D8	HER108 - 1000V, 1A, 75ns
C4	47 $\mu$ F, 250V

Tab. 4-2 : Parametry součástek - Přijímač - ZVS

### 4.3 Popis měření

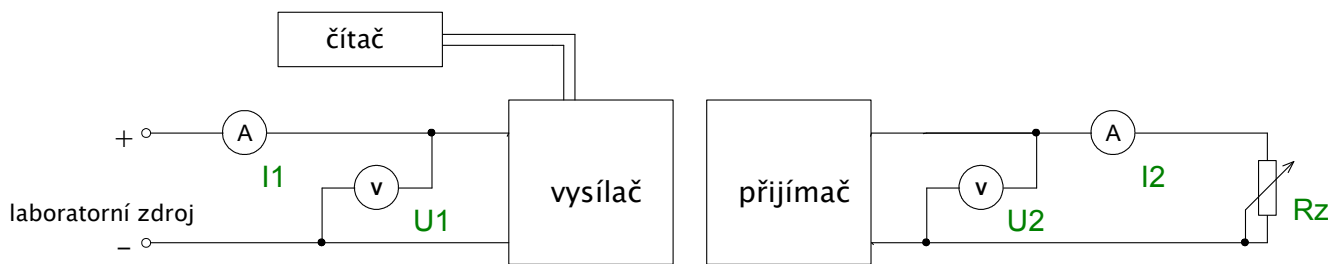
Cílem měření bylo zjistit základní charakteristiky výstupu přijímače v lineárním režimu, a od toho se odvíjející limity dosažitelného výkonu a účinnosti. Druhým úkolem bylo pozorování, jak se tyto charakteristiky mění v závislosti na vzdálenosti cívek. Třetí měření si potom kladlo za cíl porovnat charakteristiky v lineárním a rezonančním režimu.

#### Podmínky měření:

Soustava je zapojena podle schématu na obr. 4-3. Budič je napájen z laboratorního zdroje 32V. Frekvence na vysílači se nastavuje na 50 kHz změnou kapacity kondenzátoru C1 pomocí kondenzátorové baterie, po změně parametrů soustavy je vždy doladěna. Reálná frekvence je měřena pomocí čítače na smyčce vodiče okolo primární cívky. Výstup z usměrňovače je zatěžován reostatem. Současně jsou měřeny proudy a napětí napájení i výstupu. Vzdálenost cívek je dána posunem v držáku a velikost vzduchové mezery je měřena posuvným měřítkem. Fotografie soustavy se samokmitajícím budičem je uvedena v příloze, obr. 0-1.

Vzhledem k tomu, že uvedené zapojení přijímače s Graetzovým můstkem by bylo pro praktickou aplikaci neefektivní, je usměrňovač ve všech měřeních považován za součást zátěže. To znamená, že k naměřeným napětím je přičten úbytek na diferenciálním odporu usměrňovače, viz vzorec 4-1. Odpor zátěže, je taktéž součtem odporu reostatu a diferenciálního odporu usměrňovače.





Obr. 4-3 : Schéma měření - ZVS

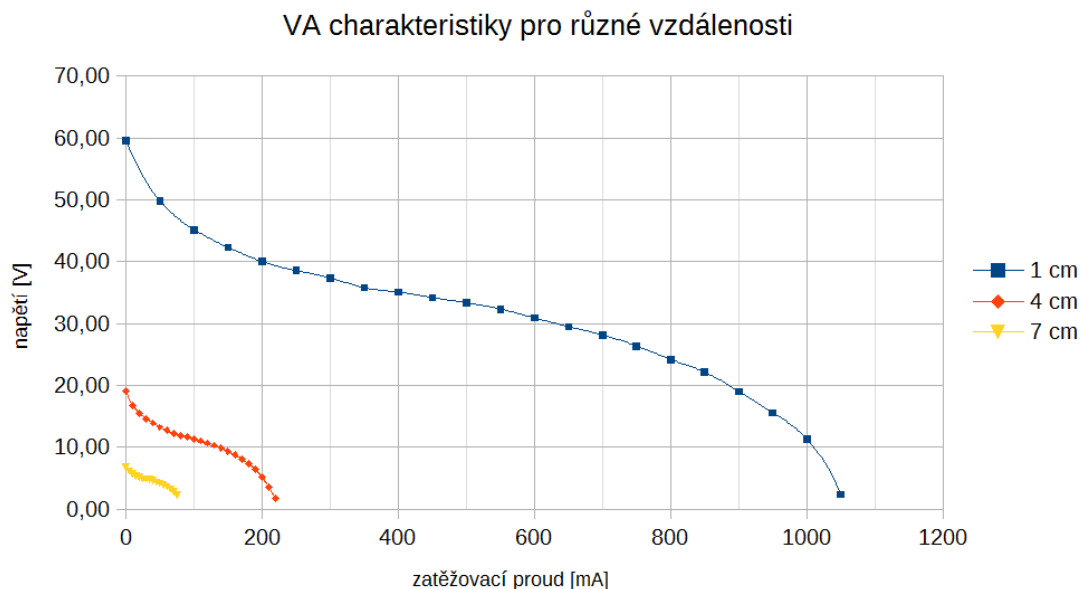
## 4.4 Měření charakteristik

### 4.4.1 Měření při konstantní vzdálenosti

#### Popis měření:

Při postupném zatěžování byl měřen proud a napětí sekundárního obvodu. Z naměřených hodnot (po přičtení úbytku usměrňovače) byla vynesena VA charakteristika, jakožto základní popis vlastností zdroje. Měření bylo provedeno při třech různých vzdálenostech- 1, 4, 7 cm, viz obr. 4-4.

#### Výsledky měření:



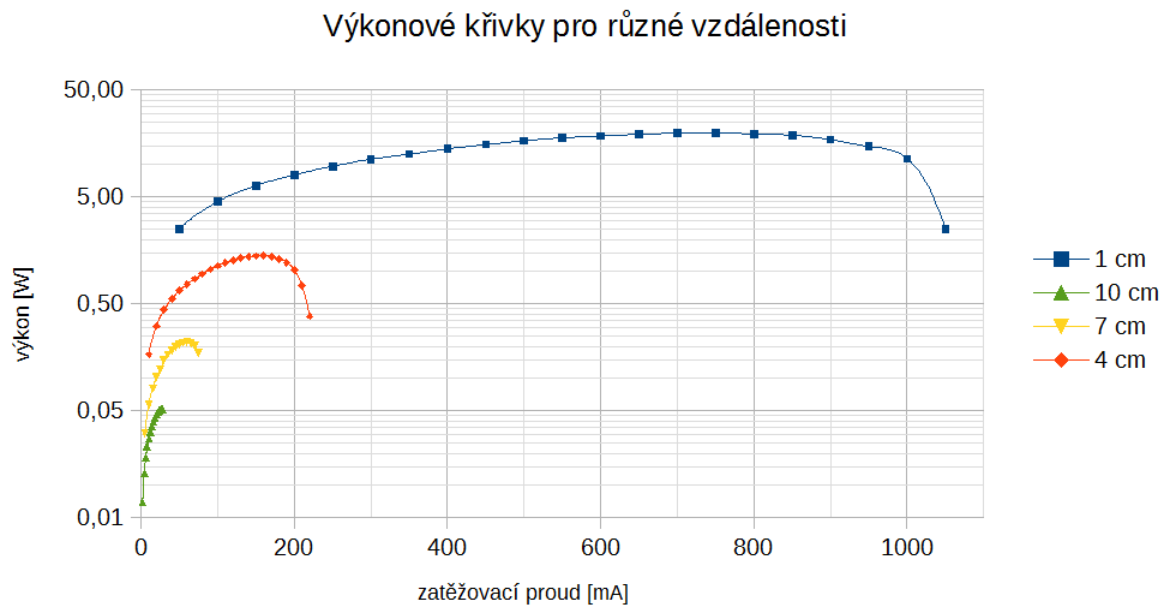
Obr. 4-4 : VA charakteristika pro různé vzdálenosti - ZVS

Voltampérová charakteristika výstupu je oproti očekávání silně nelineární, je to pravděpodobně způsobeno vlivem usměrňovače. Při malém zatížení je na filtračním kondenzátoru napětí rovno amplitudě sinusového průběhu a proud je odebírán impulsně s malým účínkem. To způsobuje větší úbytek jak na činných odporech, tak na rozptylových indukčnostech, které jsou protékány proudy s

vyššími harmonickými a mají tudíž větší reaktanci. V důsledku toho je VA charakteristika na počátku strmější.

Důležité je pozorování, že tvar charakteristiky je stejný pro všechny vzdálenosti. Dále bylo zjištěno, že střední část VA charakteristiky je víceméně lineární. Z předpokladu, že maximálního výkonu lze dosáhnout zatížením zdroje odporem rovným jeho vnitřní impedanci, je tedy možné přibližně určit maximální výkon z napětí naprázdno a proudu nakrátko.

Pro přesnější určení dosažitelného výkonu byly z naměřených napětí a proudů vyneseny křivky výkonu v závislosti na zatěžovacím proudu, viz obr. 4-5.



Obr. 4-5 : Výkonové křivky pro různé vzdálenosti - ZVS

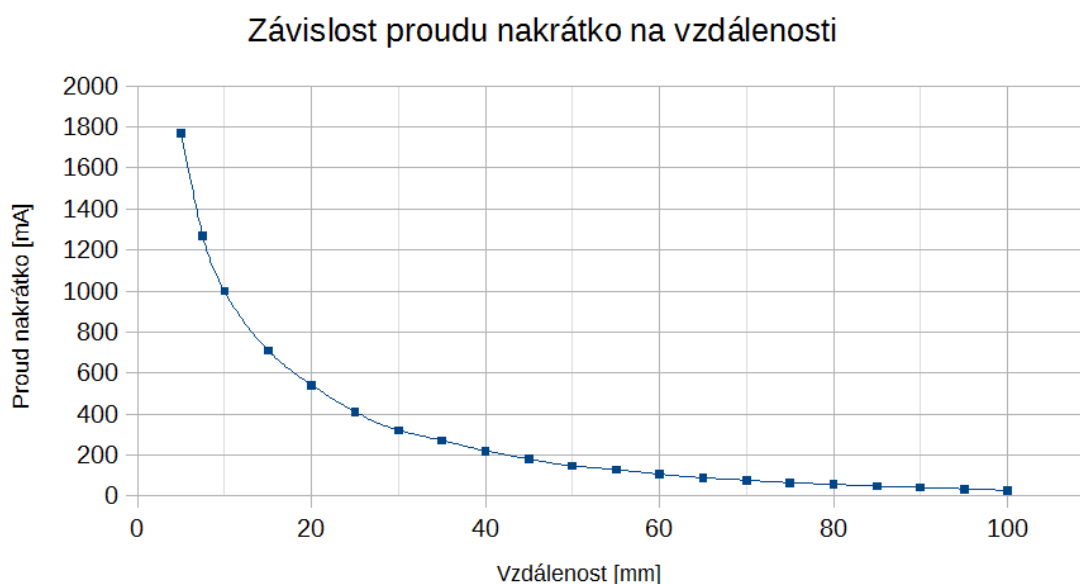
Na průběhu výkonů při zvyšování proudu je vidět, že nejsou symetrické jak by se dalo předpokládat u zdroje s lineární VA charakteristikou. Výkon dosahuje maxima přibližně při zatížení 70% proudu nakrátko.

#### 4.4.2 Měření charakteristik v závislosti na vzdálenosti

##### Popis měření:

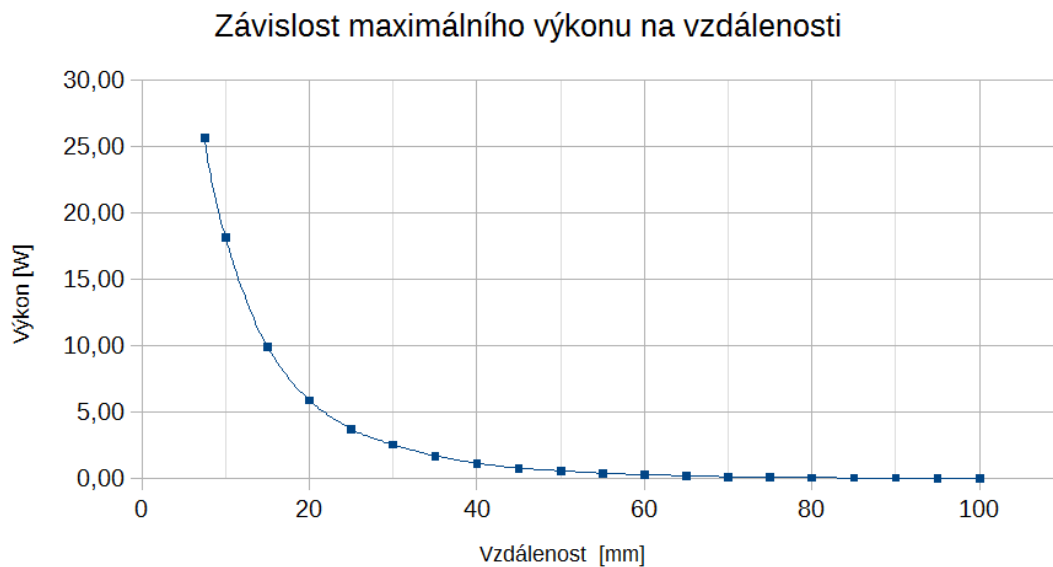
Na základě charakteristik zjištěných měření 4.4.1 byla pro každou vzdálenost cívek přibližně určena hodnota zátěžného proudu. Pro určení bylo nejprve třeba změřit závislost proudu nakrátko na vzdálenosti cívek. Následovalo měření, kdy byl přijímač zatížen proudem určeným pro jednotlivé vzdálenosti a byl vypočítán výkon a účinnost.

##### Výsledky měření:

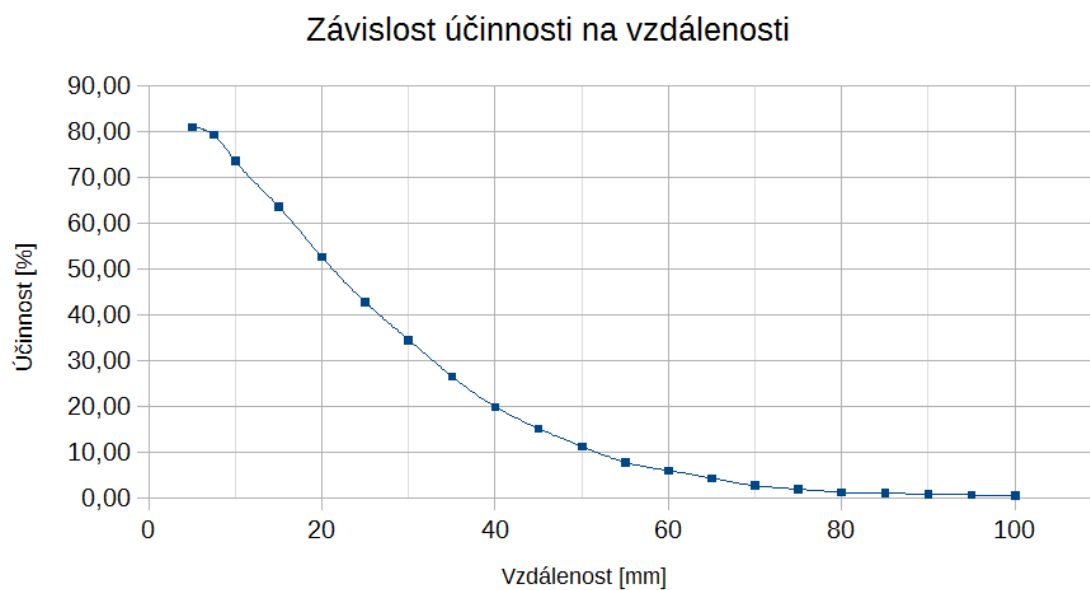


Obr. 4-6 : Závislost proudu nakrátko na vzdálenosti - ZVS

Graf 4-6 ukazuje naměřený průběh proudu nakrátko, pomocí kterého byly určeny hodnoty zátěžného proudu, jako 70% proudu nakrátko. Po zatížení předepsanými proudy bylo pro jednotlivé vzdálenosti měřeno napětí na výstupu, k tomuto napětí byl přičten úbytek usměrňovače a určen sekundární výkon. Průběh výkonů v závislosti na vzdálenosti je vyneseno do grafu 4-7. Při měření byl současně odečítán napájecí proud a příkon budiče, odtud byla určena účinnost. Průběh účinnosti při maximálním výkonu v závislosti na vzdálenosti zachycuje graf 4-8.



