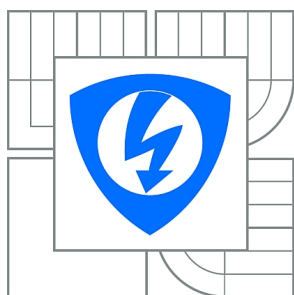


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# **VYSOKOÚČINNÁ BEZDRÁTOVÉ NABÍJACÍ ZAŘÍZENÍ PRO LI-ION AKUMULÁTORY**

WIRELESS LI-ION CHARGER WITH HIGH EFFICIENCY

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

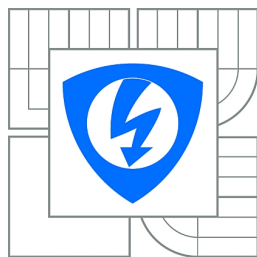
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**MARIAN BOTTYÁN**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. TAMÁS PÁL**

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Teleinformatika

**Student:** Marian Bottyán

**Ročník:** 3

**ID:** 129344

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Vysokoúčinná bezdrátové nabíjecí zařízení pro li-ion akumulátory**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh a vývoj bezdrátového nabíjecího zařízení, který bezkontaktně bude schopný nabíjet akumulátory typu Li-ion. Základním kritériem pro návrh bude optimalizace účinnosti systému a rychlosti nabíjení akumulátoru. Součástí práce je výběr vhodných komponentů a návrh indukčního přenosového systému pro přenos elektrické energie mezi napájecí a nabíjecí částí zařízení.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

1] MASAKI YOSHIO, Ralph J. Lithium-ion batteries: science and technologies. New York: Springer, 2010. ISBN 978-144-1922-342.

[2] PISTOIA, [editor] Gianfranco. Lithium-ion batteries: advances and applications. Amsterdam: Elsevier, 2014. ISBN 978-044-4595-133.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 2.6.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Tamás Pál

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**

*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.

## **ABSTRAKT**

Zámerom bakalárskej práce je návrh a vývoj vysokoúčinného bezdrôtového nabíjacieho zariadenia li-ion batérií. Podľa kritérií na vysokú účinnosť a bezpečnosti zariadenia na okolie sú v návrhu volené súčiastky. V závere práce sa odhadli úbytky na súčiastkách zariadenia. Na ich základe sa určil čas nabíjania a účinnosť.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

Bezdrôtové nabíjanie, elektromagnetická indukcia, účinnosť bezdrôtového prenosu, BQ500211A, BQ51013B

## **ABSTRACT**

The aim of bachelor's work is the design and development of high efficiency wireless charger for li-ion batteries. According to the criteria for high efficiency and safety of the device on surroundings were components chosen in design. In conclusion, this work has estimated losses on components of the device. On their basis was determined the charging time and efficiency.

## **KEYWORDS**

Wireless charging, electromagnetic induction, efficiency of wireless transmission, BQ500211A, BQ51013B

BOTTYÁN, Marian *Vysokoúčinná bezdrátové nabíjecí zařízení pro li-ion akumulátory*: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 51 s. Vedúci práce bol Ing. Tamás Pál,

## PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému „Vysokoučinná bezdrátové nabíjecí zařízení pro li-ion akumulátory“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/nebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorskom, o právach súvisejúcich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), vo znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

(podpis autora)

## POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Tamásovi Pálovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a nápomocné rady k práci.

Brno .....

.....

(podpis autora)

## POĎAKOVANIE

Výzkum popsaný v tejto bakalárskej pr bol realizovaný v laboratóriách podporených projektom SIX; registračné číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačný program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
(podpis autora)

# OBSAH

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| Úvod                                                                  | 11        |
| <b>1 Technológia bezdrôtového nabíjania</b>                           | <b>12</b> |
| 1.1 Základné pojmy . . . . .                                          | 12        |
| 1.1.1 Maxwellove rovnice (diferenciálny aj integrálny tvar) . . . . . | 12        |
| 1.1.2 Magnetická indukcia . . . . .                                   | 12        |
| 1.1.3 Lorentzova sila . . . . .                                       | 12        |
| 1.1.4 Vzájomné pôsobenie dvoch vodičov . . . . .                      | 13        |
| 1.1.5 Magnetický indukčný tok . . . . .                               | 13        |
| 1.1.6 Lenzov zákon . . . . .                                          | 13        |
| 1.1.7 Vlastná a vzájomná indukcia . . . . .                           | 14        |
| 1.1.8 Energia magnetického poľa . . . . .                             | 15        |
| 1.2 Princíp činnosti bezdrôtového prenosového systému . . . . .       | 16        |
| 1.3 Účinnosť indukčného prenosového systému . . . . .                 | 17        |
| 1.3.1 Porovnanie účinnosti nabíjania bezdrôtovo a cez vodič . . . . . | 19        |
| 1.4 Bezpečnosť a vplyv na prostredie . . . . .                        | 20        |
| 1.4.1 Prenos na krátke vzdialenosti (Near Field) . . . . .            | 20        |
| 1.5 Štandardizácia a interpolácia indukčného nabíjania . . . . .      | 22        |
| <b>2 Návrh prenosového systému</b>                                    | <b>24</b> |
| 2.1 Výber riešenia systému na bezdrôtový prenos energie . . . . .     | 24        |
| 2.2 Porovnanie a výber jednotlivých systémov . . . . .                | 25        |
| 2.3 Bloková schéma a princíp komunikácie . . . . .                    | 26        |
| 2.4 Rozpis vybraných súčiastok a ich funkcií . . . . .                | 27        |
| 2.4.1 Voľba cievok a kondezátorov . . . . .                           | 27        |
| 2.4.2 Dynamické limitovanie výkonu (DPL). . . . .                     | 27        |
| 2.4.3 Cudzie predmety medzi cievkami . . . . .                        | 27        |
| 2.4.4 Tepelná ochrana . . . . .                                       | 28        |
| 2.4.5 Výkonová časť (Power Train) . . . . .                           | 28        |
| 2.4.6 Malá kludová spotreba . . . . .                                 | 28        |
| 2.5 Výpočty . . . . .                                                 | 29        |
| 2.5.1 Čas nabíjania . . . . .                                         | 29        |
| 2.5.2 Účinnosť . . . . .                                              | 30        |
| 2.5.3 Meranie testovacieho vzorku . . . . .                           | 30        |
| <b>3 Záver</b>                                                        | <b>34</b> |
| <b>Literatúra</b>                                                     | <b>35</b> |

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| Zoznam symbolov, veličín a skratiek            | 37 |
| Zoznam príloh                                  | 39 |
| A Schémy zapojenia vysielачa a prijímača       | 40 |
| B Predlohy pre výrobu plošného spoja prijímača | 45 |
| C Obrázky stavu osadenia plošných spojov       | 47 |
| D Hodnoty namerané osciloskopom                | 49 |



# ZOZNAM OBRÁZKOV

|     |                                                                          |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Typické usporiadanie prenosového systému [5]. . . . .                    | 16 |
| 1.2 | Ilustračné obrázky k experimentom [2]. . . . .                           | 17 |
| 1.3 | Graf účinnosti prenosu na vzdialenosti medzi cievkami [5]. . . . .       | 18 |
| 1.4 | Bloková schéma pre prenos vodičom [9]. . . . .                           | 19 |
| 1.5 | Bloková schéma pre bezdrôtový prenos [9]. . . . .                        | 19 |
| 1.6 | Rozdelenie bezdrôtových prenosov energie [9]. . . . .                    | 20 |
| 1.7 | Zobrazenie hraničných oblastí [4]. . . . .                               | 21 |
| 1.8 | Parametre podľa zvoleného frekvenčného pásma [7]. . . . .                | 23 |
| 1.9 | Porovnanie účinností prenosu na prijímači bq51221 [17]. . . . .          | 23 |
| 2.1 | Porovnanie účinností vysielateľov. Naľavo TI [11], napravo IDT [18]. . . | 25 |
| 2.2 | Funkčná bloková schéma bezdrôtového prenosového systému [11]. . .        | 26 |
| 2.3 | Graf priebehu nabíjania (bezdrôtovo). . . . .                            | 31 |
| 2.4 | Graf priebehu nabíjania (cez kábel). . . . .                             | 32 |
| A.1 | Schéma zapojenia lineárneho stabilizátora (Buck Regulator). . . . .      | 40 |
| A.2 | Schéma zapojenia s kontrolérom BQ500211A. . . . .                        | 41 |
| A.3 | Schéma zapojenia výkonovej časti (Power Train). . . . .                  | 41 |
| A.4 | Schéma zapojenia sledovača prúdu. . . . .                                | 42 |
| A.5 | Schéma zapojenia s mikrokontrolérom MSP430G2001 . . . . .                | 43 |
| A.6 | Schéma zapojenia prijímača. . . . .                                      | 44 |
| B.1 | Osadenie súčiastok. Horná časť. . . . .                                  | 45 |
| B.2 | Predloha pre tlač na pauzový papier. Horná časť. . . . .                 | 45 |
| B.3 | Osadenie súčiastok. Dolná časť. . . . .                                  | 46 |
| B.4 | Predloha pre tlač na pauzový papier. Dolná časť. . . . .                 | 46 |
| C.1 | Osadenie vrchnej časti prijímača. . . . .                                | 47 |
| C.2 | Osadenie spodnej časti prijímača. . . . .                                | 47 |
| C.3 | Osadenie vrchnej časti vysielacza. . . . .                               | 48 |
| C.4 | Osadenie spodnej časti vysielacza. . . . .                               | 48 |
| D.1 | Snaha o štart zariadenia. . . . .                                        | 49 |
| D.2 | Kmitočet na cievke (Testovací Tx). . . . .                               | 49 |
| D.3 | Kmitočet na cievke (Zkonštruovaný Tx). . . . .                           | 50 |
| D.4 | Kmitočet na cievke (Zkonštruovaný Tx). . . . .                           | 50 |
| D.5 | Vysielaný paketový signál na testovacom Tx keď nie je pripojený Rx. .    | 51 |

## ZOZNAM TABULIEK

|     |                                                              |    |
|-----|--------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Čas nabíjania pri výstupnom výkone 1,5 W . . . . .           | 29 |
| 2.2 | Čas nabíjania pri výstupnom výkone 3 W . . . . .             | 29 |
| 2.3 | Účinnosti zariadenia pri rôznych vstupných výkonoch. . . . . | 30 |
| 2.4 | Meranie priebehu nabíjania nabíjania. . . . .                | 30 |
| 2.5 | Meranie priebehu nabíjania nabíjania. . . . .                | 31 |
| 2.6 | Parametre testovacieho vzorku. . . . .                       | 32 |

# ÚVOD

Už v minulom storočí bola dobre známa technológia bezdrôtového prenosu elektrickej energie. Začiatky rádiotechniky, za ktorý sa pokladá vynález vysokofrekvenčného LC oscilátoru netlmených elektromagnetických kmitov Heinricha Rudolfa Hertza ku koncu 19. storočia.

Rádiotechnika sa dnes už bežne využíva v každodennom živote, mobilný telefon, autorádio, televízny prijímač. Každý z týchto zariadení má spoločný rys v tom, že potrebujú k naviazaniu spojenia vysielateľ signálu a prijímač, ktorý sa spáruje s vysielateľom. Na tomto princípe sa zakladá aj bezdrôtový prenos elektrickej energie elektromagnetickou indukciou.

V minulosti neboli v takej miere ako dnes, rozšírené zariadenia, ktoré majú za potrebu časté nabíjanie batérií. Z tohto dôvodu je potrebné prehodnotiť spôsob, akým sa nabíjajú tieto prístroje. Časté pripájanie mobilných zariadení na nabíjačku môže poškodiť prípojku, pričom je potrebné mať v pohotovosti adaptér alebo redukciu na USB a zariadenie ku ktorému sa pripojí.

Technológia bezdrôtového prenosu energie má perspektívu do budúcnosti pri neobmedzených možnostiach využitia, či už v bežnom živote alebo v technickom prostredí. Tento potenciál je fascinujúci, a preto sa bude táto práca bližšie venovať problematike nabíjania li-ion batérií bezdrôtovo, so zameraním na dosiahnutie čo najvyššej účinnosti. Veľká časť bude venovaná teórii, t. j. princípu činnosti, porovnaní jednotlivých formujúcich sa noriem, porovnanie účinnosti nabíjania s káblovou alternatívou. Ďalej sa bude zaoberať s návrhom vlastného zariadenia pre prenos energie elektromagnetickou indukciou, s ktorou sa bude nabíjať li-ion batéria zariadenia.

# 1 TECHNOLÓGIA NABÍJANIA ELEKTRO-MAGNETICKOU INDUKCIOU

## 1.1 Základné pojmy

### 1.1.1 Maxwellove rovnice (diferenciálny aj integrálny tvar)

- Zobecnený Ampérov zákon celkového prúdu

$$\operatorname{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad \oint_l H dl = I \quad (1.1)$$

pohybujúci sa náboj (elektrický prúd) je zdrojom magnetického poľa  $H$ . Využíva sa pri Elektromagnetoch, motoroch, hlavy záznamových zariadení (zápis), antény (vysielať), ...

- Faradayov indukčný zákon

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \oint_l E dl = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1.2)$$

Časová zmena magnetického poľa indukuje elektrické pole  $E$ . Využíva sa pri cievkach a transformátoroch, generatoroch, hlavách záznamových zariadení (čítanie), antény (príjem), ... [1]

Vychádzajúc zo vzťahu [1.5], magnetický tok v čase je možné meniť zmenou:

- a) veľkosti magnetickej indukcie  $|\vec{B}|$ ,
- b) uhla medzi vektorom  $\vec{B}$  a vektorom plošného elementu  $d\vec{S}$  a
- c) veľkosti plochy závitů [2].

### 1.1.2 Magnetická indukcia

Magnetické pole, podobne ako gravitačné či elektrické, je vektorové pole. Na kvalitatívny opis magnetického poľa v každom jeho bode sa zavádza fyzikálna veličina nazývaná magnetická indukcia označovaná  $\vec{B}$ . V každom bode magnetického poľa má vektor  $\vec{B}$  smer dotýcnice k indukčnej čiare [2].

### 1.1.3 Lorentzova sila

Je definovaný zložením veľkosti elektrickej sily  $\vec{F}_e$ , ktorú môžeme vyjadriť pomocou vzťahu:  $\vec{F}_e = Q\vec{E}$  a veľkosti magnetickej sily  $\vec{F}_M$ , daná vzťahom vyplývajúceho z pozorovaní:  $\vec{F}_M = Q(\vec{v} \times \vec{B})$ . Z ktorého plynie, že pohybujúci sa elektrický náboj závisí od rýchlosti a veľkosti daného náboja, pričom magnetická sila je vždy kolmá na vektor rýchlosti  $\vec{v}$  a vektor magnetickej indukcie  $\vec{B}$ . Tieto dve sily určujú aká veľká výsledná sila pôsobí na pohybujúci sa elektrický náboj [2].

