



Martin Zavřel

Kooperace systému WPT s baterií

Technická zpráva

Pracovní balíček:

WP8 – Elektrické části pohonů, hybridní pohony, rekuperace

Rok řešení:

2018



Projekt č. TE01020038 „Centrum kompetence drážních vozidel“ je řešen s finanční podporou TA ČR.

Fakulta elektrotechnická Regionální inovační centrum elektrotechniky

Kooperace systému WPT s baterií

Pracoviště: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Číslo dokumentu: 22190-048-2018
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Martin Zavřel, Pavel Drábek, Vladimír Kindl
Hlavní řešitel: Zdeněk Peroutka
Počet stran: 17
Datum vydání: prosinec 2018
Oborové zařazení: JA – Elektronika a optoelektronika, elektrotechnika

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Regionální inovační centrum
elektrotechniky
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Ing. Martin Zavřel
tel. 377634420
zavrelm@rice.zcu.cz

Tato práce vznikla za podpory projektu TE01020038 „Centrum kompetence drážních vozidel“ řešeného s finanční podporou TA ČR.

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá základní problematikou dobíjení trakčního akumulátoru systémem bezdrátového přenosu výkonu (WPT). Zpráva uvádí hardwarové uspořádání celého řetězce, parametry jednotlivých komponentů a poukazuje na specifika plynoucí ze spojení akumulátoru a systému WPT. Rovněž je v práci proveden návrh možného řízení a jeho realizace.

Klíčová slova

Bezdrátový přenos výkonu, trakční baterie, dobíjení.

Název zprávy v anglickém jazyce

WPT system and battery cooperation.

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report deals with a basic issues of traction battery charging by wireless power transfer (WPT). The report lists the hardware layout of the overall chain, and points to the specificities of the battery and the WPT system connecting. Also, a proposal for possible management and its implementation is made.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Wireless power transfer, traction battery, charging.

Seznam symbolů a zkratk

WPT	bezdrátový přenos výkonu
DSP	digitální signálový procesor
PM	pulzní měnič
DC	stejnoseměrný
CAN	communication are network
CC	constant current
CV	constant voltage
ID	identification / identifier
MLC	multi-level converter
Rx	Received data (přijatá data)
Tx	Transmitted data (přijatá data)
GPIO	General purpose inputs and outputs

Obsah

1	ÚVOD	5
2	HARDWAROVÉ USPOŘÁDÁNÍ A ZÁKLADNÍ ŘÍDÍCÍ STRUKTURA	6
2.1	HARDWAROVÉ USPOŘÁDÁNÍ - KOMPONENTY	7
2.1.1	Trakční akumulátor	7
2.1.2	Snižovací DC/DC měnič	9
2.2	ŘÍDÍCÍ STRUKTURA – ŘÍZENÍ NABÍJENÍ	10
3	KOMUNIKACE S BATERÍÍ	13
4	NABÍJENÍ BATERIE	15
5	ZÁVĚR	15

1 Úvod

Bezdrátový přenos energie, respektive bezdrátové dobíjecí stanice, tvoří alternativu ke klasickým kabelovým nabíječkám. Současně s sebou bezdrátové nabíjení přináší celou řadu výhod, jako je například bezobslužné připojení nabíjeného zařízení, čistota, úspora času, samočinné dobíjení apod.

Především v oblasti přenosné elektroniky zaznamenalo bezdrátové nabíjení značný rozvoj, nicméně v posledních letech se do popředí dostává také bezdrátové nabíjení elektromobilů či jiných výkonových zařízení. Takovéto výkonové bezdrátové nabíjení je od toho nízko výkonového zcela odlišné.

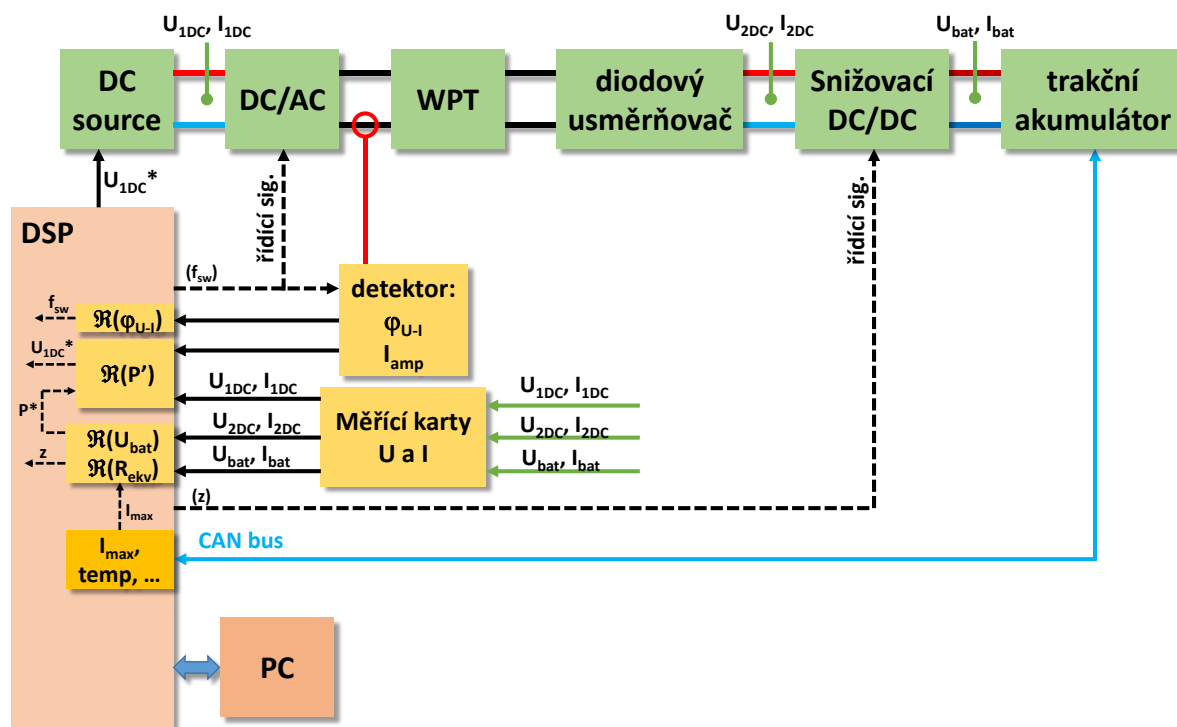
Výkonová bezdrátová dobíjecí stanice sestává z výkonového stejnosměrného zdroje, střídače, vazebných elementů, usměrňovače, DC/DC měniče a nabíjeného akumulátoru.