Obr. 4-7 : Závislost maximálního výkonu na vzdálenosti - ZVS



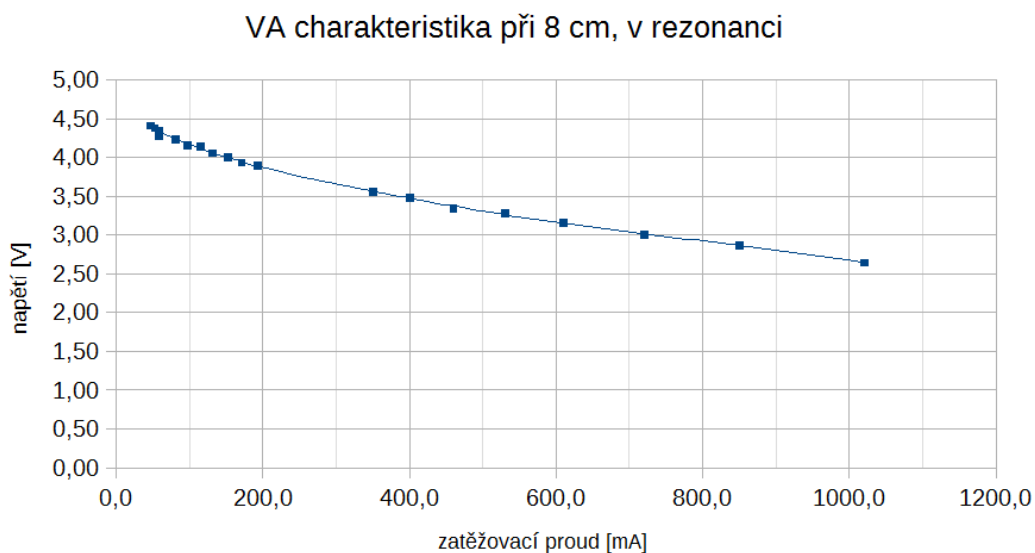
Obr. 4-8 : Závislost účinnosti na vzdálenosti - ZVS

### 4.4.3 Měření v rezonanci při konstantní vzdálenosti

#### Popis měření:

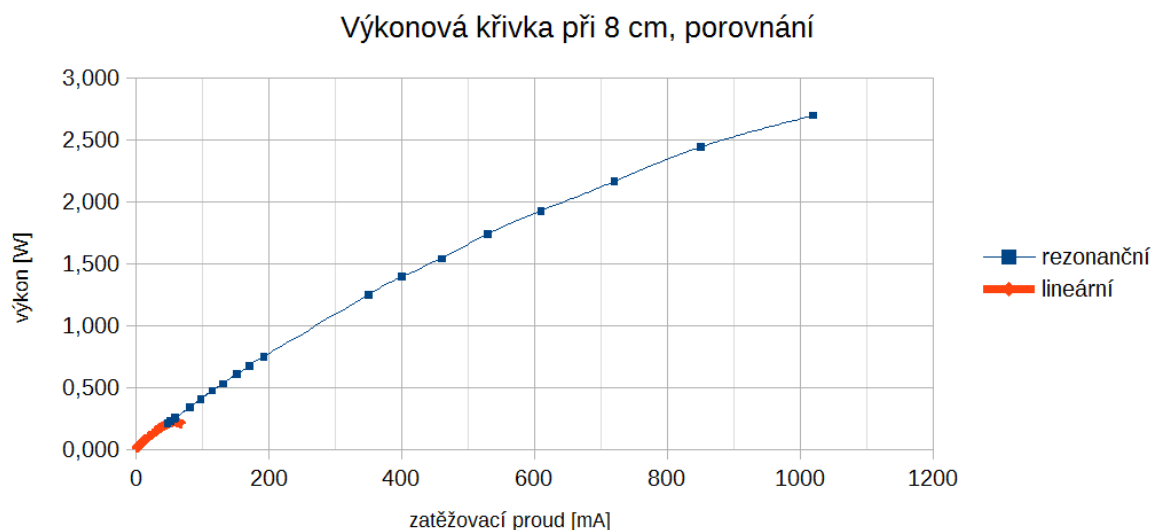
V sekundárním obvodu byl zařazen kondenzátor a bylo provedeno měření VA charakteristiky obdobně jako v měření 4.4.1. Pro každý měřený bod byla frekvence doladěna změnou kapacity kondenzátorové baterie C1 do maxima proudu. Z naměřených hodnot proudů a napětí (s kompenzací úbytku usměrňovače) byl vynesena průběh výkonu a účinnosti.

#### Výsledky měření:



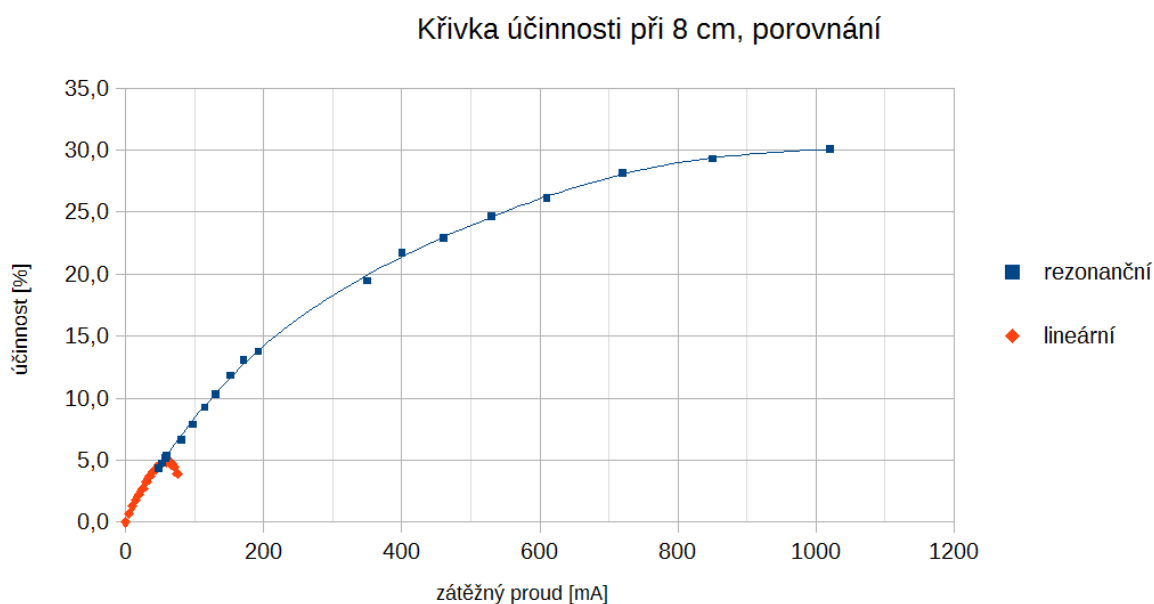
Obr. 4-9 : VA charakteristika při 8 cm, v rezonanci - ZVS

Zařazením kondenzátoru do obvodu a naladěním do rezonance se VA charakteristika napřímí, viz graf 4-9. Usměrňovač zde již nemá takový vliv, protože proud v LC obvodu je harmonický, a přestože napětí na diodách je obdélníkové, tak jimi teče téměř harmonický proud.



Obr. 4-10 : Výkonová křivka při 8 cm, porovnání - ZVS

Výkon je případě rezonančního obvodu podstatně větší, než v lineárním zapojení. V grafu 4-10 je uvedeno porovnání průběhů výkonů v závislosti na zatěžovacím proudu. Z grafu je patrné, že v rezonančním režimu nebylo možné dosáhnout extrému výkonu, protože odpor, do něhož je zahrnutý diferenciální odpor diod už nebylo možné zmenšit (poslední bod je pro výstup nakrátko).



Obr. 4-11 : Křivka účinnosti při 8 cm, porovnání - ZVS

Výrazné zlepšení je možné pozorovat i na průběhu účinnosti, viz graf. 4-11. V tomto případě je nárůst účinnosti způsoben především vyšším výstupním výkonem vzhledem k odběru naprázdno.

## 4.5 Vyhodnocení měření

V prvním měření bylo zjištěno, že voltampérová charakteristika při práci s usměřňovačem je silně nelineární. Výpočtem lze sice eliminovat vliv úbytku na usměřňovači, ale problémem zůstává neharmonický odběr proudu. Bez rezonančního obvodu usměřňovač s vyhlazovacím kondenzátorem odebírá proud v krátkých impulsech. Při malém zatížení jsou impulsy proudu krátké s velkým obsahem vyšších harmonických, což má za následek velkou vnitřní impedanci. S vyšší zátěží je napětí na kondenzátoru menší a proud teče po delší dobu, díky tomu vnitřní impedance klesá. Důsledkem nelinearity VA charakteristiky je nesymetrická výkonová křivka. Experimentálně bylo zjištěno, že tvar křivky je stejný pro všechny vzdálenosti a nejvyššího výkonu lze dosáhnout při zatížení cca 70% proudu nakrátko.

V druhé části měření bylo zjištěno, že maximální výkon, který je možné soustavou přenést, je při těsné vazbě poměrně vysoký (40W). Se zvětšováním vzduchové mezery ale klesá velice rychle. Pro reálné použití této soustavy v lineárním režimu je možné uvažovat pouze malý rozsah vzdáleností (při 2 cm, je maximální výkon již pouhých 5W).

Při měření v rezonanci se potvrdil předpoklad, že rezonanční obvod má schopnost vykompenzovat reaktivní části vnitřní impedance. Důsledkem toho je tvrdá VA charakteristika. Vnitřní impedance je stabilní kolem  $2 \Omega$ , což je při vzdálenosti 8 cm hodnota asi 40 krát menší než v případě lineárního režimu. Druhou výhodou, která byla pozorována u rezonančního obvodu, je harmonický odběr proudu. V důsledku toho jsou menší úbytky na činných i reaktivních složkách vnitřní impedance.

Na základě tvrdší VA charakteristiky je možné v rezonančním zapojení dosáhnout mnohonásobně vyššího výkonu i účinnosti.

V průběhu měření byly pozorovány také určité nedostatky samokmitajícího budiče. Především v rezonančním režimu je velice důležité, aby byla pracovní frekvence stabilní, což samokmitající budič nezajistí. Frekvence se mění se zatížením a musí se ručně dorovnávat připojováním kondenzátorů. Pokud je zátěž příliš velká, tak se obvod začíná "bránit" rezonanční frekvenci sekundárního obvodu a kmitá o cca 4kHz pod, nebo nad touto frekvencí. Potom nelze dosáhnout optimálních podmínek přenosu, což je důvod proč nebyly měřeny charakteristiky pro vzdálenosti menší než 8cm.

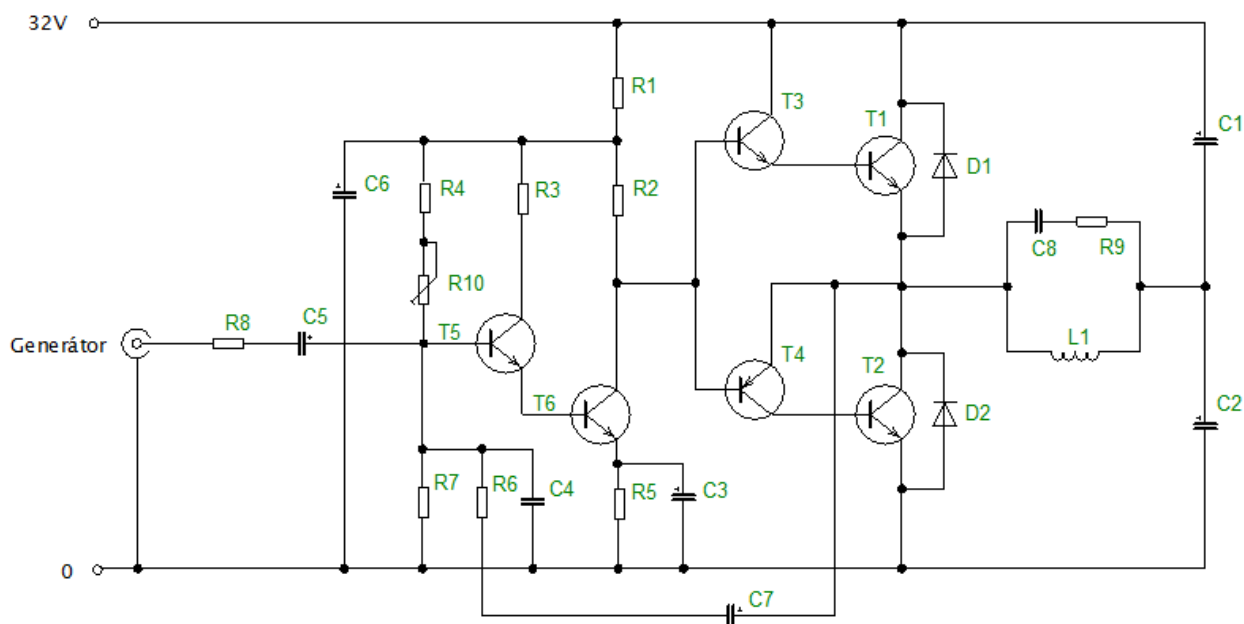
## 5 ŘÍZENÝ BUDIČ

Na základě nedostatků zjištěných v zapojení ZVS a sekundárního usměrňovače bylo navrženo zapojení, které umožní přesněji proměřit charakteristiky rezonančního přenosu.

Pro toto měření bylo důležité zajistit napájení primární cívky z budiče o přesně definovaném napětí, frekvenci a tvaru. Za tímto účelem byl použit výkonový stupeň zesilovače napájený z frekvenčního generátoru.

Dále pro odstranění nelinearity, kterou do obvodu vnáší usměrňovač byl za účelem přesnějšího změření charakteristik napájen zátěžný odpor přímo střídavým proudem.

### 5.1 Návrh zapojení



Obr. 5-1 : Schéma zapojení zesilovače - řízený budič

R1	33R, 1W
R2	560R, 0.5W
R3, R7, R8	1k2, 0.5W
R4	47k, 0.5W
R5	110R, 0.5W
R6	10k, 0.5W
R9	0R47, 3W
R10	trimr 50k
C1, C2	elektrolyt 500 $\mu$ F, 35V
C3	elektrolyt 220 $\mu$ F, 25V
C4	keramika 100pF
C5	elektrolyt 1 $\mu$ F, 50V
C6	elektrolyt 470 $\mu$ F, 35V
C7	elektrolyt 100 $\mu$ F, 25V
D1, D2	UG4D, 3A, 200V, ultrafast
T1, T2	KU607, 210V, 10A, 70W, 26MHz
T3, T6	BD139, 80V, 1.5A, 8W, 100MHz
T4	BD140, 80V, 1.5A, 12.5W, 100MHz
T5	2N6517, 350V, 0.5A, 0.6W, 200MHz

Tab. 5-1 : Parametry součástek - řízený budič



## Popis zapojení:

Zapojení bylo navrženo jako zesilovač třídy B v kvazikomplementárním zapojení, viz obr. 5-1. Parametry použitých součástek jsou sepsány v tabulce 5-1. Pro jednoduchost byla zvolena varianta s polovičním můstkem, kde se střední hodnota napájecího napětí získává pomocí kapacitního děliče z kondenzátorů C1 a C2. Výkonový stupeň je buzen z předzesilovače tvořeného tranzistorem T5 a T6. Napájení předzesilovače je zavedeno přes rezistor R1, aby se zabránilo nežádoucí kladné zpětné vazbě. Rezistory R2, R5, R4 a R7 nastavují pracovní bod, který lze doladit trimrem R10. Kondenzátor C3 zvyšuje zesílení střídavé složky, zatímco stejnosměrné napětí potřebné pro stabilní pracovní bod zůstává konstantní. Signál je přiveden na bázi tranzistoru T5 přes oddělovací kondenzátor C5 a rezistor R8. Kondenzátor C4 brání rozkmitání bez připojeného generátoru. Na bázi tranzistoru T5 je také přivedena záporná zpětná vazba přes oddělovací kondenzátor C7 a rezistor R6, který spolu s R7 určuje zesílení.

