TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

NÁVRH A REALIZACE BEZKONTAKTNÍHO INDUKČNÍHO PŘENOSU ENERGIE STANDARDU QI

Bakalářská práce

Liberec 2015 **Marek Stašík**

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií

NÁVRH A REALIZACE BEZKONTAKTNÍHO INDUKČNÍHO PŘENOSU ENERGIE STANDARDU QI

Bakalářská práce

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Autor práce: **Marek Stašík**
Vedoucí práce: Ing. Martin Kysela

Liberec 2015

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies

DESIGN AND REALISATION OF THE CONTACTLESS INDUCTIVE ENERGY TRANSFER UNDER QI STANDARD

Bachelor thesis

Study programme: B2612 – Electrical Engineering and Informatics
Study branch: 2612R011 – Electronic Information and Control Systems

Author: **Marek Stašík**
Supervisor: Ing. Martin Kysela

Liberec 2014

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Marek Stašík**
Osobní číslo:	**M12000072**
Studijní program:	**B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Elektronické informační a řídicí systémy**
Název tématu:	**Návrh a realizace bezkontaktního indukčního přenosu energie standardu Qi**
Zadávající katedra:	**Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s technologiemi bezkontaktního přenosu energie a standardem Qi.
2. Proveďte rešerši v současnosti používaných zařízení a jejich cenu a konstrukční řešení.
3. Navrhněte přípravek na měření účinnosti přenosu energie a možná obvodová řešení.
4. Proměřte prostorovou charakteristiku přenosu energie. Porovnejte možná obvodová řešení z hlediska parametrů, ceny a plochy na DPS.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **30–40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] **Wireless Power Consortium [online]. 2014 [cit. 2014-10-06]. Dostupné z: http://www.wirelesspowerconsortium.com**

[2] **Šandera J.: Návrh plošných spoju pro povrchovou montáž - SMT a SMD. BEN Technická literatura, 2006. ISBN: 80-7300-181-0.**

[3] **Vaníček, F.: Elektronické součástky. Principy, vlastnosti, modely. ČVUT, Praha 1999**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Kysela**
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Matěj Kolář**
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2015**

prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan

L.S.

Technická univerzita v Liberci - 14 -

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2014

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 15. 5. 2015

Podpis:

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především svému vedoucímu práce za obětavé pájení integrovaného obvodu. Také bych chtěl poděkovat VÚTS Liberec za výpomoc při měření indukčnosti použitých cívek. Velmi děkuji panu Ing. Leošovi Petržílkovi za výrobu DPS.

Abstrakt

Tento dokument obsahuje zjednodušené všeobecné informace o technologiích, které lze použít pro přenos energie bezkontaktně. Konkrétněji se však zabývá standardem Qi a indukčním přenosem energie.

Tento dokument dále obsahuje základní informace o principu činnosti přenosu energie ve standardu Qi. Práce obsahuje seznam některých produktů pro přenos energie, které jsou kompatibilní se standardem Qi, včetně jejich ceny. Práce se zaměřuje především na výrobu přijímače energie. V dokumentu jsou porovnány dvě varianty, jak lze přijímač realizovat. Práce obsahuje navržená obvodová schémata obou variant řešení. V dokumentu je zachycen postup, jak byla jedna varianta realizovaná až do podoby funkčního zařízení. Pro variantu, která byla realizována, je dispozici návrh desky plošných spojů. Pro realizaci výsledného zařízení byl použit integrovaný obvod bq51013b. Použití tohoto integrovaného obvodu je v tomto dokumentu dobře zdokumentováno. Práce navíc zahrnuje i vytvořenou knihovnu pro EAGLE, ve které je symbol tohoto integrovaného obvodu a jeho pouzdro. V dokumentu jsou navíc přehledně uvedeny informace o jednotlivých vývodech integrovaného obvodu bq51013b a jejich doporučeného použití a zapojení.

Dokument obsahuje informace o tom, jak lze optimalizovat přenos energie a za jakých okolností lze přenos realizovat. Dokument obsahuje mnoho dat, která byla naměřena na zhotoveném zařízení. Tato data jsou v dokumentu graficky zpracována. Například jsou v tomto dokumentu k nalezení voltampérové charakteristiky, které byly naměřeny na zhotoveném a zakoupeném přijímači energie. Dále lze v dokumentu nalézt informace o celkové účinnosti přenosu energie změřené za různých okolností. Především se jedná o závislost účinnosti na vzájemné poloze cívky přijímače a vysílače. Porovnávají se i parametry dosažené při použití dvou různých cívek.

Klíčová slova:

bezkontaktní, energie, Qi, DPS, účinnost

Abstract

This document contains simplified general information about technologies which can be used for wireless energy transport. It is further focused on standard Qi and inductive energy transfer.

This document also contains basic information about principle of operation defined in Qi standard. This work contains a list of some products which is compatible with Qi standard. This list also includes the prices of these products. This work is aiming at energy receiver development. Document contains a comparison of two possible receiver solutions. The work contains electric circuits schemas for both solutions. The document includes procedure of manufacturing for one of these solutions. The work contains PCB layout for this selected solution. In this selected solution. In this selected solution has been used integrated circuit bq51013. Usage of this integrated circuit is well described in this document. The work also includes new library for EAGLE. This library includes bq51013b symbol and package foot print. In this document is information about each pin on this integrated circuit includes its usage and recommended connection.

This document contains information about energy transfer optimization and conditions required to operate transfer. The document contains a lot of measured data. These data have been measured on the final device. These data are graphically presented in the document. Document contains for example current-voltage curves measured on manufactured and purchased receiver. Document also contains measured overall efficiencies at different conditions. Especially has been measured how efficiency depends on mutual position of the receiver and transmitter coil. Document also contains comparison of two different receiver coils.

Keywords:

wireless, power, Qi, PCB, efficiency

Obsah

Obsah 6
Seznam obrázků 8
Seznam zkratek 9
Úvod 10
1 Technologie bezkontaktního přenosu energie 11
1.1 Technologie krátkého dosahu 11
1.1.1 Indukční vazba 11
1.1.2 Kapacitní vazba 11
1.1.3 Magnetodynamická vazba 12
1.2 Technologie dlouhého dosahu 12
1.2.1 Mikrovlnný přenos 12
1.2.2 Světelný přenos 13
2 Zařízení standardu Qi 14
2.1 Výrobky vysílající energii 14
2.2 Výrobky přijímající energii 15
3 Možná obvodová řešení přijímače 17
3.1 Elektrický princip činnosti ve standardu Qi 17
3.2 Varianta řešení s mikroprocesorem 18
3.3 Varianta řešení s integrovaným obvodem bq51013 20
4 Návrh a výroba zařízení 21
4.1 Tvorba knihovny pro součástku bq51013 21
4.2 Elektrické schéma 22
4.3 Návrh desky plošných spojů 24
4.4 Osazování DPS 25
4.5 Výpočet hodnot kondenzátorů v rezonančním obvodu 26
5 Měření závislostí 28
5.1 Měření s různými cívkami 28
5.2 Měření při různé vzdálenosti cívek přijímače a vysílače 31
5.3 Měření při různém vyosení cívek přijímače a vysílače 32
5.4 Měření při různém úhlu natočení cívky vysílače a přijímače 33
5.5 Porovnání se zakoupeným přijímačem 34
5.6 Naměřené napětí za usměrňovačem 35
5.7 Shrnutí výsledků měření 36
6 Závěr 38
Seznam použité literatury 39
A Obsah CD 41
B Vzor elektrického zapojení pro obvod bq51013 42
C Navržené schéma zapojení přijímače s MCU 43
D Navržené schéma zhotoveného zařízení 44

E Porovnání VA charakteristik testovaných cívek 45
F Graf účinnosti přenosu energie testovaných cívek 46
G Graf účinnosti v závislosti na odporové zátěži přípravku 47
H Graf účinnosti v závislosti na vertikální vzdálenosti cívek 48
I Graf účinnosti v závislosti na vyosení cívek 49
J Graf účinnosti v závislosti na náklonu cívky 50
K VA charakteristiky zakoupeného a vyrobeného přijímače 51
L Graf účinnosti vyrobeného a zakoupeného přijímače 52
M Napětí na vyhlazovacím filtračním kondenzátoru 53

Seznam obrázků

Obrázek 1 Qi Wireless Charger PCBA Circuit Board with Qi Standard Coil[12] 15
Obrázek 2 QI ELEVATOR STYLE[11] 15
Obrázek 3 Wireless Qi Insert For Samsung GALAXY S3[14] 16
Obrázek 4 Cívka, kterou obsahuje většina přijímačů[15] 16
Obrázek 5 Blokové schéma vysílače a přijímače energie ve standardu Qi[18] 18
Obrázek 6 Pouzdro VQFN obvodu bq51013b[23] 21
Obrázek 7 Navržený symbol a pouzdro pro IO bq51013b 22
Obrázek 8 Příklad elektrického zapojení IO bq51013[25] 22
Obrázek 9 Navržené schéma zhotoveného zařízení 24
Obrázek 10 Navržená DPS testovacího přípravku 25
Obrázek 11 Vyrobený přijímač bez cívky 25
Obrázek 12 Zjednodušené schéma dvojitého rezonančního obvodu[17] 26
Obrázek 13 Blokové schéma zapojení pro měření přenosu energie 28
Obrázek 14 Vysílač použitý při testování přenosu energie 28
Obrázek 15 Volt-ampérová charakteristika testovaných cívek 29
Obrázek 16 Graf účinnosti přenosu energie 30
Obrázek 17 Graf účinnosti v závislosti na hodnotě zatěžovacího odporu 31
Obrázek 18 Fotografie zachycující měření při různé vertikální vzdálenosti cívky 31
Obrázek 19 Graf závislosti účinnosti přenosu energie při různých vzdálenostech o vysílače 32
Obrázek 20 Graf zobrazující účinnost přenosu energie při různém posunutí cívek 33
Obrázek 21 Graf účinnosti v přenosu energie při různém náklonu přijímací cívky 34
Obrázek 22 Porovnání VA charakteristik vyrobeného a zakoupeného přijímače 35
Obrázek 23 Porovnání účinnosti vyrobeného a zakoupeného přijímače 35
Obrázek 24 Závislost napětí za usměrňovače na proudovém odběru 36

Seznam zkratek

Zkratka	Význam	Význam v češtině
AD	Analog-to-digital	Analogově digitální
CAD	Computer-aided design	Počítačová podpora návrhu
CAM	Computer-aided manufacturing	Počítačová podpora výroby
DPS		Deska plošných spojů
EAGLE	Easily Applicable Graphical Layout Editor	Snadno použitelný grafický editor návrhů
IO		Integrovaný obvod
MCU	Microcontroller unit	Jednočipový počítač
RX	Receiver	Přijímač
SMD	Surface mount device	Zařízení pro povrchovou montáž
THT	Through-hole technology	Technologie pro montáž v otvorech
TX	Transmitter	Vysílač
VA		Volt-ampérová

Úvod

Tato práce se zabývá bezkontaktním přenosem energie pomocí magnetické indukce. Zaměřuje se především na standard Qi, protože to je v současné době nejrozšířenější standard pro indukční přenos energie.

Hlavní výhodou indukčního přenosu energie je to, že není potřeba používat žádné konektory mezi zdrojem energie a přijímačem. Díky tomu nemusí být obě zařízení v přesné vzájemné poloze, ale můžou být v určitých mezích vzájemně posunuté nebo se v těchto mezích volně pohybovat. Další výhodou je nemožnost přeskočení jiskry a z toho vyplývající vyšší bezpečnost ve výbušném prostředí. Indukční přenos energie má význam také ve vlhkém, agresivním nebo špinavém prostředí, kde by při klasickém propojení zařízení mohlo docházet ke korozi nebo znečištění kontaktů v konektorech. Lze tedy bez problému dosáhnou dokonalé vodotěsnosti obou zařízení. Další aplikace, kde může tato technologie nalézt uplatnění, je robotika. Autonomní roboti se můžou samostatně rozhodnout, kdy potřebují dobít svojí zásobu energie a vydat se na místo, kde je zdroj indukční energie a tím automaticky zahájit nabíjení bez nutnosti zásahu člověka, nebo komplikovaného dokovacího mechanizmu.

Ve standardu Qi jsou při přenosu energie použity dvě zařízení. Jedno zařízení je vysílač energie, který je ve většině případů napájen z běžné sítě. Druhé zařízení je přijímač, je většinou součástí zařízení, které ho využívá pro napájení. Standard Qi se nejčastěji používá pro nabíjení mobilních telefonů. Mnoho nově vyrobených telefonů má již zabudovaný Qi přijímač.

Tato práce se bude především zaměřovat na vývoj přijímače, který by měl být kompatibilní se všemi vysílači standardu Qi. Výstupem práce bude hlavně návrh a zkonstruování samotného zařízení, na kterém bude možné testovat účinnost přenosu energie za různých podmínek a jeho spolehlivost. Dalším přínosem této práce bude návod, jak levně a jednoduše takové zařízení zkonstruovat a používat. Práce tím pádem poskytne elektrická schémata a návrh desky plošných spojů pro výrobu testovacího přípravku. Třetím výsledkem budou samotná naměřená data. Čtvrtým přínosem bude optimalizace parametrů a hodnot součástek v přijímači tak, aby bylo možné dosáhnout nejlepší účinnosti nebo nižší výrobní ceny, a tím dosáhnout úspory elektrické energie nebo financí.

1 Technologie bezkontaktního přenosu energie

Technologie pro bezkontaktní přenos energie lze rozdělit do dvou kategorií[1]. První kategorií jsou technologie krátkého dosahu, které jsou určené pro přenos energie do vzdálenosti jednoho-násobku použité vlnové délky[2]. Druhou kategorii jsou technologie dlouhého dosahu, které se používají na vzdálenost větší, než je použitá vlnová délka, zpravidla se jedná o vzdálenosti v řádech kilometrů.

Tabulka 1 Přehled bezkontaktních technologií přenosu energie[3]

Technologie	Dosah	Směrovost	Frekvence	Antény	Aktuální a budoucí požití
Indukční vazba	Krátký	Slabá	Hz do MHz	Drátové cívky	Nabíjení přenosných zařízení (Qi, WiTricity), implantáty, elektrická vozidla, MAGLEV vlaky, RFID, čipové karty.
Rezonanční indukční vazba	Střední		MHz	Drátové cívky v rezonančním obvodu	
Kapacitní vazba	Krátký	Slabá	Hz do MHz	Elektrody	Čipové karty (ojediněle)
Magnetodynamická	Krátký	Slabá	Hz	Otáčející se magnety	Nabíjení elektromobilů
Mikrovlny	Dlouhý	Silná	GHz	Parabolické a usměrňovací antény	Napájení dronů a satelitů
Světelné paprsky	Dlouhý	Velmi silná	Vysoká	Lasery, fotočlánky	Napájení dronů

1.1 Technologie krátkého dosahu

Tyto přenosy se zpravidla vyznačují tím, že se využívá buď magnetického pole, nebo elektrického pole. Elektromagnetické záření se nepoužívá.

1.1.1 Indukční vazba

Všeobecně nejrozšířenějším způsobem přenosu na krátké vzdálenosti je přenos za pomocí indukční vazby. V přijímači energie a vysílači energie se nachází cívka. Tím že jsou cívky ve vzájemné blízkosti, mají vzájemnou indukčnost a elektricky se chovají jako transformátor. Pokud jsou obě cívky zapojeny do rezonančního obvodu, tak se jedná o takzvanou rezonanční indukční vazbu, tímto způsobem se prodlužuje vzdálenost, na kterou lze energii přenášet při zachování stejné velikosti cívek[4]. Rezonanční indukční vazbu využívá právě standard Qi.

1.1.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazba je ojediněle používaný způsob přenosu energie. V přijímači i ve vysílači je umístěna jedna elektroda a vzájemně tvoří deskový kondenzátor, který dokáže přenášet střídavý proud. Dielektrikum je pro tento kondenzátor většinou vzduch

oddělující obě elektrody. U tohoto druhu přenosu je většinou nutné použít vysoké frekvence elektrického napětí, aby se snížila reaktance vazby.

1.1.3 Magnetodynamická vazba

Další způsob, kterým lze přenášet bezkontaktně energii na krátkou vzdálenost je magnetodynamická technologie[5]. U této technologie je v přijímači a vysílači permanentní magnet. Ve vysílači je magnet rozpohybován konvenčními způsoby, jako je například elektromotor nebo spalovací motor. Pokud je magnet přijímače v dostatečné blízkosti, tak bude také rozpohybován. Tuto pohybovou energii permanentního magnetu v přijímači lze převádět na elektrickou. Jedním způsobem, jak můžou být tyto magnety například uloženy, je takový, kdy se mohou otáčet podobně jako rotor synchronního motoru, a otáčky ve vysílači energie jsou přenášeny na otáčky v přijímači.

1.2 Technologie dlouhého dosahu

Vzdálenosti, na které se tyto technologie požívají, jsou mnohem větší, než jsou rozměry obou zařízení. Pro tento druh přenosů se používá především elektromagnetické záření různých vlnových délek.

1.2.1 Mikrovlnný přenos

Jeden způsob přenosu na velké vzdálenosti používá mikrovlny. Přenos energie je v tomto případě prováděn pomocí elektromagnetického záření o mikrovlnné frekvenci. Přijímač a vysílač musí mít anténu a přijímač má vysokofrekvenční usměrňovač. Je vysoce žádoucí, aby anténa vysílače měla velkou směrovost a tím se minimalizovaly ztráty a zabránilo rušení komunikačních zařízení. U tohoto druhu přenosu je však problém, že mikrovlnné záření o velkém výkonu je nebezpečné, protože může zvýšit teplotu živých organismů až na nebezpečnou úroveň. Navíc je maximální povolený výkon v těchto pásmech legislativně omezen[6], aby se zabránilo rušení komunikačních zařízení. Mikrovlnný přenos tedy není možné použít pro přenášení velkých výkonů. Dalším problémem této technologie je možné ovlivnění účinnosti přenosu počasím, kde vlhkost v atmosféře může absorbovat značnou část energie při přenosu.

Uvažovalo se také, že by se tato technologie dala použít pro přenos energie mezi vesmírnými družicemi na oběžné dráze a povrchem země, ale bylo vypočítáno, že při frekvenci 2,4 GHz by musela mít vysílací anténa mít průměr 1 km a přijímací anténa dokonce 10 km, aby bylo dosaženo dostatečné efektivity[7].

1.2.2 Světelný přenos

Dalším způsobem přenosu na dlouhé vzdálenosti je technologie využívající světla. Pro přenos se používají lasery o vlnových délkách blízkých viditelnému spektru. Ve vysílači je umístěn laser, který je směřován na fotovoltaický článek na přijímači. Hlavní výhodou této technologie jsou oproti mikrovlnné technologii malé a kompaktní rozměry, kterých lze dosáhnout. Nevýhodou je však celková účinnost přenosu. Tuto účinnost můžou ovlivňovat povětrnostní vlivy, které v nejhorším případě můžou způsobit 100% ztráty. Hlavní zdrojem ztrát je však samotná technologie přeměny elektrické energie na světelnou a naopak. Účinnost laserů se může dostat přibližně na 64 %[8] a účinnost fotovoltaických článků při ideální vlnové délce je až 50 %[9]. To znamená, že výsledná účinnost se jen stěží dostane přes 32 %. Další nevýhodou je nebezpečnost pro živočichy, kteří by se nacházeli mezi zdrojem a přijímačem, těm hrozí oslepnutí nebo jiná zranění.

