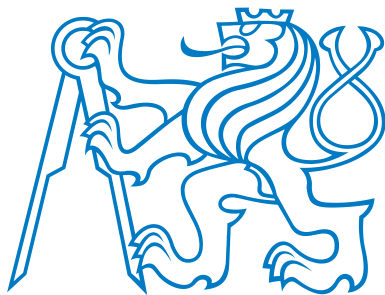


Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Univerzální power banka s rychlým a bezdrátovým nabíjením

Bc. David Touš

Vedoucí: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Obor: Elektronika a komunikace

Studijní program: Elektronika

Květen 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Touš** Jméno: **David** Osobní číslo: **474255**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Univerzální power banka s rychlým a bezdrátovým nabíjením

Název diplomové práce anglicky:

Universal Power Bank with Fast and Wireless Charging

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku týkající se typů zapojení DC/DC měničů vhodných pro konstrukci napájecího zdroje pro užití v "power bankách".
2. Využijte nabídky IO světových výrobců zabývajících se problematikou těchto typů zdrojů.
3. Na základě studie dle 1. a 2. navrhnete a realizujete konstrukci univerzálního přístroje pro napájení zařízení typu USB-C s různými úrovněmi výstupního napětí a proudů (v rozsazích do 12 V/3 A, 15 V/2,66A, 20 V/2 A). Dále se zaměřte na možnost nabíjení přístrojů s bezdrátovým přenosem energie.
4. Řízení jednotlivých procesů ovládejte pomocí vhodného mikropočítače.
5. Ověřte funkčnost sestaveného přístroje, proveďte měření základních charakteristik a vyhodnoťte dosažené parametry.
6. Navrhnete případná vylepšení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I. - III. Ben, Praha 1996 v pozdějších reedicích.
- [2] Aplikační poznámky TI, AD a dalších firem zabývajících se konstrukcí IO pro napájecí zdroje.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **24.01.2022** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

Ing. Lubor Jirásek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu této diplomové práce, panu Ing. Luboru Jiráskovi, CSc., za vedení práce, za jeho rady a připomínky, za jeho čas věnovaný konzultacím se mnou i za jeho trpělivost, kterou se mnou měl.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne

podpis:

Abstrakt

Tato diplomová práce obsahuje popis základních vlastností akumulátorů, popis zapojení obousměrných DC/DC měničů vhodných pro použití v power bankách, následuje stručný popis standardu USB Power Delivery a princip funkce bezdrátového nabíjení s využitím standardu Qi. V rámci praktické části této diplomové práce je pak navrženo, realizováno a proměřeno zapojení power banky schopné nabíjet připojené zařízení proudem až 3 A, resp. výkonem maximálně 40 W s volitelnými napěťovými úrovněmi (5 V, 9 V, 12 V, 15 V, 20 V), nebo bezdrátově nabíjet zařízení standardu Qi při přenášeném výkonu v řádu jednotek Wattů.

Klíčová slova: Power banka, DC/DC měniče, rychlé nabíjení, USB Power Delivery, bezdrátové nabíjení, standard Qi

Vedoucí: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Abstract

This diploma thesis contains description of elementary characteristics of rechargeable batteries, problematics of bidirectional DC/DC converters suitable for use in power banks, follows brief description of USB Power Delivery standard and wireless charging principles with use of Qi standard. Practical part of this thesis consists of designing, creating and measuring power bank capable of delivering up to 3 A or maximum power of up to 40 W, respectively, to the connected device, with selectable voltage levels (5 V, 9 V, 12 V, 15 V, 20 V). The power bank also allows wireless charging of devices supporting Qi standard with transmitted power of few Watts.

Keywords: Power bank, DC/DC converters, fast charging, USB Power Delivery, wireless charging, standard Qi

Title translation: Universal Power Bank with Fast and Wireless Charging

Obsah

Seznam použitých symbolů	1	8 Výběr akumulátoru, návrh BMS	32
1 Úvod	3	8.1 Výběr akumulátoru	32
2 Koncepce přístroje	5	8.2 Návrh BMS	34
3 Akumulátory	8	9 Návrh rychlého nabíjení	37
3.1 Olovený akumulátor	8	9.1 Topologie DC/DC měniče	37
3.2 Ni-MH a Ni-Cd akumulátory	9	9.2 Řízení měniče	38
3.3 Lithiové akumulátory	9	9.3 Výběr pasivních součástek	39
3.4 Superkondenzátory	10	9.3.1 Induktor(y)	39
3.5 Odhad míry nabití	12	9.3.2 Kondenzátory	42
3.6 Balancování článků	13	9.4 Výběr aktivních součástek	44
4 DC/DC měniče	15	9.4.1 Budič spínacích tranzistorů	44
4.1 Snižující/zvyšující měnič	16	9.4.2 Tranzistory	46
4.2 H-můstek	17	9.5 Snímání proudu	49
4.3 Split-Pi	18	9.6 Podpora rychlého nabíjení	50
4.4 ZETA/SEPIC	19	10 Návrh bezdrátového nabíjení	53
5 Rychlé nabíjení	21	10.1 Výběr IO	53
5.1 Qualcomm Quick Charge	21	10.2 Bezdrátový vysílač	54
5.2 USB Power Delivery	22	10.3 Snižující měnič	56
6 Bezdrátový přenos energie	24	11 Výroba, ožiování	62
6.1 Přenos pomocí induktivní vazby	24	12 Měření a testování	65
6.2 Přenos s využitím rezonance	25	12.1 ZETA/SEPIC a rychlé nabíjení	65
6.3 Přenos energie radiovými signály	26	12.2 BMS	87
7 Standardy bezdrátového nabíjení	28	12.3 Snižující měnič	90
7.1 Standard Qi	28	12.4 Bezdrátové nabíjení	94
7.1.1 Přenos energie	28	12.5 Shrnutí	99
7.1.2 Detekce vložení cizího vodivého objektu	30	13 Závěr	102
7.2 Standardy Rezence a PMA	31	Literatura	104
		Příloha	111

Obrázky

2.1 Přehledové schéma zapojení power banky.	7	7.1 Zjednodušený model systému bezdrátového nabíjení, převzato z [28].	29
3.1 Znázornění stavby superkondenzátoru, převzato z [7].	11	8.1 Schéma zapojení BMS pro power banku.	35
3.2 Příklad zapojení balancování sériově zapojených článků akumulátoru za pomoci rezistorů a tranzistorů MOSFET.	14	9.1 Schéma zapojení budiče spínacích tranzistorů pro topologii ZETA, převzato z [41].	45
4.1 Schéma zapojení snižujícího/zvyšujícího měniče. ...	17	9.2 Schéma zapojení ZETA/SEPIC měniče.	48
4.2 Schéma zapojení měniče v H-můstku.	18	9.3 Schéma zapojení IO NCS214 pro obousměrné snímání proudu tekoucího snímacím rezistorem, převzato z [44].	49
4.3 Schéma zapojení měniče v topologii Split-Pi; zapojení převzato z [18]. .	19	9.4 Schéma zapojení mikrokontroléru, USB-C kontroléru ad.	52
4.4 Schéma zapojení měniče v topologii ZETA/SEPIC; zapojení převzato z [19]	20	10.1 Schéma zapojení vysílače pro bezdrátové nabíjení uvedené v datasheetu, převzato z [29].	55
5.1 Zapojení USB-C konektoru, převzato z [22]	22	10.2 Vysílací cívka pro bezdrátové nabíjení (rozměry uvedeny v mm), převzato z [47].	55
6.1 Induktory L_1 , L_2 a vzájemná indukčnost M	25	10.3 Funkční blokové zapojení IO AP3503E, převzato z [49].	57
6.2 Základní zapojení energy harvesteru pro konverzi energie RF signálů na elektrickou energii, převzato z [24]	27	10.4 Příklad zapojení IO AP3503E, převzato z [49].	58

10.5 Celkové schéma zapojení snižujícího měniče, vysílače pro bezdrátové nabíjení a bílé LED pro použití power banky jako svítily.	61
12.1 Zatěžovací charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 5 V.	66
12.2 Zatěžovací charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 9 V.	67
12.3 Zatěžovací charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 12 V.	67
12.4 Zatěžovací charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 15 V.	68
12.5 Zatěžovací charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 20 V.	68
12.6 Převodní charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 5 V.	69
12.7 Převodní charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 9 V.	69
12.8 Převodní charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 12 V.	70
12.9 Převodní charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 15 V.	70
12.10 Převodní charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 20 V.	71
12.11 Účinnost měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 5 V.	72
12.12 Účinnost měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 9 V.	72
12.13 Účinnost měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 12 V.	73
12.14 Účinnost měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 15 V.	73
12.15 Účinnost měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 20 V.	74
12.16 Zvlnění výstupního napětí měniče ZETA při vstupním napětí cca 12 V a proudu odebíraném z měniče cca 2,7 A.	75

12.17 Odezva (průběh střídavé složky výstupního napětí) měniče ZETA na skokovou změnu zatížení měniče pro nastavenou úroveň výstupního napětí 5 V.....	75	12.22 Průběh výstupního napětí měniče ZETA při požadavku na nastavení výstupního napětí měniče na 20 V a následném požadavku na snížení výstupního napětí na bezpečnou úroveň.	78
12.18 Odezva (průběh střídavé složky výstupního napětí) měniče ZETA na skokovou změnu zatížení měniče pro nastavenou úroveň výstupního napětí 9 V.....	76	12.23 Závislost výstupního proudu měniče SEPIC na výstupním napětí pro vstupní napětí měniče 5 V. ...	79
12.19 Odezva (průběh střídavé složky výstupního napětí) měniče ZETA na skokovou změnu zatížení měniče pro nastavenou úroveň výstupního napětí 12 V.....	76	12.24 Závislost výstupního proudu měniče SEPIC na výstupním napětí pro vstupní napětí měniče 9 V. ...	80
12.20 Odezva (průběh střídavé složky výstupního napětí) měniče ZETA na skokovou změnu zatížení měniče pro nastavenou úroveň výstupního napětí 15 V.....	77	12.25 Závislost výstupního proudu měniče SEPIC na výstupním napětí pro vstupní napětí měniče 12 V. ...	80
12.21 Odezva (průběh střídavé složky výstupního napětí) měniče ZETA na skokovou změnu zatížení měniče pro nastavenou úroveň výstupního napětí 20 V.....	77	12.26 Závislost výstupního proudu měniče SEPIC na výstupním napětí pro vstupní napětí měniče 15 V. ...	81
		12.27 Závislost výstupního proudu měniče SEPIC na výstupním napětí pro vstupní napětí měniče 19 V. ...	81
		12.28 Převodní charakteristika měniče SEPIC pro nastavený výstupní proud měniče 350 mA.	82
		12.29 Převodní charakteristika měniče SEPIC pro nastavený výstupní proud měniče 700 mA.	82
		12.30 Účinnost měniče SEPIC pro výstupní napětí 12,6 V.....	83

12.31 Účinnost měniče SEPIC pro výstupní napětí 12,6 V.	83	12.40 Zatěžovací charakteristika snižujícího měniče.	91
12.32 Odezva měniče SEPIC na skokovou změnu nastaveného výstupního proudu měniče pro vstupní napětí 5 V.	84	12.41 Převodní charakteristika snižujícího měniče.	92
12.33 Odezva měniče SEPIC na skokovou změnu nastaveného výstupního proudu měniče pro vstupní napětí 9 V.	85	12.42 Účinnost snižujícího měniče.	93
12.34 Odezva měniče SEPIC na skokovou změnu nastaveného výstupního proudu měniče pro vstupní napětí 12 V.	85	12.43 Změna výstupního napětí snižujícího měniče při skokové změně zatížení měniče.	93
12.35 Odezva měniče SEPIC na skokovou změnu nastaveného výstupního proudu měniče pro vstupní napětí 15 V.	86	12.44 Zvlnění výstupního napětí snižujícího měniče.	94
12.36 Odezva měniče SEPIC na skokovou změnu nastaveného výstupního proudu měniče pro vstupní napětí 19 V.	86	12.45 Přijímač pro bezdrátové nabíjení, převzato z [52].	95
12.37 Vybíjecí charakteristika akumulátoru a odhad míry nabití.	88	12.46 Zatežovací charakteristika přijímače bezdrátového nabíjení.	96
12.38 Nabíjecí charakteristika akumulátoru a odhad míry nabití.	89	12.47 Účinnost bezdrátového nabíjení v závislosti na odebíraném výstupním proudu z přijímače.	97
12.39 Časový průběh nabíjecího proudu akumulátoru.	89	12.48 Měření spektrálních složek signálu vysílaného vysílačem pro bezdrátové nabíjení.	98
		12.49 Měření spektrálních složek signálu vysílaného vysílačem pro bezdrátové nabíjení.	98
		13.1 Vizualizace power banky v programu FreeCAD (stěny krabičky byly zprůhledněné, aby bylo lépe patrné vnitřní uspořádání).	111
		13.2 Foto spodní části krabičky power banky s DPS a akumulátorem.	112

13.3 Foto vrchní části krabičky power banky s DPS, displejem a vysílací cívkou.	113
13.4 Foto power banky.	114
13.5 Foto displeje power banky. ...	114
13.6 Foto power banky s popiskem.	115

Tabulky

3.1 Porovnání vlastností akumulátorů a superkondenzátorů; zdroj dat [1], [8].	11
4.1 Řízení spínacích tranzistorů měniče v topologii H-můstku pro různá napětí U_1 a U_2	18
4.2 Řízení spínacích tranzistorů měniče v topologii Split-Pi pro různá napětí U_1 a U_2	19
8.1 Porovnání vlastností Li-Ion článků ICR18650-22P a ICR18650-26JM, zdroj dat [31], [32].	34



Seznam použitých symbolů

C	F	Kapacita
D	%	Střída
ESR	Ω	Ekvivalentní sériový odpor
f_r	Hz	Rezonanční frekvence
f_{SW}		Spínací frekvence
f_t		Tranzitní frekvence
I_{Batt}	A	Proud tekoucí do/z akumulátoru
I_D		Proud tekoucí elektrodou Drain tranzistoru
I_{IN}		Vstupní proud
I_L		Proud tekoucí induktorem
I_{OUT}		Výstupní proud
L	H	Indukčnost
P	W	Výkon
P_{IN}		Vstupní výkon
P_{OUT}		Výstupní výkon
R	Ω	Odpor
R_{OUT}		Výstupní odpor
$R_{\Theta JA}$	$^{\circ}C/W$	Tepelný odpor tranzistoru polovodič-okolí
t	s	Čas
T		Perioda

U_{Batt}	V	Napětí na akumulátoru
U_{C}		Napětí na kondenzátoru
U_{Cell}		Napětí na článku akumulátoru
U_{DS}		Napětí na tranzistoru mezi elektrodami Drain a Source
U_{GS}		Napětí na tranzistoru mezi elektrodami Gate a Source
U_{IN}		Vstupní napětí
U_{OUT}		Výstupní napětí
η	%	Účinnost
Θ	$^{\circ}\text{C}$	Teplota

Kapitola 1

Úvod

Power banky jsou přenosná zařízení schopná uchovávat a dodávat elektrickou energii; využívány bývají především k nabíjení drobné elektroniky, např. mobilních telefonů. Dostupné jsou power banky různé velikosti, tvaru, s různou kapacitou akumulátoru a vlastnostmi. Některé power banky podporují protokoly pro rychlé nabíjení připojených zařízení nebo umožňují nabíjet zařízení pomocí bezdrátového přenosu energie. Existují i speciální power banky schopné dodávat dostatečný elektrický výkon pro start spalovacího motoru osobního automobilu pro případ vybití startovacího akumulátoru.

Cíl této diplomové práce je navrhnout a realizovat univerzální power banku podporující rychlé nabíjení připojených zařízení s podporovanými úrovněmi napětí a proudů 5 V/3 A, 9 V/3 A, 12 V/3 A, 15 V/2,66 A a 20 V/2 A; díky dostatečnému výkonu a vhodným napěťovým úrovním tak tato power banka může být použita i k napájení menších notebooků. Powerbanka bude dále vybavena konektory pro nabíjení připojených zařízení (která nepodporují rychlé nabíjení) napětím 5 V, vybavena bude též bezdrátovým nabíjením schopným přenosu výkonu v řádu jednotek Wattů zejména pro zajištění nabíjení zařízení, která jinak než bezdrátově nabíjet nelze.

V následující kapitole bude popsána koncepce navrhovaného přístroje, další kapitoly stručně popisují základní vlastnosti akumulátorů a DC/DC měničů pro použití v power bankách, dále jsou popsány princip rychlého nabíjení, bezdrátového přenosu energie a standardy bezdrátového nabíjení. Následují kapitoly věnující se vlastnímu návrhu power banky, tj. výběru akumulátoru, návrhu rychlého a bezdrátového nabíjení a výrobě power banky.

V kapitole věnující se měření a testování navrženého zařízení jsou změřeny základní charakteristiky jednotlivých částí power banky, závěr obsahuje shrnutí dosažených výsledků navrženého zařízení. V příloze tohoto textu je k dispozici foto navrženého zařízení, na DVD jsou pak k dispozici další materiály včetně souborů z návrhových programů, souborů s provedenými simulacemi nebo kód pro použitý mikrokontrolér.

Kapitola 2

Koncepce přístroje

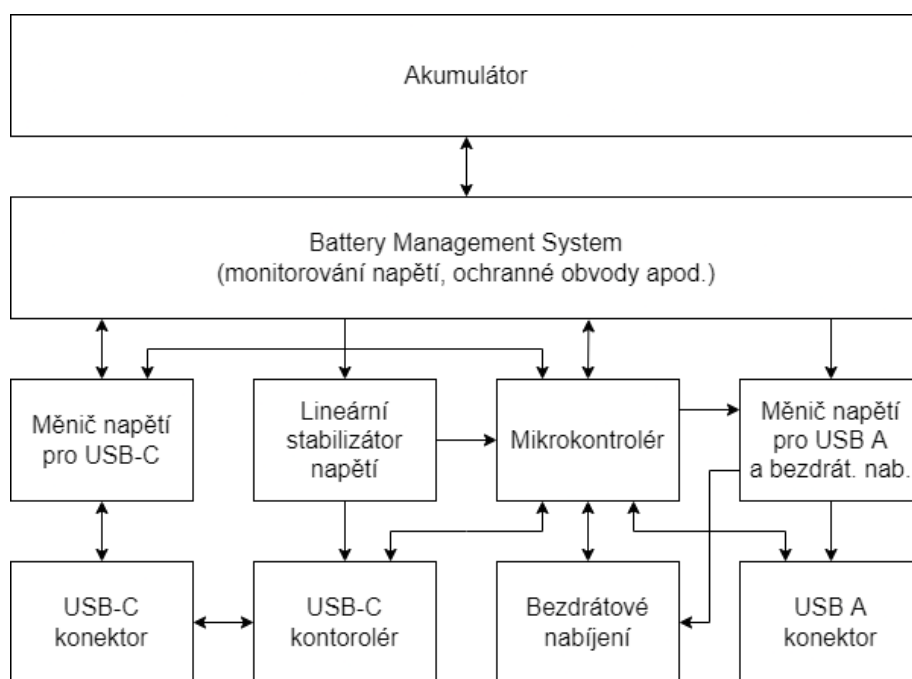
Power banky se obvykle skládají z akumulátoru sloužícího k akumulaci a dodávání elektrické energie, DC/DC měniče pro konverzi napětí na vhodnou napěťovou úroveň pro napájení zařízení připojených k power bance, DC/DC měniče napětí pro nabíjení akumulátoru power banky z připojeného zdroje napětí a integrovaných obvodů řídicích činností power banky a zajišťujících interakci s uživatelem (např. pro určování míry nabití akumulátoru a zobrazování tohoto údaje na displej). V power bankách obvykle bývají používány lithiové (Li-Ion) akumulátory s kapacitami jednotek až desítek Ah (při nominálním napětí zhruba 3,7 V).¹ Zařízení připojovaná k power bance mohou být připojena přes konektor USB A či USB-C (pokud jím power banka disponuje), pro nabíjení power banky bývá použit konektor microUSB nebo též USB-C. Některé power banky podporují standardy rychlého nabíjení Qualcomm Quick Charge či USB Power Delivery, jsou tedy schopné připojené zařízení napájet vyšší napěťovou úrovní než 5 V (typicky 9 V a 12 V). Rychlé nabíjení funguje na principu komunikace mezi power bankou a připojeným zařízením, v rámci níž dojde ke zvolení vhodné napěťové a proudové úrovně pro napájení připojeného přístroje; teprve po úspěšné komunikaci dojde k případnému zvýšení napěťové úrovně.

Přestože dnes již jsou power banky podporující některý ze standardů rychlého nabíjení běžně dostupné, stále obvykle nepodporují vyšší napěťové úrovně než 12 V a výkon power banky dodávaný připojenému zařízení obvykle nepřesahuje 20 W. To je pravděpodobně dáno mimo jiné použitou topologií DC/DC měniče napětí v power bance a použitým

¹Pokud má akumulátor power banky jiné nominální napětí, bývá uváděná kapacita akumulátoru přepočtená na napětí kolem 3,7 V. Množství akumulovatelné energie ve Wh většinou prodejce neuvádí.

akumulátorem (resp. vlastnostmi tohoto akumulátoru, zejména jeho nominálním napětím). V rámci této diplomové práce tedy bude navržena power banka, ve které bude použit DC/DC měnič napětí vhodné topologie a akumulátor s vhodnými parametry tak, aby navržená power banka podporovala i vyšší napěťové úrovně rychlého nabíjení (tedy 15 V a 20 V) a aby byla pro připojené zařízení schopna dodat výkon až 40 W.

„Srdce“ navrhované power banky tvoří akumulátor, který je použit k uchování a dodávání elektrické energie. Vzhledem k tomu, že power banka má být schopna dodávat výkony v řádu desítek Wattů, je nutné vhodně zvolit vlastnosti tohoto akumulátoru (zejména nominální napětí, vybíjecí proud nebo kapacitu). Dohled nad akumulátorem bude zajišťovat Battery Management System (BMS) monitorující napětí akumulátoru a proudy tekoucí do/z akumulátoru. BMS pro případ mimořádné situace (např. pro zabránění vybití akumulátoru pod bezpečnou mez) zajistí odpojení akumulátoru od power banky. Aby tato power banka byla schopna zároveň nabíjet připojená zařízení standardní napěťovou úrovní 5 V i dalšími napěťovými úrovněmi, musí disponovat dvěma nezávislými měniči napětí: Jeden připojený ke konektorům USB A a druhý podporující i další napěťové úrovně připojený ke konektoru USB-C; konektor bude spolu s měničem zároveň použit pro nabíjení akumulátoru power banky; tento měnič je tedy obousměrný. Pro zajištění komunikace v rámci rychlého nabíjení bude použit USB-C kontrolér komunikující s připojeným zařízením přes USB-C propojovací kabel. Pro podporu bezdrátového nabíjení bude power banka vybavena vysílačem pro bezdrátové nabíjení včetně vysílací cívky. „Mozek“ power banky, mikrokontrolér, se bude starat o řízení veškerých procesů, např. nabíjení akumulátoru power banky, zapínání/vypínání/řízení DC/DC měničů nebo monitorování stavu bezdrátového nabíjení apod. Ke komunikaci ostatních integrovaných obvodů s mikrokontrolérem bude použita sběrnice I²C, případně standardní vstupní/výstupní vývody mikrokontroléru. K napájení mikrokontroléru a dalších integrovaných obvodů (IO) bude využit lineární stabilizátor napětí. Zjednodušené přehledové schéma zapojení power banky je zobrazeno na obr. 2.1. Pro umožnění interakce uživatele s power bankou bude power banka disponovat dvěma tlačítky připojenými k mikrokontroléru a malým displejem, kde budou zobrazeny základní údaje o stavu power banky (tlačítka a displej nejsou v přehledovém schématu uvedeny).



Obrázek 2.1: Přehledové schéma zapojení power banky.

Kapitola 3

Akumulátory

Akumulátory slouží k uchování elektrické energie, akumulátor tvoří základní součást power banky. V power bankách bývají obvykle instalovány lithiové (resp. Li-Ion) akumulátory, běžně používané akumulátory jsou pak kromě lithiových také olovené akumulátory a Ni-MH (a dříve Ni-Cd) akumulátory. V některých aplikacích lze akumulátory nahradit superkondenzátory.

V této kapitole budou stručně popsány základní vlastnosti výše zmíněných akumulátorů a superkondenzátorů, dále budou uvedeny způsoby odhadu míry nabití akumulátoru a způsoby balancování jednotlivých článků akumulátoru (či baterie složené ze superkondenzátorů). V tab. 3.1 je pak k dispozici srovnání základních parametrů výše uvedených akumulátorů (a superkondenzátorů).

3.1 Olovený akumulátor

Olovený akumulátor byl první typ akumulátoru používaný v komerční sféře, přesto i dnes se ve velké míře olovené akumulátory používají. Své uplatnění nacházejí především v automobilech jako statovací akumulátory či v různých záložních zdrojích (UPS) pro napájení elektronických zařízení při výpadku elektrické energie. Olovené akumulátory se skládají z elektrod vyrobených z olovnaté oceli (s příměsmi vápníku, antimonu nebo jiných prvků) a kapalného elektrolytu (u klasických olovených akumulátorů), elektrolytu absorbovaného ve skelných vláknech (v AGM olovených akumulátorech) či s elektrolytem v podobě gelu (gelové olovené akumulátory). Olovené akumulátory mají nominální napětí

2 V na článek, disponují relativně malým počtem nabíjecích cyklů (obzvláště při hloubce vybití blíží se 100 %) a malou hustotou akumulované energie, nicméně jsou schopny krátkodobě dodávat velké proudy. Vyžadují skladování v nabitěm stavu. [1], [2],

3.2 Ni-MH a Ni-Cd akumulátory

Další používaný typ akumulátoru je nikl-kadmiový (Ni-Cd) akumulátor a jeho náhrada, nikl-metal hydridový (Ni-MH) akumulátor. Oba tyto akumulátory mají nominální napětí 1,2 V na článek. Nikl kadmiový akumulátor je charakteristický pro svou odolnost a spolehlivost, schopnost dodávat velké vybíjecí proudy (a schopnost relativně rychlého nabití) či možnost skladování ve vybitěm stavu. Mezi nevýhody tohoto typu akumulátoru patří nízké množství akumulované energie, paměťový efekt, velké samovybití nebo toxicita akumulátoru. [1], [3]

Nikl-metal hydridový akumulátor není toxický, v porovnání s Ni-Cd akumulátorem umožňuje akumulovat větší množství energie, disponuje však nižším počtem nabíjecích cyklů a nižšími vybíjecími proudy. Dnes již existují Ni-MH akumulátory se sníženým samovybitím (např. značka akumulátoru Eneloop firmy Panasonic), ovšem za cenu mírného snížení kapacity akumulátoru. Nikl-metal hydridové články bývají často používány jako náhrada za klasické alkalické články (typu AA, AAA apod.) Existují též další akumulátory využívající nikl (např. Ni-Fe či Ni-Zn akumulátory), ty však v současnosti nejsou běžně používány. [1], [3]

3.3 Lithiové akumulátory

Dnes nejběžněji používaný typ akumulátoru je lithium-iontový (Li-Ion) akumulátor. Li-Ion akumulátor má nominální napětí kolem 3,7 V, tj. nejvyšší nominální napětí ze všech zde zmíněných článků. Akumulátor se skládá z anody (složené z porézního uhlíku), katody (složené z oxidů kovů) a elektrolytu (složeného z lithných solí). Pro zlepšení vlastností (především zvýšení množství akumulovatelné energie nebo snížení vnitřního odporu) Li-Ion akumulátorů se přidávají další prvky (kobalt, mangan, nikl). Mezi výhody Li-Ion

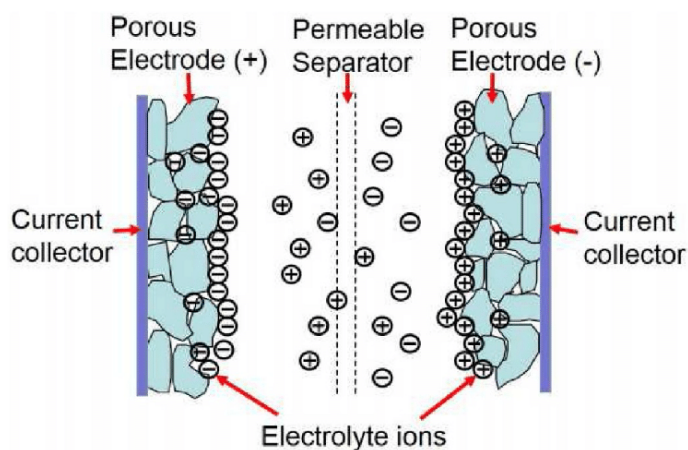
akumulátorů patří velké nominální napětí na článek, velká hustota akumulované energie, nízký vnitřní odpor, krátká doba nabíjení a schopnost dodávat relativně velké proudy. Mezi nevýhody patří nutnost zapojení ochranného obvodu k akumulátoru (např. pro ochranu proti zkratu) nebo nižší provozní rozsah teplot v porovnání s ostatními akumulátory. [1], [4]

Lithium-polymerový akumulátor (označovaný zkratkami Li-Pol či Li-Poly) je typ lithium-iontového akumulátoru. Li-Poly akumulátor se od klasických Li-Ion akumulátorů liší v použitém elektrolytu: Místo kapalného elektrolytu je použit elektrolyt v pevném stavu, v dnešní době doplněný o elektrolyt ve formě gelu. Li-poly akumulátory se vyznačují podobnými parametry jako Li-Ion akumulátory. Li-poly akumulátory nevyžadují na rozdíl od klasických Li-Ion akumulátorů pevné pouzdro pro aplikaci tlaku, díky tomu mohou být tenčí a méně rozměrné (při větší flexibilitě tvaru článku či akumulátoru), což dovoluje použití i v dnešních tenkých chytrých mobilních telefonech, tabletech či noteboocích. [5]

Třetí zde zmíněný typ lithium-iontového akumulátoru je lithium-železo-fosfátový akumulátor (LiFePO_4). Pro tento akumulátor je charakteristický nižší vnitřní odpor v porovnání s klasickými Li-Ion akumulátory, nominální napětí LiFePO_4 článku je ale pouze 3,2 V a množství akumulované energie je nižší než u klasických Li-Ion akumulátorů, dále mají LiFePO_4 články vyšší samovybíjení [1], [6]. LiFePO_4 akumulátory bývají používány např. v domácích instalacích fotovoltaických elektráren pro akumulaci vyrobené elektrické energie.

3.4 Superkondenzátory

Superkondenzátory (nebo také ultrakondenzátory) jsou elektronické součástky sloužící k uchování elektrické energie. Od akumulátorů se liší v principu uchování elektrického náboje: Náboj je uchováván elektrostaticky, nikoliv pomocí elektrochemické reakce. Superkondenzátory dosahují kapacit v řádu jednotek až tisíců Faradů, což je v porovnání s klasickými elektrolytickými kondenzátory zhruba tisíckrát až milionkrát více. Od klasických elektrolytických kondenzátorů se liší zejména v použití porézních materiálů (aktivního uhlíku) pro zvýšení kapacity (jak je znázorněno na obr. 3.1). Maximální napětí superkondenzátoru je obvykle nižší než 2,8 V; pro vyšší napětí je nutné zapojit více superkondenzátorů sériově,



Obrázek 3.1: Znázornění stavby superkondenzátoru, převzato z [7].

přičemž je nutné sledovat napětí na každém ze superkondenzátorů, aby při nabíjení nebylo překročeno jeho maximální napětí. [8], [9]

Tabulka 3.1: Porovnání vlastností akumulátorů a superkondenzátorů; zdroj dat [1], [8].

Akumulátor	Pb	Ni-Cd	Ni-MH	Li-Ion	LiFePO ₄	Superkond.
Nominální napětí (V)	2	1,2	1,2	3,6 - 3,8	3,2	- (do 2,7)
Hust. akum. energie (Wh/kg)	30 - 50	45 - 80	60 - 120	100 - 250	90 - 120	typ. 5
Vybíjecí proud (max)	0,2 C (5 C)	1 C (20 C)	0,5 C (5 C)	1 C (10 C)	10 C (30 C)	-
Počet cyklů	200 - 300	1 000	300 - 500	500 - 1 000	1 000 - 2 000	1 000 000

Protože superkondenzátory disponují téměř neomezeným počtem nabíjecích cyklů a na rozdíl od akumulátorů umožňují rychlé vybití a nabití, používají se zejména tam, kde je úložiště elektrické energie často a rychle nabíjeno a vybité, například v systémech KERS (Kinetic Energy Recovery System) pro ukládání energie při rekuperačním brzdění vozidla a využití této energie později při akceleraci. V porovnání s akumulátory jsou superkondenzátory schopny snášet velké rozsahy teplot při provozu. Mezi nevýhody superkondenzátorů patří velké samovybití, relativně malé množství akumulované energie, cena a také fakt, že napětí na superkondenzátoru se při nabíjení či vybití pohybuje v plném rozsahu hodnot (tj. od nuly do maximálního dovoleného napětí): Např. Li-Ion akumulátor má ve vybitém

stavu napětí kolem 3 V, na superkondenzátoru je ve vybitém stavu nulové napětí. Pro využití maximálního množství akumulované energie je nutné použít k tomu určený měnič napětí. [8], [9]

3.5 Odhad míry nabití

Míra nabití (SoC, State of Charge) je veličina udávající poměr zbývající kapacity akumulátoru k celkové kapacitě akumulátoru, bývá udávána v procentech (0 % = plně vybitá baterie, 100 % = plně nabitá baterie).

Míru nabití lze určit jednoduše pomocí změření napětí akumulátoru bez zatížení; z charakteristiky napětí naprázdno pro konkrétní akumulátor lze určit míru nabití. Pro přesný odhad míry nabití by akumulátor před změřením napětí měl být ponechán alespoň několik hodin bez nabíjení nebo zátěže. U lithiových akumulátorů komplikuje zjištění míry nabití relativně plochá vybíjecí charakteristika. [10]

Další metoda zjišťování míry nabití akumulátoru je pomocí hustoměru. Tato metoda lze použít pouze u akumulátorů s kapalným elektrolytem a zaplavenými elektrodami, typicky u olověných akumulátorů. Z hustoty elektrolytu lze odvodit míru nabití (u olověných akumulátorů odpovídá hustota elektrolytu nad cca 1,265 g/cm³ plně nabitému akumulátoru (resp. článku akumulátoru), hustota elektrolytu pod 1,12 g/cm³ odpovídá plně vybitému akumulátoru (hodnoty závisí na konkrétním typu olověného akumulátoru). Pro zpřesnění metody je zapotřebí před měřením hustoty elektrolytu ponechat akumulátor bez zátěže nebo nabíjení alespoň několik hodin. [10]

Další používaná metoda odhadu míry nabití se nazývá Coulomb Counting. Spočívá v měření proudu tekoucího do/z akumulátoru a vychází z dané kapacity akumulátoru v Ah: Při toku proudu do akumulátoru je přičtena dodaná kapacita do akumulátoru, při toku proudu z akumulátoru je odečtena odebraná kapacita z akumulátoru, přičemž míra nabití odpovídá poměru zbývající (nevyčerpané) kapacity akumulátoru k jeho celkové kapacitě. Kapacita akumulátoru obvykle není konstantní (se stářím akumulátoru a s rostoucím odebíraným proudem klesá), proto při kompletním vybití/nabití akumulátoru může dojít ke zkalkulování aktuální hodnoty celkové kapacity akumulátoru pro zpřesnění měření. [10]

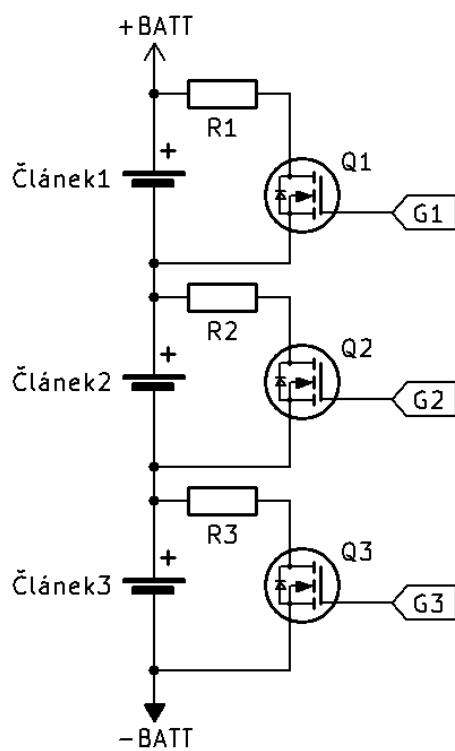
Poslední zde uvedená metoda se nazývá impedanční spektroskopie. Tato metoda dokáže pomocí střídavého signálu o frekvencích v rozsahu jednotek Hz až jednotek kHz přivedeného na vývody akumulátoru odhadnout nejen míru nabití akumulátoru, ale i „zdraví“ akumulátoru (SoH, State of Health): Tyto údaje lze určit z průběhu reálné a imaginární složky impedance v závislosti na frekvenci. V porovnání s ostatními zde zmíněnými metodami je impedanční spektroskopie poměrně komplikovaná na vyhodnocení, běžně se tedy nepoužívá. Své použití nachází v oblastech, kde je důležitá bezpečnost provozu akumulátoru a predikovatelnost jeho vlastností, např. v leteckém průmyslu. [11]

3.6 Balancování článků

U některých typů akumulátorů (typicky lithiových) je při sériovém nebo sérioparalelním zapojení článků nutné monitorovat napětí jednotlivých článků. Při větším rozdílu napětí mezi jednotlivými články je pak nutné tento rozdíl vyrovnat, aby nedošlo k přebíjení článků s vyšším napětím nebo k hlubokému vybíjení článků s nižším napětím; pro eliminaci rozdílu napětí mezi jednotlivými články slouží tzv. balancování článků.

Balancování článků můžeme dělit dle způsobu realizace: Balancování jednotlivých článků může být realizováno pomocí paralelně připojovaných rezistorů k jednotlivým článkům (viz obr. 3.2); na rezistorech, které jsou přes tranzistory připojeny k článkům, je za předpokladu sepnutého tranzistoru mařena energie článků, které vykazují vyšší míru nabití (vyšší napětí) v porovnání s ostatními články. Druhá možnost je použití měniče, který využije energii uloženou v akumulátoru k nabíjení článků s nižší mírou nabití, v podstatě se tak jedná o redistribuci náboje a k maření akumulované energie nedochází, resp. ztráty jsou dány zejména účinností použitého měniče. [12]

Balancování jednotlivých článků může probíhat pouze při nabíjení (nebo pouze při vysoké míře nabití akumulátoru) nebo i při vybíjení. Obvykle je balancování aktivováno při překročení daného rozdílu napětí jednotlivých článků. [12]



Obrázek 3.2: Příklad zapojení balancování sériově zapojených článků akumulátoru za pomoci rezistorů a tranzistorů MOSFET.

Kapitola 4

DC/DC měniče

DC/DC měniče tvoří základní součást každé powerbanky. DC/DC měniče slouží ke konverzi stejnosměrného napětí, z hlediska principu funkce je můžeme dělit na lineární a spínané. Lineární měniče (či lineární stabilizátory) jsou schopny napětí pouze snižovat a obvykle mají nižší účinnost než spínané měniče; na rozdíl od spínaných měničů obvykle vyzařují méně rušení. Spínané měniče můžeme dělit na obvody se spínanými kondenzátory (typicky používány pro malé proudy a výkony) či induktory. Měníče s induktory můžeme dále dělit dle výkonu, galvanického oddělení primární a sekundární strany (měniče s transformátory) nebo dle vztahu vstupního a výstupního napětí (snižující, zvyšující, invertující). (Podrobnosti viz např. literatura [13].)

Dle zkušeností autora bývají v powerbankách, obzvláště těch levnějších, běžné topologie měničů (snižující či zvyšující s induktorem, popř. lineární), což ostatně potvrzuje i literatura [14], [15], [16], [17]. Pro nabíjení obvykle Li-Ion akumulátoru o nominálním napětí zhruba 3,7 V z USB zdroje 5 V bývá použit buď lineární měnič nebo spínaný snižující měnič, pro napájení připojeného zařízení slouží zvyšující měnič, který mění napětí akumulátoru na přibližně 5 V. Pokud power banka podporuje i jiné napěťové úrovně výstupního napětí, než jen 5 V (typicky 9 V a 12 V), může být použito stejné zapojení měničů, nebo, pokud má akumulátor vždy větší napětí než nejvyšší podporované výstupní napětí (typické pro power banky se čtyřmi lithiovými články v sérii), je použit snižující měnič pro napájení připojeného zařízení a zvyšující měnič pro nabíjení akumulátoru. Pro nabíjení akumulátoru i napájení připojeného zařízení může být použit jeden a ten samý měnič, jak je uvedeno

v následující podkapitole.