Přes diody D1 a D2 je uzavírají jalové proudy. L1 je označena vysílací cívka, parametry viz konstrukce cívek. Paralelně k cívce je připojen kondenzátor C8 spolu se sériovým rezistorem R9. Kondenzátor C8 kompenzuje induktivní charakter vysílací cívky a je vhodné ho připojit pokud je potřeba snížit zahřívání výkonových tranzistorů. Vzhledem k tomu, že výstupní napětí je díky zpětné vazbě velice tvrdé, tak nic jiného neovlivní. Jeho hodnota pro plošné cívky a 50KHz je cca 150nF. Rezistor R9 odděluje výstup zesilovače od tvrdého napětí na C8 a zrychluje tak odezvu zpětné vazby.

## 5.2 Popis měření

Cílem měření bylo přesně určit charakteristiky soustavy cívek se sériovým rezonančním obvodem na sekundární straně. Důraz byl kladen na popis vlastností soustavy samotné, tak aby nebyly ovlivněny konstrukcí budiče ani obvodů sekundární strany. Z toho důvodu nebyly měřeny charakteristiky včetně vlivu budiče, protože ten pouze zajišťuje napájení primární cívky napětím známých parametrů.

V prvním měření bylo cílem porovnat vlastnosti dvou různých konstrukcí vinutí pomocí měření napětí naprázdno a činitele vazby.

V druhém měření byl pozorován vliv vzdálenosti cívek na rezonanční frekvenci sekundárního obvodu.

Třetí měření si kladlo za cíl zjistit, jak se projevuje volba pracovní frekvence na charakteristikách měřených na výstupních svorkách. Měření bylo provedeno při přesně naladěné rezonanční frekvenci. Byl měřen proud nakrátko, z něhož je, spolu se znalostí napětí naprázdno, možné určit parametry náhradního schématu.

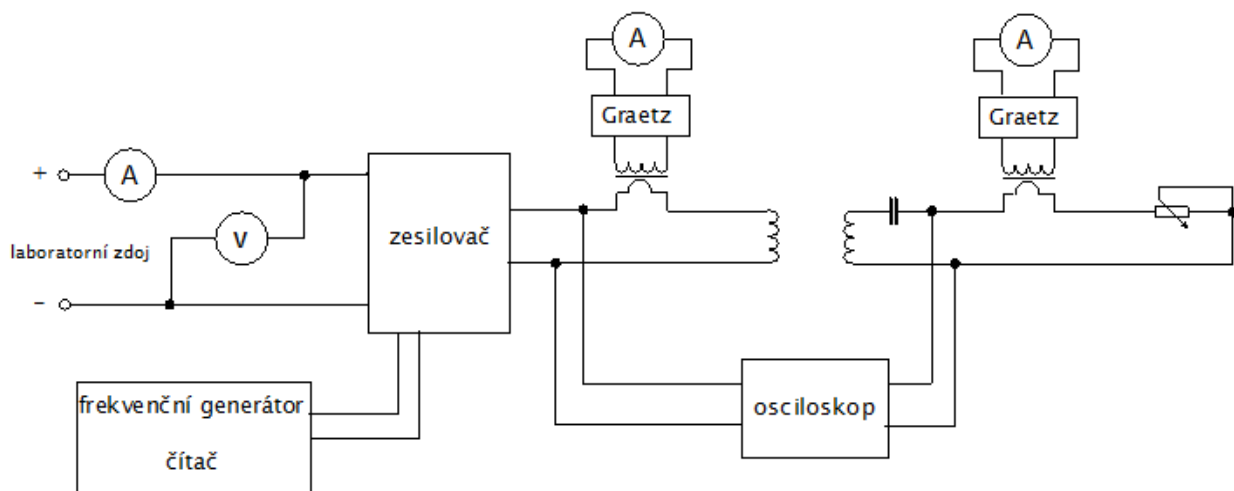
Ve čtvrtém měření byl detailně proměřen průběh proudu nakrátko na vzdálenosti cívek. Opět byl jako hlavní ukazatel výkonových možností použit proud nakrátko, pomocí kterého je možné dopočítat potřebné parametry.

Cílem pátého měření bylo ověřit, jestli je možné provozovat rezonanční systém s proměnlivou vzduchovou mezerou bez průběžného ladění frekvence. Byla nastavena vždy určitá frekvence a poté postupně měněna vzdálenost. Měřen byl proud nakrátko.

Šesté měření bylo provedeno pro ověření teorie, že při přesném naladění lze vykompenzovat reaktivní složky vnitřní impedance a získat zcela lineární VA charakteristiku výstupu. Měření bylo realizováno zatěžováním výstupu odporem a z naměřených hodnot byly určeny průběhy výkonů a účinností.

### Podmínky měření:

Zesilovač je napájen z laboratorního zdroje 32V. Na připojeném generátoru je nastavena požadovaná frekvence podle vestavěného čítače. Napětí na primární cívce je nastaveno intenzitou signálu generátoru na  $6,6 V_{ef}$ , tato hodnota je používána při všech měřeních. Střídavé proudy jsou měřeny pomocí proudového transformátoru a usměřovače s magneťoelektrickým přístrojem. Změřená hodnota středního proudu je následně přepočtena na efektivní. Napětí na primární i sekundární straně jsou měřena pomocí osciloskopu. Výstup je zatěžován proměnlivým odporem. V prvním měření jsou porovnávány vlastnosti dvou typů vinutí, v ostatních měřeních jsou zapojeny pouze plošné cívky. Zapojení přístrojů je znázorněno na obr. 5-2. Fotografie měřicího pracoviště s řízeným budičem je uvedena v příloze, obr. 0-2.



Obr. 5-2 : Schéma měření - řízený budič

## 5.3 Měření charakteristik

### 5.3.1 Měření napětí naprázdno

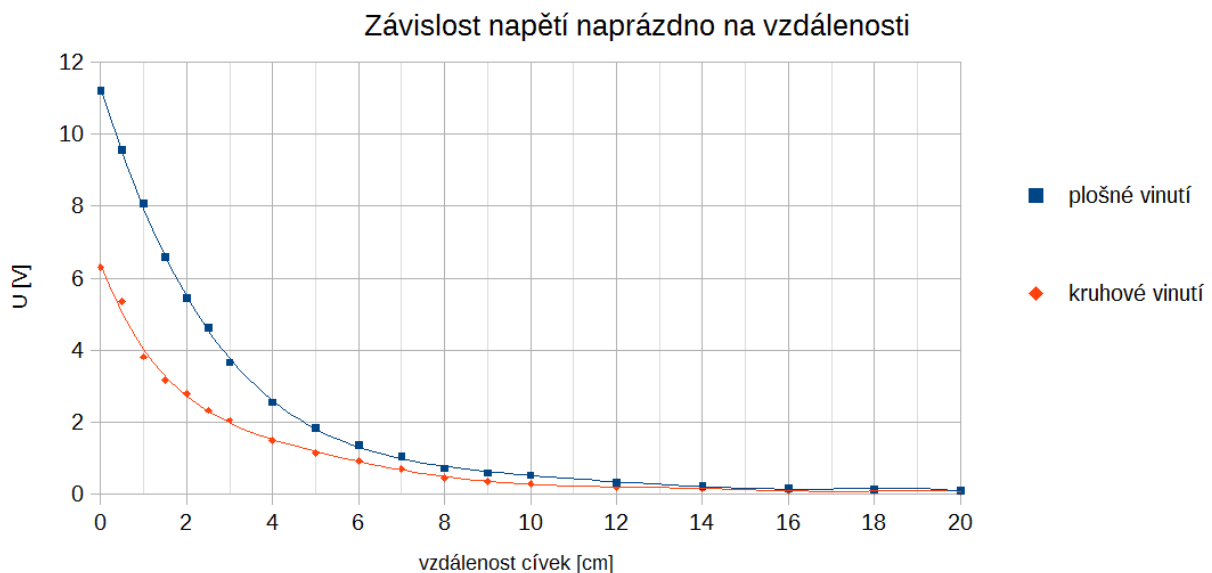
#### Popis měření:

Cílem měření bylo porovnat vlastnosti dvou různých konstrukcí vinutí pomocí měření napětí naprázdno a činitele vazby.

Frekvence generátoru byla nastavena na 50kHz a napětí na primární cívce na 6,6 V<sub>ef</sub>. Pro oba typy vinutí byl změřen průběh sekundárního napětí na vzdálenosti cívek. Z poměru napětí a poměru počtu závitů by určen činitel vazby

$$\kappa = \frac{U_2 N_1}{U_1 N_2}. \quad (5.1)$$

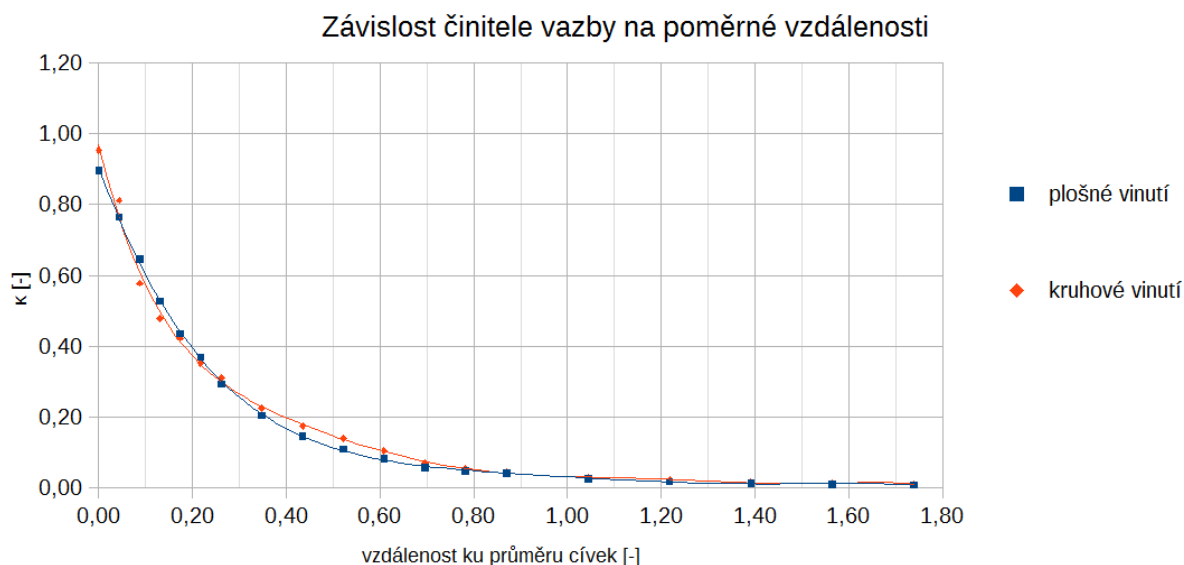
#### Výsledky měření:



Obr. 5-3 : Závislost napětí naprázdno na vzdálenosti - řízený budič

Z průběhů na grafu 5-3 je vidět, že indukované napětí se vzdáleností rychle klesá, což je nežádoucí s ohledem na dosažitelný výkon a také na využití takto malých napětí v reálné aplikaci.

Rozdíl mezi křivkami, je dán především rozdílným transformačním poměrem. Proto aby bylo možné posoudit vliv uspořádání vinutí, bylo potřeba vyjádřit činitel vazby. Pro vyšší obecnost byl vyjádřen činitel vazby na vzdálenosti vztažené k průměru cívek.



*Obr. 5-4 : Závislost činitele vazby na vzdálenosti - řízený budič*

Na grafu 5-4 je již vidět, že tvar vinutí nemá na průběh činitele vazby příliš velký vliv. Dalo by se říci, že na konstrukci vinutí nezáleží, při návrhu zařízení pro přenos energie na určitou vzdálenost, mají však oba typy cívek své výhody.

Pokud má zařízení přenášet menší výkony na co nejdelší vzdálenosti, s co nejlepší účinností, je lepší použít kruhové cívky. Vzhledem k tomu, že vinutí je soustředěno na okraji, je vazba mezi jednotlivými závitů lepší. To způsobuje, že taková cívka dosahuje vyšší indukčnosti při stejném průměru a stejné délce vodiče. Větší indukčnost zajistí menší proud naprázdno a tedy i lepší účinnost při malém zatížení.

Je-li cílem přenést co největší výkon přes nepatrnou vzduchovou mezeru, budou nejspíše výhodnější cívky plošné. Malá výška vinutí dovoluje cívky více přiblížit a velká plocha usnadní odvod ztrátového tepla při velkém zatížení.

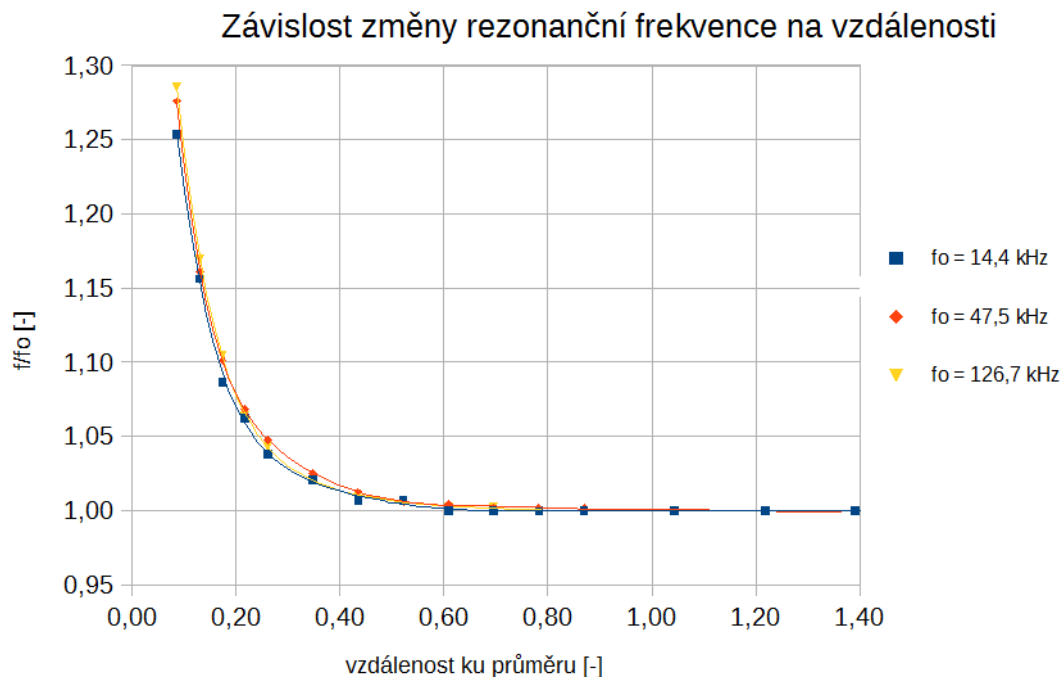
### 5.3.2 Měření rezonanční frekvence

#### Popis měření:

Cílem měření bylo určit vliv vzdálenosti cívek na rezonanční frekvenci sekundárního obvodu.

Sekundární cívka byla zapojena dokrátka pouze přes rezonanční kondenzátor a ampérmetr. Byl zvolen rezonanční kondenzátor pro danou pracovní frekvenci a při oddálených cívkách byla určena přesná hodnota vlastní rezonanční frekvence, jako frekvence taková, při níž je proud maximální. Cívky byly poté postupně přibližovány a v každé pozici byla doladěna frekvence, jejíž hodnota byla spolu se vzdáleností zaznamenána.