Samotný systém WPT pracující do odporové zátěže byl popsán v nejedné předchozí výzkumné práci a v odborných článcích. Předmětem této výzkumné zprávy je spojení systému WPT s akumulátorem a jeho dobíjení tímto systémem. Je zde uveden a popsán celý řetězec systému, parametry jednotlivých komponent, nastíněn základní způsob řízení a uvedena specifika.

Tato zpráva slouží především jako základní podklad pro další výzkum a vývoj spojení systému WPT a akumulátoru.

2 Hardwarové uspořádání a základní řídicí struktura

Hardwarové uspořádání systému dobíjení akumulátoru je zachyceno na Obr. 1. Jak je zřejmé, navrhovaná topologie využívá dříve definovaný 5kW prototyp systém WPT (popsaný ve výzkumných zprávách [4,5,6], shrnutý v poznámce pod čarou¹) doplněný o snižující DC/DC měnič (upravující obvodové parametry pro potřeby akumulátoru) a o akumulátor a upravené řízení.



Obr. 1 Blokové schéma nabíjení akumulátoru systémem WPT

Obr. 1 zachycuje první laboratorní topologii s jedním DSP. Reálná aplikace však musí obsahovat 2 DSP se vzájemnou komunikací.

¹5kW prototyp systému WPT využívá vazebné elementy v sério-sériové konfiguraci ($L_1=L_2=145 \mu\text{H}$, $C_1=C_2=3 \text{ nF}$), které jsou optimalizovány na pracovní přenosovou vzdálenost $20 \pm 5 \text{ cm}$ a vyosení až 25 cm (rozměry vazebných indukčností jsou $50 \times 50 \text{ cm}$). Vazebné elementy jsou vybaveny stíněním vyzařovaného EM pole, díky čemuž splňují zdravotní nezávislost v 35 cm .

Napájení vazebných elementů zajišťuje full SiC MOSFET střídač s obdélníkovým výstupem o frekvenci rovné hlavní rezonanční frekvenci vazebných elementů. Tento střídač je napájen ze stejnosměrného, laboratorního, výkonového zdroje.

Usměrnění výstupního napětí vazebných elementů zajišťuje SiC diodový usměrňovač s výstupním kapacitním filtrem.

Důležité poznatky o chování systému jsou, že: Na hlavní rezonanční frekvenci přenáší maximální výkon, který při vyšších kmitočtech klesá. Účinnost mapa je v oblasti nadrezonančních kmitočtů velmi plochá. Účinnost při podrezonančních kmitočtech je velmi nízká.

Výstupní napětí vazebných elementů je při optimálních pracovních podmínkách vždy vyšší než vstupní (až dvojnásobné a vyšší).

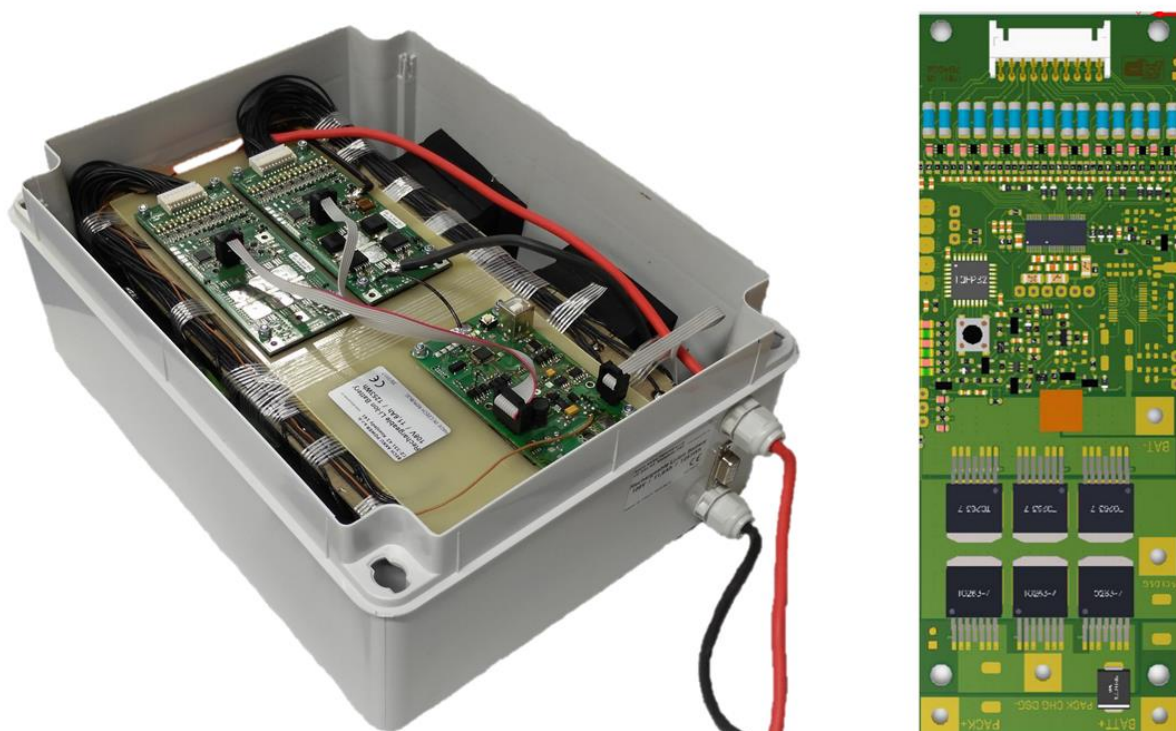
Dosahované parametry 5kW prototypu činí: DC-DC účinnost $\geq 96,5 \%$, přenášený výkon až 5100 W , optimální zátěžný odpor 40 až 120Ω , napájecí napětí 312 V .

