

Alternativní topologie usměrňovače pro systémy WPT s nízkou ekvivalentní zátěží – laboratorní ověření

Pracoviště: FEL/RICE
Číslo dokumentu: 22190-009-2022
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: M. Zavřel, V. Kindl, M. Tyrpekl
Vedoucí projektu: Z. Peroutka
Počet stran: 36
Datum vydání: 12.4.2022
Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering,
Information engineering - Electrical and electronic
engineering

Zadavatel / zákazník:
Interní výzkum

Zpracovatel / dodavatel:
Západočeská univerzita v Plzni
Research and Innovation Centre
for Electrical Engineering
Univerzitní 8
306 14 Plzeň
Kontaktní osoba:
Ing. Martin Zavřel
zavrelm@fel.zcu.cz

Tento příspěvek vznikl s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu OP VVV Elektrotechnické technologie s vysokým podílem vestavěné inteligence, číslo CZ.02.1.01/0.0/0.0/18_069/0009855 a za podpory projektu SGS-2021-021 Výzkum a vývoj perspektivních technologií v elektrických pohonech a strojích IV.

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá laboratorním ověřením alternativních topologií usměřovače on-board strany bezdrátového přenosu elektrické energie pro potřeby bezdrátových nabíjecích stanic baterií. Zpráva uvádí teoretické poznatky, jejich simulační interpretaci a měření na laboratorní sestavě. Získané výsledky jsou posléze diskutovány s cílem stanovit nejvhodnější variantu pro uvedenou aplikaci a její odnože.

Klíčová slova

Bezdrátová nabíjecí stanice, Bezdrátový přenos elektrické energie, usměřovač, impedanční přizpůsobení, baterie

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Rectifier Alternative Topologies for WPT with low equivalent load – laboratory verification

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report deals with laboratory verification of alternative on-board rectifier topologies for WPT with low equivalent load – especially for battery wireless charging stations. Research report presents theoretical background, its simulation interpretation and measurements on laboratory setup. The obtained results are also discussed in order to determine the most suitable variant for the mentioned application and its offshoots.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Wireless power charging station, Wireless power transfer, rectifier, impedance matching, battery

Seznam symbolů a zkratk

WPT	wireless power charging
Utype	napěťový typ odvozeného usměrňovače
Itype	proudový typ odvozeného usměrňovače DCDC
SOC	state of charge baterie
USM	usměrňovač

Obsah

1	ÚVOD	5
2	TEORETICKÉ POZNATKY	6
2.1	VAZEBNÉ ELEMENTY	7
2.2	DIODOVÝ USMĚRŇOVAČ.....	8
2.3	DIODOVÝ USMĚRŇOVAČ V KOMBINACI S PULZNÍM MĚNIČEM ODPORU	8
2.4	PŘIPOJENÍ PŘES I_{TYPE} USM	9
2.5	PŘIPOJENÍ PŘES U_{TYPE} USM.....	9
3	SIMULACE	10
3.1	SIMULACE V SKM	11
3.2	IMPEDANČNÍ PŘEVOD JEDNOTLIVÝCH VARIANT	13
3.3	SIMULACE V ČASOVÉ OBLASTI	14
4	MĚŘÍCÍ STANOVISŤE	20
5	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ	21
5.1	VÝKONOVÉ MAPY A MAPY PROUDU ZÁTĚŽE	21
5.2	ČASOVÉ PRŮBĚHY	25
5.2.1	<i>Vliv proměnné zátěže na časové průběhy</i>	29
5.3	TESTY PŘI NABÍJENÍ BATERIE	30
6	ZÁVĚR	34

1 Úvod

Současný rozvoj technologií založených na napájení z baterií vyžaduje adekvátní rozvoj systémů pro jejich nabíjení. Zde se krom běžných kabelových nabíječek objevují také bezdrátové nabíječky.

Rozsah aplikací je velmi různorodý. Od malé spotřební elektroniky přes ruční bateriové nářadí až po prostředky osobní i hromadné elektro mobility. Speciální oblastí jsou trvale napájená zařízení, jako jsou například měřicí a diagnostické systémy rotujících částí strojů či mikro obráběcí systémy.

Až na specifické výjimky jsou uváděná zařízení charakteru malého ekvivalentního odporu. Správné nastavení, respektive přizpůsobení, zátěžného odporu bezdrátového přenosu elektrické energie je přitom stěžejní pro dosažení optimálních provozních parametrů, především pak účinnosti a výkonu.

Tato zpráva ve zkratce definuje základní vlastnosti bezdrátového přenosu elektrické energie využívající induktivní, rezonanční vazbu v sériově-sériové topologii, která je výhodná pro přenos energie větších výkonů. Oblast spotřební elektroniky tak pozbývá platnost.