## Výsledky měření:



Obr. 5-5 : Závislost změny rezonanční frekvence na vzdálenosti - řízený budič

V grafu 5-5 jsou vyneseny průběhy rezonančních frekvencí vztažené k vlastní rezonanční frekvenci. Vlastní rezonanční frekvence byly měřeny při 20 cm, kdy je již vzájemné ovlivňování nepatrné, jak je možné ověřit z grafu. Vzdálenost mezi cívkami je vztažena k jejich průměru. Díky vztažným jednotkám na obou osách by měl být průběh stejný pro cívky různých velikostí i pracovních frekvencí za předpokladu stejného geometrického uspořádání vinutí. Pro ověření předpokladu bylo měření provedeno při třech pracovních frekvencích (14,4 - 47,5 - 126,7 kHz), a až na nepatrné odchylky jsou křivky totožné.

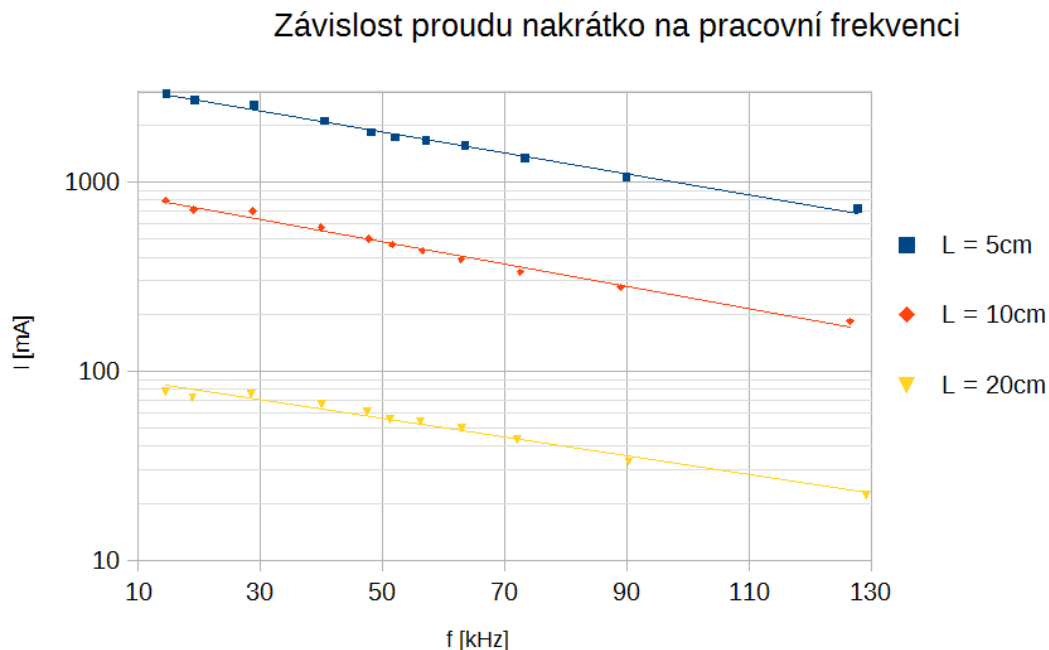
### 5.3.3 Měření závislosti proudu na pracovní frekvenci

#### Popis měření:

Měření si kladlo za cíl zjistit, jak se projevuje volba pracovní frekvence na charakteristikách měřených na výstupních svorkách. Měření bylo provedeno při přesně naladěné rezonanční frekvenci. Byl měřen proud nakrátko, z něhož je, spolu se znalostí napětí naprázdno, možné určit parametry náhradního schématu.

Sekundární cívka byla spojena dokrátka jako v 2. měření. Rezonanční kapacita se zvyšovala v malých krocích přidáváním kondenzátorů. Pro každou hodnotu kapacity byla doladěna frekvence do rezonance a byl změřen proud nakrátko.

### Výsledky měření:

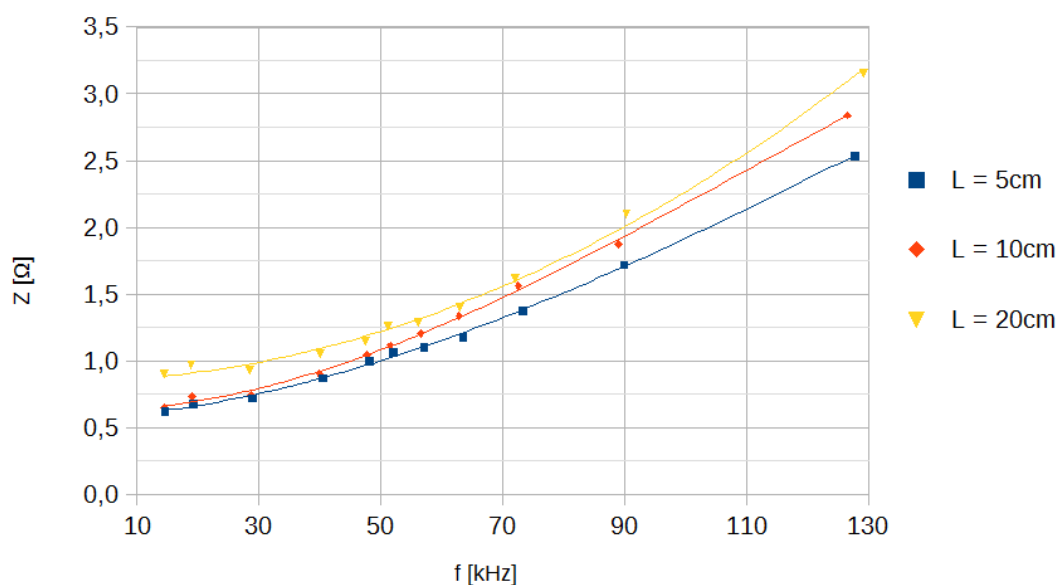


Obr. 5-6 : Závislost proudu nakrátko na pracovní frekvenci - řízený budič

Bylo zjištěno, že proud nakrátko s pracovní frekvencí klesá, viz graf 5-6. Vzhledem k tomu, že před každým odečtem byl obvod doladěn, tak by se proud nakrátko neměl s pracovní frekvencí příliš měnit. Reaktivní složky impedance se v rezonanci kompenzují, takže proud nakrátko je omezen pouze činnými ztrátami v obvodu, které by měli být jen slabě frekvenčně závislé.

Jak je ale patrné z grafu, proud nakrátko s frekvencí klesá poměrně značně. Pro objasnění tohoto jevu byly z naměřených hodnot vyneseny průběhy vnitřních impedancí.

### Závislost vnitřní impedance na pracovní frekvenci



Obr. 5-7 : Závislost vnitřní impedance na pracovní frekvenci - řízený budič

Na grafu 5-7 je již dobře vidět, že proud není omezen indukčnostmi, protože ty se se vzdáleností rychle mění. Pro tři vzdálenosti jsou tři téměř stejné křivky vnitřní impedance závislé pouze na frekvenci. Zvýšení vnitřního odporu způsobují činné ztráty. Je to především vlivem povrchového jevu na vodič vinutí a ztrátami v kondenzátoru. Zde se projevují ztráty dielektrické, které jsou silně frekvenčně závislé a ztráty vodivostní. Vodivostní ztráty vlivem sériového odporu nebyly konstantní především kvůli tomu, že pro každou frekvenci byl v kondenzátorové baterii jiný počet paralelních kondenzátorů. Výsledný sériový odpor se tudíž v průběhu měření měnil.

#### 5.3.4 Měření závislosti proudu v rezonanci na vzdálenosti

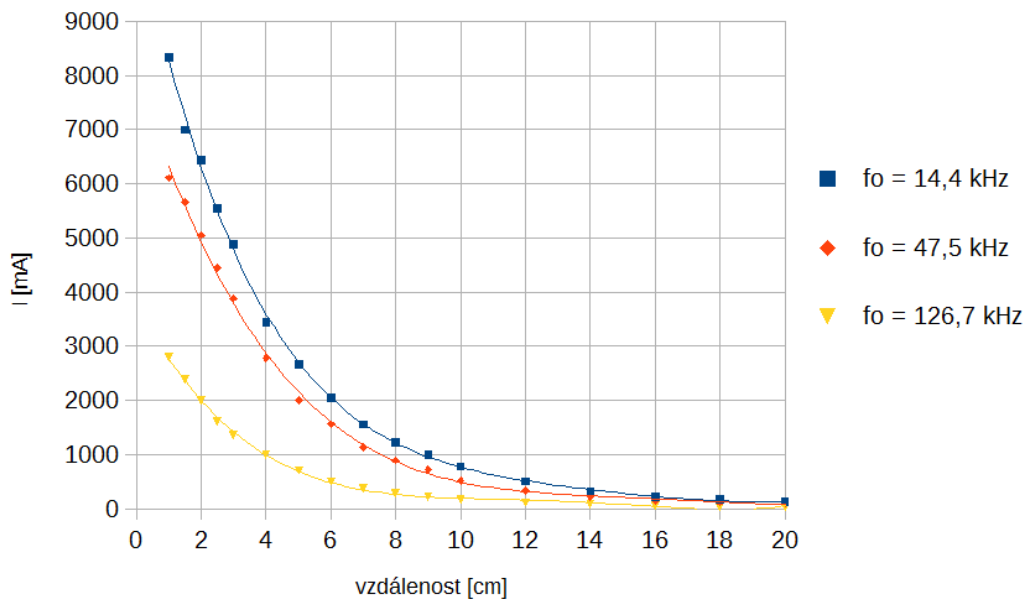
##### Popis měření:

Cílem bylo detailně proměřit průběh proudu nakrátko na vzdálenosti cívek. Opět byl jako hlavní ukazatel výkonových možností použit proud nakrátko, pomocí kterého je možné dopočítat potřebné parametry.

Cívky byly postupně přibližovány, v každé pozici byla doladěna frekvence a odečten proud nakrátko.

## Výsledky měření:

### Závislost proudu nakrátko na vzdálenosti při udržování rezonance



Obr. 5-8 : Závislost proudu nakrátko na vzdálenosti při udržování rezonance - řízený budič

Pokles proudu nakrátko se vzdáleností zachycený na grafu 5-8 je daný poklesem indukovaného napětí na vzájemné indukčnosti. Konstantou úměrnosti je zde vnitřní odpor. Rozdílné křivky pro rozdílné frekvence byly naměřeny kvůli již zmíněné frekvenční závislosti vnitřního odporu.

### 5.3.5 Měření závislosti proudu na vzdálenosti při konstantní frekvenci

#### Popis měření:

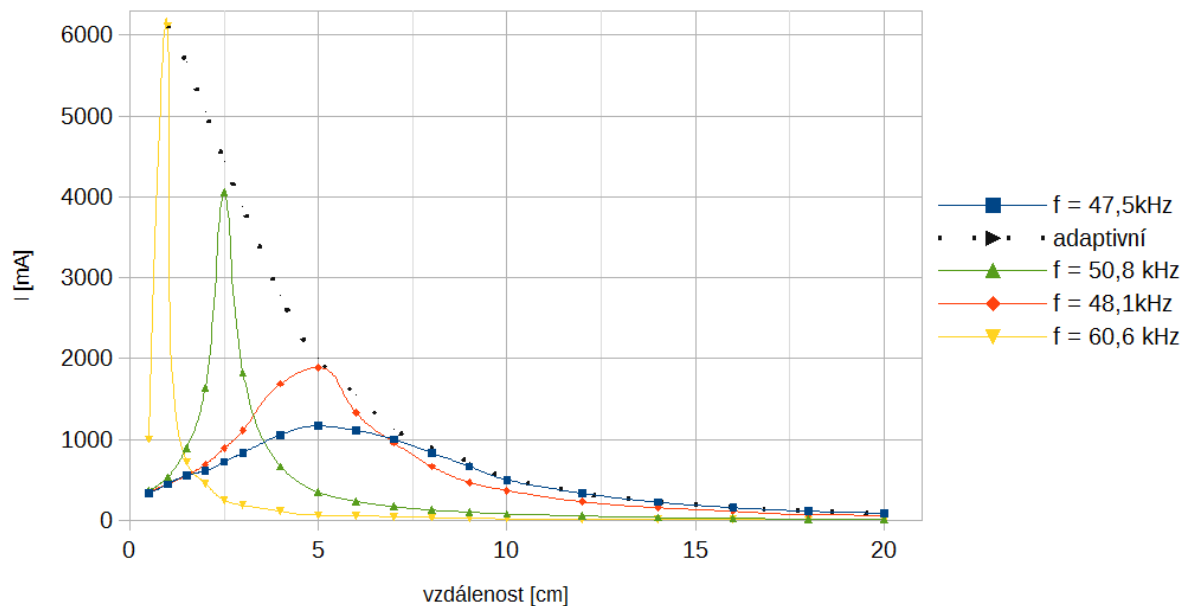
Cílem měření bylo ověřit, jestli je možné provozovat rezonanční systém s proměnlivou vzduchovou mezerou bez průběžného ladění frekvence.

Při zapojeném kondenzátoru pro pracovní frekvenci 50kHz byla naladěna rezonanční frekvence vždy pro jednu konkrétní vzdálenost. Tato vzdálenost se poté postupně měnila při zachování původně nastavené frekvence. Se změnou vzdálenosti docházelo k rozladění obvodu a byl měřen průběh proudu nakrátko.



## Výsledky měření:

Závislost proudu nakrátko na vzdálenosti při konstantní frekvenci



Obr. 5-9 : Závislost proudu nakrátko na vzdálenosti při konstantní frekvenci - řízený budič

Naměřený průběh proudů pro různá naladění je vyneseno v grafu 5-9. Z měření vyplývá, že pokud bude primární cívka napájena konstantním kmitočtem, lze soustavu provozovat jen na velice úzkém rozsahu vzdáleností, pro který je naladěna. Tečkovaná čára tvořící obálku křivek je převzata z měření při udržování rezonanční frekvence. Je zde dobře vidět, že při změně vzdálenosti a rozladění obvodu klesne proud a s ním i možný výkon mnohonásobně.

Zajímavý je tvar modré křivky, která představuje průběh při naladění na vlastní rezonanční frekvenci sekundárního obvodu. Extrém proudu nastává při vzdálenosti 5 cm, což odpovídá poloměru cívek. Dále z tohoto měření vyplývá, že zařízení naladěné na jednu frekvenci může účinně pracovat jen pro vzdálenosti větší než 1,5 krát poloměr cívek, kdy už splývá modrá a tečkovaná křivka.

Pro optimální využití obvodu ve všech vzdálenostech je pravděpodobně nezbytné aktivně řídit frekvenci, nebo upravovat hodnotu reaktancí.

### 5.3.6 Měření zatěžovacích charakteristik

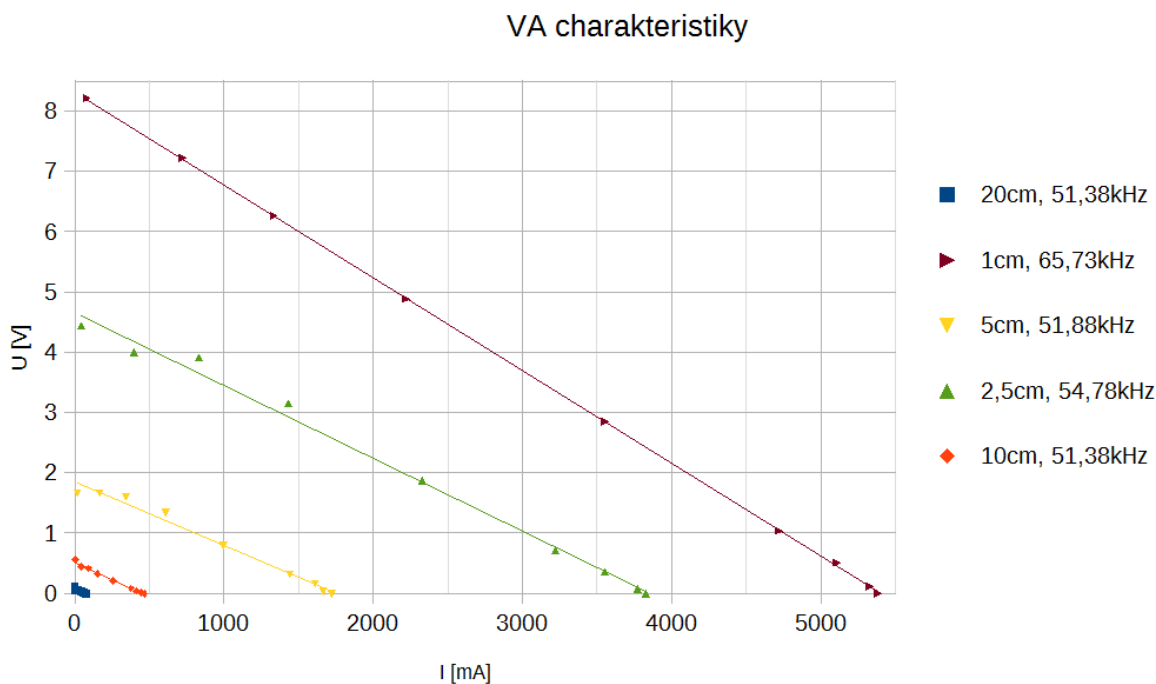
#### Popis měření:

Měření bylo provedeno pro ověření teorie, že při přesném naladění lze vykompenzovat reaktivní složky vnitřní impedance a získat zcela lineární VA charakteristiku výstupu.