2 Zařízení standardu Qi

Standard Qi spravuje Wireless Power Consortium, cože je otevřené sdružení velkého množství výrobců, které vzniklo v roce 2008. Jeho cílem je vytvořit celosvětově používaný standard bezkontaktního nabíjení. První specifikace standardu Qi byla zveřejněna už v roce 2008[10].

Nejobsáhlejší databáze zařízení kompatibilních se standardem Qi se nachází právě na stránkách konsorcia bezdrátové energie[11]. V této databázi existuje záznam o 280 vysílačích a 400 přijímačích od různých výrobců. Druhým zdrojem informací, o tom, které výrobky se prodávají a za jakou cenu, jsou různé internetové obchody. Nejvíce se pro tento účel osvědčil obchod Amazon.

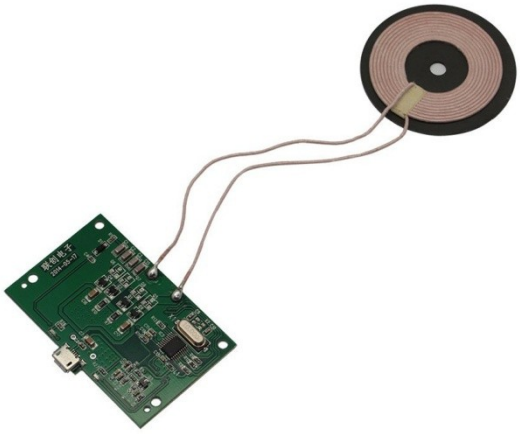
2.1 Výrobky vysílající energii

Namátkově vybrané Qi vysílače jsou v Tabulka 2. Je vidět, že jejich cena se pohybuje ve velkém rozmezí.

Tabulka 2 Přehled prodávaných vysílačů energie standardu Qi

Značka	Jméno produktu	Číslo produktu	Cena [Kč]
EASYCHEE	Foldable Wireless Charging Stand	T310	1238
TESLA1856	mini wireless charger	T-500	773
U-WAY	Qi TX Module WPC 1.1 (A11 , 5V Input)	UNITX-874Q	272
Freescale Semiconductor	Multi-Coil Consumer Wireless Charging Transmitter	WCT-5WTXAUTO	6730
Uniq	QI ELEVATOR STYLE	UQ1000UA	1510
AFD	Avatar Qi Compatible dual inductive charging pad 19V 1A OEM	AFD105-19VTX	394
Docooler	Mini Qi Wireless Charger Transmitter Pad with Silicone Mat		240
NOKIA	Wireless Charging Plate	DT-900	833
Anself	Qi Wireless Charger PCBA Circuit Board with Qi Standard Coil	PA1750	61

Hlavní vliv na cenu těchto zařízení má jejich konstrukční provedení. Například vysílač na Obrázek 1 má velmi strohé provedení a je dostupný za pouhých 61 Kč. Oproti tomu výrobek, který je na Obrázek 2 stojí v přepočtu 1510 Kč.



Obrázek 1 Qi Wireless Charger PCBA Circuit Board with Qi Standard Coil[12]

Obrázek 2 QI ELEVATOR STYLE[11]

2.2 Výrobky přijímající energii

Namátkově vybrané přijímače jsou v Tabulka 3. Je vidět, že ceny nedosahují tak velkých rozdílů, jako tomu bylo u vysílačů. Cena je v tomto případě ovlivněna funkcemi přijímače, značkou výrobce, typem cílového zařízení, nabídkou a poptávkou. Cena není překvapivě ovlivněna maximální proudovou zátěží výrobku. Například výrobek označený Qi-N4-RCVR[13] má poměrně vysokou cenu, ale podporuje nejen standard Qi, ale navíc i NFC. Má však poměrně nízký výstupní výkon 600 mA. Cenu mají vyšší i výrobky, které jsou zabudované v krytech pro mobilní zařízení.

Tabulka 3 Přehled prodávaných přijímačů energie standardu Qi

Značka	Jméno produktu	Číslo produktu	Cena [Kč]
TEKMAX	Qi Wireless Charging Energy Card for Samsung Note 3	SN3CC-627Q	442
BLUBOON	Universal Qi Wireless Charging Receiver	U01	315
Qi-infinity	Qi Wireless Charging Receiver Card for Samsung Note4 N9100	Qi-N4-RCVR	488
TYLT	Vu-Mate	SAGN3EC-T	450
Nokia	Wireless charging cover	CC-3066	590
SAMSUNG	Wireless Qi Insert For Samsung GALAXY S3	SDWC-139	335

Nejčastější konstrukční řešení přijímačů energie je vidět naObrázek 3. Jedná se o tenké pouzdro se dvěma vývody. Toto pouzdro se vkládá za zadní kryt mobilních telefonů a kontakty přijímače se spojí s kontakty mobilního zařízení, které je má pro tento účel připravené. Při rozboru tohoto přijímače bylo zjištěno, že se uvnitř nachází měděná cívka, která je vidět na Obrázek 4. Dále zařízení obsahovalo integrovaný obvod BQ51013 od firmy Texas Instrunets.

Obrázek 3 Wireless Qi Insert For Samsung GALAXY S3[14]

Obrázek 4 Cívka, kterou obsahuje většina přijímačů[15]

3 Možná obvodová řešení přijímače

Bylo rozhodnuto, že se práce zaměří čistě na zhotovení přijímače, protože bylo zjištěno, že vysílač je mnohem složitější zařízení, než přijímač. Vybíralo se ze dvou možností, jak přistupovat k řešení tohoto úkolu. Tyto dvě možná řešení jsou detailně analyzována v kapitolách 3.2 a 3.3.

3.1 Elektrický princip činnosti ve standardu Qi

Aby bylo možné navrhnout nějaké smysluplné zapojení, je nejprve nutné znát princip činnosti, který je ve standardu Qi popsán. Důležitou informací je kupříkladu to, jakým způsobem dochází k přenosu informací mezi oběma zařízeními. Digitální komunikace ve standardu Qi probíhá pouze od přijímače energie do vysílače energie. Uplatňuje se však něco, čemu se říká analogový ping[16], jehož zdrojem je TX zařízení, které využívá rezonance vstupního obvodu přijímače při detekční frekvenci f_D, která je 1 MHz. Tím, že vysílač napájí cívku střídavým napětím o frekvenci f_D a měří proud, detekuje přítomnost správně naladěného přijímače v dosahu. V případě, že takové zařízení v dosahu rozpozná, přejde do takzvané fáze digitálního pingu[16].

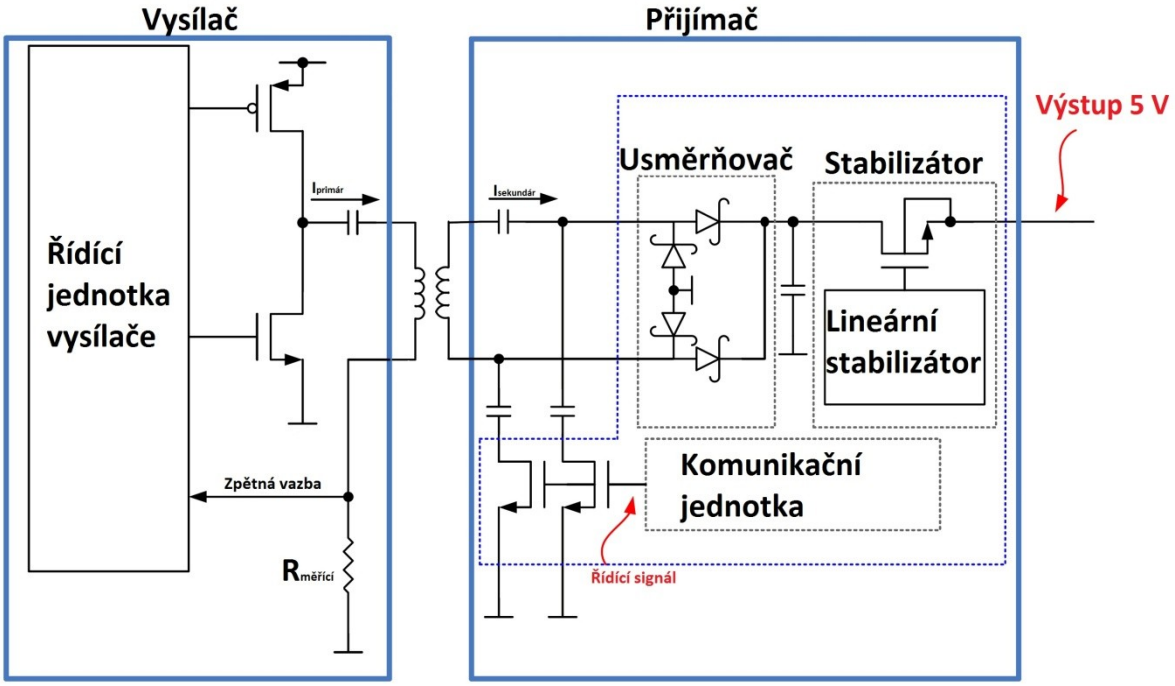
Ve fázi digitálního pingu zahájí TX zařízení odesílání energie na pracovní frekvenci, která je přibližně 100 kHz, a RX zařízení musí v určitém časovém intervalu odeslat paket, který tvoří odpověď. V opačném případě by TX zařízení přestalo odesílat energii. RX zařízení posílá data takovým způsobem, že uměle zvyšuje proudovou zátěž na vstupu, a tím se také zvyšuje proud v primární cívce, která je ve vysílači energie. TX poté tyto výkyvy proudu vyhodnocuje jako jednotlivé bity. Jedná se v podstatě o amplitudovou modulaci, kde nosným signálem je signál přenášející energii o frekvenci 100 kHz, zatímco modulovaný datový signál má frekvenci 2 kHz[16].

Přijímač energie musí obsahovat usměrňovač, aby střídavé přijaté napětí mohl převést na stejnosměrné, které musí vyhladit pomocí vyhlazovacího kondenzátoru. Napětí na vyhlazovacím kondenzátoru by se teoreticky mělo nacházet v rozmezí 5 až 28 V[17] podle parametrů cívky a zatíženosti výstupu.

Poslední věc, kterou přijímací zařízení potřebuje, je stabilizátor výstupního napětí, který by zajistil konstantní napětí při proměnlivé zátěži, a zároveň tento prvek může působit jako ochrana proti přetížení.

3.2 Varianta řešení s mikroprocesorem

První možností bylo vytvořit zcela nové zapojení s mikroprocesorem a usměrňovačem. Mikroprocesor by v tomto případě bylo potřeba naprogramovat tak, aby zařizoval komunikaci s druhou stranou podle komunikačního protokolu[18] Qi. Elektrický obvod by v tomto případě měl vycházet z blokového schématu na Obrázek 5.



Obrázek 5 Blokové schéma vysílače a přijímače energie ve standardu Qi[18]

Z Obrázek 5 právě vychází navržené schéma, které využívá procesor ATmega8. Je vidět v příloze C. Procesor ATmega8 byl zvolen, protože obsahuje dostatečný počet AD převodníků a časovačů. Navíc je tento procesor poměrně levný a jednoduchý na použití. MCU v tomto schématu má dvě funkce. Zajišťuje komunikaci s vysílačem energie a zároveň řídí výstupní napětí obvodu. Pro tento účel se nejlépe hodí typ ATmega8L-8PU[19], který dokáže pracovat už při napájecím napětí 2,7 V. Díky tomu má tento procesor mnohem větší předpoklady stihnout v počáteční fázi shromáždit dostatek energie, aby došlo ke spuštění program a včasnému odeslání odpovědi na digitální ping.

Ve schématu tvoří kondenzátory C1 a C2 dvojitý rezonanční obvod na vstupu obvodu. Detailněji je tato problematika vysvětlená v kapitole 4.5. Na vstupní svorky se připojí přijímací cívka obvodu. Diody D1, D2, D3 a D4 tvoří neřízený usměrňovač. Jsou zapojeny do podoby Graetzova můstku. Záměrně byly zvoleny diody typu BYW29, které mají nižší prahové napětí[20], než obdobné usměrňovací diody. Díky tomu může mít zapojení větší účinnost. Tranzistory T1 a T2 zajišťují komunikaci tím, že na povel MCU uzemňují přívodní vodiče od cívky skrz kondenzátory C5 a C6 a způsobují nízkou vstupní

impedanci. Díky tomu se zvýší proud, který protéká cívkou vysílače, a je ve vysílači energie, který naslouchá, vyhodnocen jako jeden datový pulz. Elektrolytický kondenzátor C3 zajišťuje vyhlazení napětí za usměrňovačem. Lineární stabilizátor 7805L zajišťuje v obvodu stabilizované napájení pro MCU. Tranzistor T4 slouží k pulzní regulaci výstupního napětí, tento tranzistor je řízen procesorem pomocí tranzistoru T3. Kondenzátor C4 slouží k vyhlazení výstupního napětí a pro správnou funkci regulace napětí. Rezistory R2 a R3 tvoří dělič, který přizpůsobuje hodnotu výstupního napětí, tak aby byla ve správném rozsahu pro AD převodník procesoru. Podobnou funkci mají také rezistory R4 a R5, které přizpůsobují napětí na vyhlazovacím kondenzátoru C3, toto napětí vyhodnocuje procesor. Díky tomu může procesor určit, kolik energie má v zásobě a jestli není potřeba požádat zdroj o větší přísun výkonu.

Nejlepším nalezeným informačním zdrojem, který popisuje komunikaci je dokument od firmy Freescale[21]. V tomto dokumentu je popsán fyzický princip přenosu informací z přijímače energie do vysílače energie. Tento dokument konkrétně obsahuje informace o tom, jak je signál namodulován, jak jsou zakódované jednotlivé logické úrovně. Dále dokument popisuje, jak jsou uspořádané jednotlivé byty, aby je bylo možné odeslat sériovým přenosem. V poslední řadě jsou v dokumentu stavové diagramy, které popisují to, jak vysílač energie vyhodnocuje přijatá data. Důležitějším zdrojem informací o komunikačním protokolu je dokument specifikací[16] standardu Qi. Je dostupný na stránkách konsorcia bezdrátové energie, kde je důkladněji popsán formát paketů, které jsou při komunikaci posílány.

Tabulka 4 Ceník součástek pro řešení s MCU

Součástka	Množství	Cena za jeden [Kč]
TDK WR-303050-15F5-G CHARGING COIL, 12.3UH	1	109
ATmega8L-8PU	1	55
Fotocuprextit FR4 dvouvrstvý cm^2	63	0,57
CE 820u/16VIT	1	3,6
CE 47u/63VT	1	1
78L05	1	3,7
BD437	1	6,1
Rezistor 0,4W 1%	5	1,8
2N3904	3	0,94
CK 22n/40V	2	0,53
CK 330n/50V	1	6,2
CK 3,3n/50V	1	1,8
	Celková cena	273,19 Kč

Nevýhodou tohoto řešení je potřebná plocha DPS, která je přibližně dvojnásobná, než u druhého řešení pomocí IO bq51013. Další nevýhodou je nutnost naprogramovat MCU,

přičemž není jisté, jestli by se podařila komunikace zprovoznit. U tohoto zapojení je navíc riziko, že obvod po proběhnutí analogového pingu vysílačem energie a zahájení přenosu výkonu neshromáždí dostatek energie, aby MCU dokázal poslat zpět paket odpovědi na digitální ping v požadovaném intervalu[16]. Za nevýhodu lze považovat i nutnost zapsat program do paměti MCU pomocí programátoru.

Nespornou výhodou tohoto způsobu je však možnost regulace úrovně výstupního napětí pomocí programu. Výstupní napětí tedy nemusí být fixních 5 V, jak tomu je u řešení s IO bq51013. Další výhodou je to, že všechny součástky můžou být THT a v běžných velikostech. Díky tomu není nutná velká přesnost technologie použité pro výrobu DPS, zároveň nejsou potřeba speciální technologie pro připájení součástek.

3.3 Varianta řešení s integrovaným obvodem bq51013

Druhou možností bylo použít integrovaný obvod BQ51013, který je schopen zajistit komunikaci, usměrnění a stabilizaci napětí na výstupu. U tohoto řešení je pouze zapotřebí k tomuto IO připojit několik pasivních dvoupólových součástek podle doporučení datového listu tohoto IO. Příklad takovéhoto zapojení je vidět na Obrázek 8.

Tabulka 5 Ceník součástek pro řešení s bq51013

Součástka	Množství	Cena za jeden [Kč]
TDK WR-303050-15F5-G CHARGING COIL, 12.3UH	1	109
BQ51013BRHLT	1	124,6
PragoBoard POLL servis cm^2	31,5	6,05
CE 22u/100V	1	0,6
Rezistor 0,4W 1%	3	1,8
CK 100n/63V	1	1,2
CK 22n/40V	4	0,53
CK 1n/50V	1	2,5
CK 680p/50V	1	2,6
CK 470n/50V	2	6,8
CK 10n/50V	1	2,5
CE-6.8/16P	1	1,6
	Celková cena	456,295

Výhodou tohoto způsobu řešení je menší potřebná plocha DPS díky malým rozměrům použitého IO. Nicméně z toho však vyplývá zásadní nevýhoda. Je zapotřebí větší přesnosti výroby DPS. Integrovaný obvod bq51013 má totiž rozteč vývodů pouhých 0,5 mm[17]. To výrazně zvyšuje výrobní náklady, a především díky tomu je toto řešení dražší.

Nakonec byla zvolena tato varianta, protože se jevila jako jednodušší a je u ní větší pravděpodobnost, že vznikne funkční zařízení.

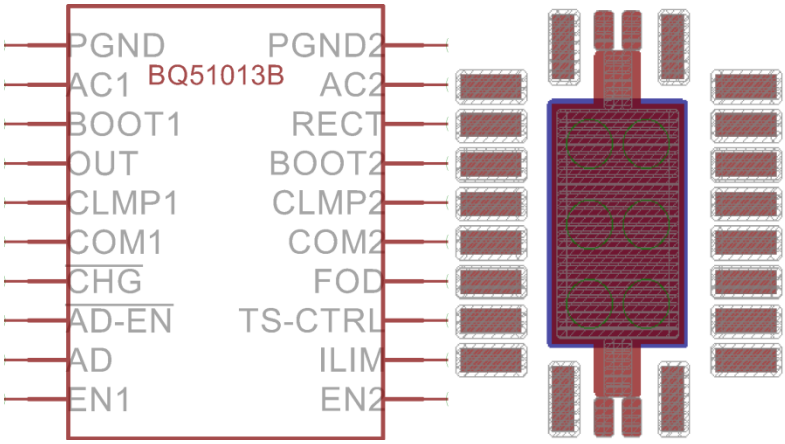
4 Návrh a výroba zařízení

4.1 Tvorba knihovny pro součástku bq51013

Pro návrh obvodu a desky plošných spojů byl zvolen software EAGLE[22], což je pravděpodobně nejlepší bezplatný software pro počítačem podporované projektování plošných spojů. Knihovna tohoto CAD softwaru však neobsahuje komponent bq51013 ani bq51013b. Z tohoto důvodu bylo nutné nejprve vytvořit knihovnu pro tyto komponenty.