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.3)$$

### 1.1.4 Vzájomné pôsobenie dvoch vodičov

Dva rovnobežné vodiče, ktorými preteká elektrický prúd rovnakým smerom sa priťahujú, zatiaľ čo vodiče s prúdmi v opačnom smere sa odpudzujú. Vodič vytvára magnetické pole a magnetická indukcia v každom mieste vodiča 2 má veľkosť:  $B_1 = \mu_0 I_1 / (2\pi d)$ . Magnetická indukcia od magnetického poľa vodiča 1 je v každom mieste vodiča 2 na tento vodič kolmá. Vodičom 2 preteká elektrický prúd  $I_2$ . Výsledná sila pôsobiaca na úsek vodiča dĺžky  $l$  sa rovná [2]

$$F = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi d} l. \quad (1.4)$$

### 1.1.5 Magnetický indukčný tok

Magnetický indukčný tok určitou plochou je integrálom elementárneho magnetického toku cez túto plochu

$$\phi = \int S \vec{B} \cdot d\vec{S}, \quad (1.5)$$

Jednotkou magnetického toku je weber ( $Wb = T \cdot m^2$ ). Počet čiar vstupujúcich do objemu ohraničeného plochou  $S$  je rovný počtu čiar z objemu vystupujúcich, teda magnetický indukčný tok cez uzavretú plochu je nulový

$$\oint S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0. \quad (1.6)$$

Rovnicou [1.6] je vyjadrený Gaussov zákon magnetického poľa, patrí medzi základné Maxwellové rovnice popisujúce elektromagnetické pole [2].

### 1.1.6 Lenzov zákon

Prúd vzbudený elektromagnetickou indukciou pôsobí proti zmene, ktorá ho vyvolala. Tento zákon je dôsledkom zákona – zákona zachovania energie. Ak by tomu tak nebolo, tak po iniciovaní elektromagnetickej indukcie by proces samovoľne neohraničene narastal.

Lenzov zákon platí nielen pre tenké vodiče, ale aj pre prúdy indukované vo veľkých (plných) viduchoch v tvare plechu, platní atď. Voľajú sa aj Foucaultove prúdy alebo vírivé prúdy. Pri pohybe vodiča v magnetickom poli vznikajú vo vodiči vírivé prúdy, ktoré pôsobia svojimi silovými účinkami proti tomuto pohybu, t. j. brzdia pohyb vodiča v premenlivom magnetickom poli (napr. pri prechode striedavého prúdu vodičom). Výrivé prúdy spôsobujú nežiadúce straty, ktoré sa prejavujú najmä zahrievaním prenosového média [2].

### 1.1.7 Vlastná a vzájomná indukcia

Uzavretý závit, cievka alebo obvod, ktorými preteká konštantný elektrický prúd  $I$  je zdrojom stacionárneho magnetického poľa. Ak sa vyberie nejaká plocha v blízkosti tohto obvodu, bude ním pretekať konštantný magnetický indukčný tok. V prípade časovej zmeny elektrického prúdu  $I(t)$  sa mení i magnetické pole generované daným obvodom, a tým aj magnetický indukčný tok  $\phi(t)$ . Táto zmena indukčného toku vedie podľa Faradayovho zákona [1.2] elektromagnetickej indukcie k vzniku elektromotorického napätia. Takýto jav sa volá samoindukcia, alebo vlastná indukcia.

Ak závitom preteká elektrický prúd, potom magnetický tok pretekaný daným závitom, cievkou alebo uzatvoreným vodičom iného tvaru sa dá vyjadriť ako

$$\phi = LI, \quad (1.7)$$

kde sa konštanta úmernosti  $L$  volá, vlastná indukčnosť – indukčnosť cievky a závisí od permeability prostredia vo vnútri cievky, počtu závitov a ich geometrického tvaru. Jednotka indukčnosti sa volá henry ( $H = Vs/A = Wb/A$ ).

Pri úvahe solenoidu polomeru  $R$  a dĺžky  $l \gg R$ , ktorý má  $N$  závitov. Ak sa zanedbajú okrajové efekty, je možné magnetické pole vo vnútri solenoidu považovať, za homogénne s magnetickou indukciou  $B$ . Celkový magnetický indukčný tok solenoidu je súčtom tokov cez všetky závity, čiže  $\phi = NBS$ , kde  $S = \pi R^2$ . Z definičného vzťahu vlastnej indukčnosti vyplýva

$$L = \frac{\phi}{I} = \frac{\mu_0 N^2 \pi R^2}{l}. \quad (1.8)$$

Pomocou indukčnosti [1.8] a Faradayovho zákona [1.2], sa dá indukované elektromotorické napätie v cievke vyjadriť ako

$$\epsilon_i = -L \frac{dI(t)}{dt}. \quad (1.9)$$

Zo vzťahu je vidieť, že veľkosť prúdu na indukované elektromotorické napätie nemá vplyv, na rozdiel od veľkosti jeho časovej zmeny.

Uvažujú sa teraz dva uzavreté obvody s prúdmi  $I_1$  a  $I_2$ . Plochou každého obvodu preteká okrem indukčného toku magnetického poľa vlastného obvodu i magnetický indukčný tok súvisiaci s tým, že tento obvod sa nachádza i v magnetickom poli druhého obvodu. Zmena prúdu v jednom vyvolá zmenu magnetického indukčného toku v oboch obvodoch. Tento jav sa nazýva vzájomná indukcia. Teda, ak je obvod 2 umiestnený v magnetickom poli obvodu 1, bude ním prechádzať dodatočný magnetický indukčný tok  $\phi_{21}$ , daný vzťahom

$$\phi_{21} = M_{21}I_1, \quad (1.10)$$

kde  $M_{21}$  je konštanta úmernosti. Analogicky to platí i opačne pre dodatočný magnetický indukčný tok  $\phi_{12}$  od obvodu 2 s prúdom  $I_2$ . Experimentálne i teoreticky sa dá ukázať, že  $M_{21} = M_{12} = M$ .  $M$  sa volá koeficient vzájomnej indukčnosti dvoch obvodov. Zmena prúdu  $I_1$  teda indukuje napätie  $\epsilon_{i2}$  v obvode 2, ktoré sa dá vypočítať podľa vzťahu

$$\epsilon_{i2} = -M \frac{dI_1}{dt}. \quad (1.11)$$

Pre elektromotorické napätie  $\epsilon_{i1}$  v obvode 1 od prúdu  $I_2$  platí analogický vzťah [2].

### 1.1.8 Energia magnetického poľa

Najprv sa určí aká energia je uložená v cievke, potom sa výsledok zovšeobecni na magnetické pole. Obvod s reálnou cievkou s indukčnosťou  $L$ , odporom  $R$  a s pripojeným zdrojom napätia  $U$ , je riadený spínačom. Podľa II. Kirchoffovho zákona pre daný RL obvod platí

$$U = RI + L \frac{dI}{dt}. \quad (1.12)$$

Ak rovnicu vynásobíme prúdom  $I$ , dostaneme

$$UI = RI^2 + LI \frac{dI}{dt}, \quad (1.13)$$

pričom  $UI$  je celkový výkon zdroja dodávaný do obvodu. Práca, ktorú zdroj dodal do obvodu počas doby  $t$  prechodového deja, je

$$W = \int_0^t UI dt = \int_0^t RI^2 dt + \int_0^t LI \frac{dI}{dt} dt. \quad (1.14)$$

Prvý člen na pravej strane predstavuje Joulovo teplo. Druhý člen predstavuje výkon potrebný na vytváranie magnetického poľa v cievke. Na vytvorenie konečného magnetického poľa v cievke, t. j. poľa, ktoré zodpovedá ustálenému elektrickému prúdu  $I$ , bolo potrebné vynaložiť prácu

$$W_m = \int_0^I LI dI = \frac{1}{2} LI^2. \quad (1.15)$$

Táto práca sa podľa zákona zachovania energie rovná energii obsiahnutej v magnetickom poli solenoidu. Solenoid o dĺžke  $l$ , počte závitov  $N$ , s plochou jedného závitú  $S$  a pretekaným elektrickým prúdom  $I$ . Zo vzťahu [1.8] pre vlastnú indukciu solenoidu, potom energia magnetického poľa solenoidu bude

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 N^2 S}{l} I^2. \quad (1.16)$$

Ak sa prúd  $I$  vyjadrí ako  $I = Bl/\mu_0 N$ . Získa sa energia magnetického poľa vyjadrená pomocou vektorov magnetického poľa  $\vec{B}$  a  $\vec{H}$

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} Sl, \quad (1.17)$$

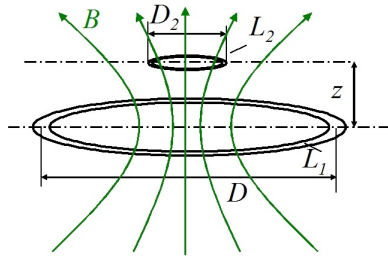
kde  $Sl$  je objem cievky. Dosadením vektoru intenzity magnetického poľa  $\vec{H} = \vec{B}/\mu_0$ , sa môže definovať hustota energie magnetického poľa daného vzťahom  $w_m = W_m/Sl$  sa dostane [2]

$$w_m = \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H}. \quad (1.18)$$

## 1.2 Princíp činnosti bezdrôtového prenosového systému (coupling)

Bezdrôtové nabíjanie môže znieť aj ako materiál pre vedeckú fikciu, no nie je to príliš vzdialená vízia budúcnosti. Technológia a teória za bezdrôtovým nabíjaním je známa už dlhú dobu. Myšlienka bola prvý krát navrhnutá Nikolom Teslom, ktorý demonštroval princíp bezdrôtového nabíjania na prelome storočia. Bežne sa táto technológia využíva pri nabíjaní electrických zubných kefiek a chirurgicky implantovaných prístrojov, ako sú umelé srdcia.

Bezdrôtové nabíjanie, tiež známe ako induktívne nabíjanie, je založené na pár jednoduchých princípoch. Technológia potrebuje dva obvody s cievkou označených ako vysielateľ ( $L_1$ ) a prijímač ( $L_2$ ). Striedavý prúd prechádza cievkou vysielateľa, ktorý následne vytvára magnetické pole. Toto magnetické pole vyvolá napätie na cievke prijímateľa. Táto energia môže byť využitá k napájaniu zariadení, alebo k nabitíu batérie. Účinnosť prenosu energie závisí na párovaní (coupling) ( $k$ ) medzi indukčnosťami

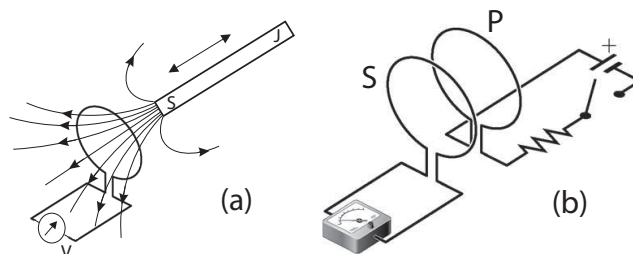


Obr. 1.1: Typické usporiadanie prenosového systému [5].

fami a ich kvalitou ( $Q$ ). Párovanie je stanované vzdialenosťou medzi indukčnosťami ( $z$ ) a pomerom ich priemeru  $D_2/D$ . Párovanie je ďalej ovplyvňované tvarom cievok a uhlom medzi nimi [6].



Najlepšie sa dá vysvetliť princíp prenosu energie indukciou na dvoch jednoduchých experimentoch, ktorými v roku 1831 Michal Faraday dokázal, že magnetické pole môže byť zdrojom elektrického prúdu.



Obr. 1.2: Ilustračné obrázky k experimentom [2].

Je zostavený jednoduchý obvod z cievky a galvanometra (obr.[1.2] (a)). Približovaním tyčového magnetu konštantnou rýchlosťou sa indukuje v cievke konštantný prúd a ručička galvanometra sa vychýli na jednu stranu. Pri vzdalovaní magnetu je výchylka opačná. Rýchlejší pohyb magnetu spôsobuje väčšiu výchylku galvanometra.

Nahradením magnetu ďalšou cievkou pripojenou k zdroju jednosmerného napätia cez potenciometer (obr.[1.2] (b)), vznikne dvojica obvodov: primárny obvod s primárnou cievkou P a sekundárny obvod so sekundárnou cievkou S (podobnosť s transformátorom). Zväčšovaním napätia na v primárnom obvode pomocou potenciometra sa v sekundárnom bude indukovať prúd – ručička galvanometra sa vychýli jedným smerom. Čím bude rýchlejšia zmena tým bude väčšia výchylka ručičky galvanometra. Pri zmene prúdu primárnou cievkou sa mení jej magnetické pole, ktoré zasahuje do sekundárnej cievky presne ako pri pohybe magnetu.

Z vykonaných pokusov vyplýva, že pri vzájomnom pohybe magnetu alebo cievky sa indukuje v druhej cievke napätie, ktoré sa nazýva elektromotorické napätie. Prúd, ktorý pri tom v obvode vzniká, sa nazýva indukovaný prúd. Ďalej, smer indukovaného prúdu závisí od zmeny magnetického poľa. Veľkosť elektromotorického napätia závisí od rýchlosti zmeny magnetického poľa [2].

### 1.3 Účinnosť induktívneho prenosového systému

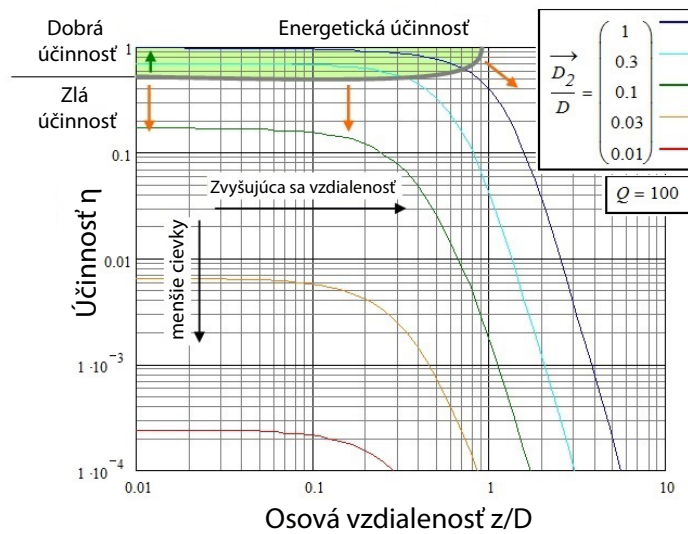
Výzkum prevedený firmou Philips, s vedúcimi projektu Dries van Wageningen a Eberhard Waffenschmidt, určil pokles účinnosti bezdrôtového prenosového systému na vzájomnej vzdialenosti cievok.