2.1 Hardwarové uspořádání - komponenty

Tato kapitola je zaměřena na popis snižujícího DC/DC měniče a akumulátoru, které jsou doplněny k 5 kW prototypu systému WPT. Ostatní komponenty systému WPT byly detailně popsány již dříve.

2.1.1 Trakční akumulátor

Pro první testy byl použit akumulátor Li-Ion s CAN komunikací v konfiguraci 30S4P od firmy Bech AkkuPower®, pracovně nazvaný „Wireless Power Storage 30S4P“. Tento akumulátor byl vyroben speciálně pro první testy nabíjení akumulátoru pomocí systému WPT. Podoba akumulátoru je vyobrazena na Obr. 2 vlevo. Obr. 2 vpravo pak zachycuje část battery managementu.



Obr. 2 – Použitý akumulátor (vlevo – celý akumulátor, vpravo – část battery managementu)

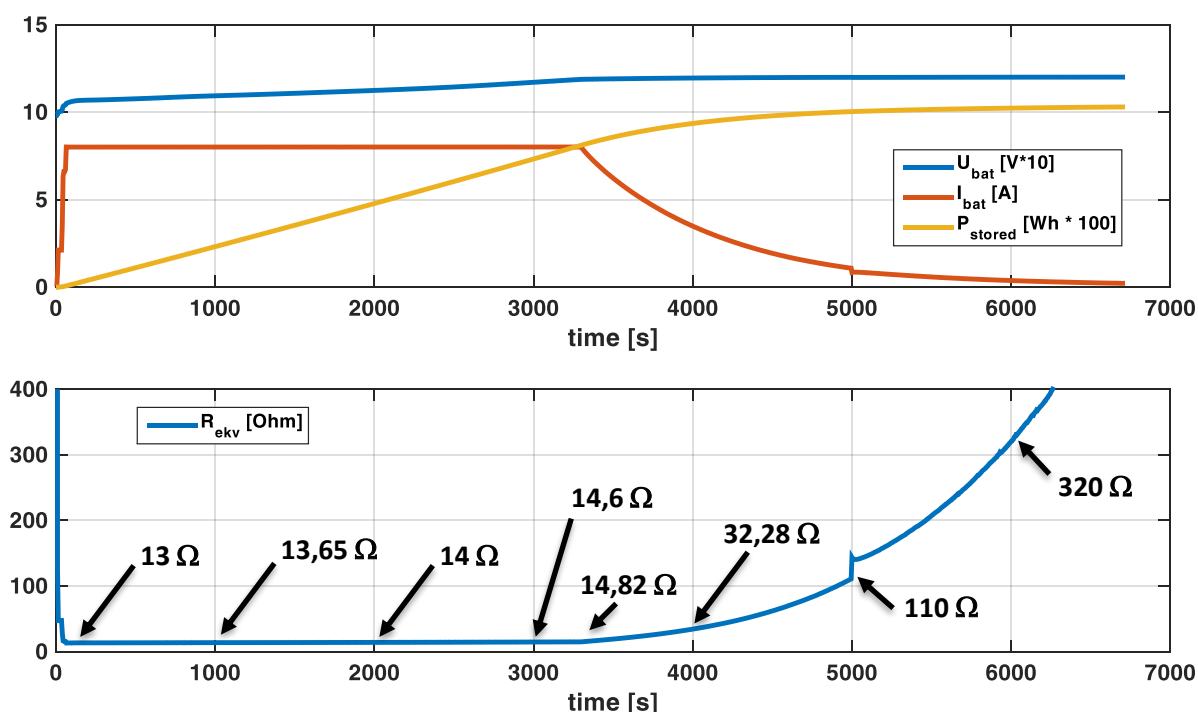
Základní parametry akumulátoru zachycuje Tab. I. Více parametrů je uvedeno ve specifikaci výrobce [3].

Tab. I – základní parametry akumulátoru

parametr	hodnota
jmenovité napětí	108 V
Jmenovitá kapacita	11,6 Ah (1078 Wh)
Minimální napětí	93 V
Maximální napětí	123 V
Maximální trvalý nabíjecí proud	10 A
Maximální trvalý vybíjecí proud	40 A

