



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

TVORBA LABORATORNÍCH PŘÍPRAVKŮ PRO BEZDRÁTOVÝ PŘENOS ELEKTRICKÉ ENERGIE ZALOŽENÝ NA MAGNETICKÉ INDUKCI

DEVELOPMENT OF LABORATORY SAMPLES FOR WIRELESS
TRANSMISSION OF ELECTRIC POWER BASED ON THE MAGNETIC
INDUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Kopečný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Krbal, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: David Kopečný **ID:** 164310 **Ročník:** 3 **Akademický rok:** 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Tvorba laboratorních přípravků pro bezdrátový přenos elektrické energie založený na magnetické indukci

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Princip bezdrátového přenosu a parametry dnes používaných zařízení, rešerše literatury, články IEEE a již vypracované závěrečné práce
2. Návrh zařízení pro demonstraci bezdrátového přenosu pro účely výuky včetně napájecích obvodů a buzení.
3. Realizace modelu bezdrátového přenosu na principu magnetické indukce a laboratorní ověření jeho parametrů

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 5.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Michal Krbal, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace:

KOPEČNÝ, D. *Tvorba laboratorních přípravků pro bezdrátový přenos elektrické energie založený na magnetické indukci*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 60 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Krbal, Ph.D..

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

.....

ABSTRAKT

Cílem práce je seskupit informace o bezdrátovém přenosu pomocí magnetické indukce a o současných řešeních bezdrátových aplikací v praxi. Práce obsahuje teoretický základ a informace o současném stavu bezdrátových napájecích aplikací. Najdeme zde fyzikální princip a návrh možného technického řešení bezdrátového systému. V práci jsou uvedeny informace z některých legislativních a hygienických předpisů.

Druhým cílem je návrh laboratorního zařízení na základě získaných informací a jeho realizace pro účely výuky a měření. V této části byla zvolena topologie obvodu a parametry rezonančních obvodů. Byl vyroben přípravek sestávající z budiče, primárního obvodu, sekundárního obvodu a modulu pro měření.

Třetím cílem je provedení měření na tomto přípravku. A vyhodnocení charakteristik z pohledu účinnosti. Naměřena byla data, která byla zpracována do charakteristik. Byla měřena účinnosti přenosu v závislosti na vzdálenosti a použité zátěži. Současně byla sledována pracovní frekvence přípravku. Dále bylo provedeno měření na dalším laboratorním přípravku, kde bylo dosaženo účinnosti více než 51 %.

Práce je členěna do 4 hlavních kapitol, které tématicky můžeme pojmenovat: informace, teorie, návrh a měření. V prvních dvou kapitolách je řešena teorie a popis technologií již aplikovaných systémů především z dopravy. V následujících dvou kapitolách je obsažen popis návrhu přípravku a samotné měření účinností.

KLÍČOVÁ SLOVA: magnetická indukce; bezdrátový přenos; bezdrátové nabíjení; cívka; účinnost přenosu; ZVS; impedanční přizpůsobení; rezonanční frekvence

ABSTRACT

The aim of the thesis is to collect the information about wireless transmission by using magnetic induction and about the current solutions of wireless applications in practice. The thesis includes theoretical basis and information about the current state of wireless power applications. This thesis is also focused on physical principle and draft of possible technical solution. On top of that, it also contains the information from some legislative and hygienic regulations.

The second aim is draft of laboratory equipment on the base of gained information and its implementation for purpose of teaching and measuring. For this part was chosen topology of circuit and the specifications of resonance circuits. It resulted in producing a preparation, which consists of the exciter, primary circuit, secondary circuit and a module for measuring.

The third aim is to take a measurement on this product and evaluation of characteristic from point of view of efficiency. Measured data were integrated into characteristics. The efficiency of transfer was measured depending on distance and used load. At the same time was also observed work frequency of product. Furthermore, another laboratory product was measured, in which was reached the efficiency more than 51%.

The thesis is divided into four main chapters, which can be thematically named as follows: the information, the theory, the draft and the measurement. The first two chapters deal with the theory and characterization of technologies of already applied systems mainly from transport. The following two chapters contain the description of proposal of the product and the very measuring of the efficiency.

KEY WORDS:

magnetic induction; wireless transmission; wireless charging; coil; Transmission efficiency; ZVS; impedance matching; resonant frequency

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Michalu Krbalovi za velmi vstřícný přístup při vedení práce, přípravě měření a za cenné rady při psaní bakalářské práce.

V Brně dne 5.6.2017

.....
podpis autora

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1. ÚVOD.....	13
2. SOUČASNÉ POHLEDY NA BEZDRÁTOVÉ TECHNOLOGIE	14
2.1 MOTIVACE UŽITÍ BEZDRÁTOVÝCH SYSTÉMŮ.....	14
2.1.1 VÝVOJ TECHNOLOGIÍ BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU	14
2.1.2 KOMFORT A ESTETIKA	14
2.1.3 MATERIÁLOVÁ NÁROČNOST A EKOLOGIE	15
2.1.4 PRODLOUŽENÍ ŽIVOTNOSTI A VYUŽITELNOSTI ZAŘÍZENÍ	15
2.1.5 SPECIÁLNÍ APLIKACE	15
2.2 SOUČASNÝ STAV TECHNOLOGIE	16
2.2.1 INDUKTIVNÍ VAZBA.....	16
2.2.2 STANDART QI Z WIRELESS POWER CONSORTIUM	16
2.2.3 DALŠÍ TECHNOLOGIE	16
2.2.4 PARAMETRY APLIKOVANÝCH INDUKČNÍCH SYSTÉMŮ	17
2.3 PROVOZ BEZDRÁTOVÝCH SYSTÉMŮ	18
2.3.1 VLV EM POLE NA LIDSKÝ ORGANIZMUS	19
3. PRINCIP PŘENOSU ENERGIE POMOCÍ MAGNETICKÉ INDUKCE.....	22
3.1 VLASTNÍ INDUKČNOST.....	25
3.2 VZÁJEMNÁ INDUKČNOST	26
3.3 ČINITEL VAZBY	27
3.4 ČINITEL JAKOSTI CÍVKY (QUALITY FACTOR).....	27
3.5 ZTRÁTY.....	27
3.6 ÚČINNOST PŘENOSU.....	28
3.7 POŽADAVKY NA NAVRHOVANÉ ZAŘÍZENÍ	28
4. NÁVRH LABORATORNÍHO PŘÍPRAVKU.....	31
5. MĚŘENÍ	34
5.1 POPIS METODY MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT	34
5.2 PŘÍPRAVEK 1 – MĚŘENÍ ÚČINNOSTI PŘENOSU ELEKTRICKÉ ENERGIE -	35
5.3 PŘÍPRAVEK 2 – MĚŘENÍ ÚČINNOSTI PŘENOSU ELEKTRICKÉ ENERGIE	39
6. DISKUZE.....	44
7. ZÁVĚR.....	45
7.1 VÝSLEDKY MĚŘENÍ – PŘÍPRAVEK 1.....	45
7.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ – PŘÍPRAVEK 2.....	46
POUŽITÁ LITERATURA	48
PŘÍLOHA A	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1: Velikost magnetického pole uvnitř a vně vodiče s proudovou hustotou 1000 A/m^2 sledovaný na radiální vzdálenosti 5 mm od středu vodiče pro názorné vysvětlení „dosahu“ magnetického pole [21].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-1: Cívka tvořena jedním závitem a vznik magnetického toku [17].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-2: Cívka reprezentovaná jedním vodičem na krátko pro vysvětlení principu přenosu [17]24</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-3: Jeden závit v nestacionárním magnetickém poli pro vysvětlení vzniku napětí [17]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-4: Dvojice cívek pro vysvětlení vzájemné magnetické vazby mezi aktivní a pasivní cívkou[20]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3-5: Tvar a rozložení magnetického pole diskové cívky s použitím feromagnetického materiálu na zadní straně. Výstup z programu Femm. [42].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-6: Příklad závislosti mezi činitelem vazby k a rezonanční frekvencí LC obvodu o daných parametrech. Vzhah pro závislost převzata z[42].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4-1: Schéma zapojení primární části obvodu ZVS v zapojení podle [38]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4-2: Přípravek 1 – Schéma zapojení sekundární části obvodu.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4-3: Přípravek 1 – Schéma zapojení sekundární části obvodu pro měření účinnosti při přidávání rezonanční kapacity</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 5-1: Závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence na změně hodnoty zátěže při vzdálenosti 5cm</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5-2: Graf závislosti účinnosti přenosu a pracovní frekvence při přidávání paralelní rezonanční kapacity na sekundární stranu obvodu.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 5-3: Přípravek 1 – uspořádání pracoviště před měřením.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5-4: Přípravek 1 – graf závislosti účinnosti přenosu a pracovní frekvence na proměnlivé zátěži při vzdálenosti 15 cm s přidanou rezonanční kapacitou.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5-5: Přípravek 1 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence na změně vzdálenosti od 6 do 33cm při neměnné zátěži.</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5-6: Přípravek 2 – Závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence při vzdálenosti 15 cm s proměnnou zátěží.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 5-7: Přípravek 2 – Závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence při vzdálenosti 20cm s proměnnou zátěží.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 5-8: Přípravek 2 – Závislost účinnosti a pracovní frekvence pro cívky uložené 5cm od sebe při vzájemném posunu středů.</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 5-9: Přípravek 2 – fotografie z měření</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 0-1: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence při vzdálenosti 10cm s proměnlivou zátěží.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 0-2: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence při vzdálenosti 5cm a vychýlení 25° s proměnlivou zátěží.</i>	<i>58</i>

<i>Obr. 0-3: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence při vzdálenosti 10 cm a vychýlení 25° s proměnlivou zátěží.</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 0-4: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence na proměnlivé zátěži při vzdálenosti 5 cm a natočením 50°</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 0-5: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence při vzdálenosti 10 cm a vychýlení 50° s proměnlivou zátěží</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 0-6: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence na proměnlivé zátěži při vzdálenosti 6 cm</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 0-7: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence na proměnlivé zátěži při vzdálenosti 10 cm</i>	<i>60</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 5-1: Přehled teoretických hodnot rezonančních frekvencí vypočtených z Thompsonova vztahu</i>	37
<i>Tab. 5-2: Přehled technických hodnot vlastního navrženého laboratorního přípravku s budičem ZVS</i>	39
<i>Tab. 7-1: Přípravek 2 – Tabulka maximálních hodnot účinností při daných vzdálenostech</i>	46
<i>Tab. 0-1: Nejvyšší přípustné hodnoty SAR a SA pro zaměstnance a ostatní osoby [16]</i>	51
<i>Tab. 0-2: Přípravek 1 – Naměřené hodnoty účinností a pracovní frekvence při vzdálenosti 5 cm</i>	51
<i>Tab. 0-3: Přípravek 1 – Naměřené hodnoty účinností přenosu s přidanou rezonanční kapacitou při vzdálenosti 10 cm</i>	52
<i>Tab. 0-4: Přípravek 1 – Naměřené hodnoty účinností přenosu s přidanou rezonanční kapacitou při vzdálenosti 15 cm</i>	52
<i>Tab. 0-5: Přípravek 2 – Naměřené hodnoty účinností přenosu při konstantní zátěži a změně vzdálenosti od 6 do 36 cm</i>	53
<i>Tab. 0-6: Přípravek 2 – Naměřené hodnoty účinností při vzdálenosti 10 cm s proměnnou zátěží</i>	53
<i>Tab. 0-7: Přípravek 2 – Naměřené hodnoty účinností přenosu při vzdálenosti 15 cm s proměnnou zátěží</i>	54
<i>Tab. 0-8: Přípravek 2 – Naměřené účinnosti přenosu při vzdálenosti 20 cm s proměnnou zátěží</i>	54
<i>Tab. 0-9: Přípravek 2 – Naměřené účinnosti přenosu při vzdálenosti 5 cm a vychýlení 25°</i>	55
<i>Tab. 0-10: Přípravek 2 – Naměřené účinnosti přenosu při vzdálenosti 10 cm a vychýlení 25°</i>	55
<i>Tab. 0-11: Přípravek 2 – Naměřené účinnosti přenosu při vzdálenosti 5 cm a vychýlení 50°</i>	56
<i>Tab. 0-12: Přípravek 2 – Naměřené účinnosti přenosu při vzdálenosti 10 cm a vychýlení 50°</i>	56
<i>Tab. 0-13: Přípravek 2 – Naměřené účinnosti přenosu energie při vzájemném posunu středů dvou rovnoběžných cívek ve vzdálenosti 5 cm od sebe</i>	57

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

B	magnetická indukce [T]
E ₂	přenesená energie [J]
ELF	velmi nízká frekvence (z angl. extremely low frequency)
EM pole	elektromagnetické pole
EMC	elektromagnetická kompatibilita
EU	evropská unie
EZ	elektrické zařízení
f ₀	rezonanční (pracovní) frekvence [Hz]
GHz	jednotka frekvence 1 x 10 ⁹ Hz
H	intenzita magnetického pole [A/m]
I	proud vodičem [A]
IARC	mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny
ICNIRP	mezinárodní komise pro ochranu před neionizujícím zářením
ISM	pásmo frekvencí pro průmyslové, lékařské a vědecké přístroje
kHz	jednotka frekvence (1000 Hz)
kW	jednotka výkonu (1000 W)
l	délka [m]
L	indukčnost cívky [H]
LC	rezonanční obvod s kondenzátorem C a cívkou L
m	jednotka délky
M	vzájemná vazba cívek [H]
MHz	jednotka frekvence 1 x 10 ⁶ Hz
N	počet závitů [-]
NF	nízká frekvence
NF	zdroj signálu o nízké frekvenci
OLEV	způsob pohonu bez akumulčních jednotek
P	výkon [W]
Q	činitel jakosti cívky [-]
Qi	standard pro bezdrátové nabíjení vytvořený sdružením Wireless Power Consortium
R	odpor [Ω]
S	plocha [m ²]
SAR	měrný pohlcený výkon (z angl. specific absorption rate)

t	čas [hod, min, s]
t_z	doba zotavení polovodičové diody
U	napětí [V]
v	rychlost pohybu [m/s]
WHO	světová zdravotnická organizace
Wi-Fi	bezdrátová komunikace počítačových sítí
WiTicity	technologie bezdrátového přenosu energie
X	počet dílků na stupnici měřidla
ZVS	zero voltage switching
α	výchylka ručičky na analogovém měřidle
η	účinnost zařízení [-]
μ	permeabilita [H/m]
μ_0	permeabilita vakua $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]
μ_r	relativní permeabilita prostředí [-]
Φ	magnetický tok [Wb]
χ	činitel vazby
Ψ	spřažený magnetický tok vícezávitové cívky [Wb]

1. ÚVOD

Elektrická energie se stala všední součástí našeho života poměrně nedávno. Člověk si svou vynalézavostí usnadňuje běžné činnosti a tím posouvá své možnosti vždy o krok dále.

Elektrifikace společnosti přinesla řadu výhod a možností zvolit si směr vývoje a technického pokroku. Zdánlivě jednoduché principy elektromagnetizmu nám donedávna byly skryty. Díky schopnostem a pracovitosti několika jedinců nám bylo umožněno využívat více přírodních sil. Dnes jsme již řadu z nich zkrotili využíváme je v běžném životě. Díky poznávání principů přírodních sil můžeme vyvíjet novou technologii a každou technologii můžeme přeměnit v užitek.

Elektrická energie, tak jak ji známe dnes, nám přináší mnoho užitku, avšak s sebou nese některá úskalí. Umíme ji získat přeměnou z jiných druhů energií, můžeme ji přenést, přeměnit na teplo nebo světlo a umíme i nepatrné množství skladovat. Přitom přenos a skladování pracně vyrobené elektrické energie nám činí největší potíže.

Za účelem přenosu elektrické energie mezi výrobnou a místem spotřeby stavíme složité konstrukce stožárů, vedení a pomocných technologií, jen abychom udrželi současný komfort, na který si lidé zvykli. Jednou z možností, jak zmenšit potřebu instalování složité sítě rozvodných a distribučních zařízení, je najít jiný způsob přenosu elektrické energie. Bezdrátový přenos je velmi populární termín a také jedno z možných řešení, prozatím jen na malé vzdálenosti, které by mohlo přispět k omezení nutnosti používání vodičů u některých technologií.

2. SOUČASNÉ POHLEDY NA BEZDRÁTOVÉ TECHNOLOGIE

Svět bez vodičů nadchne nejednoho technicky založeného člověka. Bez vodičů se zdá vše snazší. To většina z nás měla možnost pocítit při přechodu z pevných linkových telefonů na mobilní zařízení. Svět se stal o něco variabilnějším, rychlejším a zábavnějším místem pro majitele mobilních zařízení.

Při pohledu na bezdrátové technologie můžeme provést jednoduché rozdělení na:

- Datové přenosy, signály, informace.
- Silové přenosy, napájení, výkon.

Přenos informací je dnes značnou částí bezdrátový. Vysílače, rádia, satelitní technologie, telekomunikace, měření, televize, internet, data, *Wi-Fi (Bezdrátová komunikace)*. To je výčet dnes dobře známých a využívaných aplikací bezdrátového řešení.

V druhé části máme na mysli zejména napájení strojů a přístrojů. Protože nás zajímá především přenos výkonu, tedy silové aplikace napájení nebo nabíjení, bude hledáno řešení, při kterém je kladen důraz na účinnost. Jen tak je možné připravovat půdu pro možné využití v průmyslu a dopravě.

2.1 Motivace užití bezdrátových systémů

Každá technologie prochází vývojem, ve kterém z primitivních základů a předpokladů je možné vypořádat nedostatky a zapracovat je do dalšího stupně technologie. Tento proces je neustávající a je hnán potřebami dané doby. Co je pro tento vývoj velmi důležité, je dostatek zdrojů. Zdroje lidské, materiální, informační a energetické. Civilizace se nedokáže vyvíjet bez těchto zdrojů, a proto je potřeba jimi šetřit, zdokonalovat je a s respektem je využívat.

2.1.1 Vývoj technologií bezdrátového přenosu

Největších změn si v současné době můžeme všimnout zejména u drobných zařízení. Telefony, sluchátka, elektrické zubní kartáčky, chytré hodinky, to vše jsou produkty rychle se vyvíjejícího odvětví elektroprůmyslu s velkou konkurencí na trhu.

Nasazení technologie bezdrátového nabíjení je zde spíše otázkou trendu, marketingu, komfortu a luxusu, který si kupujeme společně se zařízeními. Mluvíme zde o přenosu energie v řádu několika wattů na vzdálenost několika milimetrů až centimetrů, což z původních očekávání „bezdrátového světa“ dělá jen vylepšení způsobu nabíjení. Bezdrátovost potom ztrácí na kráse, když si uvědomíme, že je stále zařízení „upoutáno“ k samotné nabíjecí stanici. Ta je přitom běžně připojena do sítě kabelem. Celá technologie není tak blýskavá, jak by se na první pohled mohlo zdát.

2.1.2 Komfort a estetika

Jestliže sestrojíme zařízení, které nepotřebuje jakýkoli lidský zásah před použitím kvůli napájení, potom odpadá jakékoli skladování přírodního kabelu na napájení, hledání zásuvek a zapojování do sítě, zmenšuje se počet potřebných přípojních míst apod. Užívání je velmi jednoduché, pohodlné, automatické a může být instalováno v libovolných prostorech či plochách (kancelářské stoly, linky, palubní desky, interiérové vybavení vozidel, vozovky, povrchy parkovišť, odkládacích ploch, skladů). Odstranění několika viditelných kabelů napomůže estetice a zvýší přehlednost pracoviště. V případě přenášení větších výkonů, např. v automobilovém

průmyslu při nabíjení elektromobilů, je vysoká míra komfortu zajištěna instalací na parkovacím místě a možností automatického parkování vozidla. Nepotřebné se stávají všechny akce připojování a manipulace s kabely, zajišťování bezpečného uložení zařízení v místě instalace, izolování, zabezpečení proti přírodním jevům jako deští mrazu, stárnutí izolací, výměny opotřebovaných pohyblivých částí nebo konektorů.

2.1.3 Materiálová náročnost a ekologie

Ruku v ruce jdou společnou cestu materiály a ekologie. Bezdrátové řešení nabízí na první pohled zdánlivou úsporu v materiálech. Je třeba si ale uvědomit, že tvrzení nemusí být tak jednoznačné. „Odstraněním kabelu“ ušetříme materiál vodiče, izolace a ochranné prvky, pájecí materiál na konektorech a samotný konektor. Na druhou stranu musíme počítat s tím, že vysílací stanice (nabíječka, napájení) a přijímač instalovaný v zařízení mohou být o něco náročnější v použité konstrukci a materiálech, než jednoduchý vodič. Při požadavku na výrobu polovodičů berme v úvahu využívání nových technologií, které jsou závislé na materiálech, a tyto materiály je třeba získat nebo vyrobit. Tím se dostáváme zase o něco blíže k hranicím mezi ekologií a úsporou.

2.1.4 Prodloužení životnosti a využitelnosti zařízení

Budeme-li si všimnout kritických bodů běžného používání jednotlivých zařízení, shledáme při využití bezdrátového řešení několik výhod použití bezdrátového systému. Jedna z nich je možnost absence konektorů. Konektor tvoří jedno z nejvíce namáhaných míst. Je mechanicky opotřebováváno, je náchylné k usazování nečistot, tvorbě oxidačních vrstev, a proto společně se stářím zařízení roste i jeho poruchovost, ztráty teplem jsou větší, spolehlivost klesá. Absence konektorů by zvýšila životnost zařízení a jeho odolnost proti vlhkosti nebo nečistotám a zmenšila by mechanické zatěžování poblíž uložení konektoru. Pokud by potom nabíjení probíhalo i v průběhu běžného provozu, získali bychom větší volnost v používání malých mobilních zařízení.

Zajímavým řešením může být použití superkondenzátorů, ale to zatím není tak dostupné pro velké výkony. Pro aplikaci tohoto řešení u větších zařízení, jakou jsou např. automobily, se nabízí alespoň částečné dobití za provozu, které má za následek zvýšení dojezdu vozidla. Tato drobná zlepšení nejsou nijak převratná, ale mohou plnit funkci dalšího článku v technické evoluci a být základem pro zcela nové systémy nabíjení.

2.1.5 Speciální aplikace

Speciálními aplikacemi se rozumí využití bezdrátového napájení v místech, kde nelze najít řešení pomocí kabelu nebo překáží systém konektorů a vodičů.

To nastává zejména v důlních aplikacích, kde jsou přítomny agresivní látky, které poškozují samotné izolace zařízení. Použitím kabelového řešení vzniká riziko (jiskra, oblouk, nadměrné zahřívání) vzniku požáru nebo interakce s plyny. Bezdrátové řešení by umožnilo snížení těchto rizik a při správném řešení i delší životnost zařízení, protože by mohlo být vybaveno krytím s vyšší odolností.

Problém vyvstává při použití konektorového řešení ve výrobních aplikacích s agresivními látkami při výrobě paliv, maziv, kyselin a zásad a dalších chemikálií. Izolace jsou odolné v omezeném intervalu teplot a s rostoucími teplotami jejich odolnost velmi rychle klesá.