Obrázok [1.3] znázorňuje vypočítanú optimálnu účinnosť systému vzťahnutú k príslušnému obrázku [1.1] s predpokladaným faktorom kvality 100. Rozmery pre

tieto výpočty boli dimenzované pre cievku s väčším priemerom cievka  $D$ , ktorá môže byť vysielateľ, alebo prijímač. Hodnoty sú zobrazované ako funkcia vzdialenosti medzi cievkami ( $z/D$ ). Premenná je priemer menšej cievky  $D_2$ . Graf zobrazuje, že

- účinnosť dramaticky klesá s rastúcou vzdialenosťou ( $z/D > 0.1$ ) alebo pri veľkom rozdiely medzi veľkosťami cievky ( $D_2/D < 0.3$ )
- Vysoká účinnosť ( $>90\%$ ) sa môže dosiahnuť malou vzdialenosťou medzi cievkami ( $z/D < 0.1$ ) a pre cievky s podobnou veľkosťou ( $D_2/D = 0.5 \dots 1$ )

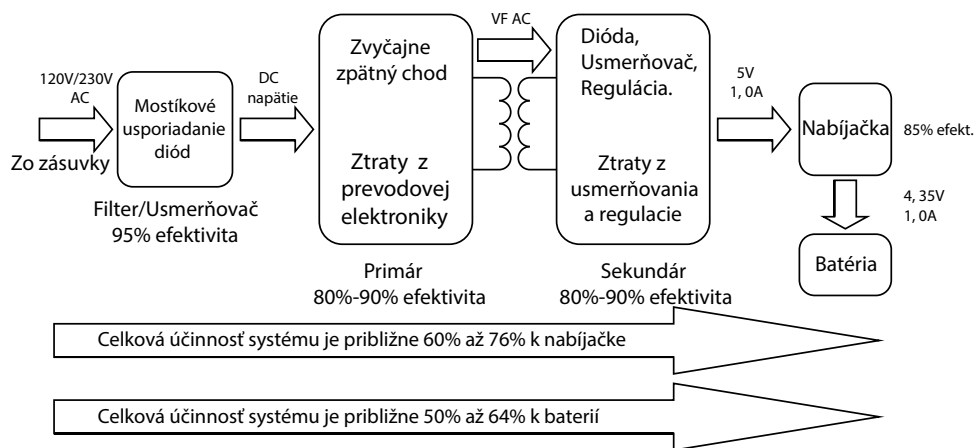
Z týchto skutočností vyplýva, že vysielanie indukčnej energie na veľké vzdialenosti je veľmi neúčinné. Na druhú stranu graf znázorňuje, že indukčný prenos energie na malé vzdialenosti dosahuje účinností porovnateľných s káblovým prenosom [5].



Obr. 1.3: Graf účinnosti prenosu na vzdialenosti medzi cievkami [5].

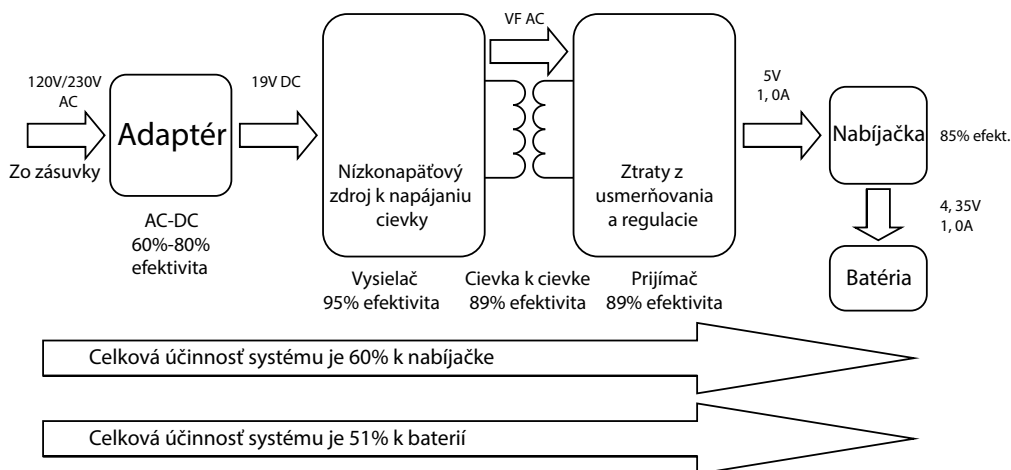
### 1.3.1 Porovnanie účinnosti nabíjania bezdrôtovo a cez vodič

Táto časť sa bude venovať porovnaniu účinnosti nabíjania cez drôt a vzduchom. Nakoniec sa zhodnotia straty na jednotlivých médiách.



Obr. 1.4: Bloková schéma pre prenos vodičom [9].

- Pri účinnosti vodičov približne 9 %, môže celková účinnosť systému k nabíjačke klesnúť na 72 % a na menej ako 47 % k batérii.



Obr. 1.5: Bloková schéma pre bezdrôtový prenos [9].

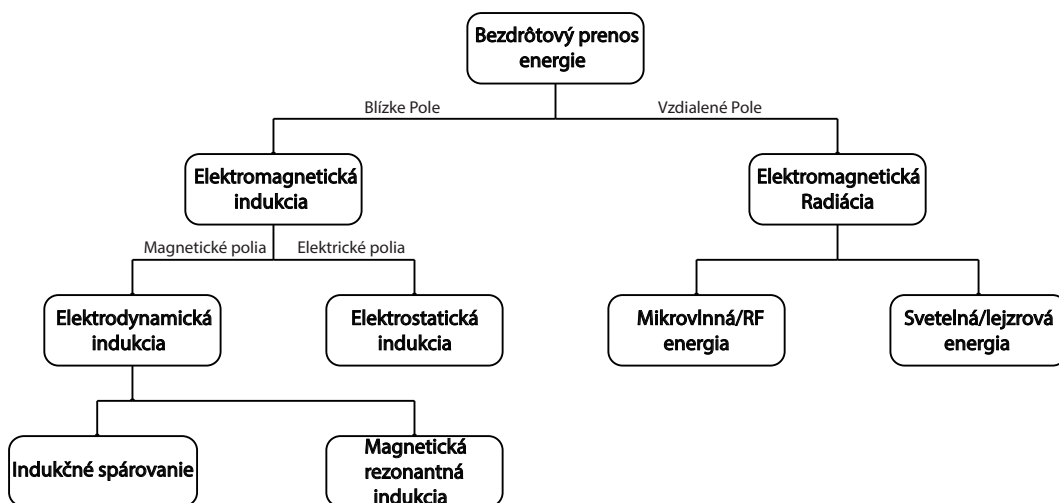
- Predpokladá sa účinnosť adaptéra 80 %,
- všetky údaje sú typické pre najväčšiu nominálnu vzdialenosť 3,7 mm, ktorá sa pokladá za optimálnu,
- najvyššia účinnosť bola zaznamenaná pri 3,5 W na výstupe.

Z blokových schém pre prenos bezdrôtovo a cez drôt je zrejmé, že účinnosti sú porovnateľné.

Existujú návrhy pre bezdrôtové prenosové systémy, ktoré v sebe zahrňujú na strane vysielacza AC/DC prevodník s vyššou účinnosťou a prijímač so zakomponovanou nabíjačkou. Takto upravené systémy bezdrôtového nabíjania dosahujú účinnosti vyššie ako 70 % [9].

## 1.4 Bezpečnosť a vplyv na prostredie

Rozširovaním zariadení vyžarujúcich signály o vysokom kmitočte do ovzdušia, nastávajú obavy z úrovne elektromagnetického (ELM) žiarenia v prostredí a jeho vplyvu na ľudí. Z tohto dôvodu existuje veľa štúdií zameraných na účinky takýchto signálov na biosféru, najmä na ľudí, no žiadna z nich úplne nepotvrdila, alebo vyvrátila tvrdenia, že toto ELM žiarenie má na obyvateľstvo neblahé účinky [3]. Faktom je, že čím je vyšší kmitočet signálu, tým viac sa približujeme do spektra radioaktívneho žiarenia. Podľa týchto stanovísk, ELM indukcia spadajúca pod blízke pole, považuje z hľadiska nižšieho pracovného kmitočtu za bezpečné.

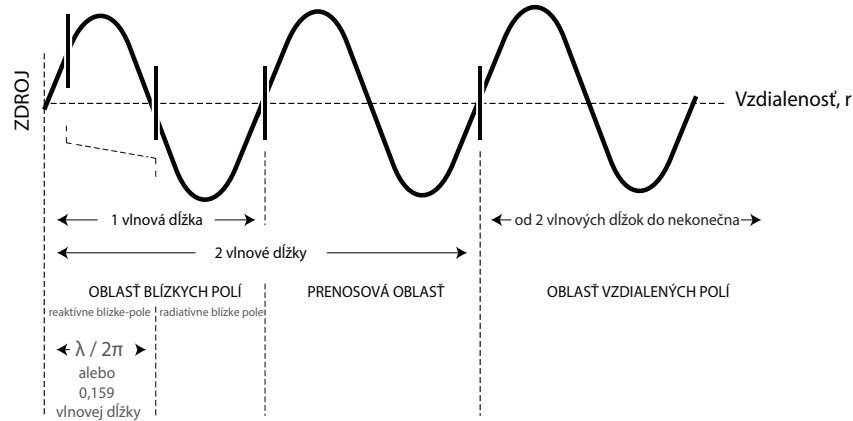


Obr. 1.6: Rozdelenie bezdrôtových prenosov energie [9].

### 1.4.1 Prenos na krátke vzdialenosti (Near Field)

Akýkoľvek zdroj elektromagnetického poľa (bodová častica, dipól, anténa alebo cievka), vytvára elektromagnetické vlnenie v okolitom prostredí. Charakteristika týchto polí a spôsob ako pôsobia na dané médium rozlišuje či ide o radiačnú (uskladnenú),

alebo ne-radiačnú zložku elektromagnetického vlnenia alebo poľa. Tieto polia sú väčšinou rozdelené do near field a far field, z hľadiska vzdialenosti od zdroja. Dôležitejší je charakter dominantných vln v týchto oblastiach. Tieto hraničné oblasti sú väčšinou označované, ako vlnová dĺžka od zdroja poľa. Čiže vlnová dĺžka elektromagnetickej (EM) vlny, ktorá súvisí s jej energiou. Popisuje jej pôsobenie na okolité médium. Ideálny indukčný zdroj produkuje elektrické a magnetické (E-polia a M-



Obr. 1.7: Zobrazenie hraničných oblastí [4].

polia) polia v bezprostrednej blízkosti. Pre udržanie energie, obvod dodáva výkon do poľa. Pole indukciou dodáva výkon späť do obvodu, a tak nedochádza ku strate energie. Počas každej polvlny zostávajú napätie ( $U$ ) a prúd ( $I$ ) navzájom kolmé. Následkom je absencia reálnej zložky v impedancii obvodu

$$Z = j\omega L, \quad (1.19)$$

kde  $L$  je indukčnosť obvodu. Preto je táto oblasť nazývaná reaktívne blízke pole. Ak je pridaný ďalší obvod so záťažou, obidva obvody budú na seba pôsobiť. Zdroj bude udržiavať energiu pokiaľ nie je do blízkosti okruhu pridaný ďalší obvod so záťažou, a zároveň bude dodávať energiu záťaži len ak ju potrebuje [4].

## 1.5 Štandardizácia a interpolácia induktívneho nabíjania

Nezrovnalosti na trhu so spárovaťelnosťou zariadení viedlo k ďalšej bitke o štandardizovanie, ktorá práve prebieha. Tak isto ako v minulosti Betamax proti VHS, HD-DVD – Blu-Ray a HomeRF – Wi-Fi sa história opakuje s 3 veľkými zoskupeniami spoločností, ktoré sa snažia o normalizáciu zariadení pre bezdrôtový prenos energie. Hlavný rozdiel medzi jednotlivými štandardmi je v kmitočte, na ktorom komunikujú cievky vysielача (Tx) a prijímača (Rx), čo je najväčší problém vzhľadom na kompatibilitu medzi prístrojmi, používajúcich nabíjanie batérie bezdrôtovo. Z tohto dôvodu je dôležité schváliť jednu univerzálnu normu.

- **Wireless Power Consortium (WPC)** – Používa štandard Qi. Bolo založené v roku 2009. Na prenos energie a komunikáciu využíva frekvenčné pásmo  $100 - 205\text{ kHz}$ . Má verejne dostupné jednotlivé riešenia prenosových systémov. Viac otvorený. Skoro 200 členov takých ako sú Samsung, HTC, LG a viacero čipových výrobcov s Qualcommom počítajúc.
- **Power Matters Alliance** – Používa štandard PMA. Bolo založené v roku 2012. Využíva frekvenčné pásmo  $277 - 357\text{ kHz}$  pre prenos energie aj komunikáciu. Na trhu známy podľa produktov Powermat. Zamerané skôr na spotrebytelov. Väčšie zastúpenie podporujúcich korporácii ako A4WP. Viac než 100 členov. Agresívne sa rozširuje 10 starbucks prevádzkach v San Jose. Behom pár rokov chcú byť v 17 000 Starbucksoch celosvetovo. 10 McDonaldoch len ako pilot. Pripravuje 600 nabíjacích miest na obnovenom Madison Square Garden, tak ako aj Powermat podložky v čakárňach Delta Airlines a na letiskách JFK and LaGuardia.
- **Alliance for Wireless Power (A4WP)** – Používa štandard rezence). Bolo založené v roku 2012. Frekvenčné pásmo  $6, 78\text{ MHz}$  ISM pre komunikáciu, a  $2, 4\text{ GHz}$  pre komunikáciu. 65 členov. Spolu s PMA predkladá hotový produkt vyvinutý jednotlivými spoločnosťami ktoré sú členmi tejto aliancie.