Pro power banku, která má být schopna dodávat na výstup napětí v širokém rozsahu hodnot (např. 5 V až 20 V) při výkonech až desítek Wattů (viz zadání této práce), snižující/zvyšující měnič není vhodný: Akumulátor by musel mít vždy buď nižší napětí než všechna podporovaná výstupní napětí (tj. napětí menší než 5 V), což by znamenalo velké proudy tekoucí akumulátorem; nebo by akumulátor musel mít vždy vyšší napětí, než je nejvyšší podporovaná hodnota výstupního napětí (tj. více než 20 V) - to by znamenalo velké množství sériově zapojených článků, což by zesložitovalo návrh power banky (balancování velkého množství článků za předpokladu použití lithiového akumulátoru, používání IO dimenzovaných na vyšší napájecí napětí apod.). V dalších podkapitolách jsou tedy kromě snižujícího/zvyšujícího zapojení měniče uvedeny další tři topologie, které jsou potenciálně vhodné pro power banky s širokým rozsahem výstupních napětí.

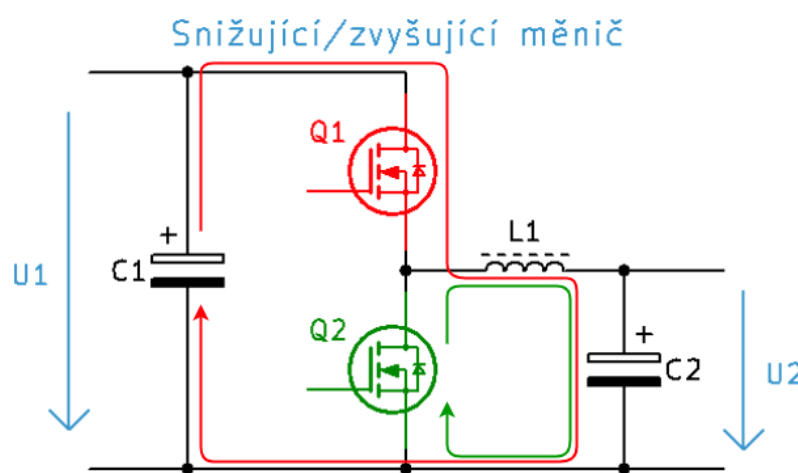
4.1 Snižující/zvyšující měnič

Schéma zapojení snižujícího/zvyšujícího měniče je zobrazeno na obr. 4.1. Barevné šipky značící směr toku proudu při sepnutí jednotlivých spínacích tranzistorů odpovídají provozu měniče ve snižujícím režimu (zdroj napětí připojen k C_1 , zátěž připojena k C_2). Při sepnutí Q_1 teče vzrůstající proud z kondenzátoru C_1 induktorem L_1 , v induktoru dochází k akumulaci energie v podobě magnetického pole a zároveň je nabíjen kondenzátor C_2 . Po vypnutí tranzistoru Q_1 a sepnutí Q_2 se proudová smyčka uzavře přes součástky Q_2 , L_1 a C_2 ; proud tekoucí L_1 bude klesat, dokud nedojde k rozepnutí Q_2 a sepnutí Q_1 . Pro zvyšující režim budou platit obrácené směry proudů, než je uvedeno v obr. 4.1, přičemž zdroj napětí bude připojen ke kondenzátoru C_2 , zátěž bude připojena k C_1 . Hodnoty napětí U_1 resp. U_2 při provozu měniče v CCM módu lze přibližně určit ze vztahu 4.1:

$$\frac{U_2}{U_1} = D, \quad (4.1)$$

kde

$$D = \frac{t_1}{T}; \quad (4.2)$$



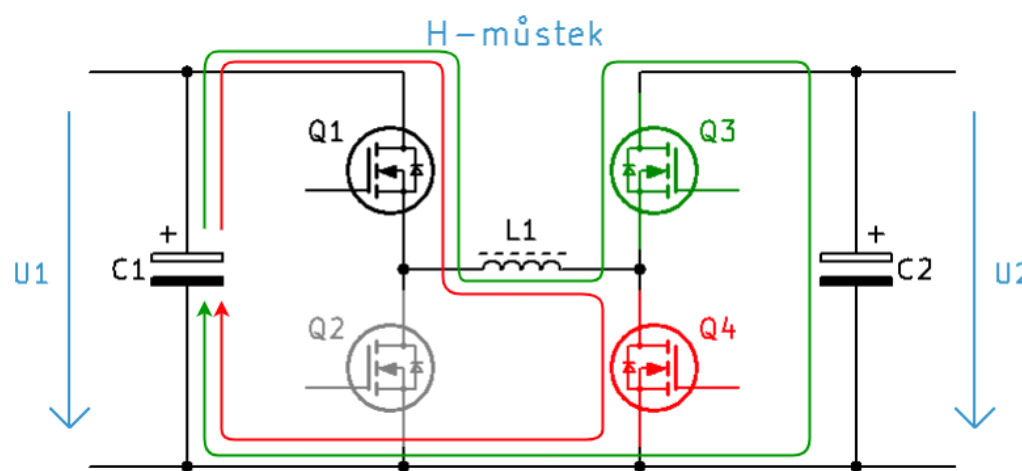
Obrázek 4.1: Schéma zapojení snižujícího/zvyšujícího měniče.

D je střída signálu pro řízení Q_1 , t_1 je doba sepnutí Q_1 a T je perioda spínání. (Pro platnost vztahu předpokládáme, že je vždy právě jeden tranzistor sepnutý; uvažujeme tedy nulový dead time a ideální součástky.)

Jako výhodou tohoto zapojení lze uvést relativní jednoduchost a potřebu minimálního množství součástek k realizaci. Pokud je však vstup měniče připojen k C_2 , pak je při napětí na vstupu měniče automaticky napětí i na výstupu měniče (z důvodu přítomnosti vnitřní diody v tranzistoru Q_1). Z toho též plyne, že měnič není zkratuvzdorný. V porovnání s dalšími uvedenými zapojeními tento měnič umožňuje snižovat napětí pouze v jednom směru a zvyšovat napětí v opačném směru, vždy tedy platí, že $U_1 \geq U_2$.

4.2 H-můstek

Schéma zapojení měniče v H-můstku je zobrazeno na obr. 4.2. Zapojení je v principu podobné zapojení snižujícího/zvyšujícího měniče s tím rozdílem, že místo dvou spínacích tranzistorů využívá čtyři tranzistory. Toto zapojení umožňuje snižovat i zvyšovat napětí v obou směrech. Na obr. 4.2 jsou barevně znázorněny proudové smyčky při sepnutí tranzistoru Q_3 resp. Q_4 ve zvyšujícím módu (zdroj napětí připojen k C_1 , zátěž připojena k C_2 ; $U_2 > U_1$). Q_1 na obrázku je trvale sepnutý, Q_2 (šedou barvou) trvale rozepnutý. Pro každý mód (zvyšující i snižující) bude vždy jedna dvojice tranzistorů (tj. Q_1 a Q_2 nebo Q_3 a Q_4) řízena komplementárními PWM signály a horní spínací tranzistor z druhé dvojice



Obrázek 4.2: Schéma zapojení měniče v H-můstku.

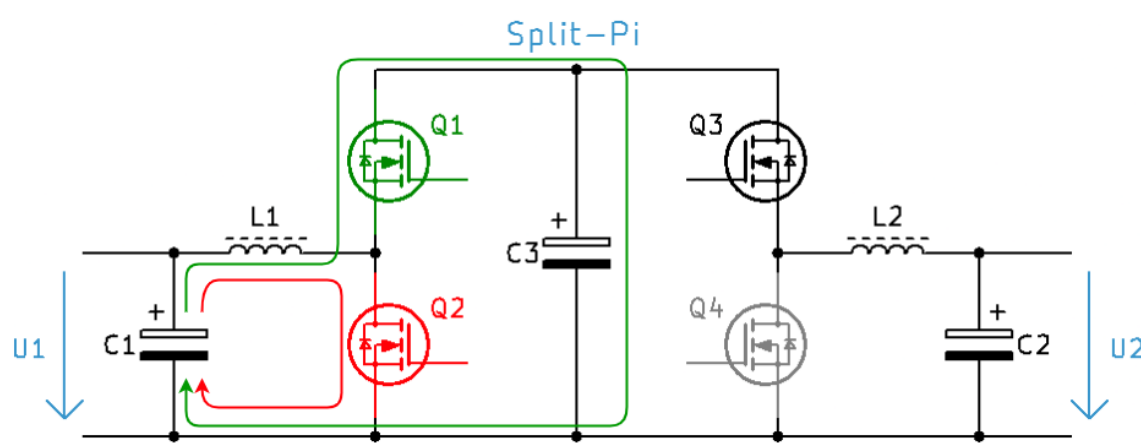
bude trvale sepnutý, spodní tranzistor pak trvale rozepnutý. Řízení spínacích tranzistorů pro různá napětí U_1 a U_2 je uvedeno v tab. 4.1.

Tabulka 4.1: Řízení spínacích tranzistorů měniče v topologii H-můstku pro různá napětí U_1 a U_2 .

Porovnání napětí	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄
$U_1 > U_2$	PWM	PWM	on	off
$U_1 < U_2$	on	off	PWM	PWM

4.3 Split-Pi

Schéma zapojení měniče v topologii Split-Pi je k dispozici na obr. 4.3. Zapojení se skládá ze dvou za sebou řazených snižujících/zvyšujících měničů, mezi něž je připojen kondenzátor C_3 ; zapojení tedy také využívá čtyři spínací tranzistory. Tento typ měniče je schopen zvyšovat i snižovat napětí v obou směrech. Na obr. 4.3 je uvedena orientace proudových smyček při zvyšování napětí (zdroj napětí je připojen k C_1 , zátěž je zapojena k C_2) pro spínací tranzistory Q_1 a Q_2 ; spínací tranzistor Q_3 je pro tento případ trvale sepnut, tranzistor Q_4 (znázorněn šedou barvou) pak trvale rozepnut. Pro každý mód (zvyšující i snižující) bude vždy jedna dvojice tranzistorů (tj. Q_1 a Q_2 nebo Q_3 a Q_4) řízena komplementárními PWM signály a horní spínací tranzistor z druhé dvojice bude trvale sepnutý, spodní tranzistor pak trvale rozepnutý. Řízení spínacích tranzistorů pro různá napětí U_1 a U_2 je uvedeno v tab. 4.2. Toto zapojení má v porovnání s ostatními



Obrázek 4.3: Schéma zapojení měniče v topologii Split-Pi; zapojení převzato z [18].

zde uvedenými zapojeními jako jediné LC filtr na obou stranách, což omezuje šíření rušení generovaného spínáním tranzistorů na vstup/výstup měniče.

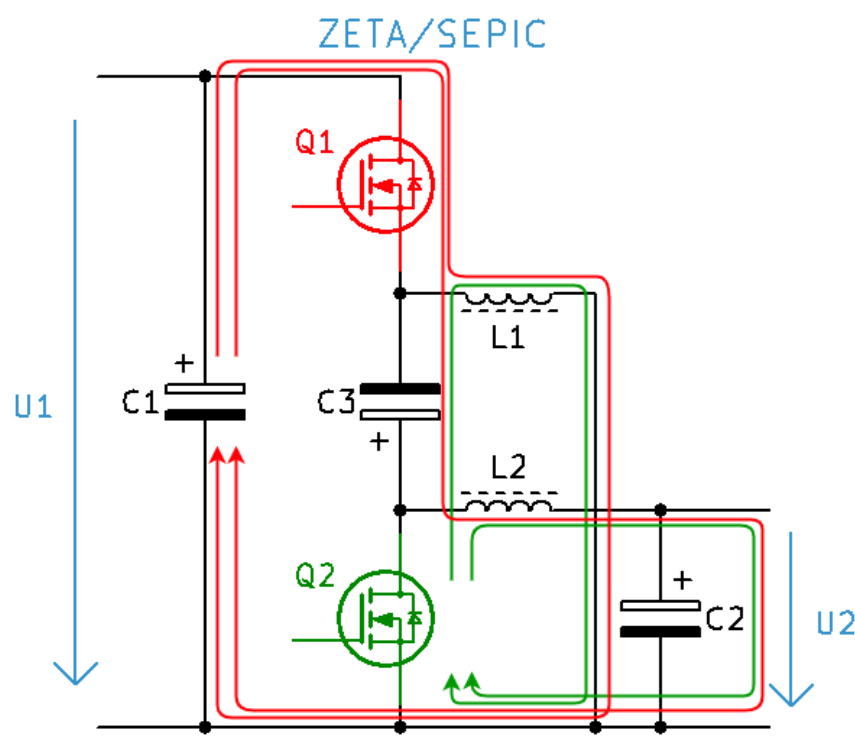
Tabulka 4.2: Řízení spínacích tranzistorů měniče v topologii Split-Pi pro různá napětí U_1 a U_2 .

Porovnání napětí	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
$U_1 < U_2$	PWM	PWM	on	off
$U_1 > U_2$	on	off	PWM	PWM

4.4 ZETA/SEPIC

Schéma zapojení měniče v topologii ZETA/SEPIC je uvedeno na obr. 4.4, zapojení využívá pouze dva spínací tranzistory. Induktory L_1 a L_2 mohou být při stejném počtu závitů umístěny na společném jádru, poté dojde ke snížení potřebné indukčnosti L_1 a L_2 na poloviční hodnotu při stejném zvlnění proudu induktory [19]. Zapojení umožňuje zvyšovat i snižovat napětí v obou směrech. Na obr. 4.4 jsou uvedeny proudové smyčky pro topologii ZETA (tzn. zdroj napětí je připojen k C_1 , zátěž k C_2) při sepnutí konkrétního spínacího tranzistoru; pro topologii SEPIC (tj. zdroj napětí připojen k C_2 , zátěž k C_1) by proudové smyčky směřovaly opačným směrem. Poměr napětí U_2 a U_1 při dané střídě signálu D spínacího tranzistoru Q_1 lze zjistit ze vztahu 4.3 (převzato z [19]):

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{D}{1-D}, \quad (4.3)$$



Obrázek 4.4: Schéma zapojení měniče v topologii ZETA/SEPIC; zapojení převzato z [19]

kde

$$D = \frac{t_1}{T}; \quad (4.4)$$

t_1 je doba sepnutí Q_1 a T je perioda spínání. (Pro platnost vztahu předpokládáme, že je vždy právě jeden tranzistor sepnutý; uvažujeme tedy nulový dead time a ideální součástky.) Na rozdíl od všech ostatních zmíněných zapojení musí být spínací tranzistory měniče v topologii ZETA/SEPIC dimenzovány na součet vstupního a výstupního napětí.

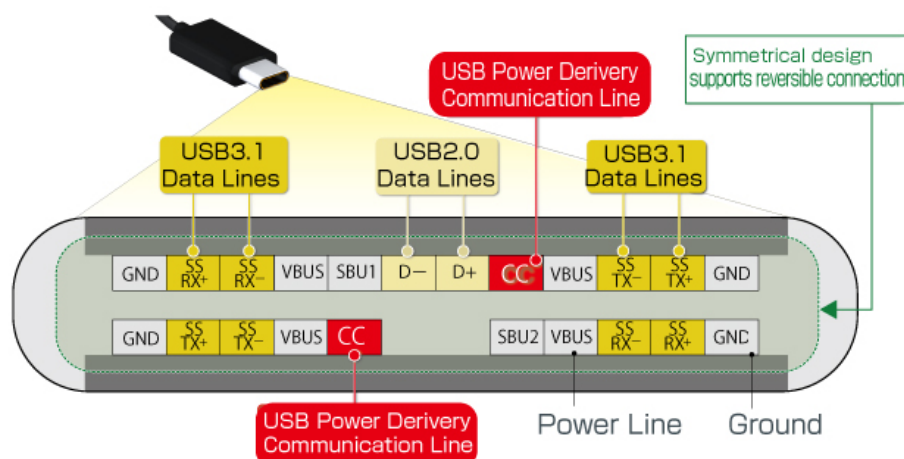
Kapitola 5

Rychlé nabíjení

Pod pojmem rychlé nabíjení (v angličtině Fast Charging či Quick Charging) je obvykle myšleno nabíjení chytrých mobilních telefonů z „nabíječek“, které mohou dodávat vyšší napětí a proud, než je určuje standard USB, což umožňuje rychlejší nabití akumulátoru připojeného zařízení. Rychlé nabíjení funguje na principu domluvy nabíjeného zařízení a zdroje energie na hodnotě dodávaného napětí a proudu. Zřejmě nejpoužívanější standardy rychlého nabíjení jsou standardy Qualcomm Quick Charge a USB Power Delivery. V následujících odstavcích budou popsány základní informace o standardech Qualcomm Quick Charge a USB Power Delivery.

5.1 Qualcomm Quick Charge

Standard Qualcomm Quick Charge stanovuje komunikaci mezi nabíjeným zařízením a zdrojem energie. Nabíjené zařízení si může zvolit některou z podporovaných úrovní napětí (typicky 5 V, 9 V nebo 12 V, případně napětí v rozsahu 3,6 V až 20 V, dle verze Quick Charge zdroje energie, resp. nabíjeného zařízení) pomocí komunikace přes datové vodiče D+ a D-. Od verze Qualcomm Quick Charge 4.0 je tento protokol zpětně kompatibilní s protokolem USB Power Delivery, což znamená, že např. chytrý mobilní telefon je možné propojit s „nabíječkou“ podporující protokol USB Power Delivery. [20]



Obrázek 5.1: Zapojení USB-C konektoru, převzato z [22]

5.2 USB Power Delivery

Standard USB Power Delivery stanovuje komunikaci mezi zařízeními propojenými pomocí kabelu s USB-C konektory na obou stranách. Komunikace slouží ke zvolení napájecího napětí a proudu pro napájené zařízení a směru toku energie. Komunikace je zajištěna přes vývody CC1 a CC2 (resp. CC a VCONN) USB-C konektoru, viz obr. 5.1. Po propojení dvou zařízení detekuje zdroj energie připojený spotřebič, odešle podporované napěťové a proudové úrovně; spotřebič potvrdí příjem odesláním zprávy s žádostí o dodávku elektrické energie s některou z podporovaných úrovní napětí a proudu. Po přijetí této zprávy zdrojem energie odešle spotřebiči potvrzení přijetí této žádosti a zprávu o tom, že zdroj energie je připraven zahájit dodávku energie s dohodnutou úrovní napětí a proudu. V rámci komunikace mezi propojenými zařízeními dochází k odesílání paketů skládajících se z preambule, začátku paketu, hlavičky, vlastních dat, cyklického redundantního součtu (CRC, Cyclic Redundancy Check) a konce paketu. [21]

Standardně definované napěťové úrovně jsou 5 V, 9 V, 15 V a 20 V. Je též možné použít další napěťové úrovně, typicky 12 V. Standard Power Delivery umožňuje přenášet výkony až 100 W (20 V, 5 A) při použití kompatibilního propojovacího kabelu. V rámci tohoto standardu je též definován mód volitelného zdroje napětí a proudu (PPS, Programmable Power Supply), při jehož aktivaci si napájené zařízení může zvolit požadovanou napěťovou

a maximální požadovanou proudovou úroveň v rozsazích napětí, které napájecí zařízení podporuje (max. rozsah napětí je 3,3 V až 21 V) s krokem 50 mV, resp. 10 mA. [21]

Standard Power Delivery je v dnešní době používán v některých chytrých mobilních telefonech, tabletech či noteboocích. USB-C připojení s podporou Power Delivery standardu se začíná používat i v monitorech, které lze přes USB-C propojit s notebookem, lze tak využít alternativní módy, které USB-C nabízí, pro přenos (video)signálu (a protokolu Power Delivery pro přenos elektrické energie) mezi notebookem a monitorem. USB Power Delivery také nachází místo v příslušenstvích k notebookům, např. v USB rozbočovačích. Díky implementaci tohoto protokolu lze např. pro případ výpadku dodávek elektrické energie u síťově napájeného USB rozbočovače pomocí USB Power Delivery protokolu iniciovat dodávku energie pro provoz USB rozbočovače a k němu připojených zařízení z (akumulátoru) notebooku; nedojde tak k výpadku připojení zařízení zapojených v USB rozbočovači.

Kapitola 6

Bezdrátový přenos energie

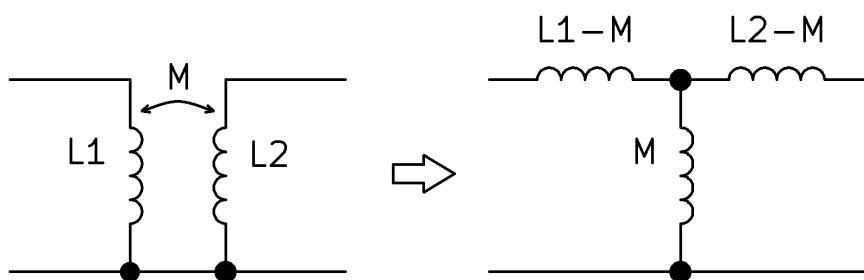
Bezdrátový přenos energie je v dnešní době hojně využíván. Využití nachází např. pro dobíjení drobné elektroniky či v oblasti energy harvesting, výzkum se ale zaměřuje i na oblast výkonové elektroniky, konkrétně např. na bezdrátové dobíjení elektromobilů. Přenos energie může být realizován kapacitní či induktivní vazbou (s využitím rezonance) nebo např. radiovými (RF) signály. Tato kapitola stručně popíše a uvede základní vlastnosti bezdrátového přenosu energie pomocí induktivní vazby (s využitím rezonance) a bezdrátového přenosu pomocí RF signálů.

6.1 Přenos pomocí induktivní vazby

Přenos pomocí induktivní vazby je založen na tom, že (proměnný) proud induktorem L_1 indukuje (přes induktorem L_1 generované proměnné magnetické pole) napětí v induktoru L_2 za předpokladu, že induktory L_1 a L_2 mají nenulovou vzájemnou indukčnost M , resp. nenulový činitel vazby k , viz vzorec 6.1 (převzato z [23]):

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}, \quad (6.1)$$

kde L_1 je indukčnost induktoru L_1 a L_2 je indukčnost induktoru L_2 . Induktivní vazba se pro bezdrátový přenos používá na vzdálenosti jednotek až desítek centimetrů (v závislosti na průměru vysílací, resp. přijímací cívky) na frekvencích od zhruba jednotek kHz. Mezi výhody tohoto způsobu přenosu patří vysoká účinnost přenosu při malých vzdálenostech



Obrázek 6.1: Induktory L_1 , L_2 a vzájemná indukčnost M .

mezi cívkami, praktičnost a bezpečnost. S rostoucí vzdáleností mezi vysílací a přijímací cívkou (nebo pokud jsou vůči sobě cívky pootočený či posunutý) účinnost přenosu proudu klesá, resp. dochází ke snížení činitele vazby k , resp. vzájemné indukčnosti M . [23, 24]

Na obr. 6.1 jsou zobrazena dvě ekvivalentní zapojení vázaných induktorů L_1 a L_2 se vzájemnou indukčností M . Z obrázku je také patrné, že s klesající vzájemnou indukčností M roste vliv impedancí L_1 a L_2 a napětí indukované na přijímací cívce se stává „měkké“.

6.2 Přenos s využitím rezonance

Pro kompenzaci rostoucího vlivu vlastní indukčnosti induktorů L_1 a L_2 z obr. 6.1 při snižující se vazbě mezi induktory lze využít rezonanci. Impedance induktorů L_1 a L_2 pro daný pracovní kmitočet lze kompenzovat impedancí opačnou, tedy použitím kondenzátoru. Pracovní kmitočet f_r (nazývaný rezonanční) je určen vztahem 6.2:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}, \quad (6.2)$$

kde L je indukčnost induktoru a C je kapacita kondenzátoru dohromady formující rezonanční obvod. Vysílač a přijímač je tvořen vysílací, resp. přijímací cívkou L a kondenzátorem C . Resonanční frekvence vysílacího i přijímacího LC obvodu je shodná. Pracovní frekvence bývá typicky v řádu MHz. [24]

Mezi výhody přenosu energie s využitím rezonance patří možnost nabíjení zařízení při větší vzdálenosti vysílače a přijímače než při čistě induktivní vazbě (dosah je obvykle několik centimetrů až několik metrů v závislosti na průměru vysílací, resp. přijímací cívky), vyšší

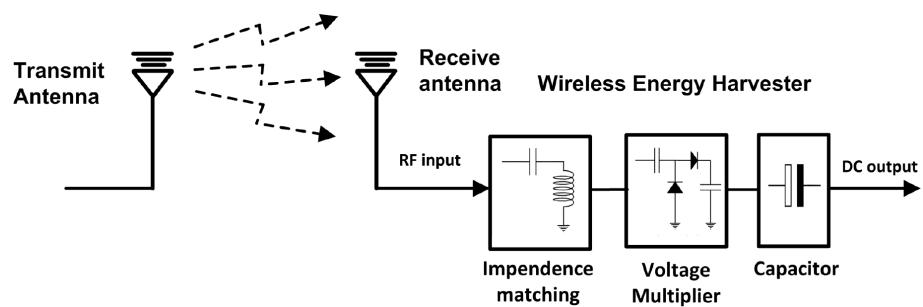
účinnost přenosu v porovnání s čistě induktivní vazbou při přenosu na stejnou vzdálenost a také fakt, že vysílač a přijímač na sebe nemusí přímo vidět, nebo že pomocí jednoho vysílače lze napájet více přijímačů. Za nevýhody lze považovat např. složitější implementaci. [23]

6.3 Přenos energie radiovými signály

Přenos energie pomocí radiových signálů se uplatňuje na frekvencích v rozsahu zhruba 300 MHz až 300 GHz na vzdálenosti obvykle desítek metrů až jednotek kilometrů. Přenášené výkony však bývají velmi nízké, obvykle řádově méně než 100 μW . Též účinnost takového přenosu energie je obvykle nízká. Většinou ale není nutná přímá viditelnost vysílače a přijímače. Získávání energie z radiových signálů je jeden ze způsobů získávání energie v oblasti energy harvesting (příklad zapojení jednoduchého energy harvesteru pro konverzi energie radiových signálů na elektrickou energii je na obr. 6.2). [23, 25]

Pro zvýšení účinnosti přenosu a větší množství získané energie je možné uplatnit tzv. Beamforming (tj. koncentrování energie RF signálu do oblasti umístění přijímače, resp. energy harvesteru). Princip Beamformingu je popsán v následujícím odstavci na příkladu zařízení komunikujícího a napájeného pomocí Wi-Fi.

Aby mohl vysílač energie (v tomto případě Wi-Fi přístupový bod - Acces Point, AP) směřovat signál do místa výskytu energy harvesteru, tj. přijímače Wi-Fi signálu, je nutná obousměrná komunikace energy harvesteru a AP pro určení polohy energy harvesteru. Energy harvester vyšle „ping“ paket přístupovému bodu (Acces Pointu – AP). AP zjistí směr, ze kterého byl signál odeslán, a odpoví na „ping“ paket. Dále odešle fiktivní data (sloužící pro dodání energie přijímači) ve směru daného energy harvesteru tak, aby v místě, kde se energy harvester nachází, byla hodnota energie signálu co nejvyšší. Aby bylo možné určit směr, ze kterého byl signál přijat, a zároveň odeslat signál ve stejném směru, je zapotřebí AP s více anténami (typicky 4 až 8). [25]



Obrázek 6.2: Základní zapojení energy harvesteru pro konverzi energie RF signálů na elektrickou energii, převzato z [24]

Kapitola 7

Standardy bezdrátového nabíjení

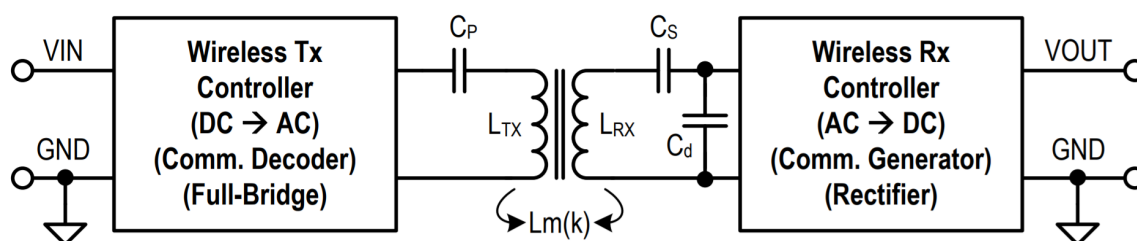
Standardy bezdrátového nabíjení stanovují komunikaci vysílače a přijímače bezdrátového nabíjení. Mezi tři nejrozšířenější standardy pro bezdrátové nabíjení patří standardy Qi, Rezence (A4WP) a PMA. Zřejmě nejrozšířenější v oblasti nabíjení chytré elektroniky je standard Qi. V následujících podkapitolách bude popsán standard bezdrátového nabíjení Qi, dále budou uvedeny základní informace o standardech Rezence a PMA.

7.1 Standard Qi

Standard Qi (vyslovováno „čí“) je mezinárodní standard pro bezdrátový přenos energie, resp. bezdrátové nabíjení drobné elektroniky, vyvinutý organizací Wireless Power Consortium. Bezdrátové nabíjení je realizováno pomocí vysílače (powerbanky, nabíjecího stojánku či podložky) a přijímače (chytrého mobilního telefonu, chytrých hodinek apod.) Přenos výkonu je založen na principu induktivní vazby. Hodnota přenášeného výkonu může být až 5 W v režimu BPP (Baseline Power Profile) a až 15 W v režimu EPP (Extended Power Profile). [26]

7.1.1 Přenos energie

O generování potřebného výkonu se stará vysílač sestávající se z napájecího zdroje, řídicího IO, spínacích tranzistorů (diskrétních či integrovaných v IO, obvykle v můstkovém zapojení, případně zapojených v polovičním můstku) a rezonančního LC obvodu tvořeného



Obrázek 7.1: Zjednodušený model systému bezdrátového nabíjení, převzato z [28].

kondenzátorem a induktorem v podobě vysílací cívky¹. Ze stejnosměrného napájecího napětí jsou pomocí spínacích tranzistorů generovány obdélníkové pulzy o frekvenci v rozsahu typicky 87 kHz až 205 kHz [26]. Přijímač se skládá z rezonančního LC obvodu (sériový a paralelní kondenzátor a induktor v podobě přijímací cívky), (synchronního) usměrňovače a řídicího IO.

Přenos výkonu probíhá pomocí induktivní vazby mezi vysílací a přijímací cívkou. (Princip přenosu výkonu je zobrazen na obr. 7.1.) Od klasických měničů s transformátorem se toto zapojení liší zejména značně nižším činitelem vazby k , pohybujícím se obvykle kolem hodnoty 0,4. Regulace přenášeného výkonu je možná změnou střídy signálu řídicího spínací tranzistoru, změnou frekvence, fázovým posuvem nebo změnou napájecího napětí. Spínací frekvence by měla být vždy vyšší než rezonanční frekvence LC obvodu, vysílač (ani přijímač) tedy nepracují v rezonanci. [26, 27]

Pro zahájení přenosu výkonu musí vysílač a přijímač absolvovat tuto sekvenci:

- Skenování - vysílač zjišťuje, zda není v blízkosti přijímač (příp. cizí vodivý objekt).
- Ping - po detekování možného přijímače přijímač vysílač vyšle „ping“ paket a čeká na odpověď.
- Identifikace a konfigurace - po odpovědi na „ping“ paket proběhne identifikace přijímače a nastavení potřebných parametrů, např. maximální hodnoty přenášeného výkonu.
- Přenos výkonu - po úspěšné konfiguraci vysílač dodává přijímačem vyžádaný výkon.

Vysílač neustále přijímá kontrolní data od přijímače, na základě nichž přizpůsobuje vysílaný výkon. Pokud dojde k výpadku komunikace (odebrání přijímače), vysílač

¹Standard Qi umožňuje použití více než jedné vysílací cívky [26]. V praxi je tedy možné spínat ty vysílací cívky, které jsou nabíjenému zařízení nejbližší, což snižuje nároky na přesné umístění přijímače bezdrátového nabíjení a zvyšuje vazbu mezi cívkou (cívkami) vysílače a cívkou přijímače.

přenos výkonu ukončí.

Pro případ využití EPP (tj. pro přenášené výkony přesahující hodnotu 5 W) ještě dochází např. k nastavení parametrů FOD (Foreign Object Detection, detekování přítomnosti cizího vodivého objektu) ad. Pro případ chyby v kterékoliv fázi se vysílač vrátí zpět do fáze skenování. [26, 27]

Vysílač používá pro komunikaci FSK modulaci (Frequency-Shift Keying, klíčování frekvenčním posuvem), přijímač používá pro komunikaci s vysílačem ASK modulaci (Amplitude-Shift Keying, klíčování amplitudovým posuvem). Odesílané datové pakety se skládají z preamble, hlavičky, odesílaných dat a kontrolního součtu. [26]

7.1.2 Detekce vložení cizího vodivého objektu

Pokud by při přenosu výkonu došlo k vložení cizího vodivého objektu mezi vysílač a přijímač, mohlo by (vlivem vířivých proudů) dojít k jeho ohřevu na nebezpečně vysokou teplotu. Aby se tomuto předešlo, zjišťuje vysílač přítomnost cizího vodivého objektu (FOD) při přenosu výkonu nebo před započítáním přenosu výkonu, a pokud je přítomen cizí vodivý objekt, dojde k omezení hodnoty vysílaného výkonu nebo ke kompletnímu zastavení přenosu výkonu (v nižších verzích standardu Qi, tj. 1.0 a 1.1, kde FOD není implementována, může být pro zabránění tomuto jevu použito snímání teploty vysílací cívky). Vysílače mohou použít několik metod pro detekci vložení cizího vodivého objektu. [26, 27, 29]

První z metod detekce vložení cizího objektu je založena na změně rezonanční frekvence a činitele jakosti rezonančního LC obvodu (Q-factor method). Vlivem přiblížení cívky přijímače (resp. feritového stínění cívky přijímače) obvykle dojde ke zvýšení indukčnosti vysílací cívky (snížení rezonanční frekvence LC obvodu). Pokud zároveň dojde k vložení cizího vodivého objektu mezi vysílací a přijímací cívku, klesne (vlivem ztrát ve vloženém objektu způsobených vířivými proudy) činitel jakosti rezonančního LC obvodu. Před započítáním přenosu výkonu tedy dojde ke změření a vyhodnocení rezonanční frekvence a činitele jakosti rezonančního LC obvodu vysílače. Pro rozpoznání cizího vloženého vodivého objektu od např. vodivé části krytu mobilního telefonu může vysílač porovnat naměřené údaje s referenčními hodnotami připojeného přijímače (pomocí vzájemné komunikace) a až poté

vyhodnotit, zda je bezpečné zahájit přenos výkonu. Tato metoda neumožňuje detekovat cizí vodivý objekt při přenosu výkonu. [26, 27]

Druhá z metod detekce vložení cizího vodivého objektu, metoda zjišťování ztrátového výkonu (Power Loss Detection, PLD), se uplatňuje až při probíhajícím přenosu výkonu. Je založena na porovnání (odhadované) úrovně výkonu na vstupu přijímače a na výstupu vysílače. Pokud rozdíl výkonu na výstupu vysílače a na vstupu přijímače překročí po určitý čas hodnotu 500 mW, znamená to, že mezi vysílací a přijímací cívkou mohl být vložen cizí vodivý objekt. Z důvodu bezpečnosti tedy dojde k ukončení přenosu výkonu, snížení hodnoty přenášeného výkonu vysílačem nebo k odeslání žádosti, aby přijímač snížil množství spotřebovávané energie. [26, 27]

7.2 Standardy Rezenze a PMA

Standard Rezenze vyvinutý aliancí Alliance for Wireless Power (A4WP, dnes AirFuel Alliance) využívá k bezdrátovému přenosu energie rezonanci. Vysílač i přijímač obsahují rezonanční LC obvod s totožnými parametry. Jeden vysílač je schopen bezdrátově napájet více přijímačů vzdálených od vysílače až jednotky metrů. Použitá frekvence pro přenos energie je 6,78 MHz. Komunikace vysílače a přijímače (pro identifikaci kompatibilních zařízení a řízení bezdrátového přenosu) je realizována pomocí Bluetooth Low Energy (BLE) spojení na frekvenci 2,4 GHz. [24, 30]

Standard PMA vyvinutý aliancí Power Matters Alliance (dnes AirFuel Alliance) využívá induktivní vazby k bezdrátovému přenosu energie. Princip funkce bezdrátového nabíjení je v zásadě podobný standardu Qi, liší se zejména komunikace vysílače a přijímače a rozsah frekvencí pro bezdrátový přenos energie. Některá zařízení (přijímače) mohou podporovat standardy bezdrátového nabíjení Qi i PMA. [24, 30]

Kapitola 8

Výběr akumulátoru, návrh BMS

Akumulátor je klíčová součást powerbanky a na parametrech akumulátoru (např. na jeho kapacitě či dovozených nabíjecích nebo vybíjecích proudech) pak závisí vlastnosti power banky. V rámci této kapitoly bude diskutován výběr akumulátoru s ohledem na jeho parametry a návrh BMS (Battery Management System) pro monitorování napětí jednotlivých článků a jejich balancování.

8.1 Výběr akumulátoru

Vzhledem k tomu, že od power banky je požadována schopnost dodávání až 40 W přes USB-C konektor, aby power banka mohla být použita i pro nabíjení menšího notebooku, měla by být schopna dodat do připojeného spotřebiče dostatečné množství energie (zhruba kolem 35 Wh, což přibližně odpovídá množství akumulovatelné energie akumulátoru menšího notebooku) pro alespoň částečné nabití akumulátoru notebooku. Od akumulátoru požadujeme, aby byl schopen dodávat výkon alespoň 50 W a disponoval kapacitou (resp. akumulovatelnou energií) alespoň kolem 45 Wh. S přihlédnutím k údajům z tab. 3.1 (na str. 11) porovnávajících vlastnosti jednotlivých typů akumulátorů volíme Li-Ion akumulátory. Li-Ion akumulátory jsou dostupné v mnoha různých tvarech a velikostech, nicméně volíme klasické cylindrické články 18650 (18 mm průměr, 65 mm délka) z důvodu velké rozšířenosti, dostupnosti a relativně nízkých cen.

Pro vyšší účinnost akumulátoru (i k němu připojených DC/DC měničů) je rozumné zvýšení nominálního napětí akumulátoru zapojením několika článků do série, čímž je při da-

ném výkonu snížen odebíraný proud z akumulátoru. S rostoucím počtem sériově zapojených článků však roste i složitost monitorování jednotlivých článků a jejich balancování, navíc je pak nutné volit IO napájené přímo z akumulátoru s ohledem na maximální napětí na akumulátoru. Z tohoto důvodu volíme kompromis, tj. tři sériově zapojené články; nominální napětí akumulátoru tedy bude přibližně 11 V (při nominálním napětí zhruba 3,6 V až 3,7 V na článek). Vzhledem k tomu, že články 18650 mívají kapacitu zhruba v rozsahu 1,5 Ah až 3,5 Ah (to odpovídá hodnotě akumulovatelné energie cca 16 Wh až 38 Wh pro tříčlánkový akumulátor), bude pro požadované množství akumulované energie nutné zapojit vždy dva články paralelně: výsledná konfigurace akumulátoru tedy bude 3S2P (dva články paralelně, třikrát v sérii, tj. celkem šest článků). Z toho vyplývá minimální požadovaná kapacita na článek (při nominálním napětí článku 3,6 V) zhruba 2,1 Ah. Při minimálním dovoleném napětí na článek kolem 3 V (resp. u některých článků až 2,7 V či 2,5 V) je pro požadovaný výkon dodávaný akumulátorem nutné, aby články umožňovaly trvale odebírat proud alespoň kolem 3 A.

Na trhu jsou k dostání jak nové články, tak články již použité (např. z nového vadného aku náradí, elektrokoloběžek apod.), nicméně prodejce obvykle není schopen garantovat, že již použité články budou od stejného výrobce a s natolik shodnými parametry, aby bylo možné sestavit akumulátor z již použitých článků. Volíme tedy zakoupení nových článků. Na trhu se vyskytuje mnoho výrobců (resp. značek) Li-Ion akumulátorů; z důvodu spolehlivosti a bezpečnosti akumulátoru však vybíráme pouze značkové akumulátory (Samsung, Panasonic, LG, Sony).

S ohledem na parametry skladově dostupných Li-Ion článků a jejich cenu byly pro porovnání vybrány dva typy článků, oba od firmy Samsung: ICR18650-22P a ICR18650-26JM. Jejich klíčové vlastnosti jsou uvedeny v tab. 8.1. V datasheetech k těmto článkům ([31], [32]) bohužel není uveden stejnosměrný vnitřní odpor článků, ale pouze impedance článku při frekvenci 1 kHz (po nabití článku). Z hodnoty impedance nelze určit stejnosměrný odpor článku, nicméně dle [33] mezi těmito hodnotami existuje určitá korelace: Stejnosměrný odpor článku se pohybuje přibližně v rozmezí dvojnásobku až jedné pětiny impedance článku na frekvenci 1 kHz (platí pro většinu výrobců). Zároveň obecně platí (pro články stejných

rozměrů), že články schopné dodávat vyšší proudy (tedy obvykle články s nižší kapacitou) mají nižší stejnosměrný odpor než články schopné dodávat nižší proudy (tj. články s vyšší kapacitou). S ohledem na tato tvrzení proto volíme pro použití v power bance články ICR18650-22P s nižší kapacitou, vyšším dovoleným vybíjecím proudem a pravděpodobně nižším vnitřním odporem pro vyšší účinnost akumulátoru.¹ Jednotlivé články akumulátoru budou vodivě propojeny poniklovanými pásky připojenými k vývodům jednotlivých článků s využitím bodové svářečky.

Tabulka 8.1: Porovnání vlastností Li-Ion článků ICR18650-22P a ICR18650-26JM, zdroj dat [31], [32].