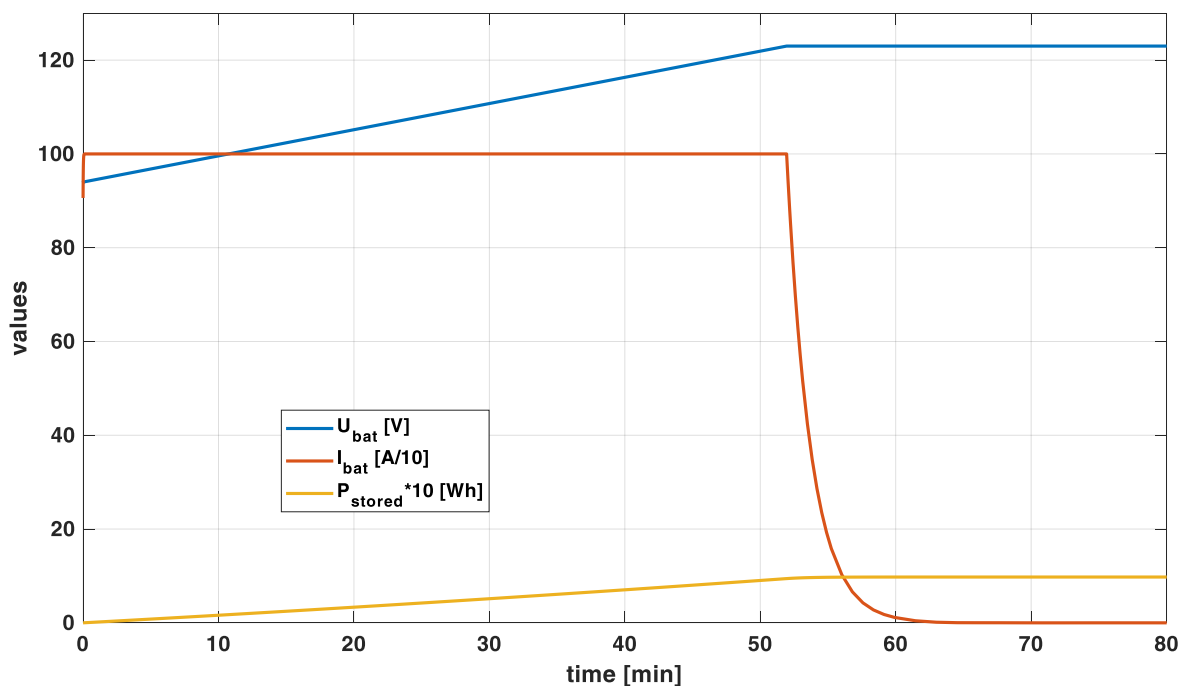
Baterie (battery management, CAN komunikace, ...) je řízena DSP. Řízení akumulátoru má zabudováno několik úrovní vratných softwarových ochran, díky čemuž je akumulátor bezpečný. Součástí akumulátoru jsou také hardwarové (vratné i nevratné) ochrany (přepětová, nadproudová výstupu a nadproudová každého článku). DSP akumulátoru také zajišťuje (posílá) zprávy na CAN sběrnici, díky čemuž je možné akumulátor velmi detailně pozorovat a řídit jeho nabíjení či vybíjení (posílané zprávy obsahují napětí, proudy, teploty a stavy ochrany a battery managementu). Detailněji se posílanými zprávami na CAN sběrnici zabývá specifikace výrobce [3] a Tab. II.

Pro potřeby zajištění optimálních pracovních podmínek je velmi důležitý ekvivalentní nabíjecí odpor akumulátoru. Ten byl měřením nabíjecích charakteristik (precizním výkonovým analyzátořem LMG 500) stanoven na (v průměru) $14\ \Omega$. Detailní stanovení ekvivalentního nabíjecího odporu zachycuje Obr. 3 (spolu s nabíjecí charakteristikou akumulátoru).



Obr. 3 Změřené nabíjecí charakteristiky akumulátoru ($I_{max} = 8\text{ A}$)

Dále uvedený Obr. 4 zachycuje výsledky simulace nabíjení požitého akumulátoru pro maximální možný nabíjecí proud 10 A. I v tomto případě je hlavní část ekvivalentního odporu v okolí $14\ \Omega$.

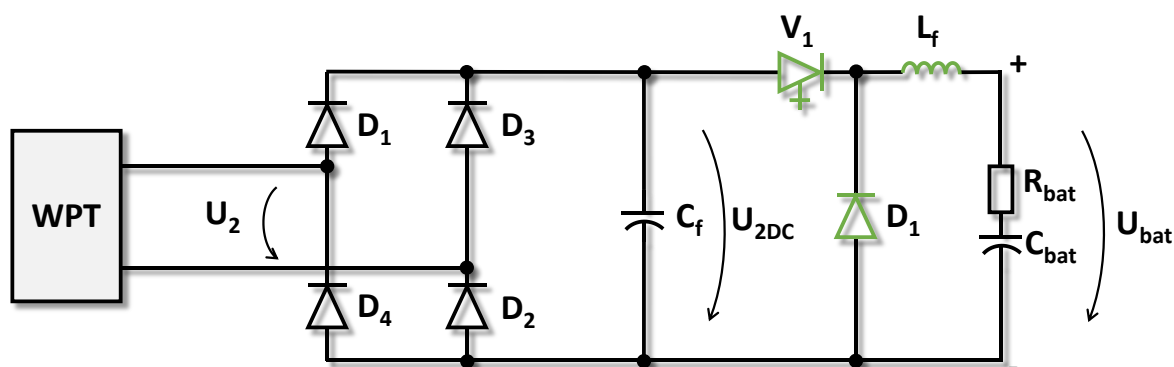


Obr. 4 Simulace nabíjecích charakteristik akumulátoru ($I_{max} = 10$ A)

2.1.2 Snížovací DC/DC měnič

Silové schéma snížujícího DC/DC měniče (zařazené v řetězci dobíjecího systému) je uvedeno na Obr. 5. Pro konstrukci snížujícího DC/DC měniče byl použit modul CAS300M12BM2 se jmenovitými parametry $V_{DSmax} = 1,2$ kV, $I_{Dcon} = 285$ A (při $T_c = 90$ °C) a $P_D = 1660$ W. Filtrační kapacita C_f představuje pouze výstupní kapacitu usměrňovače [7]. Filtrační indukčnost L_f byla zvolena 10 uH / 10 A.

Pro spínání tranzistoru byl použit firemní driver Cree CGD15HB62P1 a MLC interference. Způsob řízení snížujícího DC/DC měniče je přiblížen v následující kapitole.