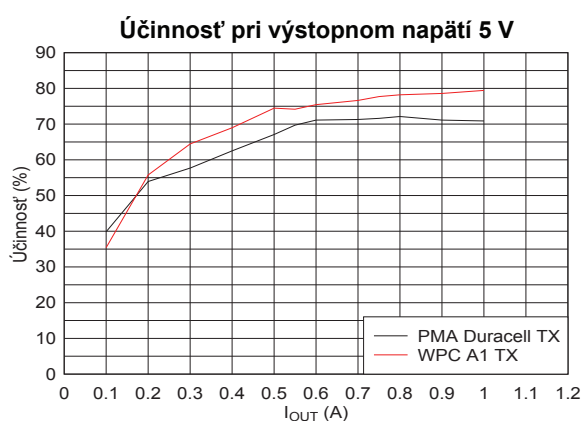
PMA a WPC sa snaží o podpísanie dohôd s výrobcami automobilov. WPC dominuje (BMW, Toyota, Porche, Volkswagen) s 30 % všetkých automobiliek. Do roku 2015 počíta s 50 %. PMA – GM (asi, na začiatku 2015).

Vzhľadom na to, že WPC pôsobí už od roku 2009, má dnes veľké zastúpenie na trhu. PMA a A4WP sa javia ako nový Betamax, či HD-DVD. Aby boli konkurencie schopný, tak sa 11. 02. 2014 A4WP a PMA spojili, a tým sa priblížili ku konsolidácii tohto priemyselného odvetvia [7], [8].

| Column1                                         | 100-500 kHz | 6.78 / 13.56<br>27 MHz ISM | Poznámky                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------|-------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vplyv RF na ľudí                                | Najlepšie   | Dobré                      | <500 KHz má väčší priestor na vyhovie SAR a Efield bezpečnostným limitom                                                                     |
| EMC žiarenie                                    | Dobré       | Nepotvrdené                | <500 KHz vyhovel FCC časť 15/18 a CISPR11 požiadavkám; 6.78 MHz zatiaľ nepotvrdené. ISM tolerancia šírky pásma je veľmi úzka 15 KHz          |
| Rušenie s NFC a inými elektrickými zariadeniami | Najlepšie   | Dobré                      | Indukované napätie v blízkych kovových objektoch alebo PCB je úmerné kmitočtu. NFC, rušenie autentikačného zabezpečenia môže byť spravované. |
| Účinnosť / Prenosová vzdialenosť                | Dobré       | Dobré                      | <500 KHz má lepšiu účinnosť zapojenia<br>6.78 MHz má lepšiu účinnosť cievky<br>Oba dosahujú podobné prenosové vzdialenosti                   |
| Cena systému                                    | Dobré       | Dobré                      | 6.78 MHz potrebuje vyššie napätie a zložitejšie FET tranzistory. <500 KHz má zložitejšie cievky na podobnú voľnosť umiestnenia.              |

Obr. 1.8: Parametre podľa zvoleného frekvenčného pásma [7].

Vzájomná komunikácia medzi Qi a rezence je riešená dual-módом. Čo sa dosahuje zavedením zmien v obvode na strane Rx. Pričom toto riešenie vedie k nerovnomerným hodnotám efektivity jednotlivých štandardov. Napríklad v riešení od Texas Instruments kombinácia s Tx štandardu Qi dosahuje účinnosť 79 % a rezence 72 %



Obr. 1.9: Porovnanie účinností prenosu na prijímači bq51221 [17].

## 2 NÁVRH PRENOSOVÉHO SYSTÉMU

Pri návrhu bezdrôtového systému pre nabíjanie li-ion batérií sa zhodnotili jednotlivé štandardy, ich klady a zápory. Z hľadiska EMC, EM žiarenia a vplyvu RF na ľudí podľa tabuľky [1.8] sa napokon vybralo riešenie podľa doporučení štandardu Qi.

Táto kapitola pojednáva o výbere a odôvodnení výberu daného riešenia systému štandardu Qi. Ďalej sa budú vysvetľovať špecifikácie štandardu Qi, ako sú prenosovým systémom riešené a s týmto riešením súvisiaci popis a výber jednotlivých súčiastok[2.4].

### 2.1 Výber riešenia systému na bezdrôtový prenos energie

Základom bezdrôtového prenosového systému je digitálny kontrolér, ktorý integruje všetky funkcie potrebné k ovládaniu bezdrôtového prenosu energie k prijímaču podľa požiadaviek WPC, tak aby spĺňal zabezpečenia dané štandardom Qi.

Riešenie systému bude zhotovené podľa návrhov v katalógových listoch od výrobcu Texas Instruments (TI). Takisto ako aj súčiastky použité v skonštruovanom zariadení [11]. Hlavným dôvodom pre voľbu Texas Instruments bolo kvôli vysokej účinnosti, rozmanitosti výberu kontrolérov pre rôzne aplikácie a dostupnosť návrhov systémov.

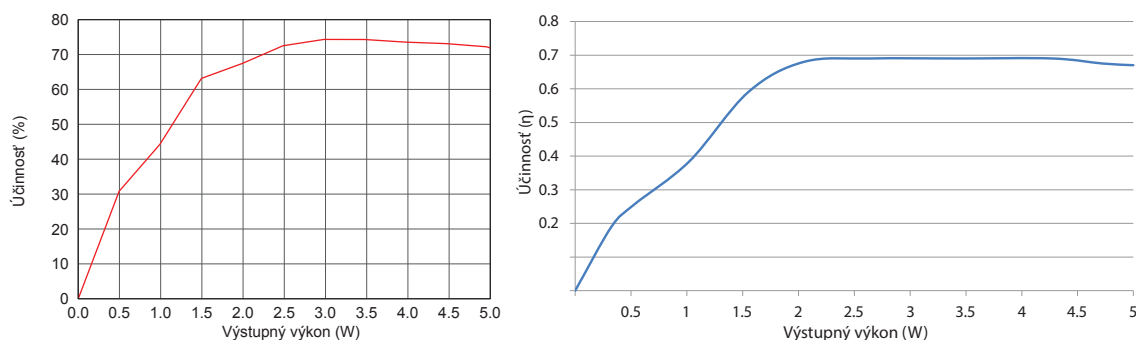
Ďalšími podobnými výrobcami sú firmy IDT a ON Semiconductor. Pričom ON Semiconductor má len jednočipové riešenia s puzdrami Flip-Chip-25, WLCSP-25, ktoré sú nevhodné na zostrojenie v daných podmienkach. Jednočipové riešenia sú vhodné pre zjednodušenie zapojenia a zmenšenie rozmerov zariadení, no pre vysvetlenie funkcií jednotlivých častí, ktoré boli pridané kvôli zabezpečeniam daných štandardom Qi viac vyhovuje zložitejšie zapojenie od TI alebo IDT.

Firma IDT poskytuje riešenia kontrolérov ako jednočipových, tak aj zapojenie pozostávajúcich z viacerých súčiastok. Pri výbere sa vyskytol problém, že katalógové listy jednotlivých kontrolérov boli uzamknuté a tým pádom nedostupné. Pri Tx boli všetky katalógové listy uzamknuté okrem P9035A a viaccievkového P9036A. Takisto aj katalógové listy Rx boli blokované okrem P9026 s puzdrom WLCSP-25.

Jediné možné riešenie by bola kombinácia Tx od jedného výrobcu s Rx druhého, čo by viedlo k zložitosti objednávanie a dopravy súčiastok. Ďalším závažným faktorom je rozdiel medzi účinnosťami jednotlivých systémov, kde Tx od TI dosahuje účinností ~75 % a Tx od IDT má najvyššie hodnoty účinností ~69 %. K porovnaniu



slúžia grafy účinnosti na výstupnom výkone od TI pre vysieláč bq500211A a voľne dostupného IDT vysieláča P9035A [18].



Obr. 2.1: Porovnanie účinností vysieláčov. Naľavo TI [11], napravo IDT [18].

## 2.2 Porovnanie a výber jednotlivých systémov

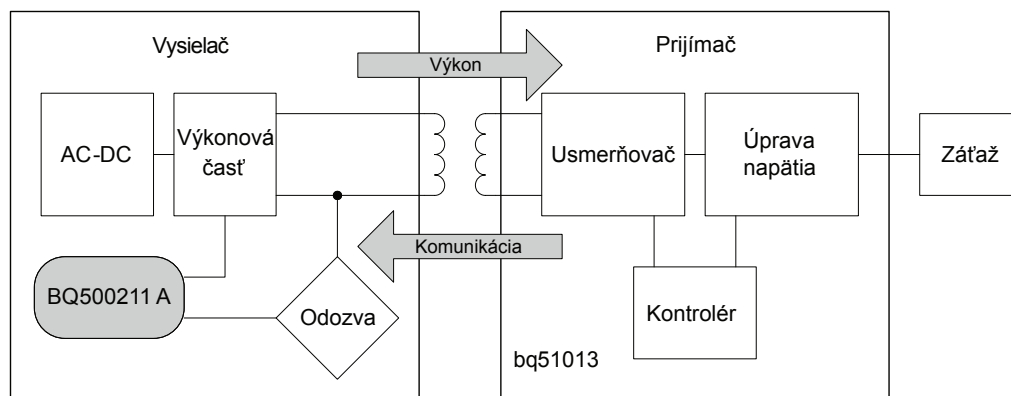
Najviac časovo náročný bol výber a návrh systému, ktorý bude skonštruovaný. Ako prvá súčiastka sa volil digitálny kontrolér, ktorý určuje aké vlastnosti bude mať bezdrôtový prenosový systém.

Podmienky výberu digitálneho kontroléra Tx a Rx:

- Verzia WPC 1.1 – Dôležitý výber pre komunikáciu so zariadeniami, ktoré používajú danú verziu. Pridáva detekciu cudzieho objektu (FOD), ktorá je presnejšia, ako doteraz používaná detekcia parazitného metalického objektu (PMOD) [2.4.3].
- Používané zapojenie nesmie obsahovať viac ako 1 súčiastku s puzdrom QFN a žiadna súčiastka nesmie byť s púzdom WLCSP. Kvôli obmedzeniam technológie výroby plošných spojov dostupných na ústave, ktorá je určená pre výrobu na úrovni školských a prototypových dosiek, jedno alebo dvojstranných. Z tohto dôvodu trebalo riešiť Tx dvojstranne namiesto ideálneho 4 vrstvového osadenia, čo sa môže odraziť na výslednej účinnosti.
- Používa na prenos energie 1 alebo viacej cievok.

Podľa týchto požiadaviek na voľbu digitálneho kontroléra sa ako Tx zvolil jednocievkový kontrolér BQ500211A. Ako Rx sa vybral BQ51013B s dynamickým ovládaním usmerňovača pre zlepšenú pokojovú odozvu a prispôbenie k rôznym záťažiam, pre dosiahnutie lepšej účinnosti.

## 2.3 Bloková schéma a princíp komunikácie bezdrôtového prenosového systému



Obr. 2.2: Funkčná bloková schéma bezdrôtového prenosového systému [11].

Bloková schéma na strane vysielača sa skladá,

- z meniča striedavého prúdu na jednosmerný, čo je zvyčajne AC-DC adaptér alebo externé napájanie cez USB, ktoré je ďalej regulované cez DC-DC menič (buck-regulator). V tomto návrhu časť obvodu s lineárnym stabilizátorom (LDO) TLV71333 [16], ktorý má nízky pokojový odber prúdu s presnosťou regulácie 2 %, pri nízkom šume výstupného napätia.
- Výkonová časť slúži na dodanie potrebného výkonu cievke Tx. Je riešená pomocou vysokorýchlostných MOSFET tranzistorov TPS28225D [13] s prispôsobiteľným nastavením doby odozvy (Dead-Time) – vysoká účinnosť a malé EMI, fixovaný na 570 kHz. Má vtup na PWM signál. Signál môže nadobudnúť tri stavy.
- Odozva je riešená obvodom so súčiastkou INA199A1 [14], ktorá sleduje prúd prostredníctvom zmeny napätia na rezistore  $R7$ , vloženého do cesty prúdu. Je to voliteľný odvod, ale potrebný, aby systém spĺňal doporučenia WPC 1.1. Tento obvod zabezpečuje funkciu FOD a PMOD [2.4.3].
- Kontrolér BQ500211A [11], zodpovedá za reguláciu celého systému a komunikáciu s Rx. Pripojiteľný mikrokontrolér MSP430G2001 [15], ktorý riadi nízky pokojový odber (Low-Power Supervisor)[2.4.6].

Časť blokovej schémy s prijímačom je možné pokladať za elektronický napájací zdroj, určený k dodávaniu jednosmerného výkonu. Skladá sa z usmerňovača, stabilizátoru napätia a kontroléra, ktorý to všetko ovláda a sprostredkuje komunikáciu s Tx.

**Komunikácia** smeruje od prijímača k vysielaču, kde prijímač zdelí vysielaču, aby vysielal výkon a aký veľký. Z dôvodu regulácie, vysielač musí komunikovať s pri-

jímačom, či má znížiť alebo zvýšiť kmitočet. Prijímač sleduje výstup usmerňovača a používajúc amplitúdovú moduláciu (AM), posiela pakety s informáciou vysielajú. Paket pozostáva z preamble, hlavičky, z aktuálnej správy a checksumu, ako je definované vo WPC. Prijímač posiela pakety moduláciou impedancie (resistívnej alebo kapacitnej) [11], [12].

## 2.4 Rozpis vybraných súčiastok a ich funkcií

### 2.4.1 Voľba cievok a kondenzátorov

Cievky sú špecifikované štandardom a kompatibilné typy A5, A11 dostupné na stránke <<http://www.ti.com/lit/an/slue649f/slue649f.pdf>>. Celková kapacita v rezonančnej časti musí byť  $400\text{ nF}/50\text{V}$ , aby sa dosiahlo rezonantného kmitočtu  $100\text{ kHz}$ . Volia sa kondenzátory  $22\text{ nF}/50\text{V}$  C0G, alebo podobného typu [11].

### 2.4.2 Dynamické limitovanie výkonu (DPL).

Sprístupňuje napájanie zo zdroja dodávajúceho  $5\text{ V}$  s obmedzeným prúdom (napríklad USB port). Dve možné zapojenia cez vstupný pin. Dynamický mód, ak bolo spozorované, že vstupné napätie pokleslo, výstupný výkon je obmedzený, aby sa znížila záťaž o hodnotu relatívnu k schopnostiam zdroja. Druhý mód (konštantný prúd), je navrhnutý pre prácu s  $500\text{ mA}$ , ktorý je USB port schopný dodávať. Limituje výstupný odber, aby vstup neprekročil  $500\text{ mA}$ . Vedomosť o aktívnom móde sa získava z farby a frekvencie blikania LED. Táto funkcia sa určuje nastavením LED\_MODE.

**LED\_MODE** – slúži na vizuálne zobrazenie prebiehajúcej funkcie systému. Jednotlivé módy sa nastavujú odporom (pin 44) podľa tabuľky 1 [11].