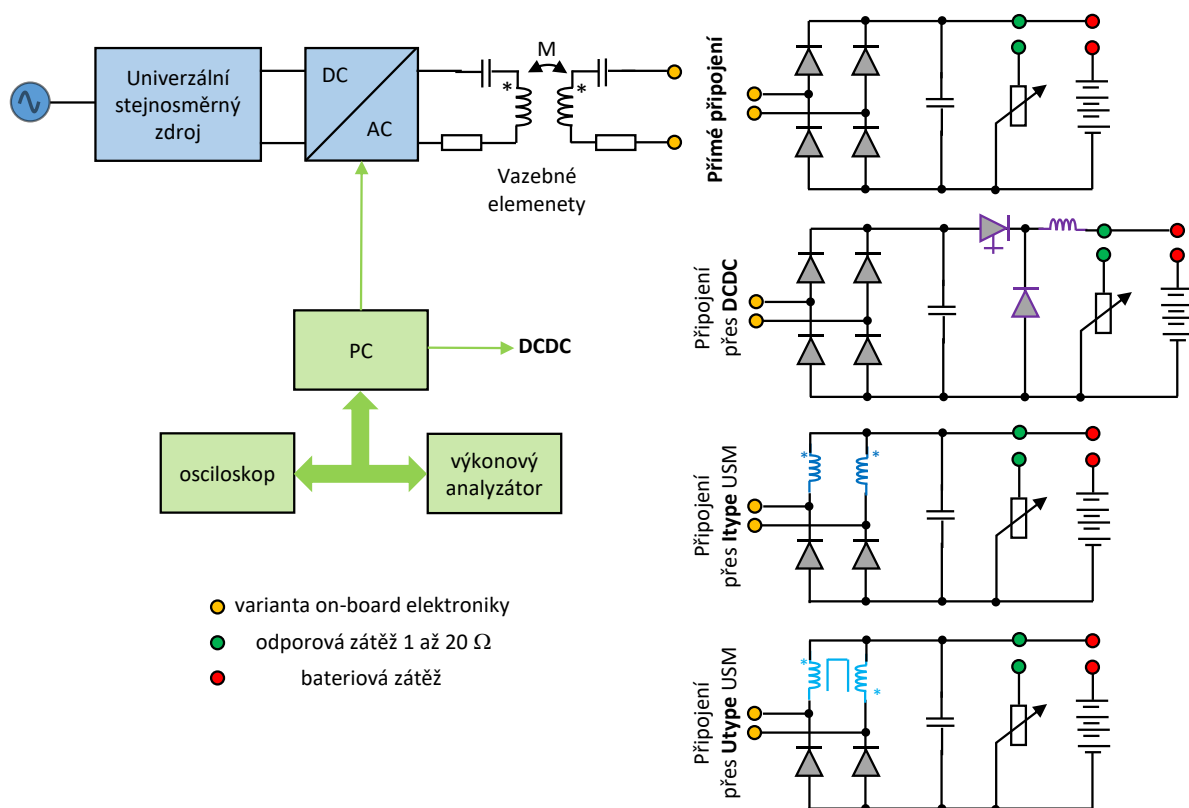
Na základě objasněných vlastností bezdrátového přenosu pak zpráva definuje možnosti propojení se zátěží, které zajistí potřebné impedanční přizpůsobení.

Teoretické poznatky jsou ve zprávě simulačně ověřeny a experimentálně verifikovány.

Hlavní závěry jsou uváděny průběžně v textu a následně shrnuty v závěru zprávy.

2 Teoretické poznatky

Zkoumaný systém je možné ilustrovat pomocí Obr. 1, který zachycuje zdroj bezdrátového přenosu elektrické energie (WPT), střídač WPT, vazebné elementy v sériově-sériové topologii a výkonovou elektroniku on-board části systému. Tato je uvažována ve čtyřech zkoumaných variantách jako přímé připojení zátěže (odporové nebo baterie) přes diodový usměrňovač, nebo přes diodový usměrňovač v kombinaci s pulzním měničem odporu (DCDC), nebo ve speciální topologii usměrňovače s proudovým výstupem (I_{type}), nebo ve speciální topologii usměrňovače s napěťovým výstupem (U_{type}). Celý systém a měření je řízeno z PC. Parametry jednotlivých stěžejních komponent zachycuje Tab. I.



Obr. 1 Schéma zkoumaného systému

2.1 Vazebné elementy

Z teorie vazebných elementů systému bezdrátového přenosu elektrické energie využívající magnetickou rezonanční vazbu v sériově-sériové konfiguraci lze odvodit několik klíčových závěrů. Předně jde o definování optimálního zátěžného odporu (rov. 2, 3) a základního obvodového popisu (rov. 1).

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_1} \int_0^T i_{s1(t)} dt + u_{c1(0)} + L_1 \frac{di_{s1(t)}}{dt} - M \frac{di_{s2(t)}}{dt} + R_1 i_{s1(t)} - u_1(t) &= 0 \\ \frac{1}{C_2} \int_0^T i_{s2(t)} dt - u_{c2(0)} + L_2 \frac{di_{s2(t)}}{dt} - M \frac{di_{s1(t)}}{dt} + R_2 i_{s2} + R_z i_{s2} &= 0 \end{aligned} \quad \text{rov. 1}$$

$$R_{z \eta max} = \sqrt{R^2 + M^2 \omega_0^2} \quad \text{rov. 2}$$

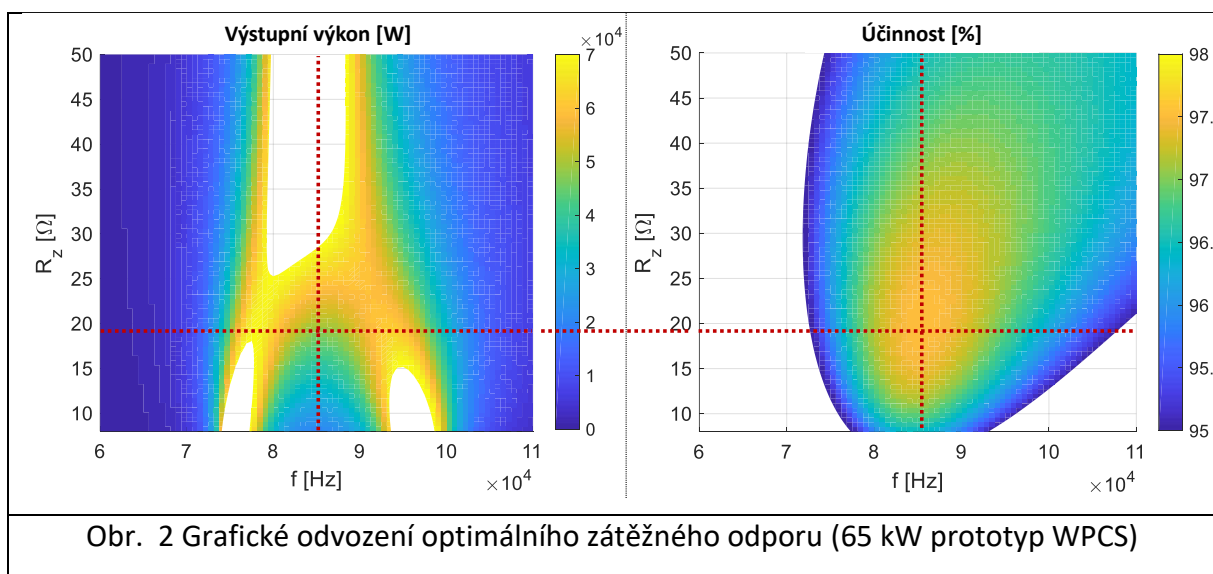
$$R_{z \eta max} = M \omega_0 \Leftrightarrow R = 0 \quad \text{rov. 3}$$