Obrázek 6 Pouzdro VQFN obvodu bq51013b[23]

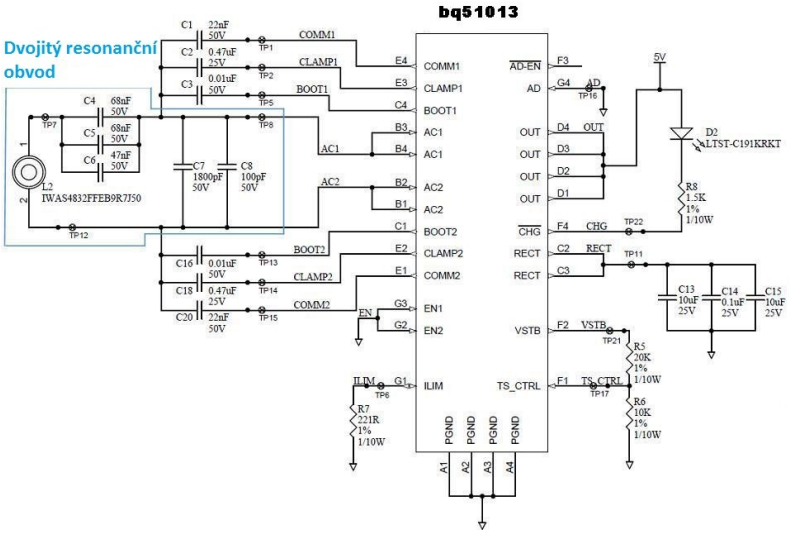
Zakoupená součástka byla v pouzdře VQFN[24], které je vidět na Obrázek 6. Tento typ pouzdra má SMD vývody ve spodní části a ze stran. Pouzdro má navíc velkou kovovou plochu zespoda, která má za úkol zajistit odvod tepla. Tato plocha není vnitřně elektricky spojena s žádným vývodem. Pro správnou funkci obvodu při vysokých zátěžích je nutné umožnit, aby teplo mohlo proudit na druhou stranu desky, kde může být dále distribuováno do větších ploch. K tomuto účelu se nejvíce hodí pokovené otvory v desce. Na Obrázek 7 je hotový schematický symbol a půdorys pouzdra. Na půdorysu je vidět termální ploška pro odvádění tepla z pouzdra. Je na ní šest pokovených průchodů, které tuto plochu tepelně spojují s další plochou na druhé straně desky. Na druhé straně desky může být potom tato plocha dále rozšiřována pomocí rozlévané mědi, nebo na ní může být přimontován chladič.



Obrázek 7 Navržený symbol a pouzdro pro IO bq51013b

4.2 Elektrické schéma

Podařilo se najít několik ukázkových zapojení integrovaného obvodu bq51013. Nejpřehlednější nalezené schéma je vidět na Obrázek 8 a v příloze B.



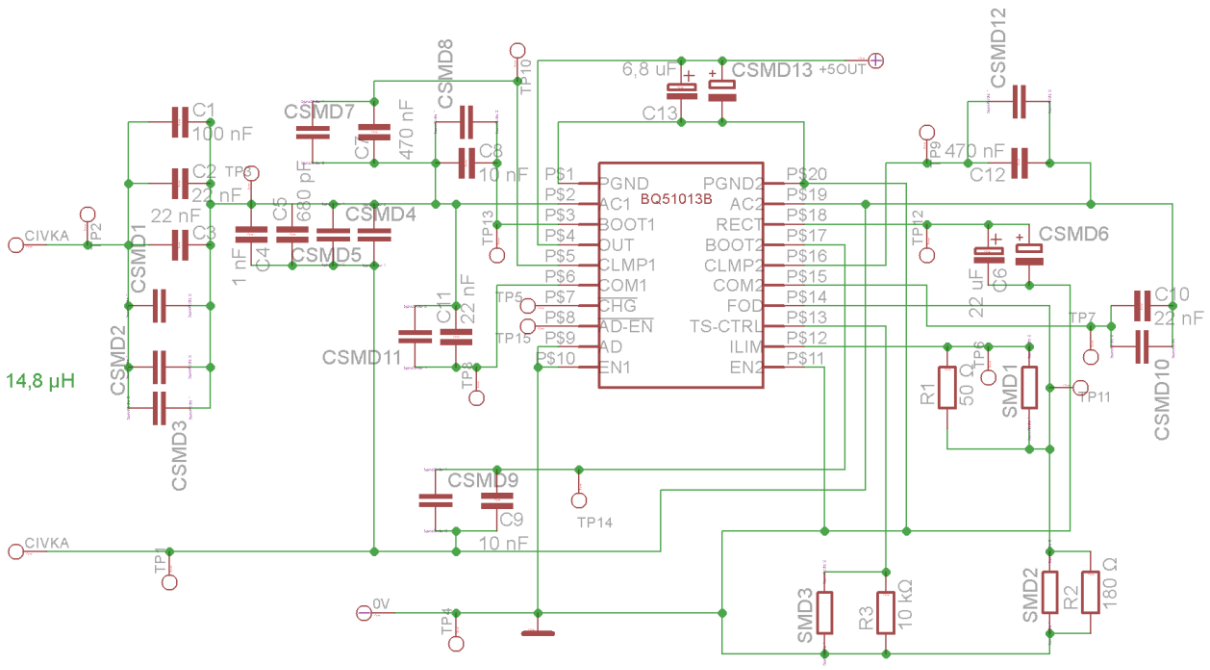
Obrázek 8 Příklad elektrického zapojení IO bq51013[25]

Jelikož je verze IO bq51013 zastaralá, byla pro zhotovení zařízení použita verze bq51013b, která má určité odlišnosti. Zejména se liší ve funkci některých vývodů. Z tohoto důvodu se ze schématu na Obrázek 8 vycházelo jen částečně a pro návrh zapojení byly použity zejména informace z datového listu pro IO bq51013b. V Tabulka 6 jsou popsány funkce jednotlivých vývodů integrovaného obvodu bq51013b. Zároveň je v tabulce uvedeno, jak jsou vývody použity v navrženém schématu.

Tabulka 6 Přehled jednotlivých vývodů bq51013b[17]

Název pinu	Popis v datovém listu	Zapojení ve schématu
AC1/AC2	Vstupy střídavého napětí z cívky.	Jsou zapojeny k uzlům na výstupu vstupního rezonančního obvodu.
BOOT1/BOOT2	Mají být zapojeny přes keramický kondenzátor 10 nF na pin AC1/AC2.	Je zapojen k pinu AC1/AC2 přes kondenzátor 10 nF.
RECT	Pin pro připojení filtračního keramického kondenzátoru vnitřního usměrňovače.	Je použit elektrolytický kondenzátor 22 µF pro 30 V
OUT	Výstupní stabilizované napětí do zátěže.	Zapojeno do proměnlivé odporové zátěže.
COM1/COM2	Komunikační pin, který má být zapojen přes kondenzátor k AC1/AC2.	Je zapojen přes kondenzátor 22 nF k pinu AC1/AC2.
CLMP1/CLMP2	Ochranné piny proti přepětí. Mají být připojeny k pinu AC1/AC2 přes kondenzátor 470 nF	Je připojen k pinu AC1/AC2 přes kondenzátor 470 nF
PGND	Země.	Je použit jako záporný potenciál výstupu.
ILIM	Pin pro nastavení proudového limitu výstupu pomocí rezistoru.	Je připojen na pin FOD rezistorem 50 Ω.
AD	Přivedením napětí na tento pin se zařízení vypne.	Je připojen přímo na PGND.
!AD-EN	Výstupní pin, který indikuje vypnutí zařízení vlivem pinu AD.	Není zapojen.
TS-CTRL	Vstupní pin pro teplotní kompenzaci. Může být připojen do země přes odpor 10 kΩ.	Je připojen k PGND přes odpor 10 kΩ.
EN1/EN2	Povolovací vstupy	Trvale připojeny k PGND.
FOD	Vstup pro měření proudu. Má být připojen do země pomocí odporu 188 Ω.	Je připojen do země odporem 180 Ω.
!CHG	Výstup tranzistoru s otevřeným drainem, který se sepne, pokud je aktivní výstup OUT.	Není zapojen.

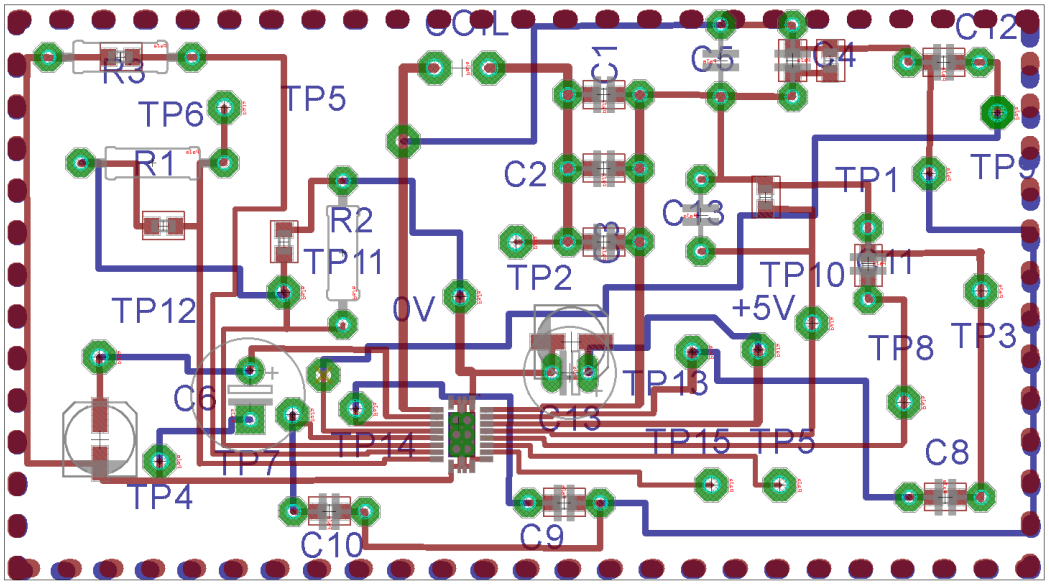
Výsledné navržené schéma zapojení je vidět na Obrázek 9 a příloze D. Ve schématu je vidět, že jsou všechny pasivní součástky zdvojeny, tak, aby bylo možné obvod osadit THT i SMD komponenty. Každý napěťový uzel v obvodu má svůj testovací bod, aby bylo možné jednoduše měřit napětí v jednotlivých bodech připojením sondy osciloskopu nebo multimetru. Díky těmto testovacím bodům je možné celé zapojení dolaďovat. Zapojení bylo navrženo tak, aby bylo vždy připraveno poskytovat napětí na výstupu, pokud se naváže spojení s vysílačem energie. Z tohoto důvodu jsou všechny povolovací vstupy IO připojeny na zem, aby bylo zařízení vždy v aktivním režimu. Pokud tedy bude někdo vytvářet přijímač podle tohoto zapojení, nebude se muset zabývat, jak zapojit vstupy IO, tak aby ho donutil pracovat. Odpor, který je připojen mezi pinem ILIM a FOD byl zvolen 50 Ω, tak aby bylo zaručeno, že omezování výstupního proudu nebude zkreslovat měření.



Obrázek 9 Navržené schéma zhotoveného zařízení

4.3 Návrh desky plošných spojů

Aby bylo dosaženo přesnější výroby, uvažovalo se o tom, že se nechá deska vyrobit firmou PragoBoard s.r.o.[26], která poskytuje službu POOL servis[27]. Tato služba umožňuje vyrobit na objednávku zaslaný návrh desky plošných spojů. Tato firma má navíc na svých webových stránkách konfigurační soubor pro EAGLE CAM procesor. Díky tomu lze velice snadno vygenerovat data pro jejich výrobní stroje. Jelikož POOL servis umožňuje oboustranné i vícevrstvé plošné spoje, tak bylo rozhodnuto, že deska bude oboustranná. Oboustranné řešení má navíc výhodu, že se velmi sníží počet drátových propojek uzlů obvodu vrchní stranou desky a tím se sníží počet pájecích bodů a riziko chyby při výrobě. Při návrhu bylo dbáno na to, aby byly cesty určené pro vyšší proud širší. Počítalo se s proudovým zatížením 1 A. Zesílené jsou především cesty vedoucí od přijímací cívky do IO a cesty, které vedou výstupní napětí 5 V usměrněné uvnitř IO. Nejaktuálnější vrze návrhu DPS je vidět na Obrázek 10.



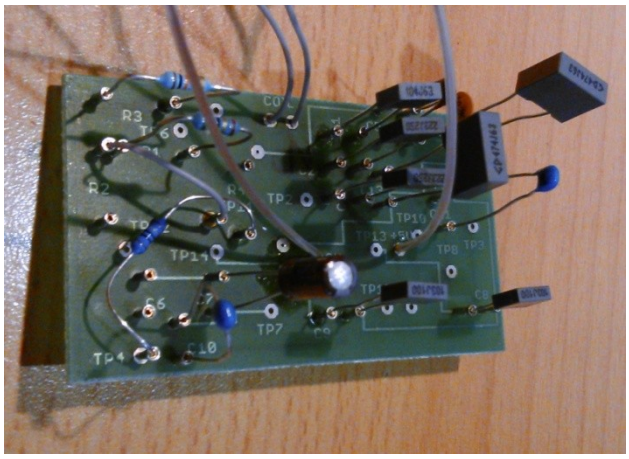
Obrázek 10 Navržená DPS testovacího přípravku

Deska plošných spojů byla nakonec vyrobena v dílně PCB-lab na TUL. Přesnost, kterou BCB-lab byla schopná dosáhnout se nakonec ukázala jako dostatečná pro tento účel.

4.4 Osazování DPS

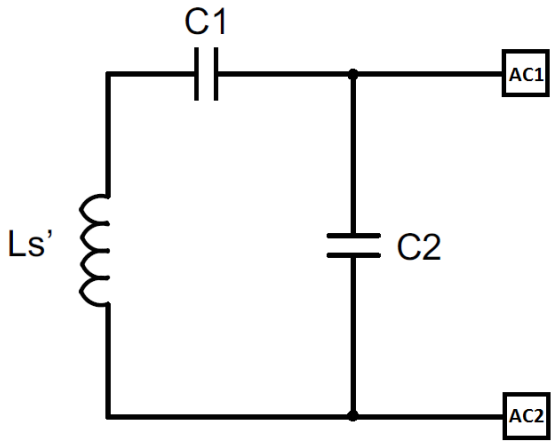
Pouzdro integrovaného obvodu QFN se pájí pouze přetavením[28]. Přetavení lze dosáhnout pomocí přetavovací pece nebo horkovzdušné pájky. V tomto případě byla použita horkovzdušná pájecí stanice pro osazení IO na DPS.

Pájecí plošky pro THT součástky byly osazeny dutinkami, do kterých se tyto drátové součástky dají vkládat a vytahovat. Díky tomu je možné měnit hodnoty součástek bez nutnosti původní součástku odpájet. Vyrobená a osazená deska je vyfocená naObrázek 11.



Obrázek 11 Vyrobený přijímač bez cívky

4.5 Výpočet hodnot kondenzátorů v rezonančním obvodu



Obrázek 12 Zjednodušené schéma dvojitého rezonančního obvodu[17]

Obvod obsahuje dvojitý rezonanční obvod jak je vidět na Obrázek 12. Pro správnou funkci přijímače je potřeba určit hodnoty kondenzátorů C_1 a C_2 v závislosti na indukčnosti připojené cívky. V datovém listu[17] obvodu bq51013 jsou vedeny přímo vztahy (1) a (2), podle kterých lze vypočítat potřebnou kapacitu pro oba kondenzátory. Oba dva vztahy vycházejí z Thomsonova vztahu[29]. První vztah (1) platí pro případ, kdy je kondenzátor C_2 zkratovaný uvnitř IO na vstupech AC1 a AC2, z toho důvodu je ve výpočtu zanedbán. Druhý vztah (2) platí naopak, pokud bude mezi oběma svorkami IO nekonečný odpor, v tomto případě je tedy potřeba zohlednit i hodnotu kondenzátoru C_2.

$$C_1 = [(f_S \cdot 2\pi)^2 \cdot L'_S]^{-1} \tag{1}$$

$$C_2 = \left[(f_D \cdot 2\pi)^2 \cdot L_S - \frac{1}{C_1}\right]^{-1} \tag{2}$$

Podle datového listu[17] je hodnota frekvence f_S 100 kHz a frekvence f_D je 1 MHz. Frekvence f_S je pracovní frekvence na které bude probíhat přenos energie. Frekvence f_D je frekvence, která je použita vysílačem pro detekci přítomnosti zařízení v dosahu. Hodnota L_S je indukčnost připojené přijímací cívky. Proměnná L'_S je hodnota té samé cívky ale ležící na vysílači energie. Při měření indukčnosti této cívky, může být zjištěná různá hodnota, pokud je cívka při měření volně na vzduchu, nebo pokud je součástí nějakého zařízení, nebo položená na vysílači, kde můžou kovové součásti měnit reálnou indukčnost.

Pro testování funkčnosti testovacího přípravku byla zakoupena speciální cívka přímo určená pro přijímače Qi standardu. Její tvar je vidět na Obrázek 4. Údajně měla být její indukčnost 7,7 µH. Měřením její indukčnosti při frekvenci 100 kHz byla zjištěna hodnota 7,5 µH. Spolu s touto přijímací cívkou byla zároveň zakoupena i cívka, určená primárně

pro vysílače standardu Qi, s údajnou indukčností 15 µH. Měřením byla zjištěna indukčnost 14,8 µH.

Tabulka 7 Použité cívky a hodnoty kondenzátorů pro jejich rezonanci

L_S [µH]	L'_S [µH]	Závitů	Q @ 100 kHz	Q @ 1 MHz	C_1 [µF]	C_2 [nF]
7,5	8,3	15	16	~160	0,3052	3,415
14,8	17,6	20	100	~1000	0,1439	1,732

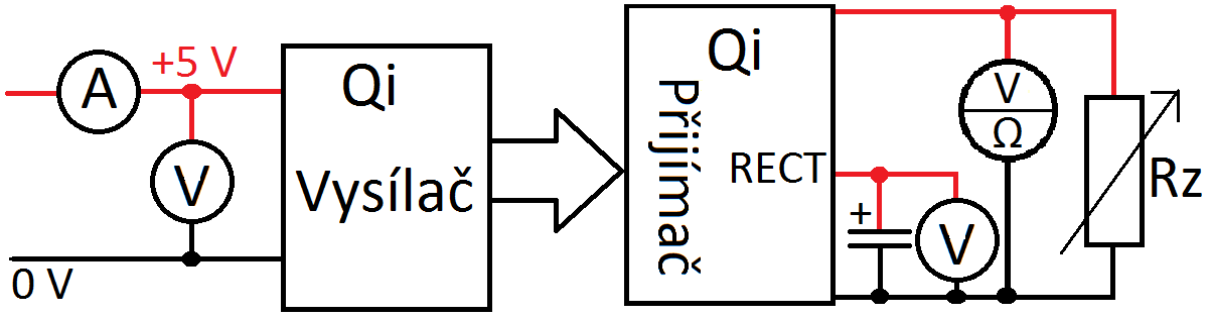
V Tabulka 7 jsou dopočítané hodnoty kondenzátorů C1 a C2 pro obě cívky. Nicméně hodnotu kondenzátoru C_2 je potřeba vždy dopočítat podle skutečně požité hodnoty C_1[17].

Podle datového listu[17] je nezbytné, aby jakost cívky byla při kmitočtu f_D = 1 MHz větší než 77. Přístroj, který byl použit pro měření jakosti, však neumí pracovat při vyšší frekvenci, než 100 kHz. Z tohoto důvodu se musela jakost jednoduše přepočítat, jak je vidět v Tabulka 7. Obě cívky tedy mají dostatečně velkou jakost.