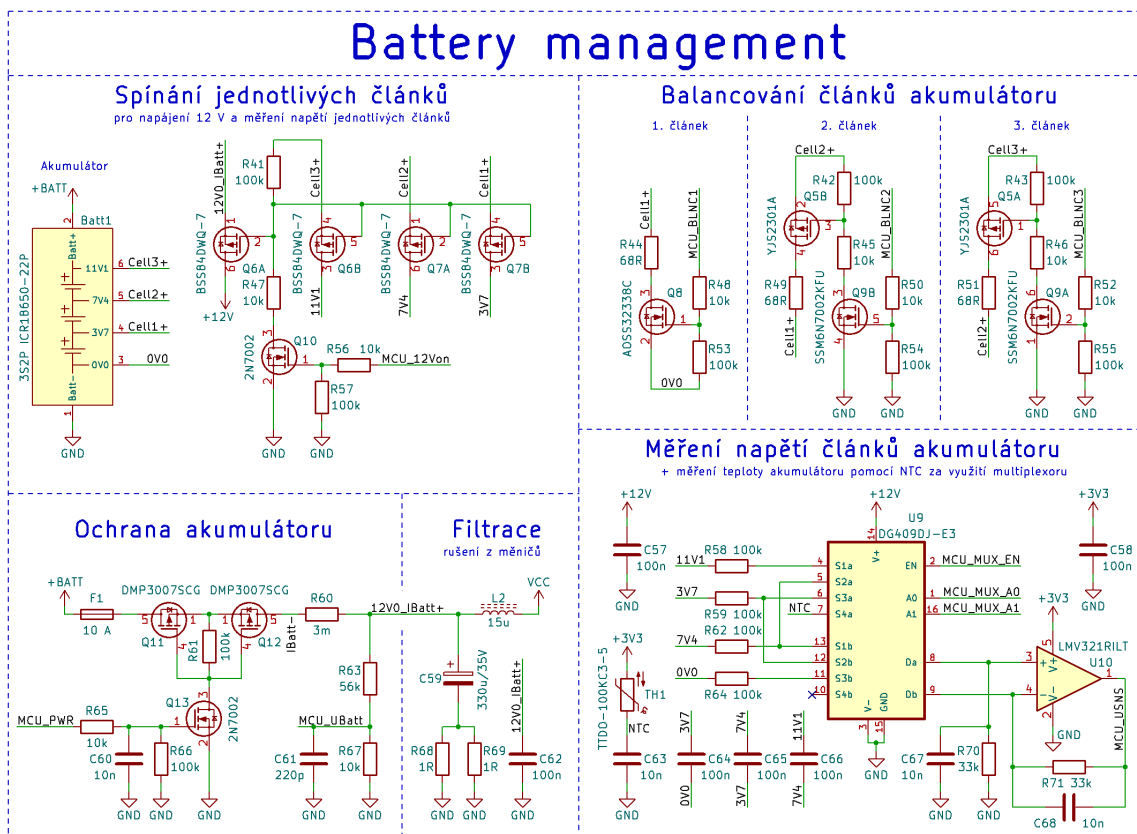
Článek	Nominální napětí	Typ. kapacita	Max. vybíjecí proud (trvale)	Impedance při 1 kHz
ICR18650-22P	3,62 V	2,15 Ah	10 A	$\leq 35 \text{ m}\Omega$
ICR18650-26JM	3,63 V	2,6 Ah	5,2 A	$\leq 100 \text{ m}\Omega$

8.2 Návrh BMS

BMS (Battery Management System) je systém, který zajišťuje, že napětí sériově zapojených článků akumulátoru (příp. odebíraný proud z akumulátoru a teplota akumulátoru) jsou v příslušných mezích. Na trhu jsou dostupné IO plnící funkci BMS. Nejjednodušší IO monitorují pouze napětí na jednotlivých člancích a pokud dojde k překročení nastavených hodnot napětí, dojde k odpojení akumulátoru; obvykle také plní funkci balancování článků (tj. vyrovnávání rozdílného napětí jednotlivých článků). Pokročilejší IO jsou schopny kromě monitorování napětí článků, balancování a sledování proudu tekoucího akumulátorem též komunikovat s mikrokontrolérem, typicky přes I²C rozhraní. Existují též IO zajišťující kromě výše uvedeného i nabíjení akumulátoru.

Vzhledem k tomu, že nabíjení bude řízeno pomocí mikrokontroléru (jak je diskutováno v následující kapitole), IO BMS zajišťující i nabíjení nemá smysl použít. A protože bude nabíjení řízeno mikrokontrolérem, měl by mikrokontrolér mít přehled o napětí na jednotlivých

¹V určitých případech se může stát, že při velkém zatížení dokáže akumulátor s větší kapacitou dodat nižší množství energie než akumulátor s nižší kapacitou právě kvůli většímu stejnosměrnému odporu článků: Větší stejnosměrný odpor má za následek větší pokles napětí na člancích při zatížení, což může být elektronikou vyhodnoceno jako vybití akumulátoru.



Obrázek 8.1: Schéma zapojení BMS pro power banku.

článcích akumulátoru: Pokud by totiž z nějakého důvodu byly rozdíly napětí na jednotlivých článcích větší, mohlo by dojít buď k mírnému přebíjení článku s vyšším napětím, než by BMS stačil vyrovnat napětí na článcích, případně by došlo rovnou k odpojení akumulátoru od powerbanky vlivem přepětí na článku. Abychom toto vyloučili, je vhodné volit IO schopný komunikovat s mikrokontrolérem (např. přes I²C rozhraní).

Vzhledem k tomu, že mnoho elektronických součástek včetně IO BMS není v době psaní této diplomové práce skladem, je volba součástek obtížná: Pokud už se podaří požadovanou součástku nalézt skladem, její cena se mnohdy pohybuje velmi vysoko. Po průzkumu skladově dostupných součástek a jejich cen tedy bylo rozhodnuto o realizaci BMS s pomocí diskrétních součástek (tranzistorů, rezistorů, příp. kondenzátorů), multiplexoru a operačního zesilovače. Schéma zapojení BMS je na obr. 8.1.

Zapojení BMS se skládá ze dvou tranzistorů MOSFET (Q_{11} a Q_{12}) umožňující odpojení akumulátoru od power banky pro případ, že dojde k překročení meze bezpečného napětí

na jednom či více člancích, LC filtru (L_2 , C_{59}) pro potlačení rušení od měničů (s potlačením cca 22 dB na spínací frekvenci 73,2 kHz měniče ZETA/SEPIC - viz další kapitola); součástek Q_6 a Q_7 spínajících napětí jednotlivých článků a celého akumulátoru; balanceru (zapojení kolem součástek Q_5 a Q_8); tranzistory jsou ovládány pomocí mikrokontroléru.

Pro monitorování napětí jednotlivých článků akumulátoru je použit multiplexor (U_9) a operační zesilovač (U_{10}) zapojený jako rozdílový zesilovač. (Na použitý operační zesilovač nejsou kromě rail-to-rail vstupu a výstupu kladeny žádné zvláštní požadavky, vybrán byl tedy IO LMV321). Multiplexor (vybrán byl IO DG409DJ) ovládaný pomocí mikrokontroléru připíná vstupy operačního zesilovače k jednotlivým článkům a výstup operačního zesilovače je přiveden na vstup AD převodníku mikrokontroléru. Pro měření teploty akumulátoru je použit NTC termistor (TH_1) připojený na vstup S4a multiplexoru; při měření teploty akumulátoru je operační zesilovač zapojen jako neinvertující operační zesilovač s jednotkovým zesílením. Pro eliminaci možného rušení byly k operačnímu zesilovači přidány kondenzátory C_{67} a C_{68} formující dolní propust druhého řádu (s mezní frekvencí cca 500 Hz).

Kapitola 9

Návrh rychlého nabíjení

V rámci této kapitoly bude diskutován návrh obvodů zajišťujících podporu rychlého nabíjení zařízení připojených k power bance, stejně tak i nabíjení power banky, tedy zejména návrh měniče a výběr součástek a dále pak výběr IO starajícího se o komunikaci mezi power bankou a k ní připojeným zařízením.

9.1 Topologie DC/DC měniče

Od DC/DC měniče požadujeme, aby byl schopen na výstup dodávat proud až 3 A (resp. výkon do 40 W) při výstupních napětích 5 V, 9 V, 12 V, 15 V a 20 V. Dále požadujeme, aby měnič byl schopen nabíjet akumulátor power banky při napětích na vstupu měniče v rozsahu 5 V až 20 V. Měnič tedy musí být schopen obousměrného provozu. Z důvodu volby nominálního napětí akumulátoru na 10,86 V nelze použít klasický snižující/zvyšující měnič, který obvykle v power bankách bývá použit: Od měniče totiž požadujeme možnost zvyšování i snižování napětí v obou směrech. Vzhledem k tomu, že obousměrné DC/DC měniče schopné snižovat i zvyšovat napětí v obou směrech pro nízká napětí a výkony (tj. do desítek Voltů a desítek Wattů) se běžně nepoužívají, ani IO pro řízení takovýchto měničů nejsou běžně dostupné¹; řízení tohoto měniče tedy bude muset být realizováno pouze s využitím vhodného mikrokontroléru, který bude generovat PWM signály pro budič spínacích tranzistorů měniče.

¹Na trhu s elektronickými součástkami lze zakoupit IO pro řízení obousměrného měniče v topologii H-místek schopného zvyšovat i snižovat napětí v obou směrech, nicméně tyto IO jsou typicky určeny do automobilového průmyslu pro proudy desítek Ampérů, resp. výkony stovek Wattů, čemuž odpovídá i jejich cena.

Protože topologie ZETA/SEPIC jako jediná z celkem tří zmiňovaných topologií, které jsou schopny zvyšovat i snižovat napětí v obou směrech, používá pouze dva spínací tranzistory místo čtyř, volíme zapojení měniče v topologii ZETA/SEPIC: Tato topologie umožní použití pouze dvou spínacích tranzistorů a jednoho dvoukanálového budiče spínacích tranzistorů místo čtyř spínacích tranzistorů a dvou dvoukanálových budičů (nebo jednoho čtyřkanálového budiče), což může ušetřit místo na DPS a zjednodušit řízení měniče (místo generování čtyř signálů pro spínací tranzistory je nutné generovat pouze dva komplementární PWM signály).

9.2 Řízení měniče

Pro řízení měniče je nutné vybrat vhodný mikrokontrolér, který disponuje dostatečným počtem vstupů AD převodníku a který je schopen generovat komplementární PWM signály s dostatečným rozlišením pro řízení spínacích tranzistorů. Vzhledem k předchozím zkušenostem autora s mikrokontroléry firmy Microchip a s vývojovým prostředím MPLAB X IDE byly vybírány 32bitové mikrokontroléry řad PIC nebo SAM. Zejména z důvodu skladové dostupnosti a dostačujících parametrů byl vybrán mikrokontrolér ATSAM70J19 s jádrem ARM Cortex M7 ve verzi s 64 vývody (pouzdro LQFP). Frekvence jádra mikrokontroléru je až 300 MHz, mikrokontrolér disponuje pěti vstupy AD převodníku a podporuje generování komplementárních PWM signálů s rozlišením až 16 bitů. Ze simulací zapojení ZETA/SEPIC měniče v programu Matlab v prostředí Simulink vyplynulo, že pro nízké zvlnění napětí na výstupu měniče je potřebné alespoň 11bitové rozlišení PWM modulátoru mikrokontroléru, kterým disponuje PWM modulátor na frekvenci generovaného signálu 73,2 kHz, volíme tedy tuto frekvenci jako spínací frekvenci měniče. (Zvýšení spínací frekvence by umožnilo použití součástek s menšími hodnotami kapacit resp. indukčností a tedy úsporu místa na DPS a pravděpodobně i snížení ceny součástek, ovšem za cenu snížení rozlišení PWM modulátoru, resp. zvýšení zvlnění výstupního napětí.)

Dále je nutné vybrat algoritmus pro řízení měniče. Zřejmě nejčastěji používané algoritmy pro řízení měničů jsou PID algoritmus, Sliding Mode Control (SMC) a FeedForward Control. PID algoritmus je pravděpodobně nejpoužívanější pro regulaci (nejen) DC/DC

měníčů; je to lineární metoda řízení (podrobnosti viz např. [34]). SMC je typ nelineárního řízení, v porovnání s PID algoritmem není výrazněji rozšířený, vyniká však svou robustností; jako nevýhodu lze uvést vysoce proměnnou spínací frekvenci měniče využívajícího SMC (pro konstantní spínací frekvenci je nutná úprava algoritmu) [35]. FeedForward metoda řízení nevyužívá chybový signál jako ostatní zde zmíněné metody řízení, nýbrž vyhodnocuje přímo vstupní a výstupní napětí a proudy měniče. FeedForward algoritmy jsou ze své podstaty stabilní a umožňují vylepšení dynamických vlastností měniče [36]. Z důvodu velké rozšířenosti a obvykle dostačujících výsledků volíme pro řízení měniče ZETA/SEPIC PID algoritmus v kombinaci s FeedForward algoritmem.

Tyto algoritmy byly navrženy a ověřeny v programu Matlab v prostředí Simulink. K nastavení parametrů PID regulátoru byla použita aplikace PID Tuner v prostředí Simulink. Pro optimální funkci PID regulace byly pro různé napěťové úrovně na výstupu ZETA/vstupu SEPIC měniče použity různé koeficienty PID regulátoru. V režimu nabíjení akumulátoru je regulovaná veličina proud tekoucí do akumulátoru, při napájení připojeného zařízení z power banky je regulovaná veličina výstupní napětí. Stabilita regulační smyčky byla ověřena v prostředí Simulink z průběhů výstupních napětí měniče při skokové změně zatížení (v režimu regulace výstupního napětí) a z odezvy na změnu nastavení požadovaného nabíjecího proudu (v režimu regulace proudu tekoucího do akumulátoru).

9.3 Výběr pasivních součástek

Pro správnou funkci měniče je nutné vybrat vhodné pasivní součástky s vhodnými parametry. V následujících odstavcích je diskutován výběr induktoru a kondenzátorů pro měnič ZETA/SEPIC.

9.3.1 Induktor(y)

Klíčový prvek měniče ZETA/SEPIC je induktor, resp. induktory, které pro úsporu místa na DPS umístíme na společné jádro. Oba induktory tedy budou mít stejné parametry, tj. stejný počet závitů, resp. stejnou indukčnost. To má za následek stejné zvlnění proudu protékajícího oběma vinutími. V následujících vzorcích tedy proměnné L a ΔI_L značí

indukčnost induktorů na společném jádru, resp. zvlnění proudu tekoucího induktory.

Pro výpočet minimální požadované indukčnosti L induktorů na společném jádru lze využít vztah 9.1 (převzato z [19]):

$$L = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\text{IN}} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_{\text{SW}}}, \quad (9.1)$$

kde $U_{\text{IN}} = 12,6$ V je maximální napětí na vstupu měniče (resp. napětí akumulátoru v nabitém stavu), ΔI_L je zvolené zvlnění proudu tekoucího induktory, které volíme na čtvrtinu hodnoty maximálního výstupního proudu měniče (3 A), tj. 0,75 A, $f_{\text{SW}} = 73,2$ kHz je spínací frekvence měniče a D je střída signálu horního spínacího tranzistoru (Q_1 dle obr. 4.4) vypočtená ze vztahu 9.2 (převzato z [19]):

$$D = \frac{U_{\text{OUT}}}{U_{\text{IN}} + U_{\text{OUT}}}, \quad (9.2)$$

kde $U_{\text{IN}} = 12,6$ V je maximální napětí na vstupu měniče a $U_{\text{OUT}} = 20$ V je maximální výstupní napětí měniče. Po dosazení vychází hodnota indukčnosti na přibližně 70 μH .

Špičkový proud $I_{L_{1\text{pk}}}$ tekoucí induktorem L_1 (značení odpovídá obr. 4.4 na str. 20) lze odhadnout ze vztahu 9.3 (převzato z [19]):

$$I_{L_{1\text{pk}}} = I_{\text{OUT}} \cdot \frac{D}{1 - D} + \frac{\Delta I_L}{2}, \quad (9.3)$$

kde $I_{\text{OUT}} = 2$ A je maximální výstupní proud měniče při maximálním výstupním napětí měniče 20 V, $\Delta I_L = 0,75$ A je zvlnění proudu tekoucího induktory a D je střída vypočtená ze vztahu 9.2, kde $U_{\text{IN}} = 8,25$ V je minimální napětí na vstupu měniče (resp. minimální napětí akumulátoru při minimálním napětí 2,75 V na článek) a $U_{\text{OUT}} = 20$ V je maximální výstupní napětí měniče. Po dosazení hodnot vychází maximální proud na přibližně 5,2 A. Špičkový proud $I_{L_{2\text{pk}}}$ tekoucí induktorem L_2 (značení viz obr. 4.4 na str. 20) je vypočten ze vztahu 9.4 (převzato z [19]):

$$I_{L_{2\text{pk}}} = I_{\text{OUT}} \cdot \frac{\Delta I_L}{2}, \quad (9.4)$$

kde $I_{\text{OUT}} = 3$ A je maximální výstupní proud měniče a $\Delta I_L = 0,75$ A je zvlnění proudu

tekoucího induktory. Po dosazení hodnot do vztahu vychází maximální proud induktorem na přibližně 3,4 A. Dle [19] je nutné volit induktory (resp. jádro induktorů) tak, aby nedošlo k saturaci ani při 1,2násobku maximálního špičkového proudu tekoucího induktorem L_1 vypočteného ze vztahu 9.3. Ve vztazích však není započtena účinnost měniče, reálně tak při maximálním zatížení měniče může téct induktory větší proud, než odpovídá vypočteným hodnotám. Pro dostatečnou rezervu volíme 1,5násobek maximálního proudu tekoucího L_1 , tj. 7,8 A.

Vzhledem k tomu, že v obchodech s elektronickými součástkami je nabízeno pouze minimum induktorů s dvěma (či více) vinutími², byla zvolena výroba induktoru ručním navinutím vinutí na zakoupené jádro. Z důvodu vhodných parametrů a skladové dostupnosti bylo vybíráno mezi toroidními železoprachovými jádry určenými (mimo jiné) pro spínané zdroje. Cívková konstanta vybíraných toroidních jader A_L byla volena kolem hodnoty 100 nH/z² a více tak, aby počet závitů nebyl zbytečně velký (resp. aby vinutí nebylo příliš dlouhé, což by zvyšovalo odpor vinutí). S ohledem na minimalizaci rozměrů jádra, délky vinutí a ztrátovosti materiálu bylo vybráno jádro Sendust Cores KS092-125A-HF s $A_L = 105$ nH/z². Potřebný počet závitů N pro oba induktory lze vypočítat ze vztahu 9.5:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}, \quad (9.5)$$

kde $L = 70$ μ H je požadovaná indukčnost a $A_L = 105$ nH/z² je cívková konstanta jádra. Dosazením do vztahu získáváme potřebný počet závitů, který je roven cca 26. Protože cívková konstanta (resp. permeabilita jádra) se sycením jádra klesá, je nutné volit větší počet závitů tak, aby se indukčnost induktorů pohybovala kolem požadované hodnoty i při větším zatížení měniče. Volíme tedy 30 závitů pro oba induktory; vycházíme při tom z hodnot a grafů uvedených v datasheetu jádra, viz [37], z nichž je patrné, že jádro se nedostane do saturace ani při proudu 7,8 A protékajícím L_1 .

Pro určení maximální použitelné tloušťky vinutí (pro minimalizaci vlivu skin efektu)

²Většina induktorů s dvěma vinutími je navíc určena pro použití ve filtru potlačujícím souhlasné rušení.

vypočteme tzv. hloubku vniku σ (vztah 9.6, převzato z [38]):

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \mu_0 \cdot f}}, \quad (9.6)$$

kde $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ je měrný odpor pro měď [38], $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{NA}^2$ je permeabilita vakua a $f = 73,2 \text{ kHz}$ je spínací frekvence měniče. Po dosazení vychází hodnota přibližně 0,25 mm. Dle [38] je neúčelné používat kruhové vodiče o větším průměru než trojnásobek hloubky vniku. Průměr 0,71 mm, kterým byla vinutí navinuta, tuto podmínku splňuje. Vzhledem k tomu že (při větším zatížení měniče) převládá stejnosměrná složka proudu tekoucího oběma vinutími induktorů, vliv střídavého odporu není kritický. Vinutí induktorů byla vinuta čtyřmi vodiči (pro induktor L_1 z obr. 4.4) resp. dvěma vodiči (pro induktor L_2) o průměru 0,71 mm.

9.3.2 Kondenzátory

Celkovou potřebnou kapacitu vstupních filtračních kondenzátorů C_{IN} a vazebních kondenzátorů C_{C} (na obr. 4.4 označeny jako C_1 a C_3) vypočteme ze vztahu 9.7 (převzato z [19], upraveno)

$$C_{\text{IN}} = C_{\text{C}} = \frac{D \cdot I_{\text{OUT}}}{\Delta U_{C_{\text{IN/C}}} \cdot f_{\text{SW}}}, \quad (9.7)$$

kde $I_{\text{OUT}} = 3 \text{ A}$ je maximální výstupní proud měniče, $\Delta U_{C_{\text{IN/C}}}$ je maximální dovolené zvlnění na vstupních filtračních kondenzátorech, resp. na vazebních kondenzátorech, které volíme na hodnotu 50 mV, $f_{\text{SW}} = 73,2 \text{ kHz}$ je spínací frekvence měniče a D je střída ze vzorce 9.2 (str. 40), kde $U_{\text{IN}} = 8,25 \text{ V}$ je minimální napětí na vstupu měniče a $U_{\text{OUT}} = 12 \text{ V}$ je výstupní napětí měniče. Po dosazení do vztahu vychází potřebná kapacita na zhruba 490 μF . Vzhledem k tomu, že v tomto vztahu není zahrnuto ESR kondenzátorů, bude při vypočtené kapacitě zvlnění větší než zvolených 50 mV.

Efektivní hodnotu proudu tekoucího vstupními filtračními kondenzátory $I_{C_{\text{IN}}}$ a vazebními kondenzátory $I_{C_{\text{C}}}$ zjistíme dosazením do vztahu 9.8 (převzato z [19]):

$$I_{C_{\text{IN}}} = I_{C_{\text{C}}} = I_{\text{OUT}} \cdot \sqrt{\frac{U_{\text{OUT}}}{U_{\text{IN}_{\text{min}}}}}, \quad (9.8)$$

kde $I_{\text{OUT}} = 3 \text{ A}$ je maximální výstupní proud měniče, $U_{\text{OUT}} = 12 \text{ V}$ je výstupní napětí a $U_{\text{IN}_{\text{min}}} = 8,25 \text{ V}$ je minimální vstupní napětí měniče. Po dosažení vychází efektivní hodnota proudu tekoucího kondenzátory na zhruba $3,6 \text{ A}$. Vazební kondenzátory musí být dimenzovány na maximální výstupní napětí (20 V) plus rezerva, vstupní filtrační kondenzátory musí být dimenzovány na maximální napětí akumulátoru (tj. $12,6 \text{ V}$) plus rezerva.

Vybrány byly elektrolytické kondenzátory Nichicon PW Series s nízkým ESR s kapacitou $270 \mu\text{F}$ a pracovním napětím 50 V (podrobnosti viz [39]), pro zvýšení kapacity a snížení proudu protékajícího jednotlivými kondenzátory budou zapojeny vždy tři elektrolytické kondenzátory paralelně³; ke každému elektrolytickému kondenzátoru bude paralelně zapojen keramický kondenzátor $100 \text{ nF}/50 \text{ V}$. (Zvolené elektrolytické kondenzátory mají dovolený efektivní proud $1,2 \text{ A}$ na frekvenci 100 kHz při $105 \text{ }^\circ\text{C}$; při paralelním zapojení tří kondenzátorů je tedy celkový efektivní proud tekoucí kondenzátory roven $3,6 \text{ A}$, což odpovídá maximálnímu efektivní hodnotě vypočteného proudu tekoucího vazebními resp. vstupními filtračními kondenzátory. Protože však ve vztahu 9.8 není uvažována účinnost měniče, může být hodnota $3,6 \text{ A}$ v určitých případech mírně překročena. Protože však bude mikrokontrolér naprogramován tak, aby došlo k vypnutí činnosti power banky při vzrůstu teploty DPS nad zhruba $65 \text{ }^\circ\text{C}$, bude s velkou pravděpodobností zajištěno, že kondenzátory nedosáhnou své maximální pracovní teploty $105 \text{ }^\circ\text{C}$, pro kterou je uváděna maximální efektivní hodnota proudu protékajícího kondenzátorem. Možné mírné překročení této efektivní hodnoty proudu tekoucího kondenzátory při velkém zatížení měniče a nízkém napětí akumulátoru by tedy nemělo příliš vadit.)

Celkovou kapacitu výstupních filtračních kondenzátorů C_{OUT} (na obr. 4.4 na str. 20 označeny jako C_2) určíme ze vztahu 9.9 (převzato z [19], upraveno):

$$C_{\text{OUT}} = \frac{\Delta I_{\text{L}}}{8 \cdot \Delta U_{C_{\text{OUT}}} \cdot f_{\text{SW}}}, \quad (9.9)$$

³Přestože v současné době už jsou běžně dostupné keramické kondenzátory na napětí 35 V i více s kapacitami desítek až stovek μF , s rostoucím stejnosměrným napětím na těchto kondenzátorech prudce klesá kapacita i pod 20% původní hodnoty. Z důvodu prudkého poklesu kapacity keramických kondenzátorů na velmi nízké hodnoty postrádá použití keramických kondenzátorů s vysokou kapacitou v tomto měniči smysl.

kde $\Delta I_L = 0,75$ A je zvlnění proudu induktorem, $\Delta U_{C_{OUT}}$ je zvlnění napětí na výstupních filtračních kondenzátorech, které volíme na hodnotu 30 mV a $f_{SW} = 73,2$ kHz je spínací frekvence měniče. Dosazením do vztahu dostáváme hodnotu kapacity výstupních filtračních kondenzátorů zhruba 43 μ F. V tomto vztahu nefiguruje ESR, tzn. že zvlnění napětí při nenulovém ESR bude větší. Z toho důvodu volíme větší hodnotu výstupních filtračních kondenzátorů, konkrétně volíme elektrolytický kondenzátor 330 μ F (a k němu paralelně keramický kondenzátor 100 nF). Takto vysokou hodnotu v porovnání s vypočtenou hodnotou volíme též z důvodu určité prodlevy reakce zpětnovazební smyčky měničů, kdy při skokové změně zatížení měniče dochází k napětovému překmitu/podkmitu, než zpětná vazba stihne napětí na výstupu vyrovnat; větší hodnota kapacity filtračních kondenzátorů sníží velikost těchto překmitů/podkmitů.

Efektivní hodnotu proudu $I_{C_{OUT}}$ tekoucího výstupními filtračními kondenzátory vypočteme ze vztahu 9.10 (převzato z [19]):

$$I_{C_{OUT}} = \frac{\Delta I_L}{\sqrt{3}}, \quad (9.10)$$

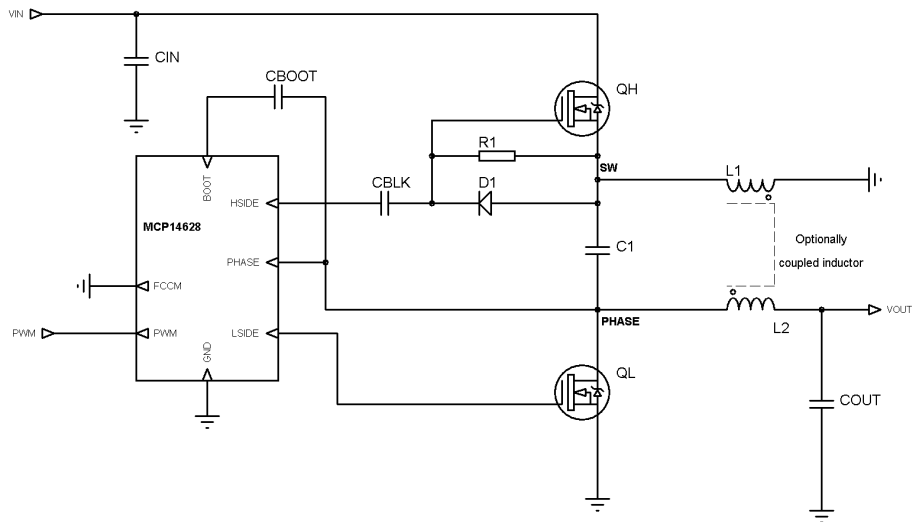
kde $\Delta I_L = 0,75$ A je zvlnění proudu induktorem. Po dosazení získáváme efektivní hodnotu proudu tekoucího výstupními filtračními kondenzátory rovnu 433 mA. Kondenzátory musí být dimenzovány na maximální výstupní napětí (20 V) a určitou rezervu; vybrán byl elektrolytický kondenzátor Hitano ESX Series s nízkým ESR a pracovním napětím 35 V (podrobnosti viz [40]), k němu bude připojen paralelně keramický kondenzátor 100 nF/50 V.

9.4 Výběr aktivních součástek

V rámci této podkapitoly bude diskutován výběr aktivních součástek, tj. spínacích tranzistorů a budiče spínacích tranzistorů.

9.4.1 Budič spínacích tranzistorů

Při zapojení měniče v topologii ZETA (a v topologii SEPIC při použití synchronního usměrnění) se na elektrodě Source horního spínacího tranzistoru (Q_1 dle obr. 4.4, str.



Obrázek 9.1: Schéma zapojení budiče spínacích tranzistorů pro topologii ZETA, převzato z [41].

20) vyskytuje záporné napětí (bráno vůči společnému vodiči); na toto záporné napětí však budiče spínacích tranzistorů s bootstrapovým obvodem (zajišťujícím plovoucí buzení horního spínacího tranzistoru) schopné buzení spínacích tranzistorů MOSFET s kanálem N nejsou stavěné. Nabízí se tedy řešení v podobě použití horního spínacího tranzistoru MOSFET s kanálem P a příslušného budiče pro tyto tranzistory, nicméně na trhu je velmi málo budičů pro MOSFET tranzistory s kanálem P, navíc tyto tranzistory mají obecně horší parametry než tranzistory MOSFET s kanálem N.

V literatuře [41] však bylo nalezeno zapojení budiče spínacích tranzistorů MOSFET s kanálem N zobrazené na obr. 9.1, které je schopné problém se zápornými napětími odstranit: Vývod budiče spínacích tranzistorů označený jako PHASE v obr. 9.1 není připojen k elektrodě Source horního spínacího tranzistoru (jak je obvyklé), ale k elektrodě Drain spodního spínacího tranzistoru, kde se záporná napětí prakticky nevyskytují (maximální záporné napětí je dáno úbytkem napětí na vnitřní diodě spodního spínacího tranzistoru, tj. typicky do 1 V, na což je většina budičů spínacích tranzistorů stavěna). Výstup HSB je připojen na řídicí elektrodu horního spínacího tranzistoru přes kondenzátor C_{BLK} odstraňující stejnosměrnou složku (a s ní i záporná napětí), na C_{BLK} je tedy hodnota stejnosměrné složky napětí stejná jako na kondenzátoru C_1 . Napětí na kondenzátoru C_{BLK} udržují v příslušných mezích dioda D_1 a rezistor R_1 .

Od IO určeného pro buzení spínacích tranzistorů (tzv. MOSFET driveru) požadujeme správnou funkci při rozsahu napájecích napětí alespoň 8,25 V až 12,6 V (tento rozsah odpovídá minimálnímu a maximálnímu napětí na akumulátoru), plovoucí buzení horního a klasické buzení spodního tranzistoru MOSFET s kanálem N a schopnost správné funkce při součtu maximálního vstupního a výstupního napětí (plus napěťová rezerva) bootstrapového obvodu budiče spínacích tranzistorů. Jako vhodný IO pro buzení spínacích tranzistorů se jeví IO LM5109 schopný buzení spínacích tranzistorů MOSFET s kanálem N proudem až 1 A fungující v rozsahu napájecích napětí 8 V až 16 V s bootstrapovým obvodem pro buzení horního spínacího tranzistoru dovolující aplikaci maximálního napětí o hodnotě až 90 V (podrobnosti viz [42]).

9.4.2 Tranzistory

Pro správnou funkci měniče a rozumnou účinnost je nutné zvolit spínací tranzistory s vhodnými parametry. Spínací tranzistory by měly mít nízký odpor kanálu v sepnutém stavu a nízkou kapacitu Gate-Source. Tranzistory musí být dimenzované na součet maximálního vstupního a výstupního napětí (plus napěťová rezerva) a na součet maximální hodnoty proudů tekoucích oběma induktory. Pro úsporu místa na DPS preferujeme tranzistory v SMD pouzdru.

Jako spínací tranzistory byly vybrány tranzistory DMT64M8LSS s maximálním napětím $U_{DS} = 60$ V, s odporem kanálu 5 m Ω při napětí $U_{GS} = 10$ V a trvalém maximálním proudu $I_D = 13,6$ A při teplotě okolí 70 °C (podrobnosti viz [43]). Tranzistor je v pouzdru SO8. Pro zlepšení chlazení budou vývody tranzistorů připájeny na DPS do oblastí rozlité mědi. Tranzistor má tepelný odpor $R_{\Theta_{JA}} = 89,5$ °C/W (podrobnosti viz [43]). Při zanedbání spínacích ztrát (a ztrát na tranzistoru ve vypnutém stavu) bude výkonová ztráta P na spínacím tranzistoru vypočtena ze vzorce 9.11:

$$P = I^2 \cdot R \cdot D, \quad (9.11)$$

kde $I = 10$ A je maximální trvalý proud tekoucí tranzistorem⁴ při maximální střídě signálu

⁴Proud 10 A zhruba odpovídá součtu maximálních trvalých proudů tekoucích oběma induktory.

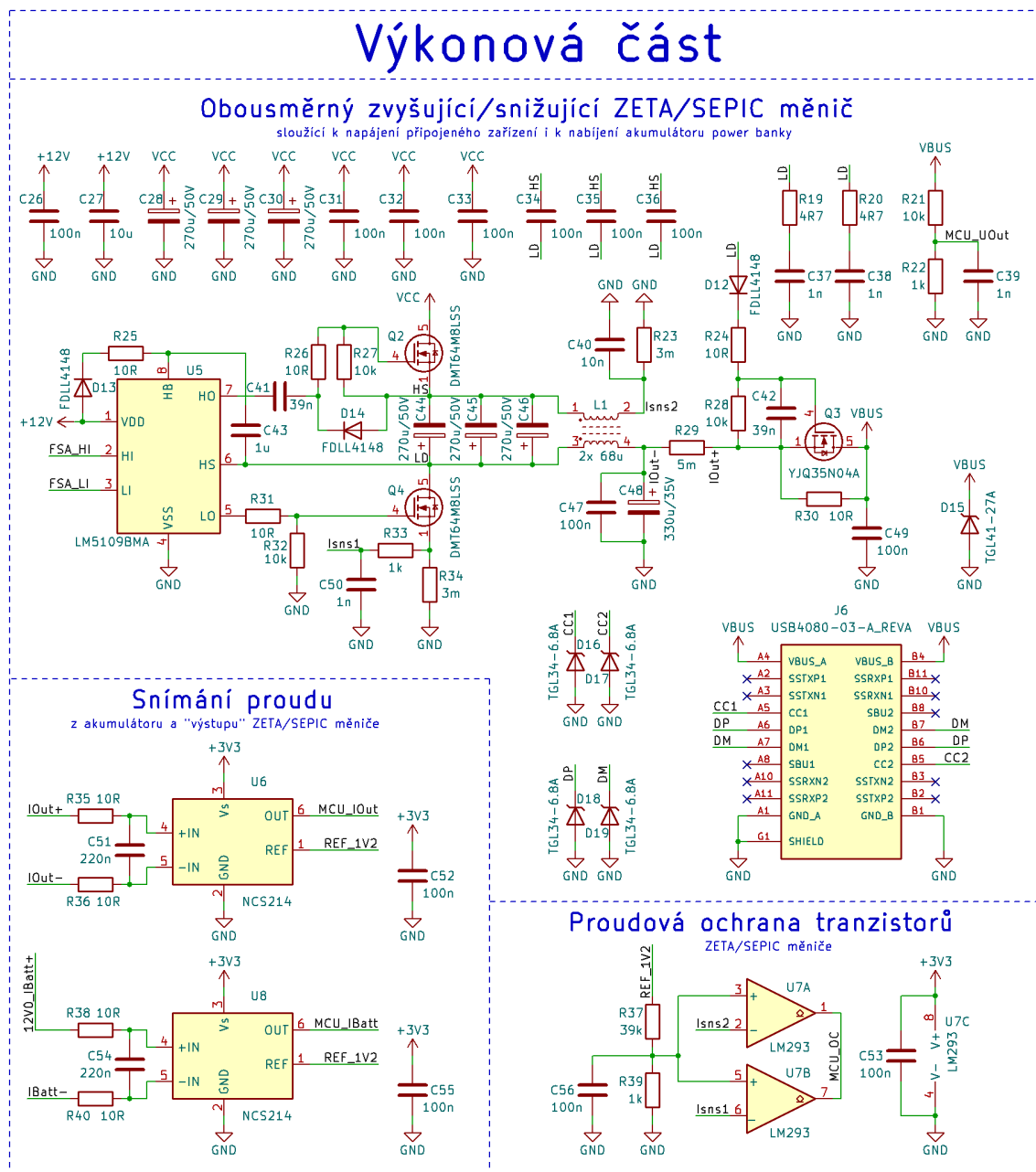
pro spínací tranzistory $D \approx 70\%$ a odporu kanálu spínacího tranzistoru $R = 5\text{ m}\Omega$. Po dosazení vychází ztrátový výkon na zhruba 350 mW . Oteplení tranzistoru $\Delta\Theta$ vypočteme ze vztahu 9.12:

$$\Delta\Theta = P \cdot R_{\Theta_{JA}}, \quad (9.12)$$

kde $P = 350\text{ mW}$ je ztrátový výkon na spínacím tranzistoru a $R_{\Theta_{JA}} = 89,5\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ je tepelný odpor tranzistoru polovodič-okolí. Po dosazení vychází oteplení tranzistoru přibližně $31\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ani při teplotě okolí (přesahující) $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tj. teplota, při které dojde k vypnutí měniče) by tedy nemělo k přehřátí tranzistoru dojít: Teplota přechodu tranzistoru $96\text{ }^{\circ}\text{C}$ nepřesahuje maximální teplotu přechodu $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Vzhledem k tomu, že výstup ZETA měniče (resp. vstup SEPIC měniče) bude osazen kondenzátorem o kapacitě $330\text{ }\mu\text{F}$, ke kterému budou de facto paralelně (přes vinutí induktoru) připojeny tři vazební kondenzátory s kapacitou $270\text{ }\mu\text{F}$, mohlo by při připojení power banky ke zdroji napětí, např. k USB konektoru počítače, dojít ke vzniku proudového rázu způsobeného velkou kapacitou kondenzátorů s nízkým ESR při nabíjení kondenzátoru na napětí připojeného zdroje. Kvůli omezení proudového rázu je měnič k USB-C konektoru připojen přes rezistor R_{30} (značení odpovídá obr. 9.2) s odporem $10\text{ }\Omega$ přemostěný tranzistorem Q_3 (MOSFET s kanálem N). Po nabití kondenzátoru může dojít k sepnutí tranzistoru Q_3 ; k sepnutí dojde při činnosti měniče automaticky: Přes diodu D_{12} a rezistor R_{24} je přivedeno napětí na řídicí elektrodu tranzistoru, velikost napětí Gate-Source zhruba odpovídá napětí akumulátoru, resp. napětí na vstupu ZETA měniče. Kondenzátor C_{42} slouží pro udržení napětí na řídicí elektrodě, i když diodou D_{12} žádný proud neprotéká, rezistor R_{28} slouží k vybití C_{42} (resp. vypnutí tranzistoru Q_3) při nečinnosti měniče. Tranzistor by měl být dimenzován na maximální výstupní napětí (plus napěťová rezerva) a proudy v řádu alespoň jednotek Ampérů (trvale), dále by měl mít nízký odpor kanálu v sepnutém stavu. Vybrán byl tranzistor YJQ35N04A.