Jelikož jde o rezonanční vazbu, pak musí být splněna rov. 4, jenž definuje rezonanční frekvenci jako pracovní přenosovou. Rov. 5 dále definuje pracovní úhlový kmitočet.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{rov. 4}$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad \text{rov. 5}$$

Grafickou reprezentaci vlivu zátěžného odporu na bezdrátový přenos elektrické energie a současně také grafické stanovení toho optimálního, zachycuje Obr. 2. Jak je z tohoto obrázku zřejmé, pokud není zátěž vazebných elementů impedančně přizpůsobena, pak dochází k poklesu přenosové účinnosti, což je nežádoucí jev, který je třeba minimalizovat.



Jak dále vyplívá z rov. 2, optimální zátěžný odpor je závislý na parazitním odporu obvodu R, tedy v důsledku na tepelných změnách parametrů ESRL a ESRC. Mimo změn R je $R_{z \eta_{max}}$ také závislý na provozním parametru v podobě vzájemné indukčnosti M, která je funkcí činitele vazby mezi vazebnými elementy a tedy na jejich vzájemné poloze (vyosení) a vzdálenosti (přenosové vzdálenosti). Detailnější popis problematiky vazebných elementů zprostředkovává literatura [1].

2.2 Diodový usměrňovač

Uvažovaný diodový usměrňovač pro přímé připojení stejnosměrné zátěže k vazebnému elementu lze z hlediska impedančního převodu popsat rov. 6. Impedanční převod je tedy nezávislý na obvodových parametrech a je dán pouze fyzikálním principem. Pro reálný případ je však rov. 4 neúplná, jelikož nerespektuje statický a dynamický odpor jednotlivých diod. V konečném důsledku bude impedanční převod diodového usměrňovače mírně závislý na obvodových parametrech, což je možné s minimální chybou zanedbat.

Dosažení optimálního provozního stavu WPT je tedy možné pouze změnou návrhu vazebných elementů, nebo změnou odporu stejnosměrné zátěže s cílem splnit podmínku rov. 3.

$$R_{z AC} = \frac{8}{\pi^2} R_{z DC} \cong 0,811 R_{z DC} \quad \text{rov. 6}$$

2.3 Diodový usměrňovač v kombinaci s pulzním měničem odporu

Doplněním diodového usměrňovače o zvyšující pulzní měnič odporu (snižující pulzní měnič napětí) získáme možnost aktivního a plynulého impedančního přizpůsobení zátěže a vazebného elementu. Impedanční převod je pak dán sériovou kombinací převodu usměrňovače (rov. 6) a měniče odporu (rov. 7). Výsledný impedanční přenos této kombinace je dán rov. 8.

$$R_{z DC} = \frac{R_{load eqv}}{z^2} ; z \in \langle 0 ; 1 \rangle \quad \text{rov. 7}$$

Odpor na stejnosměrné straně usměrňovače $R_{z DC}$ je dán velikostí ekvivalentního odporu zátěže $R_{load eqv}$ daným ohmovým zákonem na svorkách zátěže (odpor, baterie, ...) a hodnotou střídy pulzního měniče z.

$$R_{z AC} = \frac{8}{\pi^2 z^2} R_{load eqv} ; z \in \langle 0 ; 1 \rangle \quad \text{rov. 8}$$

Pro správný chod je přitom v platnosti podmínka z rov. 9, tedy že odpor nemůže být menší nežli odpor zátěže. Druhá podmínka se týká zátěže typu baterie, kdy proud nesmí překročit maximální proud baterie a dále minimální proud nesmí poklesnout pod vlastní hodnotu zvlnění – jak říkají rov. 10 - 11.

$$R_{z DC} \geq R_{load eqv} \quad \text{rov. 9}$$

$$I_{bat} \in \left((I_{bat min} ; I_{bat max CC}) \wedge \left(I_{bat min} ; \frac{U_{bat max}}{R_{eqv}} \right) \right) \quad \text{rov. 10}$$

$$\frac{U_{DC}}{8 n L_{DC} f_{sw DCDC}} \ll I_{bat min} \quad \text{rov. 11}$$

2.4 Připojení přes I_{type} USM

Speciální typ usměrňovače s proudovým výstupem je vyobrazen na Obr. 1. Jeho topologie nahrazuje horní diody H-můstkového zapojení nevázanými indukčnostmi, jejichž velikost je shodná a přesně dána rov. 12. Jak je tedy zřejmé, velikost indukčností I_{type} USM je závislá na velikosti zátěže a podmínka z rov. 3 je tak splněna pouze pro jednu konkrétní zátěž, na níž je L_{I_USM} a vazebné elementy navrženy.

$$L_{I_USM} = \frac{R_{load\ eqv}}{\omega_0} \frac{(\pi - 1)}{\pi} ; \quad \text{rov. 12}$$

Impedanční převod I_{type} USM je dán rov. 13, ze které vyplívá jednoznačná zvyšovací funkce impedance.

$$R_{z\ AC} = \frac{\pi^2}{2} R_{load\ eqv} \cong 4,93 R_{load\ eqv} \quad \text{rov. 13}$$

2.5 Připojení přes U_{type} USM

Druhá varianta speciálního typu usměrňovače, tentokrát s napěťovým výstupem. Tato varianta nahrazuje horní diody H-můstkového zapojení magneticky vázanými indukčnostmi v zapojení „common mode“ dle Obr. 1. Na rozdíl od I_{type} USM je velikost indukčností volitelná ve velkém rozsahu hodnot. L_{U_USM} je omezena minimální hodnotou tak, aby při uvažovaných nejnižších proudech zátěží nevznikali přerušované proudy.