**LOSS\_THR** – Nastavenie povolených výkonových ztrát a zneho vyvedeného odhaľovania parazitických metalických objektov (PMOD) a odhaľovanie cudzích objektov (FOD), slúži LOSS\_THR (pin 43). Nastavuje sa pripojením odporu podľa tabuľky 2. Viac informácií o indikovaných stavoch LED diód, ako aj horeuvedené tabuľky sa nachádzajú v katalógu súčiastky [11].

### 2.4.3 Odhaľovanie parazitických metalických objektov (PMOD) a odhaľovanie cudzích objektov (FOD)

Nová verzia WPC 1.1 podporuje vylepšený PMOD a nový FOD s neustálym sledovaním vstupného napätia a prúdu k výpočtu vstupného výkonu, ktorý porovnáva s výkonom prijatým – hlásený prijímačom. Z týchto hodnôt BQ500211A určí, aký je

deficit a predpokladá, že tento úbytok spôsobuje cudzí predmet, umiestnení v ceste medzi cievkami. Ak tento rozdiel výkonov prekročí hodnotu nastaveného povoleného úbytku, nastáva chyba a prenos je zastavený. Pripojením odporu priamo medzi svorky LOSS\_THR a PMOD alebo FOD, sa môže vypnúť jeden algoritmus (PMOD, FOD), alebo nastaviť rozdielne hodnoty úrovne ztrát podľa tabuľky 2. Aby mohlo PMOD a FOD byť povolené, je nutné zaviesť do návrhu prídavný obvod sledovača prúdu. Tento obvod sa nemusí voliť. Potom systém zostáva vo verzií WPC 1.0. Pre správne škálovanie signálu na sledovači prúdu treba voliť prúdový sledovací rezistor  $20\text{ m}\Omega$  a snímací prúdový zosilňovač (INA199A1) by mal mať zosilnenie 50. Prúdový sledovací rezistor má teplotnú stabilitu  $\pm 200\text{ PPM}$ . Poskytuje aj ochranu proti prepätiu. Ak prúd prekročí bezpečnú úroveň, zobrazí sa chyba na LEDkách a prenos energie sa zastaví na 1 minútu [11].

#### 2.4.4 Tepelná ochrana

Nie je potrebná pre typické zapojenie bq500211A. Kľúčovým parametrom je  $1\text{ V}$ , ak T\_SENSE klesne pod túto hodnotu súčiastka sa vypne. Znova sa zapne po uplynutí piatich minút, alebo po odobraní prijímača [11].

#### 2.4.5 Výkonová časť (Power Train)

BQ500211A riadi fázovo-prepínaný plný most, ktorý je zložený z dvojice polo-mostov. Pár TPS28225 synchronných tranzistorov MOSFET ovládačov sú využívané so štyrmi CSD17308Q2 NextFET tranzistormi. Kvôli problému osaditeľnosti puzdier NextFET tranzistorov CSD17308Q2, sú v dokumentovanom riešení tieto NextFETy nahradené s FDS6670AS. Náhrada týchto súčiastok ovplyvňuje účinnosť a EMI emisia sa môže líšiť [11].

#### 2.4.6 Malá kludová spotreba

Zníženie kludovej spotreby je riešené zapojením mikrokontroléra MSP430G2001, ktorý periodicky vypína nabíjací obvod BQ500211A, aby šetrilo energiou, pričom všetky funkcie zostávajú funkčne a spätne zavolateľné ak sú potrebné. LED diody zobrazujúce stav systému riadi mikrokontrolér, ak je bq500211A vyradený. Týmto opatrením je možné znížiť spotrebu z  $300\text{ mW}$  na menej ako  $90\text{ mW}$ . BQ500211A sa každých  $400\text{ ms}$  zobudí a vyšle analógový ping na vyhľadanie zariadenia požadujúce nabíjanie. Tento kolobeh opakovaného spustenia je nastavený RC článkom. WPC požaduje spojenie s priloženým zariadením požadujúce nabíjanie do  $500\text{ ms}$  [11].

## 2.5 Výpočty

### 2.5.1 Čas nabíjania

Z údajov úbytkov výkonu, vyčítaných z katalógových listov súčiastok pri vstupnom výkone  $2,5\text{ W}$  dodávaného cez USB port, je celkový výstupný výkon približne  $P_{OUTCELK} = 1,5\text{ W}$ . Z výstupného výkonu zistený nabíjací prúd pri zdroji dodávajúceho nabíjacie napätie  $5\text{ V}$  je

$$P_{OUTCELK} = P_{IN} - P_{UB} \quad (2.1)$$

$$I_n = \frac{P_{OUTCELK}}{U_{OUTRx}} = \frac{1,5\text{ W}}{5\text{ V}} = 300\text{ mA}, \quad (2.2)$$

Zo zisteného nabíjacieho prúdu  $I_n$ , ktorým sa nabíja batéria s kapacitou Li-ion článku  $Q$  sa zistí čas nabíjania

$$t = 1,4 \cdot \frac{q}{I_n} = 1,4 \cdot \frac{100\text{ mAh}}{300\text{ mA}} = 0,4666\text{ h}. \quad (2.3)$$

|                  |     |     |      |      |
|------------------|-----|-----|------|------|
| $q\text{ [mAh]}$ | 100 | 500 | 1000 | 1500 |
| $t\text{ [min]}$ | 28  | 140 | 280  | 420  |

Tab. 2.1: Čas nabíjania pre jednotlivé kapacity batérií, pri výstupnom výkone  $1,5\text{ W}$ .

Tieto výpočty sú vzťahnuté k USB 2.0, ktorý je schopný dodávať  $5\text{ V}$  a maximálny prúd  $500\text{ mA}$ . Verzia USB 3.0 je schopná dodávať pri  $5\text{ V}$ ,  $900\text{ mA}$ . S použitím vyššieho prúdu sa zvýši celková účinnosť systému, ktorá je najvyššia pri  $3\text{ W}$ , a zároveň sa skráti doba nabíjania.

|                  |     |     |      |      |
|------------------|-----|-----|------|------|
| $q\text{ [mAh]}$ | 100 | 500 | 1000 | 1500 |
| $t\text{ [min]}$ | 12  | 60  | 120  | 180  |

Tab. 2.2: Čas nabíjania pre jednotlivé kapacity batérií, pri výstupnom výkone  $3\text{ W}$ .

Z daných výpočtov je zrejmé, že čím je vyšší vstupný výkon, a tým aj výstupný, nabíjací prúd  $I_n$ , sa čas nabíjania zkracuje. V konečnom dôsledku je možné tvrdiť, že čas nabíjania je obmedzený maximálnymi nabíjacími schopnosťami Li-ion batérie. V skutočnosti pri predpoklade zariadenia schopného dodať vysoké výkony, dochádza pri nedokonalom spárovaní a príliš veľkých rozdieloch v rozmeroch medzi vysielačou a prijímacou cievkou k nadmernému ohrevu, príčinou čoho môže byť poškodenie batérie alebo zariadenia, ktoré sa nabíja.

### 2.5.2 Účinnosť

Výsledné účinnosti sú určené zo vzťahu

$$\eta = \frac{P_{OUTCELK}}{P_{IN}} \cdot 100. \quad (2.4)$$

|                   |     |      |      |    |      |    |
|-------------------|-----|------|------|----|------|----|
| $P_{IN} [W]$      | 2,5 | 3    | 3,5  | 4  | 4,5  | 5  |
| $P_{OUTCELK} [W]$ | 1,5 | 2    | 2,5  | 3  | 3,5  | 4  |
| $\eta [\%]$       | 60  | 66,7 | 71,4 | 75 | 77,8 | 80 |

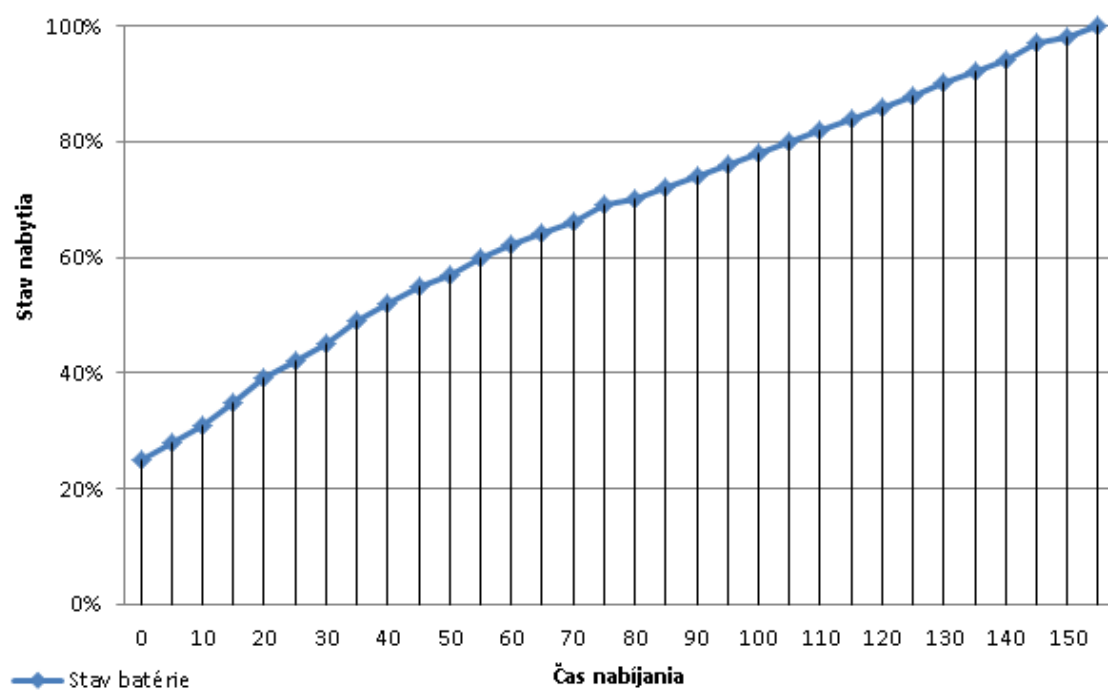
Tab. 2.3: Predpokladané účinnosti zariadenia pri rôznych vstupných výkonoch.

Z vypočítanej výslednej účinnosti  $\eta$  je možné určiť koľko celkovej energie sa dodá batérií. Teoretickými výpočtami z dostupných údajov vyplýva, že zariadenie by malo byť schopné dodávať až 80 % vstupného výkonu batérií, čo je podľa porovnania účinnosti nabíjania medzi vodičom a bezdrôtovým prenosom v kapitole [1.3.1], nereálne. Presnejšie hodnoty sa získajú po skonštruovaní a zmeraní zariadenia.

### 2.5.3 Meranie testovacieho vzorku

| Čas nabíjania [min] | Stav nabytia batérie [%] | Čiastková kapacita [mAh] |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0                   | 25                       | 537,5                    |
| 15                  | 35                       | 752,5                    |
| 30                  | 45                       | 967,5                    |
| 45                  | 55                       | 1182,5                   |
| 60                  | 62                       | 1333,5                   |
| 75                  | 69                       | 1483,5                   |
| 90                  | 74                       | 1591,5                   |
| 105                 | 80                       | 1720,5                   |
| 120                 | 86                       | 1763,5                   |
| 135                 | 92                       | 1978,5                   |
| 150                 | 98                       | 2107,5                   |
| 155                 | 100                      | 2150,5                   |

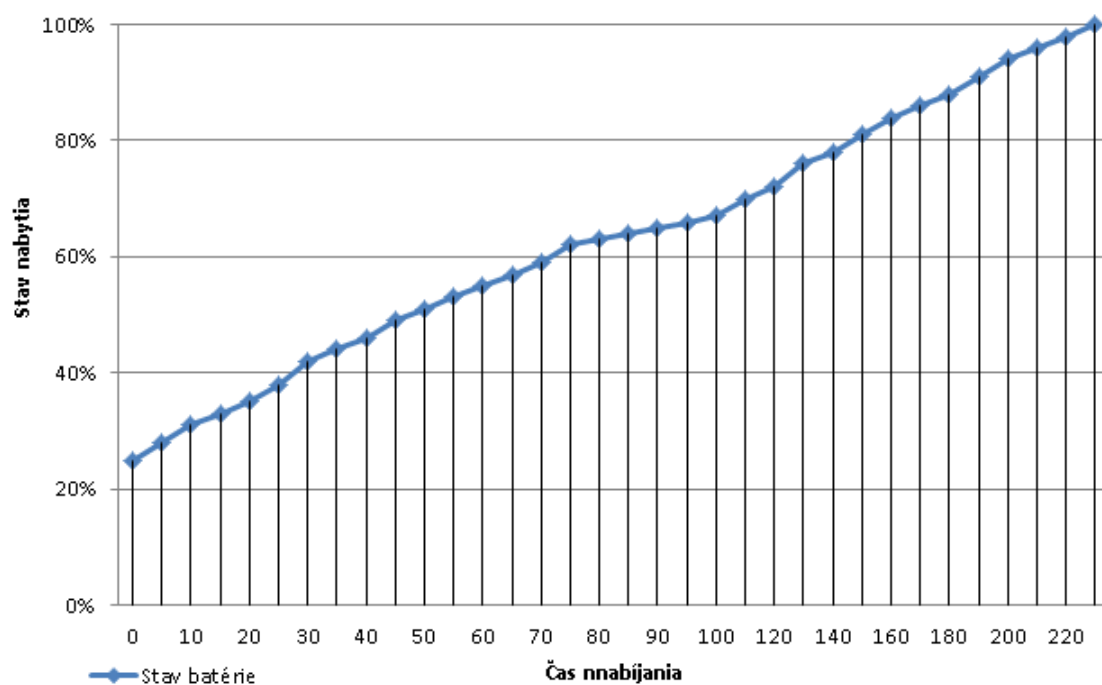
Tab. 2.4: Stav nabytia zariadenia pri danom čase s aktuálnou hodnotou kapacity batérie (bezdrôtovo).



Obr. 2.3: Graf priebehu nabíjania (bezdrôtovo).

| Čas nabíjania [min] | Stav nabitia batérie [%] | Čiastková kapacita [mAh] |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0                   | 25                       | 537,5                    |
| 20                  | 35                       | 752,5                    |
| 40                  | 46                       | 989                      |
| 60                  | 55                       | 1182,5                   |
| 80                  | 63                       | 1354,5                   |
| 100                 | 67                       | 1440,5                   |
| 120                 | 72                       | 1548                     |
| 140                 | 78                       | 1677                     |
| 160                 | 84                       | 1806                     |
| 180                 | 88                       | 1892                     |
| 200                 | 94                       | 2021                     |
| 220                 | 98                       | 2107                     |
| 228                 | 100                      | 2150                     |

Tab. 2.5: Stav nabitia zariadenia pri danom čase s aktuálnou hodnotou kapacity batérie (cez kábel).