Aby byl mikrokontrolér schopen snímat proud tekoucí z/do akumulátoru a proud tekoucí z výstupu ZETA, resp. vstupu SEPIC měniče, je nutné hodnotu proudu převést na napětí ve vhodném rozsahu pro AD převodník. K tomu lze využít Hallovu sondu nebo IO pro snímání proudu pomocí napětí na snímacím rezistoru. Protože však vlastní spotře-



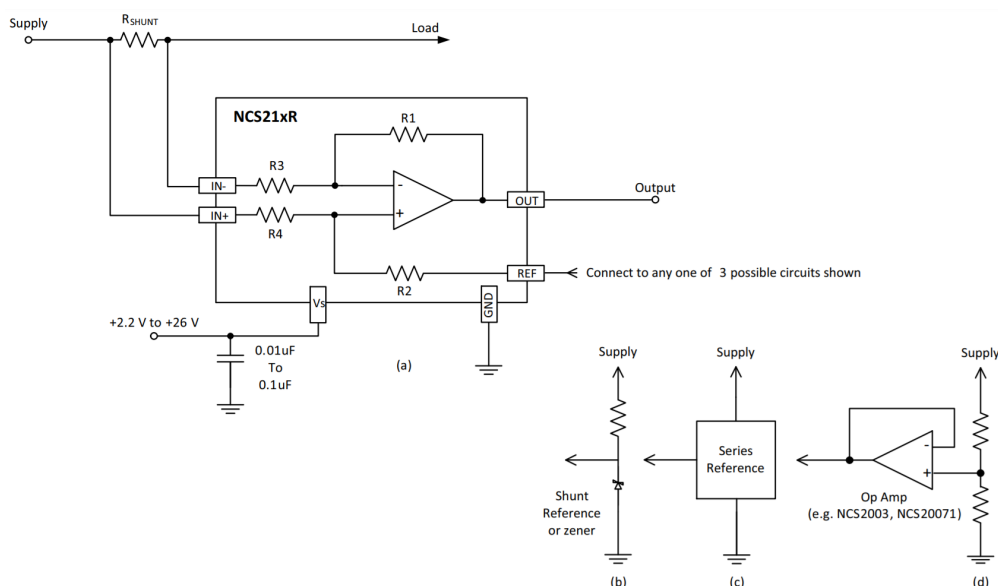
Obrázek 9.2: Schéma zapojení ZETA/SEPIC měniče.

ba Hallovy sondy ve většině případů převyšuje výkon měřený na snímacím rezistoru (při odporu snímacího rezistoru v řádu jednotek $m\Omega$), bude použito zapojení se snímacím rezistorem a IO pro snímání proudu. IO by měl být schopen snímat proudy až 10 A tekoucí z akumulátoru a proudy až 2,15 A tekoucí do akumulátoru (v akumulátoru jsou zapojeny vždy dva články paralelně, každým článkem tedy poteče 1,075 A, což je standardní nabíjecí

proud uváděný v datasheetu, viz [31]). Druhý IO snímající proud tekoucí do/z měniče by měl být schopen snímat proudy až 3 A v obou směrech. Vzhledem k tomu, že jako napěťová reference pro AD převodník byl zvolen obvod LM4040C20IDBZR s referenčním napětím 2,048 V, mělo by se napětí na výstupu IO pohybovat v rozsahu 0 V až 2,048 V; to odpovídá zisku 100 IO snímajících proud tekoucí snímacími rezistory (resp. úbytek napětí na snímacích rezistorech), jejichž odpor volíme 1 m Ω (pro snímání proudu akumulátoru) a 3 m Ω pro snímání výstupního proudu ZETA měniče/vstupního proudu SEPIC měniče. Dále požadujeme od IO mezní frekvenci v řádu desítek kHz, schopnost snímat proudy při napětích na vstupech kolem 20 V, přičemž IO bude napájen 3,3 V z lineárního stabilizátoru.

9.5 Snímání proudu

Vybrán byl IO NCS214 se zesílením 100 (podrobnosti viz [44]), který splňuje parametry uvedené výše a je schopen snímat proudy tekoucí oběma směry za podmínky připojení nenulového referenčního napětí na vstup 1 označený jako REF (viz obr. 9.3). Na tento vstup tedy bude připojen zdroj referenčního napětí 1,2 V, IO LM4041CYM3-1.2. Výstup obvodu je připojen na příslušné vstupy AD převodníku použitého mikrokontroléru.



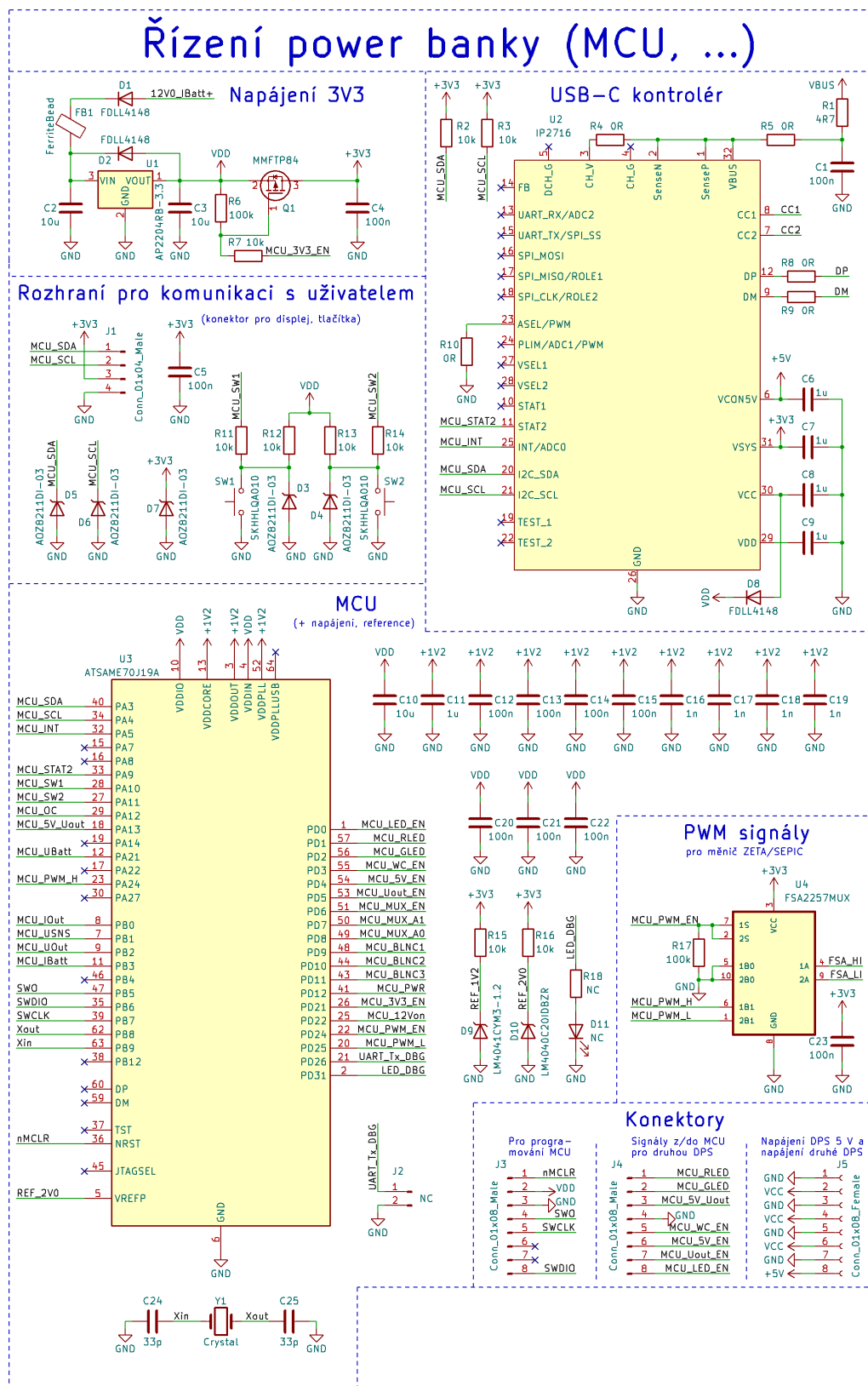
Obrázek 9.3: Schéma zapojení IO NCS214 pro obousměrné snímání proudu tekoucího snímacím rezistorem, převzato z [44].

Pro případ příliš velkého proudu tekoucího induktory (resp. spínacími tranzistory) např. vlivem náhlého zkratu na výstupu měniče byla implementována proudová ochrana skládající se ze dvou komparátorů porovnávajících napětí na snímacích rezistorech R_{23} a R_{34} (viz obr. 9.2, str. 48) s referenčním napětím (každý rezistor slouží pro jeden směr toku proudu měničem); při překročení referenčního napětí dojde k překlopení výstupu komparátoru připojeného k mikrokontroléru do logické nuly, čímž bude generováno přerušení v mikrokontroléru, které způsobí vypnutí spínacích tranzistorů a předejde tak jejich poškození. Komparátor by měl být schopen funkce při napájecím napětí 3,3 V a měl by mít co největší rychlost přeběhu a co nejmenší zpoždění i při nízkém rozdílu napětí na jeho vstupech; s rostoucí rychlostí komparátorů však výrazně roste i jejich cena. Použit tedy byl (s ohledem na nízkou spínací frekvenci měniče a použité spínací tranzistory schopné pulzně snést proud přes 100 A) komparátor LM293 (dva komparátory v jednom pouzdru). Komparátory disponují výstupy typu otevřený kolektor, oba výstupy tedy byly pro úsporu vývodů mikrokontroléru spojeny paralelně.

9.6 Podpora rychlého nabíjení

Vzhledem k tomu, že od power banky očekáváme schopnost nabíjení elektroniky s větším příkonem (např. menší notebooky), které pro komunikaci zařízení a zdroje elektrické energie využívají protokol USB Power Delivery, a vzhledem k tomu, že mnohá zařízení (typicky mobilní telefony) komunikující přes protokol Qualcomm Quick Charge jsou zpětně kompatibilní s protokolem USB Power Delivery, bude pro komunikaci mezi power bankou a připojeným zařízením použit protokol USB Power Delivery. Aby power banka podporovala rychlé nabíjení standardu USB Power Delivery, je nutné vybrat IO zajišťující komunikaci mezi power bankou a připojeným zařízením v obou směrech, tj. powerbanka jako zdroj napětí (Source) nebo jako spotřebič (Sink). Mezi skladově dostupnými IO vhodnými pro uvažované použití byly IO UPD350, IO FUSB302 a IO IP2716. První dva zmíněné obvody zajišťují komunikaci v rámci USB Power Delivery protokolu pouze na fyzické vrstvě, zbytek je zajišťován mikrokontrolérem, se kterým IO komunikují po I²C sběrnici. Třetí zmíněný IO, IP2716, zajišťuje téměř veškerou komunikaci sám, přes I²C (nebo pomocí

analogových a digitálních vstupů) je zajištěna pouze základní konfigurace IO. Tento IO též podporuje další protokoly rychlého nabíjení (Qualcomm Quick Charge, Apple BMS aj.). Z výše uvedených důvodů tedy volíme IO IP2716 (podrobnosti viz. [45]). Zapojení USB-C kontroléru a mikrokontroléru je zobrazeno na obr. 9.4.



Obrázek 9.4: Schéma zapojení mikrokontroléru, USB-C kontroléru ad.

Kapitola 10

Návrh bezdrátového nabíjení

V rámci této kapitoly bude navrženo zapojení zajišťující bezdrátové nabíjení, z důvodu velké rozšířenosti využijeme standard Qi bezdrátového nabíjení. Bezdrátové nabíjení by mělo správně fungovat v rozsahu napětí 8,25 V (napětí vybitého akumulátoru) až 12,6 V (napětí nabitého akumulátoru). Vzhledem k obecně nižší účinnosti bezdrátového nabíjení v porovnání s klasickým nabíjením pomocí kabelu není zamýšleno bezdrátovým nabíjením v powerbance nahradit klasický způsob nabíjení, nýbrž umožnit bezdrátové nabití elektroniky, kterou jinak než bezdrátově nabít nelze (typicky nositelná elektronika, např. některé chytré hodinky). Vzhledem k uvedenému účelu bezdrátového nabíjení postačí přenášené výkony v řádu jednotek Wattů.

10.1 Výběr IO

Na trhu s elektronickými součástkami jsou k dispozici IO pro realizaci bezdrátového nabíjení. V době výběru IO však na evropském trhu se součástkami bylo skladem pouze několik málo typů IO. Vybíráno bylo mezi IO NXQ1TXH5101J a třemi IO z řady WCT101x (všechny IO od firmy NXP Semiconductors). Z výběru byly vyloučeny IO v pouzdru BGA zejména z důvodu náročnějšího návrhu a výroby DPS.

IO ze série WCT101x (konkrétně MWCT1013VLH, MWCT1012VLF a MWCT1013-AVLH, liší se od sebe vesměs v detailech, např. v doporučených úrovních napájecího napětí) slouží k řízení (vysílače) bezdrátového nabíjení. Prodávány jsou v pouzdrech LQFP.

Přenášený výkon je regulován fázovým posuvem a změnou střídy signálu pro spínací tranzistory v můstkovém zapojení v kombinaci se změnou napájecího napětí tranzistorového můstku realizovanou pomocí snižujícího DC/DC měniče, pracuje tedy s konstantní spínací frekvencí. [46]

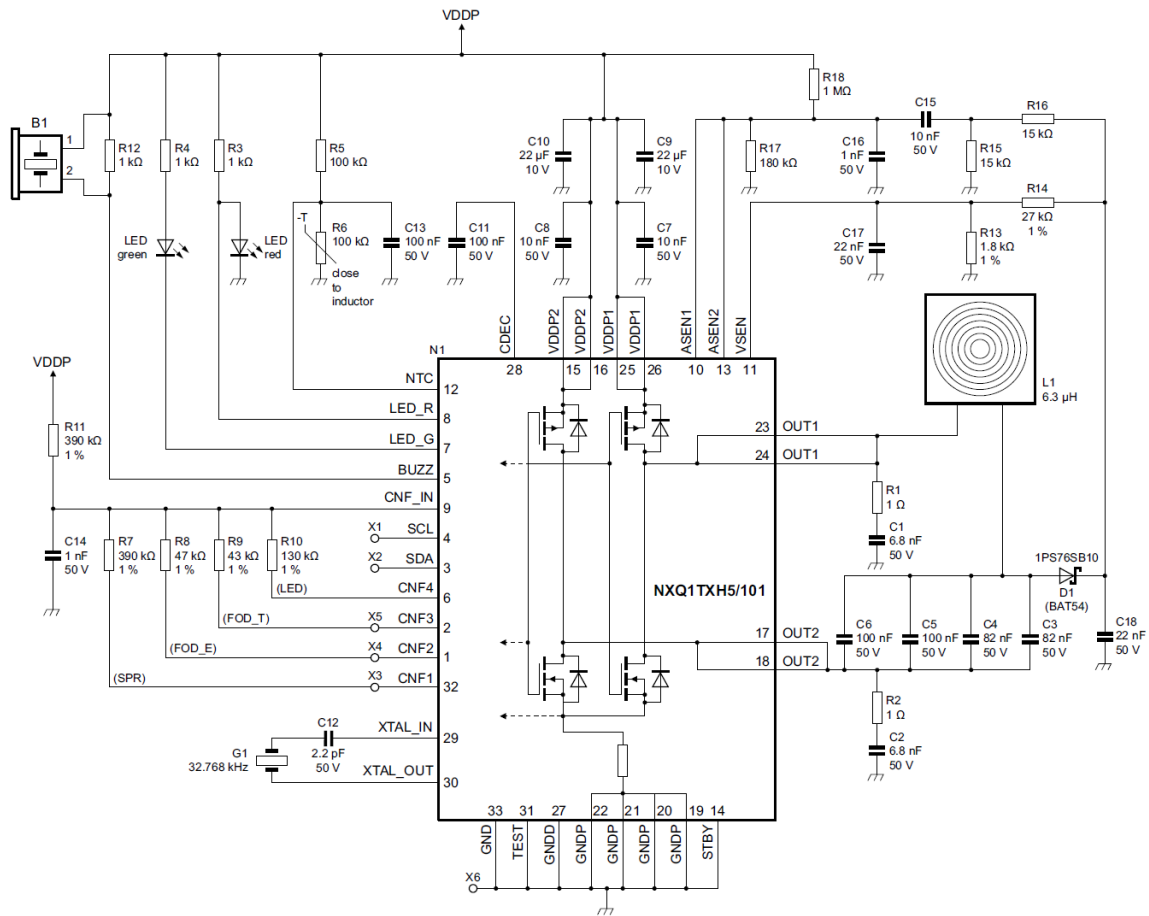
IO z této řady generují jednak signály pro spínací tranzistory (resp. pro budiče spínacích tranzistorů) můstku, ke kterému je připojena vysílací cívka, jednak signály pro spínací tranzistory snižujícího měniče; není tak zapotřebí jiný IO pro řízení snižujícího měniče. IO zároveň podporují komunikaci přes rozhraní CAN, I²C, SPI a SCI. Zdarma k dispozici je též program FreeMASTER GUI tool umožňující konfiguraci, kalibraci a debugging IO. [46]

IO NXQ1TXH5101J (v pouzdru HVQFN32) slouží k řízení bezdrátového nabíjení. Disponuje integrovanými spínacími tranzistory (též v můstkovém zapojení) pro spínání vysílací cívky; odpor kanálu spínacích tranzistorů v sepnutém stavu je cca 100 mΩ. Regulace přenášeného výkonu je realizována pomocí změny střídy spínání spínacích tranzistorů, resp. změny spínací frekvence. IO vyžaduje stabilní napájení 5 V. IO má dedikované vývody pro I²C komunikaci, nicméně ta je určena pouze pro debugging pro případ špatné funkce bezdrátového nabíječe; pro komunikaci s uživatelem používá IO dva výstupy pro LED diody, případně výstup pro akustickou indikaci pomocí piezoreproduktoru. [29]

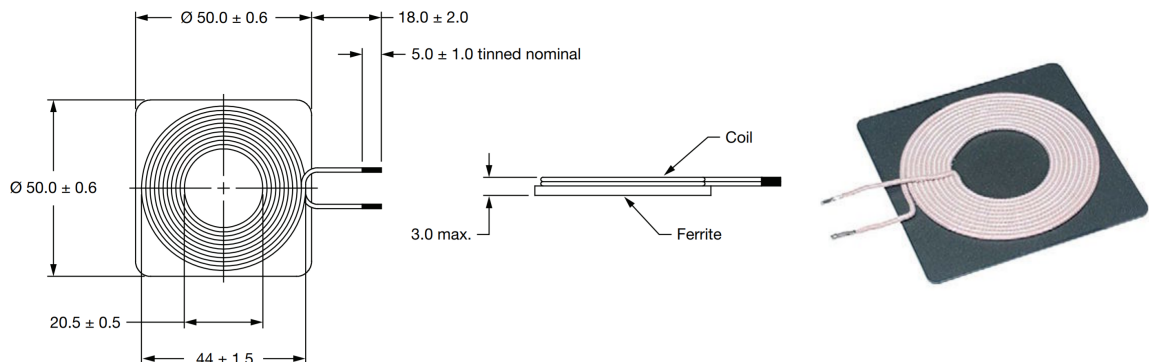
Z důvodu kompaktnějšího zapojení tohoto IO v porovnání s řadou WCT101x (integrované spínací tranzistory vs. externí budiče a externí spínací tranzistory) i mírně nižší ceny IO a velmi pravděpodobně i celkového výrobku včetně DPS byl vybrán IO NXQ1TXH5101J.

10.2 Bezdrátový vysílač

Na obr. 10.1 je zobrazeno schéma zapojení vysílače bezdrátového nabíjení uvedené v datasheetu IO. Zapojení se skládá ze samotného IO, sériového LC rezonančního obvodu skládajícího se z vysílací cívky L_1 a kondenzátorů C_3 až C_6 (rezonanční frekvence je zhruba 105 kHz), RC ochran (R_1 , R_2 , C_1 , C_2), blokovacích kondenzátorů (C_8 až C_{11}), napěťových děličů (R_{13} až R_{18}) pro snímání napětí na rezonančním obvodu, rezistorů (R_7 až R_{11}) pro nastavení potřebných parametrů vysílače. [29]



Obrázek 10.1: Schéma zapojení vysílače pro bezdrátové nabíjení uvedené v datasheetu, převzato z [29].



Obrázek 10.2: Vysílací cívka pro bezdrátové nabíjení (rozměry uvedeny v mm), převzato z [47].

Jako vysílací cívka byla použita cívka s označením IWTX5050CZEB6-R3KF1 s indukčností $6,3 \mu\text{H}$ (tolerance $\pm 10\%$) určená pro přenášené výkony do 15 W . Odpor vinutí je typicky $36 \text{ m}\Omega$. Ze zadní strany má cívka stínění z feritového materiálu. Cívka je přímo

určena pro vysílač bezdrátového nabíjení standardu Qi. Foto vysílací cívky a její rozměry jsou zobrazeny na obr. 10.2. Jako kondenzátory C_3 až C_6 , které tvoří rezonanční LC obvod, byly použity keramické kondenzátory s dielektrikem NP0 (C0G), které nevykazují výrazné změny kapacity v závislosti na napětí či teplotě. Hodnoty použitých součástek byly určeny z [29, 48].

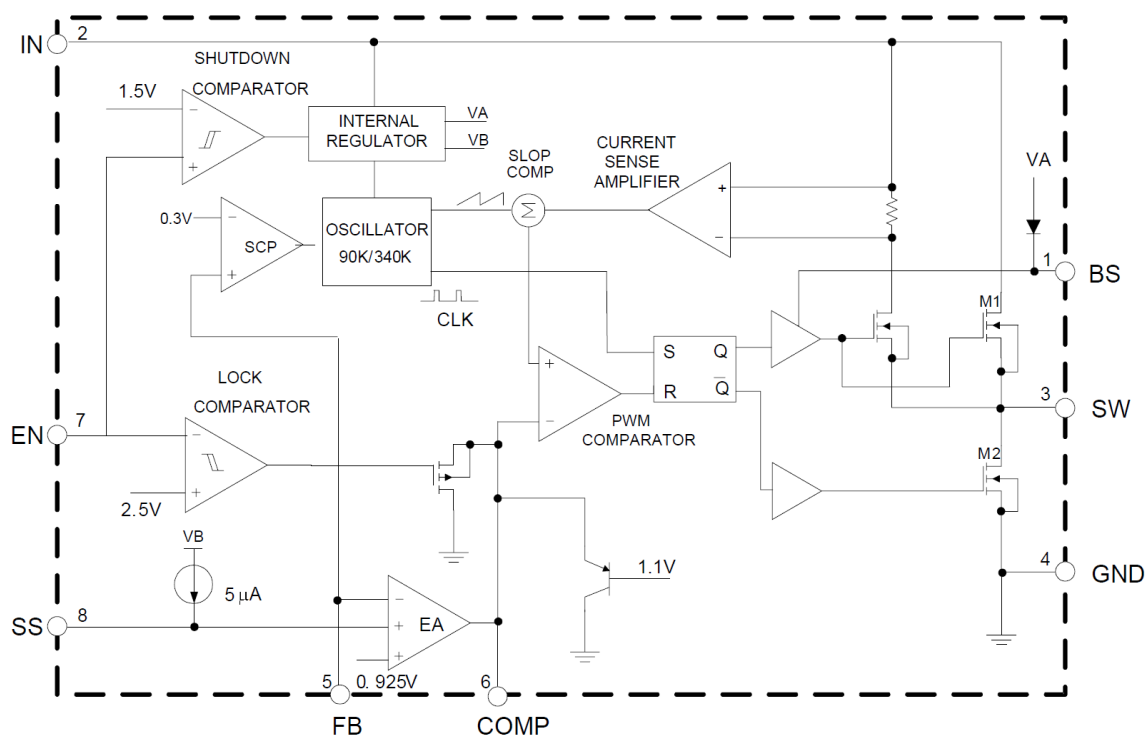
10.3 Snižující měnič

Pro napájení IO pro bezdrátové nabíjení je nutné snížit napětí z akumulátoru (o nominálním napětí 10,86 V) na 5 V; potřebný proud je alespoň 2 A. Vzhledem k tomu, že minimální napětí akumulátoru (8,25 V) je vždy větší než výstupní napětí měniče (5 V), volíme snižující topologii měniče (step-down, buck).

Od tohoto snižujícího měniče požadujeme dostatečnou účinnost, kompaktní provedení a možnost jednoduše upravovat odezvu zpětnovazební smyčky měniče. To vede na použití synchronního usměrnění, integrovaných spínacích tranzistorů v DC/DC kontroléru a externí kompenzace zpětnovazební smyčky pomocí rezistoru a kondenzátoru. Z velkého množství dostupných IO DC/DC kontrolérů pro snižující měnič byl zejména z cenových důvodů vybrán již starší IO AP3503E. (Tento měnič lze navíc použít nejen pro napájení IO vysílače bezdrátového nabíjení, ale i 5V USB zařízení připojených k power bance standardně přes USB A konektor.)

IO AP3503E je DC/DC kontrolér v pouzdru PSOP-8 s integrovanými MOSFET spínacími tranzistory schopný dodávat na výstup měniče proud 3 A. Spínací frekvence je 340 kHz, napájecí napětí může být v rozsahu 4,5 V až 18 V. IO disponuje základními funkcemi, jako je softstart, podpěťová ochrana, teplotní ochrana nebo ochrana proti zkratu ad. Regulace funguje v proudovém módu (Current Mode Control, CMC). Vnitřní zapojení je zobrazeno na obr. 10.3. Ukázkové zapojení měniče s IO AP3503E je zobrazeno na obr. 10.4.

Nyní určíme hodnoty součástek připojených k DC/DC kontroléru. Hodnoty rezistorového děliče R_1 a R_2 (označení součástek odpovídá obr. 10.4), jehož výstup je připojen na



Obrázek 10.3: Funkční blokové zapojení IO AP3503E, převzato z [49].

vstup zpětné vazby (vývod 5 IO), vypočteme ze vztahu 10.1 (převzato z [50]):

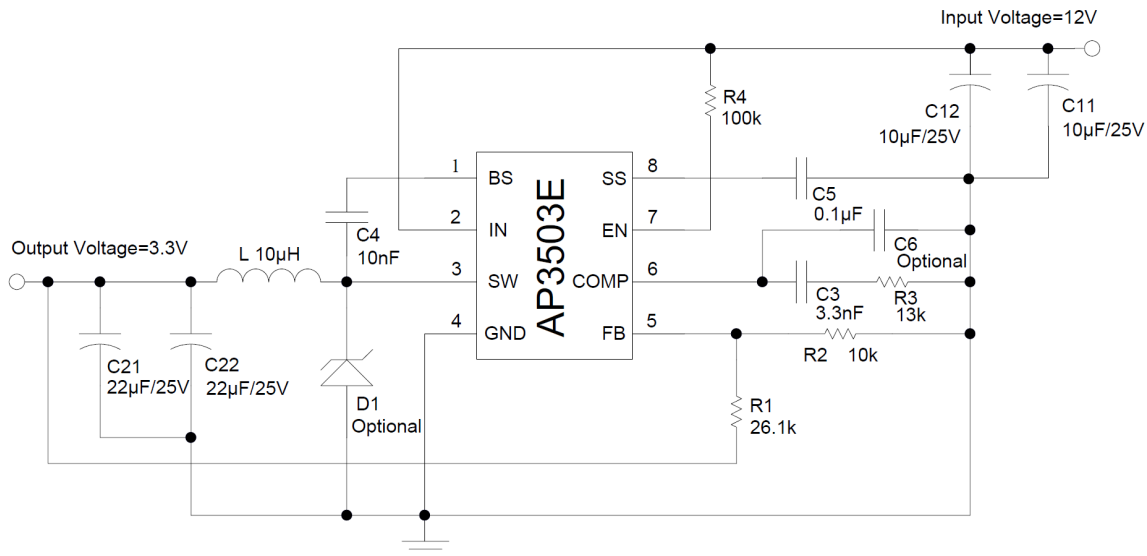
$$U_{OUT} = 0,925 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}, \quad (10.1)$$

kde U_{OUT} je výstupní napětí měniče. To volíme mírně vyšší než 5 V, konkrétně 5,15 V, z důvodu kompenzace úbytku napětí na vodivých cestách DPS při vyšším zatížení měniče; hodnotu R_2 volíme dle doporučení výrobce na 10 k Ω . Po vyjádření vychází hodnota R_1 zhruba 45,7 k Ω , což téměř odpovídá sériové kombinaci rezistorů 39 k Ω a 6,8 k Ω .

Hodnotu indukčnosti L vypočteme ze vztahu 10.2 (převzato z [50]):

$$L = U_{OUT} \cdot \frac{U_{IN} - U_{OUT}}{f_{SW} \cdot U_{IN} \cdot \Delta I}, \quad (10.2)$$

kde $U_{OUT} = 5,15$ V je velikost výstupního napětí, $U_{IN} = 12,6$ V je napětí na vstupu měniče a zároveň maximální napětí akumulátoru, $f_{SW} = 340$ kHz je spínací frekvence a ΔI je zvlnění proudu tekoucího induktorem v CCM módu. Za tuto hodnotu dosazujeme



Obrázek 10.4: Příklad zapojení IO AP3503E, převzato z [49].

20 % maximální hodnoty výstupního proudu (3 A), tj. 0,6 A. Po dosazení vychází hodnota indukčnosti $L = 14,9 \mu\text{H}$, volíme tedy nejbližší běžnou hodnotu, tj. $15 \mu\text{H}$.

Celkovou hodnotu vstupních filtračních kondenzátorů vypočteme ze vztahu 10.3 (převzato z [50]):

$$C_{\text{IN}} = \frac{I_{\text{OUT}}}{f_{\text{SW}} \cdot \Delta U_{\text{IN}}} \cdot \left(1 - \frac{U_{\text{OUT}}}{U_{\text{IN}}}\right) \cdot \frac{U_{\text{OUT}}}{U_{\text{IN}}}, \quad (10.3)$$

kde $I_{\text{OUT}} = 3 \text{ A}$ je maximální výstupní proud měniče, $f_{\text{SW}} = 340 \text{ kHz}$ je spínací frekvence, $U_{\text{OUT}} = 5,15 \text{ V}$ je výstupní napětí, $U_{\text{IN}} = 10,86 \text{ V}$ je vstupní napětí (a nominální napětí akumulátoru). Požadujeme zvlnění vstupního napětí maximálně $\Delta U_{\text{IN}} = 100 \text{ mV}$. Po odsazení vychází požadovaná kapacita vstupních filtračních kondenzátorů $C_{\text{IN}} \doteq 22 \mu\text{F}$. Vstup měniče bude osazen pěti keramickými kondenzátory $22 \mu\text{F}/16 \text{ V}$ s celkovou reálnou kapacitou zhruba $22 \mu\text{F}$ při $12,6 \text{ V}$ [51].

Celkovou kapacitu výstupních filtračních kondenzátorů můžeme zvolit dle maximálního požadovaného zvlnění nebo dle přechodové odezvy (skokové změny výstupního napětí při skokové změně zatížení). Vzhledem k tomu, že ze vztahu pro výpočet kapacity z přechodové odezvy vychází požadovaná filtrační kapacita větší, bude použit tento vztah (viz

rovnice 10.4, převzato z [50], upraveno).

$$C_{\text{OUT}} = \frac{L \cdot \Delta I_{\text{OUT}}^2}{\Delta U_{\text{OUT}} \cdot (U_{\text{IN}} - U_{\text{OUT}})}, \quad (10.4)$$

kde $L = 15 \mu\text{H}$ je indukčnost induktoru, $\Delta I_{\text{OUT}} = 2,4 \text{ A}$ je skoková změna zatížení měniče (bereme v úvahu změnu zatížení měniče z 10 % na 90 %, tj. z 0,3 A na 2,7 A), $\Delta U_{\text{OUT}} = 0,5 \text{ V}$ je maximální přípustná změna napětí na výstupu, $U_{\text{IN}} = 8,25 \text{ V}$ je vstupní napětí měniče (resp. minimální napětí na akumulátoru) a $U_{\text{OUT}} = 5,15 \text{ V}$. Po dosazení vychází hodnota výstupních filtračních kondenzátorů $C_{\text{OUT}} \doteq 56 \mu\text{F}$. Na výstup měniče bude připojeno celkem pět keramických kondenzátorů $22 \mu\text{F}/16 \text{ V}$ s celkovou reálnou kapacitou zhruba $59 \mu\text{F}$ při $5,2 \text{ V}$ [51] (tři budou připojeny přímo na výstup měniče, dva budou pak jako blokovací kondenzátory připojeny k IO pro bezdrátové nabíjení na napájecí větev 5 V napájenou ze snižujícího měniče).

Hodnotu kompenzačního rezistoru R_3 zjistíme dosazením do vztahu 10.5 (převzato z [50])

$$R_3 = f_t \cdot \frac{2\pi \cdot C_{\text{OUT}}}{G_{\text{EA}} \cdot G_{\text{CS}}} \cdot \frac{U_{\text{OUT}}}{0,925}, \quad (10.5)$$

kde $f_t = 20 \text{ kHz}$ je tranzitní frekvence¹, při které je zisk chybového zesilovače roven 1 (0 dB), $C_{\text{OUT}} = 59 \mu\text{F}$ je celková reálná kapacita výstupních filtračních kondenzátorů při výstupním napětí $U_{\text{OUT}} = 5,15 \text{ V}$, $G_{\text{EA}} = 800 \mu\text{S}$ je zisk chybového zesilovače a $G_{\text{CS}} = 5,2 \text{ A/V}$ je transkonduktance proudového snímače. Po dosazení vychází hodnota kompenzačního rezistoru $R_3 \doteq 9,9 \text{ k}\Omega$, volíme tedy nejbližší běžnou hodnotu odporu, tj. $10 \text{ k}\Omega$.

Hodnotu kompenzačního kondenzátoru C_3 vypočteme ze vztahu 10.6

$$C_3 = \frac{C_{\text{OUT}} \cdot R_{\text{OUT}}}{R_3}, \quad (10.6)$$

kde $C_{\text{OUT}} = 59 \mu\text{F}$ je celková reálná kapacita výstupních filtračních kondenzátorů při

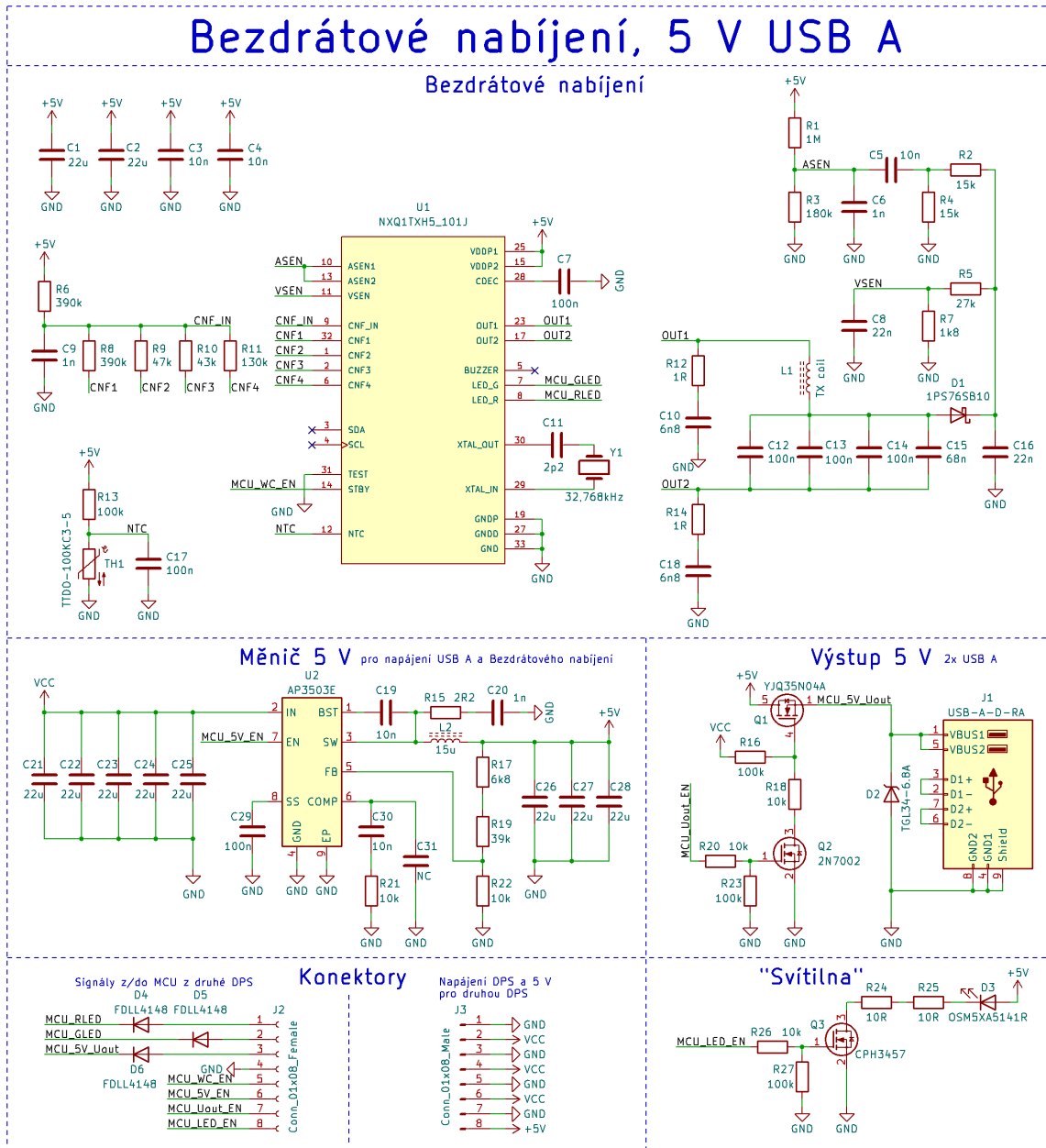
¹Obvykle bývá f_t volena v intervalu pětina až dvacetina spínací frekvence měniče); zde byla zvolena hodnota 20 kHz (jedna sedmnáctina spínací frekvence) zajišťující dobrou stabilitu za cenu zpomalení regulační smyčky zpětné vazby.

výstupním napětí $U_{\text{OUT}} = 5,15 \text{ V}$, $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ a

$$R_{\text{OUT}} = \frac{U_{\text{OUT}}}{I_{\text{OUT}}}, \quad (10.7)$$

kde $U_{\text{OUT}} = 5,15 \text{ V}$ je výstupní napětí měniče a $I_{\text{OUT}} = 3 \text{ A}$ je maximální proud odebíraný z výstupu měniče. Po dosazení vychází R_{OUT} rovno přibližně $1,72 \Omega$. Po dosazení do vztahu 10.6 vychází hodnota $C_3 = 10,1 \text{ nF}$, volíme tedy nejbližší běžnou hodnotu, tj. 10 nF .

Celkové schéma zapojení snižujícího měniče i obvodu (vysílače) pro bezdrátové nabíjení je k dispozici na obr. 10.5. Pro napájení zařízení pouze napětovou úrovní 5 V z tohoto snižujícího měniče byly přidány konektory USB A. Protože by však snižující měnič při vyšším zatížení nemusel být schopen dodávat potřebný proud pro bezdrátové nabíjení a zároveň pro zařízení připojená přes konektory USB A, byl před USB A konektor připojen tranzistor Q_1 , aby mohlo být přepínáno mezi napájením USB A konektoru a bezdrátovým nabíjením.



Obrázek 10.5: Celkové schéma zapojení snižujícího měniče, vysílače pro bezdrátové nabíjení a bílé LED pro použití power banky jako svítilny.

Kapitola 11

Výroba, oživování

Pro výrobu navrženého zařízení bylo nutné navrhnout DPS; pro úsporu místa byly navrženy dvě DPS, které jsou v power bance umístěny nad sebou; byly tedy navrženy dvouvrstvá DPS se snižujícím měničem a vysílačem bezdrátového nabíjení a čtyřvrstvá DPS obsahující mikrokontrolér, USB-C kontrolér, BMS a měnič ZETA/SEPIC. Seznam použitých součástek, obrázky rozmístění součástek a vygenerované Gerber soubory jsou k dispozici v příloze na DVD. K návrhu DPS byl použit program KiCAD.

K osazování součástek byly použity mikropáječka a horkovzdušná páječka, příp. pro větší (THD) součástky traťopáječka. Při oživování byly zjištěny chyby při návrhu čtyřvrstvé DPS: Byla zaměněna polarita napájecích vývodů operačního zesilovače, napěťové reference byly místo na spínanou napájecí větev 3,3 V připojeny na trvale napájenou větev 3,3 V a kovová část tlačítek SW₁ a SW₂ měla být připojena na společný vodič (měděnou plochu), omylem ale byla ponechána nezapojená. DPS tedy byla ručně upravena (některé vodivé cesty musely být přerušeny a nahrazeny drátkem). (V souborech návrhového programu KiCAD a v Gerber souborech jsou tyto chyby již opraveny.) Po opravě těchto chyb již nebyly zjištěny žádné další chyby v návrhu. K programování mikrokontroléru byl použit program MPLAB X IDE, jako programátor/debugger byl použit MPLAB Snap.

V programu FreeCAD byl navržen 3D model krabičky power banky, ve které jsou umístěny desky plošných spojů, vysílací cívka, displej a akumulátor. Krabička byla vytištěna na 3D tiskárně, jako tiskový materiál byl vybrán ABS. Při tisku vyšších a rozměrnějších objektů však docházelo (pravděpodobně zejména z důvodu nerovnoměrného ohřevu tiskové

podložky) k oddělení některých vrstev. Tyto mezery byly po dokončení tisku vyplněny manuálně nanesením tiskové struny rozpuštěné v acetonu, stěny krabičky byly pro zvýšení pevnosti a vyhlazení potřeny acetonem.