Rezonanční kondenzátor byl zvolen pro pracovní kmitočet cca 50kHz a přesná hodnota frekvence byla před každou změnou vzdálenosti doladěna do rezonance, se změnou zátěže se frekvence neměnila. Obvod byl zatěžován postupně se snižujícím činným odporem. Ze změřených hodnot napětí a proudů na sekundární straně byly vyneseny VA charakteristiky a výkonové křivky. Spolu s informací o primárním proudu a znalostí náhradního schématu byly dopočteny činné ztráty a účinnosti přenosu. Při zanedbání malé ztráty v paralelní větvi, byla účinnost určena dle vzorce

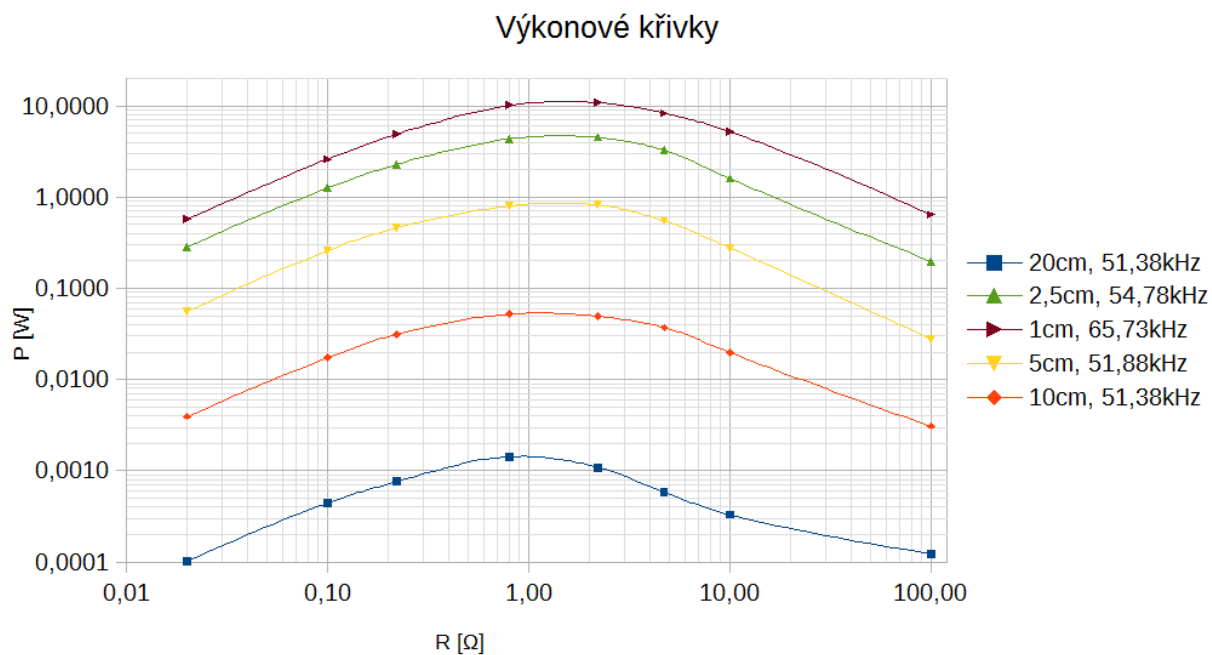
$$\eta = \frac{I_2 U_2}{I_2 U_2 + I_2^2 R_2 + I_1^2 R_1} \quad (5.2)$$

#### Výsledky měření:



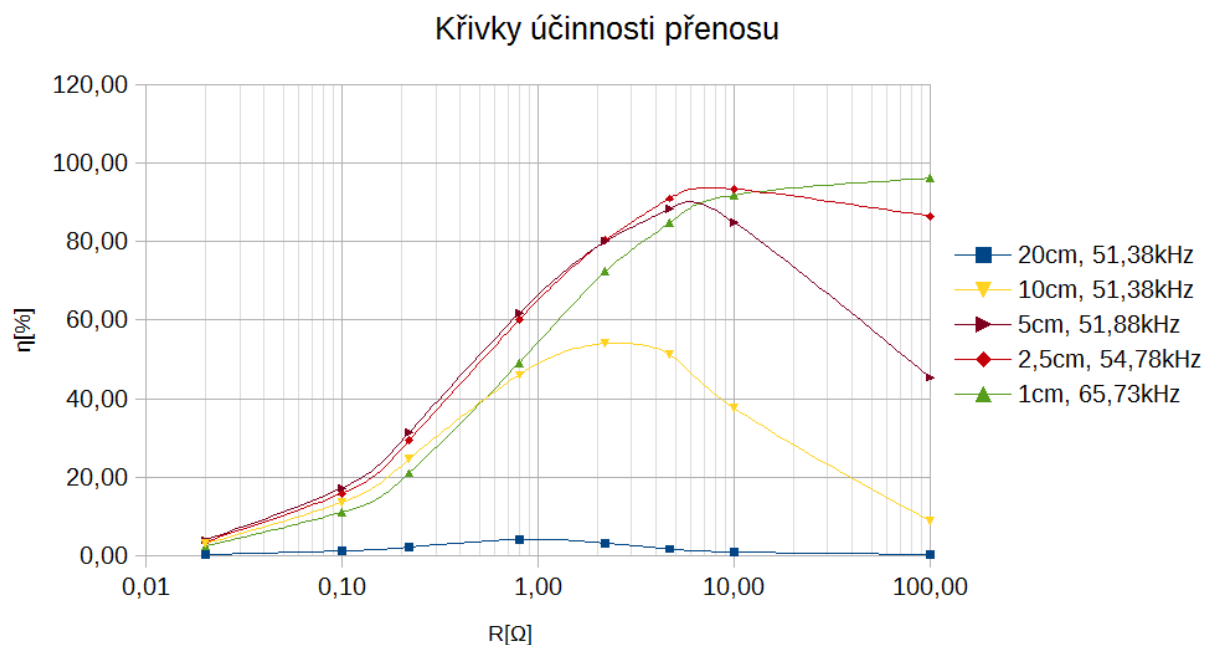
Obr. 5-10 : VA charakteristika v rezonanci pro různé vzdálenosti - řízený budič

Naměřené voltampérové charakteristiky sekundárního obvodu jakožto zdroje napětí, jsou v souladu s očekáváním lineární, viz graf 5-10. Z toho lze usoudit, že vnitřní impedance se v závislosti na zatížení nemění. U měření při 1cm je oproti ostatním průběhům pozorovatelná větší strmota charakteristiky. To je způsobeno výrazně silnější vazbou, tedy menší indukčností a vyšší frekvencí, která se projeví zvýšením vnitřního činného odporu.



Obr. 5-11 : Závislost výkonu na odporu zátěže pro různé vzdálenosti - řízený budič

Závislost výkonu na zatížení na grafu 5-11 potvrzuje předpoklad, že maximálního výkonu lze dosáhnout při zatížení činným odporem rovným reálné složce vnitřní impedance. Pro všechny vzdálenosti to v tomto případě připadá číni cca 2 Ω.



Obr. 5-12 : Závislost účinnosti přenosu na odporu zátěže pro různé vzdálenosti - řízený budič

Závislosti na grafu 5-12 byly určeny podle uvedeného vzorce 5-2 a vyjadřují účinnost samotného přenosu, nezávisí na vlastnostech budiče případně obvodů na straně přijímače. Důležitým faktem je, že účinnost není nikdy maximální ve stejném bodě, kdy je maximální výkon. Při maximu výkonu se napětí dělí do zátěže a do ztrát rovným dílem, tudíž účinnost nemůže překročit 50%. Bod maximální účinnosti je vždy při větším odporu zátěže. A jak plyne z naměřených dat, závisí tento bod na vzdálenosti cívek. Jedná se o poměr ztrát naprázdno a ztrát, které přibudou zatížením. Pro velké vzdálenosti jsou ztráty naprázdno dominantní a účinnost může vylepsit jen dosažení maximálního možného výkonu. Proto extrém funkce leží v menších hodnotách odporu. Při krátkých vzdálenostech jsou možné výkony podstatně větší nežli ztráty naprázdno, proto se extrém účinnosti posouvá směrem k větším odporům.

## 5.4 Vyhodnocení měření

Výstupem měření je potvrzení předpokladů o chování rezonančního obvodu a také určité praktické poznatky využitelné při konstrukci zařízení pro bezdrátový indukční přenos energie.

Bylo zjištěno, že uspořádání vinutí má jen malý vliv na činitele vazby jakožto nejdůležitější limitující parametr. Přesto podstatně ovlivňuje vlastní indukčnost cívky a také mezizávitovou kapacitu. Maximalizovat vlastní indukčnost je vhodné především pro přenos na delší vzdálenosti. S ohledem na pracovní frekvenci je také potřeba zvážit vliv parazitních kapacit u různých uspořádání vinutí. Dále je z měření zřejmé, že odpor použitých vodičů je na 50kHz asi dvojnásobný, proto by bylo vhodné vinout cívky vysokofrekvenčním lankem.

Charakteristiky naprázdno jsou podobné jako v případě měření se samokmitajícím budičem, navíc byly detailně proměřeny frekvenční závislosti. Bylo zjištěno, že pro činnost zařízení, které má přenášet energii přes proměnlivou vzduchovou mezeru je naprosto nezbytné řízení frekvence. Pro vzdálenosti delší než 1,5 poloměru cívek může však systém pracovat i s jednou frekvencí, protože ovlivňování rezonančních obvodů je již zanedbatelné.

Byl potvrzen předpoklad, že vhodnou konstrukcí a naladěním je možné úplně vykompenzovat rozptylové indukčnosti, problém však zůstává v tom, že indukované napětí se vzdáleností rychle klesá. Pro praktické využití je potřeba toto napětí dále upravit například pomocí měniče.

## 6 MĚŘENÍ SE SPÍNANÝM MĚNIČEM

Jedním ze zásadních problémů, které je potřeba vyřešit při použití indukčního přenosu energie v praktické aplikaci, je otázka stabilizace výstupního napětí. Z průběhu indukovaného napětí, viz graf 5-3 bylo zjištěno, že v závislosti na vzdálenosti se napětí mění ve velkém rozsahu. Většina zařízení, která mají být přes bezdrátový přenos napájena, potřebují konstantní napětí. Je tudíž potřeba omezovat napětí při krátkých vzdálenostech a při oddálení naopak napětí zvyšovat. To lze řešit například zapojením spínaného měniče na výstup. Takový měnič poté musí být schopen pracovat s velkým rozsahem vstupního napětí.

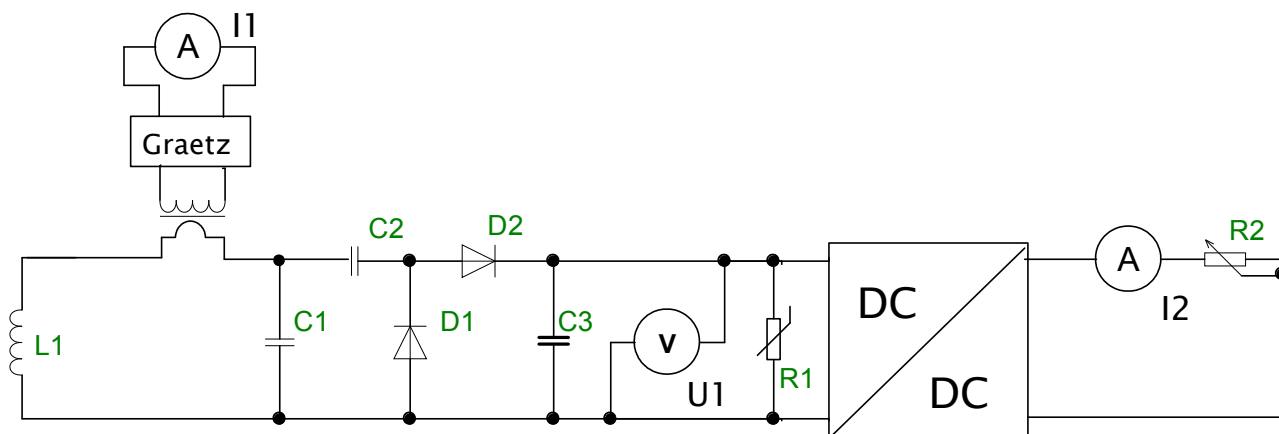
Je možných několik přístupů, jak energii z obvodu odebírat. Použití jednoduchého sériového rezonančního obvodu má výhodu v tom, že napětí je velice tvrdé. Na druhou stranu je nízké a pro usměrnění není možné použít křemíkové diody, protože při větších vzdálenostech by napětí nepřekonaloby úbytek PN přechodu. Řešením může být navinutí velkého počtu závitů na sekundární cívkou, vzhledem k vysoké frekvenci by se však pravděpodobně vyskytly problémy s parazitními kapacitami. Pro využití i malých napětí je nezbytné použití řízeného usměrňovače například s tranzistory mosfet a následně takto získané napětí zvýšit pomocí DC/DC měniče. Pro napájení řídicích obvodů usměrňovače a měniče je potom potřeba také konstantní napětí o vyšší hodnotě, nežli lze získat pouhým usměrněním, proto se musí napájet ze svého vlastního výstupu. Takové řešení má však zásadní nedostatek - nedokáže se samo nastartovat. Uplatnění popsaného zapojení je možné například v zařízeních, kde je na přijímač připojený akumulátor.

Druhým přístupem je zapojit rezonanční obvod jako paralelní a využít zvýšené napětí, které se v rezonanci objevuje na kondenzátoru. Tím odpadá problém s úbytkem usměrňovače, protože napětí na kondenzátoru je mnohokrát vyšší. Ovšem i toto zapojení má jedno velké úskalí- musí pracovat do stálé zátěže. Při odlehčení vzniká téměř netlumený LC obvod a proud obvodem i výstupní napětí roste nade všechny meze.

Určitým kompromisem, který bude dále rozebrán je sérioparalelní rezonanční obvod. Paralelní kondenzátor je připojen na cívkou přímo a ze sériového kondenzátoru se napájí usměrňovač s měničem. Výhoda zapojení spočívá v tom, že rezonanční frekvence je závislá na zatížení měniče. Díky tomu lze při jmenovité zátěži pracovat se zvýšeným napětím na paralelním kondenzátoru, po odlehčení však dojde k posunu rezonanční frekvence a rozladění obvodu, čímž se omezí proud naprázdno.

## 6.1 Popis zapojení a postup měření

Pro tento experiment byla použita stejná sestava jako v předchozím měření, tedy plošné cívky s primárním vinutím napájeným z výkonového zesilovače. Na sekundární cívku byl místo sériového kondenzátoru připojen sérioparalelní obvod a usměrňovač s měničem podle schématu 6-1. Parametry použitých součástek viz tab. 6-1. Výstup měniče byl zatěžován reostatem.