Další z mnoha speciálních aplikací je v lékařství. Kabelové napájení kardiostimulátorů s sebou nese riziko zanesení infekce v místech prostupu kabelu tkání. Bez přítomnosti kabelu by se snížilo riziko infekce, ale zároveň by se zvýšila expozice tkání. Vliv na tkáň je stále ještě posuzován a

hodnoty intenzit polí jsou definovány s ohledem na poznatky, které vyplývají z dlouhodobých studií. Více je tato otázka popsána v části 2.3.1 *Vliv EM pole na lidský organizmus*.

2.2 Současný stav technologie

Bezdrátové nabíječky mobilních zařízení se objevují až v posledním desetiletí. Běžně k dostání jsou bezdrátové nabíječky mobilních telefonů ve formě podložky, na kterou se zařízení pokládají. Těsnou blízkostí vysílače i přijímače dojde k přenosu energie a nabití zařízení. Každé nabíjení je však zápas s účinností a časem. Abychom zajistili co nejvyšší účinnost, měly by být cívkami co nejvíce vycentrované a nacházet se co nejbližší u sebe. Každý milimetr vzdálenosti navíc snižuje účinnost. Některé aplikace jsou provedeny jako součást pracovní plochy. Při takovémto přenosu řádově v jednotkách wattů jsou ztráty malé a dá se říci i zanedbatelné z pohledu jednoho uživatele, ale v masovém nasazení jsou i jednotky procent velmi výrazné hodnoty energií, které nenávratně ztratíme. [2]

2.2.1 Induktivní vazba

Zařízení k přenosu energie za účelem napájení zařízení můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin z pohledu vazby.

- Sestavy s prostou induktivní vazbou.
- Sestavy s rezonanční induktivní vazbou.

Při využití vlastností rezonance dochází k výměně energie mezi cívkami naladěnými na stejnou frekvenci. Ostatní předměty jsou ovlivňovány minimálně, nebo indukují jen malé proudy. Účinnost a přenosová vzdálenost tak nejvíce závisí na velikosti rezonátorů. [25]

2.2.2 Standart Qi z Wireless Power Consortium

Induktivní vazba je hlavní myšlenkou organizace WPC (z anglického Wireless Power Consortium). Je to organizace seskupující výrobce elektrických zařízení, u kterých použití bezdrátového nabíjení připadá v úvahu. Cílem je definovat a rozvíjet standart tak, aby všechna zařízení splňující podmínky tohoto standartu byla kompatibilní bez ohledu na výrobce. Spolupráce zde probíhá se společnostmi jako LG, Nokia, Panasonic, Toshiba a další. [24] Nevýhodou tohoto řešení však je příliš malá vzdálenost mezi cívkami, řádově do několika milimetrů (jednotky centimetrů). [24] Jako další standardy můžeme uvést *A4WP (WiTricity)*, *PMA (Power Matters Consortium)*, *u Beam* [27], [30]. Jednou z důležitých vlastností zařízení splňujících tento standart je schopnost komunikace nabíječky a nabíjeného zařízení. Zařízení potom nemusí být aktivní, pokud není využíváno a taktéž může toto zařízení hlídat parametry nabíjeného spotřebiče.

2.2.3 Další technologie

Zejména mezi výrobci mobilních zařízení se rodí nové nápady spíše drobného charakteru. Tady za zmínku stojí technologie *WiPower Qualcomm*, která dle popisu dovoluje nabíjení i skrze kovový kryt, což pro běžnou indukční smyčku představuje omezení. Je uváděno, že zařízení pracuje na „frekvencích tolerantních ke kovovým materiálům“. [29] Podrobnější popis chybí, ale protože informace pochází z roku 2015 a z pohledu běžného uživatele není tato technologie stále rozšířena, jde spíše o dílčí úspěch, který může být zahrnut do některých dalších standardů nebo výrobků.

Nabíjení přes *Wi-Fi* je možné pro velmi malé výkony u drobných zařízení. Tato technologie dokáže přeměnit výkon vyslaný jako *Wi-Fi* signál na použitelné hodnoty pro napájení. Nazývá se

„*POWIFI*“ (*Power over Wi-Fi*) [30]. Testována byla kamera na vzdálenost 6 m, která díky dodané energii z Wi-Fi vysílače mohla pořídit jeden snímek za 35 min. Na vzdálenost 60 cm se povedlo autorům získat 100 μW , při 3 m vzdálenosti lze čerpat 10 μW . Z hlediska napájení běžných spotřebičů zde nezískáváme široké uplatnění, ale pro specializované aplikace, detekce, signalizace bez drátů zde vzniká pole využití. Zlepšení parametrů by mohlo nastat po použití směrové antény.

Technologie *WattUp* slibuje nabíjení zařízení na 5 m. [31] Frekvence nabíjení je mezi 5,7 GHz a 5,8 GHz, tedy v ultra krátkých radiových vlnách. V současnosti je určen pro zařízení do 10 W. Mezi cílové spotřebiče jsou řazeny kamery, hodinky, telefony, tablety klávesnice, ovladače, sluchátka apod. Podle parametrů nabíjení má vysílač dodávat celkem 4 W současně pro 4 zařízení na vzdálenosti do 1,5 m a na 3,5 m by měl dodat čtyřem zařízením celkem 1 W. Softwarová správa cílů pravděpodobně na letiště, kavárny a restaurace, kde je možné připojení každého „spotřebitele“ spravovat. Technologie je nasazena od roku 2015 a k lidem se měla šířit už v roce 2016.

2.2.4 Parametry aplikovaných indukčních systémů

Čínská automobilka *BYD* vyrábí autobusy s bezdrátovým nabíjením od firmy *WAVE*. Jedná se o indukční řešení schopné provádět nabíjení na vzdálenost 20-25 cm. Přenesený výkon je 5 kW a účinnost přenosu je 90 %. Autobusy by měly být dodány do Kalifornie. Experimentální autobus byl provozován na Státní univerzitě v Utahu. [3]

Od roku 2011 v Jihokorejském institutu KAIST testují bezdrátové nabíjení vozidel s pohonem typu OLEV (elektrobus bez akumulátorových jednotek). Vodiče jsou 17 cm pod zemí a výkon 100 kW je možné dodávat trvale při účinnosti 75-80 %. Přenos probíhá při frekvenci 20 kHz. [3], [4].

Španělská společnost Endesa testuje dobíjení elektromobilů s cílem nabíjet elektromobil na 80% stav baterie za 15 min. K tomu vyvinula zařízení s možností přenášet výkon 30 kW. [35]

Dva indukčně nabíjené autobusy byly připojeny do flotily pro běžný linkový provoz regionálního dopravce Rhein-Neckar-Verkehr GmbH (RNV) v Německu. Při provozu je zde možnost přenášet až 200 kW. [34], [36]

Deployment kit WIT-3300 od společnosti WiTricity je plug-in řešení bezdrátového nabíjení pro vozidla. Při vzdálenosti 18 cm je účinnost 90 % pro přenos 3,3 kW. Uváděná pracovní frekvence je 145 kHz. [40]

Z malých aplikací můžeme jmenovat zařízení pro nabíjení telefonů a tabletů. Ikea nabízí samostatné jednotky nebo už aplikovaná řešení v nábytku, kde maximální výkon při indukčním nabíjení je 5 W. Jednotky podporují nabíjení všech zařízení s certifikací Qi [4]. Dalšími zařízeními s téměř totožnými parametry jsou nabíječky Samsung EP-NG930B, Gogen WCH 01C, SPIGEN F300W, lampa s nabíječkou Lea Phantom a další. [5], [6]

V roce 2007 bylo představeno řešení přenosu energie pomocí „elektromagnetické rezonance“. Týmům vědců z Massachusettského technologického institutu se povedlo přenášet po dobu 2 minut dostatek energie na svícení 60 W žárovkou. Podle zdroje [1] cívky rezonovaly na frekvenci 9,9 MHz. Umístěny byly tak, že měly stejnou osu cívek, každá cívka měla v průměru 60 cm a přenos probíhal na vzdálenost 2 m s účinností 40 %. Pro tento princip byl později užíván pojem *WiTricity*. Z důvodů možného využití v elektronice byl tento princip dále zkoumán společností *Intel*, *Toyota*, *Samsung* a další.

Aplikace do dopravy představuje zvládnutí několika kritických bodů. Automobil je vybaven cívkou, která je od indukční desky vzdálena deset až dvacet centimetrů. To se výrazně projevuje na účinnosti přenosu a prakticky nás zbavuje možností přenášení velkého výkonu bez užití silných polí. Při velké vzdálenosti je navíc nutné instalovat mnohem větší cívky velikosti okolo 80 cm. Zajímavým řešením je projekt z institutu Fraunhofer. Nabíjecí pole je umístěno v přední části vozu pod nárazníkem. Při parkování je vozidlo nárazníkem přiblíženo do těsné blízkosti k nabíjecí aparatuře tak, že se vzdálenost pohybuje v řádu jednotek centimetrů. Potom může probíhat nabíjení při parametrech 3 kW přenášeného výkonu za účinnosti 95 % a cívka je přitom velká jen 10 cm. [7]

Testované zařízení firmy Toyota s výkonem 2 kW pracuje s frekvencí 85 kHz a vstupním napětím 200 V. U elektromobilu slibuje nabití baterií za 90 minut. [33]

V diplomové práci [25] Západočeské univerzity v Plzni byl otestován jednoduchý bezdrátový systém se dvěma cívkami (20 závitů), kde byla účinnost stanovena na 69,9 % na vzdálenosti 105 mm. Pracovní frekvence (rezonance obvodu) byla mezi 42,88 kHz a 55,60 kHz. Zařízení bylo konstruováno se systémem odboček, kterým se hledalo vhodné rozložení parametrů.

Přenášením výkonů řádově jednotkách nebo desítkách wattů může při těchto frekvencích vznikat dostatečně silné nežádoucí a nebezpečné pole. Vystavování tkání polím se věnujeme v kapitole 2.3.1. Stejná pole jsou potom nežádoucí i z pohledu EMC (*elektromagnetická kompatibilita*). Stávají se zdrojem rušení a mohou ohrozit provozuschopnost některých důležitých zařízení ve svém okolí. Této problematice se věnujeme v následující kapitole.[1]

2.3 Provoz bezdrátových systémů

Aby bylo možné zajistit rozvoj bezdrátových systémů, je nutné stanovit pravidla. Z vlastní iniciativy vznikla řešení se snahou standardizovat užívané parametry tak, aby byla zařízení kompatibilní. Druhá stránka věci je pohled legislativy a stanovení pravidel provozování tak, aby neohrozila provoz jiných zařízení. Tomuto tématu se věnuje EMC Legislativa a Elektromagnetická kompatibilita

Každé zařízení zakoupené nebo provozované na území státu se závaznými pravidly EMC musí mít platnou certifikaci. K tomu slouží příslušné úřady vydávající „*prohlášení o shodě*“. Certifikované zařízení musí splňovat limity definované dle předpisů daného státu a úřadu. Vzhledem ke stále probíhající harmonizaci legislativy a norem používaných na území EU jsou tyto limity podobné pro většinu zemí. [1]

Každé elektrické zařízení je potenciálním zdrojem rušení pro své okolí. Rušením je myšlen soubor nežádoucích elektromagnetických jevů, které definujeme podle normy [26] následovně:

„Jakýkoliv elektromagnetický jev, který může zhoršit provoz přístroje, zařízení nebo systému a nebo nepříznivě ovlivnit živou nebo neživou hmotu.“

Aby zařízení vyhovělo zkouškám a bylo odolné zejména vůči reálným podmínkám, jsou definovány veličiny jako úroveň odolnosti a úroveň vyzařování nebo meze odolnosti a meze vyzařování. Je třeba brát ohled na metody zkoušky, které předpokládají stav v reálném prostředí, nejsou však dokonale přesné a liší se svou vhodností jednotlivých aplikací. V reálných instalacích se vyskytuje více zdrojů různé povahy rušení a platí zde princip superpozice zdrojů rušení. Z toho důvodu zavádíme pojem rezerva kompatibility. Tedy jakýsi vztah mezi mezi odolnosti a mezi vyzařování. Podrobnější informace jsou k nalezení přímo v normě [26].

K rušení dochází vazební cestou. Je to spojnice mezi zdrojem rušení a zařízením citlivým na toto rušení. Nejčastěji se setkáváme s vazební cestou vodivou, tedy pomocí vodivého spojení (vodič) a nebo pomocí volného prostoru (vzduch). V druhém případě je to problematika bezdrátových systémů, komunikace, bezdrátového nabíjení a také vzájemná interference různých zdrojů. Obě vazební cesty se mohou vyskytovat současně. Dnes jsou téměř všechna EZ (elektrická zařízení) při nabíjení spojena se sítí. U těchto EZ lze využít bezdrátového spojení např. za účelem komunikace s dalšími EZ. S přibývajícím množstvím zařízení se může více projevit princip superpozice a je třeba, aby používaná zařízení byla proti tomuto jevu dostatečně odolná.

Zjednodušeně můžeme tato zařízení označit jako „elektromagneticky kompatibilní zařízení“. Definice EMC je zavedena taktéž v normě. Hlavním cílem je schopnost zařízení fungovat vyhovujícím způsobem ke svému elektromagnetickému prostředí (okolí) a schopnost omezit vytváření nepřijatelného rušení kteréhokoliv zařízení ve svém okolí. [26]

Přístroje, stroje nebo zařízení ISM (zařízení využívající vysokofrekvenční pole) jsou všechny průmyslové a vědecké přístroje využívající vysokofrekvenční pole, které mohou být zdrojem nežádoucího rušení. Spadá sem většina přístrojů a strojů s výjimkou telekomunikačních zařízení. Pro ty jsou podmínky definované odděleně. V průmyslové praxi jsou to především přístroje pro indukční ohřev materiálů, obloukové svařování, jednotky jiskrového obrábění a další.

Podle normy ČSN EN 550 11 ed.3 [32] pro průmyslová, vědecká a lékařská zařízení, týkající se jejich rušení od 9 kHz do 400 MHz, členíme do skupin a tříd. Zařízení třídy A je vhodné pro provoz v průmyslu nebo zařízení přímo připojené na rozvodnou síť nízkého napětí, tedy mimo domácnosti. Při používání v domácnosti by nemusela být zajištěna EMC s ostatními stroji a přístroji. Naopak zařízení třídy B je vhodné pro provoz v domácnostech a nebo může být připojeno na síť nízkého napětí. „Zařízení třídy A musí splňovat meze třídy A.“[32] Analogická definice existuje i pro třídu B.

U fungujících zařízení popsaných v kapitole 2.2.4 bylo nejčastěji užito obvodů s rezonanční frekvencí 40–170 kHz, s výjimkou 9,9 MHz v případě Massachusettského technologického institutu. V těchto řádech budeme hledat řešení i pro námi navrhovaný laboratorní přípravek. Pokud bychom uvažovali o nasazení do praxe, je nutné specifikovat, zda jde o zařízení průmyslové nebo pro domácí použití. Tím by se vymezily limity pro rušení a zařízení by jim muselo vyhovět.

Při těchto frekvencích je nutné dodržet maximální hodnotu rušení pro magnetickou složku. Podle normy ČSN EN 55011 ed.3 jsou mezní hodnoty pro magnetickou složku rušivého EM vyzařování pro indukční a varná zařízení určená ke komerčnímu používání uvedena v Tab. 12 obsažené v této normě. Hodnota meze pro měřicí vzdálenost 3 m je 69 dB(μ A/m) pro kmitočtový rozsah 9-70 kHz. Této hodnoty se u malých zařízení v laboratoři, kvůli jejich malému výkonu, nemusíme obávat.

2.3.1 Vliv EM pole na lidský organizmus

Zdravotní limity pro neionizující záření jsou v současné době posuzovány pouze z pohledu tepelných účinků na organizmus. Tepelné účinky EM pole závisí na efektivních hodnotách jeho složek. [13] Limity vycházejí z doporučení Mezinárodní komise pro ochranu před neionizujícím zářením ICNIRP (1999). Jiné než tepelné účinky zahrnuté v současných předpisech Ministerstva zdravotnictví nejsou. O dlouhodobých účincích podlimitních dávek potom můžeme jen diskutovat. Představu o vlivu EM pole si můžeme udělat z výsledku zasedání Mezinárodního úřadu pro výzkum rakoviny (IARC, jež je součástí WHO) z května roku 2011 ve francouzském Lyonu, kde bylo EM pole zařazeno mezi možné karcinogeny skupiny 2B – potenciálně karcinogenní pro

člověka. [8], [9], [10], [11] Podle některých zdrojů je ale toto zařazení neodůvodněné, protože z výsledků studií nevyplývá přímá souvislost mezi neionizujícím zářením z mobilních zařízení a rakovinou v oblasti hlavy. Karcinogeneze vysokofrekvenčních *EM* polí v rozsahu od 100 kHz do 300 GHz nebyla prokázána, ale je připouštěn fakt, že je třeba dalšího výzkumu. [11], [12]. Při zkoumání vlivů polí *ELF* na člověka (pole s velmi malou frekvencí) byla zjištěna slabá interakce některých tělních okruhů. Patogenní vlivy doposud prokázány nebyly. [23]

Ze současných studií je tedy zřejmé, že se vysokofrekvenční pole projevuje při interakci s tkání pouze zvýšením teploty. Předaná energie je zhruba stokrát menší než je energie tepelného pohybu molekul v tkáni. [13] V tomto ohledu je součástí uvedení výrobku na trh nutná certifikace a splnění legislativy a norem. Součástí měřených veličin je i „měrný absorbovaný výkon“ (SAR- Specific Absorption rate). Je definovaný jako výkon P , který přijme tkáň o jednotkové hmotnosti s jednotkou [W/kg]. Podle frekvence zařízení je nutné zohlednit způsob určení absorbované energie. Pravidla pro určení jsou zakotvena v *Nařízení vlády č. 1/2008 Sb.*, o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, nabývající účinnosti 30.4.2008. Toto nařízení stanovuje limity pro osoby a pracovníky vystavené *EM* polím. [32]

Z pohledu bezdrátového přenosu energie za účelem nabíjení se nejčastěji pohybujeme v oblastech 50 kHz až 150 kHz. Z hlediska tepelných účinků na tkáň je pro nás určení měrného absorbovaného výkonu (SAR) dostatečnou mezí. Pro příklad jsou zde uvedeny nejvyšší přípustné hodnoty *SAR* a *SA* (absorbované energie) pro zaměstnance a ostatní osoby. [16] Pro ostatní osoby, tedy i uživatele bezdrátových nabíjecích zařízení, je limit *SAR* 0,08 W/kg a pro zaměstnance pracující taktéž s vysokofrekvenčními zařízeními je limit *SAR* 0,4 W/kg. Pokud bude polí vystavena jen malá část těla (obvykle u mobilních telefonů), je možné zvýšit meze *SAR* na 2 W/kg pro ostatní osoby (4 W/kg pro ruce, chodidla a kotníky). V případě zaměstnanců můžeme zvýšit limity *SAR* na 10 W/kg (20 W/kg). [14], [15], [16].

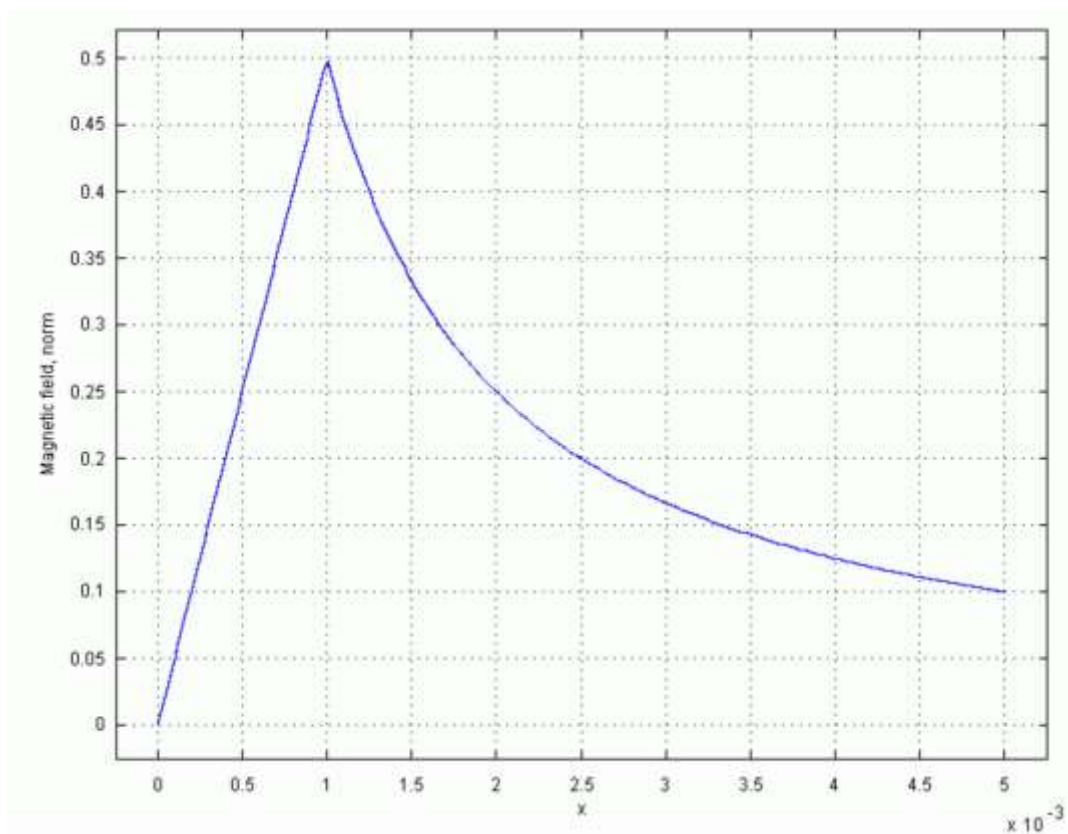
Frekvence 0-100 kHz považujeme za nízké frekvence (*NF*). [8] Od 100 kHz jsou to potom zdroje vysokofrekvenční. Do *NF* oblasti spadá převážně silová část elektrifikace – rozvody a napájení. Frekvence nad 100 se týká především terekomunikací a datových přenosů. *EM* pole má dvě základní složky. Složka magnetická je charakterizována magnetickou indukcí B [T] a složku elektrickou charakterizuje intenzita elektrického pole E [V/m]. Při vysokých frekvencích je vyšší složka elektrická a naopak při nízkých frekvencích převažuje složka magnetické indukce.

Pole „dosáhne“ pouze do určité vzdálenosti od vodiče (zdroje *EM* pole). Velikost intenzity pole nelineárně klesá se vzdáleností od zdroje, viz *Obr. 2-1*.

Intenzita magnetického pole v dané vzdálenosti od středu cívky potom odpovídá následujícímu vztahu. [22]

$$H = \frac{N \cdot I \cdot R^2}{2 \cdot (R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (\text{A/m}; -, \text{A}, \text{m}, \text{m}) \quad (2.1)$$

Kde H je intenzita magnetického pole, N je počet závitů, I procházející proud, R střední poloměr cívky a x je vzdálenost od středu cívky. Současně předpokládáme, že délka prstence je zanedbatelná vzhledem k poloměru.