Pro snazší interakci uživatele s power bankou disponuje power banka malým OLED displejem s rozlišením 128 x 32 pixelů, na kterém je zobrazován stav akumulátoru (odhad míry nabití v procentech s rozlišením 10 %, příp. chybové hlášení), stav USB A konektoru (ON, OFF, Chyba), stav USB-C konektoru (displej zobrazuje zvolenou napěťovou úroveň, příp. chybové hlášení) a stav bezdrátového nabíjení (ON, OFF, Nabíjení, Nabito, Chyba). Stav bezdrátového nabíjení je zjišťován ze stavu vývodů IO vysílače, přičemž tyto vývody byly určeny pro spínání LED diod pro indikaci stavu IO uživateli. Při oživování zařízení však bylo zjištěno, že v okamžiku přechodu vysílače ze stavu ON do stavu Nabíjení však dochází k tomu, že logická úroveň na těchto vývodech se po dobu zhruba jedné až dvou sekund zdánlivě náhodně mění, což má obvykle za následek chybné zobrazení stavu bezdrátového nabíjení na displeji: Místo stavu ON nebo stavu Nabíjení bývá zobrazen stav Chyba, případně stav Nabito; po nejdéle dvou sekundách však dojde k zobrazení správného stavu bezdrátového nabíjení na displej.

Při oživování zařízení se též vyskytl problém s USB-C kontrolérem: přestože byl konfigurován tak, aby při připojení spotřebiče k power bance podporoval vyšší napěťové úrovně než 5 V, zařízení po připojení k power bance nedokázalo zvolit vyšší napěťovou úroveň. Nakonec bylo zjištěno, že při konfiguraci USB-C kontroléru omylem došlo k vypnutí podpory rychlého nabíjení, což způsobilo nedostupnost vyšších napěťových úrovní.

Aby byla power banka univerzálně použitelná, byla navrženo zařízení založené na IO IP2721, který podporuje komunikaci dle protokolu USB Power Delivery. IO lze nakonfigurovat pomocí připojených rezistorů tak, aby při připojení ke zdroji energie podporujícím protokol USB Power Delivery zvolil uživatelem požadovanou (příp. nejbližší nižší) napěťovou úroveň (tedy. standardně 5 V, 9 V, 12 V, 15 V nebo 20 V). Toto zařízení (pro které byla též navržena DPS a plastová krabička, která byla vytištěna na 3D tiskárně) lze použít pro napájení zařízení vyžadujících jinou než standardní napěťovou úroveň (5 V), která nepodporují komunikaci dle standardu USB Power Delivery. Je však na uživateli, aby

ověřil, že toto zařízení je nakonfigurováno pro zvolení napěťové úrovně, kterou zařízení vyžadující vyšší napěťovou úroveň podporuje (ověření je možné např. pohledem na displej power banky, který po připojení spotřebiče komunikujícího s využitím protokolu USB Power Delivery zobrazuje jím zvolenou napěťovou úroveň na USB-C konektoru) a aby zajistil, že maximální odběr proudu takto připojeného zařízení nepřesáhne maximální podporovaný výstupní proud power banky pro danou napěťovou úroveň¹. (Podrobnosti k navržené DPS jsou k dispozici v příloze na DVD.)

¹Pokud dojde k přetížení výstupu USB-C power banky, power banka pozastaví činnost měniče ZETA/SEPIC a ohlásí na displeji chybovou hlášku. Obnovení činnosti měniče a smazání chybové hlášky je možné např. vypnutím a zapnutím power banky (stiskem tlačítka SW₁).

Kapitola 12

Měření a testování

V rámci této kapitoly dojde k ověření funkčnosti rychlého nabíjení, snižujícího měniče, bezdrátového nabíjení a BMS. V samostatné podkapitole jsou pak shrnuty výsledky měření.

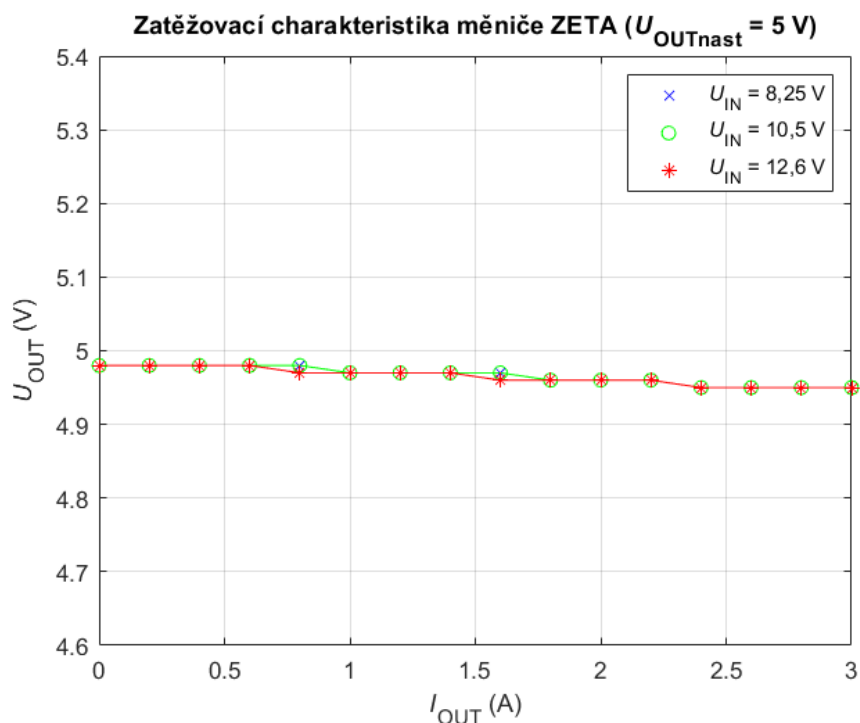
12.1 ZETA/SEPIC a rychlé nabíjení

Pro ověření vlastností měniče ZETA/SEPIC byly změřeny jeho základní charakteristiky (účinnost, zatěžovací charakteristika nebo převodní charakteristika). Pro tato měření byl měnič napájen laboratorním zdrojem zajišťujícím požadované napětí na vstupu měniče (vstupní napětí měniče bylo měřeno na vstupech Batt₁ pro připojení akumulátoru, výstupní napětí bylo měřeno poblíž USB-C konektoru na ochranné diodě D₁₅, viz obr. 9.2 na str. 48). Dále byly pořízeny snímky z osciloskopu pro zvlnění výstupního napětí a odezvy měniče na skokovou změnu zatížení měniče. Tabulky s naměřenými daty jsou uvedeny v příloze na DVD.

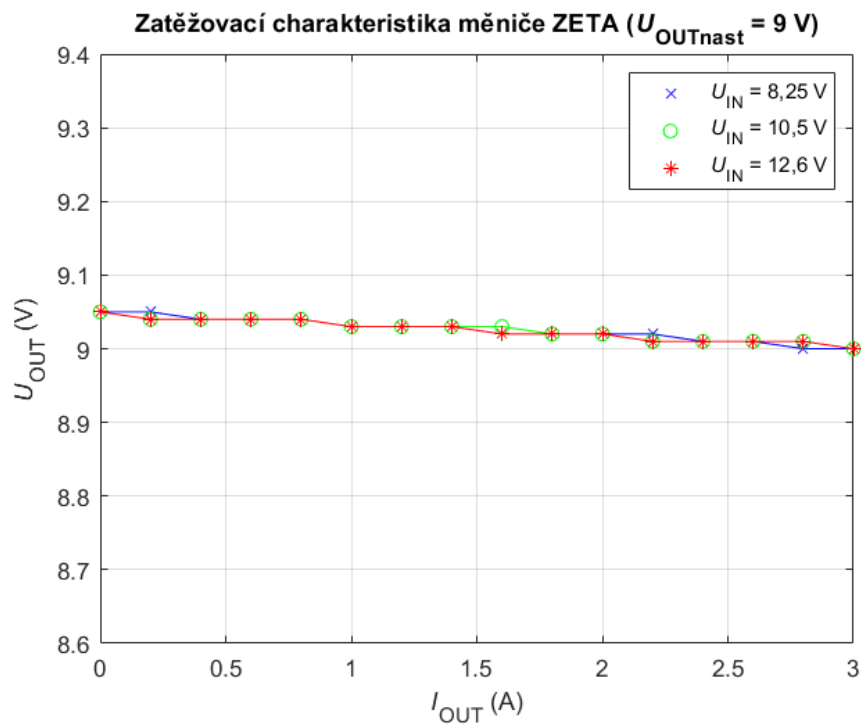
Zatěžovací charakteristika měniče ZETA v závislosti na proudu odebíraném z výstupu měniče byla změřena pro úrovně výstupních napětí 5 V, 9 V, 12 V, 15 V a 20 V (napětové úrovně podporované power bankou) pro vstupní napětí 8,25 V (minimální napětí akumulátoru), 12,6 V (maximální napětí akumulátoru) a 10,5 V (přibližně průměr minimálního a maximálního napětí akumulátoru). Výstup měniče byl připojen na umělou zátěž, na které byl nastavován odebíraný proud v rozsahu 0,2 A až 3 A (pro výstupní napětí do 12 V), 0,2 A až 2,66 A (pro výstupní napětí 15 V) a 0,2 A až 2 A (pro výstupní napětí 20 V) s krokem 0,2 A. Průběhy jsou zobrazeny na obr. 12.1, obr. 12.2, obr. 12.3, obr. 12.4 a obr.

12.5. Z průběhů vyplývá, že při vyšších hodnotách odebíraného proudu napětí na výstupu měniče poklesne zhruba o 50 mV v porovnání s napětím měniče bez zatížení; výjimkou je pokles o 100 mV při výstupním napětí 20 V, který je ale pravděpodobně způsoben změnou rozlišení multimetru pro měření napětí vyššího než 20 V. Naměřená hodnota výstupního napětí se od nastavené hodnoty liší maximálně o zhruba 100 mV.

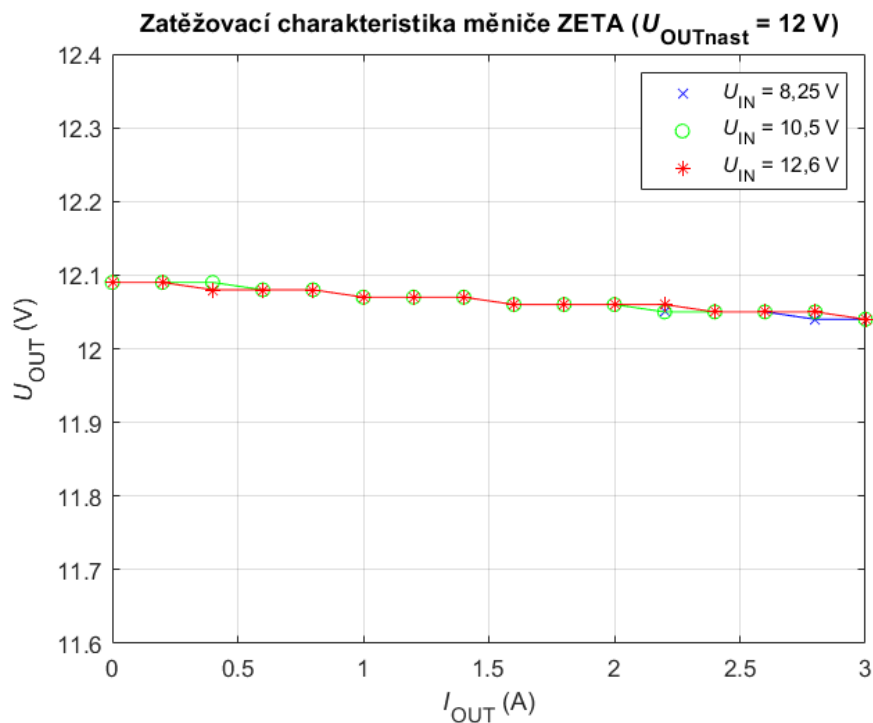
Na obr. 12.6, obr. 12.7, obr. 12.8, obr. 12.9 a obr. 12.10 jsou vykresleny grafy převodních charakteristik měniče pro power bankou podporované napěťové úrovně výstupního napětí při vstupním napětí měniče v rozsahu 8,25 V až 12,6 V pro odebírané proudy 10 %, 50 % a 100 % maximální hodnoty výstupního proudu měniče. Z průběhu napětí je patrné, že výstupní napětí je téměř nezávislé na vstupním napětí měniče, patrnější je změna výstupního napětí při zvýšení odebíraného proudu. Rozdíl výstupních napětí 100 mV pro úroveň výstupního napětí 20 V je též způsoben změnou rozlišení multimetru měřícího výstupní napětí.



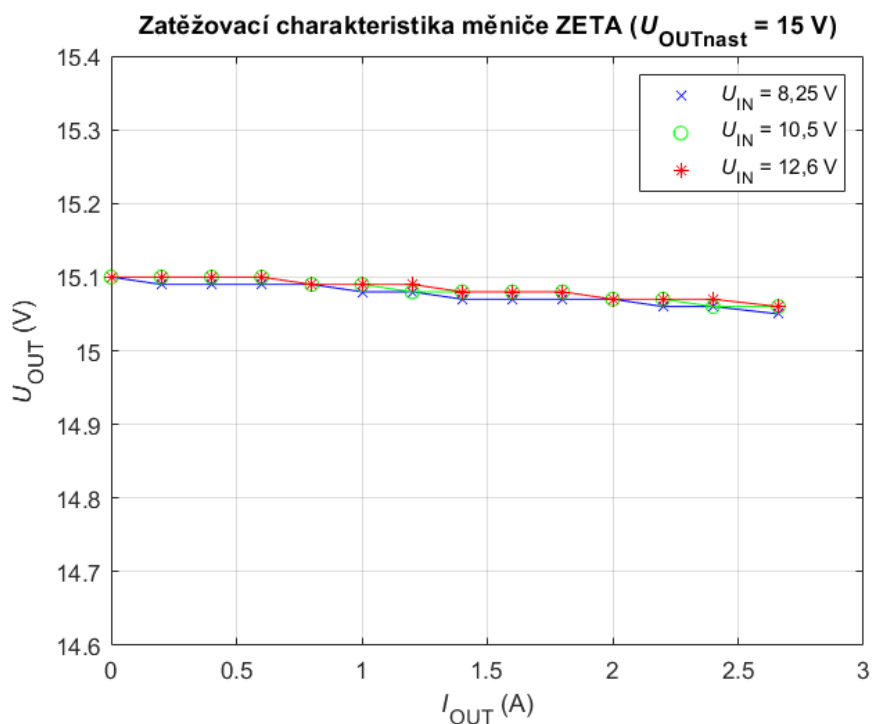
Obrázek 12.1: Zatěžovací charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 5 V.



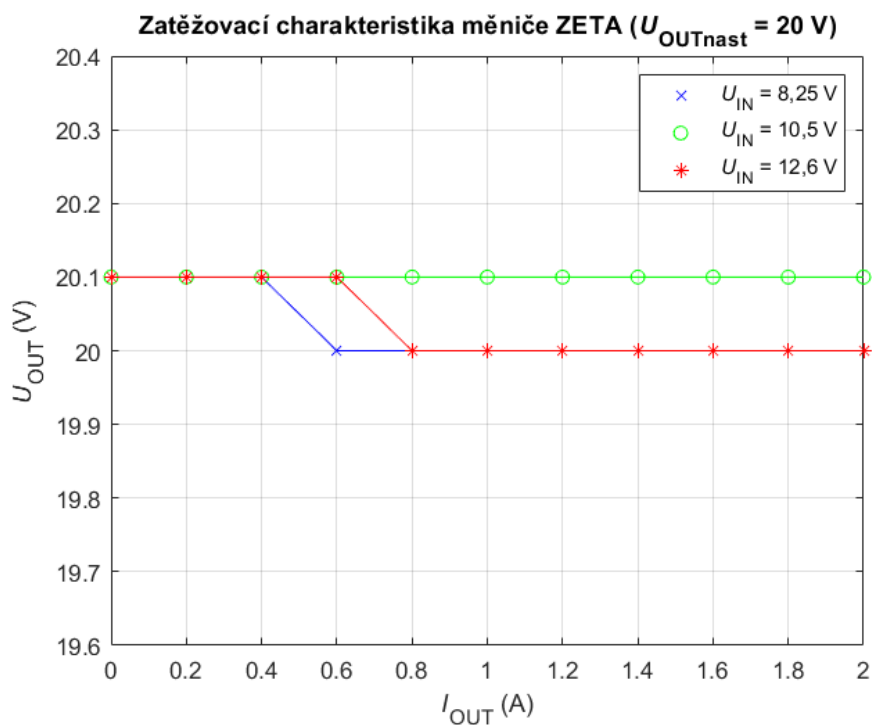
Obrázek 12.2: Zatěžovací charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 9 V.



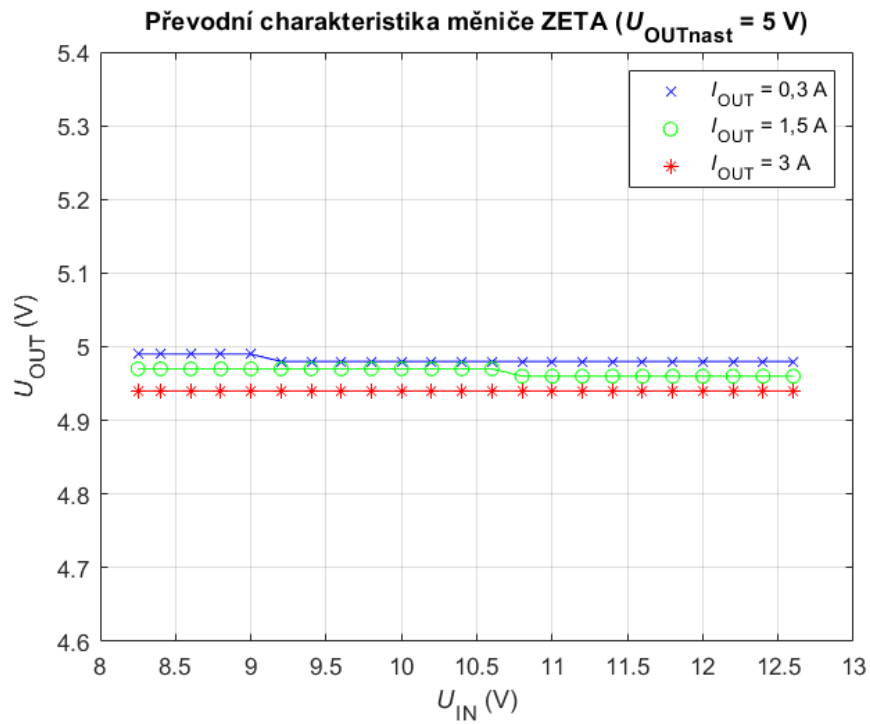
Obrázek 12.3: Zatěžovací charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 12 V.



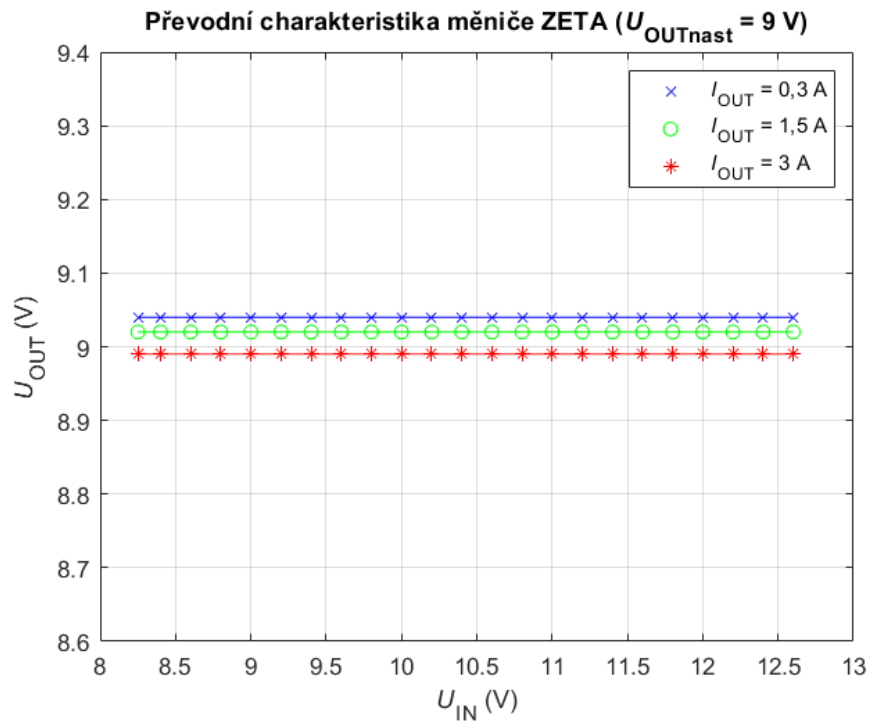
Obrázek 12.4: Zatěžovací charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 15 V.



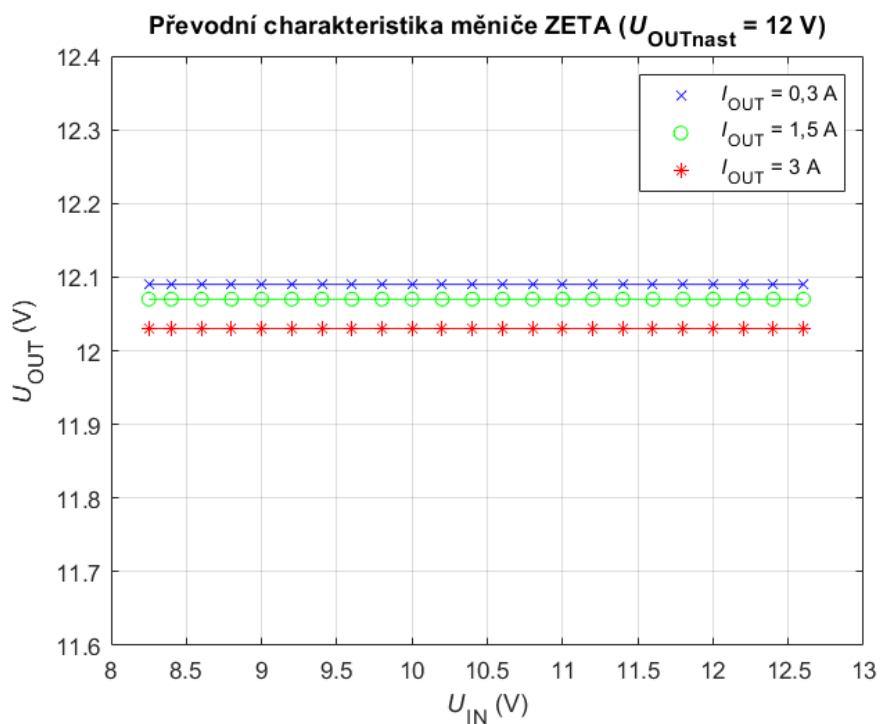
Obrázek 12.5: Zatěžovací charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 20 V.



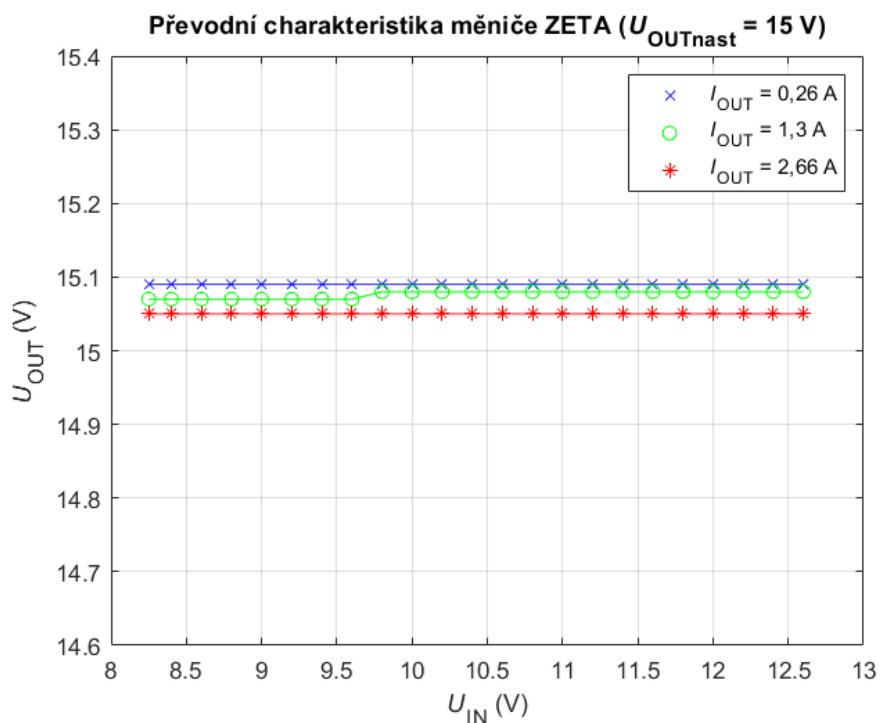
Obrázek 12.6: Převodní charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 5 V.



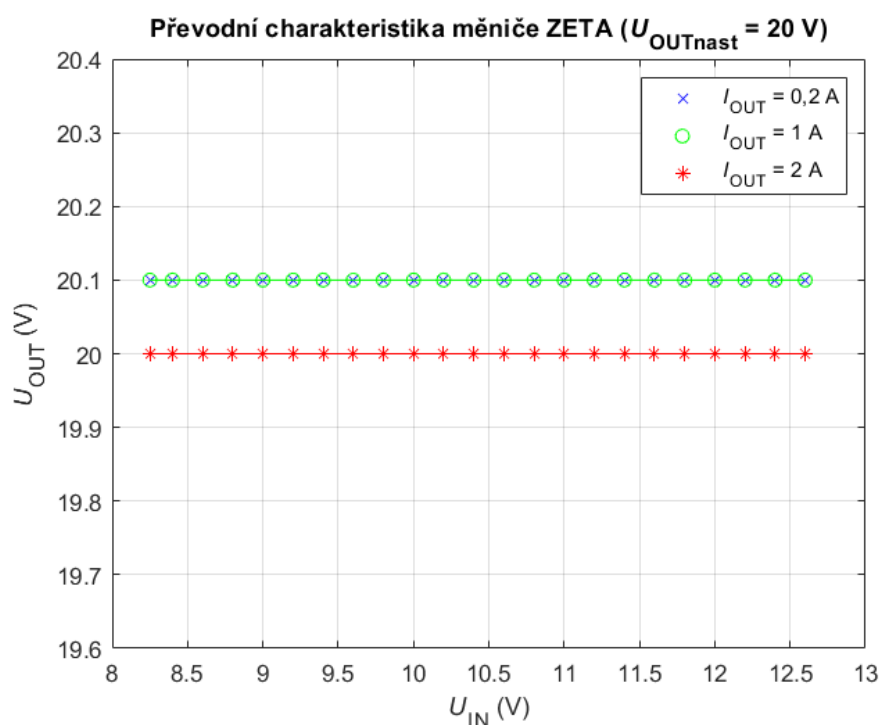
Obrázek 12.7: Převodní charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 9 V.



Obrázek 12.8: Převodní charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 12 V.

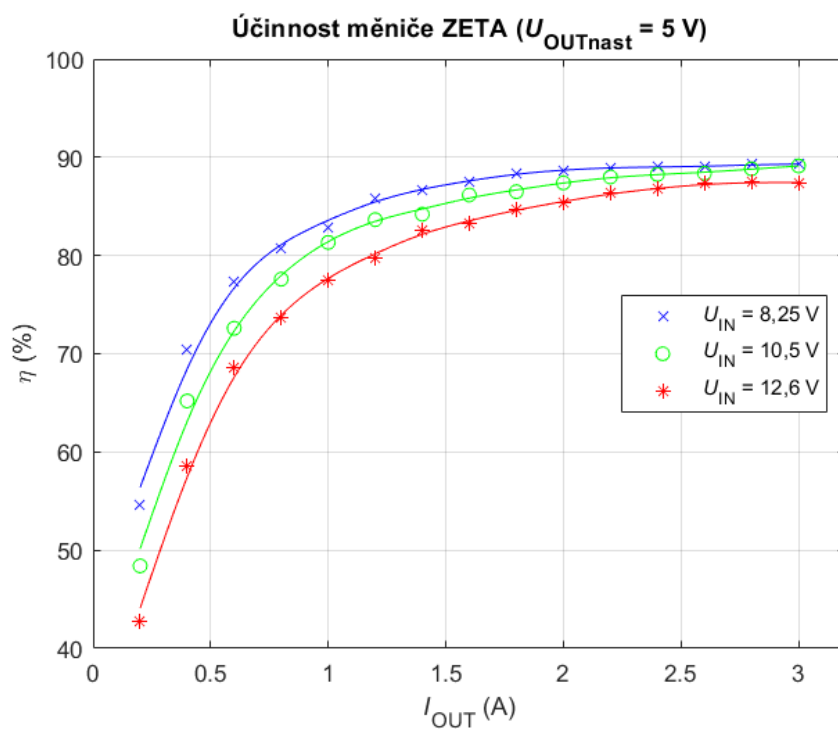


Obrázek 12.9: Převodní charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 15 V.

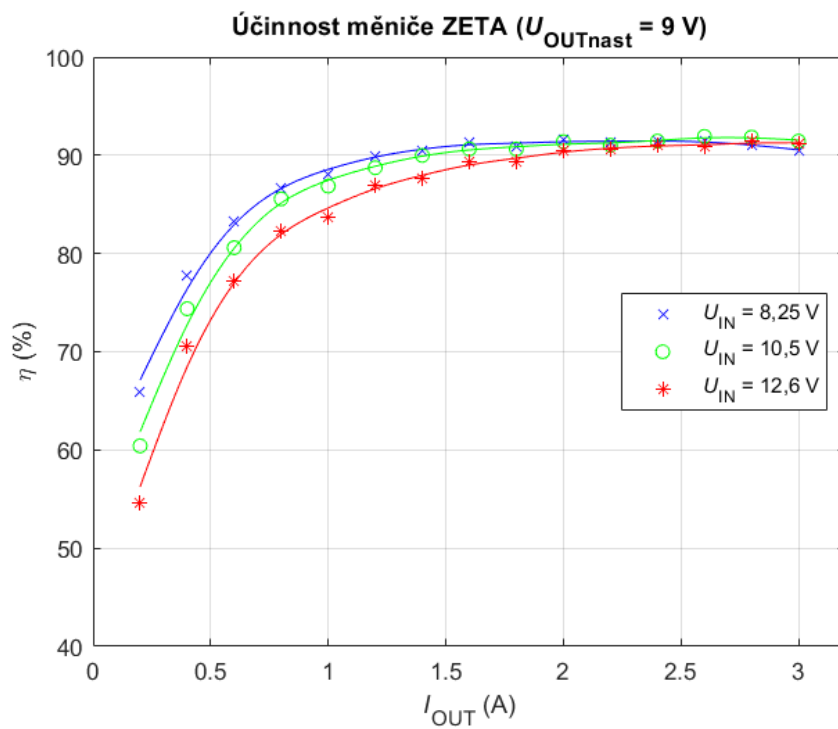


Obrázek 12.10: Převodní charakteristika měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 20 V.

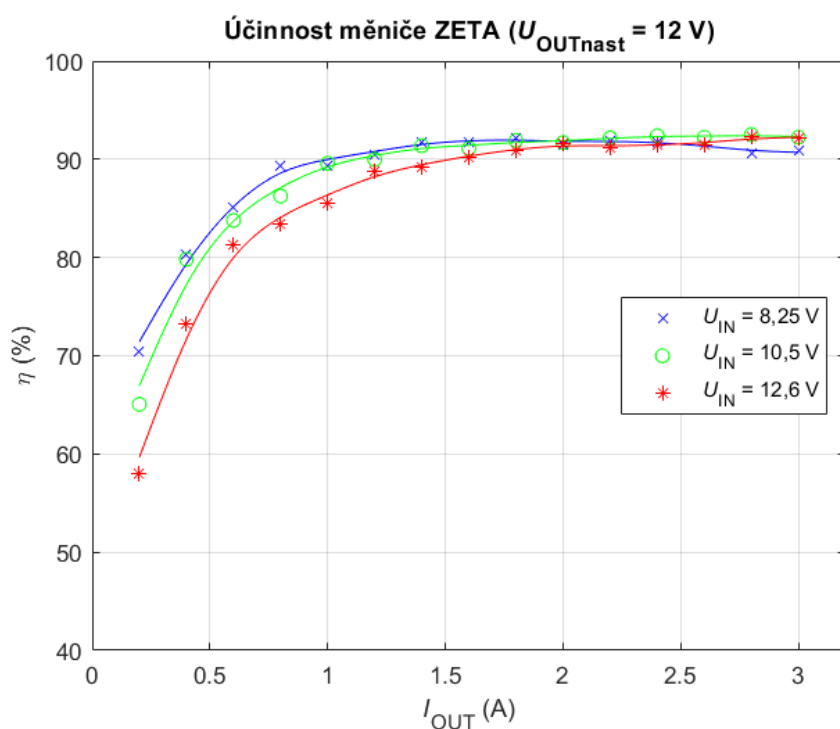
Dále byly naměřeny průběhy účinnosti měniče v závislosti na odebíraném proudu z výstupu měniče; výstupní proud byl nastavován v rozsahu 0,2 A až maximální hodnota výstupního proudu pro danou úroveň výstupního napětí, účinnost byla měřena vždy pro vstupní napětí měniče 8,25 V, 10,5 V a 12,6 V. Průběhy jsou zobrazeny na obr. 12.11, obr. 12.12, obr. 12.13, obr. 12.14 a obr. 12.15. Z obrázků je patrné, že hodnoty účinnosti měniče pro nízké hodnoty odebíraného proudu z výstupu měniče se pohybují pouze kolem 50 %; to je způsobeno zejména vlastní spotřebou mikrokontroléru (zhruba 70 mA) a USB-C kontroléru (cca 10 mA), které jsou napájeny ze vstupu měniče přes lineární stabilizátor snižující napětí akumulátoru na napětí 3,3 V. Pro vyšší hodnoty proudů odebíraných z výstupu měniče pak účinnost roste, svého maxima (přes 92 %) dosahuje při úrovni výstupního napětí 15 V, vstupním napětí měniče 12,6 V a proudu 2,66 A odebíraném z výstupu měniče. Z průběhů též vyplývá, že maxima v průbězích účinnosti při různých vstupních napětích měniče je dosaženo při různých hodnotách proudu odebíraného z výstupu měniče.



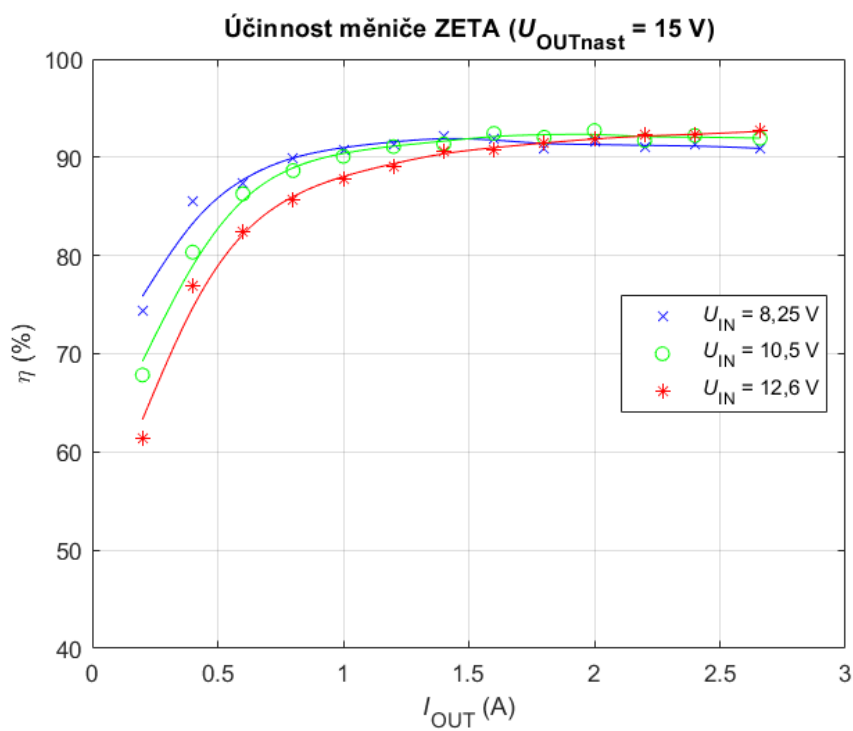
Obrázek 12.11: Účinnost měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 5 V.



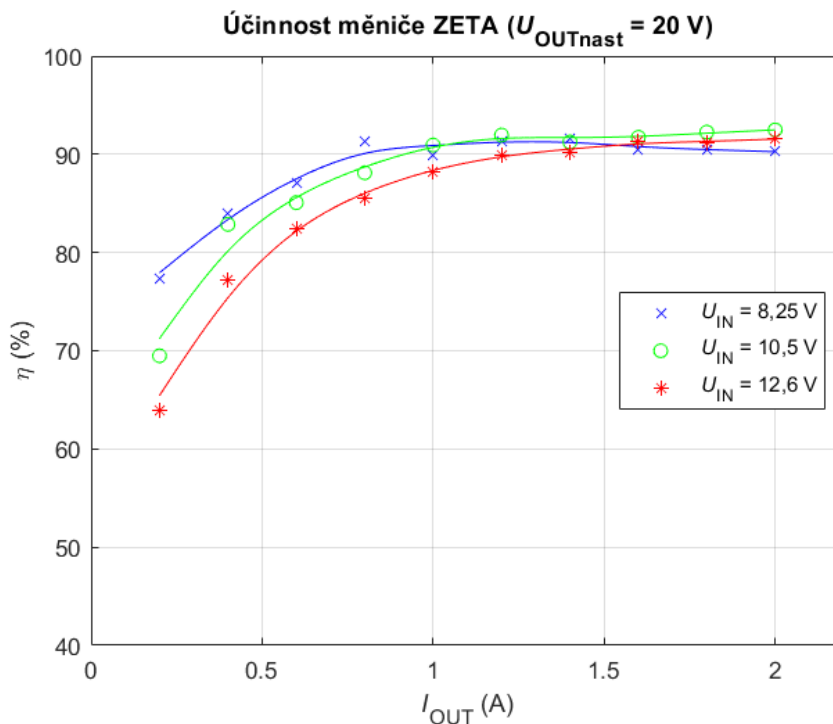
Obrázek 12.12: Účinnost měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 9 V.



Obrázek 12.13: Účinnost měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 12 V.



Obrázek 12.14: Účinnost měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 15 V.

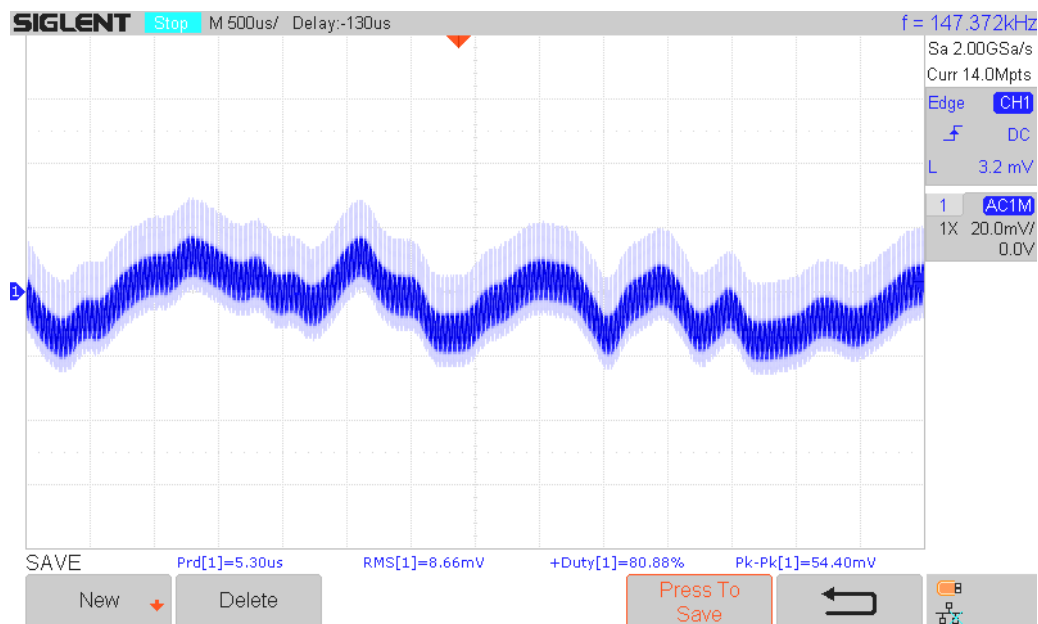


Obrázek 12.15: Účinnost měniče ZETA pro nastavené výstupní napětí měniče 20 V.