Obr. 6-1 : Zapojení sekundární strany s měničem

D1, D2	HER108 - 1000V, 1A, 75ns
C1	kondenzátorová baterie 53nF, MKP
C2	47nF, MKP
C3	1 $\mu$ F, MKP
R1	varistor, 470V
R2	reostat 100/2000 $\Omega$
L1	sekundární plošná cívka
DC/DC	měníč 13-500/12 V, 2A

Tab. 6-1 : Parametry součástek - měření s měničem

### Popis zapojení:

Proud přijímací cívky L1 je měřen přes proudový transformátor, usměrňovač a magnetoelektrický přístroj. Kondenzátor C1 paralelní rezonancí s L1 zvyšuje napětí. Proud je odebírán přes kondenzátor C2, který v závislosti na zatížení posouvá rezonanční frekvenci obvodu. Následuje usměrňovač tvořený diodami D1 a D2. Bylo zvoleno zdvojovací zapojení usměrňovače kvůli menšímu úbytku napětí oproti Graetzovu můstku a také z důvodu parametrů použitého měniče. Kondenzátor C3 plní funkci vyhlazovacího kondenzátoru, na kterém je měřeno napětí pomocí digitálního voltmetru. Varistor R1 chrání obvod před nebezpečným napětím při odlehčení měniče. DC/DC je jednočinný blokující měnič 13-500/12 V, 2A.

Na výstupu měniče je k dispozici již stabilizované napětí 12V. Jako zátěž slouží reostaty 100 a 2000  $\Omega$ . Pro určení výkonu postačí měřit proud I2, protože při přetížení napětí neklesá, ale měnič přejde do cyklovacího režimu.

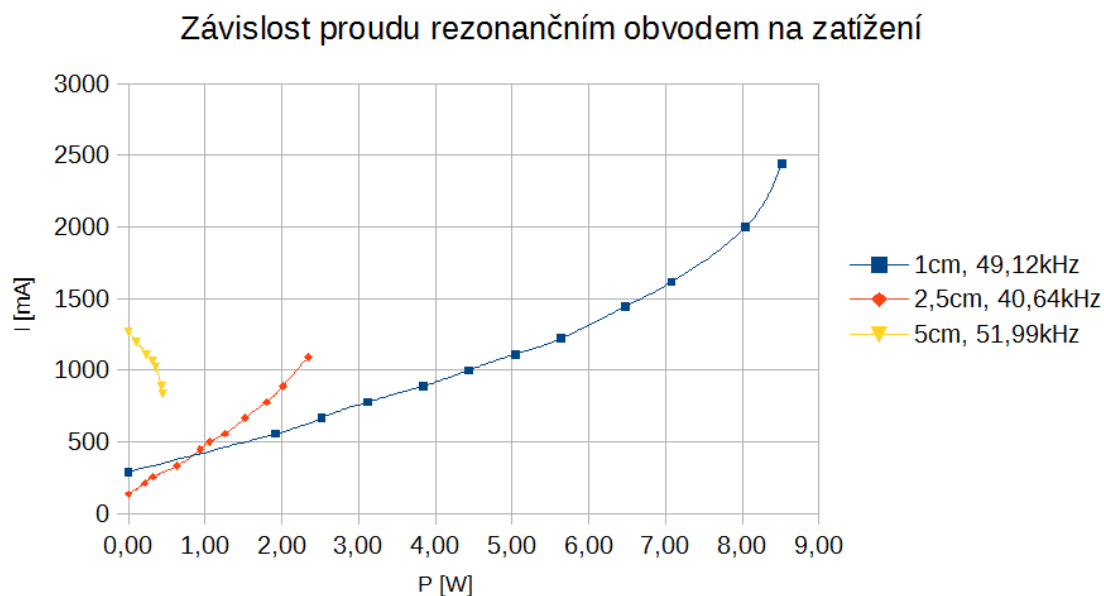
### Měřené závislosti:

Cílem měření bylo zjistit jaká je oblast výkonů, vzdáleností a frekvencí, v níž je měnič schopen pracovat a jak je možné v tomto zapojení využít maximální teoretické výkony naměřené v předchozí části. Vzhledem k tomu, že je zde velká řada volných proměnných, byly naměřeny jen některé charakteristiky, tedy hodnoty při naladění takovém, kdy lze dosáhnou největšího výkonu pro určitou vzdálenost a jak se projeví, když se při této frekvenci vzdálenost změní.

### Popis měření:

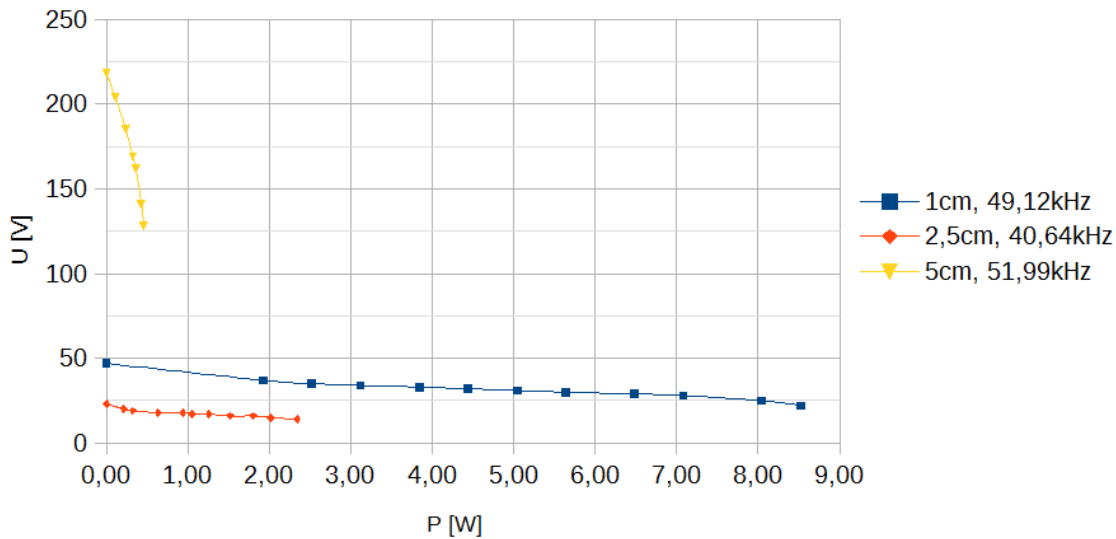
Napětí na primární cívce bylo voleno stejně jako v předchozích měřeních, sinusové, konstantní  $6,6 V_{ef}$ . Pro určitou vzdálenost byla nalezena frekvence, při níž je možné zatížit měnič největším proudem, a to tak, že se postupně zmenšoval odpor reostatu a současně se upravovala frekvence do maxima napětí  $U_1$ . Po nalezení tohoto bodu se odpor postupně zvětšoval a měřil se průběh  $I_1$ ,  $U_1$  a  $I_2$ . V druhé části měření byla nastavena frekvence, která byla určena jako optimální a postupně se měnila vzdálenost za měření  $I_1$ ,  $U_1$  a  $I_2$ .

## 6.2 Měření charakteristik



Obr. 6-2 : Závislost proudu rezonančním obvodem na zatížení - měření s měničem

### Závislost napětí usměřňovače na zatížení



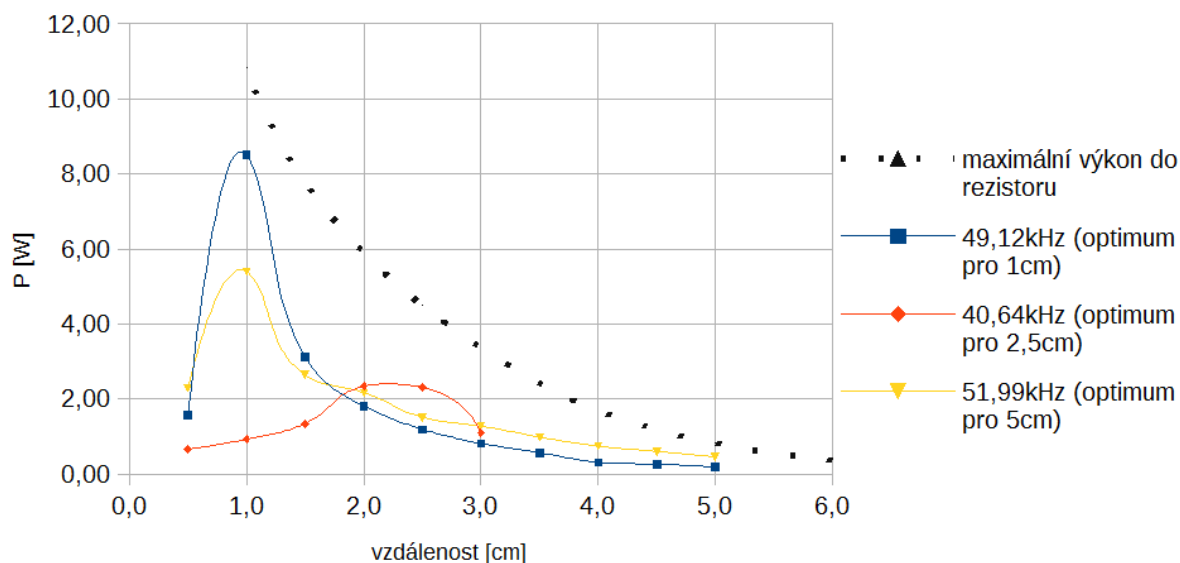
Obr. 6-3 : Závislost vstupního napětí měniče na zatížení - měření s měničem

Jak je vidět z grafu 6-2, pro vzdálenost 1 a 2,5 cm je chování obvodu, přesně takové, jak bylo předpokládáno. Při maximálním zatížení je obvod v rezonanci, se zmenšováním zátěže potom dochází k rozladění a proud cívkou klesá. Z průběhů napětí na grafu 6-3 je také zřejmé, že se napětí mění pouze málo a bylo by možné použít měnič navržený pro užší rozsah vstupního napětí.

Charakteristika při 5 cm je zásadně odlišná. Je to dáno tím, že při velké vzdálenosti je dosaženo největšího výkonu při frekvenci téměř rovné rezonanční frekvenci paralelního kondenzátoru. Proto jsou napětí i proud naprázdno větší a se zatížením klesají jako u jednoduchého paralelního obvodu. To lze však považovat za výhodu tohoto zapojení, které se pro krátké vzdálenosti chová spíše jako sérový LC obvod a pro delší vzdálenosti jako paralelní. Rozdíl v charakteristikách je způsobený frekvencí generátoru, která byla sice nastavována ručně, je zde však vidět regulační schopnost měniče, který představuje proměnlivý zátěžný odpor, podle toho jaké má vstupní napětí.



## Závislost výkonu na vzdálenosti při konstantní frekvenci



Obr. 6-4 : Závislost výkonu na vzdálenosti při konstantní frekvenci - měření s měničem

V grafu 6-3 jsou vyneseny průběhy výkonů, které lze z měniče odebírat při jedné nastavené frekvenci generátoru a různých vzdálenostech. Se změnou vzdálenosti se mění indukčnost a rezonanční frekvence stejně jako u charakteristik obr. 5-9, stojí však za povšimnutí, že křivky naměřené s měničem nemají tak ostrá maxima, protože se zde projevuje zásah měniče, který při zmenšení napětí zmenší vstupní odpor, čímž se zvětší výsledná kapacita sérioparalelního obvodu a rezonanční frekvence se tím opět přiblíží frekvenci generátoru. Tečkovaná čára je převzata z předchozího měření, jako maximum výkonu, kterého je možné dosáhnout při optimálním naladění.

## 6.4 Vyhodnocení měření

V zapojení systému s měničem bylo dosaženo stabilního výstupního napětí. Bez regulace frekvence zařízení sice není schopno nastavit úplně ideální podmínky v celém rozsahu vzdáleností, ale může být použito v určitém užším rozsahu. Lze využít přibližně 80% maximálního výkonu při optimalizaci na jednu vzdálenost. Při změně vzdálenosti s jednou frekvencí je možné nastavení takové, že v intervalu 1-5 cm je možné využití maxima nad 50%. Oproti měření bez měniče bylo dosaženo významného zlepšení. Bez měniče je rozsah vzdáleností s minimálně 50% využitím přibližně 0,2 cm, použitím měniče se oblast zvětšila na 4 cm.

Výhodou zapojení je jednoduchost a v určitém malém rozsahu samoregulační schopnost bez nutnosti použití obvodů pro úpravu frekvence.

## 7 ZÁVĚR

V práci byly představeny praktické aplikace využívající bezdrátový indukční přenos energie. Byl uveden přehled technologií a vlastností takových systémů. Byly rozebrány základní principy a zapojení obvodů.

V praktické části byla navržena tři zapojení a bylo provedeno měření charakteristik těchto obvodů. Cílem této části bylo ověřit předpokládané vlastnosti soustavy cívek a podpůrných obvodů. Dále byly při měření pozorovány praktické důsledky nastavení jednotlivých parametrů, které mohou být zdrojem informací při konstrukci přenosového zařízení pro určitou danou aplikaci. Základní vlastnosti testovaných zapojení byly shrnuty v jednotlivých hodnoceních měření.

Bylo zjištěno, že ZVS driver testovaný v prvním měření může dobře sloužit jako budič v zařízeních s lineárním přenosem. Výhodou je bezeztrátové generování sinusového proudu při velmi jednoduchém zapojení a dobrý výkon i účinnost pro krátké vzdálenosti, například pro 0,5 cm je maximální výkon 40W při účinnosti 80%. S oddalováním cívek výkon klesá velice rychle. Pro dosažení účinnosti více než 50% je nutné použít cívku, jejíž poloměr je alespoň 5x větší, než vzduchová mezera. Bylo uvedeno porovnání vlastností lineární a rezonanční vazby a bylo dokázáno, že pro delší vzdálenosti lze s využitím rezonance dosáhnout mnohonásobně většího výkonu i účinnosti. Například při vzdálenosti 8 cm stoupne výkon v rezonančním režimu 12x.

Při měření vlastností rezonančně vázaného systému bylo zjištěno, že použití budiče ZVS není možné pro vzdálenosti kratší než 8 cm. Proto bylo navrženo druhé zapojení, pomocí kterého bylo možné přesně proměřit vlastnosti rezonančního systému. V sérii měření byly detailně prozkoumány jednotlivé vlivy a jejich dopady na elektrické charakteristiky.

Byly porovnány vlastnosti dvou různých uspořádání vinutí. Bylo zjištěno, že oba typy mají určité výhody i nevýhody. Plošné cívky se osvědčily pro vyšší proudové namáhání při krátké vzdálenosti, oproti tomu cívky kruhové dosahují lepší účinnosti při přenosu na delší vzdálenosti. V dalších měřeních byl však pro možnost porovnání jednotlivých průběhů používán je jeden typ vinutí - plošné cívky.

V měření zatěžovacích charakteristik byly potvrzeny předpokládané vlastnosti rezonanční soustavy. Při přesném naladění je možné vykompenzovat nežádoucí rozptylové indukčnosti a obvod poté vykazuje jen činný vnitřní odpor přibližně  $2\Omega$ . Na základě toho byl zvolen jeden charakteristický parametr- proud nakrátko, pomocí něhož bylo možné porovnávat změny v chování systému.

Byl popsán vliv přiblížení cívek na rezonanční frekvenci. Ten je pro těsně vázaný systém velmi intenzivní, naopak při vzdálenostech větších než 1,5 poloměru cívek již téměř neměřitelný.

Byl zkoumán vliv frekvence na dosažitelný výkon a účinnost. Obecně není možné určit jednu frekvenci jako optimální, ta je v každém konkrétním případě kompromisem mezi ztrátami vlivem proudu naprázdno a ztrátami vlivem nárůstu činného odporu v obvodu se zvýšením frekvence.

V dalších měřeních byl zkoumán vliv vzdálenosti na proud nakrátko, jakožto ukazatel maximálního možného výkonu. Zde byly porovnány charakteristiky při nastavení jedné frekvence a při frekvenci adaptivní. Bylo zjištěno, že při jedné nastavené frekvenci je rozsah vzdáleností, kdy lze využít výhody rezonančního obvodu, jen velmi úzký, v měřené soustavě cca 0,5 cm pro využití maxima nad 50%.

V zapojení s měničem se podařilo odstranit poslední překážky k využití zařízení pro napájení reálného spotřebiče. Použitím sérioparalelního LC obvodu a měniče bylo získáno stabilní napětí a zlepšil se i výkon v širším intervalu vzdáleností (do 4 cm). Vlastnosti obvodu jsou však stále závislé na nastavení frekvence, která není univerzální pro plný rozsah vzdáleností.