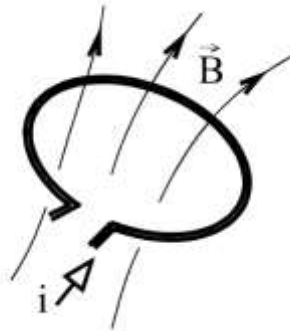


Obr. 2-1: Velikost magnetického pole uvnitř a vně vodiče s proudovou hustotou 1000 A/m^2 sledovaný na radiální vzdálenosti 5 mm od středu vodiče pro názorné vysvětlení „dosahu“ magnetického pole [21]

3. PRINCIP PŘENOSU ENERGIE POMOCÍ MAGNETICKÉ INDUKCE

K popisu principu přenosu energie pomocí magnetické indukce použijeme fyzikální zákony běžně známé elektrotechniky (elektrodynamiky). Nejdříve uvedme veličiny a mechanismy, se kterými se při návrhu setkáváme.

Ampérův zákon definuje silové účinky na vodič v magnetickém poli a Ampérovo pravidlo pravé ruky určí orientaci magnetických pólů cívky protékané proudem. Pro popis vzniku magnetického toku uvažujme svinutý vodič do kruhového tvaru reprezentující cívku o jednom závitě



Obr. 3-1: Cívka tvořena jedním závitěm a vznik magnetického toku [17]

Pokud vodičem cívky prochází statický proud, vytvoří se kolem vodiče magnetické pole. Směr vektoru magnetické indukce B určíme Ampérovým pravidlem pravé ruky. Položíme pravou ruku na závit tak, aby palec ukazoval dohodnutý směr proudu vodičem. Prsty znázorňují vektor B jednoho vodiče. Současně můžeme určit i magnetické póly, tedy orientaci cívky. Prsty položíme tak, aby ukazovaly směr proudu v cívce, palec potom značí směr severního magnetického pólu cívky.

Intenzita magnetického pole H s jednotkou [$A \cdot m^{-1}$] je veličina charakterizující magnetické pole cívky. Je ovlivněna materiály, kterými vektor intenzity magnetického pole prochází. Pomocí intenzity magnetického pole zapíšeme vztah pro magnetickou indukci B takto [17]:

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \text{ (T; -, A/m)} \quad (3.1)$$

kde μ je magnetická permeabilita,

μ_r je relativní permeabilita prostředí a

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ je permeabilita vakua, tedy fyzikální konstanta

Intenzita magnetického pole odpovídá velikosti proudu procházejícího závitěm cívky.

Působení magnetické indukce B plochou S využijeme tak, že do směru toku vložíme cívku, která zajistí přeměnu magnetického toku Φ zpět na proud využitelný ve spotřebiči. Tím dojde k přenosu vzduchovým médii bez použití vodiče. Přenos energie může být uskutečněn jen s časově proměnným polem.

Pro běžné výpočty magnetického toku Φ je možné uvažovat zjednodušený vztah za předpokladu, že jsou vektory magnetické indukce a normály plochy orientovány souhlasně.

$$\Phi = B \cdot S \text{ (Wb; T, m}^2\text{)} \quad (3.2)$$

Další velmi důležitou veličinou je indukčnost cívky L s jednotkou [H]. Tu můžeme definovat pomocí magnetického toku Φ vzniklého působením proudu i při průchodu závitů cívky.

$$L = \frac{\Phi}{i} \text{ (H; Wb, A)} \quad (3.3)$$

Indukčnost cívky s více závitů je určena jako:

$$L = \frac{\psi}{i} \text{ (H; Wb, A)} \quad (3.4)$$

kde ψ je tzv. spřažený magnetický tok všech závitů cívky a i je proud vodičem.

Uvažujeme-li magnetické pole bez rozptylu a mají-li všechny závity stejnou plochu, potom

$$\psi = N \cdot \Phi \text{ (Wb; -, Wb)}. \quad (3.5)$$

Velikost indukčnosti cívky L závisí na uspořádání vodičů, geometrických rozměrech a vlastnostech použitých materiálů ve vodiči, jádře a okolí. [18] Indukčnost tedy můžeme popsat následujícím vztahem.

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{S}{l} \text{ (H; H/m, -, -, m}^2\text{, m)} \quad (3.6)$$

kde μ_0 , μ_r je permeabilita daného prostředí viz vztah,

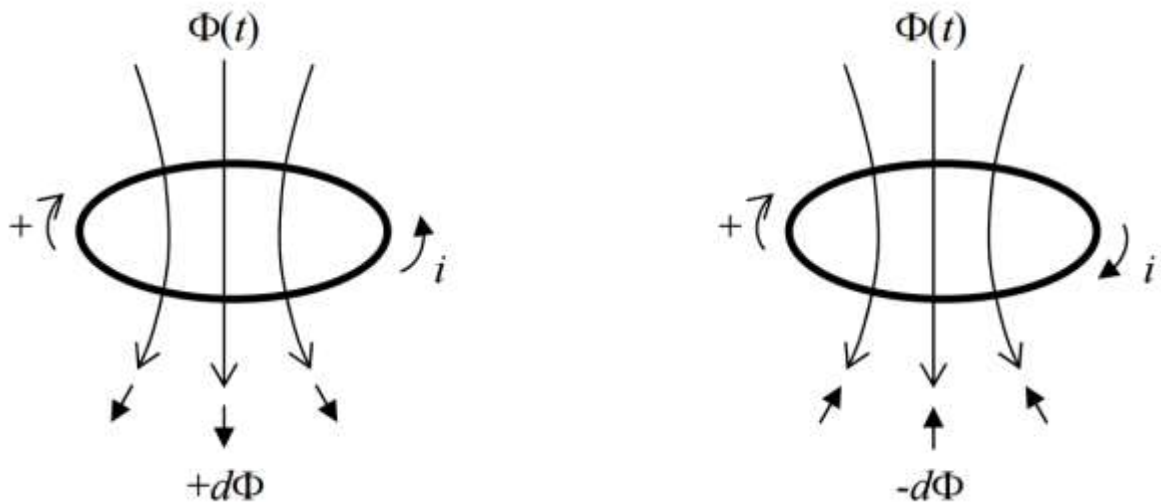
N je počet závitů,

S je plocha jedné smyčky a l délka cívky

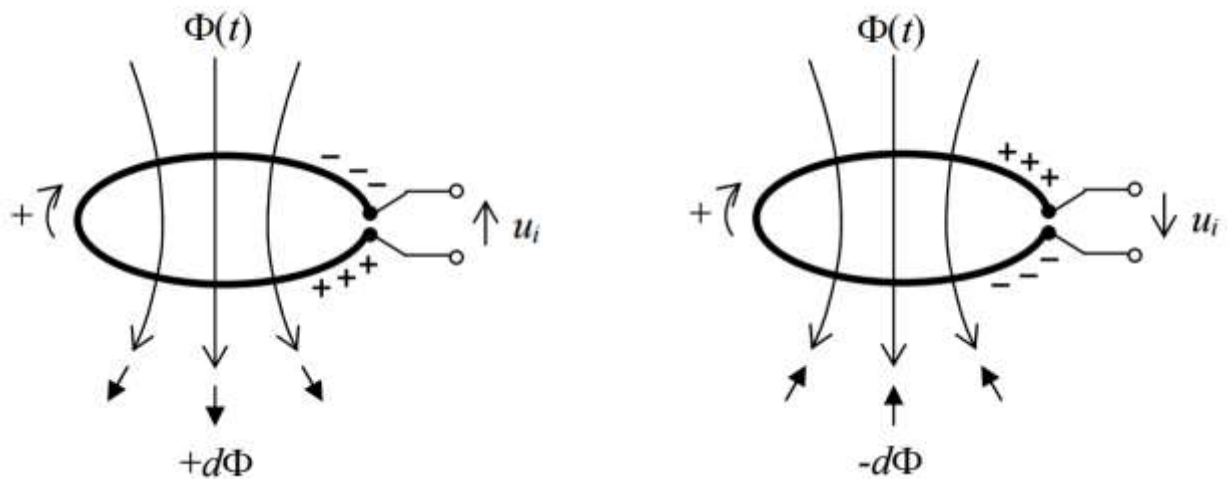
Chceme-li energii z magnetického pole cívky využít, je nutné do jejího pole vložit cívku. Pro názornost máme cívku reprezentovanou jedním závitů na krátko, viz *Obr. 3-1*.

Na vlevo je naznačena orientace smyčky šipkou se znakem „+“. Směr respektuje Ampérovo pravidlo pravé ruky, protože je tento směr spjat s magnetickým tokem.

Z Faradayova indukčního zákona víme, že každá blízká změna magnetického toku vyvolává ve smyčce proud, který silově působí proti této akci. V následujícím vztahu pro indukovaný proud ve smyčce uvažujeme elektrický odpor vodiče R . Vyvolaný proud potom závisí na změně magnetického toku v čase a tomto odporu.



Obr. 3-2: Cívka reprezentovaná jedním vodičem na krátko pro vysvětlení principu přenosu [17]



Obr. 3-3: Jeden závit v nestacionárním magnetickém poli pro vysvětlení vzniku napětí [17]

$$i = -\frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt} \text{ (A; } \Omega, \text{Wb,s)} \quad (3.7)$$

Záporné znaménko značí směr proudu proti původní akci, R je elektrický odpor vodiče a $\frac{d\Phi}{dt}$ je časová změna magnetického toku.

Změnou magnetického toku Φ nyní dojde k pohybu nabitých částic k místu rozpojení a tím ke vzniku indukovaného napětí u_i . Toto indukované napětí je potom shodné s vnitřním napětím zdroje, tedy napětím naprázdno. Pokud připojíme mezi oba rozpojené konce závitů Obr. 3-3 spotřebič, začne procházet proud.

$$u_i = \frac{d\Phi}{dt} \text{ (V; Wb,s)} \quad (3.8)$$

Z praktických aplikací víme, že zařízení jako transformátory nebo motory jsou tvořeny větším množstvím závitů. Výsledné indukované napětí je potom rovno součtu všech příspěvků od každého závitu.

Indukování napětí můžeme dosáhnout i při pohybu přímého vodiče skrze magnetické pole. Velikost indukovaného napětí bychom určili ze vztahu (3.9). [17]

$$u_i = B \cdot l \cdot v \text{ (V;T,m,m/s)} \quad (3.9)$$

Taková aplikace ale není předmětem této práce. Využití by mohla najít v budoucích aplikacích například do nákladní dopravy v místech členitého terénu. Nákladní automobil by tímto způsobem kinetickou energii při sjezdu měnil na elektrickou a využil ji. Akumulovaná energie by byla využita při rozjíždění, chlazení či svícení.

Přenos pomocí magnetické indukce je podstata práce elektrických transformátorů, proto nám nyní poslouží jako model pro vysvětlení.

Transformátor je soustava cívek s magnetickou vazbou. Tou je magnetický spřažený tok. Primární vinutí vytvoří magnetický tok, a ten je materiálem jádra přiveden do dutiny sekundární cívkou. Magnetický tok indukující v sekundárním vinutí napětí je tzv. spřažený magnetický tok. Vlivem rozptylu magnetického pole některé siločáry neprotnou dutinu sekundárního vinutí a uzavřou se mimo ni. Proto spřažený tok je menší než původní magnetický tok primární cívkou ($\Phi_{sd} < \Phi$). Z toho důvodu je materiál jádra transformátoru vyroben z feromagnetika nebo trafoplechů s co největší relativní permeabilitou μ_r , aby siločáry magnetického toku byly vtaženy do jádra a prošly snáze dutinou sekundární cívkou.

3.1 Vlastní indukčnost

Indukčnost je charakteristická veličina cívkou (konstanta) udávající možnost cívkou akumulovat energii ve svém magnetickém poli.

Definujme tedy vlastní indukčnost jedné cívkou s N závity. Ve vodiči, smyčce nebo cívkou se indukuje napětí vždy, když v okolí dojde ke změně magnetického toku.

$$u_i = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \text{ (V;-;Wb,s)} \quad (3.10)$$

Následující vztah (3.11), který je uveden i v předchozí kapitole, je vyjádřením vlastní indukčnosti. Současně můžeme naznačit vztah mezi spřaženým magnetickým tokem a proudem, který jej vyvolal. [20]

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{S}{l} \text{ (H; H/m,-,m^2,m)} \quad (3.11)$$

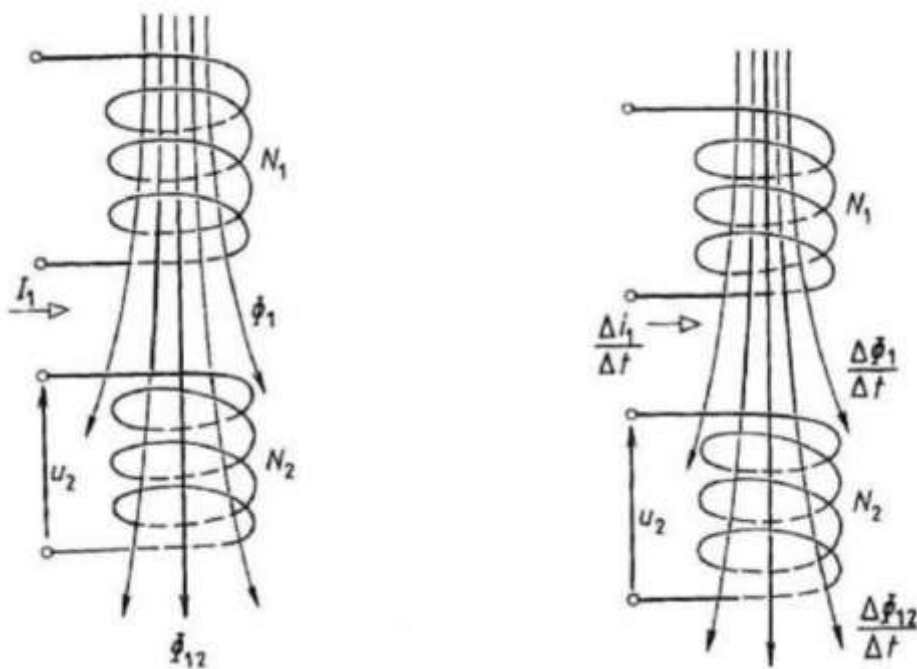
$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N \cdot \Phi}{I} \text{ (H;Wb,A)} \quad (3.12)$$

3.2 Vzájemná indukčnost

Vzájemnou indukčností M [H] rozumíme vztah mezi dvěma a více cívkami mající mezi sebou vazbu prostřednictvím magnetického pole.

Mějme primární a sekundární cívku C1 a C2. První cívka C1 je aktivní a je připojena ke zdroji. Pasivní cívka C2 je umístěna v poli aktivní C1. Průchodem proudu v C1 dojde k vytvoření magnetického toku ϕ_1 , který z části prochází dutinou C2. Tuto část toku značíme jako ϕ_{12} , viz Obr. 3-4.

V pasivní cívkce C2 je indukováno napětí závislé na této vzájemné vazbě mezi cívkami. Toto napětí později slouží k vytvoření proudu a následně k napájení spotřebiče zapojeného v sekundárním okruhu.



Obr. 3-4: Dvojice cívek pro vysvětlení vzájemné magnetické vazby mezi aktivní a pasivní cívkou[20]

3.3 Činitel vazby

Pokud máme dvojici cívek navinutou na feritovém jádře a obě cívky mají vlastní indukčnosti L_1 a L_2 , je mezi nimi vazba, která dá vzniknout vzájemné indukčnosti. V ideálním případě projdou všechny siločáry feromagnetikem a u žádné nedojde k rozptylu. V reálném stroji je však situace jiná. Proto zavádíme činitel vazby k nebo také χ . [20]

Ten přímo ovlivňuje vzájemnou vazbu takto:

$$M = \chi \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (\text{H}; -, \text{H}, \text{H}) \quad (3.13)$$

Bez použití jádra nazýváme sestavu dvou cívek s tzv. vzduchovým transformátorem. U tohoto typu přenosu se běžné vztahy nepoužijí, protože uvažují nulový rozptyl. Tento jev postihneme činitelem vazby k . Nabývá hodnot od $k = 0$, kdy matematicky neexistuje žádná vazba, až do hodnoty $k = 1$, která reprezentuje dokonalou vazbu, při které neexistuje magnetický rozptylový tok.

Činitel vazby se běžně pohybuje v hodnotách $k = 0,9-0,9995$ například, u impulzních transformátorů vybavených feritovým jádrem. [19], [20]

Činitel vazby ovlivňuje převod transformátoru. Při „těsné vazbě“, kdy $k \rightarrow 1$, se uvažuje zjednodušený výpočet převodu N_2/N_1 . Tento vztah však platí pouze pro dokonalý transformátor. Výstupní indukčnost se s klesající hodnotou činitele vazby zvětšuje [20]. Pro případ cívek se vzduchovým jádrem jsou běžné hodnoty menší.

3.4 Činitel jakosti cívky (Quality factor)

Činitel jakosti cívky je definován jako poměr induktivní reaktance cívky X_L a ztrátového odporu cívky.

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega \cdot L}{R} \quad (-; \Omega, \Omega; \text{rad/s}, \text{H}, \Omega) \quad (3.14)$$

Reaktance zde působí jako ideální veličina. Odpor R značí ztráty způsobené teplem. Dále se mohou vyskytovat ztráty vířivými proudy, hysterezí a ztráty skin efektem (vytlačování proudu k povrchu vodiče při rostoucí frekvenci). [25]

Pro cívku existuje poměr mezi reaktancí a odporem, kdy je činitel jakosti nejvyšší. To je výhodné z pohledu ztrát, můžeme je snížit nastavením pracovní frekvence v rezonančních obvodech. [25]

3.5 Ztráty

K účinnosti přenosu v běžných podmínkách se vždy váže ztráta energie. Z fyzikálních důvodů, použitých materiálů a uspořádání částí zařízení je možné ztráty očekávat v následujících oblastech.

- Ztráty teplem v místech průchodu proudu.
- Tepelné ztráty výkonových prvků.
- Ztráty v magnetickém poli.
- Skin efekt.

V případě tepelných ztrát, které se vyskytují v celém obvodu, je velmi problematické jejich určení. V obvodu se vyskytuje příliš velké množství neznámých pro analytické určení. Nejvýznamnější tepelné ztráty mohou vykazovat aktivní prvky, tedy tranzistory, usměrňovací prvky, a to v závislosti na zvolené typologii obvodu. Při vhodné volbě zapojení se můžeme těmto ztrátám z větší části vyhnout. Významné úbytky výkonu vlivem tepla ale nelze příliš upravovat v LC obvodu. Při vysokých frekvencích se běžné kondenzátory velmi rychle zahřívají. Vhodnější jsou zde keramické kondenzátory. Velký proud procházející rezonanční cívkou má za následek zahřívání vodiče cívky. Tomu částečně předejdeme volbou velkého průřezu vodiče, případně volbou kondenzátorů pro indukční ohřev v metalizovaném provedení. Velký průřez vodiče je však řešení pro krátkodobé nabíjecí aplikace. Pokud bychom chtěli snížit ztráty v cívce, musíme zvolit materiál s lepší vodivostí. Nutné je zohlednit skin efekt. Vlivem skin efektu se proud vytlačuje ze středu vodiče, takže středová část není plně využívána. Proto jsou některé vodiče tvořeny spletením více menších vodičů (lanko). Ke zlepšení vodivosti takového vodiče pomůže i nanosení vodivějšího kovu na povrch lanka (trubky/vodiče/tyče).

3.6 Účinnost přenosu

Největší úskalí bezdrátového přenosu nalézáme právě v tomto sousloví. Ze zákona zachování energie víme, že energie E_1 dodaná do soustavy je stejná jako součet energie přenesené E_2 a energie ztrát E_z . Taktéž to platí pro výkon.

$$P_1 = P_2 + P_z \quad (W;W,W) \quad (3.15)$$

Účinností potom rozumíme poměr přeneseného výkonu P_2 a vstupního výkonu P_1 .

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} (-;W,W) \quad (3.16)$$

Ztráty určíme jako rozdíl vstupního výkonu P_1 a výstupního výkonu P_2 :

$$P_z = P_1 - P_2 \quad (W;W,W) \quad (3.17)$$

Její procentní hodnotu vyjádříme jako:

$$P_{z\%} = \frac{P_z}{P_1} \cdot 100 \quad (\%;W,W) \quad (3.18)$$

3.7 Požadavky na navrhované zařízení

Při řešení mechanického provedení zařízení je třeba myslet mimo jiné i na materiály obalů či krytů. Ty by měly být nevodivé a nekovové, aby nezapříčinily ztrátu výkonu, která by se projevila jako zahřívání vlivem indukovaných proudů.

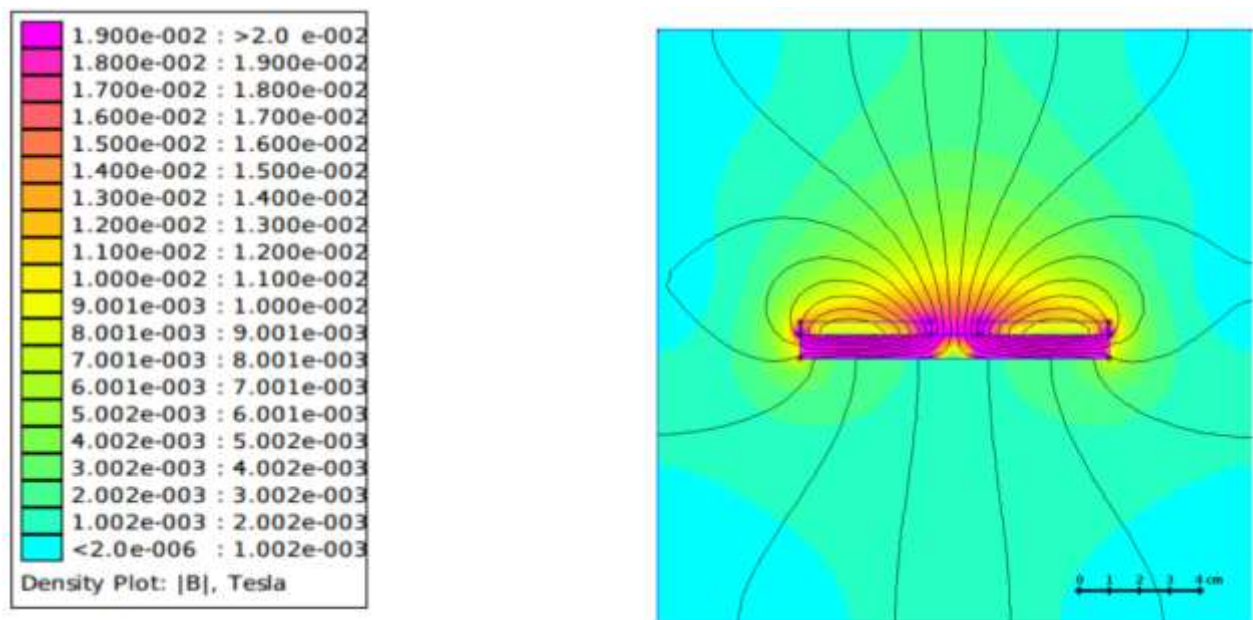
Aby bylo možné dosáhnout nejvyšší možné účinnosti, je třeba zvolit parametry vhodně tak, aby byly konstruovatelné a vyhnuly se extrémům. I když dochází k protichůdnému působení (velké vzdálenosti, úzká provedení (diskovitá), vysoké intenzity, velké proudy, malé rozměry, je třeba

najít kompromis. Dále je důležité, aby byl provoz co nejjednodušší a zohlednil pořizovací a provozní náklady.