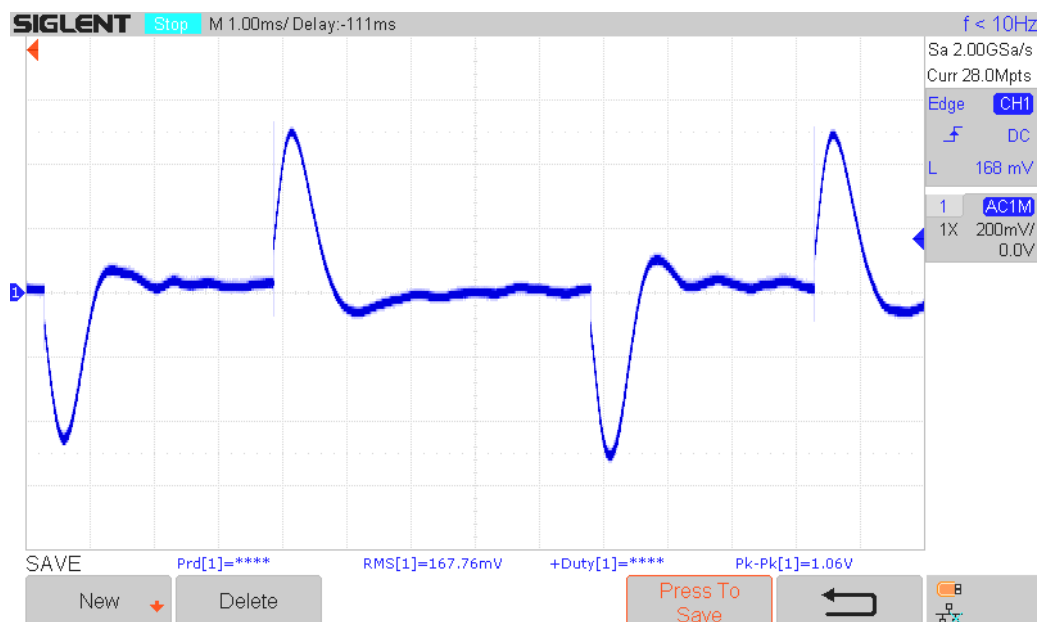
Dále bylo změřeno zvlnění výstupního napětí měniče ZETA při vstupním napětí zhruba 12 V (měnič byl napájen z akumulátoru). Zvlnění je zobrazeno na obr. 12.16. Z obrázku je patrné, že zvlnění výstupního napětí (špička-špička) je zhruba 50 mV. Na samotném zvlnění výstupního napětí se podílí i rušení způsobené spínáním spínacích tranzistorů a regulační smyčka měniče: Vlivem konečného rozlišení PWM modulátoru mikrokontroléru dochází k zakmitávání výstupního napětí (regulační smyčka neustále mění střidu signálu pro spínací tranzistory o minimální možnou hodnotu, tj. o 1 bit v registru PWM modulátoru mikrokontroléru, pro udržení požadovaného výstupního napětí). Průběhy zvlnění výstupního napětí pro ostatní napěťové úrovně jsou velmi podobné zobrazenému průběhu na obr. 12.16, nejsou tedy v tomto textu uvedeny.

Pro ověření stability zpětnovazební smyčky měniče byly naměřeny odezvy měniče (resp. průběhy výstupního napětí měniče pro power bankou podporované napěťové úrovně) pro skokové změny zatížení měniče, kdy nejprve došlo ke skokovému zvýšení odebíraného proudu z 10 % na 90 % zatížení měniče (tedy z 0,3 A na 2,7 A pro případ napěťové úrovně 5 V atd.) a poté došlo ke skokovému snížení hodnoty odebíraného proudu z 90 % zpět

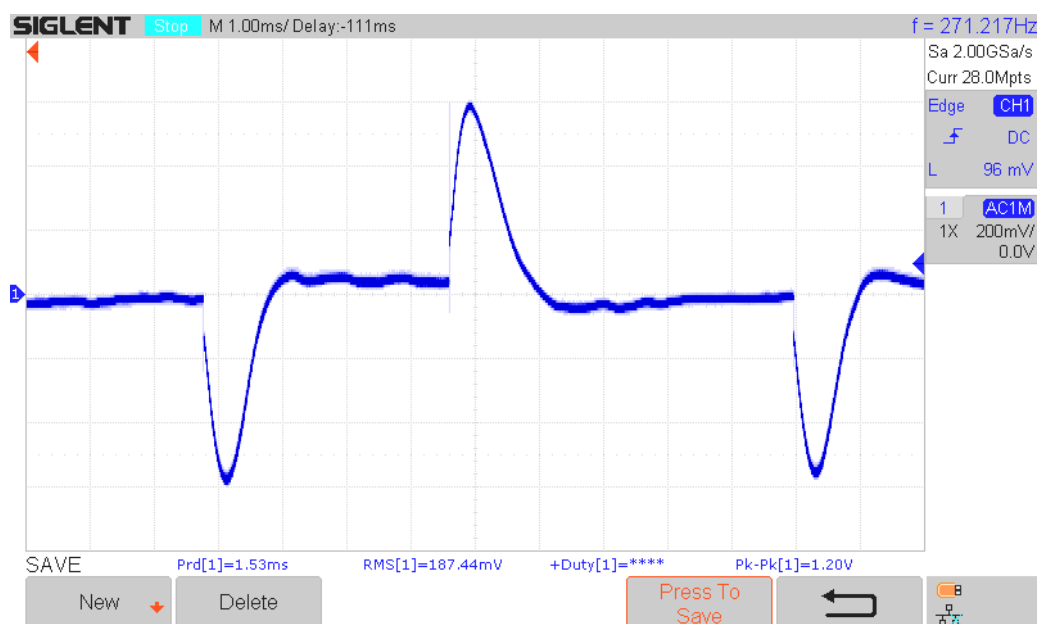
na 10 %. Průběhy jsou zobrazeny na obr. 12.17, obr. 12.18, obr. 12.19, obr. 12.20 a obr. 12.21. Z průběhů je patrné, že maximální velikost překmitu/podkmitu výstupního napětí je zhruba 600 mV a doba trvání překmitu/podkmitu je menší než 3 ms.



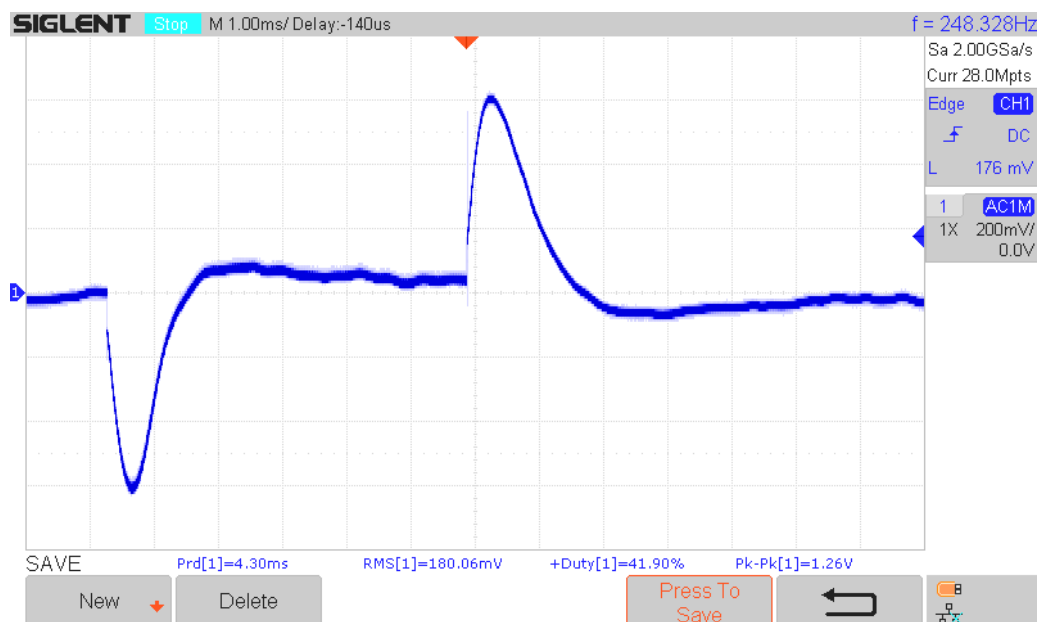
Obrázek 12.16: Zvlnění výstupního napětí měniče ZETA při vstupním napětí cca 12 V a proudu odebraném z měniče cca 2,7 A.



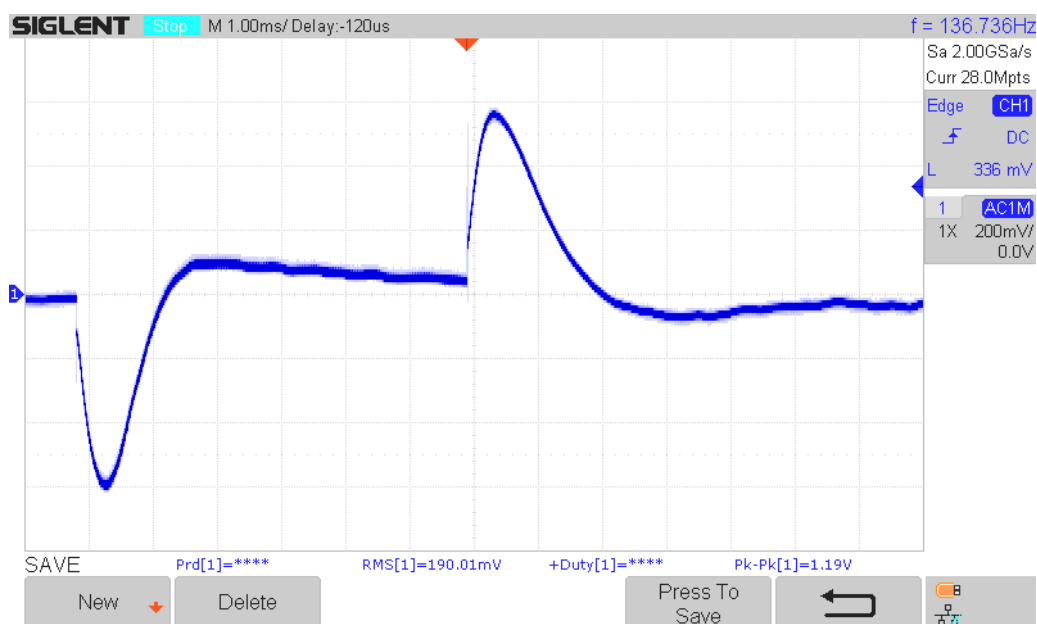
Obrázek 12.17: Odezva (průběh střídavé složky výstupního napětí) měniče ZETA na skokovou změnu zatížení měniče pro nastavenou úroveň výstupního napětí 5 V.



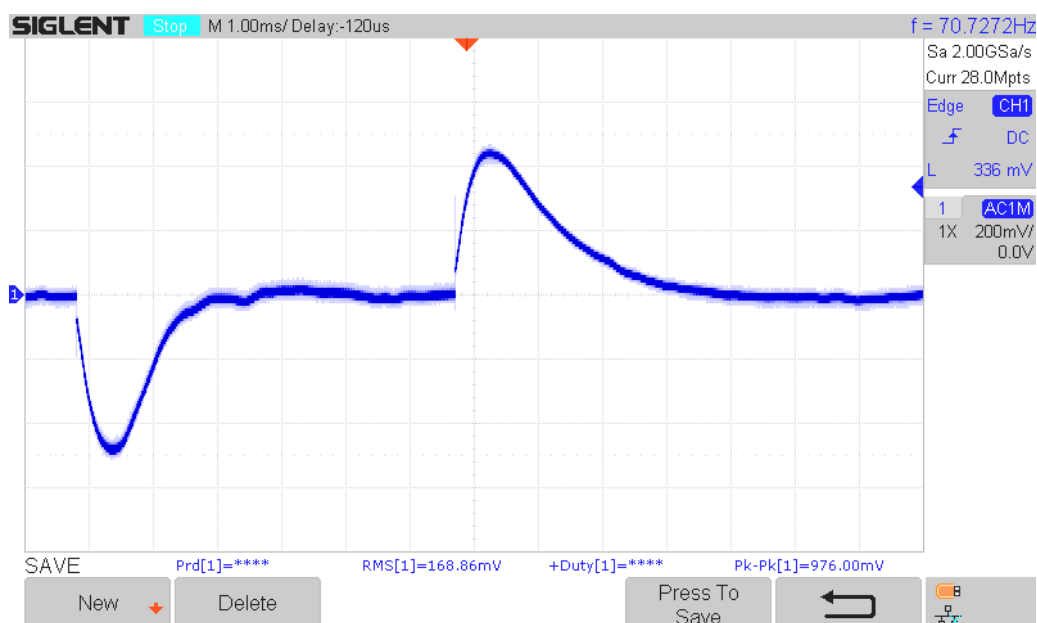
Obrázek 12.18: Odezva (průběh střídavé složky výstupního napětí) měniče ZETA na skokovou změnu zatížení měniče pro nastavenou úroveň výstupního napětí 9 V.



Obrázek 12.19: Odezva (průběh střídavé složky výstupního napětí) měniče ZETA na skokovou změnu zatížení měniče pro nastavenou úroveň výstupního napětí 12 V.

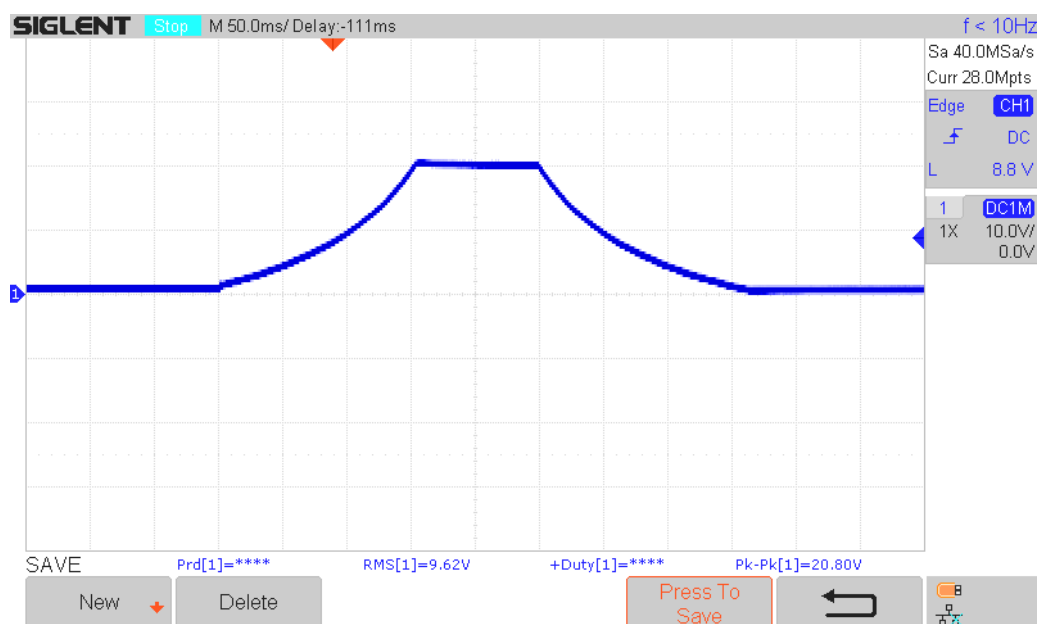


Obrázek 12.20: Odezva (průběh střídavé složky výstupního napětí) měniče ZETA na skokovou změnu zatížení měniče pro nastavenou úroveň výstupního napětí 15 V.



Obrázek 12.21: Odezva (průběh střídavé složky výstupního napětí) měniče ZETA na skokovou změnu zatížení měniče pro nastavenou úroveň výstupního napětí 20 V.

Pro úplnost byl na osciloskopu zobrazen průběh výstupního napětí měniče ZETA při nastavení napěťové úrovně 20 V a následné snižování napětí při požadavku na snížení výstupního napětí na bezpečnou hodnotu. Průběh z osciloskopu je zobrazen na obr.



Obrázek 12.22: Průběh výstupního napětí měniče ZETA při požadavku na nastavení výstupního napětí měniče na 20 V a následném požadavku na snížení výstupního napětí na bezpečnou úroveň.

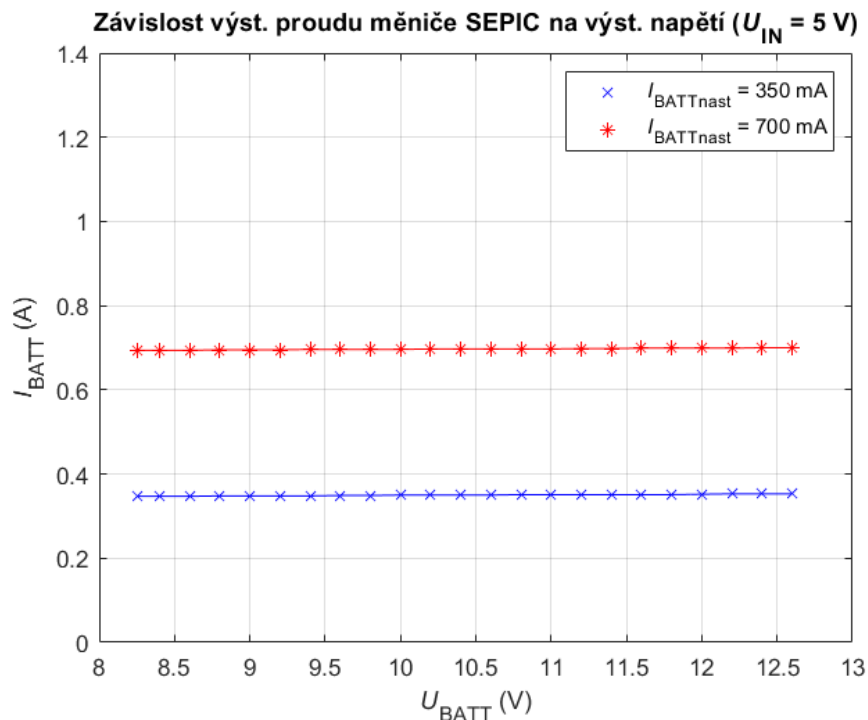
12.22. Z průběhu je patrné, že napětí na výstupu měniče se pozvolna zvyšuje až na hodnotu zhruba 20 V, kde se ustálí, a po požadavku na snížení napětí na bezpečnou hodnotu začne pozvolna klesat až na hodnotu zhruba 0,7 V, poté power banka měnič vypne. Čas od požadavku na nastavení výstupního napětí do zvýšení/snížení výstupního napětí na požadovanou hodnotu je roven zhruba 160 ms. Protože mikrokontrolér při pozvolném zvyšování napětí zvyšuje hodnotu střídý generovaného signálu pro spínací tranzistory vždy o konstantní hodnotu za daný čas, je průběh napětí na obr. 12.22 nelineární (průběh napětí odpovídá vztahu 9.2, str. 40).

Vzhledem k tomu, že měnič SEPIC je určen pro nabíjení akumulátoru, regulovaná veličina je výstupní proud měniče (tedy proud tekoucí do akumulátoru). Závislost výstupního proudu měniče na výstupním napětí měniče byla měřena vždy pro dvě hodnoty nastaveného proudu pro pět hodnot vstupního napětí měniče: 5 V, 9 V, 12 V, 15 V a 19 V (místo hodnoty 20 V byla zvolena hodnota 19 V, protože laboratorní zdroj, který měl autor k dispozici a který byl používán pro napájení měniče power banky, není schopen dodat vyšší napětí než cca 19,8 V).¹ Výstup měniče byl připojen na umělou zátěž, na které bylo nastavováno

¹Power banka si při připojení ke zdroji napětí podporujícím komunikaci dle USB Power Delivery protokolu

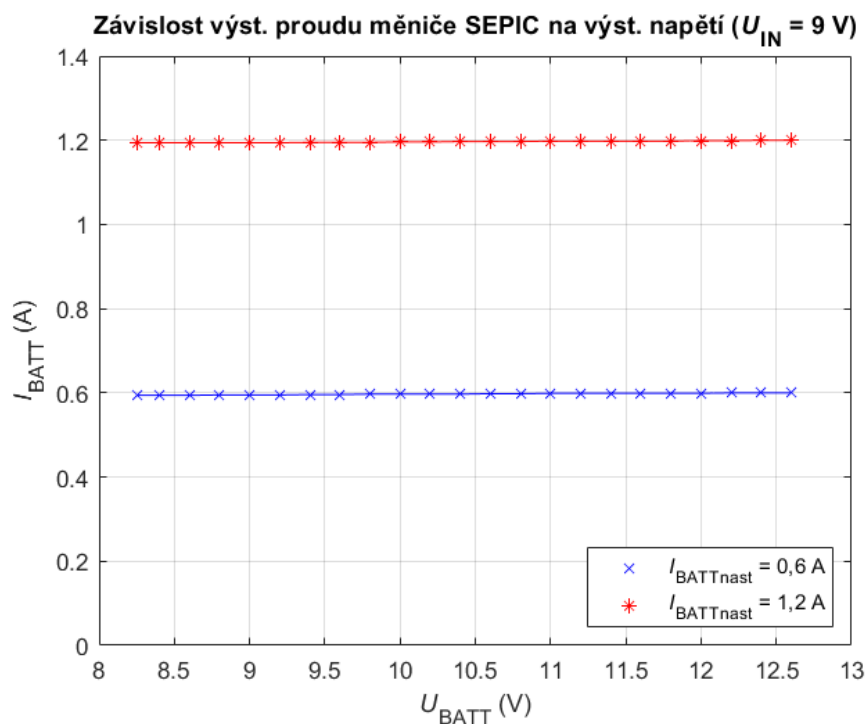
požadované napětí v rozsahu 8,25 V až 12,6 V s krokem 0,2 V. Průběhy jsou zobrazeny na obr. 12.23, obr. 12.24, obr. 12.25, obr. 12.26 a obr. 12.27. Z průběhů je patrné, že výstupní proud měniče se od nastavené hodnoty liší o maximálně než 15 mA a s rostoucím výstupním napětím měniče mírně roste.

Převodní charakteristika měniče SEPIC byla měřena pro nastavený výstupní proud 350 mA a 700 mA pro výstupní napětí 8,25 V, 10,5 V a 12,6 V pro vstupní napěťové úrovně 5 V, 9 V, 12 V, 15 V a 19 V. Naměřené charakteristiky jsou zobrazeny na obr. 12.28 a obr. 12.29. Z průběhů je patrné, že výstupní proud vykazuje závislost na vstupním napětí měniče i i závislost na výstupním napětí měniče, nicméně maximální odchylka od nastavené hodnoty výstupního proudu měniče nepřesahuje 10 mA.

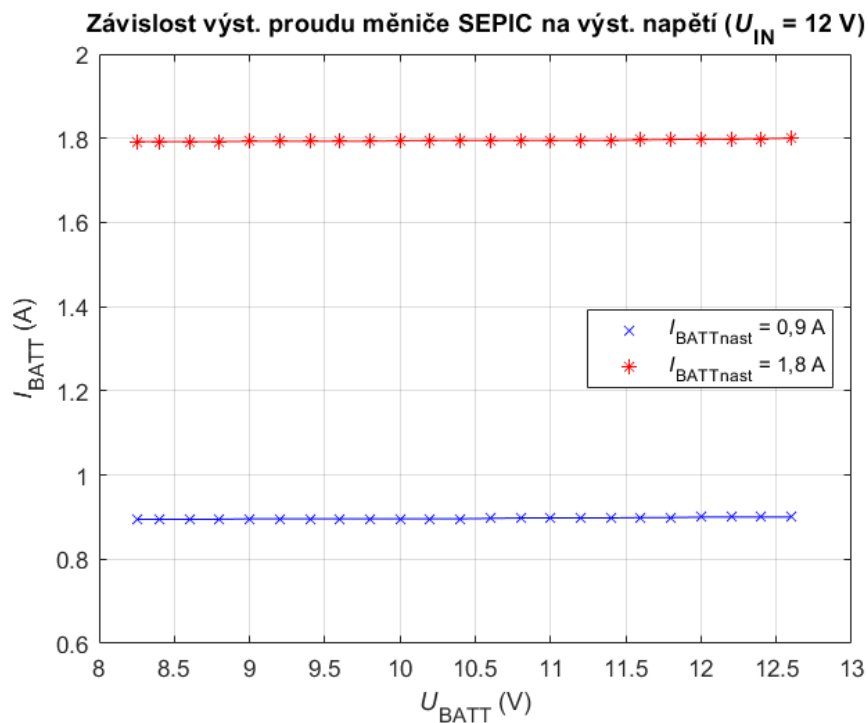


Obrázek 12.23: Závislost výstupního proudu měniče SEPIC na výstupním napětí pro vstupní napětí měniče 5 V.

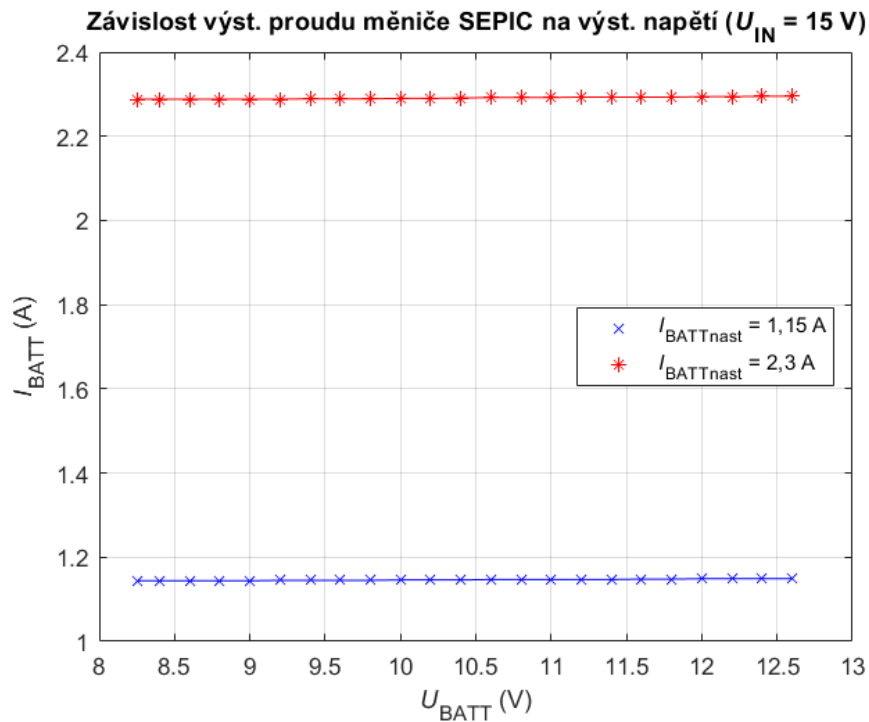
vyžádá podporované napěťové a proudové úrovně zdroje, vybere si vhodnou napěťovou úroveň a vypočítá maximální nabíjecí proud akumulátoru tak, aby za žádných okolností nedošlo k překročení proudového limitu zdroje; maximální proud odebíratelný ze zdroje napětí je v mikrokontroléru power banky nastaven na 2,5 A. S ohledem na tyto výpočty a nastavení byly voleny nastavené výstupní proudy měniče SEPIC, pro které byly charakteristiky měřeny: Maximální nastavená hodnota výstupního (nabíjecího) proudu měniče, pro kterou byla charakteristika měřena, byla vždy hodnota nastaveného výstupního proudu blízká se proudu 2,5 A odebíranému z připojeného zdroje, resp. pro vyšší vstupní napětí hodnota výstupního proudu 2,3 A, což je hodnota o málo vyšší, než je standardní nabíjecí proud akumulátoru 2,15 A, kterým power banka nabíjí akumulátor při dostatečném výkonu a vhodné napěťové úrovni připojeného zdroje napětí.



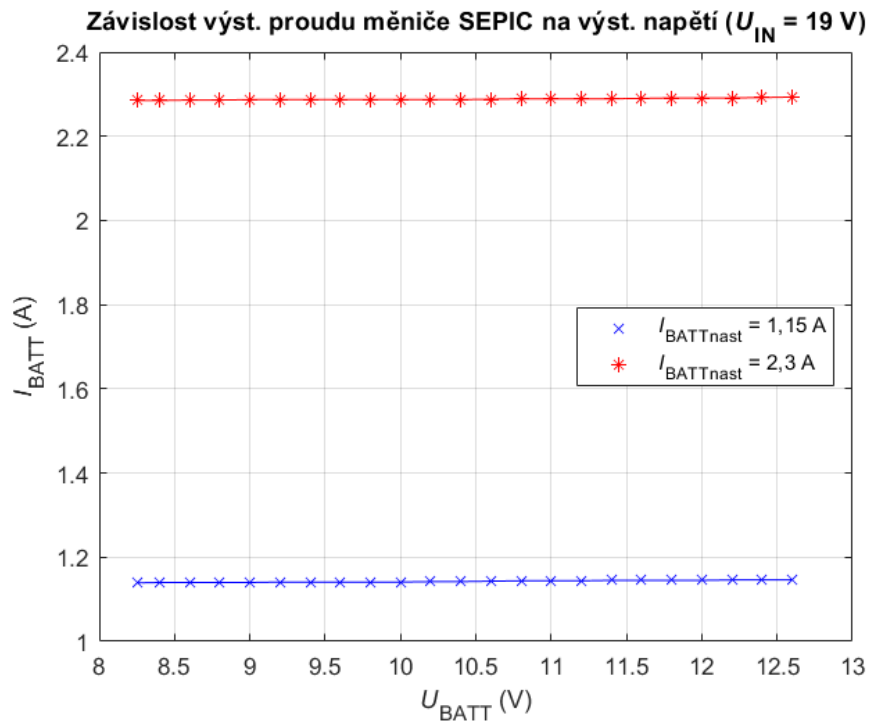
Obrázek 12.24: Závislost výstupního proudu měniče SEPIC na výstupním napětí pro vstupní napětí měniče 9 V.



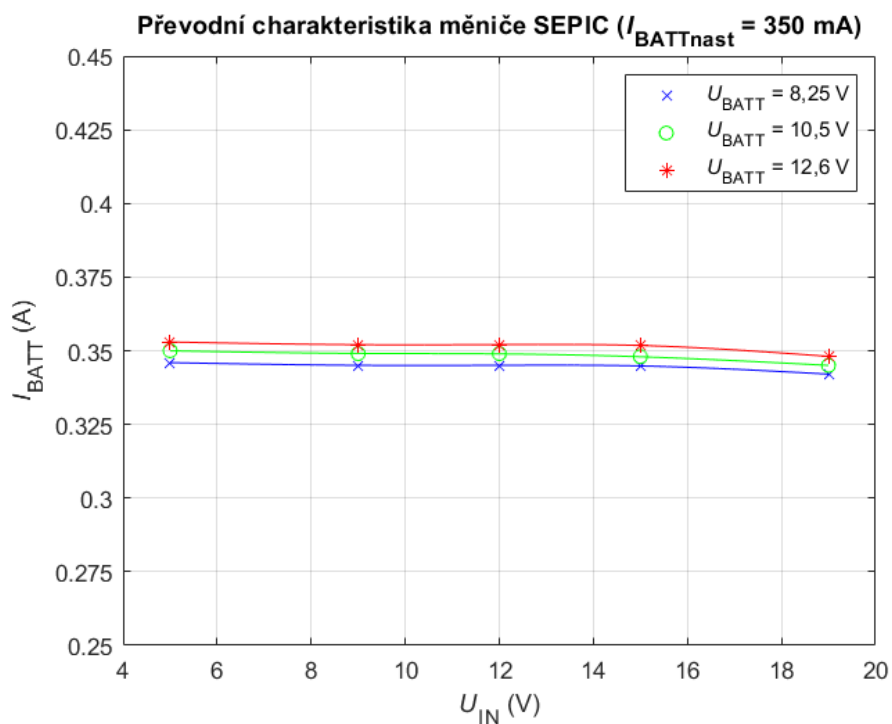
Obrázek 12.25: Závislost výstupního proudu měniče SEPIC na výstupním napětí pro vstupní napětí měniče 12 V.



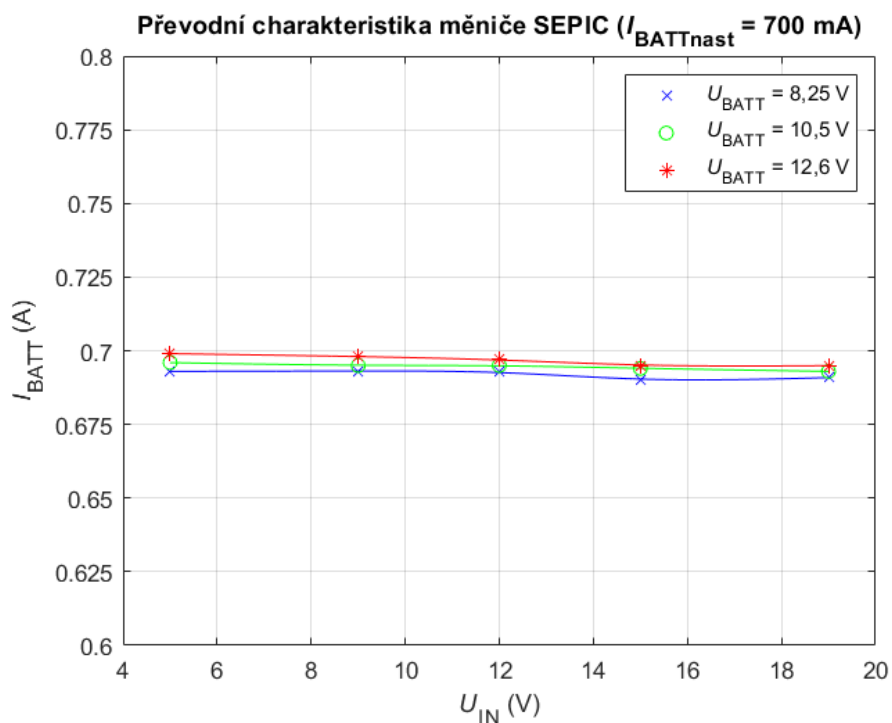
Obrázek 12.26: Závislost výstupního proudu měniče SEPIC na výstupním napětí pro vstupní napětí měniče 15 V.



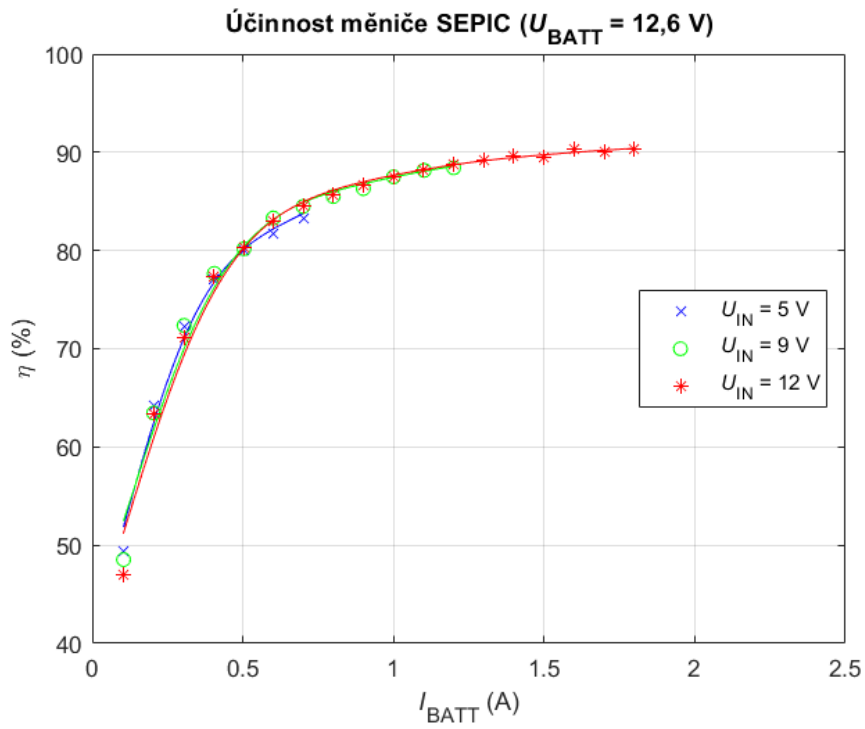
Obrázek 12.27: Závislost výstupního proudu měniče SEPIC na výstupním napětí pro vstupní napětí měniče 19 V.



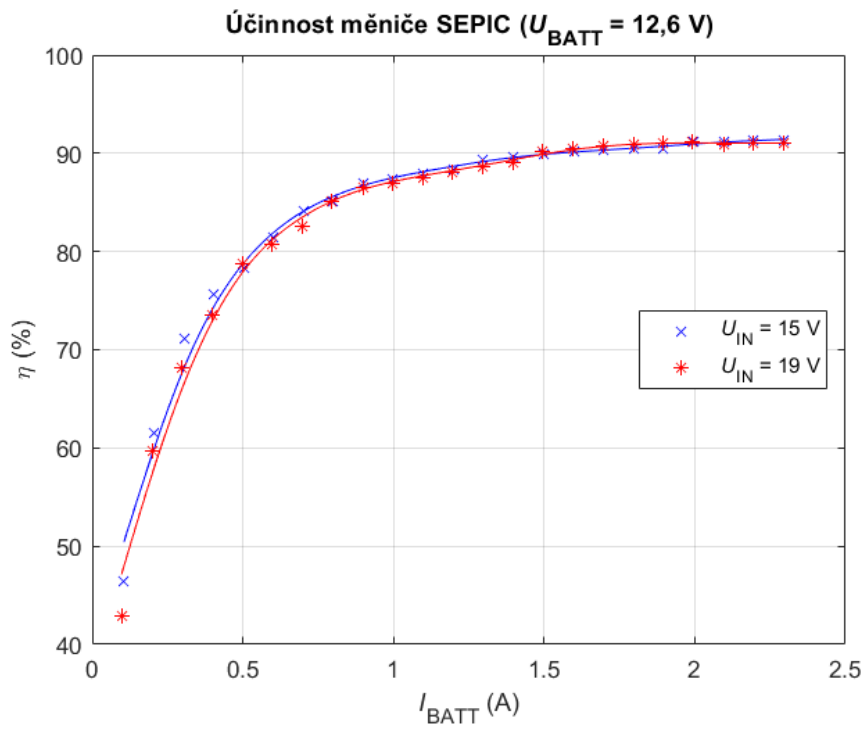
Obrázek 12.28: Převodní charakteristika měniče SEPIC pro nastavený výstupní proud měniče 350 mA.



Obrázek 12.29: Převodní charakteristika měniče SEPIC pro nastavený výstupní proud měniče 700 mA.



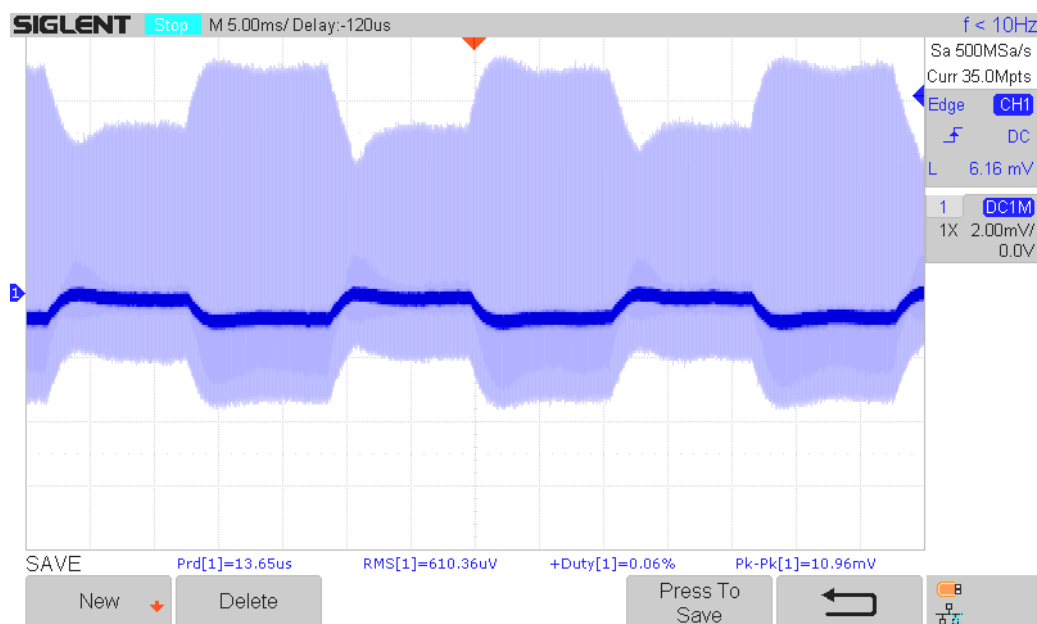
Obrázek 12.30: Účinnost měniče SEPIC pro výstupní napětí 12,6 V.



Obrázek 12.31: Účinnost měniče SEPIC pro výstupní napětí 12,6 V.