Obr. 2.4: Graf priebehu nabíjania (cez kábel).

|          |         |         |                |
|----------|---------|---------|----------------|
|          | Vstup   | Výstup  | Priemer cievky |
| Vysielač | 5 V/2 A | 5 V/1 A | 43 mm          |
| Prijímač | 5 V     | 1 A     | 30 mm          |

Tab. 2.6: Parametre testovacieho vzorku.



Merania sa previedli napájaním z USB portu notebooku bez možnosti regulácie výstupného výkonu. Z výsledkov meraní nemožno určiť výslednú účinnosť môže sa len konštatovať, že nabíjanie bezdrôtovo prebehlo rýchlejšie pri použití napájania z rovnakého USB portu. Toto rýchlejšie nabíjanie môže mať negatívny účinok na životnosť li-ion batérie, nakoľko je to nová technológia a nie je regulovaná programom.

#### **Dodatočné merania na testovacom a zkonštruovanom vysielачi**

- **Testovací Tx** – Vstupné napätie vysielачa je  $5\text{ V}$  pri  $500\text{ mA}$ . Zmerala sa frekvencia magnetizačného prúdu  $89,9\text{ kHz}$  obdĺžnikového signálu D.2 pri meranom prúde cievkou  $510\text{ mA}$ . Napätie namerané na cievke bolo  $915\text{ mA}$ .
- **Zkonštruovaný Tx** – Vstupné napätie sa nastavilo na  $5\text{ V}$  pri vstupnom prúde  $500\text{ mA}$ . Zariadenie nekomunikovalo s prijímačom nakoľko sa vyskytla chyba v obvode a nedodával sa žiaden prúd vysielacej cievke. Obvod sa pokúšal v  $1,24$  sekundových intervaloch D.1 dodať prúd vysielacej cievke, ale z nejakej príčiny sa obvod stále reštartoval čo naznačoval v obvode zapojený bzučiak, ktorý má za úlohu hlásiť nadviazanie kontaktu a následného zahájenia prenosu, ale ten sa nikdy neuskutočnil. V týchto intervaloch sa osciloskopom podaril namerať krátkodobý pílovitý signál na cievke D.3, s kmitočtom  $7,1\text{ kHz}$  pri vstupnom prúde  $190\text{ mA}$  a  $70,92\text{ kHz}$  pri vstupnom prúde  $1,83\text{ A}$  D.4.

### 3 ZÁVER

Práca v úvode oboznamuje, so základnými pojmy elektromagnetickej indukcie definíciou fyzikálnych veličín, kde je popísaný princíp činnosti, možné výhody a nevýhody tejto technológie prenosu energie. Úlohou úvodnej časti je tiež preukázať bezpečnosť používania zariadenia a jeho uplatnenie v bežnom živote.

Návrh prebiehal v dvoch úsekoch. Najprv sa navrhla vysielacia časť, potom prijímacia. Pri návrhu vysielача robil najväčší problém výber kontroléra BQ500\*\*\*, podľa ktorého sa menilo celé zapojenie. Problémom bolo najmä zapúzdrenie súčiastky, ktoré bolo častokrát neosaditeľné, dané podmienkami osadenia UTKO. Ďalej, bolo potrebné brať do úvahy napájacie napätie, ktoré sa volilo pre napájanie z portu USB. Kvôli obmedzeniam výrobnjej technológie DPS, bolo potrebné návrh upraviť pre dvojvrstvové osadenie, namiesto ideálneho štvorvrstvého, kde sú dve vrstvy venované uzemneniu. Vynechaním dvoch vrstiev z riešenia vedie k zväčšeniu DPS a k možnému zvýšeniu šumu. Táto zmena môže mať vplyv na výslednú účinnosť. Zabezpečenie osaditeľnosti si vyžadovalo zmenu spínacích tranzistorov s rýchlou odozvou na iný typ. Tieto tranzistory na výstupe Tx majú veľký vplyv na účinnosť vysielача, ktorý sa zistí po zostrojení a zmeraní zariadenia. Prijímacia časť sa volila s dôrazom na kompatibilitu s vysielачom a vhodné zapuzdrenie. Návrhy pre DPS oboch častí sa realizoval v programe Eagle, samostatne pre vysielач a prijímač.

Po výslednej úprave návrhu plošného spoja vysielача sa vyleptal plošný spoj a objednali súčiastky. Vyskytli sa problémy s logistikou ako je nedostupnosť súčiastok s neobvyklými hodnotami. Preto sa objednávali súčiastky od rôznych dodávateľov. Výsledkom čoho bol oneskorený a značne časovo náročný proces výberu a objednávaní súčiastok. Častá zmena zoznamu materiálov a dohľadávanie súčiastok, ktoré sú dostupné u jednotlivých dodávateľoch viedlo k celkovému zmätku a neskorému doručení súčiastok. Dátum doručenia posledných súčiastok tak padol na skúškové obdobie.

Bolo objednané aj testovacie zariadenie v prípade nefunkčnosti návrhu na ktorom sa previedli merania na porovnanie s káblovým protajškom 2.5.3. Dodatočné merania sa previedli na testovacom a zkonštruovanom zariadení 2.5.3.

Bohužiaľ sa nepodarilo zostrojiť funkčné zariadenie u vysielача aj prijímača mohla byť chyba spôsobená problematickým osadzovaním súčiastok BQ5\*\*\*. Vysielacie BQ500211A bolo po prvotnom osadení zkontrolované a našli sa skraty pod zariadením, ktoré bolo následne prefúknute horúcim vzduchom čo mohlo spôsobiť poškodenie súčiastky. Pri prijímacom BQ51013B sa po osadení nezistil žiaden zkrat, ale po osadení sa zistilo nevhodné prepojenie pod súčiastkou, ktoré mohlo nastať nadmerným zahrievaním pri osadzovaní okolitých súčiastok.

# LITERATÚRA

- [1] SEDLÁČEK J., *Elektrotechnika 1* [online]. 2008, UETEE: Vysoké Učení Technické, prednáška č.6. [cit. 16. Dec 2014]. URL: <[http://www.utee.feec.vutbr.cz/files/predmety/BEL1/Multimed\\_uc/BEL1\\_blok6.pdf](http://www.utee.feec.vutbr.cz/files/predmety/BEL1/Multimed_uc/BEL1_blok6.pdf)>.
- [2] HOCKICKO P., KÚDELČÍK J., *Základy fyziky, EDIS* [online]. 2011, Žilina: Žilinská univerzita. 274 s. ISBN 978-80-8070-653-1. URL: <[http://hockicko.uniza.sk/Books/ZakladyFyziky\\_KudelcikHockicko.pdf](http://hockicko.uniza.sk/Books/ZakladyFyziky_KudelcikHockicko.pdf)>.
- [3] PIŇOVSKÁ, M. a kol. 2013. Mobilné telefóny a možné účinnky na zdravie človeka. *Strojárstvo EXTRA* [online]. 2013, roč. 3, č. 4, s. 12-16 URL: <<http://www.engineering.sk/images/stories/2013/04april/extra.pdf>>.
- [4] UMENEI A. E., *Understanding low frequency non-radiative power transfer* [online]. 2011, [cit. 16. Dec 2014]. URL: <[http://www.wirelesspowerconsortium.com/data/downloadables/6/8/9/understanding-low-frequency-non-radiative-power-transfer-8\\_8\\_11.pdf](http://www.wirelesspowerconsortium.com/data/downloadables/6/8/9/understanding-low-frequency-non-radiative-power-transfer-8_8_11.pdf)>.
- [5] WAGENINGEN D. , WAFFENSCHMIDT E., *Transfer efficiency* [online]. 2013, [cit. 16. Dec 2014] URL: <<http://www.wirelesspowerconsortium.com/technology/transfer-efficiency.html>>.
- [6] WAGENINGEN D., WAFFENSCHMIDT E., *Transfer efficiency* [online]. 2013, [cit. 16. Dec 2014] URL: <<http://www.wirelesspowerconsortium.com/technology/basic-principle-of-inductive-power-transmission.html>>.
- [7] LEGRAND Y., *Compare: Wireless Technology* [online]. 2012, [cit. 16. Dec 2014] URL: <<https://community.freescale.com/community/the-embedded-beat/blog/2012/11/30/wireless-power-technology-comparison>>.
- [8] Maxwell R., *Wireless charging standards, Qi, Powermat, A4WP, what does it all mean and who will prevail?* [online]. 2014, [cit. 16. Dec 2014] URL: <[http://www.phonearena.com/news/Wireless-charging-standards-Qi-Powermat-A4WP-what-does-it-all-mean-and-who-will-prevail\\_id57371](http://www.phonearena.com/news/Wireless-charging-standards-Qi-Powermat-A4WP-what-does-it-all-mean-and-who-will-prevail_id57371)>.
- [9] SIDDABATTULA K., *Why not a wire* [online]. 2013, [cit. 16. Dec 2014]. URL: <<http://www.wirelesspowerconsortium.com/data/downloadables/1/2/1/1/why-not-a-wire-the-case-for-wireless-power.pdf>>.

- [10] HO S., *Making Wireless Power a Reality!* [online]. 2013, [cit. 16. Dec 2014]  
URL: <[https://www.academia.edu/6136523/bqTESLA\\_TM\\_Making\\_Wireless\\_Power\\_a\\_Reality](https://www.academia.edu/6136523/bqTESLA_TM_Making_Wireless_Power_a_Reality)>.
- [11] Texas Instruments. *Katalog1* [Online]. 2012, posledná aktualizácia 9. 2013  
[cit. 16. Dec 2014]. URL:  
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq500211a.pdf>>.
- [12] Texas Instruments. *Katalógový list*. [Online]. 2013, [cit. 16. Dec 2014]. URL:  
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq51013b.pdf>>.
- [13] Texas Instruments. *Katalógový list*. [Online]. 2006, posledná aktualizácia  
4. 2010 [cit. 16. Dec 2014]. URL:  
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps28225.pdf>>.
- [14] Texas Instruments. *Katalógový list*. [Online]. 2009, posledná aktualizácia  
11. 2012 [cit. 16. Dec 2014]. URL:  
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina199a1.pdf>>.
- [15] Texas Instruments. *Katalógový list*. [Online]. 2011, posledná aktualizácia  
11. 2013 [cit. 16. Dec 2014]. URL:  
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2553.pdf>>.
- [16] Texas Instruments. *Katalógový list*. [Online]. 2009, posledná aktualizácia  
11. 2012 [cit. 16. Dec 2014]. URL:  
<<http://www.ti.com/lit/ds/slvsa00d/slvsa00d.pdf>>.
- [17] Texas Instruments. *Katalógový list*. [Online]. 2014, [cit. 16. Dec 2014]. URL:  
<<http://www.ti.com/lit/ds/slvsa00d/slvsa00d.pdf>>.
- [18] Integrated Device Technology. *Katalógový list*. [Online]. 2013,  
[cit. 16. Dec 2014]. URL:  
<<https://www.idt.com/products/power-management/wireless-charging-ics-wireless-power-ics/wireless-power-transmitters/p9035a-wpc-11-5v-wireless-power-transmitter-tx-a5-and-tx-a11>>.

## ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

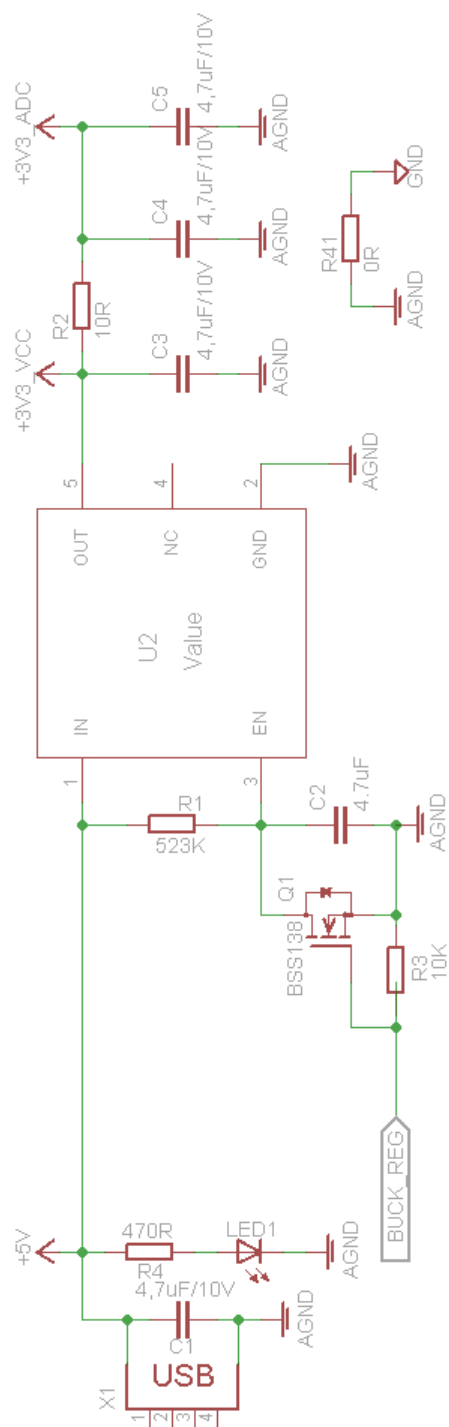
|           |                                     |
|-----------|-------------------------------------|
| A4WP      | aliance for wireless power          |
| AM        | amplitúdová modulácia               |
| B         | elektromagnetická indukčnosť        |
| D         | priemer cievky                      |
| DPL       | dynamic power limiting              |
| DPS       | doska plošného spoja                |
| EM        | elektromagnetické                   |
| EMC       | electromagnetic compatibility       |
| E-pole    | elektrické pole                     |
| Flip-Chip | controlled collapse chip connection |
| FOD       | foreign object detection            |
| H         | intenzita magnetického poľa         |
| I         | prúd                                |
| IDT       | integrated device technology        |
| j         | imaginárne číslo                    |
| k         | faktor kvality sprákovania cievok   |
| L         | indukčnosť                          |
| LDO       | lineárny stabilizátor               |
| M-pole    | magnetické pole                     |
| NFC       | near field communication            |
| $P_{IN}$  | vstupný výkon                       |
| $P_{UB}$  | súčet jednotlivých ubytkov výkonov  |
| PMA       | power matters alliance              |
| PMOD      | parasitic metal object detection    |

|          |                                                  |
|----------|--------------------------------------------------|
| PPM      | parts per million                                |
| q        | kapacita li-ion baterie                          |
| Q        | faktor kvality                                   |
| QFN      | quad flat no-leads package                       |
| RF       | rádiový kmitočet (radio-frequency)               |
| Rx       | prijímač (receiver)                              |
| t        | čas                                              |
| TI       | Texas Instruments – výrobca, dodávateľ spčiasťok |
| Tx       | transmitter                                      |
| U        | napätie                                          |
| $w_m$    | hustota energie magnetického poľa                |
| $W_m$    | energia magnetického poľa                        |
| WLSCSP   | wafer level chip scale package                   |
| WPC      | wireless power consortium                        |
| z        | vzdialenosť medzi cievkami                       |
| Z        | impedancia                                       |
| $\eta$   | účinnosť                                         |
| $\omega$ | uhlová frekvencia                                |