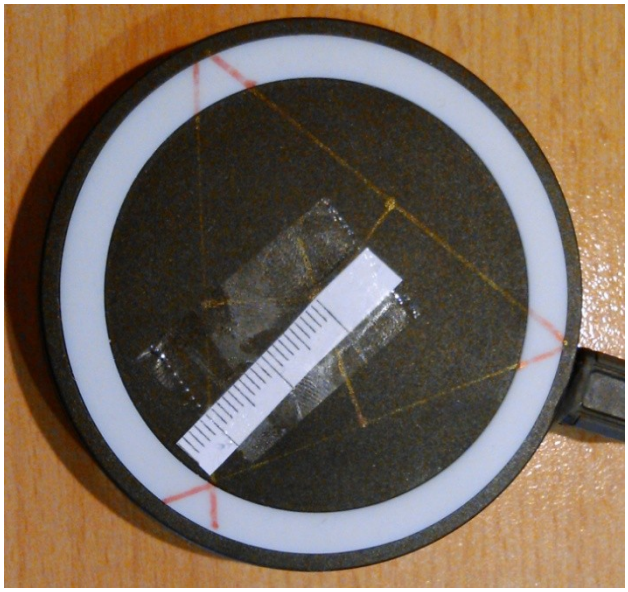
V obvodu na Obrázek 8, ze kterého se vycházelo při návrhu obvodu, je hodnota kondenzátoru C_1 zastoupená paralelní kombinací kondenzátorů C4, C5 a C6. Kondenzátor C_2 je zasolen paralelní kombinací C7 a C8.

5 Měření závislostí

Měření bylo zaměřeno především na určení účinnosti celkového přenosu při různých okolnostech. Zároveň se měřila i volt-ampérová charakteristika. Na Obrázek 13 je blokové schéma, na kterém je znázorněno, jakým způsobem probíhalo měření přenosu energie. Na vstupu použitého vysílače, který je na Obrázek 14, se měřil vstupní proud a napětí. Napájecí zdroj, kterým byl vysílač napájen, měl proudové omezení 1 A. Na straně přijímače se měřilo napětí na vyhlazovacím kondenzátoru za usměrňovačem na vývodu IO RECT. Především se však na straně přijímače měřilo výstupní napětí a odpor připojené zátěže.



Obrázek 13 Blokové schéma zapojení pro měření přenosu energie

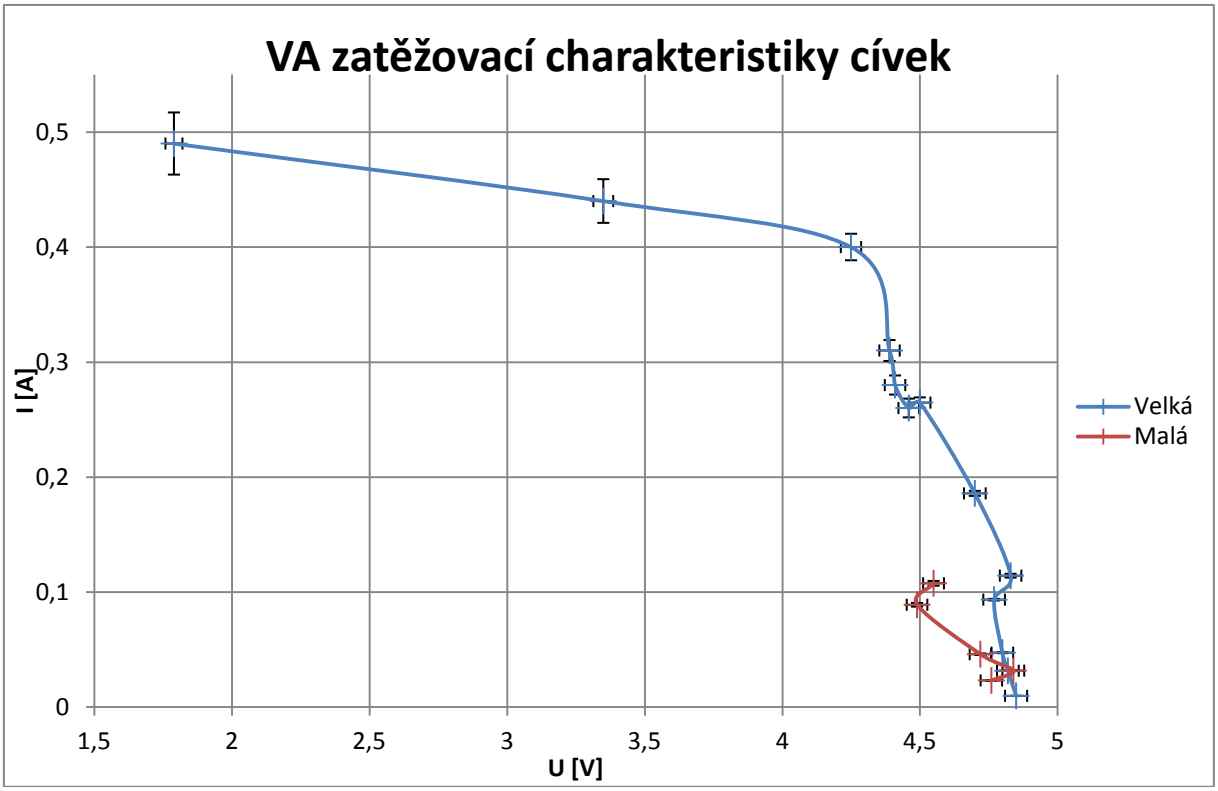


Obrázek 14 Vysílač použitý při testování přenosu energie

5.1 Měření s různými cívkami

Testované cívky jsou zapsány v tabulce 7. Velká cívka má indukčnost 14,8 µH a malá cívka má indukčnost 7,5 µH. Zatěžovací charakteristika byla měřena při nejmenší možné spolehlivé vzdálenosti cívky přijímače a vysílače a nulovém vzájemném vyosení.

Výsledné naměřené charakteristiky jsou vidět na Obrázek 15 a v příloze E. I přesto, že je velká cívka primárně určena pro Qi vysílače, bylo při měření zjištěno, že zařízení s připojenou velkou přijímací cívkou disponuje mnohem lepší zatěžovací charakteristikou, než s malou cívkou. Při měření zatěžovací charakteristiky s malou cívkou bylo změřeno, že při překročení zatěžovacího proudu 110 mA už spojení nebylo stabilní. U velké cívky bylo spojení stabilní až do odběru 490 mA.



Obrázek 15 Volt-ampérová charakteristika testovaných cívek

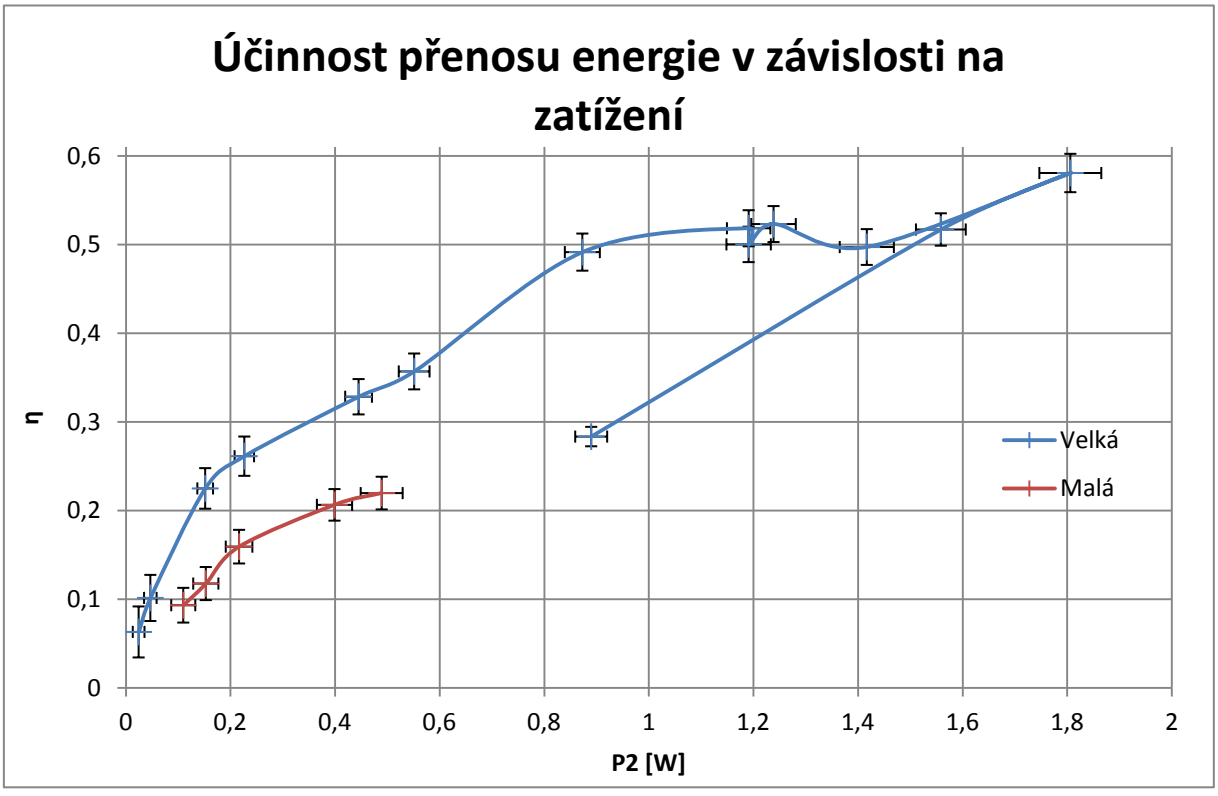
Zajímavost, která byla při měření zjištěna, je to, že pokud velká cívka ležela v nulové vzdálenosti na vysílači, bylo spojení nestabilní a pravidelně docházelo k výpadkům. Při měření zatěžovací charakteristiky byla tedy velká cívka ve vzdálenosti 1 mm nad povrchem vysílačem, kde byl přenos spolehlivý. U malé cívky se tento problém neprojevil a pracovala již při nulové vzdálenosti. Tento problém by mohl být způsoben špatným naladěním kondenzátorů přijímače pro velkou cívku.

Další zajímavostí je to, že aby bylo spojení za použití velké cívky bez výpadků, je nutné na výstup připojit alespoň minimální zátěž. Odpor R_Z tedy nesměl mít nekonečnou hodnotu, aby bylo spojení spolehlivé. Tento problém se u malé cívky neprojevoval a spojení bylo vždy spolehlivé i při odpojené zátěži.

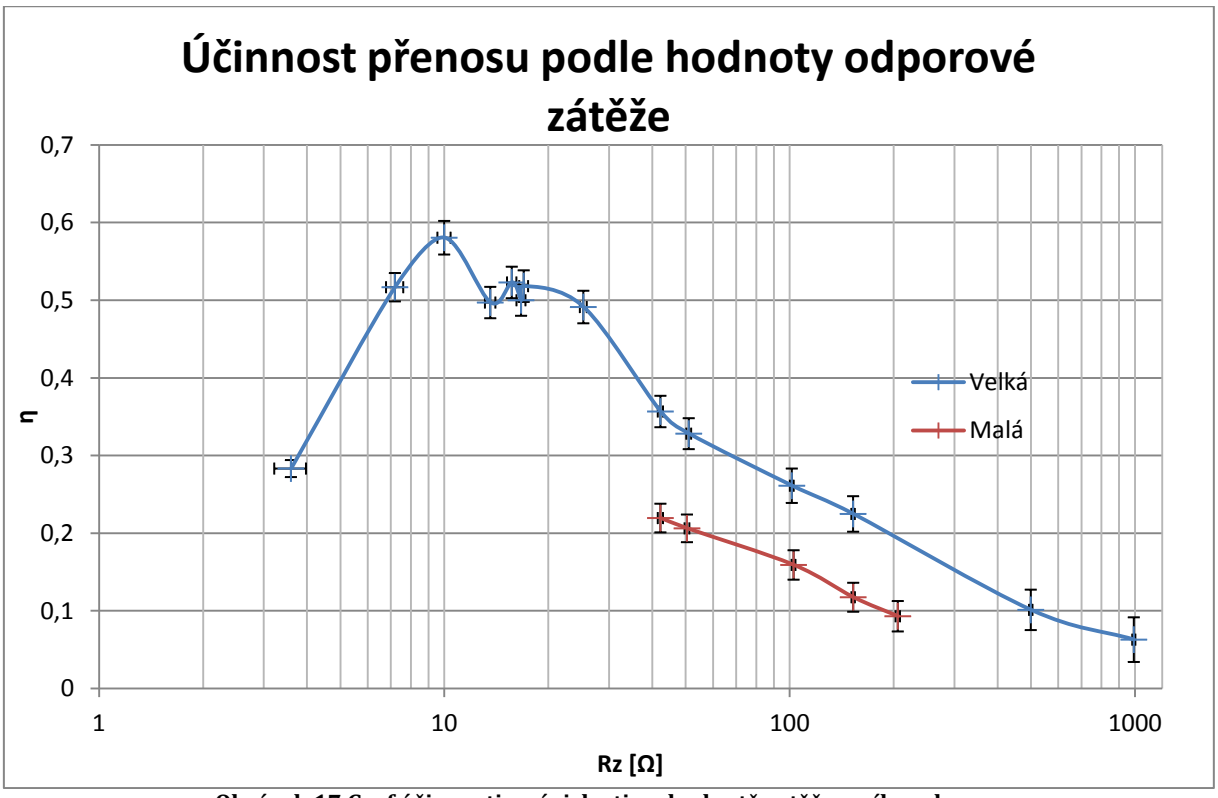
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \tag{3}$$

$$\eta = \frac{\frac{{U_2}^2}{R_Z}}{U_1 \cdot I_1} \tag{4}$$

Důležitým aspektem přenosu energie v tomto případě je účinnost. Účinnost se počítala jako poměr mezi odebíraným výkonem z přijímače a výkonem dodávaným do vysílače. V tomto případě byl pro výpočet účinnosti použit vztah (4). Naměřené charakteristiky účinnosti přenosu pro obě cívky jsou vidět na Obrázek 16 a v příloze F. Spojnice v grafu spojují naměřené body v pořadí, od největší hodnoty R_Z k nejmenší hodnotě R_Z. U obou cívek je patrné, že má účinnost vzrůstající tendenci podle odebíraného výkonu. Nicméně je u velké cívky patrné, že pokud se hodnota R_Z dostane pod určitou úroveň, začne se snižovat odebíraný výkon a účinnost. Tento jev je lépe vidět na Obrázek 17, kde znázorněna závislost účinnosti přímo na velikosti odporové zátěže. To, že se účinnost začne snižovat při překročení určité zátěže, je způsobeno pravděpodobně proudovým omezením zdroje, který byl použit pro napájení vysílače. Z grafů je také patrné, že nejvyšší dosažená účinnost při použití velké cívky byla (58,1 ± 2,2) %, zatímco při použití malé cívky byla účinnost jen (22,0 ± 1,9) %.



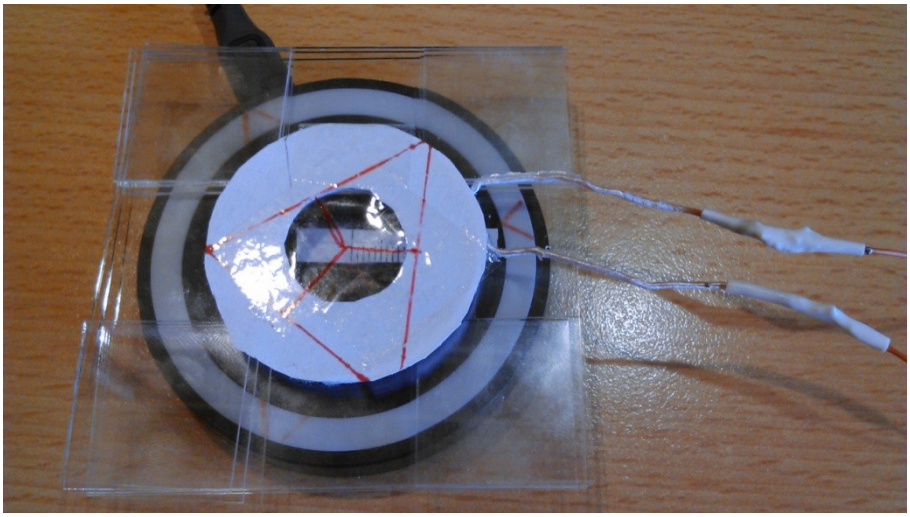
Obrázek 16 Graf účinnosti přenosu energie



Obrázek 17 Graf účinnosti v závislosti na hodnotě zatěžovacího odporu

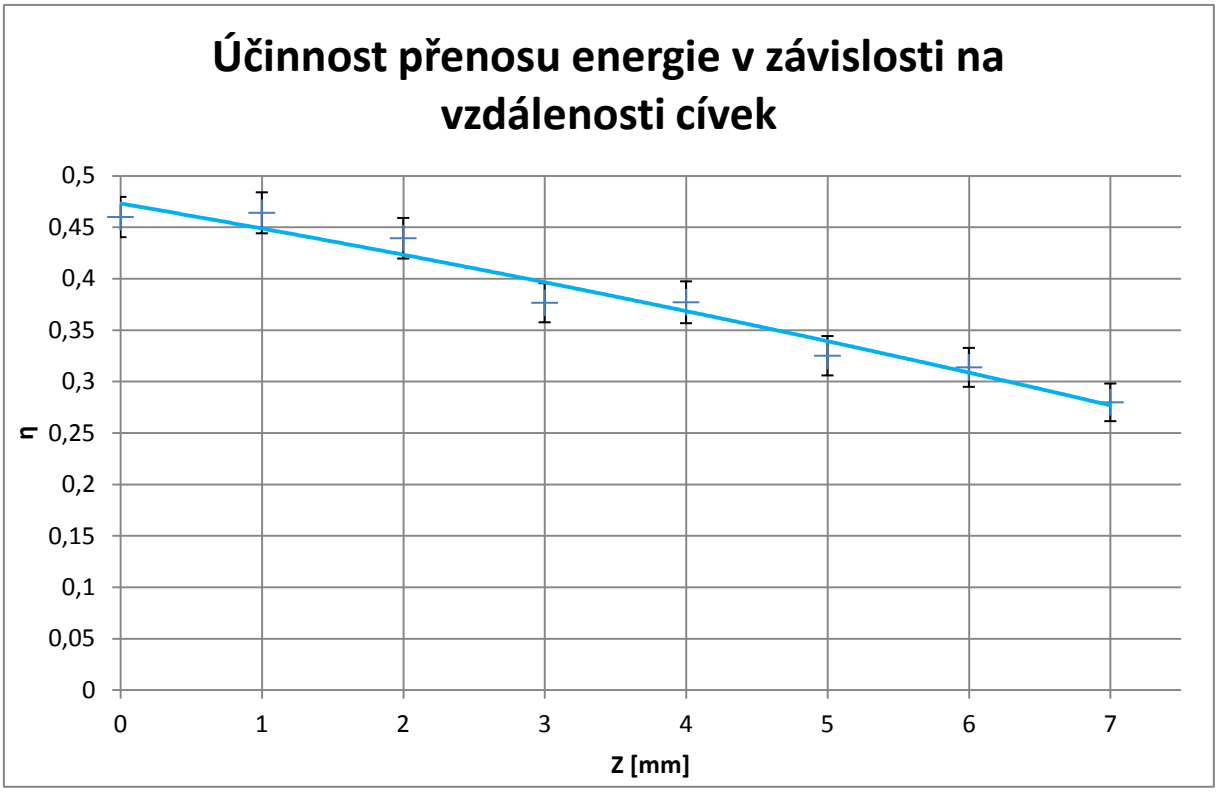
5.2 Měření při různé vzdálenosti cívek přijímače a vysílače

Při měření závislosti účinnosti přenosu energie na vzdálenosti cívky přijímače od vysílače, byla použita pouze velká cívka, protože malá cívka se kvůli své účinností jevila jako nepoužitelná. Pro zajištění přesné vzdálenosti přijímací byly použity skleněné plátky o tloušťce 1 mm. Tyto plátky se vrstvily na sebe na vysílači a cívka přijímače ležela na povrchu. Díky průhlednosti skla bylo možné cívku umístit přímo nad střed vysílače. Sklo má navíc relativní permeabilitu přibližně 1[30]. Díky tomu nemá jeho přítomnost vliv na magnetické pole.