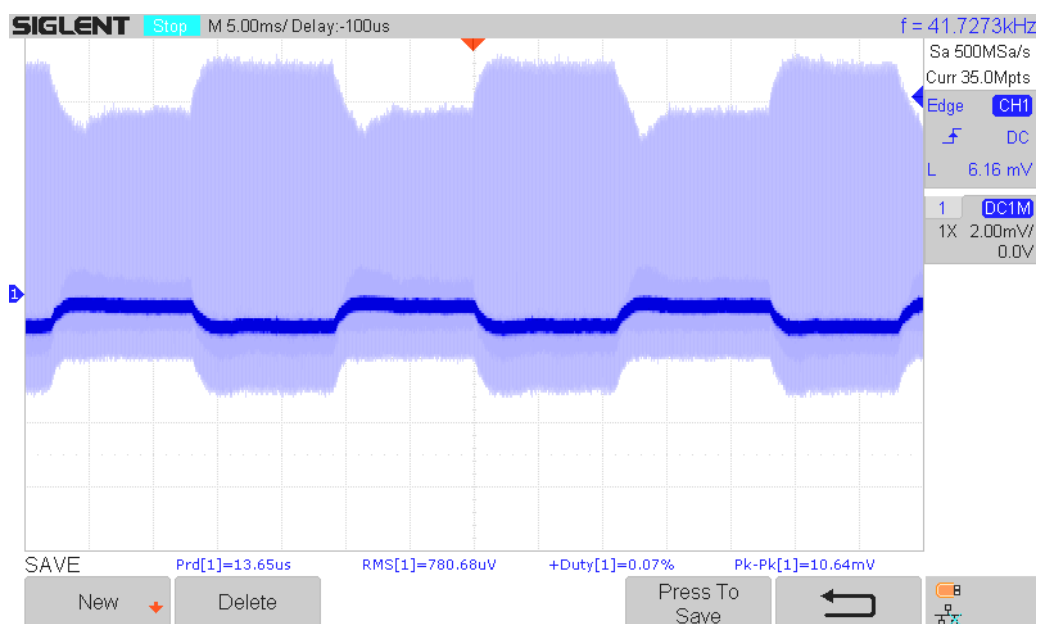
Dále byla změřena účinnost měniče SEPIC v závislosti na výstupním proudu měniče pro vstupní napětí měniče 5 V, 9 V, 12 V, 15 V a 19 V pro výstupní napětí měniče pouze 12,6 V. Naměřené průběhy jsou zobrazeny na obr. 12.30 a 12.31. Přestože tyto průběhy nemají shodnou osu x s průběhy účinnosti měniče ZETA, z průběhů je patrné, že účinnost měniče SEPIC dosahuje podobných hodnot, jako účinnost měniče ZETA²: Pro nízké hodnoty proudů odebíraných z výstupu měniče je účinnost zhruba 50 %, pro výstupní proudy kolem 2,15 A účinnost přesahuje 90 %.

Pro ověření stability regulační smyčky měniče byly naměřeny odezvy měniče (průběh výstupního proudu měniče) při změně nastaveného výstupního proudu měniče. Průběhy byly měřeny pro vstupní napětí 5 V, 9 V, 12 V, 15 V a 19 V, přičemž výstupní proud byl nastavován z hodnoty 100 mA na 700 mA a zpět (výstup měniče byl připojen k akumulátoru). Průběhy byly měřeny na snímacím rezistoru R_{60} (s odporem 1 m Ω , viz obr. 9.2 na str. 48), zobrazené průběhy jsou uvedeny na obr. 12.32, obr. 12.33, obr. 12.34, obr. 12.35 a obr. 12.36. Z naměřených průběhů vyplývá, že nabíjecí proud je upraven na požadovanou hodnotu za méně než 3 ms. Průběhy též odhalují přítomnost rušení vznikajícího vlivem spínání spínacích tranzistorů měniče.

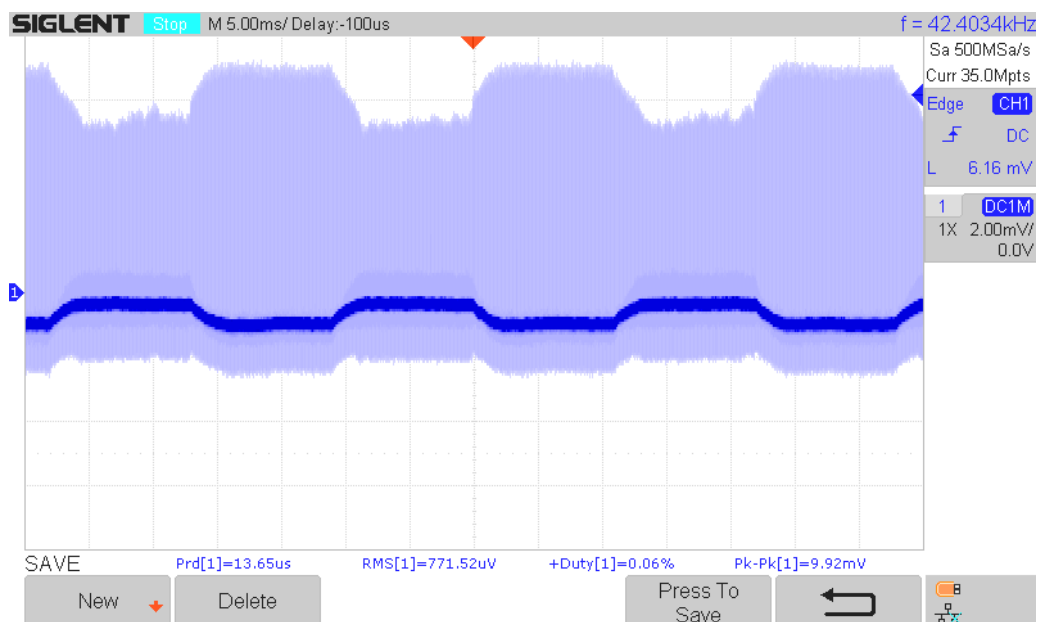


Obrázek 12.32: Odezva měniče SEPIC na skokovou změnu nastaveného výstupního proudu měniče pro vstupní napětí 5 V.

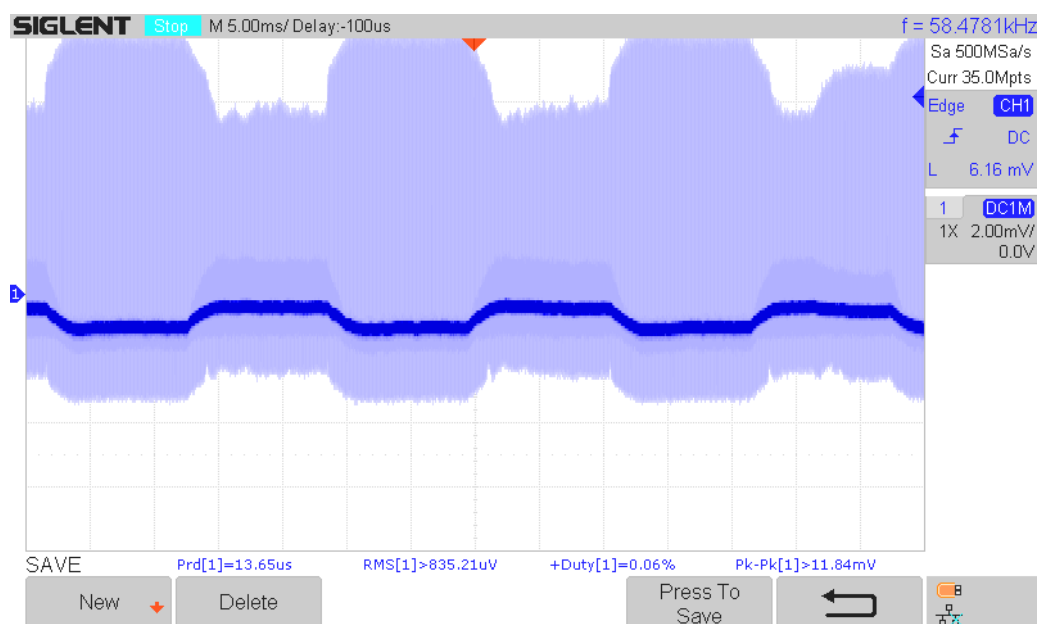
²Z tohoto důvodu nebyly změřeny průběhy účinnosti pro výstupní napětí měniče SEPIC 8,25 V a 10,5 V.



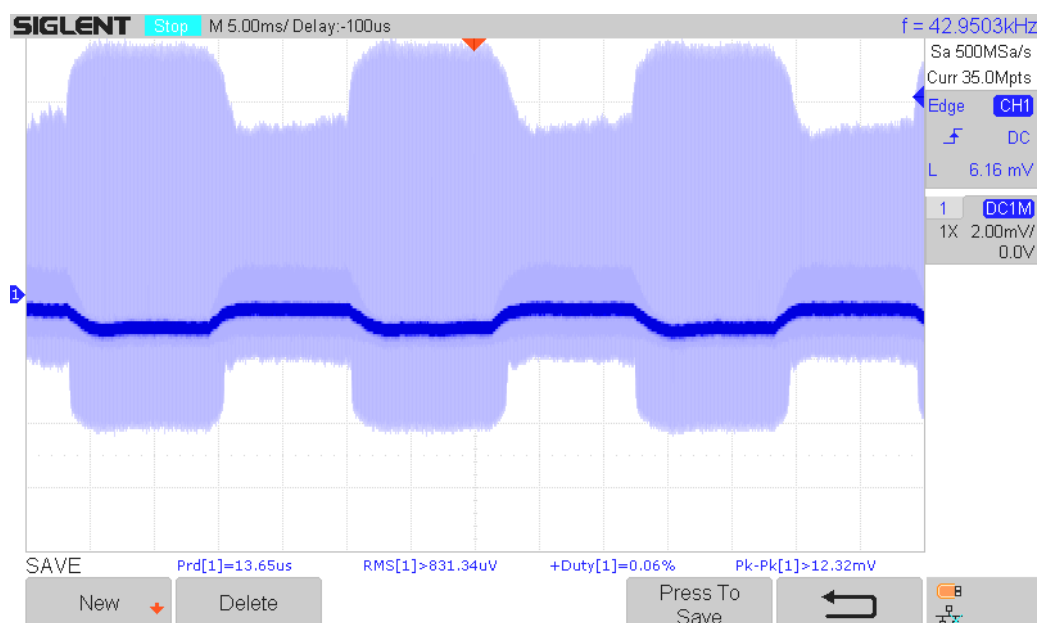
Obrázek 12.33: Odezva měniče SEPIC na skokovou změnu nastaveného výstupního proudu měniče pro vstupní napětí 9 V.



Obrázek 12.34: Odezva měniče SEPIC na skokovou změnu nastaveného výstupního proudu měniče pro vstupní napětí 12 V.



Obrázek 12.35: Odezva měniče SEPIC na skokovou změnu nastaveného výstupního proudu měniče pro vstupní napětí 15 V.



Obrázek 12.36: Odezva měniče SEPIC na skokovou změnu nastaveného výstupního proudu měniče pro vstupní napětí 19 V.

Akumulátor power banky lze nabít připojením power banky ke zdroji napětí podporujícím komunikaci dle protokolu USB Power Delivery. Funkce komunikace power banky a připojeného zdroje napětí byla ověřena na napájecím zdroji Lenovo ADLX65YDC3D

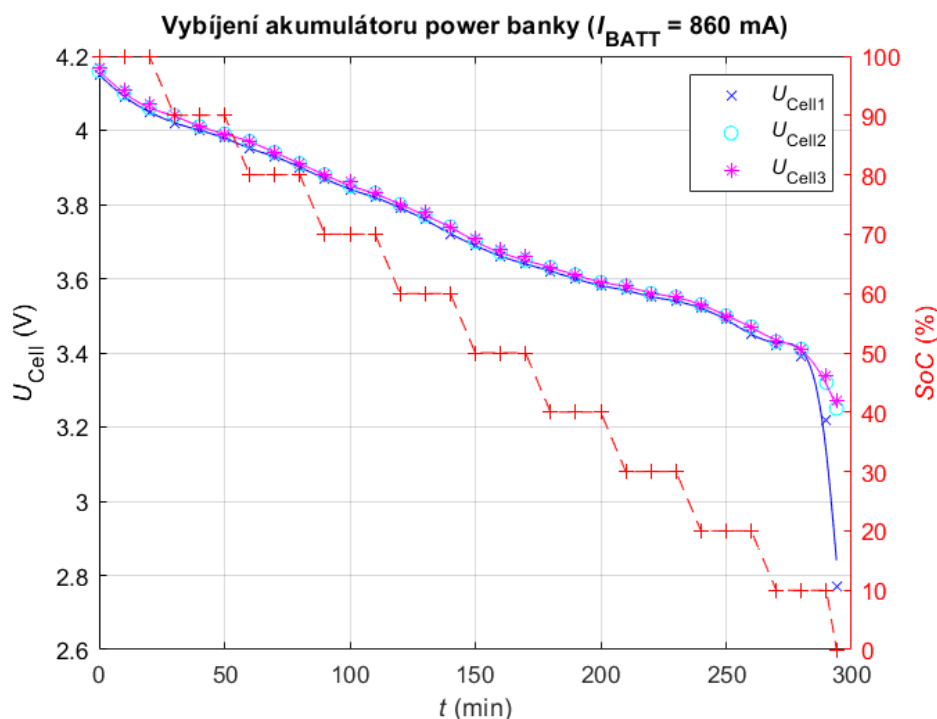
podporujícím výstupní napěťové úrovně 5 V, 9 V, 15 V a 20 V. Power banka si po připojení ke zdroji vybere vhodnou napěťovou úroveň (jako výchozí je nastavena úroveň 15 V) a úspěšně zahájí nabíjení akumulátoru. Při odpojení zdroje power banka toto odpojení registruje a automaticky sníží úroveň napětí na USB-C konektoru na bezpečnou hodnotu.

Komunikace power banky s připojeným zařízením (spotřebičem) byla ověřena nejprve s využitím IO IP2721, s pomocí něhož lze zvolit požadovanou napěťovou úroveň. IO po připojení ke zdroji napětí podporujícím komunikaci dle USB Power Delivery vybere uživatelem požadovanou (či nejbližší nižší) napěťovou úroveň, kterou zdroj napětí podporuje. Po připojení spotřebiče přes USB-C konektor k power bance dojde nejprve k nastavení výstupní napěťové úrovně 5 V a až po úspěšné komunikaci power banky a spotřebiče dojde ke zvýšení výstupního napětí měniče na spotřebičem vybranou napěťovou úroveň. Odpojení spotřebiče je power bankou detekováno - výstupní napětí je automaticky sníženo na bezpečnou úroveň. Po ověření správné funkce power banky při připojení spotřebiče v podobě IO IP2721 byla power banka připojena přes tento IO (při volbě napěťové úrovně 20 V) k notebooku HP 250 G6 (notebook nepodporuje komunikaci USB Power Delivery). Po připojení notebooku k power bance přes tento IO došlo k úspěšnému zahájení dobíjení akumulátoru notebooku. K power bance byl také připojen chytrý mobilní telefon Motorola Moto G 5G, který podporuje komunikaci dle protokolu USB Power Delivery. Po připojení došlo k úspěšnému zahájení nabíjení, jemuž předcházelo zvolení napěťové úrovně 9 V.

12.2 BMS

Pro ověření funkce BMS byl nejprve k power bance připojen akumulátor, přičemž jeden jeho článek (resp. dva paralelně zapojené články) byl úmyslně mimo power banku vybit více, než ostatní články (napětí článků tedy bylo rovno 4,08 V, 4,16 V a 4,16 V). Poté bylo zahájeno nabíjení akumulátoru power bankou (jako zdroj energie pro nabíjení posloužil laboratorní zdroj, jehož napětí bylo nastaveno na 15 V), přičemž byla sledována napětí na jednotlivých článcích při nabíjení; nastavené nabíjecí napětí je rovno 4,2 V/článek. Nabíjení akumulátoru trvalo asi 8 hodin, maximální naměřená hodnota napětí na článcích byla zhruba 4,21 V (nabíjecí napětí článků uváděné v datasheetu je 4,2 V, napětí na článek

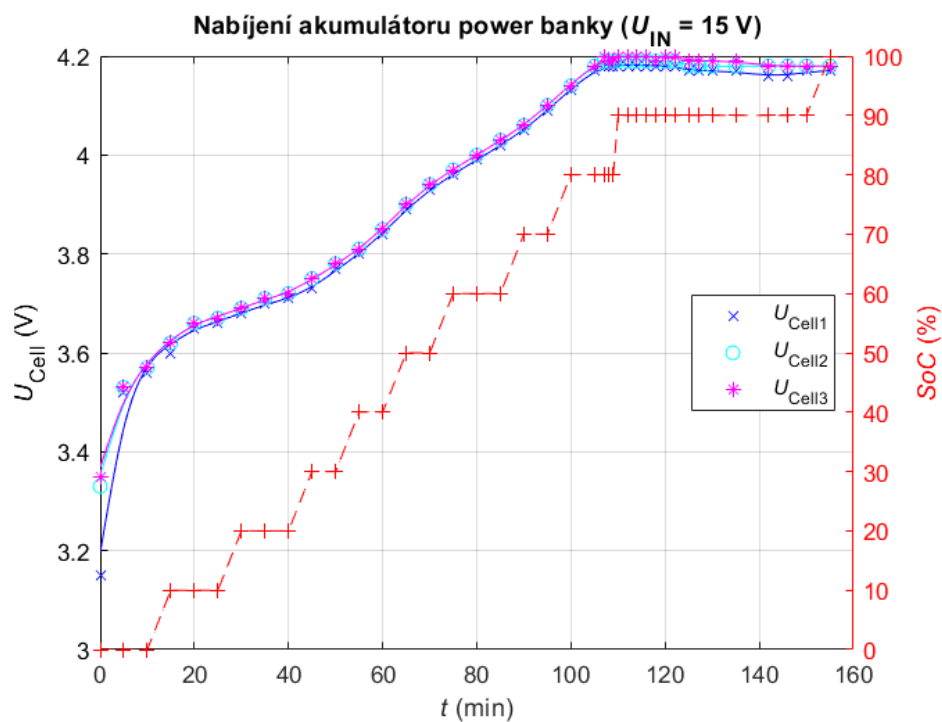
by nemělo přesáhnout 4,25 V, viz [31]). Po ukončení nabíjení power bankou byla napětí na článcích rovna 4,18 V, 4,19 V a 4,19 V, balancování článků je tedy funkční.



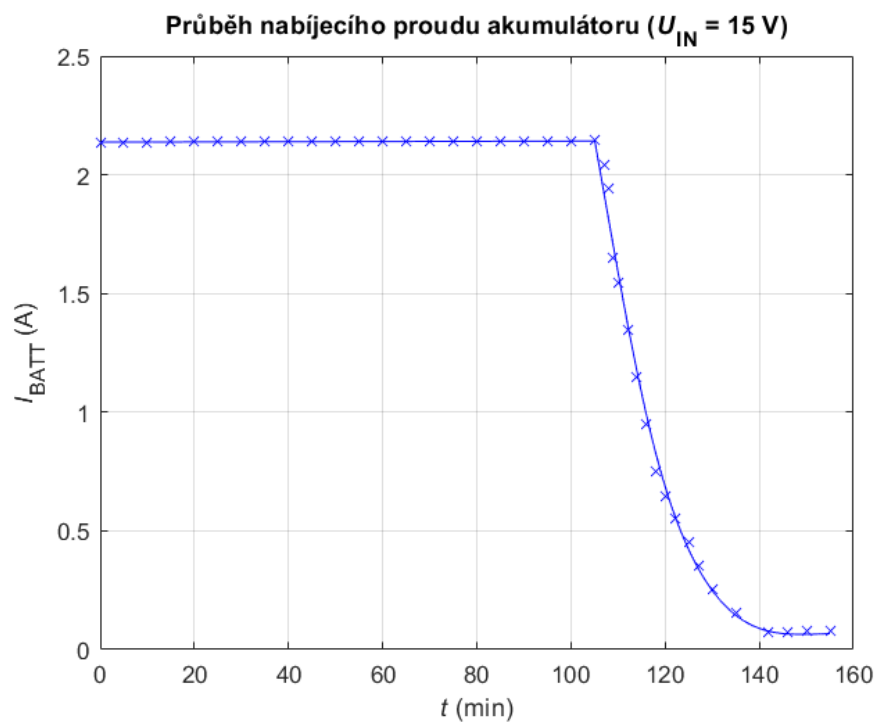
Obrázek 12.37: Vybíjecí charakteristika akumulátoru a odhad míry nabití.

Po nabití byl akumulátor ponechán zhruba jednu hodinu bez nabíjení nebo zátěže. Poté došlo k zahájení vybíjení akumulátoru - na výstup power banky (tedy USB-C konektor) byla připojena umělá zátěž, která byla v průběhu času nastavována tak, aby proud odebíraný power bankou z akumulátoru byl po celou dobu vybíjení roven 860 mA (430 mA, resp. 0,2C na článek, tj. vybíjecí proud, pro který je udávána kapacita článku). Vybíjení bylo power bankou ukončeno při poklesu napětí prvního článku pod 2,77 V (napětí pro ukončení vybíjení uvedené v datasheetu je 2,75 V). Vybíjecí charakteristika akumulátoru (resp. jeho článků) a odhad míry nabití (SoC) zobrazený na displeji power banky (SoC je udáván s rozlišením 10 %) jsou zobrazeny na obr. 12.37. Z průběhů napětí článků je patrné, že napětí článků se většinu času pohybuje v rozsahu zhruba 4,2 V až 3,4 V, v posledních několika minutách vybíjení však napětí prvního článku prudce klesá až na 2,77 V, kdy je vybíjení akumulátoru ukončeno. Vynásobením času, po který byl akumulátor vybíjen (4,9 hodin), a vybíjecího proudu (0,86 A) dostáváme kapacitu akumulátoru 4,21 Ah; udávaná kapacita

článků přepočtená na kapacitu akumulátoru je typicky 4,3 Ah, minimálně 4,1 Ah.



Obrázek 12.38: Nabíjecí charakteristika akumulátoru a odhad míry nabití.



Obrázek 12.39: Časový průběh nabíjecího proudu akumulátoru.

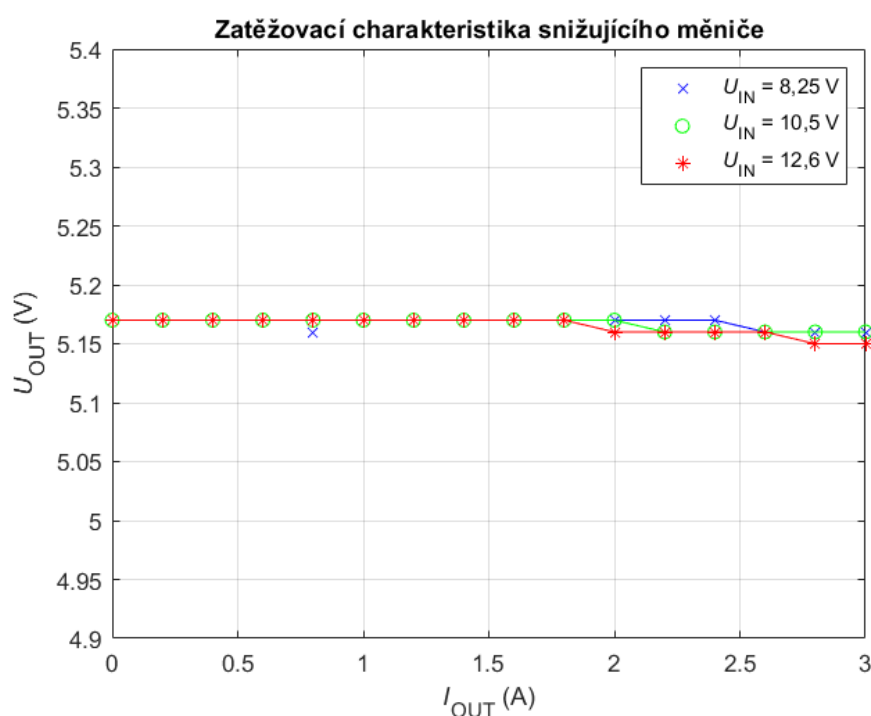
Po ukončení vybíjení byl akumulátor zhruba hodinu ponechán bez zátěže nebo nabíjení, poté byla power banka připojena (přes USB-C konektor) k laboratornímu zdroji s nastaveným napětím 15 V a bylo zahájeno nabíjení power banky. Nabíjecí charakteristika akumulátoru (resp. jeho článků) a průběh odhadu míry nabití akumulátoru zobrazeného na displeji power banky jsou uvedeny na obr. 12.38, průběh nabíjecího proudu akumulátoru je zobrazen na obr. 12.39. Z průběhu napětí na článcích akumulátoru je vidět, že napětí v počáteční fázi nabíjení prudce stoupá, poté následuje pokles rychlosti růstu napětí článků, který se zastaví při napětí mírně pod 4,2 V. V ten okamžik začne power banka snižovat nabíjecí proud tak, aby napětí na článcích nepřekročilo 4,2 V, jak je patrné z průběhu nabíjecího proudu. Nabíjecí proud je nejprve nastaven na hodnotu 2,15 A (to odpovídá standardnímu nabíjecímu proudu 1,075 A/článek uváděnému v datasheetu); proud je při překročení napětí 4,2 V/článek postupně snižován (s krokem 100 mA) až na cca 70 mA, přičemž pro případ vyššího napětí než 4,2 V na některém z článků je aktivováno balancování (to je patrné na průběhu napětí článků 2 a 3 na obr. 12.38, které se v poslední fázi nabíjení mírně snižuje, zatímco napětí na článku 1 mírně roste). Z průběhu odhadu míry nabití akumulátoru je patrné, že power banka je schopna (pokud je připojena ke zdroji disponujícím dostatečným výkonem a vhodnou napěťovou úrovní) nabít akumulátor během dvou hodin ze zhruba 90 %, akumulátor je plně nabit za méně než 160 minut.

12.3 Snižující měnič

U snižujícího měniče byla změřena zatěžovací charakteristika, převodní charakteristika a účinnost v závislosti na zatížení měniče. Dále byla pomocí osciloskopu zjištěna odezva měniče na skokovou změnu zatížení. (Tabulky s naměřenými daty jsou k dispozici v příloze na DVD.) Na DPS je kromě snižujícího měniče umístěn ještě vysílač pro bezdrátové nabíjení; aby nedocházelo ke zkreslení naměřených hodnot vlivem spotřeby IO vysílače, byl snižující měnič měřen bez osazeného IO vysílače pro bezdrátové nabíjení.

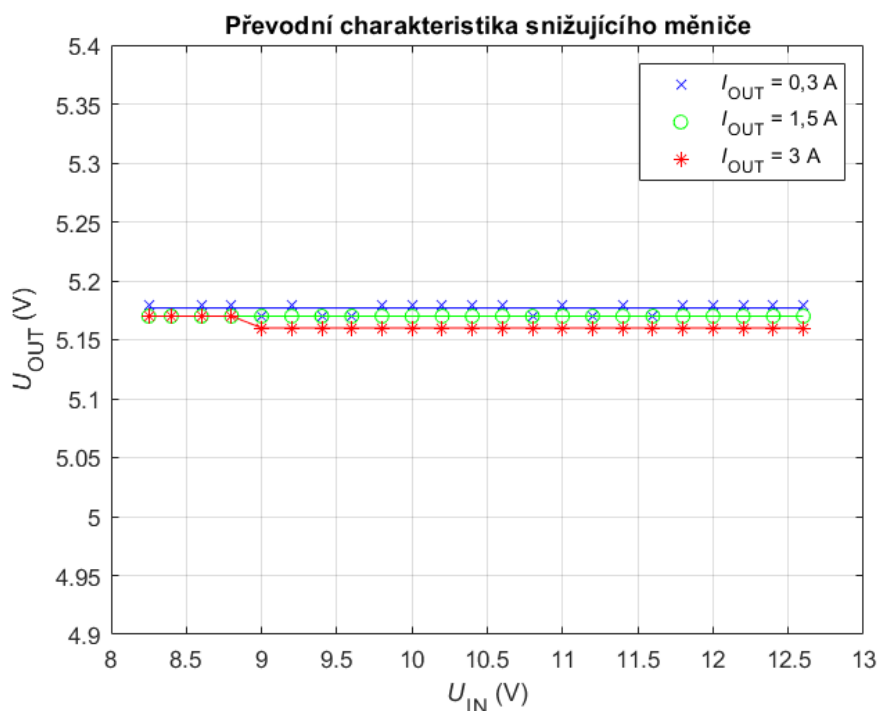
Zatěžovací charakteristika snižujícího měniče byla měřena pro vstupní napětí 8,25 V (minimální napětí akumulátoru), 12,6 V (maximální napětí akumulátoru) a 10,5 V (tj. cca střed intervalu mezi napětími 8,25 V a 12,6 V); aby bylo zajištěno požadované napětí na

vstupu měniče, byl k napájení měniče použit laboratorní zdroj (nikoliv akumulátor). Měnič byl zatěžován proudem v rozsahu 0 A až 3 A s krokem 0,2 A nastavovaným na umělé zátěži (3 A je maximální proud, na který je měnič stavěný) a zároveň bylo snímáno výstupní napětí (napětí byla měřena na vstupních a výstupních filtračních kondenzátorech měniče). Naměřené průběhy jsou vykresleny na obr. 12.40. Z průběhů je patrné, že s rostoucím zatížením měniče klesá výstupní napětí, nicméně změřený pokles je pouze 20 mV.



Obrázek 12.40: Zatěžovací charakteristika snižujícího měniče.

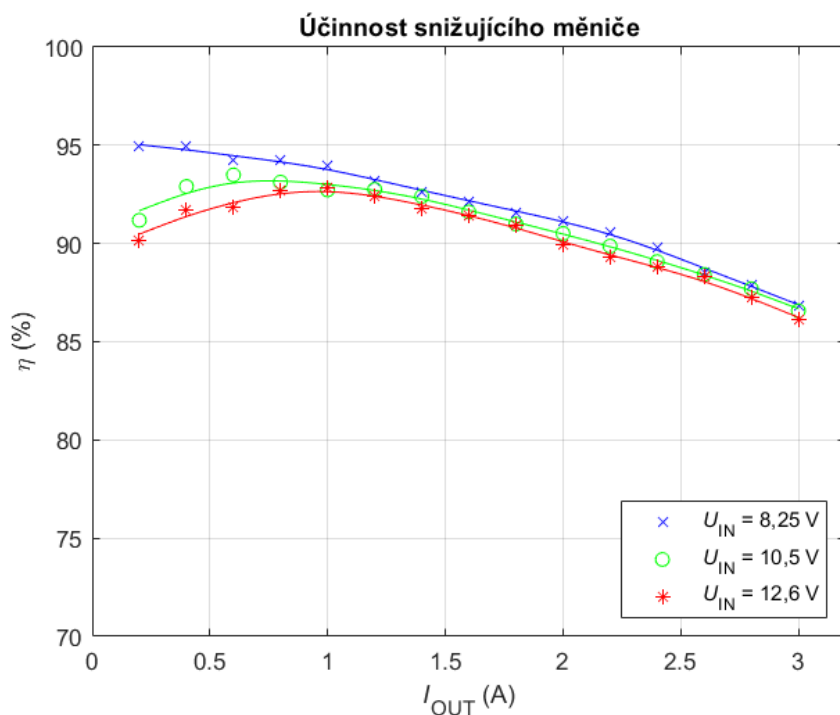
Převodní charakteristika měniče byla měřena pro rozsah vstupních napětí 8,25 V až 12,6 V pro výstupní proudy 0,3 A, 1,5 A a 3 A, měnič byl napájen z laboratorního zdroje. Charakteristika je zobrazena na obr. 12.41. Z průběhů je patrné, že hodnota výstupní napětí se pohybuje kolem 5,16 V, výstupní napětí měniče je téměř nezávislé na vstupním napětí. Na průbězích je též patrný pokles výstupního napětí pro větší zatížení měniče.



Obrázek 12.41: Převodní charakteristika snižujícího měniče.

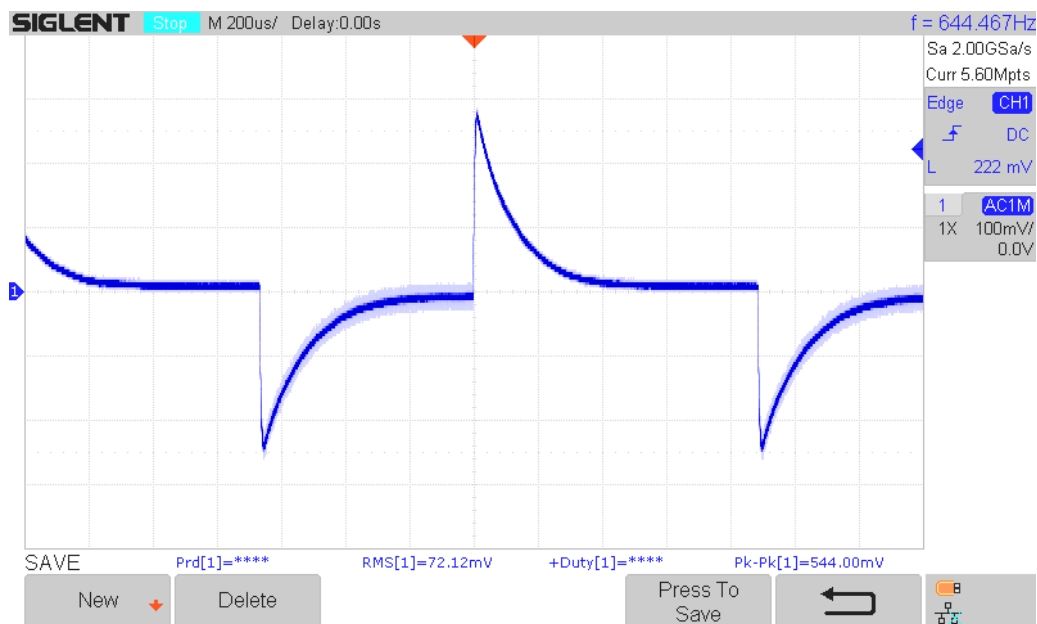
Účinnost v závislosti na zatížení měniče (resp. na proudu odebíraném z výstupu měniče) byla měřena též pro vstupní napětí 8,25 V, 10,5 V a 12,6 V (měnič byl opět napájen z laboratorního zdroje). Odebíraný proud z měniče byl nastavován v rozsahu 0,2 A až 3 A s krokem 0,2 A. Graf s naměřenými průběhy je zobrazen na obr. 12.42. Z grafu je patrné, že měnič dosahuje účinnosti přes 90 % při odebíraných proudech pod 1 A; maximální účinnost měniče se blíží 95 %, minimální naměřená účinnost (pro měřený rozsah) je cca 86 %. Z grafu je též patrné, že pro různá vstupní napětí měniče dosahuje průběh účinnosti svého maxima při různých odebíraných proudech: S rostoucím vstupním napětím měniče se jeho účinnost snižuje a maxima v průbězích účinnosti je dosahováno při vyšších hodnotách odebíraného proudu. Při nulovém odebíraném proudu z měniče je jeho spotřeba (nezávisle na vstupním napětí) zhruba 1 mA.

Pro ověření stability zpětnovazební smyčky snižujícího měniče byla změřena odezva měniče na skokovou změnu zatížení, vstup měniče byl připojen k akumulátoru. Snímek z osciloskopu je uveden na obr. 12.43. Snímek zobrazuje průběh výstupního napětí (resp. jeho střídavé složky) na měniči při skokové změně zatížení z 0,3 A na 2,7 A (resp. změně

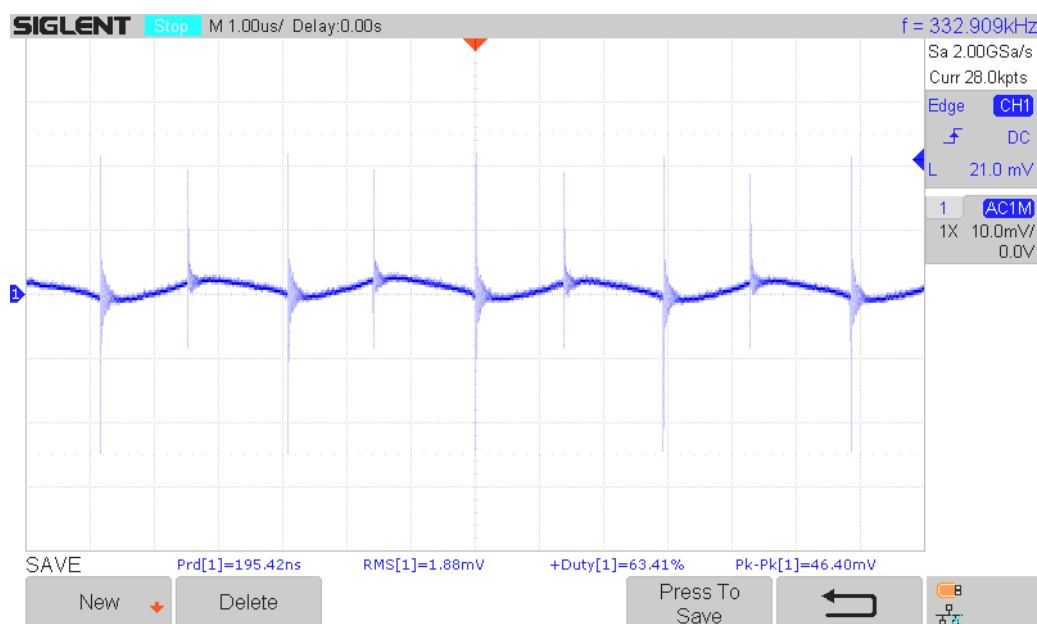


Obrázek 12.42: Účinnost snižujícího měniče.

zatížení měniče z 10 % na 90 %) a zpět. Z průběhu je patrné, že výstupní napětí se při skokové změně zatížení odchýlí o cca 300 mV, doba ustálení je zhruba 400 μ s.



Obrázek 12.43: Změna výstupního napětí snižujícího měniče při skokové změně zatížení měniče.



Obrázek 12.44: Zvlnění výstupního napětí snižujícího měniče.

Zvlnění výstupního napětí měniče (při napájení měniče z akumulátoru při odebraném proudu z výstupu měniče 2,7 A) je zobrazeno na obr. 12.44. Z něj vyplývá, že celkové zvlnění výstupního napětí je nižší než 50 mV (špička-špička); na celkovém zvlnění napětí se velkou mírou podílí rušení vznikající spínáním spínacích tranzistorů měniče.

Snižující měnič byl též ověřen (současným) připojením mobilních telefonů LG Optimus L4 II a Motorola Moto G 5G ke konektorům USB A. Po připojení došlo k úspěšnému zahájení nabíjení akumulátorů obou mobilních telefonů.

12.4 Bezdrátové nabíjení

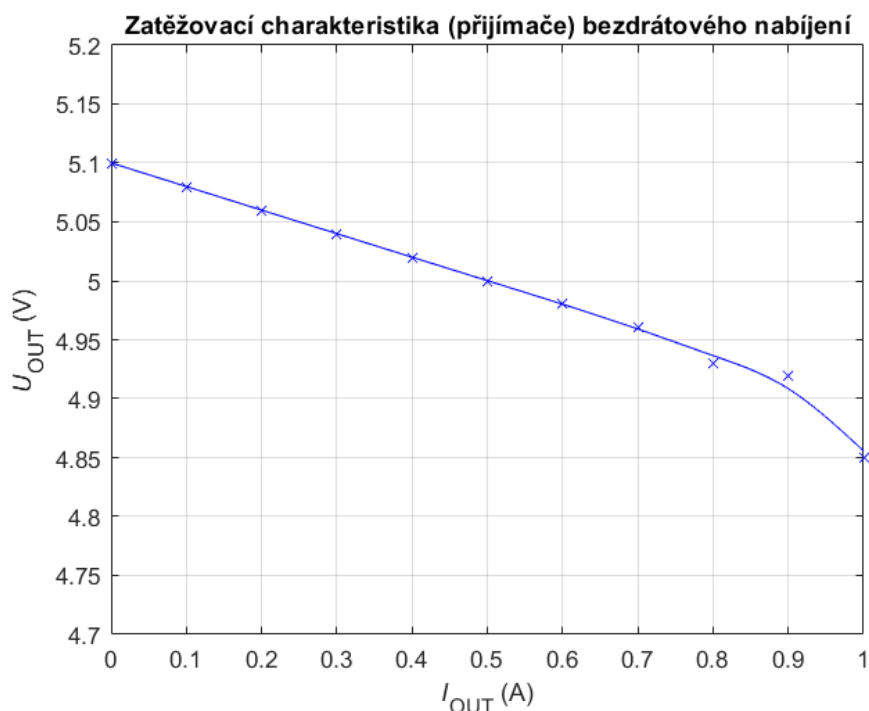
Aby bylo možné otestovat funkci bezdrátového nabíjení (resp. vysílače pro bezdrátové nabíjení), byl zakoupen přijímač pro bezdrátové nabíjení (podporující standard Qi bezdrátového nabíjení) určený pro chytré mobilní telefony, které nepodporují funkci bezdrátového nabíjení: Přijímač má být umístěn za kryt mobilního telefonu a výstup tohoto přijímače (konektor microUSB) lze připojit do microUSB konektoru mobilního telefonu. Bezdrátový přijímač by měl na výstup dodávat 5 V při odebraném proudu až 2 A. Foto bezdrátového přijímače je na obr. 12.45. Výstup přijímače byl místo do mobilního telefonu připojen na



Obrázek 12.45: Přijímač pro bezdrátové nabíjení, převzato z [52].

umělou zátěž, na níž byly nastavovány různé hodnoty odebíraného proudu a s pomocí níž byly změřeny zatěžovací charakteristika (bezdrátového přijímače) a účinnost přenosového řetězce bezdrátového nabíjení. Aby bylo možno měřit proudy odebírané vysílačem pro bezdrátové nabíjení, byl z DPS vypájen IO (U_2) DC/DC kontroléru snižujícího měniče (a rezistor R_{17} , značení viz obr. 10.5, str. 61) a vysílač pro bezdrátové nabíjení byl napájen z laboratorního zdroje. Účinnost i zatěžovací charakteristika byly měřeny s vysílací cívkou umístěnou ve vyrobené plastové krabičce power banky.