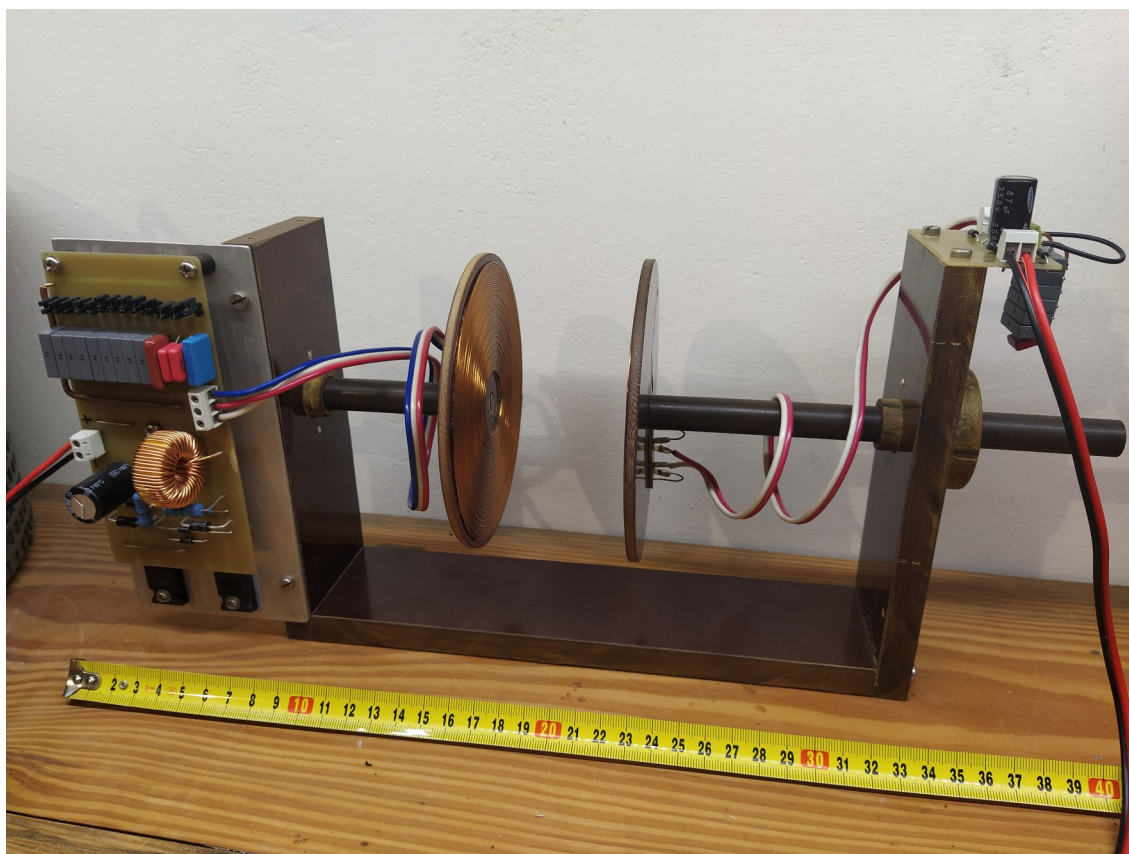
Bylo zjištěno, že v pasivních zapojeních nelze dosáhnout zcela přesného nastavení. K dosažení optimálních parametrů v soustavě, kde se mění vzdálenost by bylo nutné mít řídicí logiku na obou stranách a zajistit komunikaci přes vzduchovou mezeru. Jedině tak bude možné naladit přesnou frekvenci, která je klíčovým parametrem pro dosažení vysokého výkonu.

# LITERATURA

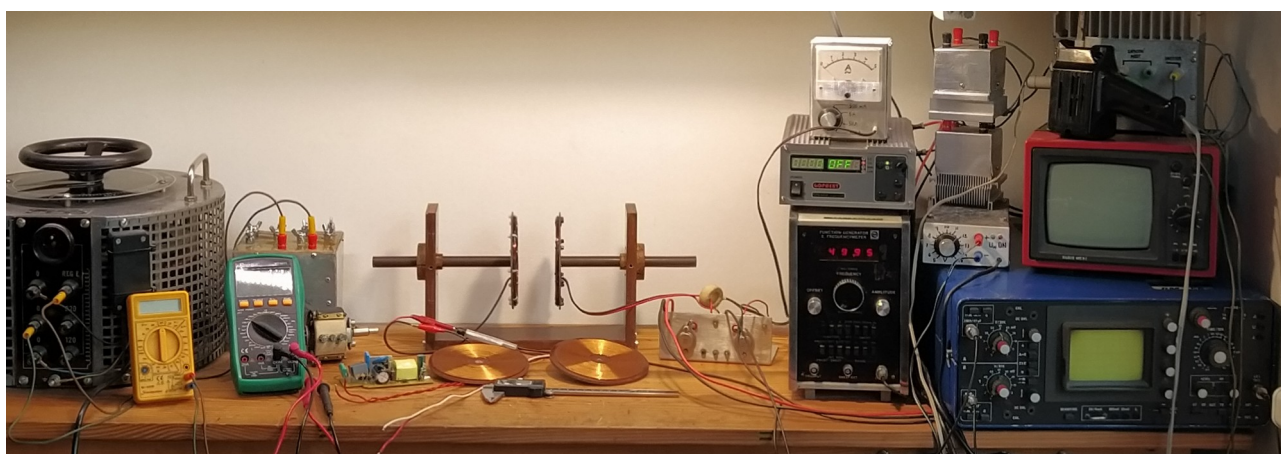
- [1] PAVELKA, Jiří a Pavel KOBRLE, Elektrické pohony a jejich řízení. 3.přepřacované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016, ISBN 978-80-01-06007-0.
- [2] LETTL, Jirí, Jiří PAVELKA a Jan BAUER. Výkonová elektronika. 4. přepřacované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019, ISBN: 978-80-01-06514-3.
- [3] MOHAN, Ned. Power electronics: a first course. Hoboken: Wiley, 2012, ISBN 978-1-118-07480-0.
- [4] VELÍK, Vladimír. Základy elektrotechniky. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960.
- [5] Vobecký, Jan a Vít ZÁHLAVA. Elektronika. 2. rozšířené vydání. Praha: Grada Publishing, 2001, ISBN 80-7169-884-9.
- [6] C. Qiu, K. T. Chau, C. Liu and C. C. Chan, "Overview of wireless power transfer for electric vehicle charging," 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), Barcelona, 2013, pp. 1-9. Dostupné z : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6914731>
- [7] SRB, L. Bezdrátové nabíjení mobilů a tabletů (vědecké okénko) [online]. Poslední změna 8. 4. 2012 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z : <https://mobilizujeme.cz/clanky/bezdratovenabijeni-mobilu-a-tabletu-vedecke-okenko>
- [8] Alza.cz, Bezdrátové nabíječky pro mobilní telefony [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z : <https://www.alza.cz/bezdratove-nabijecky-pro-mobilni-telefony/18854866.htm# cud=1>
- [9] X. Liu, "Qi Standard Wireless Power Transfer Technology Development Toward Spatial Freedom," in IEEE Circuits and Systems Magazine, vol. 15, no. 2, pp. 32-39, Secondquarter 2015. Dostupné z : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7110442>
- [10] B. M. Badr et al, "Design of a wireless measurement system for use in wireless power transfer applications for implants," Wireless Power Transfer, vol. 4, (1), pp. 21-32, 2017. Dostupné z : <https://www.cambridge.org/core/journals/wireless-power-transfer/article/design-of-a-wireless-measurement-system-for-use-in-wireless-power-transfer-applications-for-implants/71A86ABB1937522C28AA2957CF7C5DB4>
- [11] Xiao Lu, D. Niyato, Ping Wang, Dong In Kim and Zhu Han, "Wireless charger networking for mobile devices: fundamentals, standards, and applications," in IEEE Wireless Communications, vol. 22, no. 2, pp. 126-135, April 2015. Dostupné z : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7096295/citations#citations>
- [7] G. Kiruthiga, M. Y. Jayant and A. Sharmila, "Wireless charging for low power applications using Qi standard," 2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), Melmaruvathur, 2016, pp. 1180-1184. Dostupné z : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7754338>
- [12] S. Y. Hui, "Planar Wireless Charging Technology for Portable Electronic Products and Qi," in Proceedings of the IEEE, vol. 101, no. 6, pp. 1290-1301, June 2013. Dostupné z : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6481427>
- [13] Wireless charging standards, Most Popular Wireless Charging Standards [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z : <https://wirelesschargingstandard.weebly.com/guides/pma-power-matters-alliance>

- [20] Y. Park et al., "A Triple-Mode Wireless Power-Receiving Unit With 85.5% System Efficiency for A4WP, WPC, and PMA Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 4, pp. 3141-3156, April 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2703153. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7924354>

## PŘÍLOHA



Obr. 0-1 : Soustava se samokmitajícím budičem



Obr. 0-2 : Měřící pracoviště se zapojením řízeného budiče

vzdálenost [mm]	$U_2$ naprázdno [V]	$I_2$ nakrátko [mA]	$U_2$ při $P_{max}$ [V]	$I_2$ při $P_{max}$ [mA]	$R_{dif}$ [ $\Omega$ ]	$R_2$ [ $\Omega$ ]	$I_1$ při $P_{max}$ [mA]	$P_1$ [W]	$P_{2max}$ [W]	účinnost [%]
0	90,6									
2,5	83,6									
5	75,6	1770	41,8	954	43	41	1540	49,3	39,85	80,87
7,5	65,1	1270	37,6	680	51	49	1010	32,3	25,60	79,21
10	60,2	1000	32,6	555	60	57	770	24,6	18,11	73,50
15	48,5	710	26,6	373	68	64	470	15,0	9,93	63,56
20	40,4	540	21,6	273	75	69	350	11,2	5,89	52,56
25	33,3	410	17,9	206	81	74	270	8,6	3,69	42,73
30	27,3	320	15,3	166	85	76	230	7,4	2,54	34,51
35	24	270	12,8	133	89	78	200	6,4	1,70	26,56
40	20,4	220	10,9	105	93	78	180	5,8	1,15	19,89
45	17,1	180	9,2	84	95	77	160	5,1	0,77	15,13
50	14,4	147	8,1	71	98	77	160	5,1	0,58	11,24
55	13,1	129	7,0	57	102	75	160	5,1	0,40	7,81
60	11,1	106	6,1	47	105	73	150	4,8	0,29	5,99
65	9,8	89	5,5	38	109	70	150	4,8	0,21	4,32
70	8,7	77	4,8	27	113	57	150	4,8	0,13	2,73
75	7,7	65	4,3	22	117	49	150	4,8	0,09	1,95
80	6,9	57	3,8	16	121	27	150	4,8	0,06	1,28
85	6,1	48	3,5	14	127	20	140	4,5	0,05	1,09
90	5,6	42	3,2	12	133	8	140	4,5	0,04	0,85
95	5	35	2,9	11	143	6	140	4,5	0,03	0,70
100	4,4	28	2,7	10	157	7	140	4,5	0,03	0,61

Tab. 0-1 : Měření při změně vzdálenosti cívek - ZVS

$U_2$ [V]	$I_2$ [mA]	$P_2$ [W]	$R_{in}$ [ $\Omega$ ]	$I_1$ [mA]	účinnost [%]
59,60	0	0,0			
49,83	50	2,5	207		
45,16	100	4,5	150		
42,29	150	6,3	119		
40,02	200	8,0	101		
38,56	250	9,6	87	740	40,71
37,38	300	11,2	76	540	62,00
35,79	350	12,5	70	570	68,68
35,07	400	14,0	63	620	71,00
34,19	450	15,4	58	660	72,85
33,37	500	16,7	54	700	74,00
32,34	550	17,8	51	740	74,50
30,91	600	18,5	49	780	74,30
29,50	650	19,2	47	810	73,98
28,13	700	19,7	46	820	74,00
26,37	750	19,8	45	840	74,10
24,19	800	19,4	45	820	73,60
22,12	850	18,8	45	810	72,99
18,98	900	17,1	46	740	71,70
15,55	950	14,8	47	680	67,89
11,35	1000	11,4	49	580	61,15
2,38	1050	2,5	55		

Tab. 0-2 : Měření při 1cm - ZVS



$U_2$ [V]	$I_2$ [mA]	$P_2$ [W]	$R_{in}$ [ $\Omega$ ]
19,1	0	0,00	
16,726	10	0,17	367
15,532	20	0,31	243
14,638	30	0,44	192
13,944	40	0,56	161
13,24	50	0,66	143
12,706	60	0,76	128
12,242	70	0,86	117
11,848	80	0,95	107
11,644	90	1,05	97
11,31	100	1,13	91
11,046	110	1,22	85
10,682	120	1,28	81
10,318	130	1,34	78
9,834	140	1,38	75
9,3	150	1,40	74
8,766	160	1,40	73
8,132	170	1,38	72
7,318	180	1,32	73
6,394	190	1,21	74
5,15	200	1,03	76
3,526	210	0,74	80
1,732	220	0,38	85

Tab. 0-3 : Měření při 4cm - ZVS

$U_2$ [V]	$I_2$ [mA]	$P_2$ [W]	$R_{in}$ [ $\Omega$ ]
6,77	0	0,000	
6,18	5	0,031	503
5,76	10	0,058	294
5,42	15	0,081	219
5,14	20	0,103	178
4,91	25	0,123	152
4,92	30	0,148	126
4,76	35	0,167	113
4,59	40	0,184	103
4,39	45	0,197	96
4,17	50	0,209	91
3,92	55	0,216	87
3,64	60	0,218	84
3,29	65	0,214	83
2,88	70	0,202	83
2,34	75	0,175	85

Tab. 0-4 : Měření 7cm - ZVS



$U_2$ [V]	$I_2$ [mA]	$P_2$ [W]	$R_{in}$ [ $\Omega$ ]
4,10	0	0,0000	
3,51	2	0,0070	444
3,23	4	0,0129	292
3,02	6	0,0181	229
2,86	8	0,0229	192
2,73	10	0,0273	167
2,61	12	0,0313	149
2,53	14	0,0354	134
2,46	16	0,0394	121
2,38	18	0,0429	112
2,29	20	0,0458	105
2,20	22	0,0485	100
2,10	24	0,0505	96
2,01	26	0,0521	92
1,83	28	0,0512	92

Tab. 0-5 : Měření při 10cm - ZVS

$U_2$ za usměr. [V]	úbytek usměr. [V]	$U_2$ před usměr. [V]	$I_2$ [mA]	$R_{dif}$ [ $\Omega$ ]	$R_z$ [ $\Omega$ ]	$R_{in}$ [ $\Omega$ ]	$P_2$ [W]	$I_1$ [mA]	$P_1$ [W]	účinnost [%]
2,78	1,63	4,41	47,1	93,59	59,02	4,07	0,208	150	4,8	4,3
2,75	1,63	4,38	52,1	84,09	52,78	4,20	0,228	150	4,8	4,8
2,71	1,64	4,35	59,0	73,65	45,93	4,32	0,256	150	4,8	5,3
2,64	1,63	4,27	57,9	73,83	45,60	4,50	0,248	150	4,8	5,2
2,58	1,65	4,23	80,6	52,46	32,01	4,61	0,341	160	5,12	6,7
2,5	1,66	4,16	97,3	42,74	25,69	4,54	0,405	160	5,12	7,9
2,47	1,67	4,14	114,7	36,08	21,53	4,02	0,475	160	5,12	9,3
2,38	1,68	4,06	130,7	31,05	18,21	4,14	0,530	160	5,12	10,4
2,31	1,69	4,00	151,7	26,37	15,23	3,95	0,607	160	5,12	11,9
2,23	1,70	3,93	170,7	23,04	13,06	3,91	0,671	160	5,12	13,1
2,18	1,72	3,90	192,3	20,26	11,34	3,66	0,749	170	5,44	13,8
1,75	1,81	3,56	350,0	10,17	5,00	2,97	1,246	200	6,4	19,5
1,64	1,84	3,48	400,0	8,70	4,10	2,80	1,392	200	6,4	21,8
1,47	1,88	3,35	460,0	7,27	3,20	2,73	1,539	210	6,72	22,9
1,36	1,92	3,28	530,0	6,18	2,57	2,49	1,737	220	7,04	24,7
1,19	1,97	3,16	610,0	5,17	1,95	2,37	1,925	230	7,36	26,2
0,97	2,03	3,00	720,0	4,17	1,35	2,22	2,161	240	7,68	28,1
0,76	2,11	2,87	850,0	3,38	0,89	2,04	2,440	260	8,32	29,3
0,43	2,21	2,64	1020,0	2,59	0,42	1,92	2,695	280	8,96	30,1