Obrázek 18 Fotografie zachycující měření při různé vertikální vzdálenosti cívky

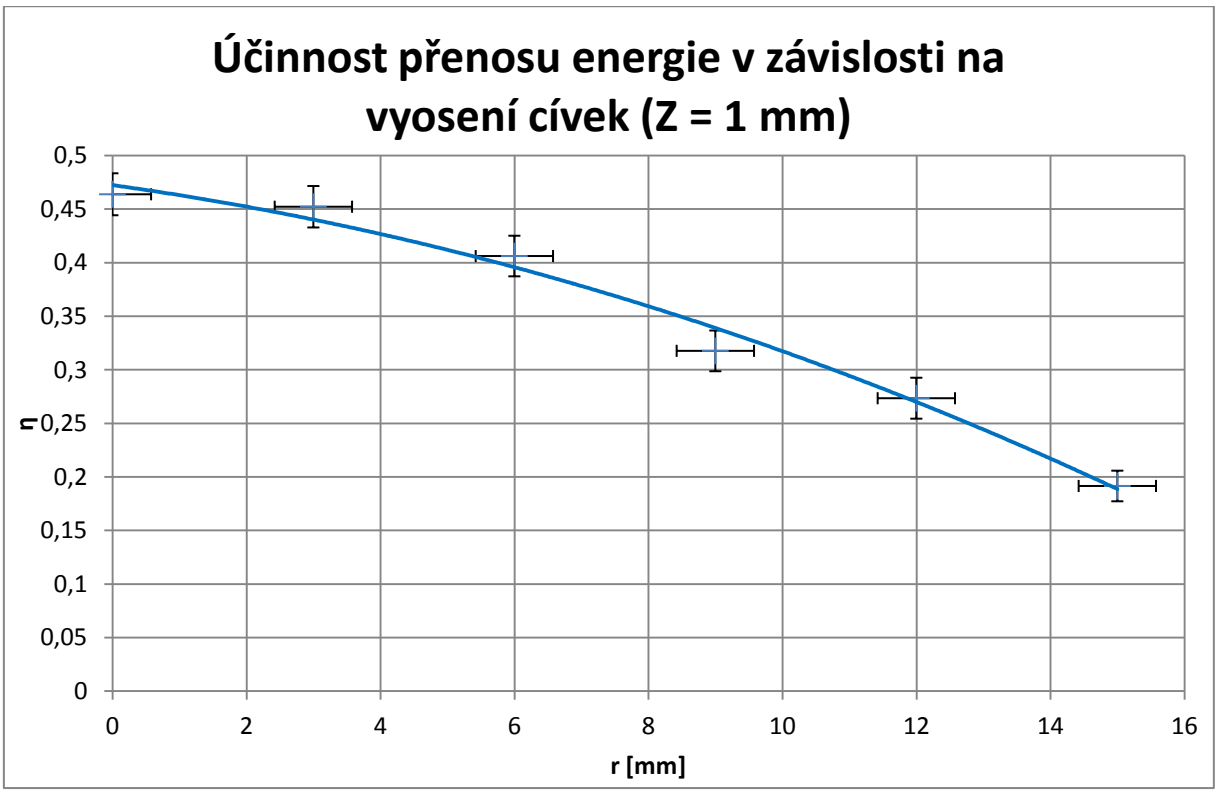
Na měřená data jsou vidět na Obrázek 19 a detailněji v příloze H. Z grafu je patrné, že zvětšující mezera mezi cívkami způsobuje snižování účinnosti přenosu energie a vynesená funkce v grafu se jeví poměrně lineární. Kvadratická aproximace však v tomto případě zajistila vyšší spolehlivost křivky. Při měření bylo zjištěno, že při vzdálenosti 8 mm už nebylo spojení spolehlivé a docházelo k nepřetržitému přerušování spojení a navazování nového.



Obrázek 19 Graf závislosti účinnosti přenosu energie při různých vzdálenostech o vysílače

5.3 Měření při různém vyosení cívek přijímače a vysílače

Tato část měření se taktéž zaměřovala jen na velkou cívku. Při měření byla cívka přijímače v konstantní vzdálenosti 1 mm od povrchu vysílače. V této vzdálenosti je z předešlých měření zjištěno, že je spojení spolehlivé. Pro odměřování vzdálenosti od středu byla použita stupnice s rozlišením 1 mm. Naměřená data jsou vynesena v grafu na Obrázek 20 a v příloze I. Z naměřených dat je patrné, že se účinnost snižuje kvadraticky, podle velikosti vyosení. Při vyosení 15 mm už spojení nebylo stabilní a přenos byl přerušovaný. Strmost snižování účinnosti nebyla tak vysoká, jako tomu bylo při vertikálním posunu. Za povšimnutí stojí to, že při vertikálním i horizontálním posunu měla poslední spolehlivá poloha změřenou účinnost 0,27.

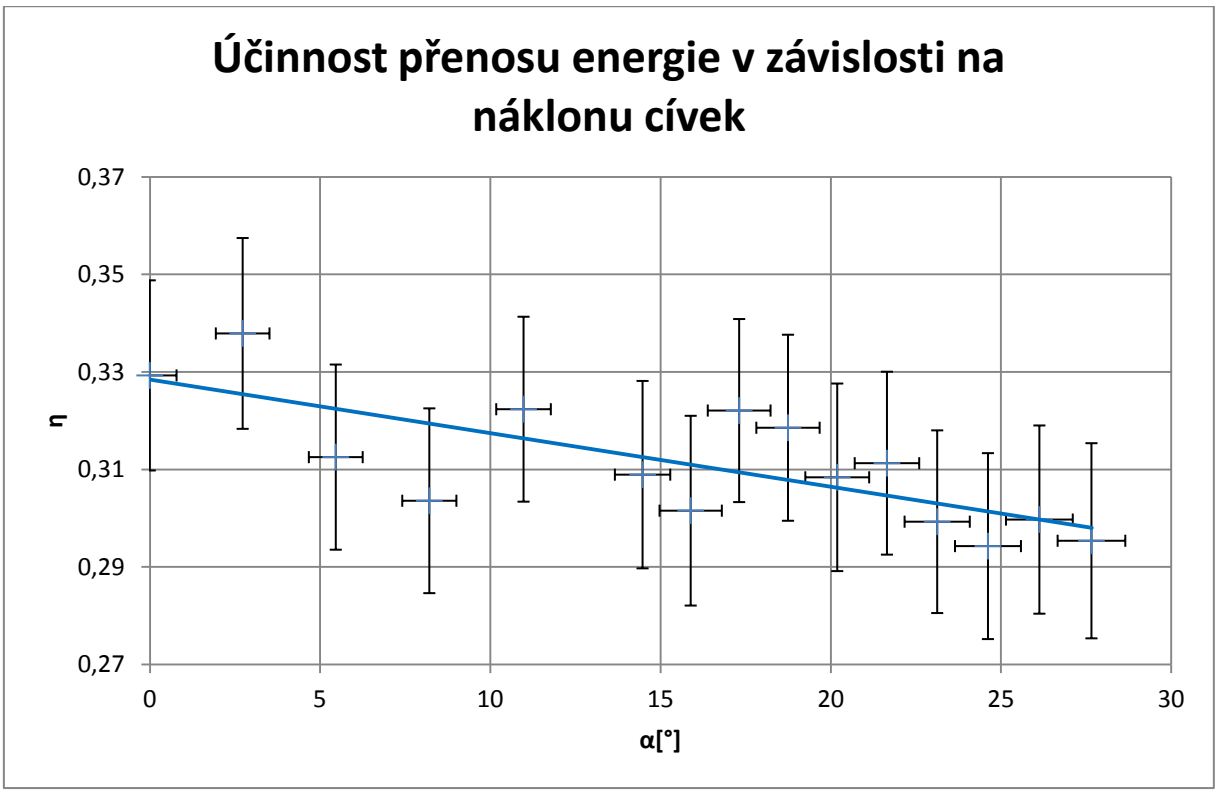


Obrázek 20 Graf zobrazující účinnost přenosu energie při různém posunutí cívek

5.4 Měření při různém úhlu natočení cívky vysílače a přijímače

Při tomto měření byla cívka přijímače umístěna tak, aby byl její střed 5 mm vertikálně nad středem vysílače. Tato vzdálenost byla zvolena, aby byl pod cívkou prostor pro její otáčení a dodržení konstantní vzdálenosti středu od vysílače. Zároveň je v této výšce dostatečná rezerva do vzdálenosti 8 mm, kde bylo zjištěno, že už přenos není spolehlivý. Postupně se zvyšoval úhel natočení, tím že se měnil počet skleněných plátků, které cívku podpíraly na každé straně. Naměřená charakteristika je na Obrázek 21 a v příloze J je tato charakteristika zobrazena detailněji. Z naměřené křivky je patrné, že účinnost má mírně klesající tendenci v závislosti na náklonu cívky. Za povšimnutí stojí to, že se účinnost zmenšuje přímo úměrně tomu, jak se zmenšuje kolmá plocha přijímací cívky ke zdroji magnetického pole. Výpočet pro určení kolmé plochy popisuje vztah (5).

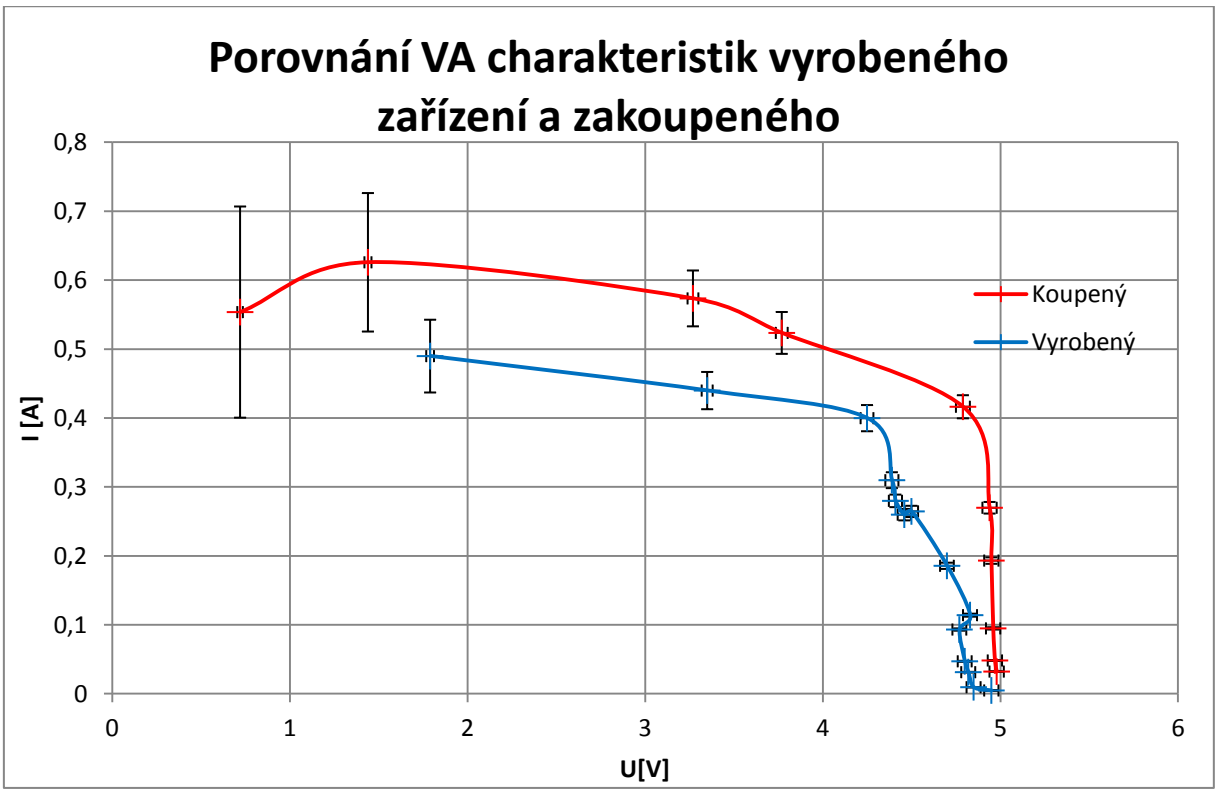
$$S_{\perp} = \mathrm{S} \cdot \cos(\alpha) \tag{5}$$



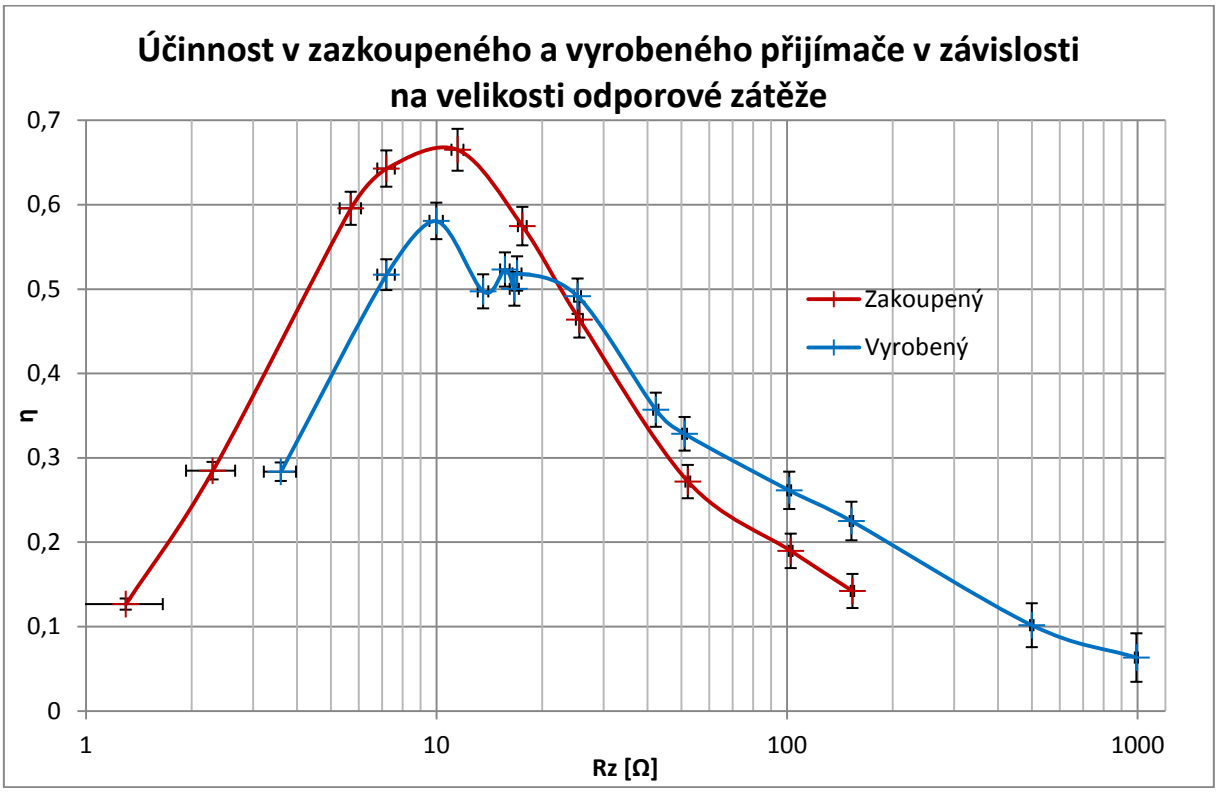
Obrázek 21 Graf účinnosti v přenosu energie při různém náklonu přijímací cívky

5.5 Porovnání se zakoupeným přijímačem

Jako zástupce komerčně prodávaných zařízení byl vybrán přijímač pro mobilní telefon SAMSUNG Galaxy S3, který je vidět na Obrázek 3. Toto zařízení má udávané výstupní napětí 5 V a maximální poskytovaný proud 700 mA. Při měření byl tento přijímač umístěn do nulové vzdálenosti na vysílač. Měřila se jeho zatěžovací charakteristika a účinnost. Na Obrázek 22 a příloze K je vidět porovnání naměřené VA charakteristiky zakoupeného přijímače a vyrobeného přijímače s velkou cívkou. Z grafu je patrné, že zakoupený přijímač má lepší charakteristiku a chová se jako tvrdší zdroj. Navíc bylo při měření zjištěno, že s tímto zakoupeným přijímačem je spojení pevnější a při žádném měřeném zatížení nedošlo k přerušení spojení. Měření v tomto případě bylo zkresleno proudovým omezením napájecího zdroje pro vysílač. Naměřená účinnost je vynesená v grafu na Obrázek 23 a příloze L. V tomto grafu je porovnána účinnost zakoupeného přijímače a přijímače vyrobeného s připojenou velkou cívkou. Porovnáním obou průběhů je patrné, že účinnost zakoupeného přijímače je lepší při vyšších zátěžích. Oproti tomu vyrobený přijímač dosahoval vyšší úspornosti při nižším zatížení.