## ZOZNAM PRÍLOH

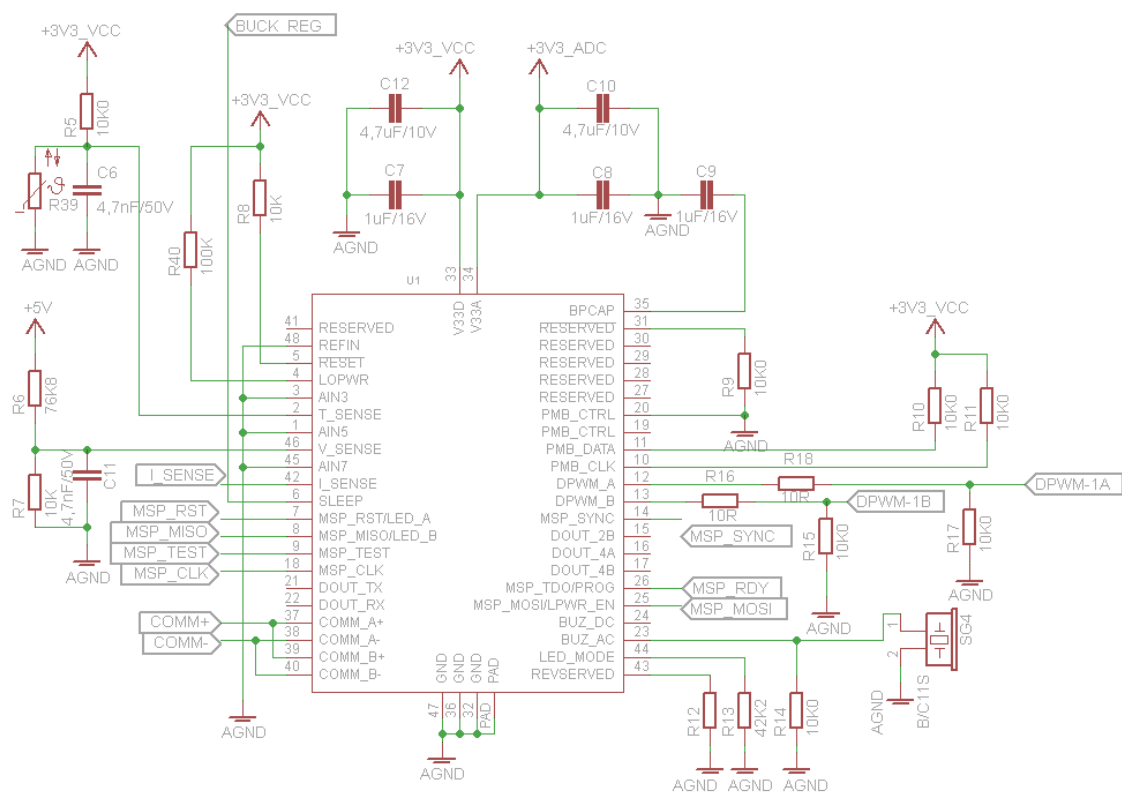
|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| A Schémy zapojenia vysieláča a prijímača       | 40 |
| B Predlohy pre výrobu plošného spoja prijímača | 45 |
| C Obrázky stavu osadenia plošných spojov       | 47 |
| D Hodnoty namerané osciloskopom                | 49 |

## A SCHÉMY ZAPOJENIA VYSIELAČA A PRIJÍMAČA

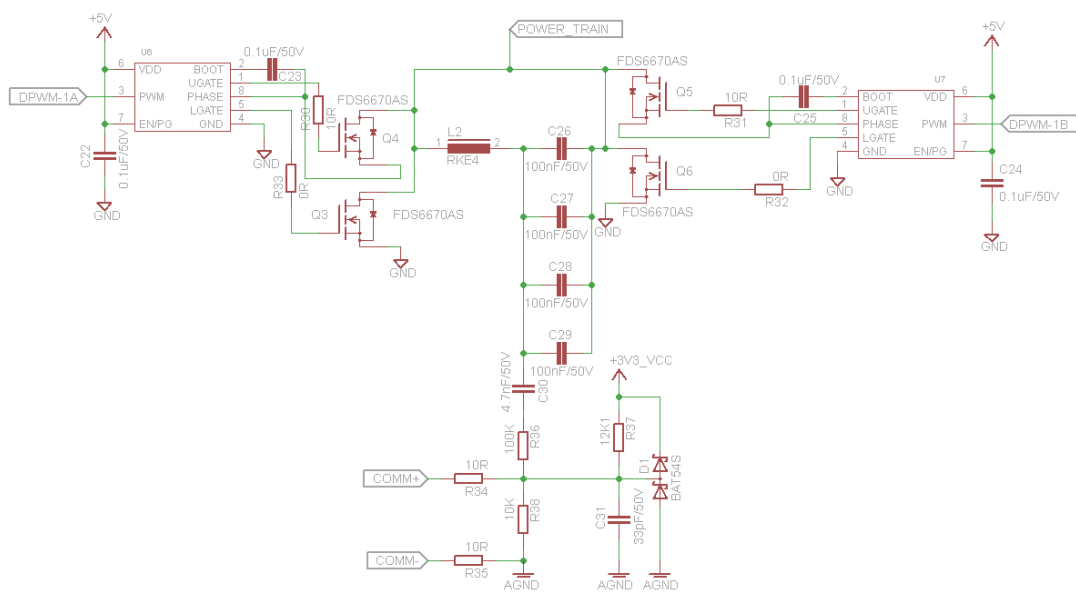


Obr. A.1: Schéma zapojenia lineárneho stabilizátora (Buck Regulator).

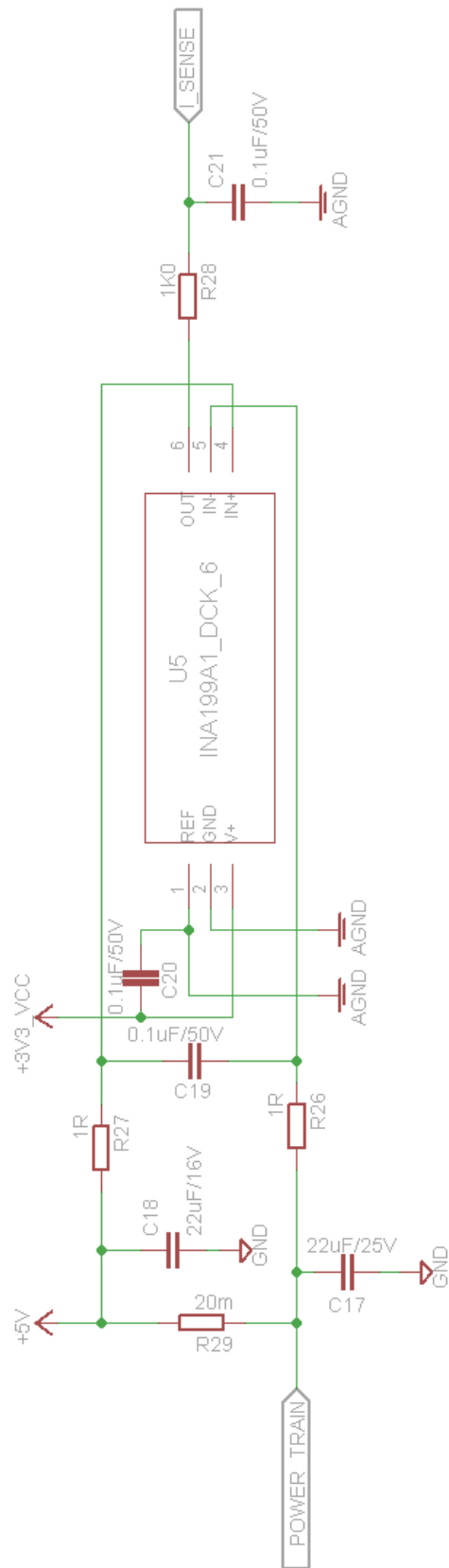




Obr. A.2: Schéma zapojenia s kontrolérom BQ500211A.

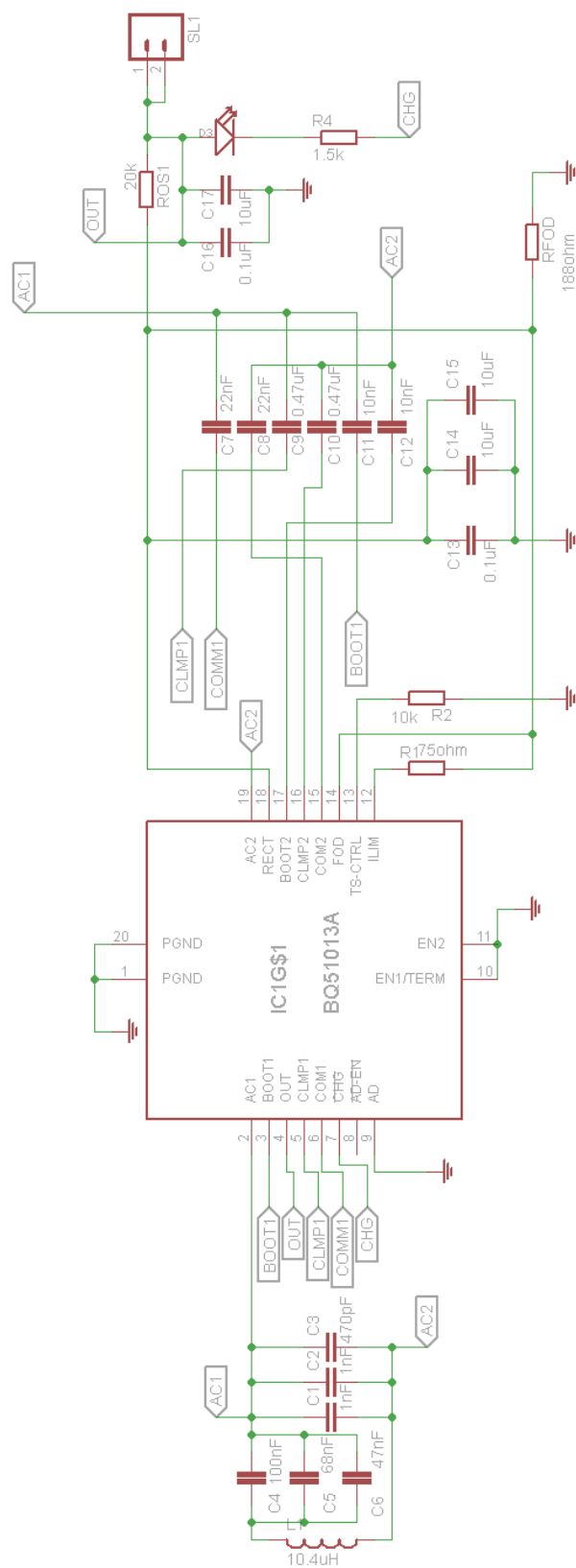


Obr. A.3: Schéma zapojenia výkonovej časti (Power Train).



Obr. A.4: Schéma zapojenia sledovača prúdu.

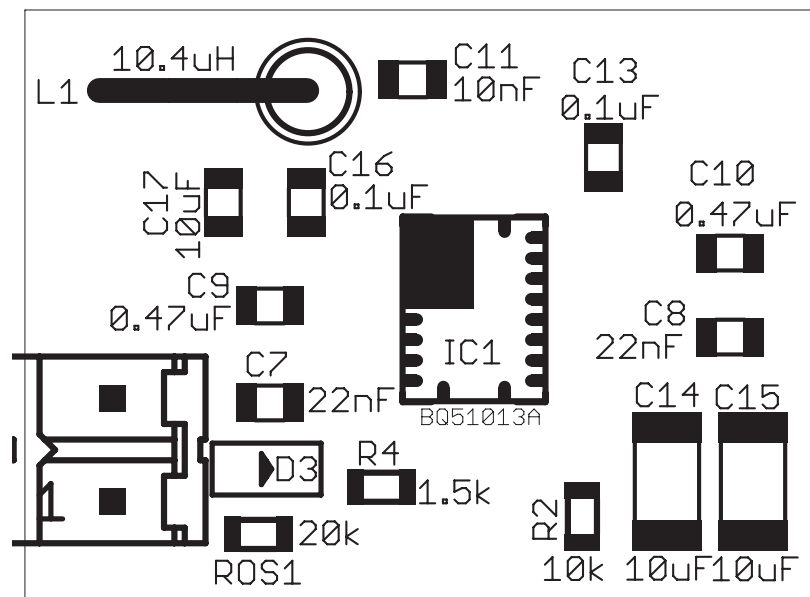




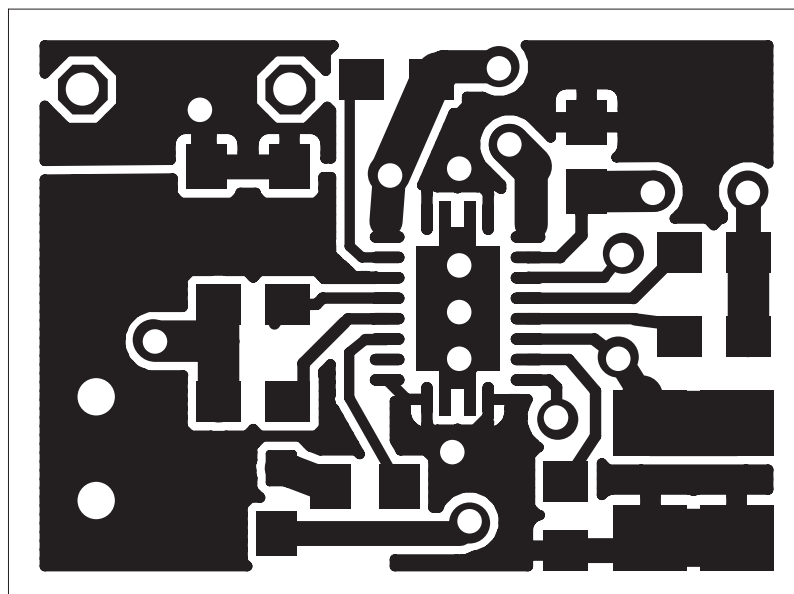
Obr. A.6: Schéma zapojenia prijímača.