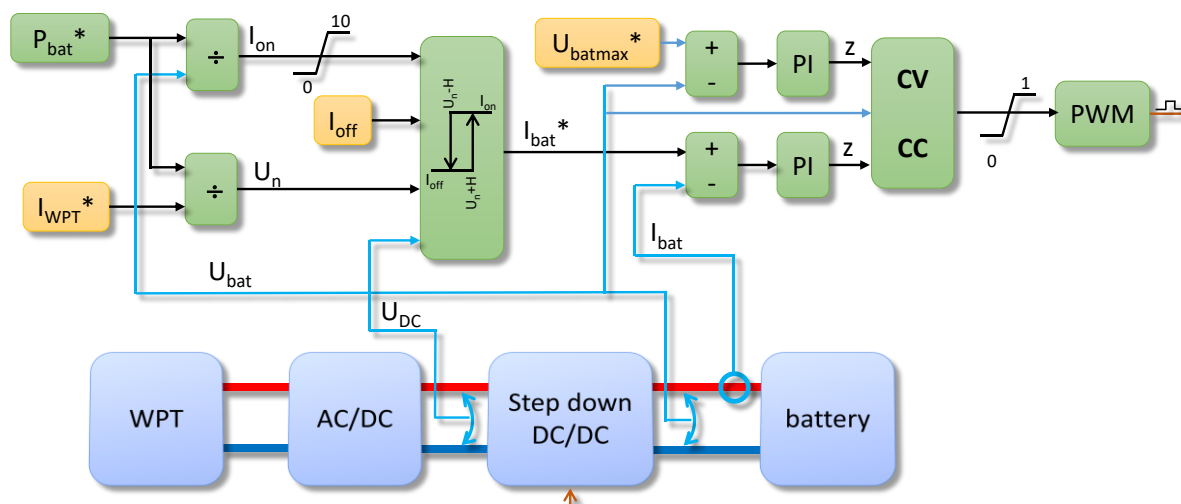
Obr. 5 Silové schéma snížujícího DC/DC měniče

2.2 Řídící struktura – řízení nabíjení

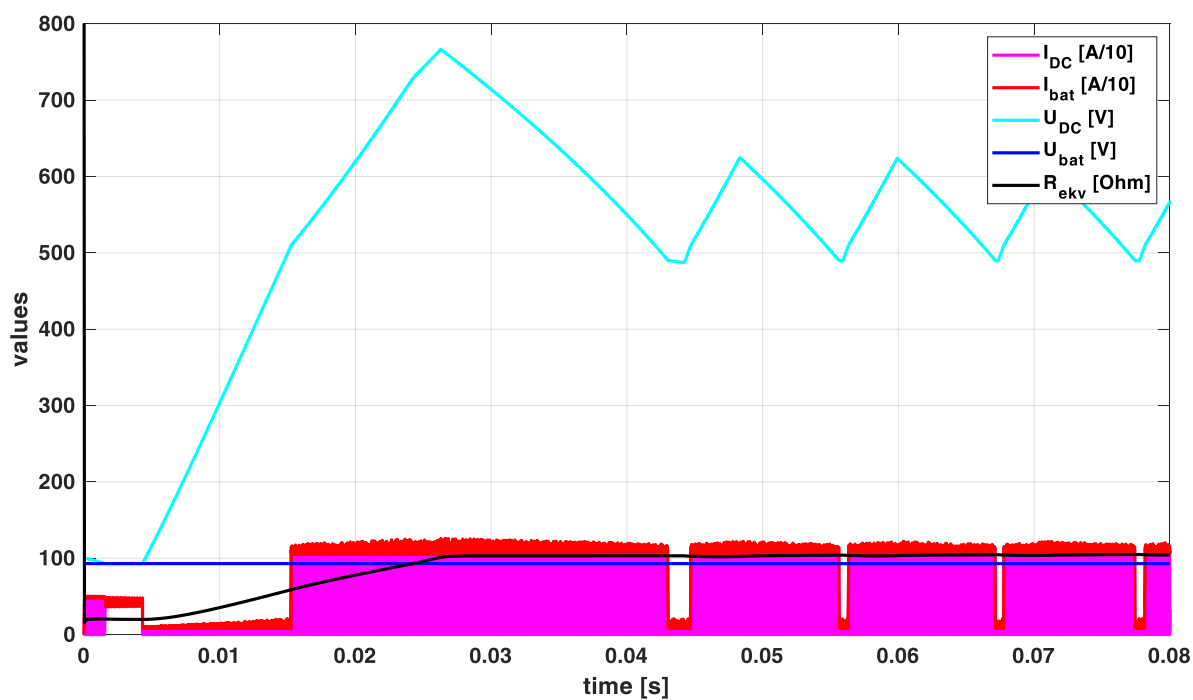
PM ve spojení se systémem WPT se řídí spínacím diagramem snižovacího PM, přičemž zadávání střídý je dáno komplexní regulační strukturou umožňující řízení dodávaného výkonu s ohledem na optimální zatížení systému WPT. Jedna z možných realizací takové regulační struktury je uvedena na Obr. 6. Hlavní vstup zde tvoří požadovaný nabíjecí výkon P_{bat}^* , ze kterého jsou dopočítávané ostatní parametry s ohledem na optimální zatížení systému WPT. Optimální napětí DC meziobvodu U_n je udržované hysterezním regulátorem a je dané podílem P_{bat}^* a optimálního proudu I_{WPT}^* . Hysterezní pásmo činí $2H$, přičemž výstupem hysterezního regulátoru je požadovaný nabíjecí proud (minimální a optimální). V levé části hystereze dochází k omezení nabíjecího proudu akumulátoru a energie systému WPT je ukládána do výstupního kapacitního filtru usměrňovače. Dochází tedy k prudkému navyšování napětí DC meziobvodu. V pravé části hystereze dochází k odčerpávání energie z uvedeného filtru a systému WPT do baterie. Jelikož je nabíjecí proud akumulátoru větší, než optimální proud systému WPT (nastavený proud přijímacího vazebného elementu I_{WPT}^*), tak dochází ke snižování napětí v DC meziobvodu. Tímto cyklem je zaručena efektivní hodnota optimálního ekvivalentního zatěžovacího odporu systému WPT R_{ekv} . Činnost hysterezního regulátoru zachycuje obrázek 7. Tento obrázek také zachycuje činnost PI regulátoru nabíjecího proudu. Takto popsaná regulace se týká části nabíjení CC. Pro napětí blízká maximálnímu napětí akumulátoru dochází k přechodu regulace do režimu CV, kdy je snižovacím DC/DC měničem nastavována právě tato hodnota napětí na akumulátoru.