Obrázek 22 Porovnání VA charakteristik vyrobeného a zakoupeného přijímače

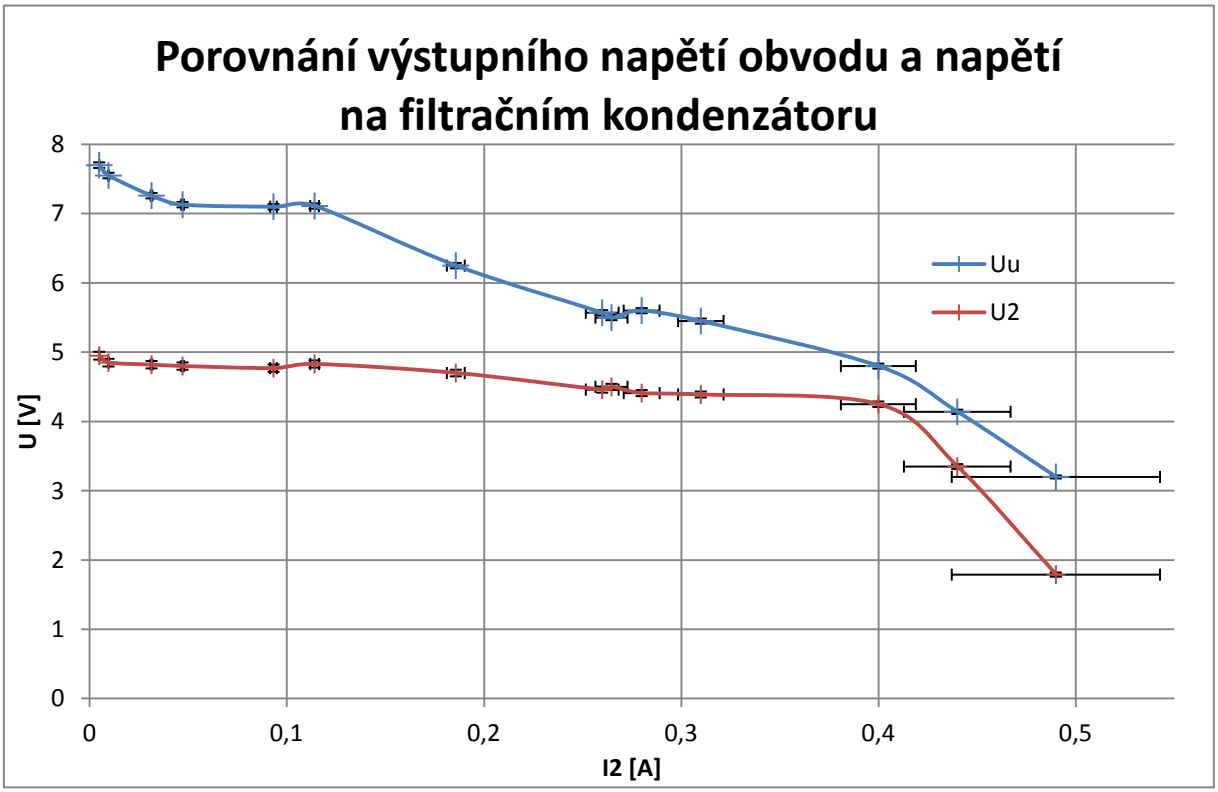


Obrázek 23 Porovnání účinnosti vyrobeného a zakoupeného přijímače

5.6 Naměřené napětí za usměrňovačem

V průběhu měření byly odebírány vzorky napětí, které bylo na filtračním vyhlazovacím kondenzátoru na přípravku. Tento elektrolytický kondenzátor je Kladným polem připojen k vývodu IO RECT a záporným k zemi. Napětí na tomto komponentu velmi

kolísalo, takže bylo při měření velmi obtížné určit jeho efektivní hodnotu. V grafu na Obrázek 24 a v příloze M je vidět závislost napětí za usměrňovačem a výstupního napětí na odebíraném proudu. Zobrazená data v grafu jsou naměřena na vyrobeném přijímači s připojenou velkou cívkou. Z naměřených hodnot lze určit, že napětí, na které je tento kondenzátor nabit, je v průměru o 1,7 V vyšší, než výstupní napětí obvodu. Za povšimnutí stojí i fakt, že napětí na vyhlazovacím kondenzátoru nepřekračuje 8 V. Díky tomuto poznatku lze vhodně zvolit tento kondenzátor, tak, aby nebyla zbytečně předimenzovaná jeho napěťová výdrž.



Obrázek 24 Závislost napětí za usměrňovače na proudovém odběru

5.7 Shrnutí výsledků měření

Pro přehlednost jsou v Tabulka 8 shrnuté výsledky měření, které vyjadřují mezní parametry, při kterých jsou zařízení schopná bez problému pracovat. V tabulce je zároveň uvedeno, jaký maximální výkon byla zařízení schopná poskytovat.

Tabulka 8 Tabulka mezních parametrů pro bezproblémový přenos energie

	Přijímač s malou cívkou	Přijímač s velkou cívkou	Zakoupený přijímač
P_{MAX}	0,49 W	1,8 W	2 W
R_Z	> 42,3 Ω	3,6 až 10000 Ω	
Rozsah vyosení		0 až 12 mm	
Vertikální rozsah	0 až ? mm	1 až 7 mm	0 až 7 mm
Rozsah natočení		0 až 26,1 °	

6 Závěr

Tato práce se dá považovat za úspěšnou, protože byly splněny všechny body zadání. Hlavním přínosem práce je návod, který popisuje postup výroby přijímače, včetně schémat a seznamu součástek. Výsledek této práce může být tedy použit v jiných projektech, kde je potřeba přenášet energii bezkontaktně. Především by se výstup této práce dal využít pro projekty zabývající se vývojem mobilních robotů.

V práci byly porovnávány dvě varianty řešení přijímače. Jedna varianta byla založena na použití integrovaného obvodu určeného přímo pro přijímače. Další varianta byla založena na tom, že by se tento IO nahradil mikroprocesorem a několika diskrétními komponenty. Práce obsahuje ceník součástek, které obě řešení vyžadují. Cena řešení s MCU vychází na 273 Kč, zatím co cena řešení se specializovaným integrovaným obvodem byla vyčíslená na 456 Kč. Pro srovnání zakoupený přijímač, který byl měřen, je na trhu dostupný za 335 Kč. Přestože by řešení s MCU vycházelo levněji, bylo realizováno řešení se specializovaným IO bq51013, protože se jevilo jako jednodušší. Kdyby se navíc převedl čas nutný pro vývoj programu MCU na peníze, tak by se tato varianta výrazně prodražila. Práce ovšem zahrnuje i návrh obvodového řešení s MCU.

Podařilo se zhotovit a zprovoznit přípravek pro testování přenosu energie. Jedná se o přijímač plně kompatibilní standardem Qi. Přípravek byl zkonstruován tak, aby umožňoval měnit hodnoty jednotlivých komponentů na DPS jejich snadnou výměnou. Díky tomu může být zařízení použito pro hledání ideálních hodnot součástek.

Při výrobě zařízení se podařilo výrazně snížit náklady na výrobu jednoho zařízení. V datovém listu k požitému IO je totiž uvedeno, že by se měl jako vyhlazovací kondenzátor použít keramický kondenzátor o minimální kapacitě 4,7 μF. V realizovaném zařízení byl však použit kondenzátor elektrolytický, který je výrazně levnější. Díky tomu lze na jednom výrobku ušetřit více než 44 Kč.

Výstupem této práce jsou i data, která byla naměřena na realizovaném zařízení. Byly změřeny prostorové charakteristiky, jak se projevuje vzájemná poloha cívek přijímače a vysílače na účinnosti přenosu energie. Naměřená data také ukazují, že zhotovené zařízení má jen o 8 % menší účinnost, než zakoupený přijímač. Měření také ukázalo, že přenos energie měl lepší naprostou většinu měřených parametrů, pokud byla použita pro příjem cívka s větší indukčností, počtem závitů a jakostí.

Seznam použité literatury

[1] VALTCHEV, Stanimir, Elena BAIKOVA a Luis JORGE. Http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0353-3670/2012/0353-36701203171V.pdf. Portugalsko, 2012. Dostupné z: http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0353-3670/2012/0353-36701203171V.pdf. Referát. UNL.

[2] Electromagnetic Radiation: Field Memo. Cincinnati, Ohio, 1990. Dostupné z: https://www.osha.gov/SLTC/radiofrequencyradiation/electromagnetic_fieldmemo/electromagnetic.html#section_6. Poznámka. OSHA Cincinnati Laboratory.

[3] Wireless power. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014 [cit. 2014-12-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_power

[4] BAARMAN, David a Joshua SCHWANNECKE. UNDERSTANDING WIRELESS POWER. In: Fulton Innovation [online]. 2009 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z:http://ecoupled.com/system/files/pdf/eCoupled_UnderstandingWirelessPower_WhitePaper.pdf

[5] ASHLEY, Steven. Wireless recharging: Pulling the plug on electric cars. BBC [online]. 2012 [cit. 2014-12-21]. Dostupné z: http://www.bbc.com/future/story/20121120-pulling-the-plug-on-electric-cars

[6] ČR. Všeobecné oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat v pásmech 2,4 GHz až 66 GHz. In: Praha, 2010. Dostupné z: https://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2010/vo-r_12-09_2010-12.pdf

[7] LANDIS, Geoffrey. RE-EVALUATING SATELLITE SOLAR POWER SYSTEMS FOR EARTH. In: IEEE 4th World Conference on P hotovoltaic Energy Conversion. Clevland: IEEE, 2006, s. 2. Dostupné z:http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20070005136.pdf

[8] ROSSIN, V, E ZUCKER, M PETERS, M EVERETT a B ACKLIN. High-power diode laser technology and applications II. High-power diode laser technology and applications II. 2004, č. 5336. Dostupné z:http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=913516

[9] PHOTONIC FRONTIERS: Photonic power delivery: Photonic power conversion delivers power via laser beams. Laser Focus World [online]. 2006 [cit. 2014-12-21]. Dostupné z:http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-42/issue-1/features/photonic-frontiers-photonic-power-delivery-photonic-power-conversion-delivers-power-via-laser-beams.html

[10] About the WPC. 2008. Wireless Power Consortium [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.wirelesspowerconsortium.com/about/

[11] Products - Wireless Power Consortium. WIRELESS POWER CONSORTIUM. Wireless Power Consortium [online]. 2008 [cit. 2014-12-22]. Dostupné z: http://www.wirelesspowerconsortium.com/products/

[12] Amazon.com: Online Shopping for Electronics, Apparel, Computers, Books, DVDs & more [online]. 1996 [cit. 2014-12-23]. Dostupné z: http://www.amazon.com/

[13] Qi Wireless Charging Receiver Card for Samsung Note4 N9100Qi Infinity | Qi Infinity. 2015. Qi infinity-Wireless Charging Products [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.qi-infinity.com/product/qi-wireless-charging-receiver-card-for-samsung-note4-n9100/

[14] FIXER QI podložka umožňující bezdrátové nabíjení pro Samsung Galaxy S3 (eko-balení) | Smarty.cz. *Mobilní telefony, Smartphony - eshop online | Smarty.cz* [online]. 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z:http://www.smarty.cz/FIXER-QI-podlozka-umoznujici-bezdratove-nabijeni-pro-Samsung-Galaxy-S3-eko-baleni-/5837/Produkt

[15] WPC Qi standard - TDK – Ultra-thin receiving coil unit for wireless power transfer | Electropages. Electronics News from the latest Electronics Component Distributors [online]. 2014 [cit. 2014-12-23]. Dostupné z: http://www.electropages.com/2012/07/tdk-ultra-thin-receiving-coil-unit-wireless-power-transfer/

[16] Low Power: Part 1: Interface Definition. In: System Description Wireless Power Transfer [online]. 2013 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: http://www.wirelesspowerconsortium.com/downloads/wireless-power-specification-part-1.html

[17] TEXAS INSTRUMENTS. BQ51013B: Highly Integrated Wireless Receiver Qi (WPC V1.1) Compliant Power Supply [online]. 2013, 43 s. [cit. 2015-03-2]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq51013b.pdf

[18] DONOVAN, John, Brian DIPERT a Will STRAUSS. Low-Power Design. Low-Power Design [online]. 2014 [cit. 2014-12-28]. Dostupné z: http://www.low-powerdesign.com/article_TI-Qi.html

[19] ATmega8L: datasheet. ATMEL. GME [online]. 2003 [cit. 2015-03-17]. Dostupné z: http://www.gme.cz/img/cache/doc/432/193/atmega8l-8pu-datasheet-1.pdf

[20] BYW29: HIGH EFFICIENCY FAST RECOVERY RECTIFIER DIODES. In: GM electronic: elektronika, kterou znáte [online]. 1999 [cit. 2015-04-06]. Dostupné z:http://www.gme.cz/img/cache/doc/223/171/byw29f-200-stm-datasheet-1.pdf

[21] GAO, Xiang. Demodulating Communication Signals of Qi-Compliant Low-Power Wireless Charger Using MC56F8006 DSC.Freescale Semiconductor [online]. 2013, č. 4701 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z:http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/app_note/AN4701.pdf

[22] CadSoft EAGLE PCB Design Software|Support, Tutorials, Shop [online]. 2011 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z:http://www.cadsoftusa.com/

[23] BQ51013B | Wireless Power Solutions | Battery Management Products | Description & parametrics. TEXAS INSTRUMENTS. Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments - TI.com [online]. 2015 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: http://www.ti.com/product/bq51013b

[24] RHL (R - PVQFN - N20): PLASTIC QUAD FLAT PACK NO-LEAD. TEXAS INSTRUMENTS. Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments - TI.com [online]. 2011 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ml/mpqf155i/mpqf155i.pdf

[25] Bq51013 Receiver Circuit Restarts - Wireless Power Forum - Wireless Power - TI E2E Community. HYDER. TI E2E Community [online]. 2012 [cit. 2014-12-30]. Dostupné z:http://e2e.ti.com/support/power_management/wireless_power/f/693/t/229246

[26] O firmě | PragoBoard s.r.o.: vícevrstvé, dvou a jednovrstvé plošné spoje [online]. 2012 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z:http://www.pragoboard.cz/o_firme

[27] CENÍK POOL SERVISU. | PragoBoard s.r.o. | [online]. 2014 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z:http://www.pragoboard.cz/download/cenik_pool.pdf

[28] ŠANDERA, Josef. Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 270 s. ISBN 80-730-0181-0.

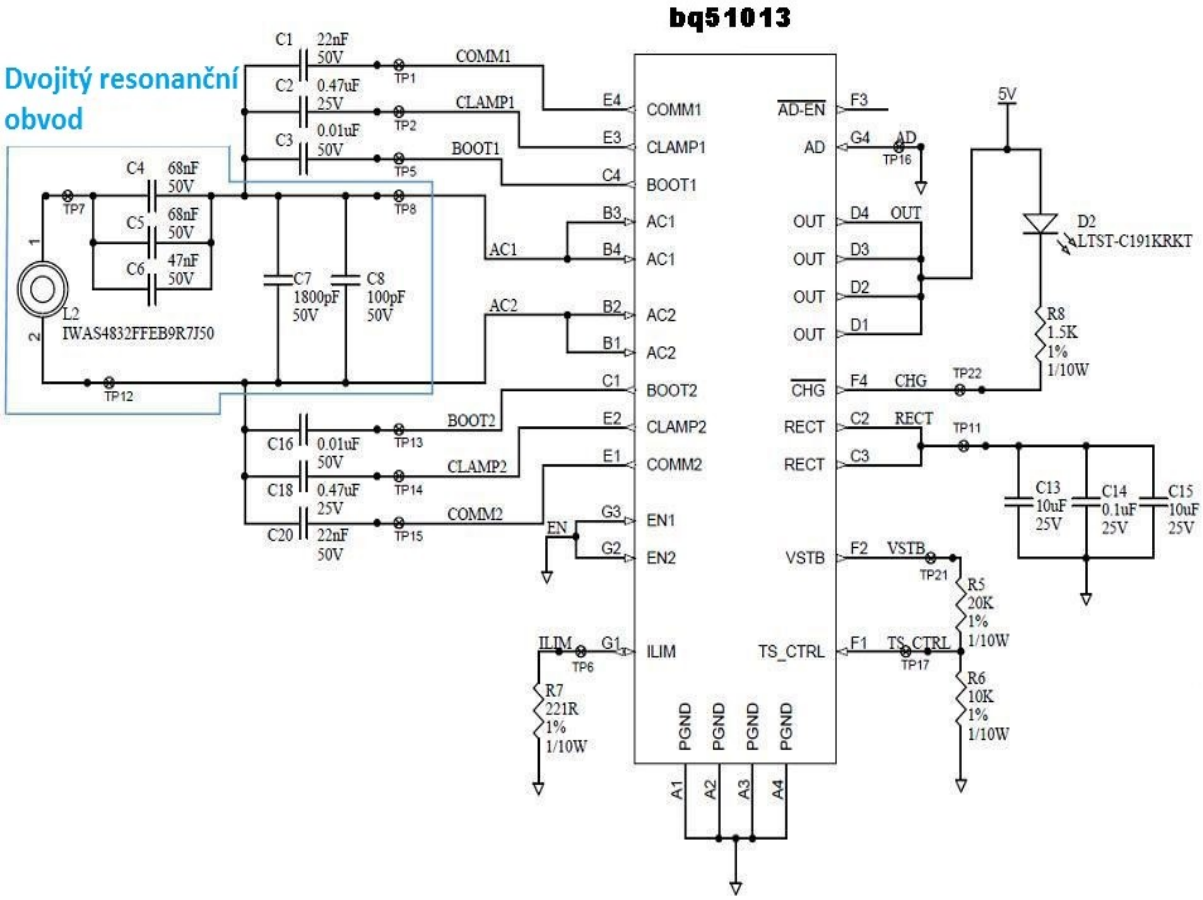
[29] Rezonanční obvod. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-03-06]. Dostupné z:http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezonan%C4%8Dn%C3%AD_obvod

[30] Permeability of SiO2. In: Eng-Tips Engineering Forums [online]. 2007 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=177934

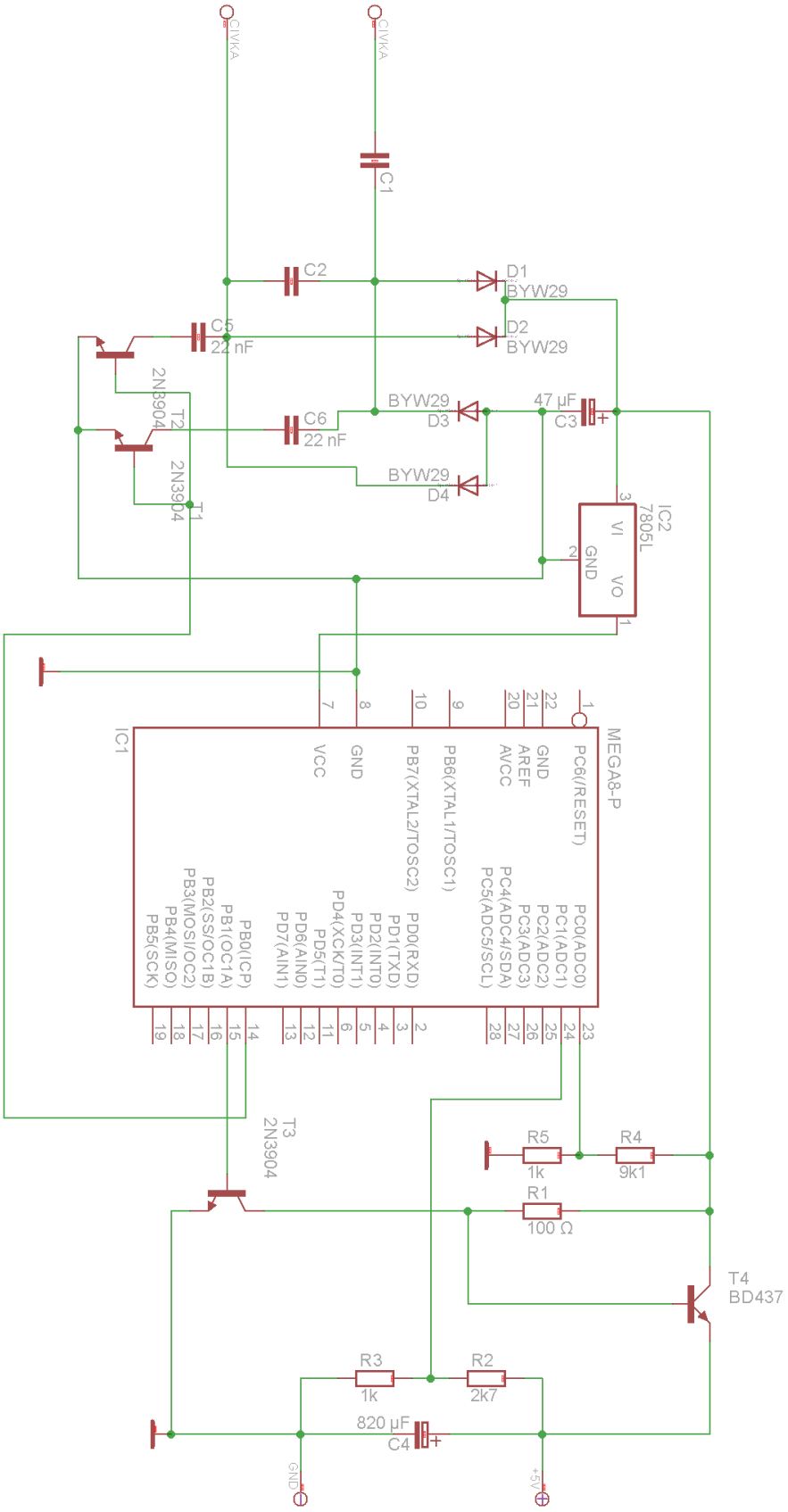
A Obsah CD

- text_prace
  - dokument.pdf
  - dokument.docx
- obrazky
  - prijimac_s_MCU.png
  - prijimac_schema.png
  - prijimac_dps.png
  - bq51013_puzdro.png
- schemata
  - prijimac.sch
  - prijimac.brd
- lbr
  - bq51013.lbr
- tabulkova_data
  - namerena_data.xlsx
  - cenik_soucastek.xlsx
  - seznam_produktu.xlsx