K omezení ztrát přispívá vhodná volba topologie budiče cívek. Z principu by měl stačit jakýkoli laditelný obvod, který nám umožní držet cívky v rezonanci. Spínáním v nenulových hodnotách proudu a napětí dochází taktéž ke ztrátám. Proto budeme volit zapojení ZVS, při kterém spínáme při nulovém napětí, což nám zajistí minimální ztráty. [39]

Jak lze vyčíst z předchozích kapitol, tak přenesená energie je úměrná magnetickému spřaženému toku. Ten je největší za předpokladu, že je dvojice cívek umístěna souose a v co nejmenší vzdálenosti od sebe.

Pokud bychom chtěli v tomto směru zlepšit parametry, je možné do obvodu přidat segmenty feromagnetického jádra, čímž by došlo k tvarování vytvořeného magnetického pole a siločáry by se koncentrovaly v tomto magnetickém obvodu. Na *Obr. 3-5* je výstup ze simulace programu *Femm*. Tato simulace znázorňuje natvarování mag. pole. Přidáním jádra vhodných parametrů



Obr. 3-5: Tvar a rozložení magnetického pole diskové cívky s použitím feromagnetického materiálu na zadní straně. Výstup z programu Femm. [42]

bychom taktéž získali 1000x větší relativní permeabilitu a tím zlepšili přenos, Je však třeba mít na paměti, že dochází k indukovaní vířivých proudů, a proto by se trafoplech v obvodu choval jako předmět indukčního ohřevu -prudec by se zahříval. Podobně by tomu bylo i u jiných materiálů.

Z řešení diferenciální rovnice pro odporovou zátěž ze zdroje [42] vyplývají některé následující důsledky pro návrh a konstrukci zařízení.

- Pro velký přenášený výkon potřebujeme velké napětí a malý odpor v cestě proudu. Proto materiál cívek vybíráme s co nejmenší rezistivitou a o dostatečném průřezu. Vliv skin efektu roste s pracovní frekvencí.
- Malý odpor tlumící rezonanční obvod na primární straně v porovnání s odporem zátěže.
- Účinnost zařízení závisí na poměru průměrů $D2/D1$ sekundární a primární cívky a na jejich vzájemné vzdálenosti [37].
- Činitel vazby se snažíme držet co nejbližší $k = 1$.

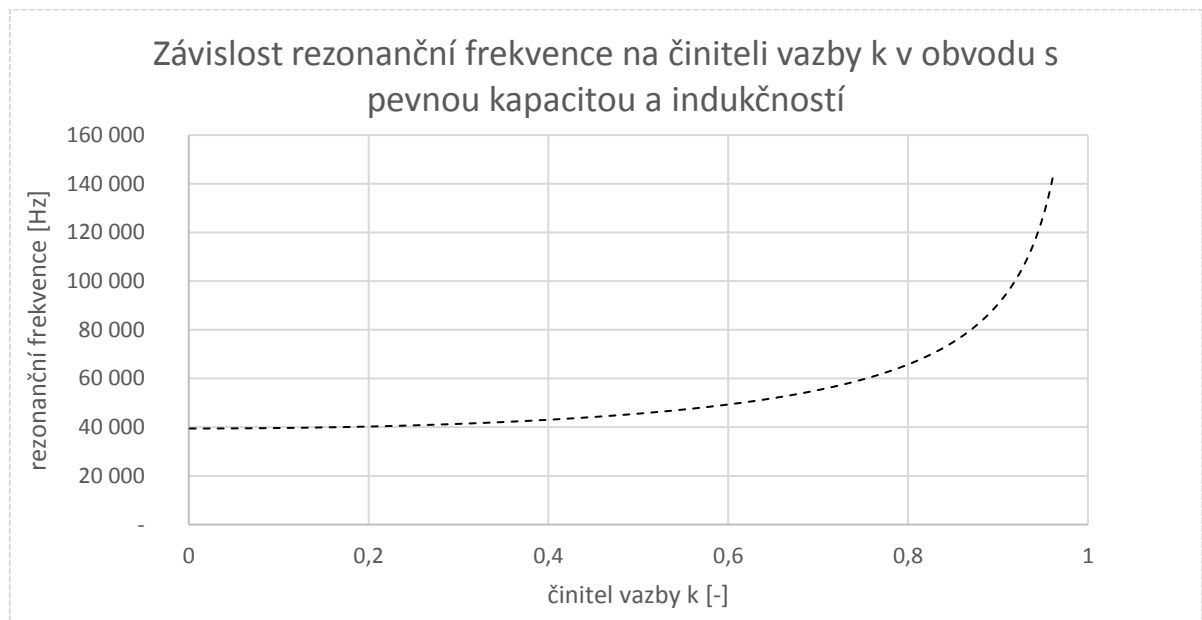
Ze zdroje [37], [42] je možné zpracovat doporučení autora v závěru.

- Co nejvyšší činitel jakosti cívky Q (velký průměr vodiče kvůli skin efektu, dobrá vodivost).
- Maximalizace indukčnosti.

Zlepšení parametrů nastává, když nastavíme obvod do ideální rezonance. To lze provést buď na straně vysílače, nebo také na straně přijímače. Na straně sekundáru je to příznivější z hlediska obvodových prvků, které nemusejí být dimenzovány na tak vysoké napětí, které by vznikalo na primární straně. To je ale otázka velikosti napájecího napětí v případě ZVS budiče. [39]

Pokud budou známy velikosti LC prvků, bude známa rezonanční frekvence. Závislost činitele vazby a frekvence je zřejmá z grafu na Obr. 3-6.

Současně s ekonomickým návrhem by měla být dodržena legislativa a normy z pohledu *EMC* a interakce s okolím, aby nedocházelo k rušení nepovolených pásem, a také by měl být návrh v souladu s hygienickou vyhláškou o expozici osob v *EM* poli.



Obr. 3-6: Příklad závislosti mezi činitelem vazby k a rezonanční frekvencí LC obvodu o daných parametrech. Vzhah pro závislost převzata z[42]

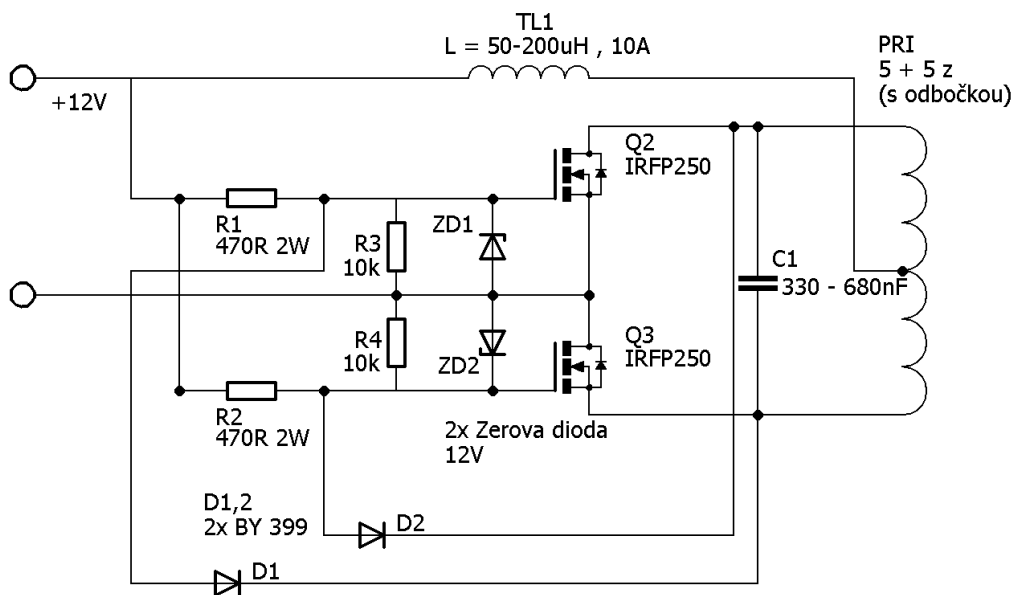
4. NÁVRH LABORATORNÍHO PŘÍPRAVKU

V primární části potřebujeme proud protékající primární cívkou o námi zvolené frekvenci. Obvod tedy musí kmitat v závislosti na velikosti indukčnosti primární cívky a kapacity k ní připojené.

Byl zvolen obvod dvojčinného oscilátoru v tzv. Mazilliho zapojení se zpětnou vazbou. Zapojení je také známo pod zkratkou ZVS. Jedná se o jednoduché zapojení, které velmi dobře vyhovuje požadavkům pro demonstraci bezdrátového přenosu. Disponuje velmi dobrou účinností a nižší náročností na konstrukci. Malé množství součástek a schopnost zdroje ladit se do rezonance s použitou primární cívkou a rezonančním kondenzátorem je zde výhodou. Při nízkém napájecím napětí není potřebný velký chladič a zdroj je velmi odolný i při velkých výkonech. Slabším článkem při vyšších hodnotách napětí na vstupu je rezonanční kondenzátor, který musí zvládat velké proudy a téměř čtyřnásobek vstupního napětí. [39]

Činným prvkem je zde dvojice tranzistorů N-FET s katalogovým značením IRFP250. V ideálním případě jsou spínány při průchodu nulou. To se projevuje na jejich mírném zahřívání, a to i při značném příkonu. Aktivní chlazení není třeba, postačí zde jen větší chladič. V našem případě byl použit chladič 13x8x2 cm.

Obvod může být napájen 12-24 V. Frekvenci nastavíme velikostí indukčnosti primární cívky a kapacity rezonančního kondenzátoru C1 (viz schema na Obr. 4-1)



Obr. 4-1: Schéma zapojení primární části obvodu ZVS v zapojení podle [38]

Obvod se ladí do rezonance samostatně. Velikosti parametrů LC obvodu určíme následujícím výpočtem. Vycházíme z Thompsonova vztahu pro rezonanční frekvenci. [36]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ (Hz;H,F)} \quad (4.1)$$

Kde indukčnost je dána počtem závitů primární cívky. V našem případě použijeme 10 závitů s odbočkou v polovině, tedy do výpočtu zahrnujeme 5 závitů. Výpočet

provádíme vztahem pro výpočet indukčnosti cívky se vzduchovým jádrem odvozeným ze vzorce pro výpočet počtu závitů ze zdroje [37]

$$L = \frac{r^2 \cdot N^2}{25l + 23r} \text{ (}\mu\text{H; cm, -, cm)} \quad (4.2)$$

kde je

r ... poloměr cívky,

N ...počet závitů,

l ...délka cívky.

$$L = \frac{11^2 \cdot 5^2}{25 \cdot 0,5 + 23 \cdot 11} = 11,394 \mu\text{H} \quad (4.3)$$

V pozdějším porovnání naměřených hodnot rezonančních frekvencí zjistíme, že mnohem přesnější hodnotu indukčnosti cívky získáme výpočtem ze vztahu (3.11). Vztahů pro určení indukčnosti cívky existuje značné množství a jejich použití ovlivní i rozsah frekvencí, na kterých jsou cívky užívány. K vhodnému výběru vztahu se váže i rozdílnost hodnot, které výpočtem získáme. Desetinásobek indukčnosti získané při jednom výpočtu oproti dalšímu výpočtu není výjimkou. Protože výpočet pomocí druhého vztahu je přesnější, budeme dále používat vztah (3.11).

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{S}{l} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5^2 \cdot \frac{0,038}{0,005} = 238,7 \mu\text{H} \quad (4.1)$$

Velikost rezonančního kondenzátoru je zvolena dle doporučení na 330 nF. Pokud zvolíme menší kondenzátor, zvýší se frekvence a bude docházet k většímu zahřívání kondenzátorů. Pokud bychom zvolili větší kondenzátor, bude pracovní frekvence menší. Vhodné kondenzátory jsou se jmenovitým napětím vyšším než π násobek napájecího napětí (4x vstupní napětí je tedy s rezervou) v provedení pro pulsní provoz, nebo indukční ohřev, případně metalizované.

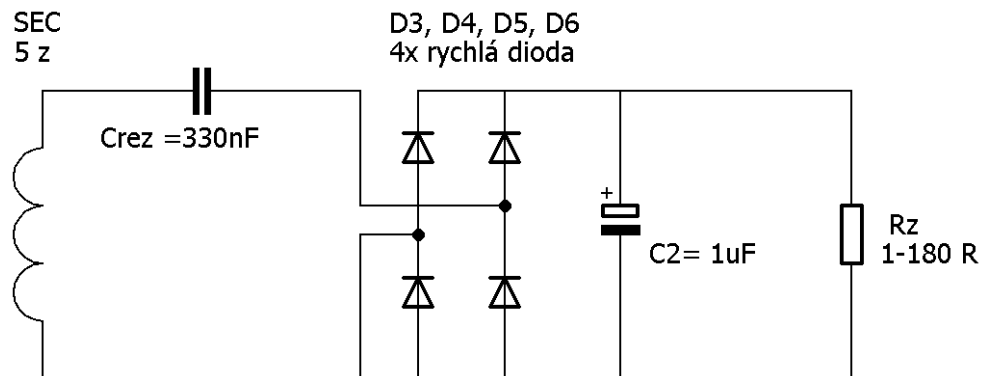
Vyčíslení pracovní (rezonanční) frekvence pro indukčnost cívky 10,85 μH a kapacitu rezonančního kondenzátoru 330 nF je v následujícím vztahu.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{238,7 \cdot 10^{-6} \cdot 330 \cdot 10^{-9}}} = 17,941 \text{ kHz} \quad (4.4)$$

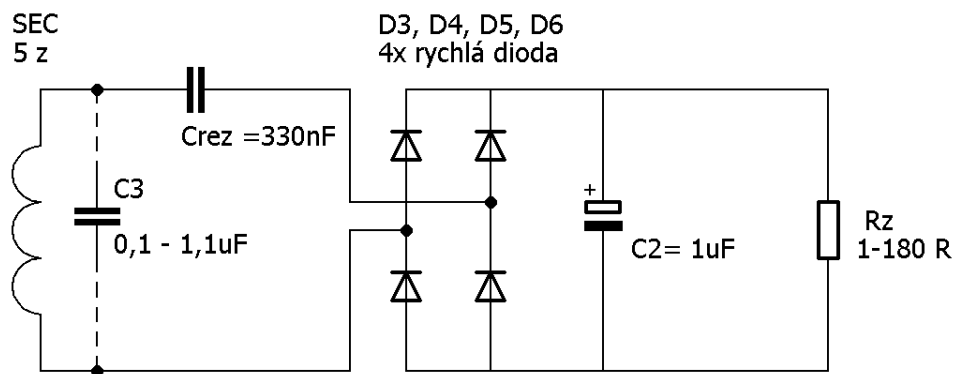
Tento výpočet je spíše orientační. Při konstrukci reálné cívky se mohou hodnoty lišit i v desítkách procent. Velký vliv na frekvenci má i samotná zátěž, přesněji impedanční přizpůsobení. V diplomové práci [42] je uvedeno, že se v technické praxi používají tzv. Wheelerovy vzorce, ale i tak se autorovi nepodařilo dosáhnout přesného návrhu. Navržená sekundární cívka měla mnohem menší indukčnost, než naznačil výpočet.

Sekundární část obvodu je navržena obdobně. Sekundární cívka má 5 závitů silného vodiče o průměru 1,2 mm a průměr cívky je stejný jako u primární, tedy 210 mm. Celkový sekundární obvod je navržen jako sériový rezonanční obvod s usměrňovačem. Kondenzátor má kapacitu $C_{rez} = 330 \text{ nF}$, cívka s pěti závity by měla mít stejnou indukčnost jako v případě primáru, 238,7 μH .

Usměrňovač je složen ze 4 kusů rychlých diod s $t_z = 200\text{ms}$. Za usměrňovačem je filtrační kapacita a samotná zátěž. Tu představuje rezistor s proměnlivou hodnotou odporu. Indukčnost vinutí odporového vodiče v rezistoru zanedbáváme.



Obr. 4-2: Přípravek 1 – Schéma zapojení sekundární části obvodu



Obr. 4-3: Přípravek 1 – Schéma zapojení sekundární části obvodu pro měření účinnosti při přidávání rezonanční kapacity

Zapojení na Obr. 4-3 je doplněno o kapacitu C3, pro zjištění závislosti přidané kapacity a účinnosti v kapitole 5 Měření.

5. MĚŘENÍ

Měření účinnosti přenosu je provedeno jako měření vstupního napětí a proudu z upraveného stabilizovaného PC zdroje. Mezi PC zdrojem a samotným přípravkem jsou vloženy analogové měřicí přístroje. Voltmetr a ampérmetr, oba s měnitelným rozsahem do 6 A a 120 V. Měření na sekundární straně je provedeno totožně. Měřicí přístroje jsou vloženy před zátěž. Měříme tedy napětí na rezistoru s posuvně měnitelným odporem a proud jím procházející. Současně s měřením vstupních a výstupních hodnot je prováděno měření pracovní frekvence pomocí osciloskopové sondy.

Cílem měření je stanovit závislosti pro dva konkrétní přípravky. Z charakteristik dále můžeme vyvodit bod impedančního přizpůsobení. To je stav, ve kterém očekáváme nejvyšší účinnost. Dále vyhodnocujeme bod s maximální účinností přenosu.

5.1 Popis metody měření a zpracování dat

Při měření byly hodnoty vstupního proudu a napětí odečítány a zapsány do tabulky i s rozsahy přístrojů. Tyto hodnoty byly vyčísleny a součinem byl vyjádřen odebíraný výkon.

$$U = \frac{\alpha}{X} \cdot Y(V; -, -, V) \quad (5.1)$$

Kde α je výchylka ručičky přístroje, X je počet dílků na stupnici měřidla, Y je aktuální rozsah měřidla. Po dosazení odečtených hodnot napětí a proudu dostaneme následující.

$$U_1 = \frac{57}{120} \cdot 24 = 11,4 \text{ V} \quad (5.2)$$

$$I_1 = \frac{109}{120} \cdot 6 = 5,45 \text{ A} \quad (5.3)$$

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = 11,2 \cdot 5,45 = 67,2 \text{ W} \quad (5.4)$$

kde P_1 je vstupní vypočtený výkon do zařízení bezdrátového přenosu a U_1 a I_1 jsou změřené hodnoty napětí a proudu. Výpočet a zjištění přeneseného výkonu na sekundární straně probíhá totožně.

Účinnost zařízení je potom dána jako poměr přeneseného výkonu na sekundární stranu a vstupního výkonu do zařízení.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 (\%; \text{ W, W}) \quad (5.5)$$

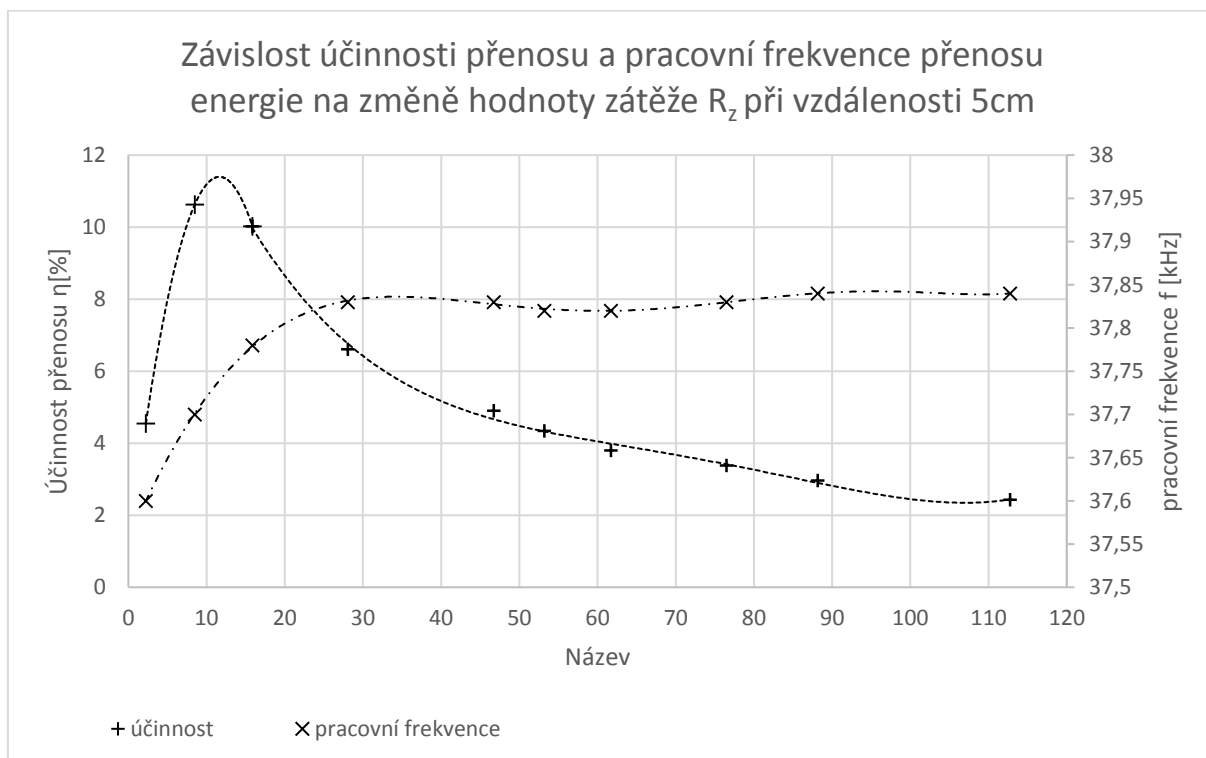
$$\eta = \frac{35,65}{P_1 62,13} \cdot 100 = 57,38 \% \quad (5.6)$$

Hodnoty do výpočtu jsou čerpány z tabulky hodnot pro přenos při vzdálenosti 6 cm.

5.2 Přípravek 1 – Měření účinnosti přenosu elektrické energie -

V této kapitole jsou uvedeny hodnoty a průběhy účinností, které byly naměřeny na laboratorním přípravku vlastního návrhu a konstrukce s budičem ZVS. Pro přehlednost jsou zde uvedeny jen některé závislosti. Ostatní závislosti jsou uvedeny v příloze spolu s naměřenými hodnotami v tabulce.

Prvním měřením byla zjištěna závislost účinnosti na proměnné odporové zátěži při vzdálenosti 5 cm mezi cívkami. Nejdříve byly umístěny cívky do patřičné vzdálenosti. Nastavitelný rezistor byl nastaven na nejnižší hodnotu. Po každém odečtení byla zátěž zvětšena. Rozsah odporu byl nastavován od cca 2 Ω do 113 Ω . Současně s odečtem každého bodu byla zaznamenána pracovní frekvence.