Impedanční převod U_{type} USM je dán rov. 15, ze které vyplívá jednoznačná zvyšovací funkce impedance, avšak přibližně poloviční oproti U_{type} USM.

$$R_{z\ AC} \approx \frac{32}{\pi^2} R_{load\ eqv} \approx 3,24 R_{load\ eqv} \quad \text{rov. 14}$$

3 Simulace

Pomocí uvedených vztahů v kapitole 2 je možné sestavit numerický model jednotlivých zapojení z Obr. 1, který je založený na SKM, do jejíž podoby jsou uvedené vztahy upraveny. Takovouto interpretaci získáme rychlou a velmi přesnou představu o chování bezdrátového přenosu elektrické energie ve spojení se zkoumanými variantami on-board výkonové elektroniky. Simulace v SKM je také důležitá z pohledu verifikace výsledků měření, neboť obrázky tohoto charakteru jsou jím získávány.

Druhou část simulací tvoří simulace v časové oblasti, která je sestavena v prostředí Simulink a Plecs. Simulace samotná je velmi jednoduše pojatá, zaměřená čistě na sledované obvodové veličiny. Simulace v časové oblasti zprostředkovává detailní pohled na obvodové veličiny jak bezdrátového přenosu elektrické energie, tak na obvodové veličiny on-board výkonové elektroniky. Tento simulační přístup je důležitý především z pohledu ověření fyzikální korektnosti jednotlivých topologií a z pohledu elektrického dimenzování výkonových součástek (obecně celého obvodu).

Aby bylo možné k simulacím korektně přistoupit, je nutné definovat vazebné elementy, proměnnou zátěž a finální bateriovou zátěž (vlivem nabíjecího procesu taktéž proměnného charakteru). Tab. I zachycuje krom uvedených parametrů také návrhové parametry jednotlivých typů připojení zátěže k přijímacímu vazebnému elementu. Tyto návrhové parametry jsou dány dříve uvedenými vztahy.

Tab. I Testovaná sestava a její varianty

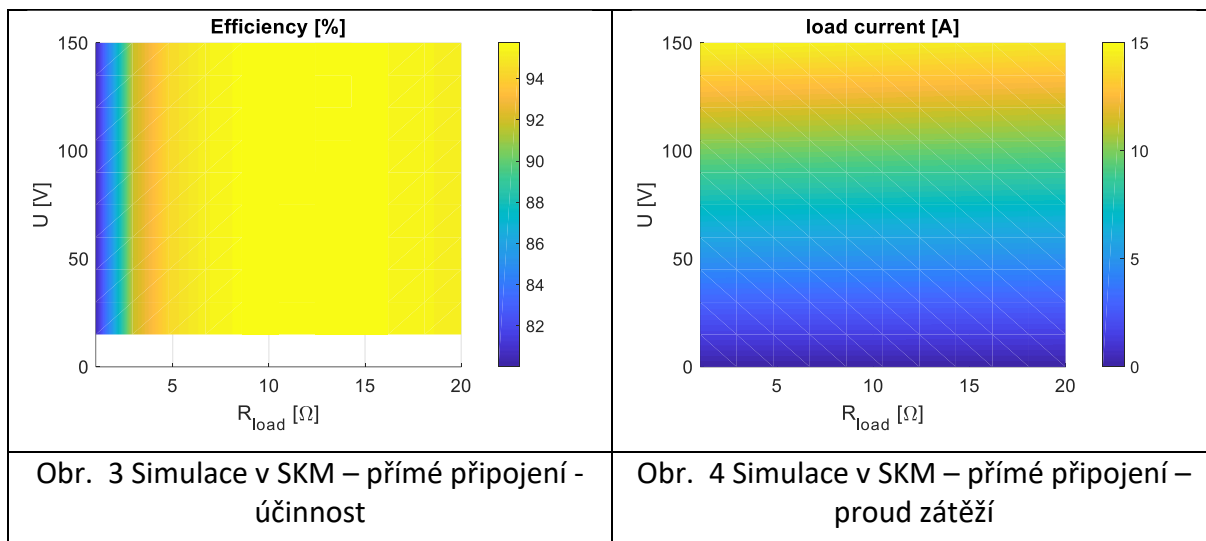
Vazebné elementy	L	23 μ H
	C	3,3 nF
Proměnná zátěž	R _{trim}	0 – 20 Ω
Baterie	U _{min}	
	U _{max}	
	C _{bat}	
Battery management	pasivní	Ano
	aktivní	Ano
	kombinační	ano
On-board elektronika	diodový USM (usměrňovač)	H-bridge SiC
	diodový USM + SD DCDC	L _{DCDC} = 100 μ H
	I _{type} USM	2*L 100 μ H, SiC
	U _{type} USM	CMM = 900 μ H , SiC
Off-board elektronika	střídač	H-bridge SiC
	zdroj	univerzální