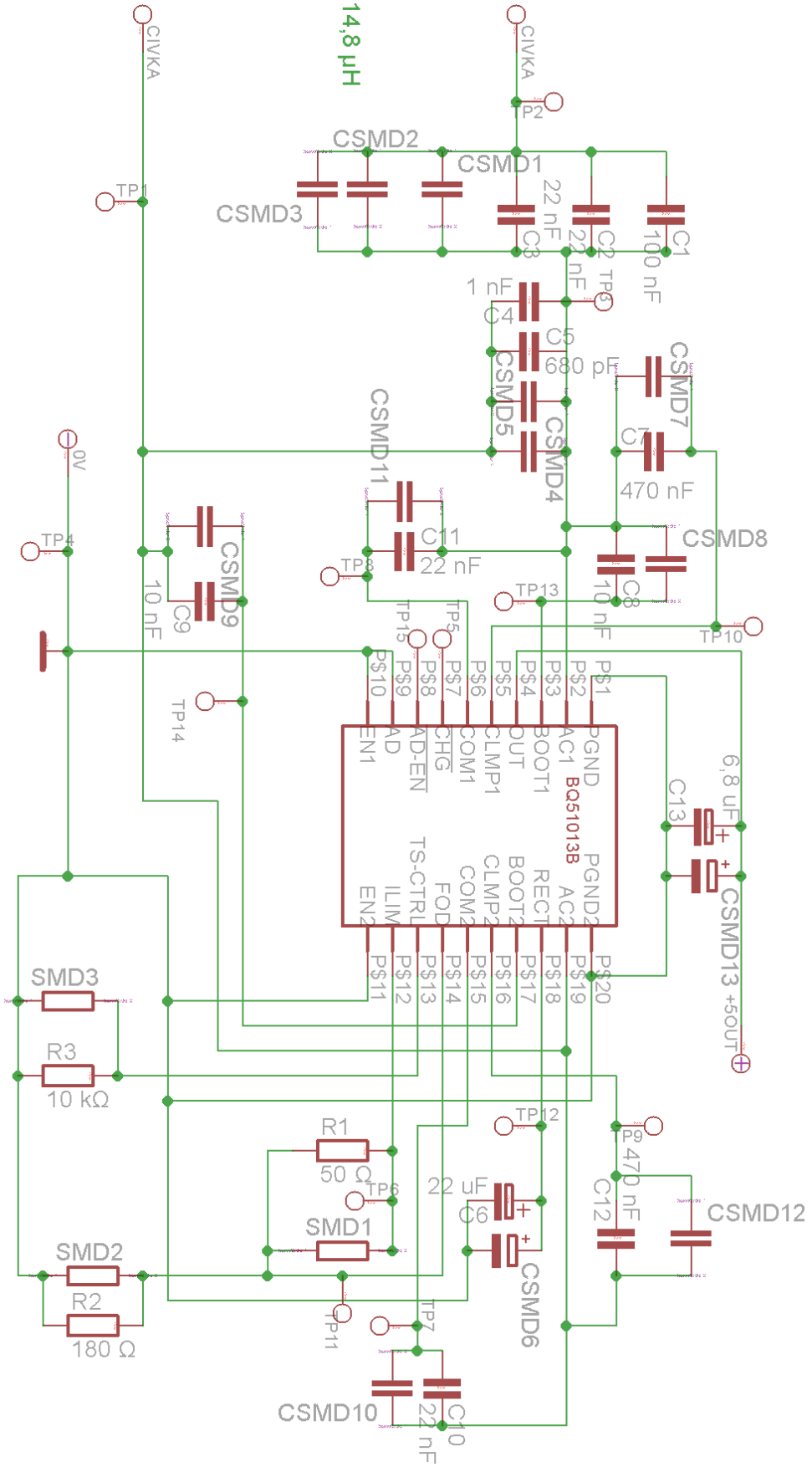
B Vzor elektrického zapojení pro obvod bq51013



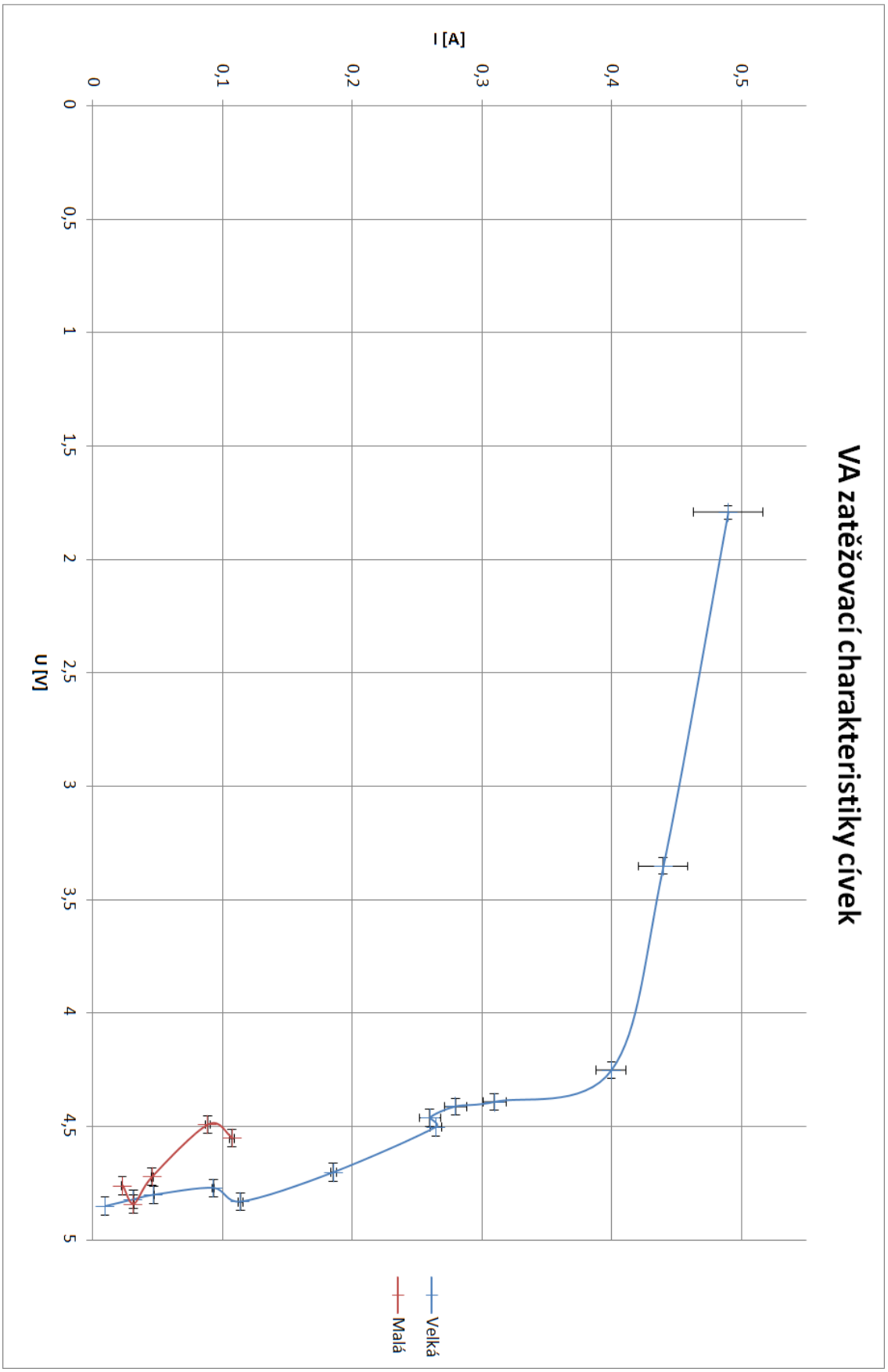
C Navržené schéma zapojení přijímače s MCU



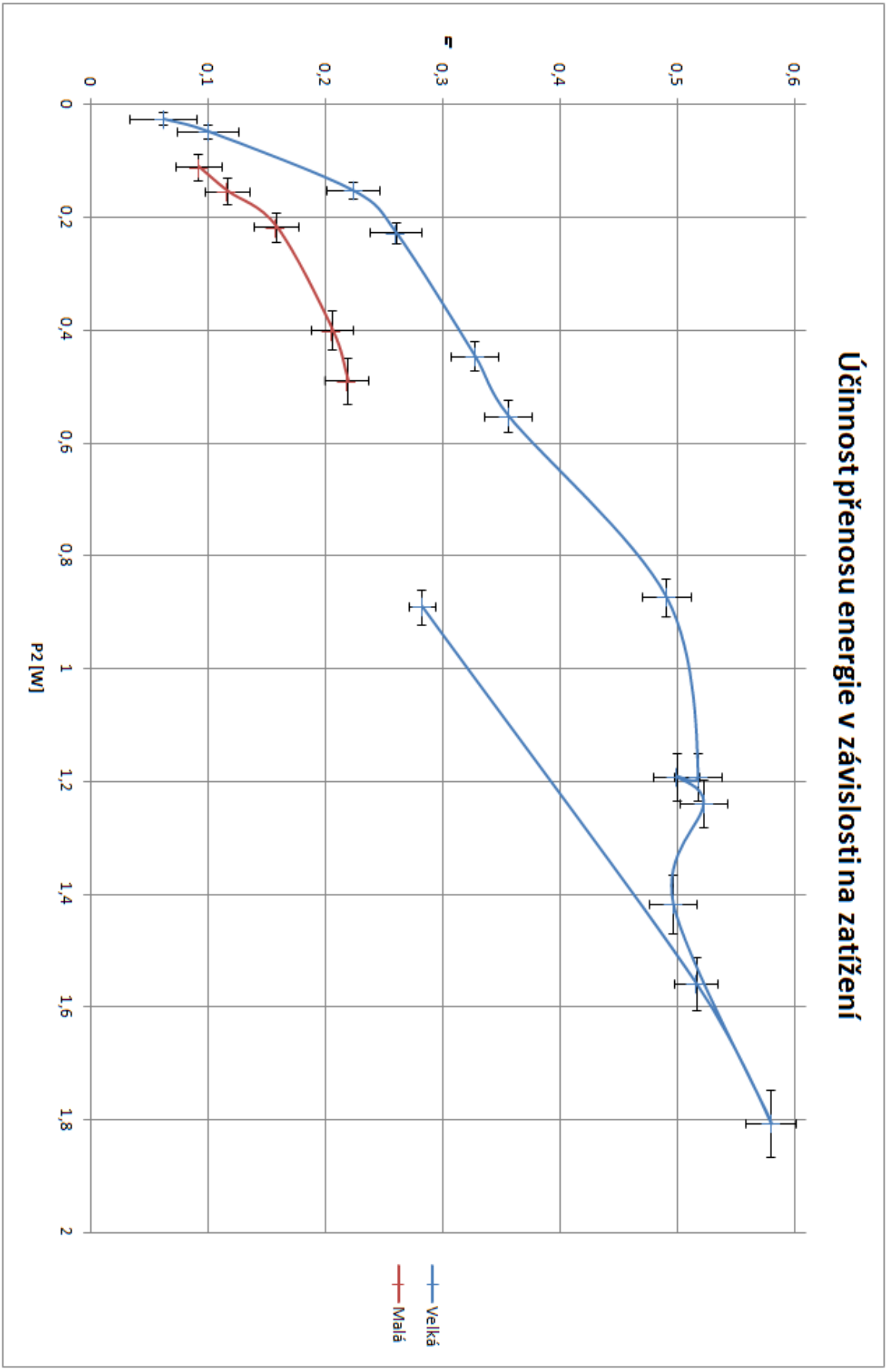
D Navržené schéma zhotoveného zařízení



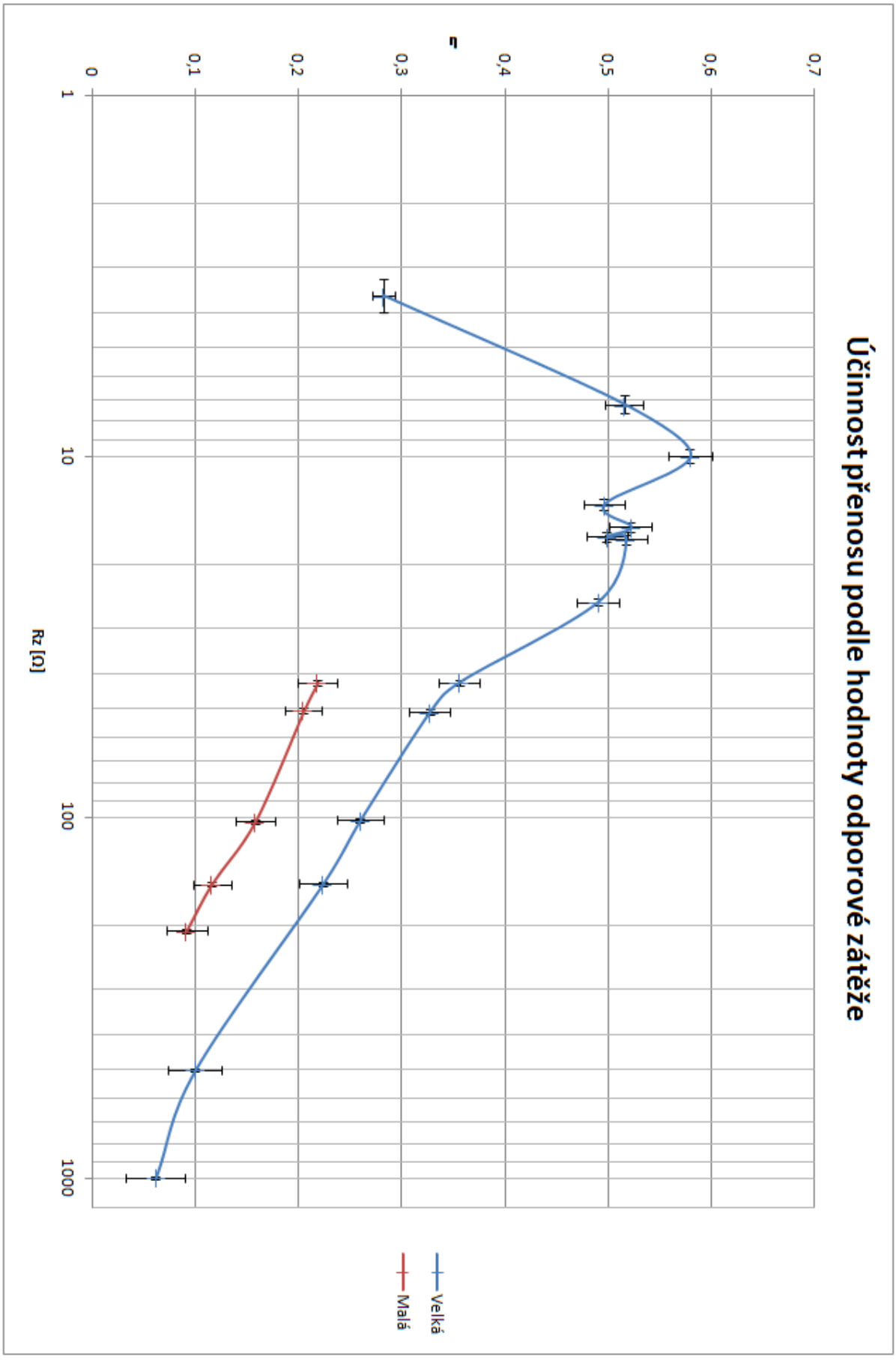
E Porovnání VA charakteristik testovaných cívek



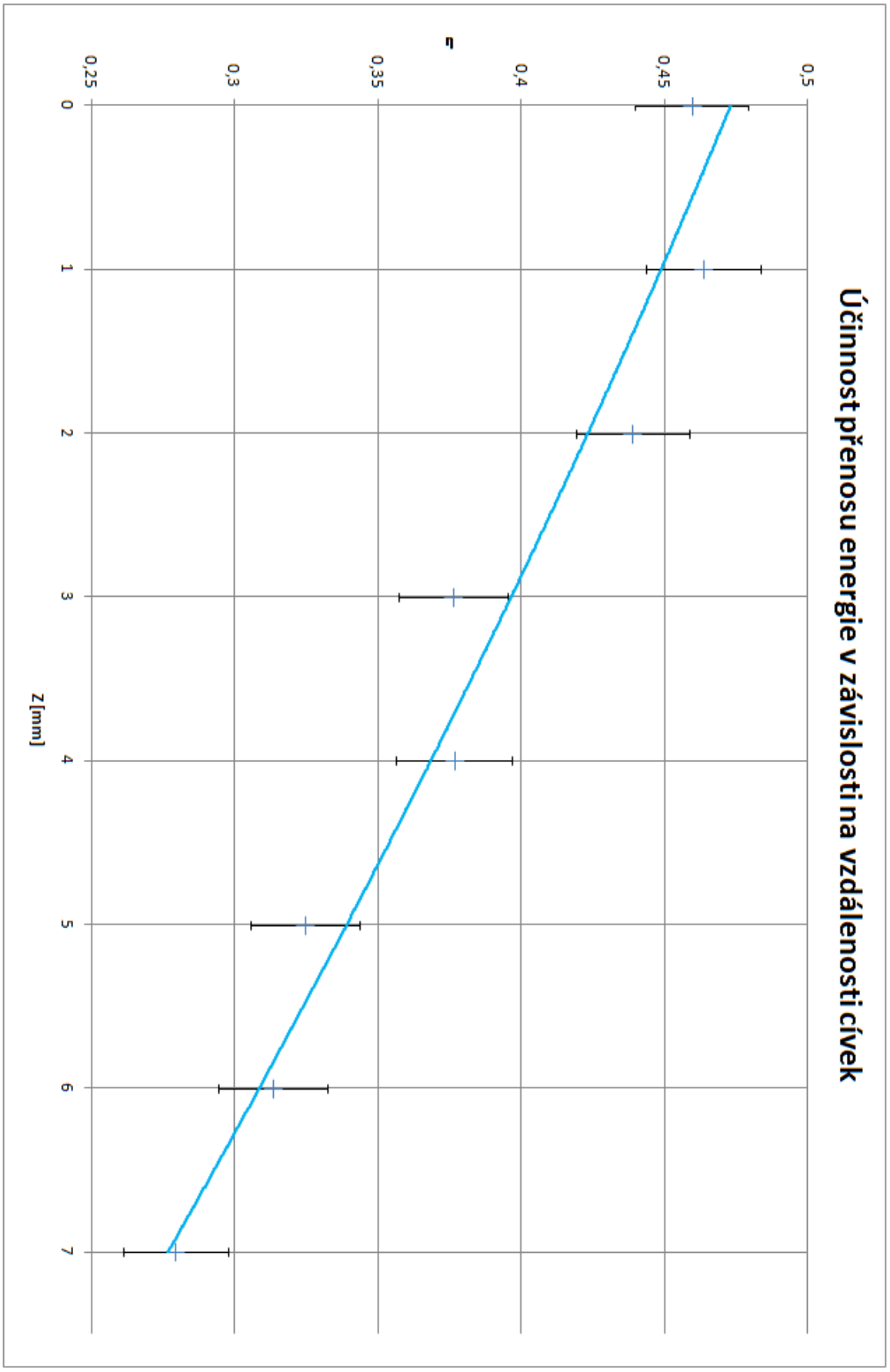
F Graf účinnosti přenosu energie testovaných cívek