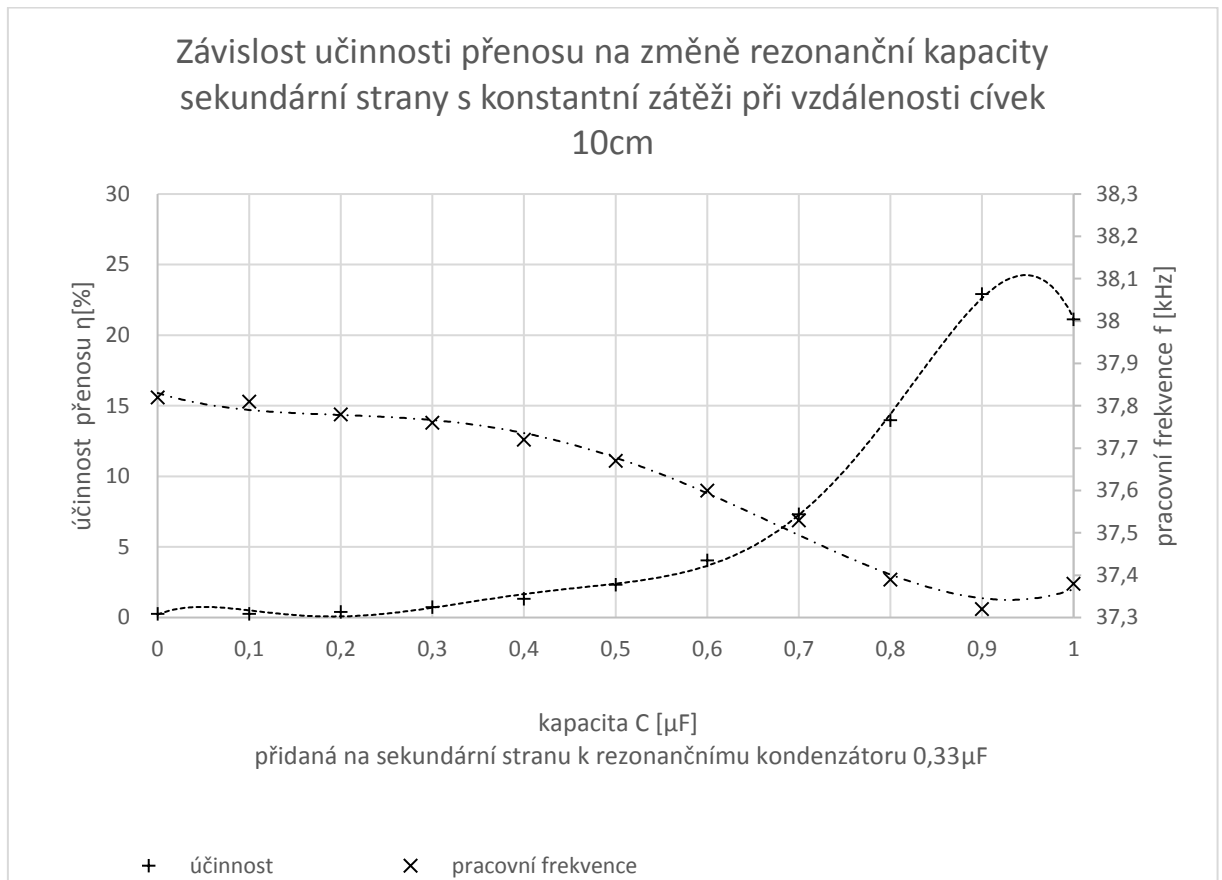
Obr. 5-1: Závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence na změně hodnoty zátěže při vzdálenosti 5cm

Ze závislosti je zřejmá oblast impedančního přizpůsobení. Vhodný bod bychom tedy našli pro zátěž mezi 10 a 15 Ω . Po tomto vrcholu už nastává rychlé klesání účinnosti. Pracovní frekvence se v rámci proměny zátěže mění o necelých 250 Hz. V oblasti impedančního přizpůsobení je to v rozmezí 100 Hz. Při zátěži 30 Ω se frekvence stabilizuje a zůstává neměnná až do 113 Ω . Pokud by byl spotřebič napájen tímto zařízením ve vzdálenosti 5 cm, dají se očekávat nejlepší výsledky z hlediska účinnosti při zátěži 13 Ω a frekvenci 37,75 kHz. I při dodržení těchto parametrů by byla účinnost cca 11 %.

Dále bylo provedeno měření se stejným uspořádáním a postupem, ale byla zvětšena vzdálenost na 10 cm. Při této vzdálenosti byla účinnost menší než 1 %, a proto nebylo vykresleno.

Skutečná změřená účinnost byla u obou měření mnohem nižší, než jsme na počátku návrhu předpokládali. Střídmy odhad účinnosti byl alespoň 25 %. Protože pracovní parametry určují obě cívky s jejich rezonančními kapacitami C_{rez} , byla na sekundární stranu paralelně k cívce přidána

kapacitní kaskáda. Tento krok měl za cíl vyzkoušet, jak se změní výsledná účinnost a pracovní frekvence. Přidání kapacity je zřejmé ze schematu na Obr. 4-3.



Obr. 5-2: Graf závislosti účinnosti přenosu a pracovní frekvence při přidávání paralelní rezonanční kapacity na sekundární stranu obvodu

Zátěž při tomto měření zůstala konstantní (hodnota rezistoru nebyla měněna). Hodnota odporu byla vypočítána z naměřených napětí a proudů na sekundární straně podle Ohmova zákona. Hodnota zátěže se pohybovala od 39 do 22 Ω . Pravděpodobně se v ní uplatňoval vliv indukce přívodů a přívodů kondenzátorů v kapacitní kaskádě. Hodnoty na ose x byly nastavovány na kaskádě a poté byl proveden odečet hodnoty vstupních a výstupních veličin.

Velmi zajímavou anomálií je zde fakt, že se pracovní frekvence téměř nezměnila. Podle výpočtu z Thompsonova vztahu pro rezonanční frekvenci by měla mít teoretická rezonanční frekvence hodnotu 17,94 kHz pro cívku s 5 závitů a průměr cívek 22 cm.

Tab. 5-1: Přehled teoretických hodnot rezonančních frekvencí vypočtených z Thompsonova vztahu

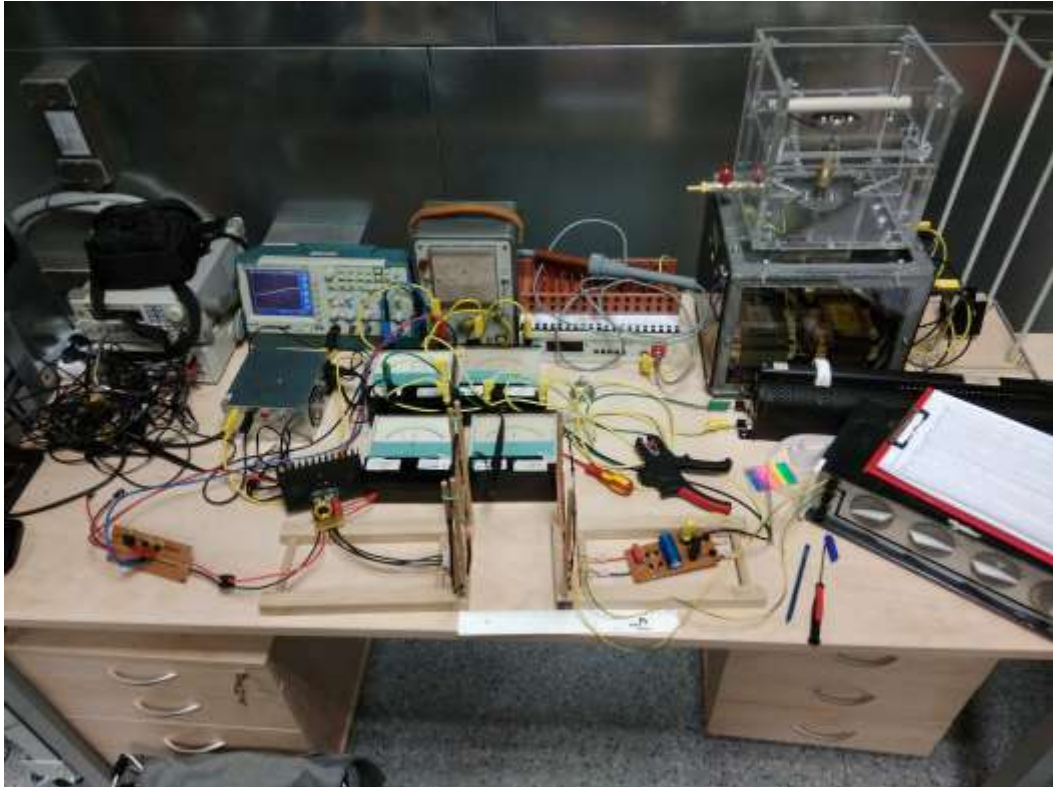
Přehled teoretických hodnot rezonančních frekvencí vypočteny z Thompsonova vztahu pro parametry dané tabulkou						
Cívka					Rez. kondenzátor	Rez. frekvence
průměr d	plocha S	délka l	závitů	indukčnost L	kapacita	f_{rez}
[m]	[m ²]	[m]	[-]	[μ H]	[nF]	Hz
0,220	0,038	0,005	2	38,196	330	44 851
			3	85,940	330	29 901
			4	152,783	330	22 426
			5	238,723	330	17 941

Výpočet rezonančních frekvencí byl proveden pomocí vztahu (4.4). Do vztahu vstupuje pevně daná kapacita a vypočítaná indukčnost cívek podle vztahu pro indukčnost cívky (3.11).

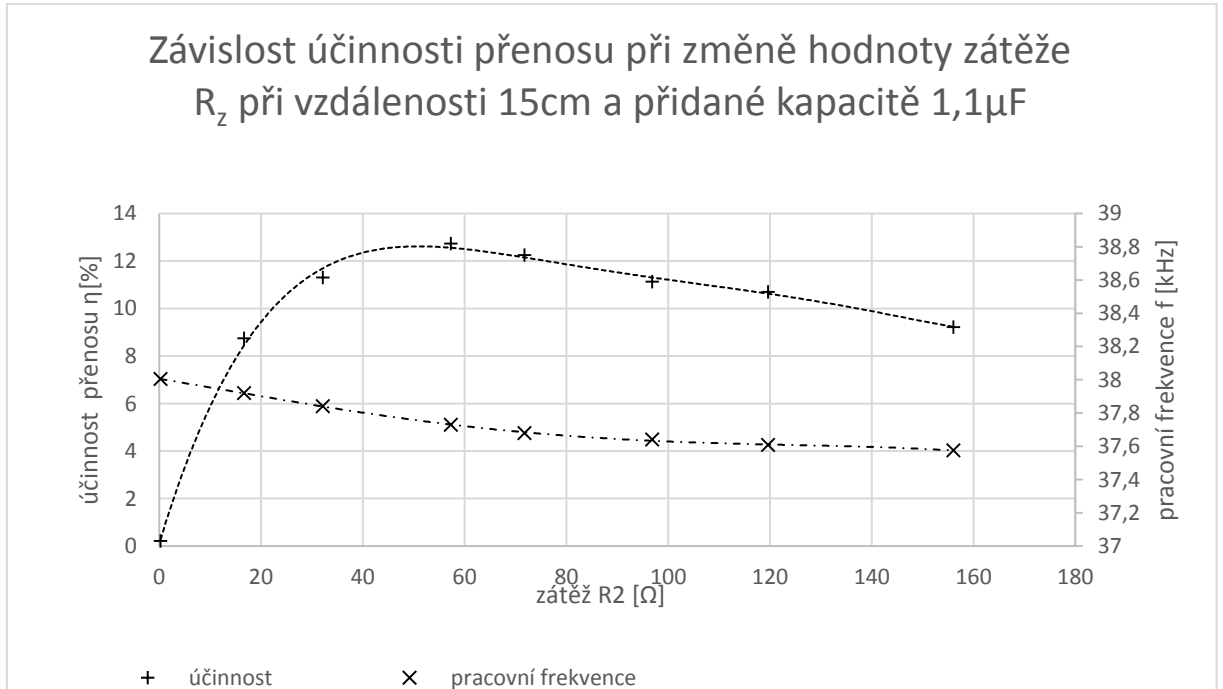
Pokud bychom užili vztah pro výpočet indukčnosti cívky (tvar odlišný od solenoidu se vzduchovým jádrem) vyjádřený jako (4.2) tak po vyčíslení hodnot získáme ještě více odlišné hodnoty. [38]

Reálně měřená frekvence se pohybovala mezi 37,6 a 37,9 kHz. To by v teoretickém výpočtu odpovídalo matematicky indukčnosti 2,5 závitů. Snížení indukčnosti může být způsobeno mezizávitovou kapacitou, délkou přívodů, uspořádáním vodičů a dalšími vlivy.

Následné měření bylo provedeno ve vzdálenosti 15 cm a byla přidána kapacita 1,1 μ F do rezonančního obvodu paralelně k cívce. Z grafu na Obr. 5-4 je vidět oblast maximální účinnosti a můžeme ji považovat za oblast impedančního přizpůsobení obvodu. Vlivem větší vzdálenosti v porovnání se závislostí z grafu Obr. 5-1 je vidět širší základna impedančního přizpůsobení, tedy menší náchylnost na změnu zátěže z pohledu účinnosti. Za ideální v tomto případě považujeme hodnotu 55 Ω , kterou určíme z proložení naměřených bodů. Frekvence se v tomto případě mění jen nepatrně. S postupně vzrůstající zátěží frekvence mírně klesá. Na celém rozsahu měřených hodnot se mění o cca 400 Hz. V místě impedančního přizpůsobení bychom naměřili hodnoty 55 Ω a 37,75 kHz.



Obr. 5-3: Přípravek 1 – uspořádání pracoviště před měřením



Obr. 5-4: Přípravek 1 – graf závislosti účinnosti přenosu a pracovní frekvence na proměnlivé zátěži při vzdálenosti 15 cm s přidanou rezonanční kapacitou

Tab. 5-2: Přehled technických hodnot vlastního navrženého laboratorního přípravku s budičem ZVS

Přehled- Laboratorní přípravek s budičem ZVS	
Vstupní napětí do primárního obvodu	12 V
Proud do primárního obvodu	0,2-0,45 A
Vypočtená frekvence zdroje	17,491 kHz
Skutečná frekvence zdroje	37,3- 38,9 kHz
Změna pracovní frekvence	Max 1,8 kHz
Nejlepší impedanční přizpůsobení při	50 Ω , (Cca 12,5 %) vzdálenost 15 cm s přidanou paralelní rezonanční kapacitou 1,1 μF
Maximální naměřená účinnost	12,72 % (vzdálenost 15 cm)

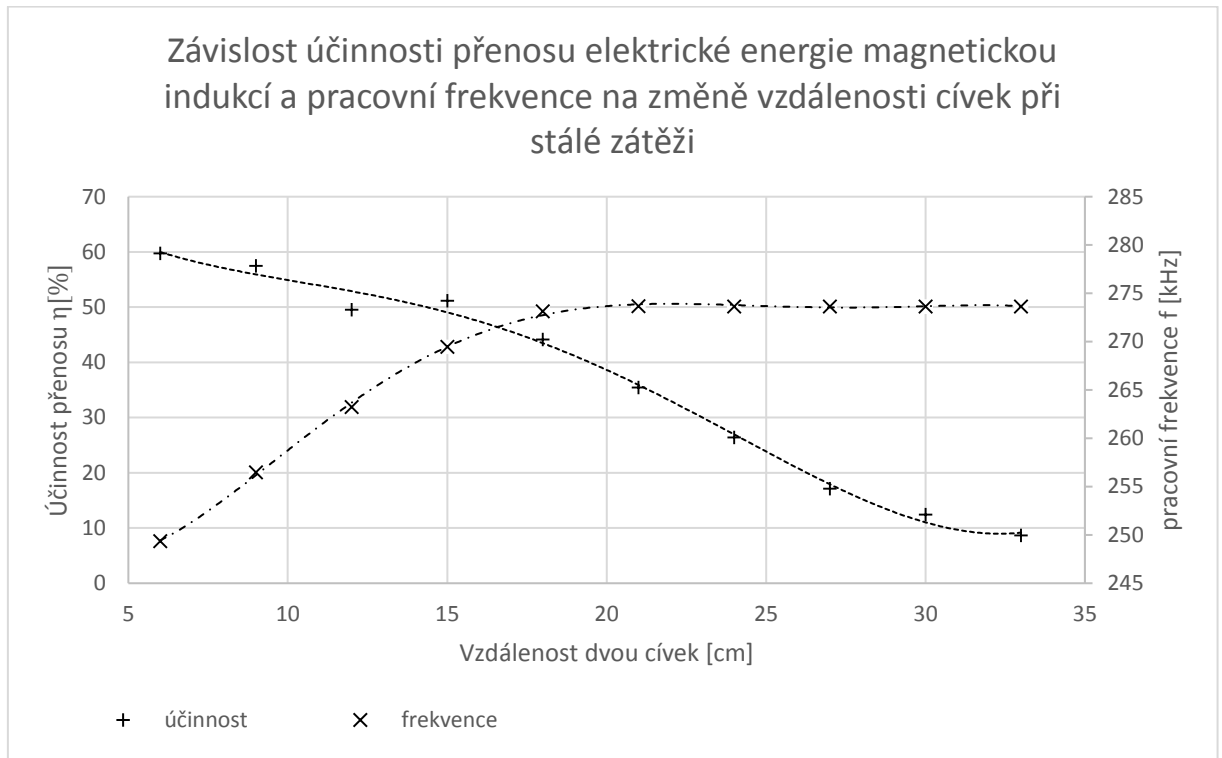
5.3 Přípravek 2 – Měření účinnosti přenosu elektrické energie

Bylo provedeno měření na přípravku mírně odlišné konstrukce od prvního zapojeného obvodu. Přípravek 2 byl zapůjčený již sestrojený a žádné fyzické úpravy nebyly prováděny autorem práce.

Jedná se o jednoduché zapojení dvojice tranzistorů v kmitavém obvodu. Jako rezonanční kapacita zde slouží paralelně spojená dvojice metalizovaných kondenzátorů z indukčního ohřevu. Každý má kapacitu 330 nF. Primární cívka je tvořena jedním závitem masivního vodiče obdélníkového průřezu 4x8 mm. Sekundární obvod je totožný s primárním rezonančním obvodem. Výhodou tohoto obvodu je opět schopnost naladit se do rezonance.

Sekundární obvod tvoří cívka s jedním závitem, dvojice metalizovaných kondenzátorů a jako usměrňovací prvky jsou zde použity 4 *Schottkyho* diody. Napětí je upraveno filtrační kapacitou. Měření na sekundární straně je provedeno stejně jako u předchozího laboratorního přípravku, dvojicí analogových přístrojů měřící napětí a proud zátěží.

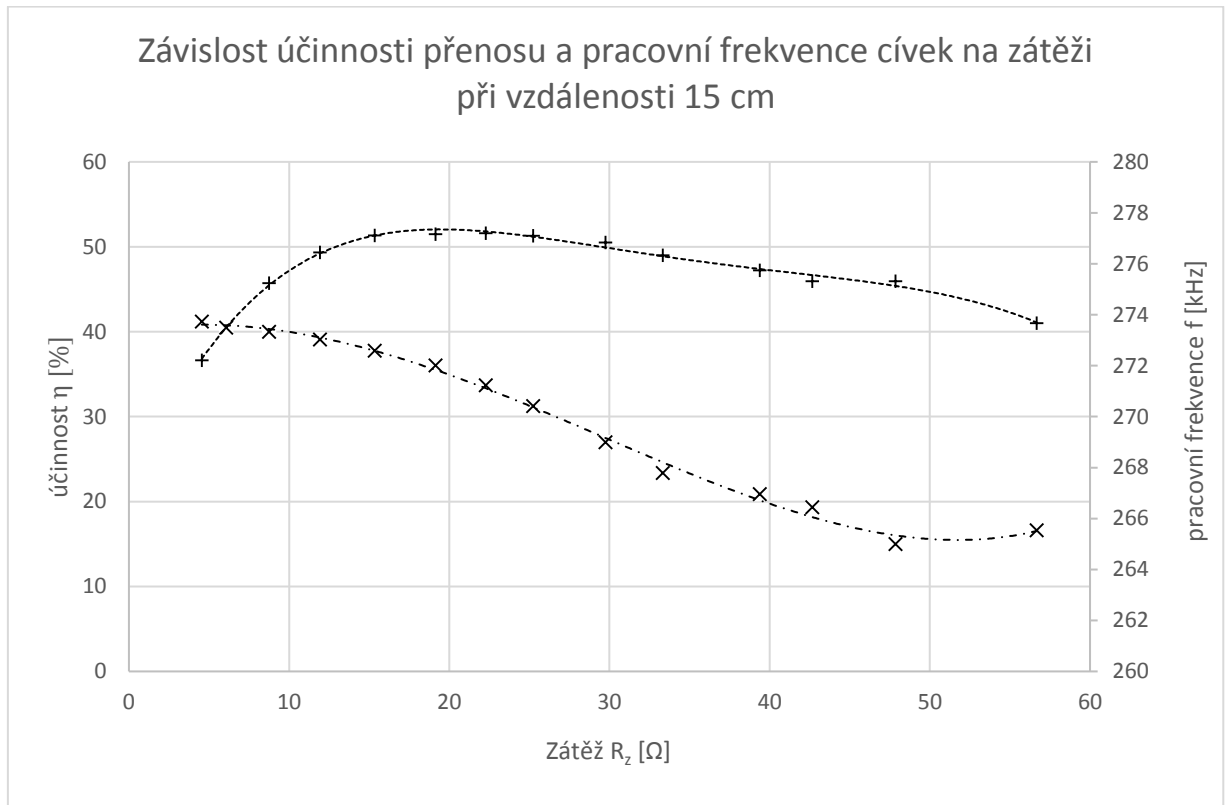
V prvním měření byla nastavena pevná hodnota zátěže přibližně 24 Ω . Účinnost byla zjišťována ve vzdálenosti cívek od 6 cm do 33 cm s krokem 3 cm. Hodnota zátěže vypočtená z naměřených sekundárních parametrů se pohybovala od 22 do 26 Ω . Cílem bylo ověřit pravidlo, že přenesená energie klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Výslednou závislost je možné vidět na Obr. 5-5.



Obr. 5-5: Přípravek 1 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence na změně vzdálenosti od 6 do 33 cm při neměnné zátěži.

Ze závislosti je zřejmé, že přenesená energie neklesá s druhou mocninou vzdálenosti. Celý fyzikální vztah cívek je zatížen několika dalšími vlivy, které předpokládaný průběh ovlivňují. Největší vliv bude mít samotný rozměr cívek. Dvě plošné cívky se nechovají v této vzdálenosti jako bodový zdroj, a proto je závislost více lineární než kvadratická. Svůj vliv zde uplatňuje i pracovní frekvence. Ta se při vzdálenosti 20 cm stabilizuje a dále závislost od této hodnoty klesá alespoň mírně exponenciálně.