3.1 Simulace v SKM

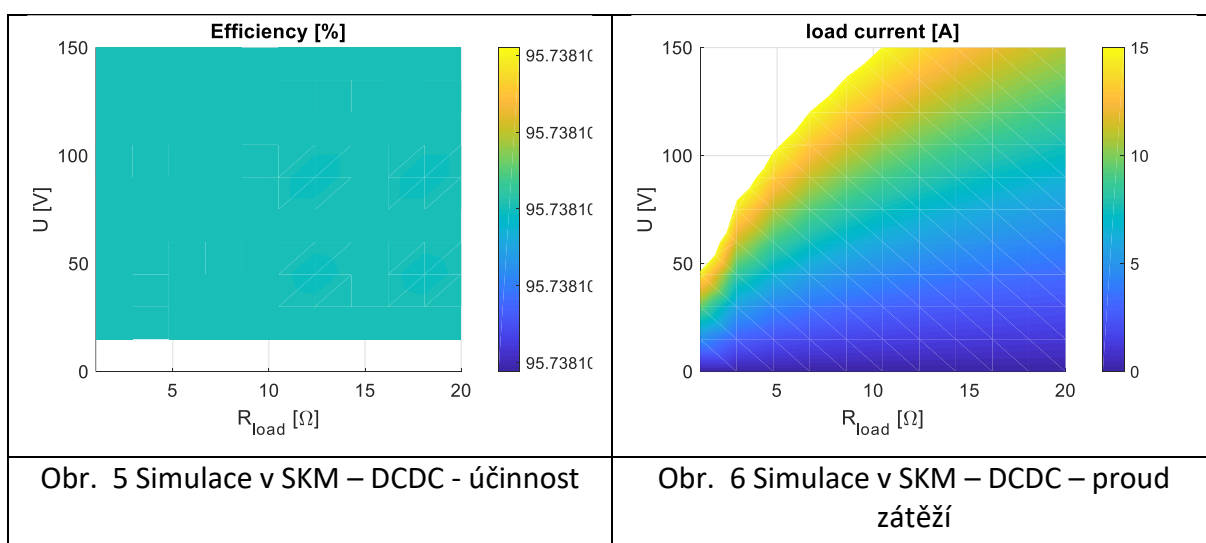
Obr. 3 zachycuje účinností (osa Z) mapu bezdrátového přenosu elektrické energie pro případ přímého připojení proměnné zátěže přes diodový usměrňovač (osa X) při různých přenosových výkonech / napájecích napětích (osa Y).

Následující Obr. 4 je pak obdobou Obr. 3 s rozdílem ve sledované veličině, kterou zde tvoří proud proměnnou zátěží (osa Z).

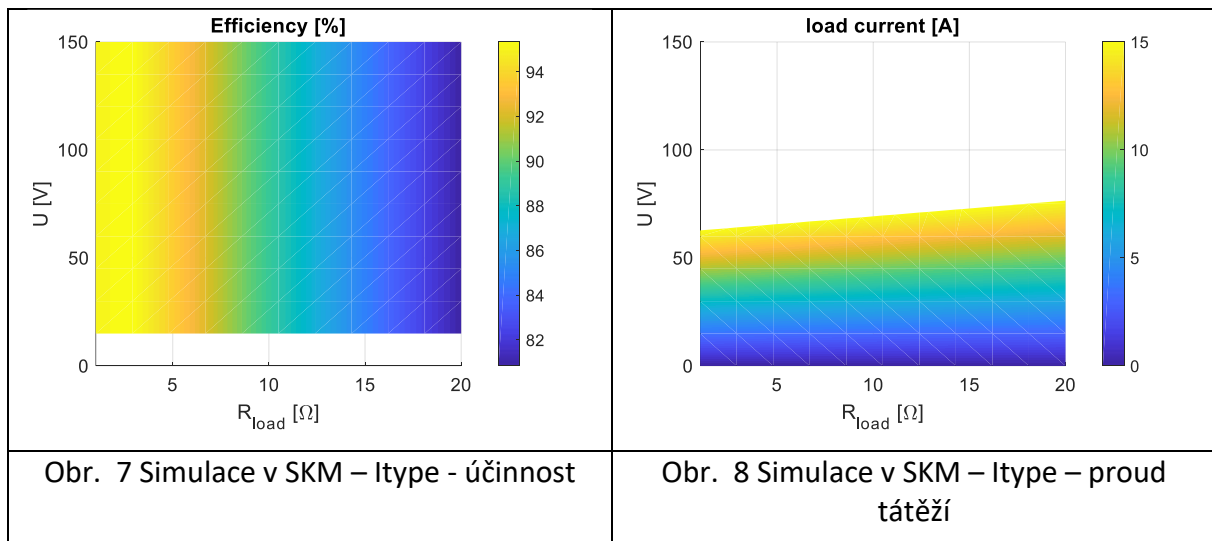
Závěrem ze sledovaných veličin je ověření rov. 1 – 6 a grafické znázornění závislosti přenosové účinnosti a proudu zátěže při přímém připojení proměnné zátěže přes usměrňovač na přijímací vazebný element.