Jak je také patrné z Obr. 7, ekvivalentní zátěžný odpor je udržován na $104 \pm 1 \Omega$, což je pro systém výhodná hodnota [1,2], která zaručuje přenos výkonu s vysokou účinností. Ekvivalentní zátěžný odpor lze samozřejmě upravovat změnou parametrů regulace – požadovaného proudu přijímacího elementu systému WPT I_{WPT}^* .

Velikost hysterezního pásma (tedy rozkmit U_{DC}) lze nastavit zásahem do regulace. Jak je z Obr. 7 zřejmé, jeho velikost má také přímý vliv na dobu vedení minimálního nabíjecího proudu.

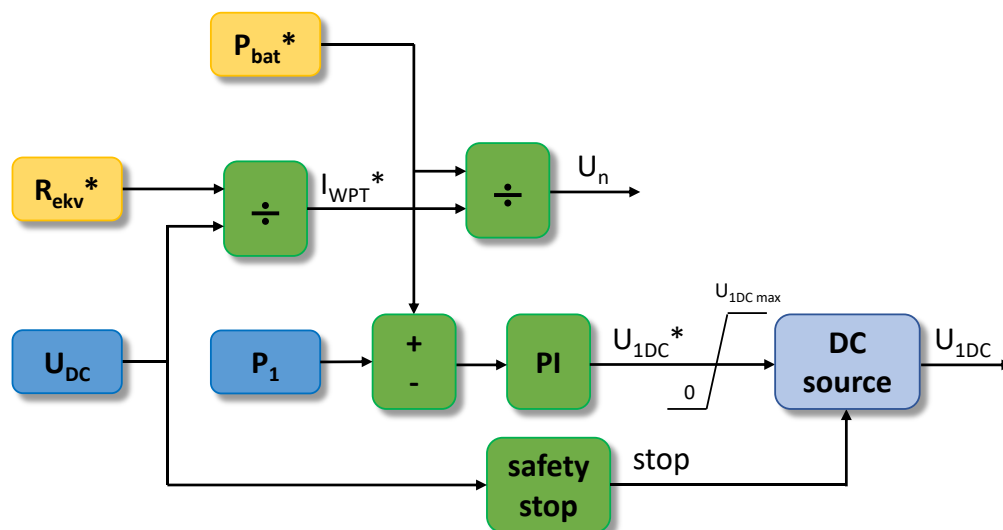


Obr. 6 Řídicí struktura nabíjení baterie – snižovacího DC/DC měniče.



Obr. 7 Výstup simulace snižovacího DC/DC měniče

Uvedený usměrňovač v kombinaci se snižujícím DC/DC měničem zajišťuje správné nabíjení baterie. Energie pro tuto kombinaci je dodávána přes vazebné elementy systému WPT z kombinace napěťového střídače a DC zdroje. Jak je patrné z Obr. 1, výstupním napětím DC zdroje je řízen přenášený výkon, tedy výkon dodávaný do snižujícího DC/DC měniče. Tato část regulace je zachycena na Obr. 8.



Obr. 8 Řídící struktura dodávaného výkonu – DC zdroje

Veškeré řízení bylo implementováno do DSM TMS320F28335.

3 Komunikace s baterií

Komunikace s baterií, respektive s battery managementem, je pro správné a bezpečné nabíjení zcela nezbytná. Tato komunikace probíhá na CAN sběrnici mezi baterií a DSP s komunikační rychlostí 500 kbps. Základní struktura zpráv je patrná z Tab. II. Při nabíjení jsou využívány především zprávy s ID 0x244. Zprávy s ID 0x240-243 mají pouze informativní charakter a zprávy s ID 0x245 jsou nepřijímané.

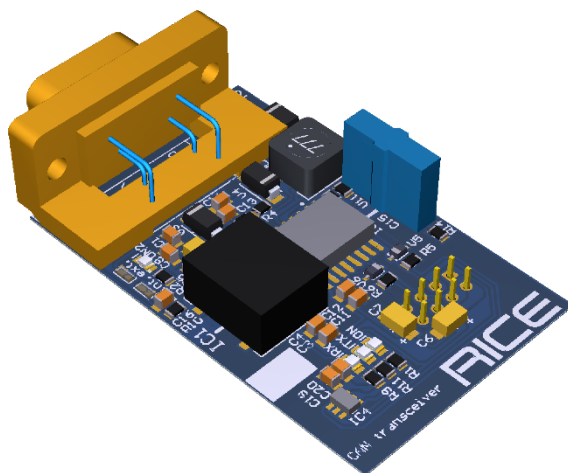
Tab. II Struktura zpráv na CAN (baterie)

ID	BYTE	Význam	Reprezentace dat
0x240	0 až 7	CELL 1 až 8	(DATA * 10) + 200 [mV]
0x241	0 až 7	CELL 9 až 16	
0x242	0 až 7	CELL 17 až 24	
0x243	0 až 5	CELL 25 až 30	
0x244	0 až 3	Teplota 1 až 4	DATA - 30 [°C]
	4	Proud bat.	DATA [A]
	5	Napětí bat.	DATA [V]
	6 až 7	Příznaky	viz specifikace výrobce
0x245	0	FWm1	verze firmware elektroniky článků 1 až 12
	1	FHm1	verze hardware elektroniky článků 1 až 12
	2	FWm2	verze firmware elektroniky článků 13 až 24
	3	FHm2	verze hardware elektroniky článků 13 až 24
	4	Fwmast	verze firmware hlavní řídicí jednotky
	5	Hhmast	verze hardware hlavní řídicí jednotky
	6	ID_L	IDL = DATA * 0x100 + DATA
	7	ID_H	IDH = DATA * 0x100 + DATA