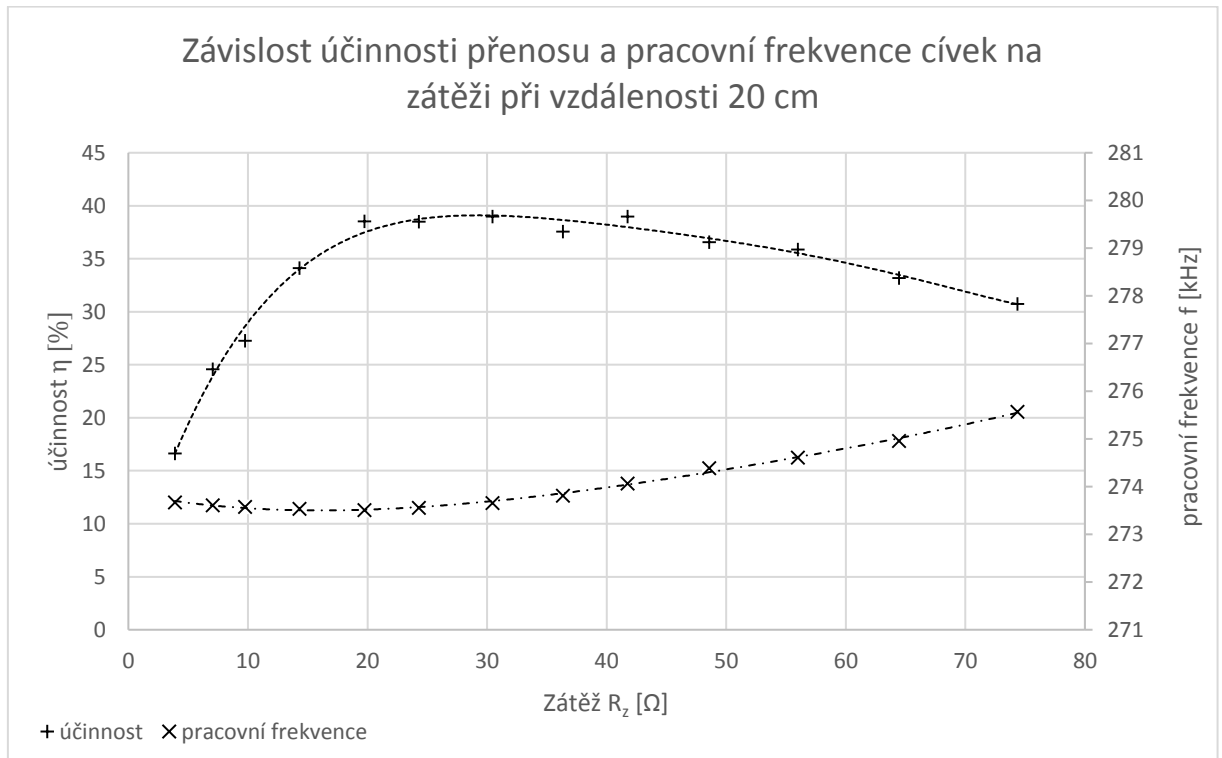
V dalších měřeních byla zjišťována účinnost přenosu při pevně daných vzdálenostech. Cívky byly umístěny do měřené pozice před zahájením měření a následně byly odečítány hodnoty sledovaných veličin po každé po změně hodnoty zátěže. Zajímavé jsou závislosti účinností při 15 cm a při 20 cm. Pro vzdálenost 10 cm je závislost vykreslena a přiložena v příloze jako Obr. 0-1.



Obr. 5-6: Přípravek 2 – Závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence při vzdálenosti 15 cm s proměnnou zátěží

Ze závislosti na Obr. 5-6 je vidět oblast impedančního přizpůsobení v hodnotách zátěže mezi 15 Ω a 25 Ω . Účinnost ve špičce je 51,6 % a poté pozvolna klesá. V maximu závislosti je účinnost 51,6 %, a to pro zátěž vypočtenou z naměřených hodnot o velikosti 22,3 Ω . Hodnota pracovní frekvence se pohybuje od 265,5 do 274,2 kHz a s rostoucí zátěží klesá.

U druhého průběhu, vykresleném na Obr. 5-7, byla zvětšena vzdálenost na 20 cm. Účinnost tím poklesla na 38,6 %. Zajímavé je porovnání obou průběhů frekvencí, které se v každém z případů chovají odlišně. Proto v tomto případě není jasné, jakou optimální frekvenci bychom nastavovali u obvodu, který by neměl možnost automatické regulace pracovní frekvence.

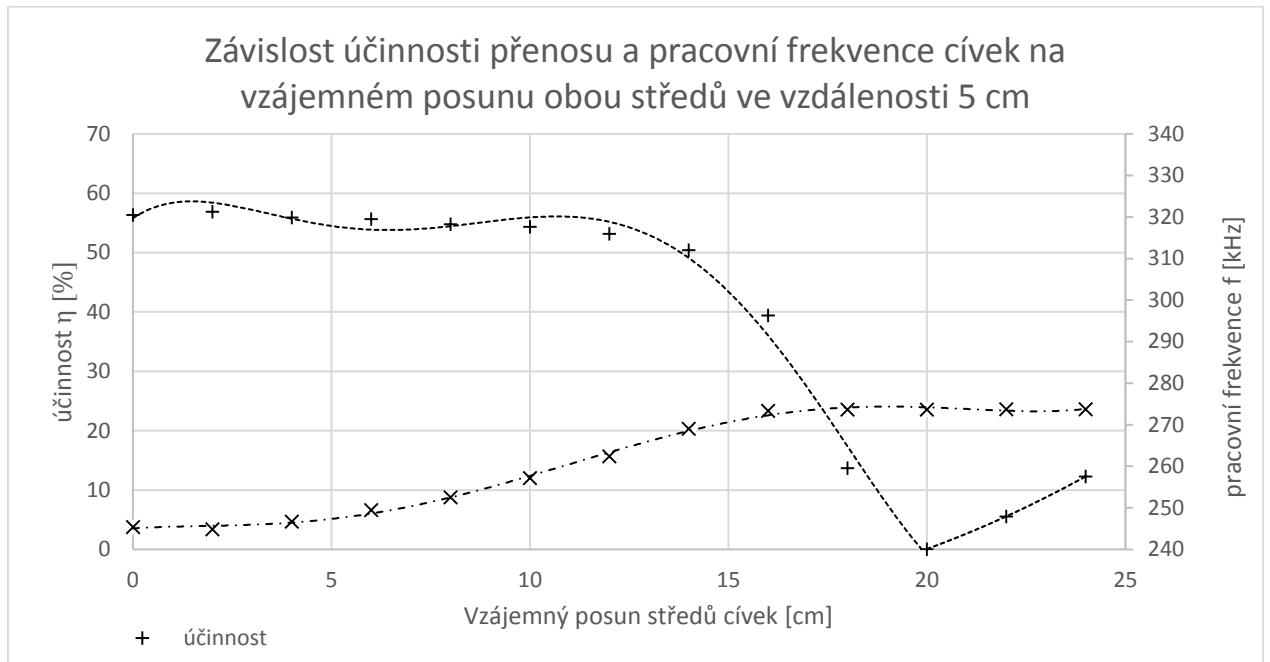


Obr. 5-7: Přípravek 2 – Závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence při vzdálenosti 20 cm s proměnnou zátěží

Při měření ve vzdálenosti 20 cm byla určena oblast impedančního přizpůsobení mezi 25 a 35 Ω . Optimální zátěž pro tuto vzdálenost s námi zkoumaným nastavením obvodu je 30 Ω . V tomto bodě by obvod pracoval při frekvenci 273,66 kHz. S rostoucí zátěží poté účinnost klesá a pracovní frekvence mírně roste. Rozdíl mezi maximální a minimální frekvencí je cca 2 kHz. Naměřené hodnoty jsou přiloženy v příloze v Tab. 0-8.

V následujících měřeních byla zjištěna závislost účinností při známých vzdálenostech 5 a 10 cm, avšak při stavu, kdy jsou cívky vychýleny o 25° nebo 50°. Závislosti jsou vykresleny a přiloženy v příloze jako *Obr. 0-2*, *Obr. 0-3* a *Obr. 0-5*. I přes malé vzdálenosti byla účinnost při 5 cm a 25° vychýlení menší, než u vzdálenosti 10 cm a vychýlení 50°. Prvním důvodem je, že se při měření cívky v průmětu na rovinu stolu protínaly (geometricky do sebe zasahovaly). To mohlo být důvodem vzniku nesymetrického rozložení magnetického pole kolem cívky a tedy uzavírání siločar mimo sekundární cívku. Jak je vidět v průběhu na *Obr. 0-2*, tak je pracovní frekvence o 30 kHz větší než v ostatních případech. To bychom mohli odůvodnit právě protnutím ploch cívek. Měření v tomto uspořádání bychom měli brát pouze jako informační. U dalších dvou měření s natočením cívek je vidět o něco rychlejší klesání účinnosti. Nejlepší účinnost je zde naměřena v bodě při vzdálenosti 10 cm a natočení 50°. Při 20 Ω zátěži zde máme účinnost 58,3 %. Pracovní frekvence v tomto bodě je 256,9 kHz.

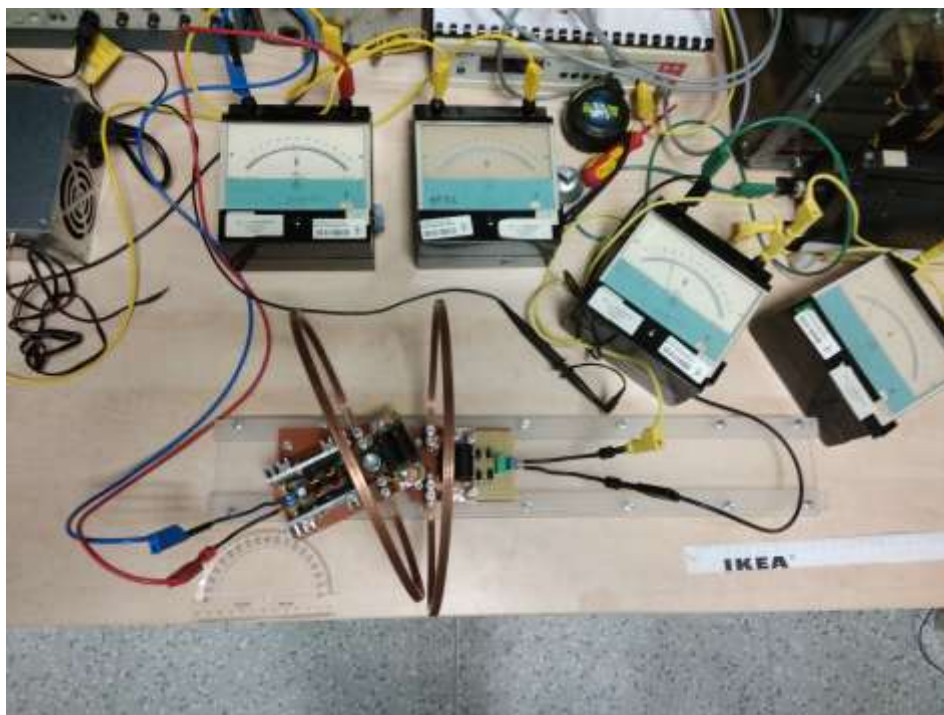
Vlemti zajímavý průběh je možné získat při měření vzájemného posunu cívek v určité vzdálenosti. Byla zvolena vzdálenost 5 cm mezi plochami obou cívek a vzdálenost obou středů (ve směru kolmém k osám cívek) byla zvětšována až do hodnoty 24 cm. Závislost účinnosti je vykreslena na *Obr. 5-8*.



Obr. 5-8: Přípravek 2 – Závislost účinnosti a pracovní frekvence pro cívky uložené 5 cm od sebe při vzájemném posunu středů.

Z grafu můžeme vyčíst, že ve vzdálenosti 20 cm je účinnost nulová. Je to bod, při kterém plochu cívky protínají magnetické siločáry jejichž výsledný vliv se navzájem ruší. Proto nedochází k indukování proudu a napětí na sekundární cívce. Dalším zvětšováním tuto rovnováhu narušíme a opět se začne uplatňovat vliv magnetického indukčního toku plochou cívky.

K tomuto jevu dochází například když se uživatel elektromobilu snaží navést vozidlo přesně nad cívku. Pokud by navedení nebylo přesné, účinnost velmi rychle klesá a dochází ke zbytečným ztrátám.



Obr. 5-9: Přípravek 2 – fotografie z měření

6. DISKUZE

Provedením dvou sad měření na různých zařízeních získáváme srovnání charakteristik dvou zařízení s rozdílnými parametry. Rozdíly jsou největší v poměrech cívek a v použitých pracovních frekvencích o účinnostech a jejich kritických závislostech na vzdálenosti se můžeme dočíst z mnoha zdrojů. Málokterý však nabídne měření s různou hodnotou zátěže, navíc na různých vzdálenostech. V této práci jsou tyto charakteristiky obsaženy.

Obvod je zvolen tak, aby nebyla nutná manuální změna frekvence. Obvod už ze své povahy má snahu se ladit do rezonance samostatně. To přináší snadnou aplikaci zařízení s minimem součástek, malými ztrátami v budicím obvodu a za nízké pořizovací náklady. Tak získáme zařízení odolné, minimálně poruchové (malé množství součástek), dobře chladitelné a nenáročné na vstupní parametry (hodnoty vstupního napětí jsou kritické nejvíce pro rezonanční kondenzátory).

S dostatkem finančních zdrojů by stálo za pozornost provést měření na stejné sestavě po přidání feritových nástavců a feritové plochy na záda cívky pro natvarování magnetického pole. Jistě zajímavé charakteristiky bychom získali při reálném použití nabíjecího zařízení u vozidla nebo robota, na kterém bychom systém reálně otestovali.

Pro autora je přínos práce velmi široký. Při tvorbě práce měl možnost vyrobit fungující zařízení a na něm změřit reálné hodnoty. Ty potom konfrontovat s teorií a odůvodnit jejich chování.

Získáním zkušeností s návrhem a konstrukcí zařízení získává představu o náročnosti vývoje takovýchto zařízení pro nasazení v průmyslu. Předpoklady získané v teorii dané oblasti se v praxi ukazují jako mnohem složitější a mnohdy závisí na více faktorech.

Při výpočtech vyšlo najevo, že použité vztahy je nutné často upravit pro konkrétnější aplikaci nebo výpočet chápat jako orientační. Při výpočtu indukčnosti se obvod choval, jako by měl polovinu použitých závitů. Proto je třeba být obezřetný při výpočtových návrzích.

Autorovi práce se nepodařilo přesně zdůvodnit příčinu jevu, který nastal při měření charakteristiky Obr. 5-2, kdy na sekundárním rezonančním obvodu byla přidávána paralelní rezonanční kapacita. Účinnost byla maximální až při přidání 1 μF . Pracovní frekvence se změnila minimálně. Zjištění přesné příčiny tohoto jevu by vyžadovala několik dalších měření.

7. ZÁVĚR

Hlavní náplní práce je návrh vhodné konstrukce přípravku (návrh obvodu a fyzické provedení) a provedení měření účinností na tomto přípravku. Práce obsahuje měření ještě na dalším přípravku s vyšším přeneseným výkonem.

V práci jsou obsaženy kapitoly zabývající se vlivem expozice tkání v polích vznikajících při fungování bezdrátových zařízení a řešící otázku vlivu *EM* pole na vznik karcinomu.

V kapitole 3 je obsažen návrh laboratorního přípravku, jeho schéma a popis parametrů. Bylo zvoleno zapojení ZVS z důvodu jednoduché konstrukce a schopnosti ladit se samostatně do rezonance.

Náplní kapitoly 4 je zpracování měření na samotném přípravku (Přípravek 1). Kapitola rovněž obsahuje měření dalšího zařízení pro bezdrátový přenos. Cílem těchto měření bylo zjistit následující závoslosti:

- Účinnost přenosu na proměnlivé vzdálenosti s neměnnou zátěží,
- účinnost přenosu na neproměnlivé zátěži v definovaných vzdálenostech (hledání impedančního přispůsobení)
- hodnoty pracovní frekvence v průběhu všech měření
- účinnost při natočení cívky
- účinnost při posunu středů cívek v definované vzdálenosti.

Základní předpoklady pro konstrukci, které vyplynuly z analýzy fungujících aplikací indukčního přenosu v dopravě, při nabíjení automobilů a aplikacích v bezdrátových nabíjecích stanicích drobných zařízení, jsou:

- minimální vzdálenosti mezi přenášenými cívkami,
- maximální soustřednost obou cívek,
- přesné naladění obou rezonančních obvodů
- provoz zařízení v oblasti impedančního přispůsobení

Zařízení bylo testováno v laboratorních podmínkách a jako zátěž sloužil posuvný rezistor. Přenášený výkon byl zjišťován na zátěži od 1 do 180 Ω .

7.1 Výsledky měření – Přípravek 1

Nejvyšší účinnosti přenosu u navrženého přípravku bylo dosaženo při vzdálenosti 10 cm s přidanou rezonanční kapacitou 0,9 μF . Hodnota účinnosti v tomto případě byla 22,9 % a pracovní frekvence 37,32 kHz.

Zajímavým jevem je samotná změna paralelní rezonanční kapacity. Při měření závislosti uvedené v grafu na Obr. 5-2 byla přidávána kapacita po násobcích 0,1 μF až do 1,1 μF . Účinnost nabyla maxima při hodnotě 0,9 μF přidané kapacity a její hodnota byla 22,91 %. Zatímco pracovní frekvence se změnila jen o 400 Hz. Z toho je možné usuzovat, že v námi idealizovaném obvodu působí ještě další neznámé. Vzhledem k měřené vzdálenosti mezi cívkami je popis obvodu komplikovanější. Především jde o vazební indukčnost a vliv kapacity cívek. Cívky společně vykazují kapacitní vazbu, která vstupuje do námi zvolených hodnot prvků rezonančního obvodu. Proto se obvod v takových situacích chová jinak, než by tomu bylo při velkých vzdálenostech.

Se zvětšením přenosové vzdálenosti na 15 cm a přidáním rezonanční kapacity 1 μF na straně sekundárního obvodu bylo dosaženo účinnosti 12,75 % při pracovní frekvenci 37,73 kHz.

Bez přidání kapacity byla nejvyšší dosažená účinnost 10,63 % na vzdálenosti 5 cm při frekvenci 37,7 kHz.

7.2 Výsledky měření – Přípravek 2

Měření na druhém přípravku bylo provedeno s totožným postupem jako u prvního přípravku. Zařízení se liší pouze v pracovní frekvenci, tedy volbou L a C parametrů v rezonančních obvodech, velikostí a počtem závitů použitých cívek.

V následující tabulce jsou shrnuty dosažené maximální účinnosti.

Tab. 7-1: Přípravek 2 – Tabulka maximálních hodnot účinností při daných vzdálenostech

Maximální naměřené účinnosti pro dané vzdálenosti				
vzdálenost x	úhel β	frekvence f	přenesený výkon P	účinnost η
[cm]	[°]	[kHz]	[W]	[%]
6	0	247,92	39,8	59,2
10	0	261,59	39,2	58,3
15	0	271,24	27,0	51,6
20	0	273,66	12,9	39,0
5	25	319,55	22,8	33,9
10	25	288,61	29,1	42,9
5	50	250,91	36,0	54,4
10	50	260,21	39,2	58,3

Průběhy závislostí k jednotlivým vzdálenostem jsou zobrazeny a popsány v kapitole 5.3 zbylé závislosti jsou přiloženy v příloze.

Ze závislostí lze vyčíst následující informace:

- V konfiguraci zařízení s cívkou o jednom masivním závitě lze dosáhnout účinnosti přibližně 50-60 % na vzdálenost 15 cm.
- Ve vzdálenosti 10 cm s různým natočením cívek dosahujeme lepší účinnosti při natočení 50° než při natočení o 25°, a to o 15,5 %. Pracovní frekvence se při těchto natočeních liší o 28 kHz.
- Cívky se nesmí v průmětu k pracovní ploše protínat. Výsledkem je nárůst frekvence na 319 kHz a pokles účinnosti.
- Je vhodné provozovat zařízení v oblasti impedančního přizpůsobení, neboť je zde účinnost nejvyšší.
- Největší nároky na návrhové konstrukční prvky jsou kladeny na díly rezonančních obvodů. Metalizované kondenzátory se značně zahřívají, velké proudy procházející cívkou ohřívají vodič. V uzavřeném obalu při přenosu větších výkonů by bylo nutné uvažovat o chlazení.
- Ze závislosti na Obr. 5-5 je zřejmé, že se při takovýchto vzdálenostech cívky nechovají jako bodový zdroj, a tedy přenesená energie neklesá přímo s mocnicnou vzdáleností, ale celkový vztah je složitější.
- Výslednou účinnost můžeme ovlivnit jak natočením cívek, tak natvarováním magnetického pole pomocí feromagnetika na jedné straně cívky. Toto měření nebylo provedeno, tedy nelze určit zvýšení účinnosti číselně. Poznatky vychází z Obr. 3-5.

Oblasti impedančního přizpůsobení jsou dobře viditelné na závislostech vynesných v grafech na obr. Obr. 5-6 a Obr. 5-7. Vhodná oblast impedancí zátěže pro provozování tohoto přípravku je v případě vzdálenosti 15 cm – 15-25 Ω . V druhém případě měření (20 cm) je to přibližně 30 Ω .