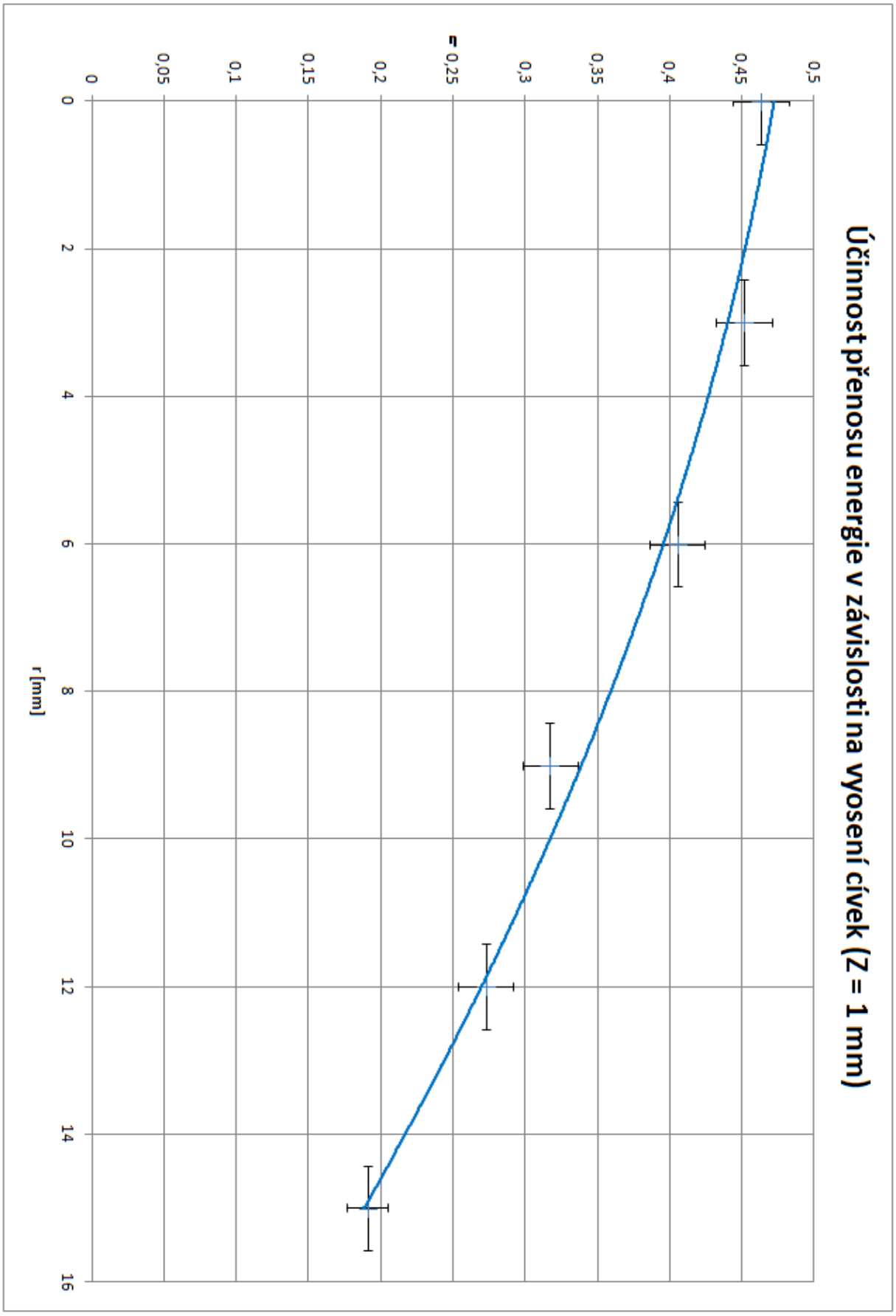
G Graf účinnosti v závislosti na odporové zátěži přípravku



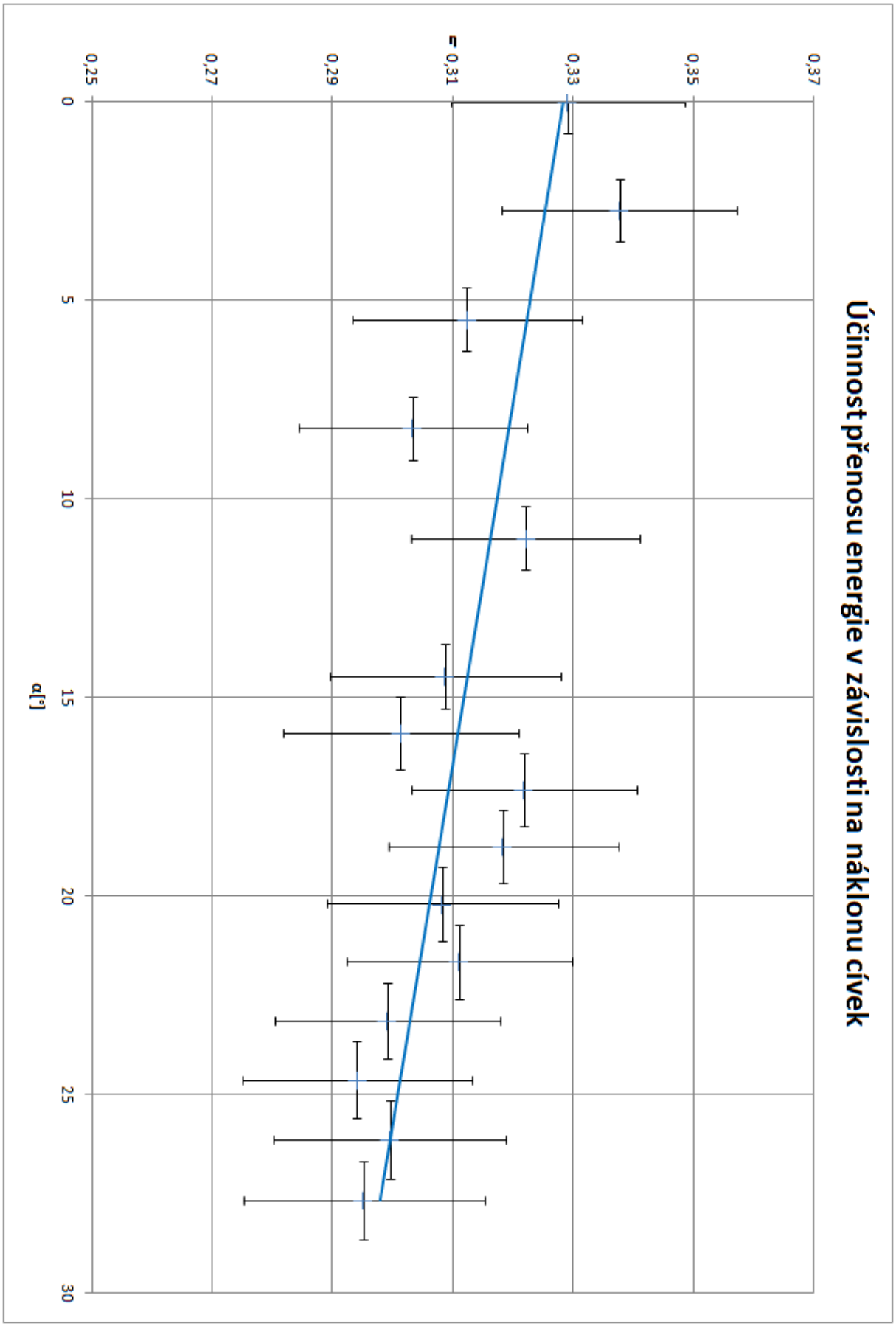
H Graf účinnosti v závislosti na vertikální vzdálenosti cívek



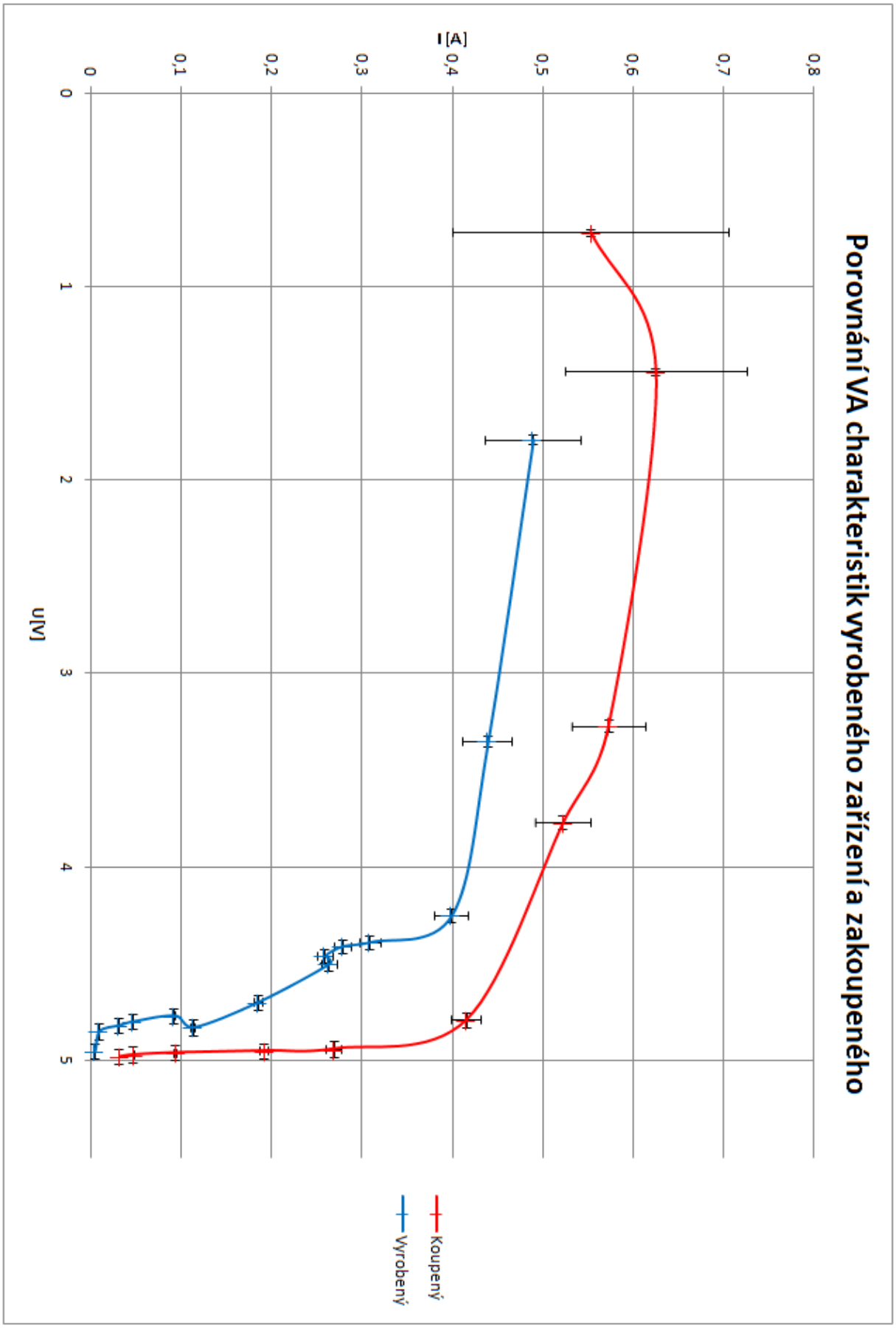
I Graf účinnosti v závislosti na vyosení cívek



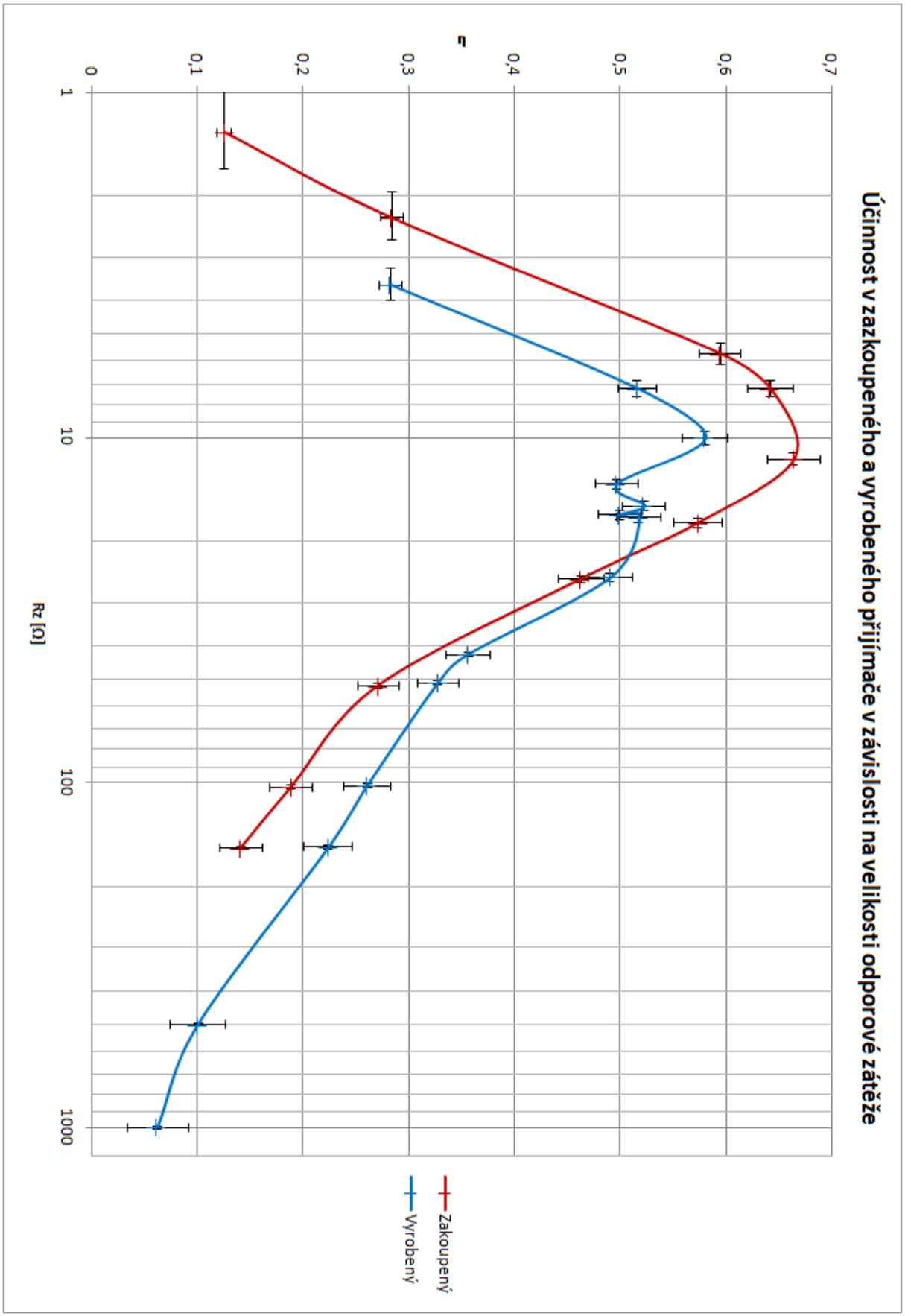
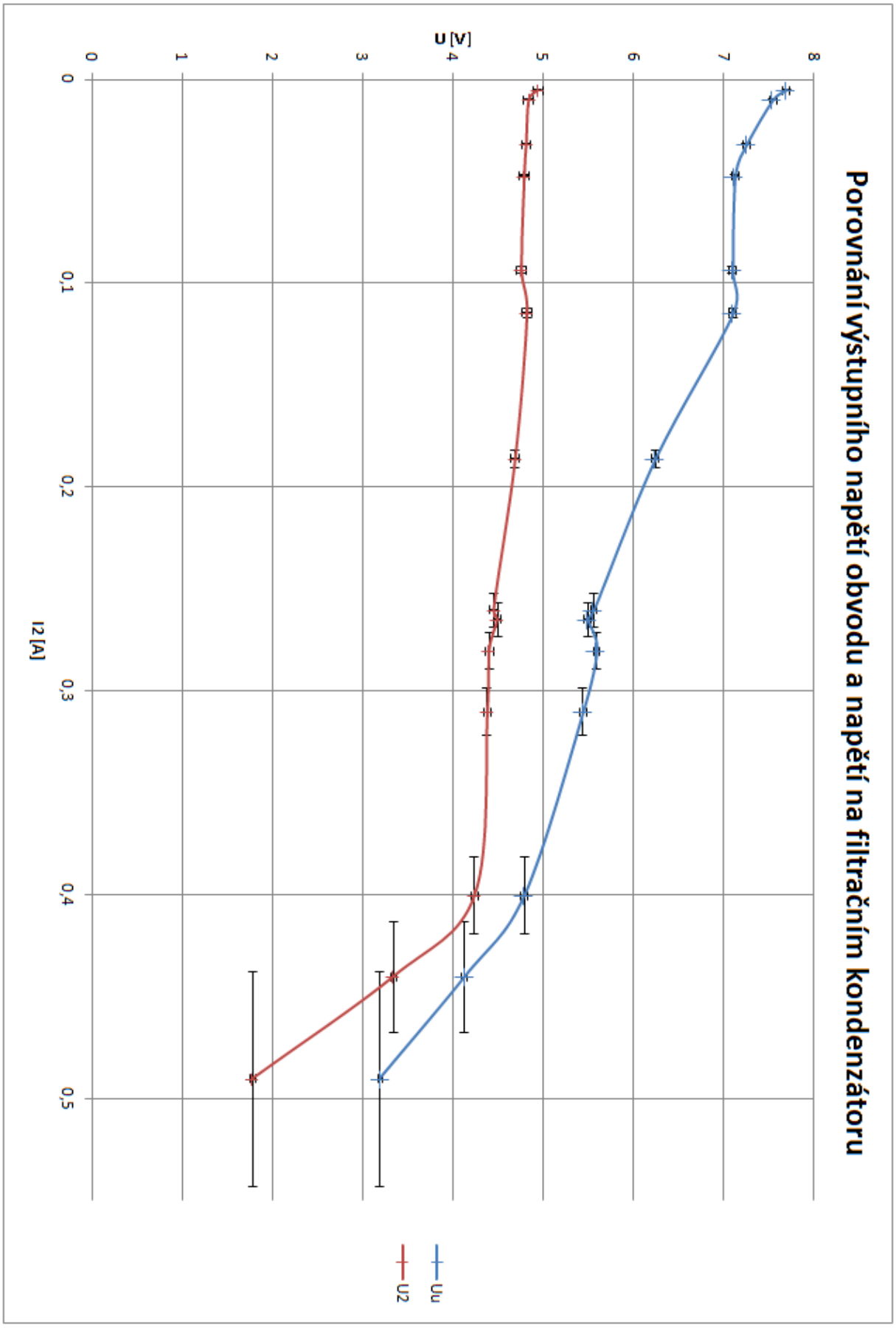
J Graf účinnosti v závislosti na náklonu cívky



K VA charakteristiky zakoupeného a vyrobeného přijímače



L Graf účinnosti vyrobeného a zakoupeného přijímače



M Napětí na vyhlazovacím filtračním kondenzátoru