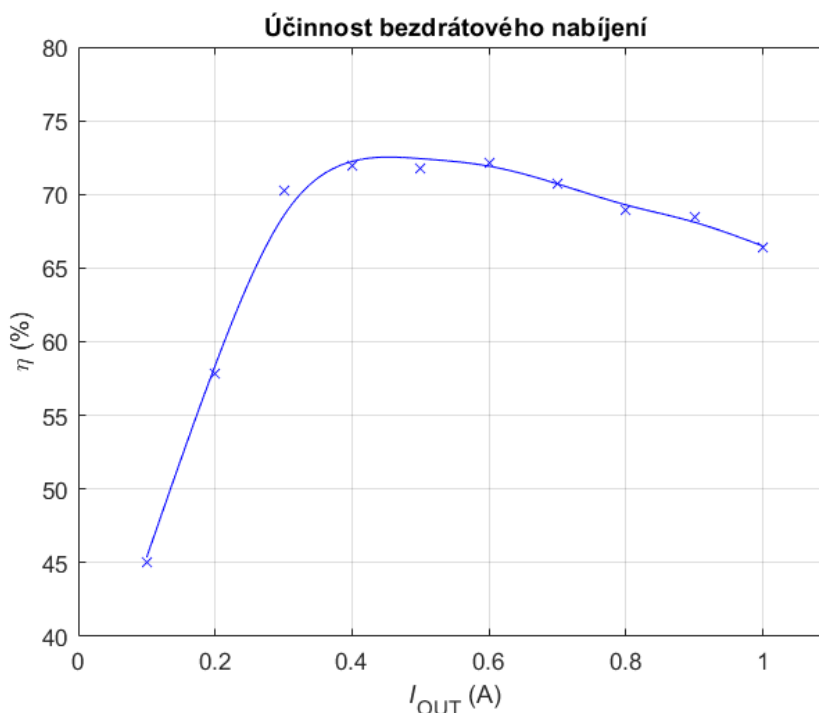
Změřená zatěžovací charakteristika je uvedena na obr. 12.46. Charakteristika byla měřena pro napájecí napětí vysílače 5,15 V (to odpovídá napětí na výstupu snižujícího měniče, kterým je vysílač standardně napájen), proud odebíraný z výstupu měniče byl nastavován v rozsahu 0 A až 1 A s krokem 0,1 A, výstupní napětí přijímače bylo měřeno na výstupu k němu připojeného microUSB konektoru. Jak je patrné z grafu zatěžovací charakteristiky, výstupní napětí klesá téměř lineárně s rostoucím odebíraným proudem až do hodnoty odebíraného proudu cca 0,9 A; při odebíraném proudě 1 A však výstupní napětí prudce klesá a při cca 1,05 A pak postupně klesne na cca 2 V, následně je bezdrátový přenos energie ukončen. Při připojení sondy osciloskopu k vysílací cívce bylo zjištěno, že při proudu kolem 1 A odebíraném z přijímače se frekvence průběhu napětí na cívce shora blíží minimální (podporované) vysílací frekvenci 110 kHz; vzhledem k tomu, že vysílací výkon vysílače bezdrátového nabíjení je (při vyšším zatížení) regulován právě pomocí změny (snížení) vysílací frekvence, vysílač není schopen dodat vyšší výkon - k dodání vyššího



Obrázek 12.46: Zatežovací charakteristika přijímače bezdrátového nabíjení.

výkonu by totiž bylo nutné snížit vysílací frekvenci pod podporovanou hodnotu.

Průběh účinnosti (přenosového řetězce) bezdrátového nabíjení je zobrazen na obr. 12.47. Z grafu je patrné, že účinnost přenosového řetězce se pro odebírané proudy nad 0,3 A pohybuje kolem 70 %, špičkové hodnoty (zhruba 72 %) dosahuje zhruba při odebíraném proudu 0,5 A. Na výslednou účinnost přenosového řetězce mají vliv jak účinnost vysílače a přijímače, tak ztráty v podobě výkonu vyzářeného do okolí; tyto složky sice nejsme schopni změřit, nicméně ze zahřívání IO vysílače, jeho cívky a přijímače jsme schopni zhruba odhadnout vliv těchto komponent na výslednou účinnost: IO vysílače i vysílací cívka se při provozu téměř nezahřívají, naopak přijímač (a zejména jeho cívka) se při vyšších odebíraných prouděch značně zahřívají. Z toho vyplývá, že na výslednou účinnost bude mít (pro tento konkrétní případ) značný vliv přijímač bezdrátového nabíjení. Ze specifikace Q_i vyplývá, že výkon vyzářovaný do okolí (příp. výkon ztracený v cizích kovových objektech vložených mezi vysílací a přijímací cívku) by neměl přesáhnout hodnotu 0,5 W (a pokud k překročení této hodnoty dojde, vysílač by měl omezit vysílaný výkon nebo ukončit bezdrátový přenos energie).

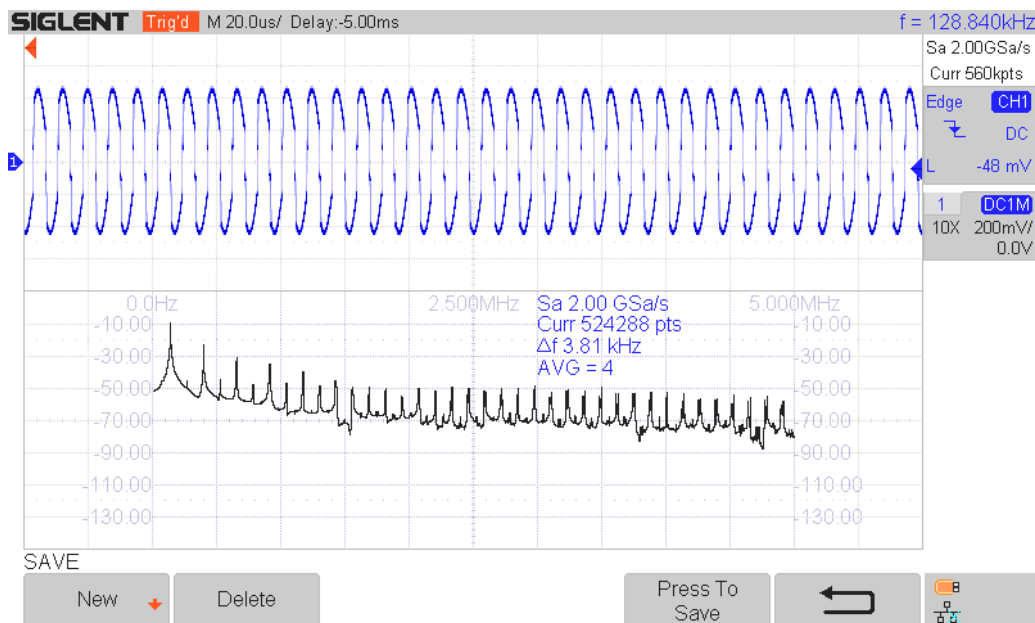


Obrázek 12.47: Účinnost bezdrátového nabíjení v závislosti na odebraném výstupním proudu z přijímače.

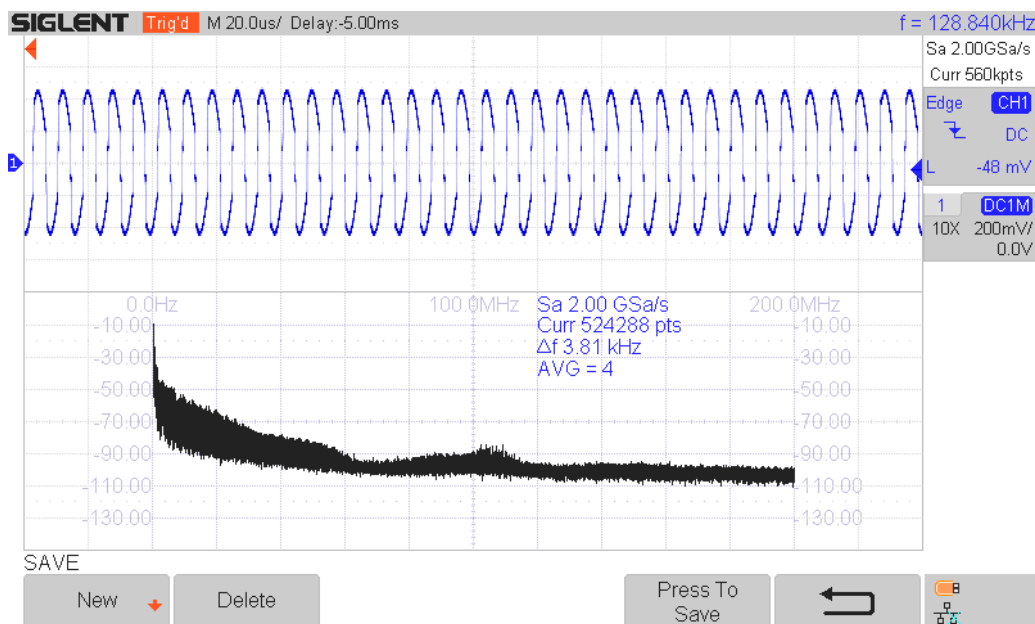
Pro hrubé zjištění spektrálních vlastností vysílaného signálu byl vložením zkratované smyčky sondy osciloskopu mezi cívky vysílače a přijímače zjištěn průběh vysílaného signálu, z něhož byly pomocí FFT (Fast Fourier Transform, Rychlé Fourierovy transformace) zobrazeny jeho spektrální složky; měření byla provedena v rozsahu frekvencí 0 Hz až 5 MHz, resp. 0 Hz až 200 MHz. Snímky obrazovky osciloskopu jsou k dispozici na obr. 12.48 a obr. 12.49 (jednotka osy y je dBV_{RMS}). Z obrázků je patrné, že nejvyšší energii nesou spektrální složky na frekvencích stovek kHz, s rostoucí frekvencí energie spektrálních složek klesá. Na prvním obrázku je patrná vysílací frekvence a její harmonické složky, na druhém obrázku je kolem frekvence 100 MHz patrné rušení od snižujícího měniče. Pro přesnější měření (a pro ověření elektromagnetické kompatibility vysílače pro bezdrátové nabíjení, resp. power banky) by bylo nutné realizovat příslušná měření spektra vyzařovaných signálů a výkonů jednotlivých spektrálních složek, to však z časových důvodů nebylo realizováno.

Pomocí zakoupeného bezdrátového přijímače byla též otestována detekce vložení cizího vodivého objektu (vložením části kovové pinzety pro osazování SMD součástek) mezi

vysílací a přijímací cívku. Po několika sekundách od vložení kovového předmětu došlo k ukončení bezdrátového přenosu energie vysílačem a k indikaci chybového kódu až do doby odebrání přijímače. Za tuto dobu došlo pouze k mírnému zahřátí vloženého kovového předmětu a nedošlo tedy k ohrožení bezpečnosti.



Obrázek 12.48: Měření spektrálních složek signálu vysílaného vysílačem pro bezdrátové nabíjení.



Obrázek 12.49: Měření spektrálních složek signálu vysílaného vysílačem pro bezdrátové nabíjení.

12.5 Shrnutí

V rámci ověřování vyrobeného zařízení byla změřena zatežovací charakteristika, převodní charakteristika a účinnost měniče ZETA v závislosti na zatížení měniče. Z naměřených charakteristik vyplývá, že výstupní napětí měniče pro všechny power bankou podporované napěťové úrovně výstupního napětí (tj. 5 V, 9 V, 12 V, 15 V a 20 V) se od nastavené hodnoty odchyluje o maximálně 100 mV, při zatížení měniče klesne výstupní napětí v porovnání se stavem bez zátěže o maximálně 100 mV. Výstupní hodnota napětí měniče je na vstupním napětí měniče téměř nezávislá. Účinnost měniče ZETA se při nízkém zatížení měniče pohybuje pouze kolem 50 %, avšak při vyšším zatížení měniče dosahuje účinnosti hodnoty kolem 90 % (maximální naměřená účinnost měniče přesahuje 92 %). Z naměřených charakteristik vyplývá, že měnič je schopen dodávat deklarovaný proud (až 3 A) a výkon (až 40 W). Dále bylo změřeno zvlnění výstupního napětí měniče ZETA, které činí zhruba 50 mV na všech podporovaných napěťových úrovních výstupního napětí (při 90% zatížení měniče). Z naměřených průběhů výstupního napětí měniče ZETA při skokové změně zatížení měniče vyplývá, že velikost napěťového překmitu/podkmitu je zhruba 600 mV (při změně zatížení měniče o 80 %), doba ustálení výstupního napětí je menší než 3 ms. Z průběhu výstupního napětí též vyplývá, že zpětnovazební smyčka měniče je stabilní. Doba náběhu výstupního napětí měniče na nastavenou hodnotu a doba snižování výstupního napětí na bezpečnou hodnotu je zhruba 160 ms. Z porovnání naměřených hodnot s hodnotami udávanými ve specifikaci USB Power Delivery (např. tolerance výstupního napětí $\pm 5\%$, resp. $\pm 5\% \pm 0,5\text{ V}$ po dobu maximálně 5 ms při skokové změně zatížení o 25 %, nebo maximální dobu snižování výstupního napětí na bezpečnou hodnotu 650 ms, viz [21]) vyplývá, že power banka (resp. měnič ZETA) splňuje příslušné specifikace protokolu USB Power Delivery.

Pro měnič SEPIC, který je určen k nabíjení akumulátoru power banky, byly měřeny závislost výstupního proudu měniče na výstupním napětí, převodní charakteristika měniče a účinnost měniče v závislosti na výstupním proudu měniče. Z naměřených charakteristik vyplývá, že výstupní proud měniče SEPIC se od nastavené hodnoty liší o maximálně 15 mA; s rostoucím výstupním napětím měniče mírně roste, s rostoucím vstupním napětím

byly změřeny zatěžovací charakteristika, převodní charakteristika a účinnost v závislosti na zatížení měniče. Z naměřených charakteristik vyplývá, že výstupní napětí snižujícího měniče je stabilní a téměř nezávislé na zatížení nebo na vstupním napětí měniče: Rozdíl naměřených hodnot výstupního napětí je maximálně 30 mV. Z průběhu účinnosti je patrné, že měnič dosahuje účinnosti až 95 %, minimální naměřená účinnost (v daném rozsahu měření) byla cca 86 %. Z naměřených charakteristik vyplývá, že měnič je schopen dodávat deklarovaný proud (3 A). Dále byl změřen průběh výstupního napětí měniče při skokové změně zatížení měniče, přičemž naměřená velikost napěťového překmitu/podkmitu je zhruba 300 mV (při změně zatížení měniče o 80 %) a doba ustálení je 0,4 ms. Z průběhu vyplývá, že zpětnovazební smyčka snižujícího měniče je stabilní. Z měření průběhu výstupního napětí je patrné, že zvlnění výstupního napětí je zhruba 50 mV (špička-špička) při zatížení měniče na 90 %. Naměřené parametry považujeme s ohledem na účel použití měniče za velmi dobré. Funkce snižujícího měniče byla též ověřena (současným) připojením mobilních telefonů LG Optimus L4 II a Motorola Moto G 5G ke konektorům USB A, přičemž po připojení došlo k zahájení nabíjení akumulátorů obou mobilních telefonů.

Pro ověření funkce bezdrátového nabíjení byl zakoupen přijímač pro bezdrátové nabíjení, s pomocí něhož byly naměřeny zatěžovací charakteristika (bezdrátového přijímače) a účinnost přenosového řetězce. Ze zatěžovacích charakteristik je patrné, že maximální odebraný výkon z přijímače bezdrátového nabíjení byl zhruba 4,9 W (výrobce IO vysílače pro bezdrátové nabíjení uvádí charakteristiky pro odebíraný výkon do 5,5 W). Maximální naměřená účinnost bezdrátového přenosu činí zhruba 72 %, pro odebírané proudy v rozsahu 0,3 A až 1 A je pak naměřená účinnost vyšší než 65 %. Pro zobrazení spektrálních složek vysílaného signálu bylo pomocí FFT vykresleno spektrum signálu na obrazovce osciloskopu: Z něj je patrná vysílací frekvence a její harmonické složky, jejichž výkon s rostoucí frekvencí klesá. Pomocí zakoupeného přijímače bezdrátového nabíjení byla úspěšně ověřena detekce vložení cizího kovového objektu mezi cívku vysílače a přijímače pro bezdrátové nabíjení: Po několika sekundách od vložení objektu došlo k zastavení bezdrátového přenosu energie a k zobrazení chybové hlášky na displeji power banky. Bezdrátové nabíjení je funkční, naměřené parametry jsou pro dané použití dostatečné.

Kapitola 13

Závěr

V rámci této diplomové práce byla prostudována problematika DC/DC měničů vhodných pro použití v power bankách, popsány byly základní vlastnosti akumulátorů, zapojení měničů vhodných pro použití v power bankách, základy rychlého nabíjení, způsoby bezdrátového přenosu energie a dále byly uvedeny základní informace o aktuálně používaných standardech pro bezdrátové nabíjení elektroniky. Zároveň byla navržena a realizována univerzální power banka umožňující bezdrátově nabíjet elektroniku podporující standard bezdrátového nabíjení Qi; power banka dále disponuje měniči napětí pro napájení připojených zařízení pomocí konektorů USB A napětím 5 V (proud až 2krát 1,5 A) nebo pomocí USB-C konektoru při volitelné napěťové úrovni 5 V, 9 V, 12 V, 15 V nebo 20 V dle protokolu USB Power Delivery (výstupní proud je až 3 A, výstupní výkon až 40 W). Jednotlivé procesy (řízení obousměrného měniče ZETA/SEPIC, nabíjení akumulátoru, spuštění snižujícího měniče, vysílače pro bezdrátové nabíjení apod.) jsou řízeny pomocí mikrokontroléru SAMS70. Pro zjednodušení interakce uživatele s power bankou disponuje power banka malým OLED displejem, na kterém je zobrazován stav akumulátoru, bezdrátového nabíjení a USB A a USB-C výstupů. V neposlední řadě byla navržena krabička pro umístění součástí power banky, která byla úspěšně vytištěna na 3D tiskárně.

Funkce power banky byla ověřena změřením množství charakteristik měničů napětí, použitého akumulátoru a vysílače pro bezdrátové nabíjení. Dosahované parametry power banky, tj. účinnost měničů přes 90 % a účinnost přenosového řetězce bezdrátového nabíjení přesahujícího 70 %, stabilita výstupního napětí měničů či jejich dynamické vlastnosti

považujeme s ohledem na účel použití power banky za více než dostatečné. Z naměřených charakteristik též vyplývá, že power banka splňuje specifikace standardu USB Power Delivery. Funkce rychlého nabíjení (resp. komunikace v rámci standardu USB Power Delivery) byla úspěšně ověřena na mobilním telefonu, IO IP2721 a zdroji napětí podporujícím komunikaci dle USB Power Delivery. Funkce bezdrátového nabíjení byla úspěšně ověřena na přijímači bezdrátového nabíjení standardu Qi určeného pro mobilní telefony, které touto funkcí nedisponují. Cíle uvedené v zadání této diplomové práce byly splněny.

Jako možné vylepšení navrženého zařízení se nabízí např. použití mikrokontroléru s nižší spotřebou a vyšším rozlišením PWM modulátoru při vyšších frekvencích generovaného signálu, aby mohla být zvýšena spínací frekvence měniče ZETA/SEPIC, což by umožnilo zmenšení rozměrů součástek měniče (induktorů, kondenzátorů); to by zmenšilo rozměry power banky a snížilo by to její váhu a cenu součástek. Protože USB-C kontrolér podporuje i jiné standardy rychlého nabíjení, je možné nakonfigurovat použitý mikrokontrolér tak, aby power banka podporovala množství dalších protokolů pro rychlé nabíjení (např. Qualcomm Quick Charge). Vzhledem k tomu, že je k řízení měniče ZETA/SEPIC použit mikrokontrolér, je v budoucnu možné do programu mikrokontroléru jednoduše implementovat podporu PPS (Programmable Power Supply) dle Standardu USB Power Delivery, což by znamenalo, že by se power banka (resp. výstup USB-C) dala používat jako regulovatelný zdroj napětí (s téměř libovolně volitelnými napěťovými úrovněmi od zhruba 3 V do 21 V) s volitelným proudovým omezením. Dále lze do mikrokontroléru implementovat např. MPPT algoritmus (Maximum Power Point Tracking, sledování bodu maximálního výkonu) pro nabíjení akumulátoru power banky (přes USB-C konektor) přímo z výstupu menšího fotovoltaického panelu, což by mohlo být využito při absenci jiných zdrojů energie např. při déletrvajícím pobytu v přírodě.



Literatura

- [1] BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries. In: *Battery University* [online]. 2021. [cit. 2022-02-18]. Dostupné na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries>.
- [2] BU-201: How does the Lead Acid Battery Work? In: *Battery University* [online]. 2021. [cit. 2022-02-18]. Dostupné na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-201-how-does-the-lead-acid-battery-work>.
- [3] BU-203: Nickel-based Batteries. In: *Battery University* [online]. 2021. [cit. 2022-02-18]. Dostupné na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-203-nickel-based-batteries>.
- [4] BU-204: How do Lithium Batteries Work? In: *Battery University* [online]. 2021. [cit. 2022-02-18]. Dostupné na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work>.
- [5] BU-206: Lithium-polymer: Substance or Hype? In: *Battery University* [online]. 2021. [cit. 2022-03-18]. Dostupné na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-206-lithium-polymer-substance-or-hype>.
- [6] BU-205: Types of Lithium-Ion. In: *Battery University* [online]. 2021. [cit. 2022-03-18]. Dostupné na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>.

- [7] DRUMMOND, R., C. HUANG, P. GRANT a kol. Overcoming diffusion limitations in supercapacitors using layered electrodes. *Journal of Power Sources* [online]. 2019. [cit. 2022-03-18]. ISSN 03787753. Dostupné na: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775319305191>.
- [8] Supercapacitor. In: *EE Power* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné na: <https://eepower.com/capacitor-guide/types/supercapacitor/#>.
- [9] BU-209: How does a Supercapacitor Work? In: *Battery University* [online]. 2021. [cit. 2022-02-18]. Dostupné na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-209-how-does-a-supercapacitor-work>.
- [10] BU-903: How to Measure State-of-charge. In: *Battery University* [online]. 2021. [cit. 2022-02-15]. Dostupné na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-903-how-to-measure-state-of-charge>.
- [11] KURZWEIL, Peter a Wolfgang SCHEUERPFUG. State-of-Charge Monitoring and Battery Diagnosis of Different Lithium Ion Chemistries Using Impedance Spectroscopy. In *Batteries* [online]. 2021. [cit. 2022-02-15]. ISSN 2313-0105. Dostupné na: <https://www.mdpi.com/2313-0105/7/1/17>.
- [12] BARSUKOV, Yevgen. Battery Cell Balancing: What to Balance and How. In: *Texas Instruments* [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné na: <https://www.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic%20-%20Battery%20Cell%20Balancing%20-%20What%20to%20Balance%20and%20How.pdf>.
- [13] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I: Základní zapojení analogových a spínaných napájecích zdrojů*. 2. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 1997. ISBN 80-86056-02-3.
- [14] ŠTEFANEC, František. Powerbanka. In: *Tefova elektronika* [online]. [cit. 2022-02-12]. Dostupné na: <http://tefatronix.g6.cz/display.php?page=pbkit3&lang=cz>.

- [15] ŠTEFANEC, František. Plastová powerbanka. In: *Tefova elektronika* [online]. [cit. 2022-02-12]. Dostupné na: <http://tefatronix.g6.cz/display.php?page=pbkit2&lang=cz>.
- [16] MP2669: 5A, Battery Charger with 3A Boost System Current and Fast-Charge Capability. In: *Monolithic Power Systems* [online]. [cit. 2022-02-12]. Dostupné na: <https://www.monolithicpower.com/en/mp2669.html>.
- [17] Powerbank SoC. In: *Injoinic* [online]. [cit. 2022-02-12]. Dostupné na: http://www.injoinic.com/product_detail/id/21.html?lang=en-us.
- [18] LUNA, Massimiliano, Antonio SFERLAZZA, Angelo ACCETTA a kol. Modeling and Performance Assessment of the Split-Pi Used as a Storage Converter in All the Possible DC Microgrid Scenarios. Part I: Theoretical Analysis. *Energies* [online]. 2021, roč. 14, č. 16. ISSN 1996-1073. Dostupné na: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/16/4902>.
- [19] FALIN, Jeff. Designing DC/DC converters based on ZETA topology. In: *Texas Instruments* [online]. 2010. [cit. 2022-02-12]. Dostupné na: <https://www.ti.com/lit/an/slyt372/slyt372.pdf>.
- [20] BRYAN. What is Qualcomm Quick Charge? In: *Power Bank Expert* [online]. 2020. [cit. 2022-02-09]. Dostupné na: <https://www.powerbankeexpert.com/what-is-qualcomm-quick-charge-technology/>.
- [21] USB Power Delivery Specification. In: *USB* [online]. 2021. [cit. 2022-02-09]. Dostupné na: <https://www.usb.org/document-library/usb-power-delivery>.
- [22] USB Power Delivery: What is USB Power Delivery? In: *ROHM Semiconductor* [online]. [cit. 2022-02-09]. Dostupné na: <https://www.rohm.com/electronics-basics/usbpd/usb-power-delivery>.
- [23] AGBINYA, Johnson, ed. *Wireless Power Transfer*. Aalborg, Dánsko: River Publishers, 2012. ISBN 978-87-92982-78-0.

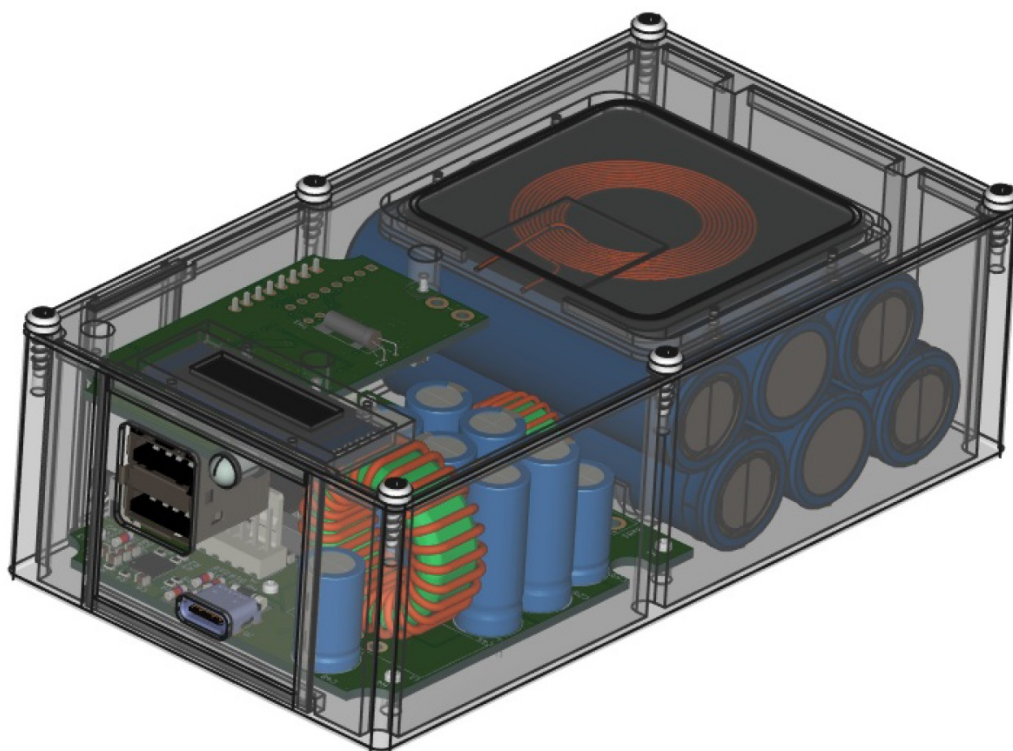
- [24] LU, Xiao., Ping WANG, Dusit NIYATO a kol. Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications. In: *Cornell University* [online]. 2015. [cit. 2021-12-17]. Dostupné na: <https://arxiv.org/pdf/1509.00940.pdf>.
- [25] TRAN, Vu H., Archan MISRA, Jie XIONG a kol. WiWear: Wearable Sensing via Directional WiFi Energy Harvesting. In: *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)* [online]. IEEE, 2019. [cit. 2021-03-29]. Dostupné na: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8767406/>.
- [26] Qi Specification: Version 1.3. In: *Wireless Power Consortium* [online]. 2021. [cit. 2021-12-18]. Dostupné na: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/knowledge-base/specifications/download-the-qi-specifications.html>.
- [27] KRAKOWER, Jon. Design of a Qi Wireless Charging Device: A Guide to Engineering Considerations. In: *PCH* [online]. [cit. 2021-12-17]. Dostupné na: <https://www.pchintl.com/wp-content/uploads/2021/04/PCH-Wireless-Charging-Device.pdf>.
- [28] SMITH, Nicholas. White Paper – Tuning Qi® and AirFuel®/PMA® Inductive Resonance Circuits for Optimal Efficiency. In: *Renesas* [online]. 2017. [cit. 2021-12-31]. Dostupné na: <https://www.renesas.com/us/en/document/whp/tuning-qi-and-airfuel-pma-inductive-resonance-circuits-optimal-efficiency>.
- [29] NXQ1TXH5: One-chip 5 V Qi wireless transmitter. In: *NXP Semiconductors* [online]. 2016. [cit. 2021-12-17]. Dostupné na: https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/NXQ1TXH5_SDS.pdf.
- [30] BATTEZZATO, Paolo. Wireless Battery Charging. In: *STMicroelectronics* [online]. 2017. [cit. 2021-12-17]. Dostupné na: https://www.st.com/content/dam/technology-tour-2017/session-3_track-7_wireless-charging.pdf.
- [31] Specification of product for Lithium-ion Rechargeable Cell: Model: ICR18650-22P. In: *TME* [online]. 2010. [cit. 2022-03-18]. Dostupné na: <https://www.tme.eu/Document/cf2b91a94627173083963b831db6ea62/ACCU-18650-2.2P-HV.pdf>.

- [32] SPECIFICATION OF PRODUCT: Model: ICR18650-26JM. In: *TME* [online]. 2015. [cit. 2022-03-18]. Dostupné na: <https://www.tme.eu/Document/f4cded3154f98dca54d36390b138423c/ACCU-ICR18650-26JM.pdf>.
- [33] ANDREA, Davide. White Paper - Resistance vs impedance: Cell impedance at 1 kHz is not the same as DC resistance. In: *Li-Ion BMS* [online]. 2013. [cit. 2022-03-19]. Dostupné na: https://liionbms.com/php/wp_resistance_vs_impedance.php.
- [34] GILLARD, George. Introduction to PID Controllers. In: *George Gillard* [online]. 2017. [cit. 2022-03-19]. Dostupné na: <http://georgegillard.com/documents/2-introduction-to-pid-controllers>.
- [35] TAN, S.-C., Y.M. LAI a C. TSE. General Design Issues of Sliding-Mode Controllers in DC-DC Converters. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. IEEE, 2008, roč. 55, č. 3. ISSN 0278-0046. Dostupné na: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4401191/>.
- [36] Introduction to SMPS Control Techniques. In: *Microchip* [online]. 2006. [cit. 2022-03-19]. Dostupné na: https://www.microchip.com/stellent/groups/sitecomm_sg/documents/training_tutorials/en527885.pdf.
- [37] Specification for Approval. In: *Semic Trade* [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné na: https://semic.cz/!old/files/pdf_www/Ljf_T92-SH-125A_KD.pdf.
- [38] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumičky pro spínané napájecí zdroje*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-91-0.
- [39] Aluminum Electrolytic Capacitors: Nichicon. In: *TME* [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné na: <https://www.tme.eu/Document/f0ed906e3e46b26d1cb9b355ff46c0e6/e-pw.pdf>.
- [40] Hitano ESX Series. In: *GM Electronic* [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné na: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.123-408.1.pdf>.

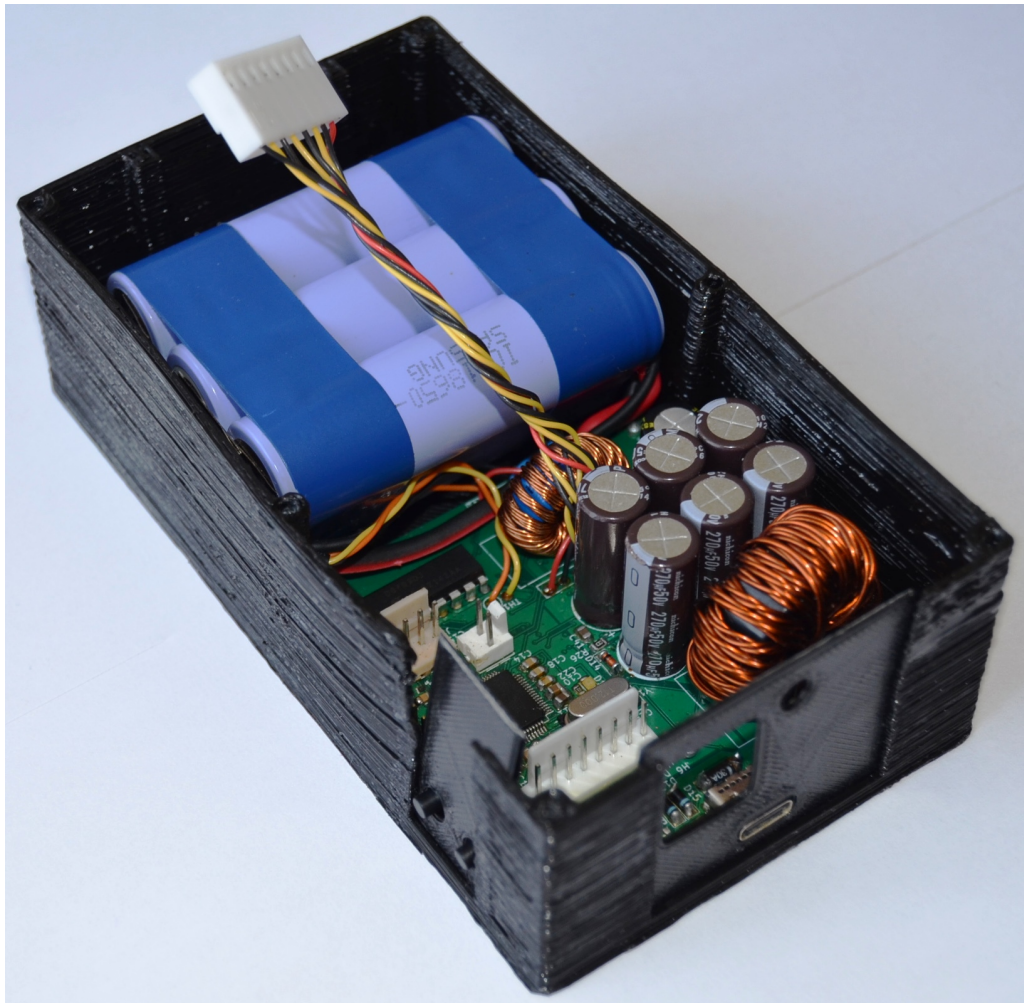
- [41] ROSU HAMZESCU, Mihnea. a OPREA, Sergiu. AN1467: High-Power CC/CV Battery Charger Using an Inverse SEPIC (Zeta) Topology. In: *Microchip* [online]. 2012. [cit. 2022-03-19]. Dostupné na: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01467A.pdf>.
- [42] LM5109B High Voltage 1-A Peak Half-Bridge Gate Driver. In: *Texas Instruments* [online]. 2016. [cit. 2022-03-21]. Dostupné na: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5109b.pdf>.
- [43] DMT64M8LSS: 60V N-Channel Enhancement Mode MOSFET. In: *Diodes Incorporated* [online]. 2020. [cit. 2022-03-21]. Dostupné na: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/DMT64M8LSS.pdf>.
- [44] Current-Shunt Monitors, Voltage Output, Bidirectional Zero-Drift, Low- or High-Side Current Sensing. In: *Onsemi* [online]. 2021. [cit. 2022-03-21]. Dostupné na: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ncs210r-d.pdf>.
- [45] IP2716: USB TYPE-C PD3.0 QC3.0/2.0/MTK High Voltage Charger Protocol Controller. In: *Korechip* [online]. [cit. 2022-03-21]. Dostupné na: <http://www.korechip.com/uploadfile/cfile/upload/20179271505018.pdf>.
- [46] WCT101XDS. In: *Farnell* [online]. 2019. [cit. 2021-12-31]. Dostupné na: <https://www.farnell.com/datasheets/2860190.pdf>.
- [47] IWTX5050CZEB6R3KF1: Wireless Charging Transmitter Coil / Shield. In: *Vishay* [online]. 2020. [cit. 2021-12-31]. Dostupné na: <https://www.vishay.com/docs/34484/iwtx5050czeb6r3kf1.pdf>.
- [48] AN11775: NXQ1TXH5/101 one-chip 5 V Qi wireless transmitter. In: *NXP Semiconductors* [online]. 2016. [cit. 2021-12-17]. Dostupné na: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN11775.pdf>.
- [49] AP3503E: 340kHz, 3A Synchronous DC-DC Buck Converter In: *RS Components* [online]. 2012. [cit. 2021-12-31]. Dostupné na: <https://docs.rs-online.com/1e72/0900766b8133218e.pdf>.

- [50] PENG, Cheng Zhi. Application Note 1073: Design Consideration with AP3502E/3E. In: *Diodes Incorporated* [online]. 2012. [cit. 2021-12-31]. Dostupné na: https://www.diodes.com/assets/App-Note-Files/power/sw_reg/AN1073.pdf.
- [51] GRM31CR61C226KE15#. In: *Murata* [online]. [cit. 2021-12-31]. Dostupné na: <https://www.murata.com/en-global/products/productdetail?partno=GRM31CR61C226KE15%23>.
- [52] 10W 5V/2A Qi Wireless Charger Receiver Phone Charger Coil. In: *AliExpress* [online]. [cit. 2022-02-09]. Dostupné na: <https://www.aliexpress.com/item/1005002049527558.html?>

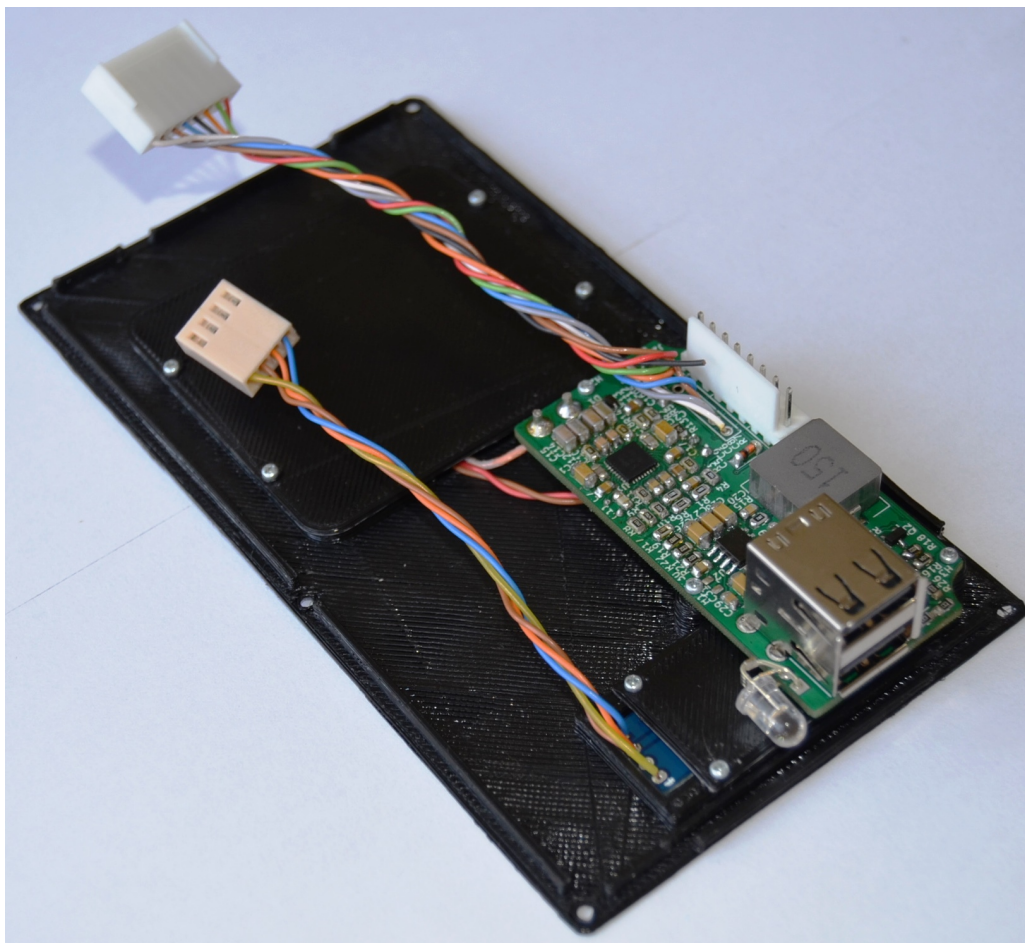
Příloha



Obrázek 13.1: Vizualizace power banky v programu FreeCAD (stěny krabičky byly zprůhledněné, aby bylo lépe patrné vnitřní uspořádání).



Obrázek 13.2: Foto spodní části krabičky power banky s DPS a akumulátorem.



Obrázek 13.3: Foto vrchní části krabičky power banky s DPS, displejem a vysílací cívkou.



Obrázek 13.4: Foto power banky.



Obrázek 13.5: Foto displeje power banky.



Obrázek 13.6: Foto power banky s popiskem.