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SVAČINA, J. *Základy elektromagnetické kompatibility (EMC) 6 Normalizace v oblasti EMC*. *Elektrorevue*. [online]. 4.10.2001 [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01036/index.html#kap12>
- [2] KONDRATCHIK, D. *Návrh indukčního zařízení pro nabíjení akumulátorů*. Praha, 2015. diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Fakulta elektrotechnická
- [3] WEBB, A. *Wireless Electric Vehicle Charging Moves Forward, In Long Beach Buses* [online]. Poslední změna 13. 5. 2013 [cit. 2016-11-01]. Dostupné z: <http://www.plugincars.com/wireless-electric-vehicle-charging-moves-forward-long-beach-buses-127211.html>
- [4] HORČÍK, J. *Rychlovlaky s bezdrátovou technologií přenosu energie? V Jižní Koreji!* [online]. Poslední změna 21. 2. 2013 [cit. 2016-11-01]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/rychlovlaky-s-bezdratovou-technologie-prenosu-energie-v-jizni-koreji>
- [5] Ikea.com, *MORIK - Bezdrátová nabíječka* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://www.ikea.com/cz/cs/catalog/products/20299443/>
- [6] Alza.cz, *MORIK - Samsung EP-NG930B* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/samsung-ep-ng930b-cerna-d4089278.htm?catid=18854866>
- [7] GROHMAN, J. *Bezdrátové nabíjení v nárazníku auta* [online]. Poslední změna 12. 8. 2014 [cit. 2016-11-01]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/bezdratove-nabijeni-v-narazniku-auta>
- [8] NOVÁK, Ivo. *Účinky elektromagnetického pole na lidský organismus. TZB-info: Elektrotechnika*. [online]. Poslední změna 18.12.2016 [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://elektro.tzb-info.cz/13319-ucinky-elektromagnetickeho-pole-na-lidsky-organismus>
- [9] BAAN, Robert et al. *Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields* [online]. Poslední změna 22. 6. 2011 [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: [http://www.thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045\(11\)70147-4/fulltext](http://www.thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045(11)70147-4/fulltext)
- [10] International Agency for Research on Cancer: *Agents Classified by the IARC Monographs* [online]. IARC: ©2016, poslední změna 19. 5. 2017 [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/>
- [11] Státní zdravotní úřad: *Informace vydávané Národní referenční laboratoří pro neionizující elektromagnetická pole a záření NRL_19*. [online]. 2014 [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/documents/cpl/NRL_Eletromag/NRL_19.pdf
- [12] Státní zdravotní úřad: *Informace vydávané Národní referenční laboratoří pro neionizující elektromagnetická pole a záření NRL_17*. [online]. 2011 [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/NRL_17.pdf
- [13] Státní zdravotní úřad: *Informace vydávané Národní referenční laboratoří pro neionizující elektromagnetická pole a záření: NRL_16*. [online]. 2009 [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/documents/cpl/NRL_Eletromag/NRL_16.pdf

- [14] D ŘÍNOVSKÝ, J. *Elektromagnetická kompatibilita: přednášky*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2010. ISBN 978-80-214-4202-3.
- [15] Nařízení vlády č. 291/2015 Sb. *Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením* [online]. Platnost od 03. 11. 2015 [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-291>
- [16] Nařízení vlády č. 480/2000 Sb. *Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením* [online]. ze dne 22. listopadu 2000 [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: <http://www.epravo.cz/vyhledavani-aspi/?Id=50000&Section=1&IdPara=1&ParaC=2>
- [17] BRANČÍK, L. *Elektrotechnika 1*. Brno: VUTIUM, 2004. ISBN 80-214-2607-1.
- [18] *Magnetické pole*. spsemoh.cz. [online]. 10.4.2016 [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zae/el7.htm>
- [19] ZEMÁNEK, M. *Užití výkonových měničů ve zdrojích*. Brno, 2009. Disertační práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [20] Výukový portál sspbrno: elektromagnetická indukce [online]. cit. 2016-12-19. Dostupné z: https://moodle.sspbrno.cz/pluginfile.php/7453/mod_resource/content/1/Elektromagneticka%20indukce.pdf
- [21] ČAPEK, M. *Magnetické pole kolem masivního dlouhého vodiče* [online]. cit. 2016-12-19. Dostupné z: http://www.old2.elmag.org/doku.php/k317:simulace_elmag_poli:mag_pole_kolem_masiv_vodice
- [22] BROŽEK, P. *Měření intenzity magnetického pole souosých kruhových cívek* [online]. cit. 2016-12-19. Dostupné z: http://www.pavelbrozek.com/verejne_soubory/PraktikaII/23.%20M%EC%F8en%ED%20intenzity%20magnetick%20pole%20souos%20kruhov%20c%EDv%20ek.pdf
- [23] KOŠTÁL, J. *Statická pole a strašák ELF versus lidské zdraví* [online]. Časopis Elektro. 1/2006. FCC Public s. r. o.: © 2014 - 2016 [cit. 2016-12-19] Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/staticka-pole-a-strasak-elf-versus-lidske-zdravi--13347>
- [24] 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/bezdratove-nabijeni-mobilu-a-tabletu-vedecke-okenko>
- [25] KOPŘIVA, L. *Účinnost bezdrátového indukčního dobíjení* [online]. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Vladimír Kindl, Ph.D..
- [26] ČSN IEC 1000-1-1. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)*.
- [27] ŠKOPEK, P. *Techbox: bezdrátová nabíječka vás zbaví kabelů* [online]. Poslední změna 16. 11. 2013 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <https://mobilenet.cz/clanky/techbox-bezdratova-nabijeka-vas-zbavi-kabelu-13749>
- [28] KOVACZICZ, J. *Bezdrátové nabíjení: Jak funguje a jak ho přidat do jakéhokoliv telefonu?* [online]. poslední změna 1.12.2015 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z:

- <https://www.svetandroida.cz/bezdratove-nabijeni-funkce-kompatibilita-201512#comments>
- [29] PERNICA, J. *Bezdrátové nabíjení dostane vzpruhu, překážkou nebude ani kovový kryt* [online]. Poslední změna 29.7.2015 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <https://www.svetandroida.cz/qualcomm-wipower-201507>
- [30] MACHO, D. *PoWiFi: Nabíjení přes Wi-Fi konečně funguje, zázraky ale nečekejme* [online]. Poslední změna 24.11.2015 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <https://www.svetandroida.cz/powifi-bezdratove-nabijeni-201511>
- [31] JAVŮREK, K. *WattUp: bezdrátové nabíjení zařízení až do 5 metrů* [online]. poslední změna 20. 1. 2015 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.zive.cz/clanky/wattup-bezdratove-nabijeni-zarizeni-az-do-5-metru/sc-3-a-176878/default.aspx>
- [32] ČSN EN 55011 ed. 3. *Průmyslová, vědecká a lékařská zařízení - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření.*
- [33] HOLEC, V. *Bezdrátové nabíjení míří z telefonů do aut, testuje jej Toyota* [online]. Poslední změna 21. 2. 2014 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.autorevue.cz/bezdratove-nabijeni-miri-z-telefonu-do-aut-testuje-jej-toyota>
- [34] GROHMANN, J. *Jihokorejské elektrobusy získávají energii ze silnice* [online]. Poslední změna 7. 8. 2013 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/jihokorejske-elektrobusy-ziskavaji-energii-ze-silnice>
- [35] HOŘČÍK, J. *Ve Španělsku zkouší bezdrátové rychlodobíjení* [online]. Poslední změna 5. 1. 2013 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/ve-spanelsku-zkousi-bezdratove-rychlodobijeni>
- [36] Proelektrotechniky.cz *Indukčně dobíjený elektrobus v Mannheimu: další krok k linkovému provozu* [online]. Poslední změna 16. 6. 2015 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/167.php>
- [37] LAŠO, M. *Bezdrátový přenos energií.* Brno, 2014. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Krbal.
- [38] Projekt: Inovace oboru Mechatronik pro Zlínský kraj [online]. Poslední změna 1. 11. 2010 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=17785&revision=-1&instance=2>
- [39] MUNICH, A. *ZVS (Mazilli) Driver* [online]. Poslední změna 26. 12. 2010 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://adammunich.com/zvs-driver/>
- [40] SRB, L. *WiTricity: WIT-3300 Deployment Kit* [online]. Poslední změna 15. 3. 2013 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/witricity-wit-3300-deployment-kit>
- [41] VŠETEČKA, R. *Vědci poprvé poslali elektrinu vzduchem. Dráty už nebudou třeba* [online]. Poslední změna 8. 6. 2007 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/vedci-poprve-poslali-elekrinu-vzduchem-draty-uz-nebudou-treba-pwp-/tec_technika.aspx?c=A070608_103555_tec_technika_vse
- [42] JELÍNEK, A. *Jednotka pro bezdrátový přenos elektrické energie.* Brno 2013. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D..

PŘÍLOHA A

Tab. 0-1: Nejvyšší přípustné hodnoty SAR a SA pro zaměstnance a ostatní osoby [16]

Měrný absorbovaný výkon (SAR) a měrná absorbovaná energie (SA) - - nejvyšší přípustné hodnoty				
Platí pro frekvence od 100000 Hz do 10 ¹⁰ Hz	Měrný absorbovaný výkon - SAR - středovaný pro kterýkoli šestiminutový interval a celé tělo	SAR středovaný pro kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 ga) tkáně s výjimkou rukou, zápěstí, chodidel a kotníků	SAR středovaný pro kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 ga) tkáně rukou, zápěstí, chodidel a kotníků	Špičková hodnota měrné absorbované energie SA středovaná pro kterýchkoli 10 ga) tkáně
zaměstnanci	0,4 W/kg	10 W/kg	20 W/kg	0,01 J/kg b)
ostatní osoby	0,08 W/kg	2 W/kg	4 W/kg	0,002 J/kg b)

Tab. 0-2: Přípravek 1 – Naměřené hodnoty účinností a pracovní frekvence při vzdálenosti 5cm

Účinnosti přenosu energie při vzdálenosti 5cm.							
U ₁	I ₁	U ₂	I ₂	P ₁	P ₂	f	účinnost η
[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[w]	[kHz]	[%]
12,30	0,2500	0,56	0,2500	3,0750	0,1400	37,60	4,55
12,30	0,2600	1,70	0,2000	3,1980	0,3400	37,70	10,63
12,40	0,2500	2,22	0,1400	3,1000	0,3108	37,78	10,03
12,40	0,2300	2,30	0,0820	2,8520	0,1886	37,83	6,61
12,40	0,2200	2,50	0,0535	2,7280	0,1338	37,83	4,90
12,30	0,2200	2,50	0,0470	2,7060	0,1175	37,82	4,34
12,20	0,2180	2,50	0,0405	2,6596	0,1013	37,82	3,81
12,20	0,2140	2,60	0,0340	2,6108	0,0884	37,83	3,39
12,20	0,2120	2,60	0,0295	2,5864	0,0767	37,84	2,97
12,20	0,2100	2,65	0,0235	2,5620	0,0623	37,84	2,43

Tab. 0-3: Přípravek 1 – Naměřené hodnoty účinností přenosu s přidanou rezonanční kapacitou při vzdálenosti 10 cm

Hodnoty účinností přenosu při přidávání (sekundární) paralelní rezonanční kapacity a vzdálenosti 10cm.								
C	U ₁	I ₁	U ₂	I ₂	P ₁	P ₂	f	účinnost η
[μF]	[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[w]	[kHz]	[%]
0,33μ	12,40	0,2040	0,50	0,0130	2,5296	0,0065	37,82	0,26
0,33+0,1μ	12,30	0,2040	0,50	0,0134	2,5092	0,0067	37,81	0,27
0,33+0,2μ	12,30	0,2060	0,60	0,0166	2,5338	0,0100	37,78	0,39
0,33+0,3μ	12,30	0,2080	0,80	0,0240	2,5584	0,0192	37,76	0,75
0,33+0,4μ	12,30	0,2100	0,98	0,0350	2,5830	0,0343	37,72	1,33
0,33+0,5μ	12,30	0,2160	1,30	0,0475	2,6568	0,0618	37,67	2,32
0,33+0,6μ	12,26	0,2220	1,72	0,0640	2,7217	0,1101	37,60	4,04
0,33+0,7μ	12,30	0,2500	2,50	0,0900	3,0750	0,2250	37,53	7,32
0,33+0,8μ	12,30	0,2850	3,50	0,1400	3,5055	0,4900	37,39	13,98
0,33+0,9μ	12,30	0,3800	5,10	0,2100	4,6740	1,0710	37,32	22,91
0,33+1,0μ	12,30	0,4500	5,00	0,2340	5,5350	1,1700	37,38	21,14
Poznámka: Kapacita sériového rezonančního kondenzátoru daného pevně v obvodu je 0,33μF								

Tab. 0-4: Přípravek 1 – Naměřené hodnoty účinností přenosu s přidanou rezonanční kapacitou při vzdálenosti 15 cm

Hodnoty účinností přenosu energie při vzdálenosti 15cm a přidané kapacitě 1,1μF.							
U ₁	I ₁	U ₂	I ₂	P ₁	P ₂	f	účinnost η
[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[w]	[kHz]	[%]
12,30	0,2500	0,04	0,1580	3,0750	0,0066	38,00	0,22
12,30	0,2700	2,20	0,1320	3,3210	0,2904	37,92	8,74
12,30	0,2900	3,60	0,1120	3,5670	0,4032	37,84	11,30
12,30	0,2900	5,10	0,0890	3,5670	0,4539	37,73	12,72
12,30	0,2900	5,60	0,0780	3,5670	0,4368	37,68	12,25
12,30	0,2900	6,20	0,0640	3,5670	0,3968	37,64	11,12
12,30	0,2850	6,70	0,0560	3,5055	0,3752	37,61	10,70
12,30	0,2850	7,10	0,0455	3,5055	0,3231	37,58	9,22

Tab. 0-5: Přípravek 2 – Naměřené hodnoty účinnosti přenosu při konstantní zátěži a změně vzdálenosti od 6 do 36 cm

Účinnosti přenosu energie při změně vzdálenosti 6-36cm s neměnnou zátěží							
U ₁	I ₁	U ₂	I ₂	P ₁	P ₂	f	účinnost η
[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[w]	[kHz]	[%]
11,20	6,0000	30,00	1,3250	67,2000	39,7500	247,92	59,15
11,40	5,4500	31,00	1,1500	62,1300	35,6500	247,64	57,38
11,40	5,1500	31,00	1,0500	58,7100	32,5500	247,50	55,44
11,40	4,7750	32,00	0,9000	54,4350	28,8000	247,26	52,91
11,60	4,5500	32,50	0,8250	52,7800	26,8125	247,19	50,80
11,60	4,4000	33,50	0,7750	51,0400	25,9625	247,14	50,87
11,80	4,2250	34,00	0,7250	49,8550	24,6500	247,10	49,44
11,80	4,0750	34,00	0,6500	48,0850	22,1000	247,07	45,96
11,80	3,9500	34,00	0,6000	46,6100	20,4000	247,05	43,77
11,80	3,7500	35,00	0,5500	44,2500	19,2500	247,02	43,50
11,80	3,6000	35,00	0,5000	42,4800	17,5000	246,99	41,20
11,80	3,5000	35,00	0,4750	41,3000	16,6250	246,97	40,25

Tab. 0-6: Přípravek 2 – Naměřené hodnoty účinnosti při vzdálenosti 10 cm s proměnnou zátěží

Účinnosti přenosu energie při vzdálenosti 10cm s proměnnou zátěží							
U ₁	I ₁	U ₂	I ₂	P ₁	P ₂	f	účinnost η
[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[w]	[kHz]	[%]
11,20	6,0000	27,00	1,4500	67,2000	39,1500	261,59	58,26
11,40	5,5500	29,00	1,2250	63,2700	35,5250	260,85	56,15
11,40	5,0500	30,00	1,0000	57,5700	30,0000	259,19	52,11
11,60	4,6000	32,00	0,8250	53,3600	26,4000	258,59	49,48
11,70	4,3000	33,50	0,7000	50,3100	23,4500	258,26	46,61
11,80	4,0500	34,00	0,6000	47,7900	20,4000	258,09	42,69
11,80	3,9500	34,00	0,5500	46,6100	18,7000	257,00	40,12
11,80	3,7500	35,00	0,5000	44,2500	17,5000	257,89	39,55
11,80	3,6000	35,00	0,4500	42,4800	15,7500	257,83	37,08
11,90	3,5000	36,00	0,4250	41,6500	15,3000	257,77	36,73
11,90	3,4250	35,50	0,4000	40,7575	14,2000	257,75	34,84

Tab. 0-7: Přípravek 2 – Naměřené hodnoty účinnosti přenosu při vzdálenosti 15 cm s proměnnou zátěží

Účinnosti přenosu energie při vzdálenosti 15cm s proměnnou zátěží							
U ₁	I ₁	U ₂	I ₂	P ₁	P ₂	f	účinnost η
[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[w]	[kHz]	[%]
12,20	1,5000	1,24	1,5500	18,3000	1,9220	274,11	10,50
12,00	2,1750	6,60	1,4500	26,1000	9,5700	273,74	36,67
12,00	2,4500	8,50	1,4000	29,4000	11,9000	273,50	40,48
12,00	2,8000	11,60	1,3250	33,6000	15,3700	273,34	45,74
11,90	3,3000	15,20	1,2750	39,2700	19,3800	273,03	49,35
11,80	3,8000	18,80	1,2250	44,8400	23,0300	272,59	51,36
11,70	4,2000	22,00	1,1500	49,1400	25,3000	272,02	51,49
11,60	4,5000	24,50	1,1000	52,2000	26,9500	271,24	51,63
11,60	4,6750	26,50	1,0500	54,2300	27,8250	270,42	51,31
11,60	4,8250	29,00	0,9750	55,9700	28,2750	269,00	50,52
11,60	4,7500	30,00	0,9000	55,1000	27,0000	267,79	49,00
11,60	4,6000	31,50	0,8000	53,3600	25,2000	266,96	47,23
11,60	4,5000	32,00	0,7500	52,2000	24,0000	266,45	45,98
11,60	4,4000	33,50	0,7000	51,0400	23,4500	265,01	45,94
11,70	4,2500	34,00	0,6000	49,7250	20,4000	265,55	41,03

Tab. 0-8: Přípravek 2 – Naměřené účinnosti přenosu při vzdálenosti 20 cm s proměnnou zátěží

Účinnosti přenosu energie při vzdálenosti 20cm s proměnnou zátěží							
U ₁	I ₁	U ₂	I ₂	P ₁	P ₂	f	účinnost η
[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[w]	[kHz]	[%]
12,20	1,5500	3,50	0,9000	18,9100	3,1500	273,67	16,66
12,20	1,7000	6,00	0,8500	20,7400	5,1000	273,61	24,59
12,20	1,8750	7,80	0,8000	22,8750	6,2400	273,58	27,28
12,00	2,1000	11,10	0,7750	25,2000	8,6025	273,54	34,14
12,00	2,4000	14,80	0,7500	28,8000	11,1000	273,51	38,54
12,00	2,5750	17,00	0,7000	30,9000	11,9000	273,56	38,51
12,00	2,7500	19,80	0,6500	33,0000	12,8700	273,66	39,00
12,00	2,9000	21,80	0,6000	34,8000	13,0800	273,81	37,59
12,00	2,9500	24,00	0,5750	35,4000	13,8000	274,07	38,98
12,00	3,0500	25,50	0,5250	36,6000	13,3875	274,39	36,58
12,00	3,2500	28,00	0,5000	39,0000	14,0000	274,61	35,90
12,00	3,2750	29,00	0,4500	39,3000	13,0500	274,96	33,21
11,96	3,0750	29,00	0,3900	36,7770	11,3100	275,57	30,75

Tab. 0-9: Přípravek 2 – Naměřené účinnost přenosu při vzdálenosti 5 cm a vychýlením 25°

Účinnosti přenosu energie při vzdálenosti 5cm s proměnnou zátěží s vychýlením 25°							
U ₁	I ₁	U ₂	I ₂	P ₁	P ₂	f	účinnost η
[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[w]	[kHz]	[%]
11,20	6,0000	32,50	0,7000	67,2000	22,7500	319,55	33,85
11,40	5,6000	32,00	0,6000	63,8400	19,2000	319,93	30,08
11,30	5,4500	32,00	0,5500	61,5850	17,6000	320,16	28,58
11,40	5,3000	32,50	0,5050	60,4200	16,4125	320,41	27,16
11,40	5,1000	33,00	0,4500	58,1400	14,8500	320,37	25,54
11,40	4,9500	33,50	0,4000	56,4300	13,4000	320,55	23,75
11,60	4,8000	33,50	0,3500	55,6800	11,7250	320,71	21,06
11,70	4,7000	34,00	0,3200	54,9900	10,8800	320,83	19,79
11,60	4,6000	34,00	0,3000	53,3600	10,2000	320,93	19,12
11,70	4,5500	33,50	0,2950	53,2350	9,8825	320,98	18,56
11,70	4,5250	34,00	0,2800	52,9425	9,5200	321,06	17,98
11,70	4,5000	34,00	0,2600	52,6500	8,8400	321,14	16,79
11,80	4,4500	34,00	0,2400	52,5100	8,1600	321,21	15,54

Tab. 0-10: Přípravek 2 – Naměřené účinnost přenosu při vzdálenosti 10 cm a vychýlením 25°

Účinnosti přenosu energie při vzdálenosti 10cm s proměnnou zátěží s vychýlením 25°							
U ₁	I ₁	U ₂	I ₂	P ₁	P ₂	f	účinnost η
[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[w]	[kHz]	[%]
11,30	6,0000	34,00	0,8550	67,8000	29,0700	288,61	42,88
11,40	5,3500	34,00	0,7100	60,9900	24,1400	289,66	39,58
11,40	5,0000	34,00	0,6200	57,0000	21,0800	290,15	36,98
11,60	4,7500	34,00	0,5700	55,1000	19,3800	290,44	35,17
11,70	4,5500	34,00	0,5200	53,2350	17,6800	290,66	33,21
11,70	4,4500	34,50	0,4800	52,0650	16,5600	290,81	31,81
11,80	4,3000	34,50	0,4400	50,7400	15,1800	290,95	29,92
11,80	4,2000	34,50	0,4100	49,5600	14,1450	291,07	28,54
11,80	4,0500	34,50	0,3800	47,7900	13,1100	291,16	27,43
11,80	4,0000	34,50	0,3600	47,2000	12,4200	291,23	26,31
11,80	3,9500	34,50	0,3300	46,6100	11,3850	291,31	24,43
11,80	3,8500	34,50	0,3100	45,4300	10,6950	291,36	23,54
11,80	3,7500	34,50	0,2900	44,2500	10,0050	291,51	22,61

Tab. 0-11: Přípravek 2 – Naměřené účinnost přenosu při vzdálenosti 5 cm a vychýlením 50°