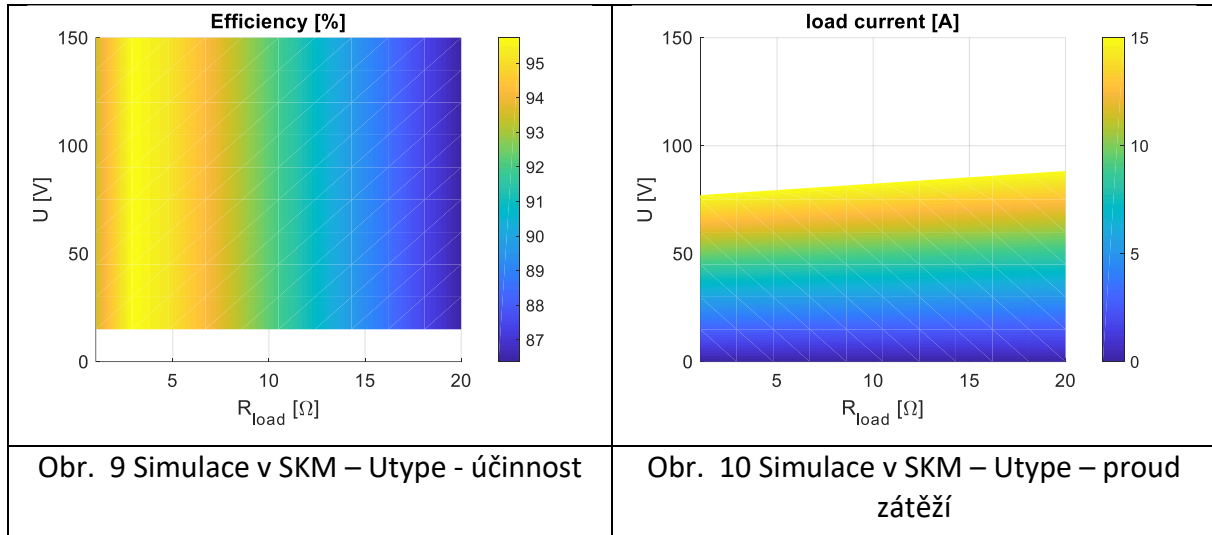
Obr. 5 a Obr. 6 zachycuje pro variantu s DCDC měničem stejné závislosti jako tomu je v předchozím případě. S ohledem na platnost rov. 1 – 5 je tak ověřena správnost rov. 7 – 11. Dále je z Obr. 5 – 6 zřejmé grafické znázornění závislosti sledovaných veličin na proměnné zátěži.



Obr. 7 a Obr. 8 zachycuje pro variantu s proudovým typem speciálního usměrňovače (I_{type}) stejné závislosti jako tomu je v předchozích případech. S ohledem na platnost rov. 1 – 5 je tak ověřena správnost rov. 12 – 13. Dále je z Obr. 7 – 8 zřejmé grafické znázornění závislosti sledovaných veličin na proměnné zátěži.

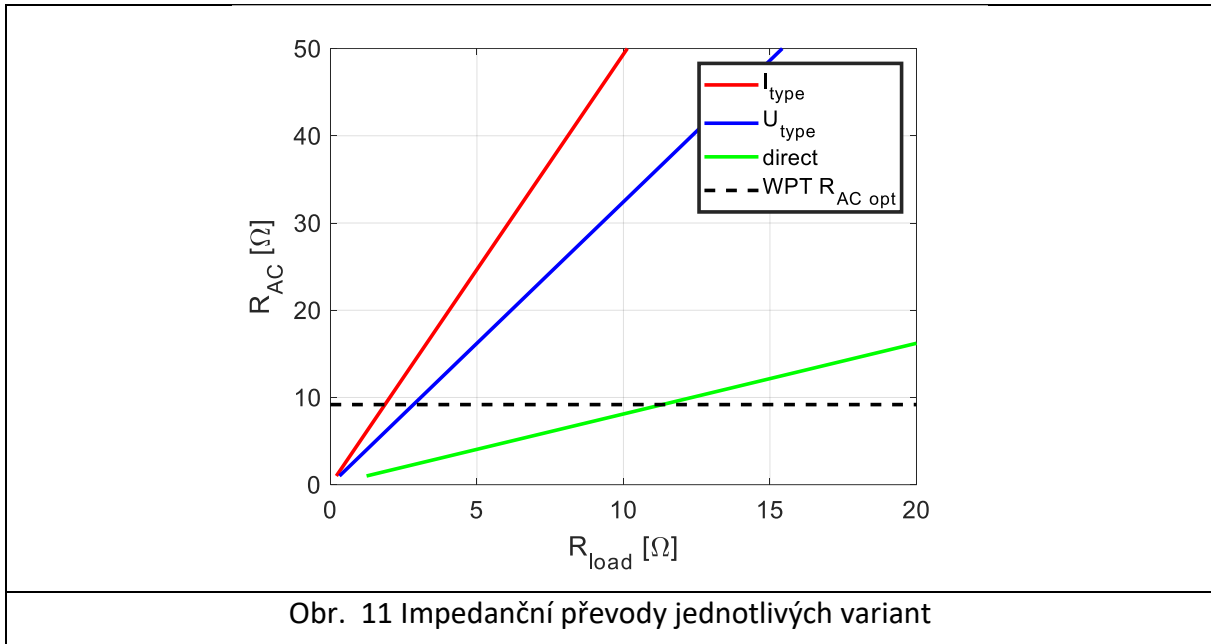


Obr. 9 a Obr. 10 zachycuje pro variantu s napěťovým typem speciálního usměrňovače (U_{type}) stejné závislosti jako tomu je v předchozích případech. S ohledem na platnost rov. 1 – 5 je tak ověřena správnost rov. 14 – 15. Dále je z Obr. 9 – 10 zřejmé grafické znázornění závislosti sledovaných veličin na proměnné zátěži.



3.2 Impedanční převod jednotlivých variant

Z rov. 6 – 15 vyplívá specifický impedanční převod každé varianty obvodu vůči požadované velikosti optimální zátěže z rov. 3 ($9,2 \Omega_{AC}$). Takovéto impedanční převody lze vyobrazit pomocí Obr. 11 a porovnat je s požadovanou hodnotou danou právě rov. 3. Význam jednotlivých průběhů na Obr. 11 je zřejmý z legendy a to až na převod varianty s DCDC měničem, která je, díky aktivnímu přizpůsobení, právě vždy shodná s WPT $R_{AC\ opt}$ při splnění podmínky $R_{load} < R_{AC\ opt}$.