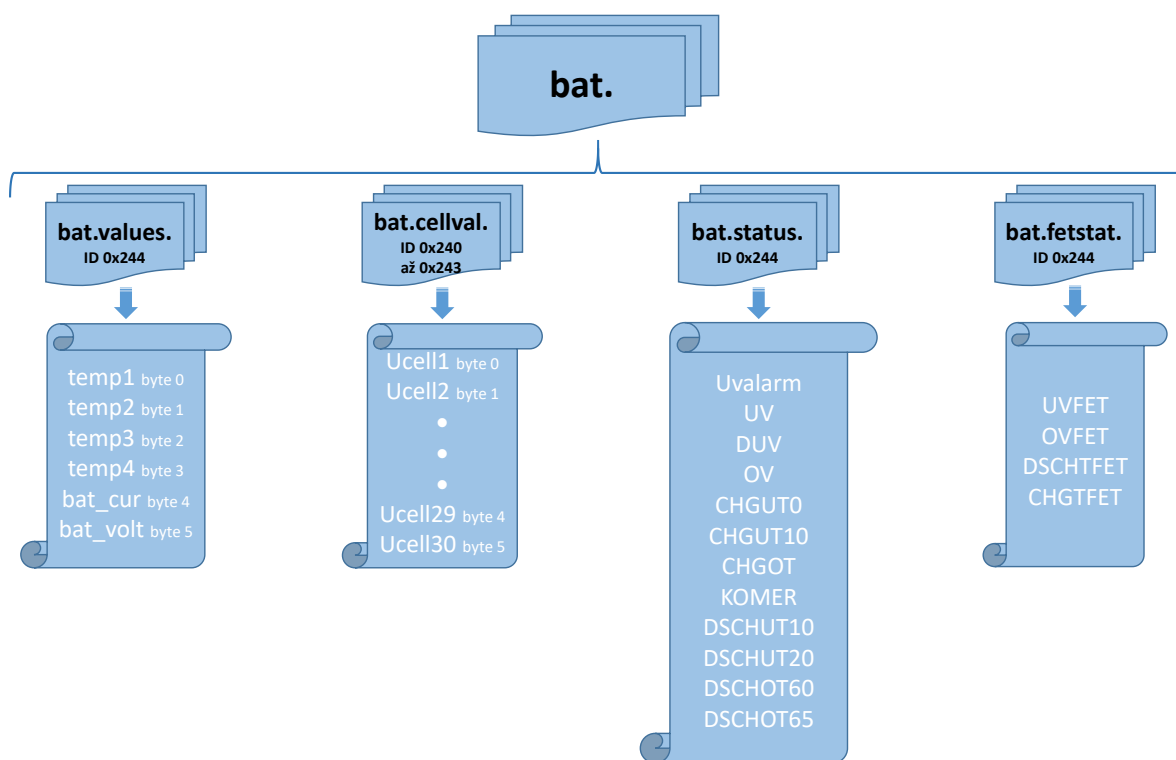
DSP zprávy přijímá CAN periférií (CAN A), která je v MLC interferenci [1] namapována na GPIO 18,19 (Rx,Tx) a přes ochranné a přizpůsobovací obvody vyvedena na konektor H30 MLC interferenci.

Ke konektoru H30 je připojen CAN transceiver, který je detailněji popsán ve výzkumné zprávě [8]. Modul CAN transceiveru byl vyvinut jako univerzální CAN modul pro MLC interferenci, který zajišťuje galvanické oddělení komplementární CAN sběrnice a umožňuje volbu jejího napájení. CAN transceiver umožňuje komunikační rychlost až 1 Mbps. Na Obr. 9 je vyobrazen použitý (vyvinutý) CAN transceiver.

Příjem o odesílání CAN zpráv zajišťuje primárně knihovna MLC _can_drv_28335.c . Přijatá data jsou ukládána do přehledné struktury, která je znázorněna na Obr. 10



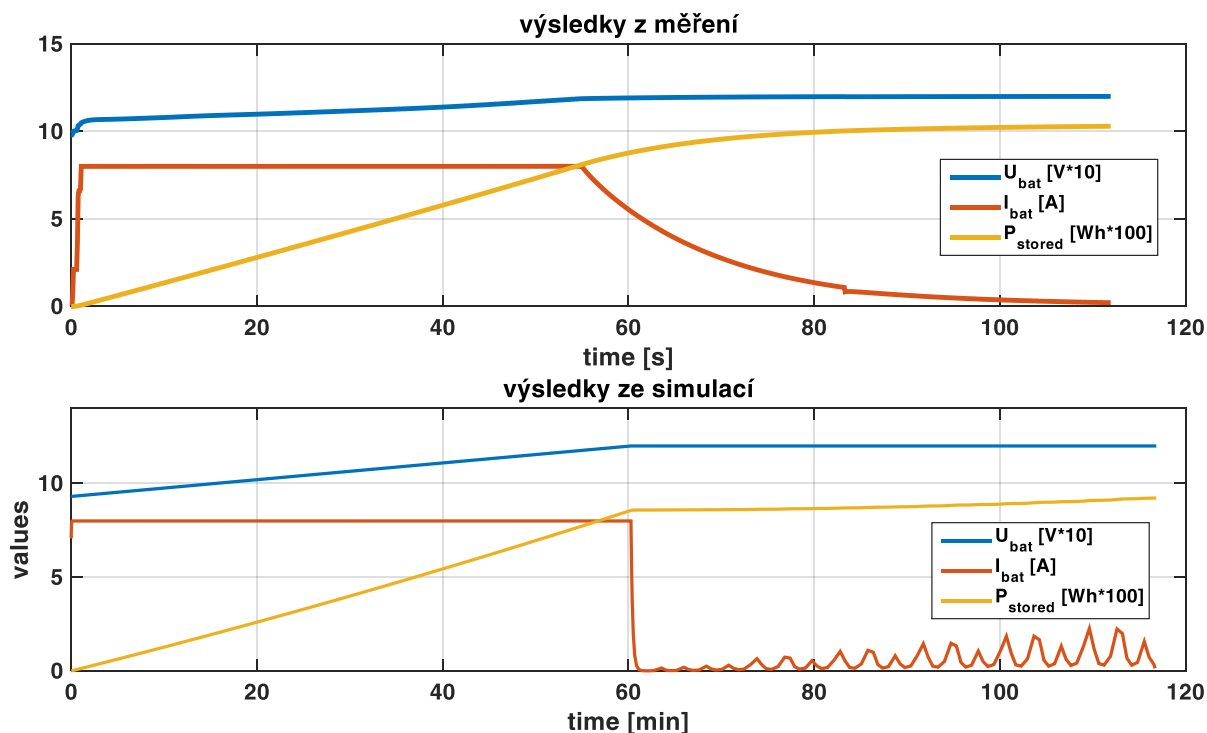
Obr. 9 – Modul CAN transceiveru pro MLC interface