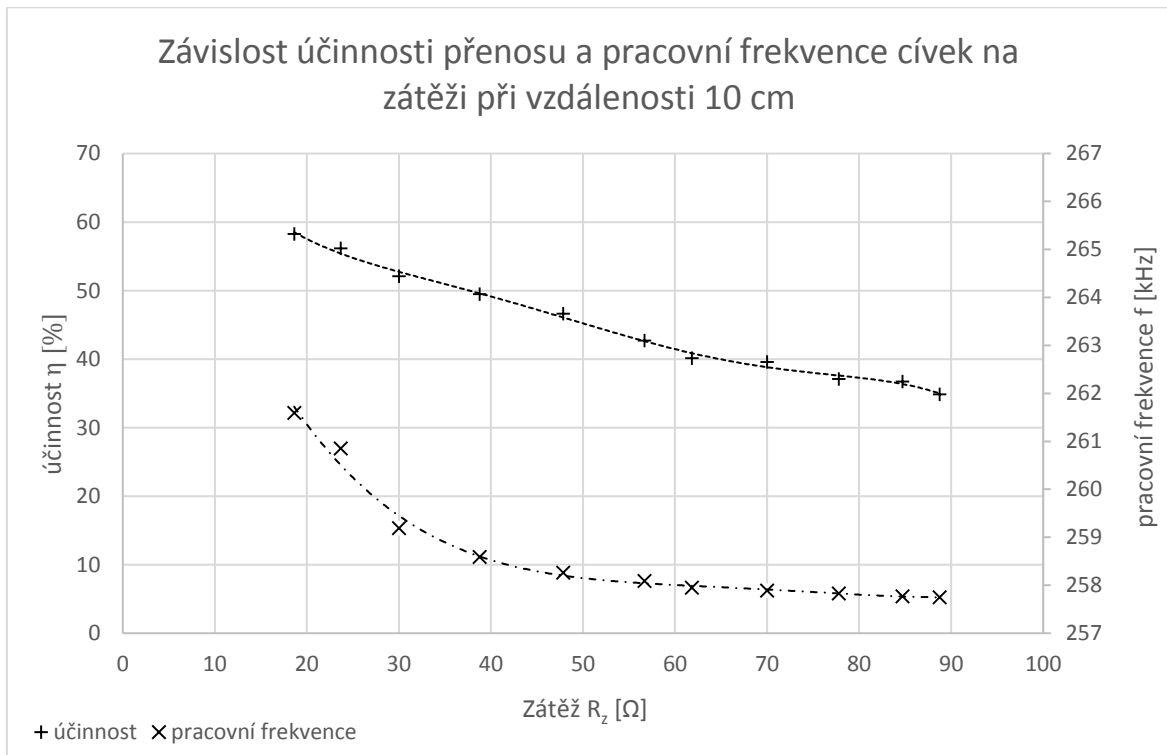
Účinnosti přenosu energie při vzdálenosti 5cm s proměnnou zátěží s vychýlením 50°							
U ₁	I ₁	U ₂	I ₂	P ₁	P ₂	f	účinnost η
[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[w]	[kHz]	[%]
11,60	5,7000	30,00	1,2000	66,1200	36,0000	250,91	54,45
11,60	5,5000	30,00	1,1400	63,8000	34,2000	250,86	53,61
11,60	5,2000	31,00	1,0200	60,3200	31,6200	250,65	52,42
11,60	4,8000	32,00	0,9000	55,6800	28,8000	250,45	51,72
11,70	4,5500	33,00	0,8100	53,2350	26,7300	250,32	50,21
11,80	4,3000	33,50	0,7050	50,7400	23,6175	250,19	46,55
11,80	4,0500	34,00	0,6350	47,7900	21,5900	250,11	45,18
11,80	3,9250	34,50	0,5750	46,3150	19,8375	250,05	42,83
11,80	3,7500	35,00	0,5200	44,2500	18,2000	249,98	41,13
11,80	3,6000	35,00	0,4900	42,4800	17,1500	249,94	40,37
12,00	3,5000	35,50	0,4400	42,0000	15,6200	249,92	37,19
12,00	3,4000	35,50	0,4100	40,8000	14,5550	249,88	35,67
12,00	3,2500	36,00	0,3650	39,0000	13,1400	249,85	33,69

Tab. 0-12: Přípravek 2 – Naměřené účinnost přenosu při vzdálenosti 10 cm a vychýlením 50°

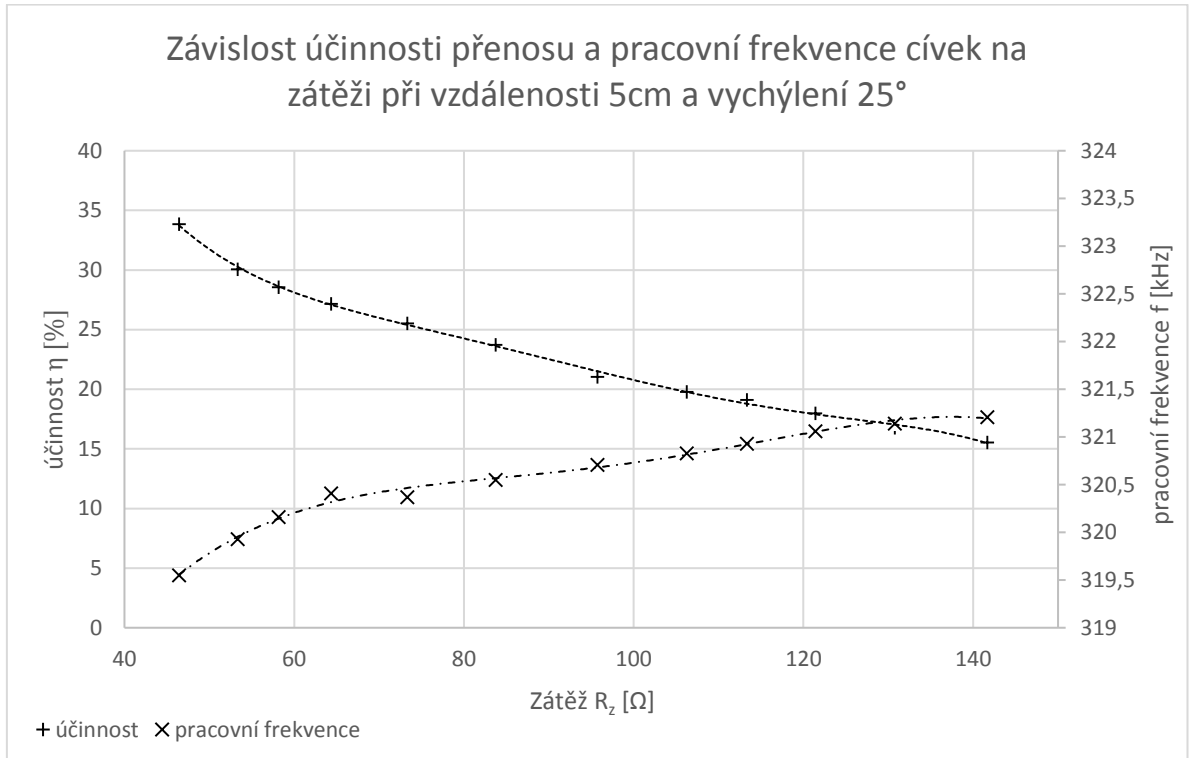
Účinnosti přenosu energie při vzdálenosti 10cm s proměnnou zátěží s vychýlením 50° - cívky se průmětem komo na stůl protínají							
U ₁	I ₁	U ₂	I ₂	P ₁	P ₂	f	účinnost η
[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[w]	[kHz]	[%]
11,20	6,0000	28,00	1,4000	67,2000	39,2000	260,21	58,33
11,30	5,6000	29,00	1,2500	63,2800	36,2500	259,19	57,29
11,40	5,2500	30,00	1,0900	59,8500	32,7000	258,66	54,64
11,40	5,1000	30,50	1,0000	58,1400	30,5000	258,36	52,46
11,60	4,8000	31,50	0,8950	55,6800	28,1925	257,99	50,63
11,70	4,5500	32,00	0,8100	53,2350	25,9200	257,74	48,69
11,70	4,3250	33,50	0,7150	50,6025	23,9525	257,52	47,33
11,80	4,2000	34,00	0,6500	49,5600	22,1000	257,36	44,59
11,80	4,0500	34,00	0,6000	47,7900	20,4000	257,26	42,69
11,80	3,8000	34,50	0,5200	44,8400	17,9400	257,11	40,01
11,80	3,5500	35,00	0,4400	41,8900	15,4000	256,97	36,76
11,90	3,4500	36,00	0,3900	41,0550	14,0400	256,91	34,20
11,90	3,0500	36,00	0,3500	36,2950	12,6000	256,87	34,72

Tab. 0-13: Přípravek 2 – Naměřené účinnosti přenosu energie při vzájemném posunu středů dvou rovnoběžných cívek ve vzdálenosti 5 cm od sebe

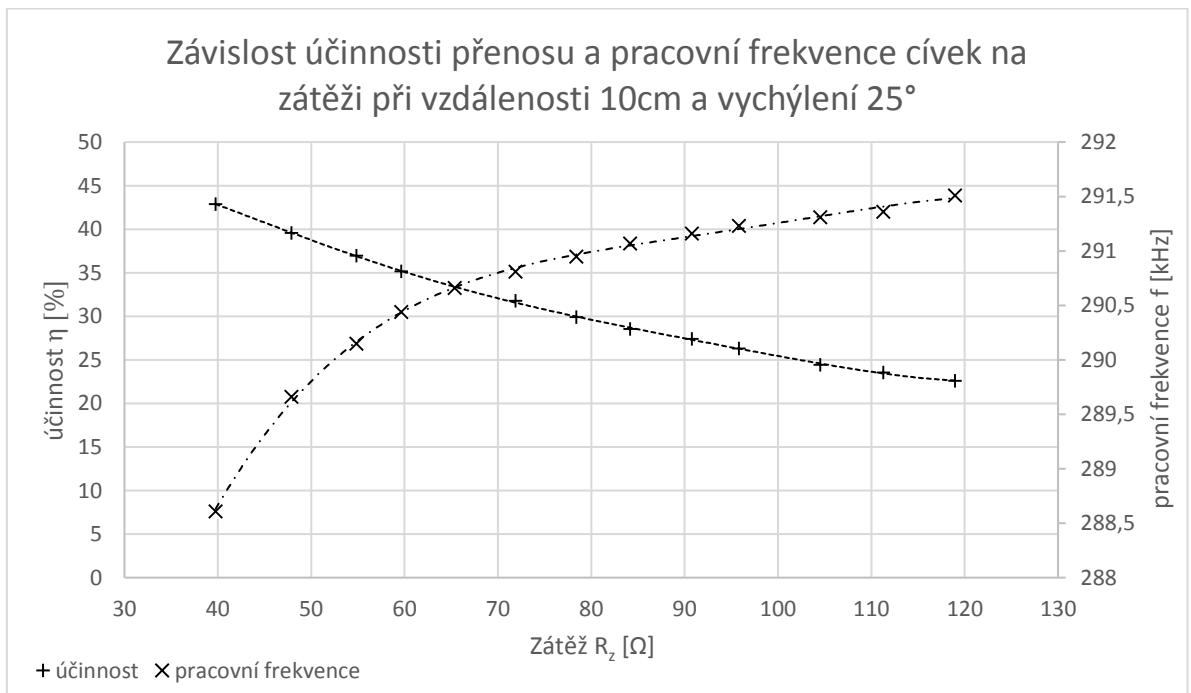
Účinnosti přenosu energie při vzájemném posunu středů dvou rovnoběžných cívek ve vzdálenosti 5cm od sebe							
U_1	I_1	U_2	I_2	P_1	P_2	f	účinnost η
[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[w]	[kHz]	[%]
11,40	5,6000	30,00	1,2000	63,8400	36,0000	245,36	56,39
11,30	5,6000	30,00	1,2000	63,2800	36,0000	244,82	56,89
11,40	5,6000	30,00	1,1900	63,8400	35,7000	246,69	55,92
11,40	5,6000	30,00	1,1850	63,8400	35,5500	249,49	55,69
11,40	5,6000	29,90	1,1700	63,8400	34,9830	252,53	54,80
11,40	5,5750	29,80	1,1600	63,5550	34,5680	257,16	54,39
11,40	5,4500	29,00	1,1400	62,1300	33,0600	262,43	53,21
11,60	4,8000	26,50	1,0600	55,6800	28,0900	269,04	50,45
12,00	2,7000	18,00	0,7100	32,4000	12,7800	273,34	39,44
12,20	1,5000	7,95	0,3150	18,3000	2,5043	273,67	13,68
12,20	1,2250	0,54	0,0200	14,9450	0,0108	273,67	0,07
12,20	1,3000	4,90	0,1800	15,8600	0,8820	273,73	5,56
12,20	1,4500	7,50	0,2900	17,6900	2,1750	273,77	12,30



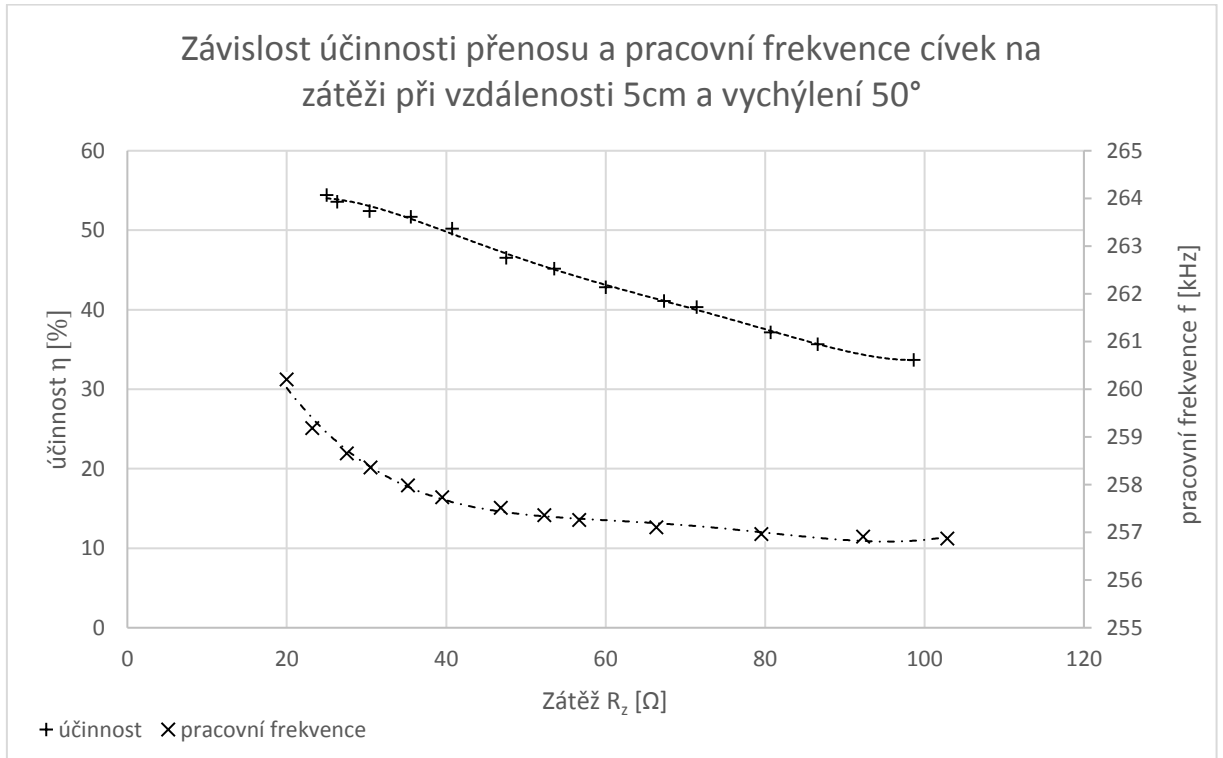
Obr. 0-1: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence při vzdálenosti 10cm s proměnlivou zátěží.



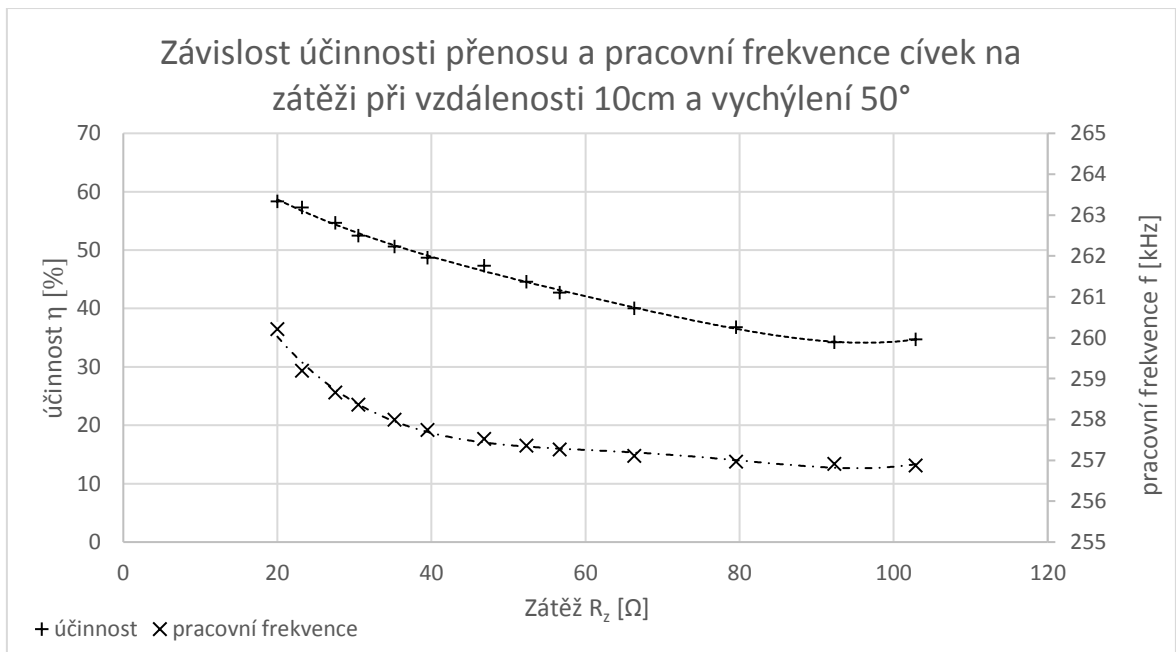
Obr. 0-2: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence při vzdálenosti 5cm a vychýlení 25° s proměnlivou zátěží.



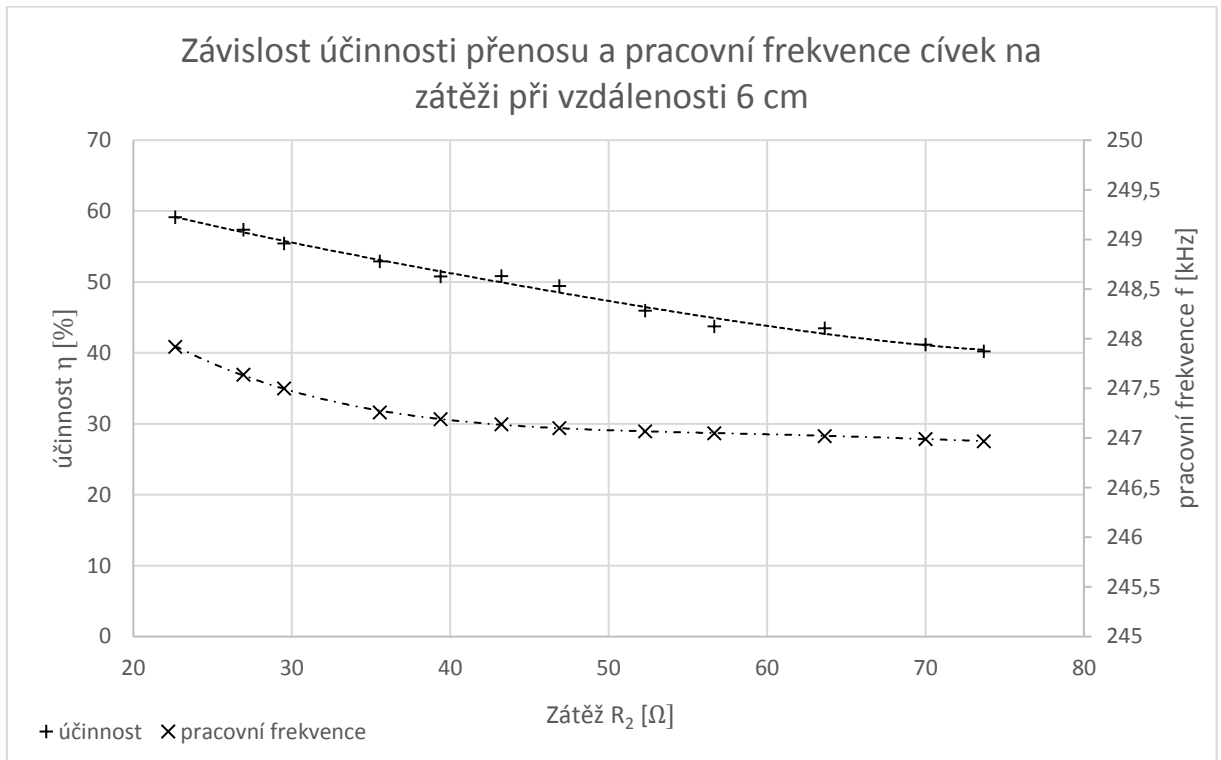
Obr. 0-3: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence při vzdálenosti 10 cm a vychýlení 25° s proměnlivou zátěží.



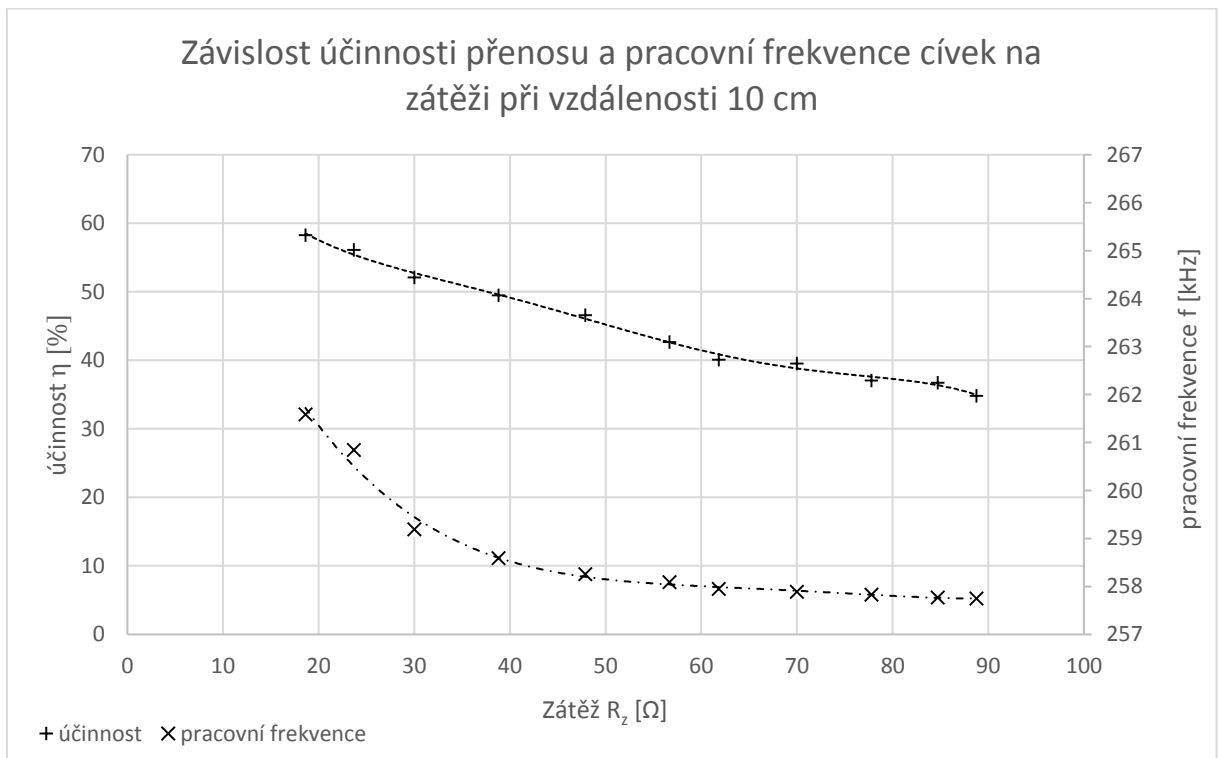
Obr. 0-4: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence na proměnlivé zátěži při vzdálenosti 5 cm a natočením 50°



Obr. 0-5: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence při vzdálenosti 10 cm a vychýlení 50° s proměnlivou zátěží



Obr. 0-6: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence na proměnlivé zátěži při vzdálenosti 6 cm



Obr. 0-7: Přípravek 2 – závislost účinnosti přenosu a pracovní frekvence na proměnlivé zátěži při vzdálenosti 10 cm