Touto cestou je možné ověřit simulační výsledky z Obr. 3, 5, 7, 9 a zanést toto ověření do tabulky (Tab. II), z níž je vidět prakticky dokonalá shoda.

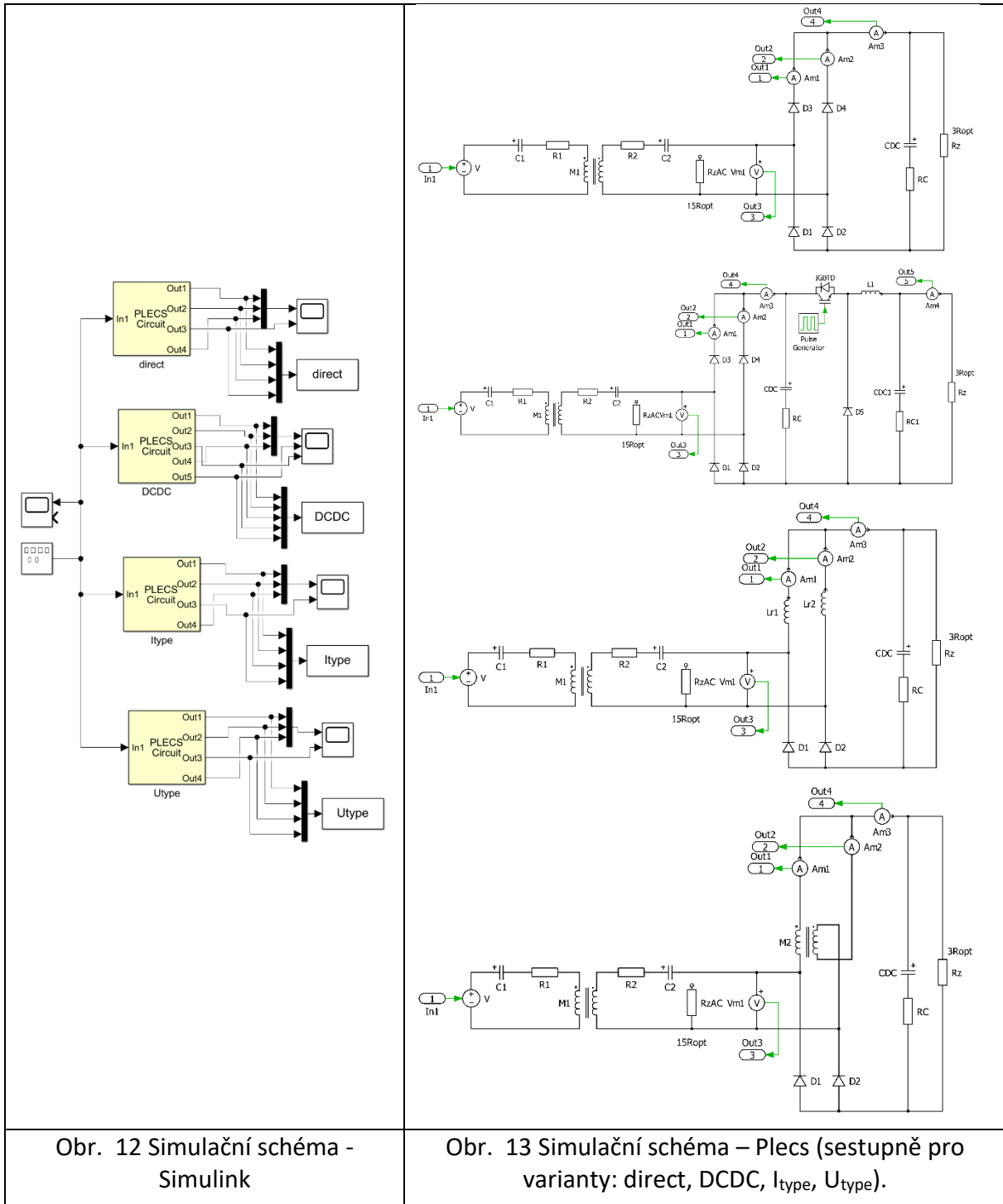
Tab. II porovnání zjištěných optimálních $R_{load\ opt}$

Varianta	$R_{load\ opt}$ Obr. 11	$R_{load\ opt}$ SKM	η at $R_{load\ opt}$ SKM
Direct	11,5	$\approx 11,5$	$\approx 95,7$
DCDC	---	---	$\approx 95,7$
I_{type}	1,8	$\approx 1,8$	$\approx 95,7$
U_{type}	2,8	$\approx 2,8$	$\approx 95,7$

3.3 Simulace v časové oblasti

Aby bylo možné přistoupit k realizaci prototypu a výsledky z experimentálního ověřování patřičně verifikovat, je nutné vytvořit model jednotlivých variant v časové oblasti. Tento je uveden na Obr. 12 – 13.