## B PREDLOHY PRE VÝROBU PLOŠNÉHO SPOJA PRIJÍMAČA

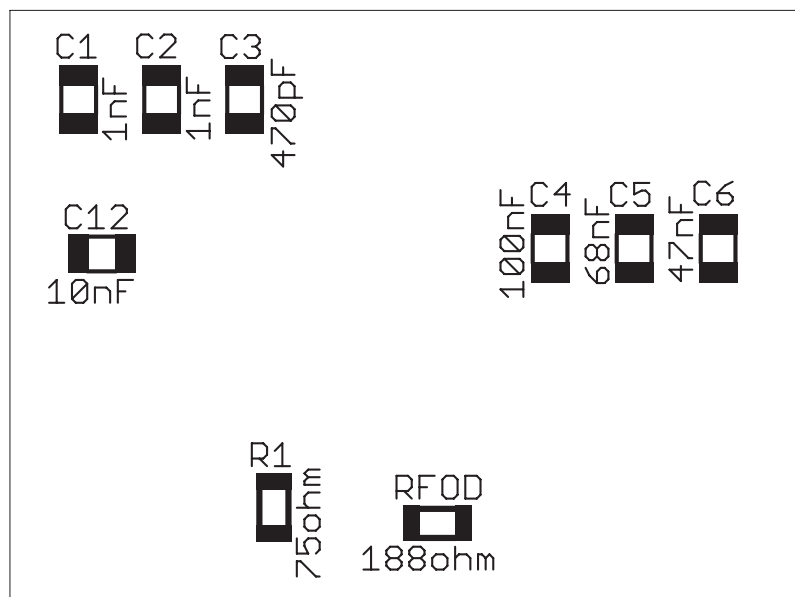
Rozmer: 14,5 mm × 19,5 mm



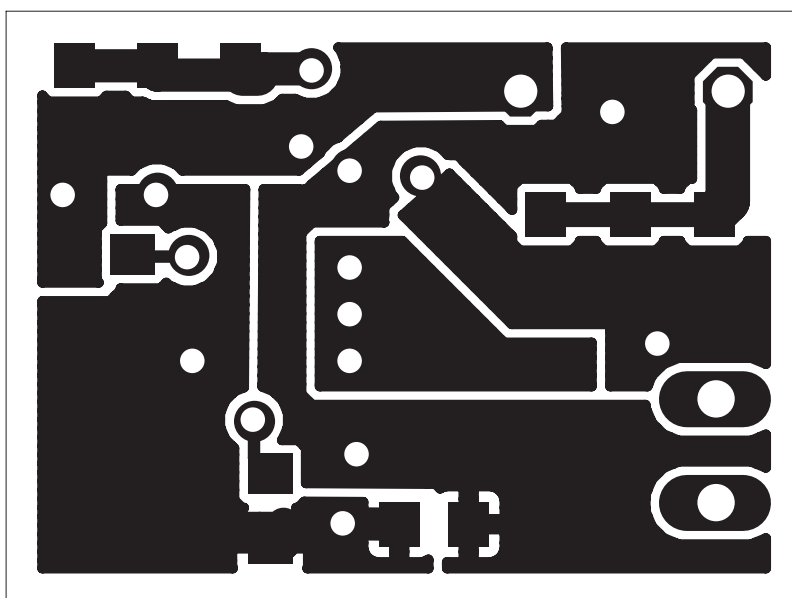
Obr. B.1: Osadenie súčiastok. Horná časť.



Obr. B.2: Predloha pre tlač na pauzový papier. Horná časť.

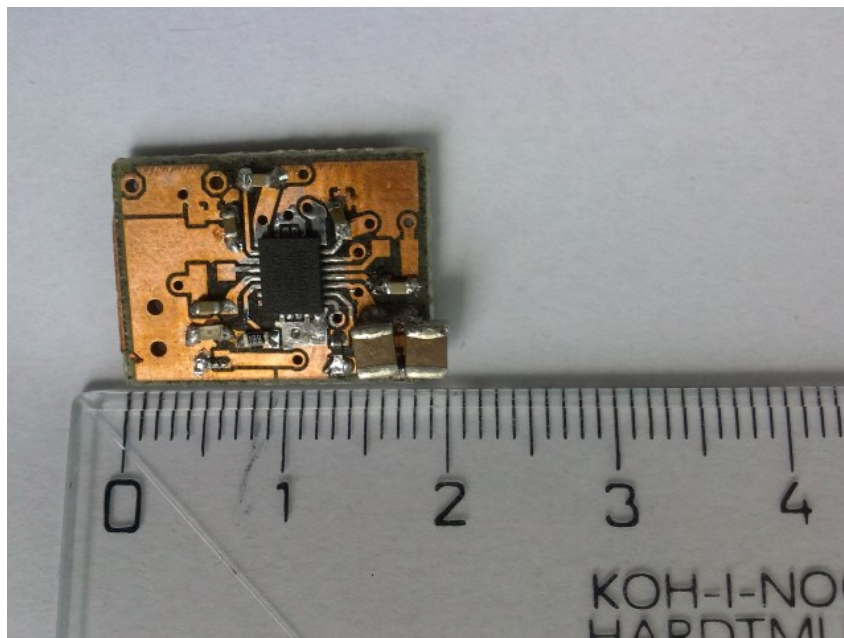


Obr. B.3: Osadenie súčiastok. Dolná časť.

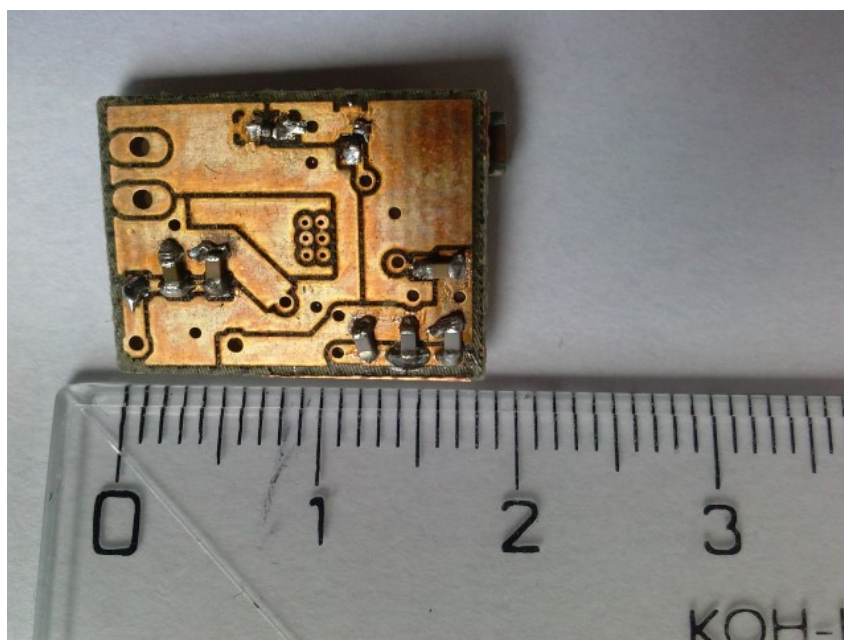


Obr. B.4: Predloha pre tlač na pauzový papier. Dolná časť.

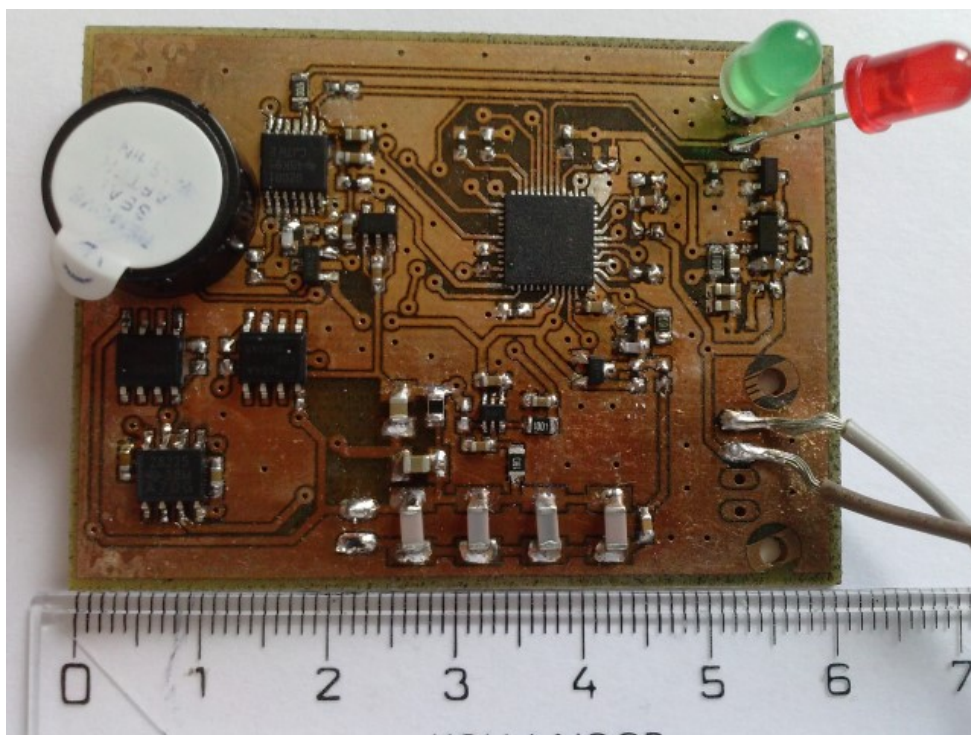
## C OBRÁZKY STAVU OSADENIA PLOŠNÝCH SPOJOV



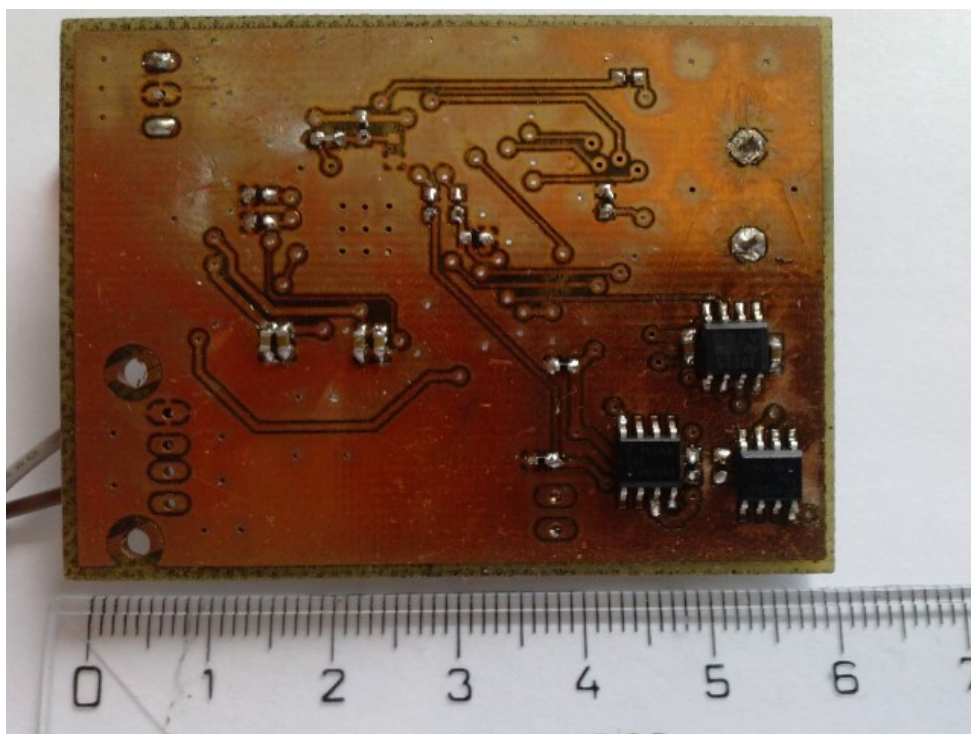
Obr. C.1: Osadenie vrchnej časti prijímača.



Obr. C.2: Osadenie spodnej časti prijímača.



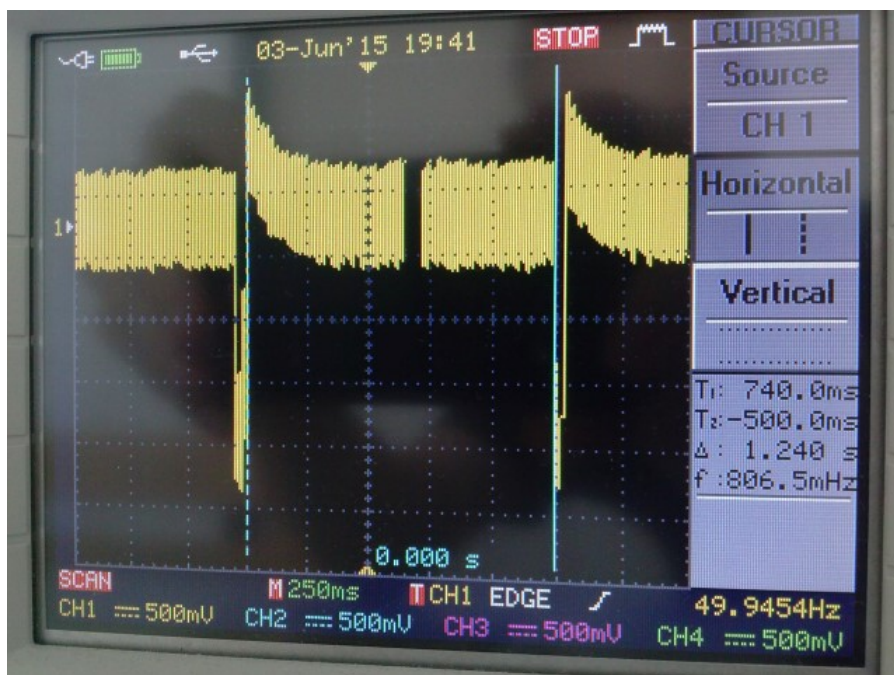
Obr. C.3: Osadenie vrchnej časti vysieláča.



Obr. C.4: Osadenie spodnej časti vysieláča.



## D HODNOTY NAMERANÉ OSCIOSKOPOM



Obr. D.1: Snaha o štart zariadenia.



Obr. D.2: Kmitočť na cievke (Testovací Tx).



Obr. D.3: Kmitočť na cievke (Zkonštruovaný Tx).



Obr. D.4: Kmitočť na cievke (Zkonštruovaný Tx).



Obr. D.5: Vysielaný paketový signál na testovacom Tx keď nie je pripojený Rx.