Obr. 10 – Struktura uložení dat z CAN sběrnice (baterie)

4 Nabíjení baterie

Realizované nabíjení baterie systémem WPT dosahuje výsledků dle Obr. 11. Na tomto obrázku je znázorněn průběh napětí a proudu na akumulátoru během nabíjení a celková uložená energie (při zanedbání ztrát v člancích akumulátoru). Obr. 11 také potvrzuje specifikaci výrobce a uvedené měření nabíjecích charakteristik akumulátoru.



Obr. 11 Záznam nabíjení akumulátoru

Měření veličin na akumulátoru, tedy napětí U_{bat} , proudu I_{bat} a uložené energie P_{stored} bylo prováděno precizním výkonovým analyzátozem LMG 500.

5 Závěr

Spojením 5 kW prototypu systému WPT, snižujícího DC/DC měniče a testovacího akumulátoru byl vytvořen laboratorní prototyp nabíjení akumulátoru systémem WPT. Jako akumulátor byl použit speciálně sestavený LI-ION 30S4P s CAN komunikací. DC/DC měnič je tvořený SiC půlmůstkovým modulem a indukčností 10 μ H.

Měřeními a simulacemi byly ověřeny parametry akumulátoru a funkce spojení DC/DC měniče s akumulátorem. Byl také stanoven ekvivalentní nabíjecí odpor akumulátoru na 14 Ω .

Dále byla navržena regulační struktura pro nabíjení systémem WPT, která umožňuje regulaci nabíjení akumulátoru v režimech CC a CV, přizpůsobení ekvivalentního zátěžného odporu systému WPT na optimální hodnotu 104 Ω a regulaci dodávaného výkonu systémem WPT.

Z důvodu bezpečného a kvalitního dobíjení byla vytvořena komunikace s baterií po CAN sběrnici s využitím vlastního CAN transceiveru v TMS320F28335.

Nabíjení akumulátoru systémem WPT bylo dále měřeno a simulováno s vynikajícími výsledky a shodou.

Celkově práce shrnuje základní poznatky z nabíjení akumulátoru systémem WPT a slouží jako podklad pro budoucí výzkum a vývoj.

Literatura

- [1] T. Košan, MLC interface – vývojový kot pro víceúrovňové měniče s procesorem a FPGA, výzkumná zpráva FEL/KEV, 2012, no.: 22190-010-2012.
- [2] Texas Instruments, TMS320F2833x, TMS320F2823x Digital Signal Controllers (DSCs), katalogový list k produktu, 20 16.
- [3] Bech Akku Power, Wireless power storage 30S4P, specifikační dokument / katalogový list výrobce, verze 1.0, 2017.
- [4] M. Zavřel, *Měřicí stanoviště a měření na systému WPT*, Výzkumná zpráva, FEL/KEV, no.:43916218, Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [5] M. Zavřel, *Základní měření na systému WPT*, Výzkumná zpráva, FEL/KEV, no.: 43916484, Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [6] KINDL, V., KAVALÍR, T., ZAVŘEL, M. *Stínění EM pole výkonového WPT systému „RICE ver.1“*, Výzkumná zpráva, FEL/KEV, no.:43918058, Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [7] M. Jára, Výkonový jednofázový usměrňovač s SiC modulem, Funkční vzorek, FEL/KEV, no.: 22190-FV021-2013, ZČU, 2013.
- [8] M. Zavřel, P. Drábek, T. Košan, CAN transceiver modul pro MLC interference, Výzkumná zpráva, FEL/KEV, no.: XXXXXX, ZČU 2019.

Seznam obrázků

Obr. 1 Blokové schéma nabíjení akumulátoru systémem WPT	6
Obr. 2 – Použitý akumulátor (vlevo – celý akumulátor, vpravo – část balancéru a battery managementu)	7
Tab. I – základní parametry akumulátoru	7
Obr. 3 Změřené nabíjecí charakteristiky akumulátoru ($I_{\max} = 8 \text{ A}$)	8
Obr. 4 Simulace nabíjecích charakteristik akumulátoru ($I_{\max} = 10 \text{ A}$)	9
Obr. 5 Silové schéma snižujícího DC/DC měniče	9
Obr. 6 Řídící struktura nabíjení baterie – snižovacího DC/DC měniče	11
Obr. 7 Výstup simulace snižovacího DC/DC měniče	11
Obr. 8 Řídící struktura dodávaného výkonu – DC zdroje	12
Tab. II Struktura zpráv na CAN (baterie)	13
Obr. 9 – Modul CAN transceiveru pro MLC interference	14
Obr. 10 – Struktura uložení dat z CAN sběrnice (baterie)	14
Obr. 11 Záznam nabíjení baterie	15

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	12.2018	M. Zavřel