Tab. 0-6 : Měření při 8cm v rezonanci - ZVS

L [cm]	L/d [-]	plošné		kruhové	
		U <sub>sek</sub> [V]	k[-]	U <sub>sek</sub> [V]	k[-]
0	0,00	11,20	0,90	6,291	0,95
0,5	0,04	9,56	0,76	5,359	0,81
1	0,09	8,07	0,65	3,813	0,58
1,5	0,13	6,59	0,53	3,162	0,48
2	0,17	5,44	0,44	2,79	0,42
2,5	0,22	4,61	0,37	2,325	0,35
3	0,26	3,66	0,29	2,046	0,31
4	0,35	2,55	0,20	1,488	0,23
5	0,43	1,83	0,15	1,15	0,17
6	0,52	1,37	0,11	0,92	0,14
7	0,61	1,04	0,08	0,69	0,10
8	0,70	0,72	0,06	0,456	0,07
9	0,78	0,59	0,05	0,36	0,05
10	0,87	0,52	0,04	0,296	0,04
12	1,04	0,33	0,03	0,2	0,03
14	1,22	0,23	0,02	0,144	0,02
16	1,39	0,16	0,01	0,104	0,02
18	1,57	0,13	0,01	0,08	0,01
20	1,74	0,10	0,01	0,064	0,01

Tab. 0-7 : Měření naprázdno - řízený budič

L [cm]	L/d [-]	k[-]	fo = 14,4 kHz		fo = 47,5 kHz		fo = 126,7 kHz	
			f[kHz]	f/fo [-]	f[kHz]	f/fo [-]	f[kHz]	f/fo [-]
1	0,09	0,66	18,05	1,25	60,6	1,28	162,9	1,29
1,5	0,13	0,54	16,65	1,16	55,15	1,16	148,2	1,17
2	0,17	0,44	15,65	1,09	52,3	1,10	140	1,10
2,5	0,22	0,37	15,3	1,06	50,75	1,07	134,8	1,06
3	0,26	0,30	14,95	1,04	49,75	1,05	132,2	1,04
4	0,35	0,21	14,7	1,02	48,7	1,03	129,3	1,02
5	0,43	0,15	14,5	1,01	48,1	1,01	128	1,01
6	0,52	0,11	14,5	1,01	47,8	1,01	127,5	1,01
7	0,61	0,08	14,4	1,00	47,7	1,00	127	1,00
8	0,70	0,06	14,4	1,00	47,6	1,00	127	1,00
9	0,78	0,05	14,4	1,00	47,6	1,00	126,7	1,00
10	0,87	0,04	14,4	1,00	47,6	1,00	126,7	1,00
12	1,04	0,03	14,4	1,00	47,5	1,00	126,7	1,00
14	1,22	0,02	14,4	1,00	47,5	1,00	126,7	1,00
16	1,39	0,01	14,4	1,00	47,5	1,00	126,7	1,00
18	1,57	0,01	14,4	1,00	47,5	1,00	126,7	1,00
20	1,74	0,01	14,4	1,00	47,5	1,00	126,7	1,00

Tab. 0-8 : Měření vlivu vzdálenosti na frekvenci - řízený budič

	fo = 14,4 kHz	fo = 47,5 kHz	fo = 126,7 kHz
L [cm]	I[mA]	I[mA]	I[mA]
1	8325	6105	2797,2
1,5	6993	5661	2386,5
2	6438	5050,5	1998
2,5	5550	4440	1609,5
3	4884	3885	1354,2
4	3441	2775	987,9
5	2664	1998	710,4
6	2053,5	1554	499,5
7	1554	1132,2	372,96
8	1221	888	288,6
9	999	721,5	219,78
10	777	521,7	176,49
12	499,5	333	111
14	321,9	222	78,81
16	222	155,4	55,5
18	166,5	111	35,52
20	122,1	88,8	24,42

Tab. 0-9 : Měření vlivu vzdálenosti na proud nakrátko - řízený budič

C[nF]	L = 5cm			L = 10cm			L = 20cm		
	frez [kHz]	I[mA]	R <sub>in</sub> [Ω]	frez [kHz]	I[mA]	R <sub>in</sub> [Ω]	frez [kHz]	I[mA]	R <sub>in</sub> [Ω]
680	14,57	2941,5	0,6	14,45	799,2	0,7	14,41	77,7	0,9
390	19,25	2719,5	0,7	19,02	710,4	0,7	18,88	72,15	1,0
172	28,93	2553	0,7	28,69	699,3	0,7	28,53	75,48	0,9
88	40,42	2109	0,9	39,94	577,2	0,9	40,03	66,6	1,1
62	48,15	1831,5	1,0	47,66	499,5	1,0	47,49	61,05	1,1
53	52,04	1720,5	1,1	51,52	466,2	1,1	51,19	55,5	1,3
44	57,08	1665	1,1	56,46	432,9	1,2	56,21	54,39	1,3
35,7	63,47	1554	1,2	62,83	388,5	1,3	62,97	49,95	1,4
26,8	73,25	1332	1,4	72,52	333	1,6	72,02	43,29	1,6
17,8	89,87	1065,6	1,7	89,02	277,5	1,9	90,29	33,3	2,1
8,9	127,7	721,5	2,5	126,5	183,15	2,8	129,15	22,2	3,2

Tab. 0-10 : Měření vlivu frekvence na proud nakrátko - řízený budič

l [cm]	f = 47,5kHz	f = 48,1kHz	f = 50,8 kHz	f = 60,6 kHz
	Ln → ∞	Ln = 5cm	Ln = 2,5cm	Ln = 1cm
I [mA]	I [mA]	I [mA]	I [mA]	I [mA]
0,5	333	355,2	366,3	999
1	444	444	532,8	6105
1,5	555	555	888	721,5
2	610,5	688,2	1642,8	455,2
2,5	721,5	888	4051,5	249,75
3	832,5	1110	1831,5	183,15
4	1054,5	1687,2	666	111
5	1165,5	1887	344,1	63,27
6	1110	1332	233,1	55,5
7	999	954,6	168,72	44,4
8	832,5	666	125,43	33,3
9	666	466,2	99,9	24,42
10	499,5	366,3	77,7	17,76
12	333	227,55	53,28	13,32
14	222	155,4	33,3	8,88
16	155,4	111	22,2	7,77
18	111	69,93	15,54	6,66
20	88,8	61,05	11,1	5,55

Tab. 0-11 : Měření při konstantní frekvenci - řízený budič

20cm, 51,38kHz									
$R_z$ [Ω]	$I_{ef2}$ [mA]	$U_{ef2}$ [V]	$P_2$ [W]	$I_{ss\ nap}$ [mA]	$I_{ef1}$ [mA]	$P_1$ [W]	$\eta$ [%]	$\eta_{zes}$ [%]	
0,00	72,15	0,000	0,0000	200	412,92	0,04	0,00	0,000	
0,02	71,04	0,001	0,0001	200	412,92	0,04	0,24	0,002	
0,10	66,60	0,007	0,0004	200	412,92	0,04	1,06	0,007	
0,22	58,83	0,013	0,0008	200	412,92	0,04	1,83	0,012	
0,80	42,18	0,034	0,0014	200	412,92	0,04	3,43	0,022	
2,20	22,20	0,049	0,0011	200	412,92	0,04	2,68	0,017	
4,70	11,10	0,052	0,0006	200	412,92	0,04	1,45	0,009	
10,00	5,75	0,058	0,0003	200	412,92	0,04	0,84	0,005	
100,00	1,11	0,111	0,0001	200	412,92	0,04	0,31	0,002	
∞	0,00	0,117	0,0000	200	412,92	0,04	0,00	0,000	
10cm, 51,38kHz									
$R_z$ [Ω]	$I_{ef2}$ [mA]	$U_{ef2}$ [V]	$P_2$ [W]	$I_{ss\ nap}$ [mA]	$I_{ef1}$ [mA]	$P_1$ [W]	$\eta$ [%]	$\eta_{zes}$ [%]	
0,00	466,20	0,000	0,0000	200	412,92	0,14	0,00	0,000	
0,02	444,00	0,009	0,0039	200	412,92	0,13	2,99	0,062	
0,10	416,25	0,042	0,0173	200	412,92	0,13	12,88	0,271	
0,22	377,40	0,083	0,0313	200	412,92	0,13	23,27	0,490	
0,80	255,30	0,204	0,0521	200	412,92	0,12	43,20	0,815	
2,20	149,85	0,330	0,0494	200	412,92	0,10	50,04	0,772	
4,70	88,80	0,417	0,0371	200	412,92	0,08	46,43	0,579	
10,00	44,40	0,444	0,0197	200	412,92	0,06	32,96	0,308	
100,00	5,55	0,555	0,0031	200	412,92	0,04	7,28	0,048	
∞	0,00	0,562	0,0000	200	412,92	0,04	0,00	0,000	
5cm, 51,88kHz									
$R_z$ [Ω]	$I_{ef2}$ [mA]	$U_{ef2}$ [V]	$P_2$ [W]	$I_{ss\ nap}$ [mA]	$I_{ef1}$ [mA]	$P_1$ [W]	$\eta$ [%]	$\eta_{zes}$ [%]	
0,00	1720,50	0,000	0,0000	310	643,8	1,43	0,00	0,000	
0,02	1665,00	0,033	0,0554	310	643,8	1,40	3,97	0,559	
0,10	1609,50	0,161	0,2590	300	632,7	1,52	17,08	2,698	
0,22	1443,00	0,317	0,4581	270	577,2	1,47	31,13	5,302	
0,80	999,00	0,799	0,7984	250	499,5	1,30	61,19	9,980	
2,20	610,50	1,343	0,8200	240	449,55	1,03	79,29	10,677	
4,70	341,90	1,607	0,5494	230	432,9	0,65	88,25	7,465	
10,00	166,50	1,665	0,2772	210	421,8	0,33	84,85	4,125	
100,00	16,65	1,665	0,0277	210	421,8	0,07	40,31	0,413	
∞	0,00	1,700	0,0000	210	421,8	0,04	0,00	0,000	
2,5cm, 54,78kHz									
$R_z$ [Ω]	$I_{ef2}$ [mA]	$U_{ef2}$ [V]	$P_2$ [W]	$I_{ss\ nap}$ [mA]	$I_{ef1}$ [mA]	$P_1$ [W]	$\eta$ [%]	$\eta_{zes}$ [%]	
0,00	3829,50	0,000	0,0000	1160	2475,3	8,01	0,00	0,000	
0,02	3774,00	0,075	0,2849	1150	2442	8,07	3,53	0,774	
0,10	3552,00	0,355	1,2617	1080	2308,8	8,17	15,45	3,651	
0,22	3219,00	0,708	2,2796	1000	2097,9	7,95	28,66	7,124	
0,80	2331,00	1,865	4,3468	730	1542,9	7,34	59,23	18,608	
2,20	1432,00	3,150	4,5114	470	999	5,66	79,65	29,996	
4,70	832,50	3,913	3,2574	310	677,1	3,67	90,93	32,836	
10,00	399,60	3,996	1,5968	240	477,3	1,72	92,78	20,792	
100,00	44,40	4,440	0,1971	200	401,82	0,24	83,83	3,080	
∞	0,00	4,525	0,0000	200	399,6	0,04	0,00	0,000	
1cm, 65,73kHz									
$R_z$ [Ω]	$I_{ef2}$ [mA]	$U_{ef2}$ [V]	$P_2$ [W]	$I_{ss\ nap}$ [mA]	$I_{ef1}$ [mA]	$P_1$ [W]	$\eta$ [%]	$\eta_{zes}$ [%]	
0,00	5383,50	0,000	0,0000	3510	7548	26,15	0,00	0,000	
0,02	5328,00	0,107	0,5678	3350	7326	25,69	2,21	0,530	
0,10	5106,00	0,511	2,6071	3320	6993	25,59	10,19	2,454	
0,22	4717,50	1,038	4,8961	3110	6660	25,11	19,50	4,920	
0,80	3552,00	2,842	10,0934	2360	5050,5	21,64	46,65	13,365	
2,20	2220,00	4,884	10,8425	1510	3207,9	15,43	70,28	22,439	
4,70	1332,00	6,260	8,3389	930	1931,4	10,00	83,43	30,020	
10,00	721,50	7,215	5,2056	540	1110	5,72	90,96	30,125	
100,00	77,70	8,210	0,6379	190	352,98	0,67	95,31	10,492	
∞	0,00	8,250	0,0000	170	333	0,03	0,00	0,000	

Tab. 0-12 : Měření při zatěžování odporem - řízený budič

1cm, 49,12kHz			
$I_{out}$ [mA]	$P_{out}$ [W]	$I_2$ ef [mA]	$U_{usm.}$ [V]
710	8,52	2442	22
670	8,04	1998	25
590	7,08	1615	28
540	6,48	1443	29
470	5,64	1221	30
420	5,04	1110	31
370	4,44	999	32
320	3,84	888	33
260	3,12	777	34
210	2,52	666	35
160	1,92	555	37
0	0,00	289	47
2,5cm, 40,64kHz			
$I_{out}$ [mA]	$P_{out}$ [W]	$I_2$ ef [mA]	$U_{usm.}$ [V]
195	2,34	1088	14
168	2,02	888	15
150	1,80	777	16
127	1,52	666	16
105	1,26	555	17
88	1,06	500	17
78	0,94	444	18
53	0,64	333	18
27	0,32	255	19
18	0,22	211	20
0	0,00	133	23
5cm, 51,99kHz			
$I_{out}$ [mA]	$P_{out}$ [W]	$I_2$ ef [mA]	$U_{usm.}$ [V]
38	0,46	833	128
36	0,43	888	141
30	0,36	1021	162
27	0,32	1066	169
20	0,24	1110	185
9	0,11	1199	204
0	0,00	1265	218

Tab. 0-13 : Měření s měničem při optimální frekvenci

f=49,12					
L [cm]	I <sub>out</sub> [mA]	P <sub>out</sub> [W]	U <sub>usm.</sub> [V]	I <sub>2</sub> ef [mA]	
0,5	131	1,57	20	599	
1,0	710	8,52	22	2442	
1,5	260	3,12	36	755	
2,0	150	1,80	39	555	
2,5	99	1,19	44	433	
3,0	68	0,82	43	389	
3,5	47	0,56	40	344	
4,0	26	0,31	46	311	
4,5	22	0,26	37	289	
5,0	15	0,18	29	233	
f=40,64					
L [cm]	I <sub>out</sub> [mA]	P <sub>out</sub> [W]	U <sub>usm.</sub> [V]	I <sub>2</sub> ef [mA]	
0,5	55	0,66	16	333	
1,0	77	0,92	15	455	
1,5	112	1,34	15	611	
2,0	195	2,34	14	1110	
2,5	192	2,30	14	1088	
3,0	91	1,09	14	533	
f=51,99					
L [cm]	I <sub>out</sub> [mA]	P <sub>out</sub> [W]	U <sub>usm.</sub> [V]	I <sub>2</sub> ef [mA]	
0,5	191	2,29	20	833	
1,0	450	5,40	38	1055	
1,5	220	2,64	54	644	
2,0	180	2,16	62	622	
2,5	126	1,51	81	666	
3,0	106	1,27	87	677	
3,5	82	0,98	106	877	
4,0	62	0,74	126	833	
4,5	50	0,60	124	833	
5,0	38	0,46	128	833	

Tab. 0-14 : Měření s měničem při konstantní frekvenci