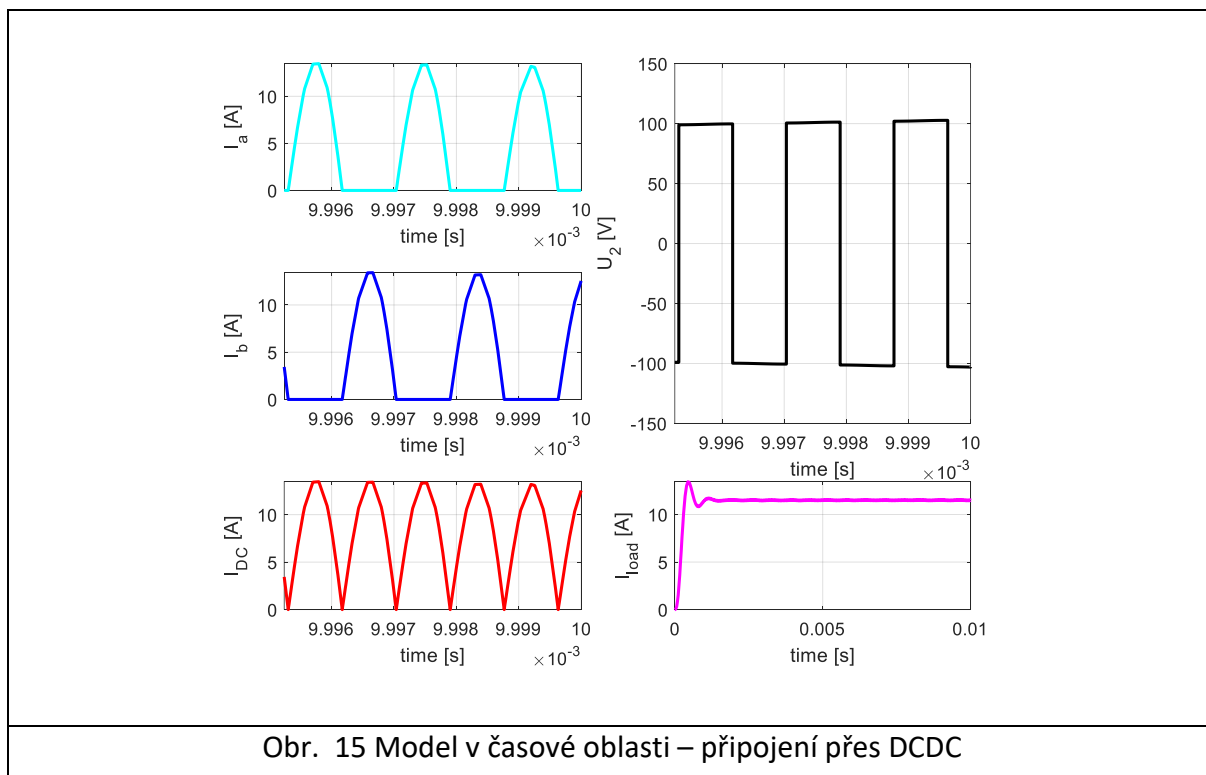
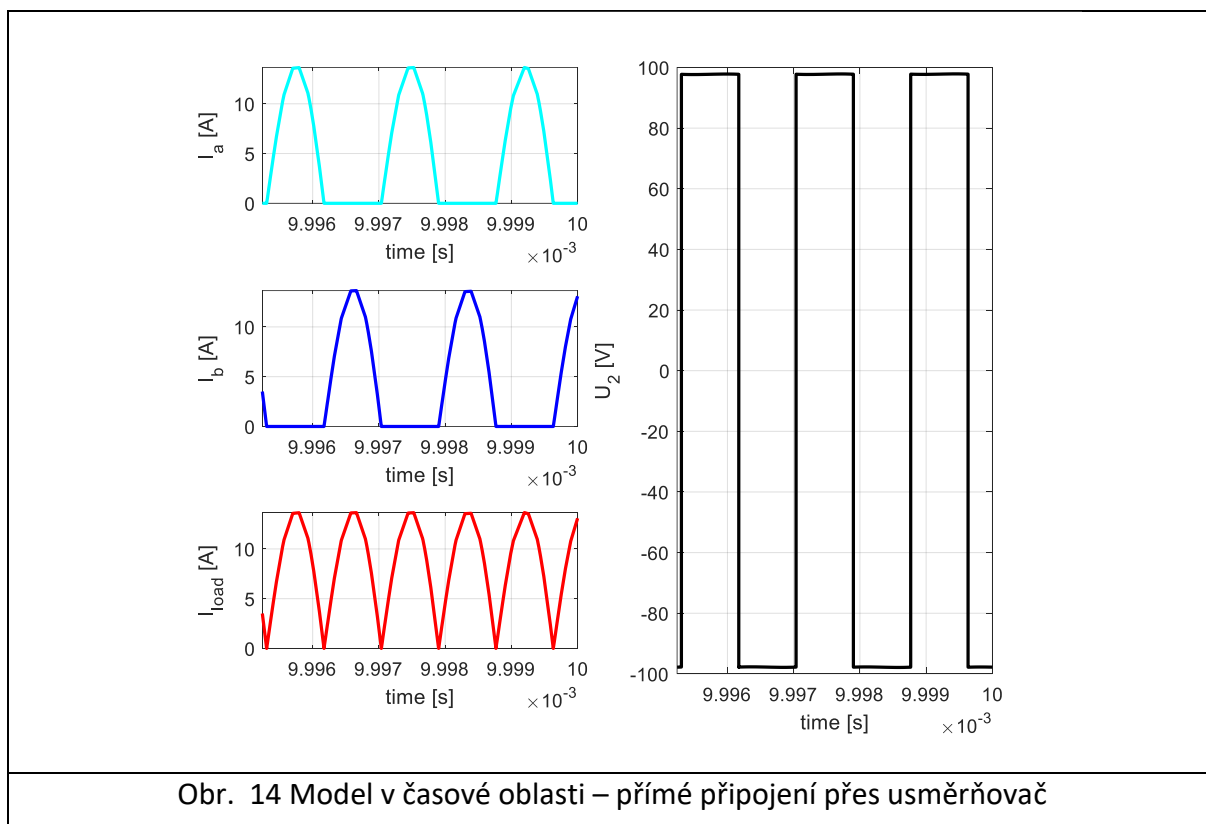
Veškeré parametry jsou uvedeny v Tab. I až na případ vzájemné indukčnosti common-mode induktoru U_{type} varianty, kdy je třeba volit induktory s velmi těsnou vazbou ($k \rightarrow 1$), neboť právě ta přetváří I_{type} na U_{type} (viz Obr. 19).

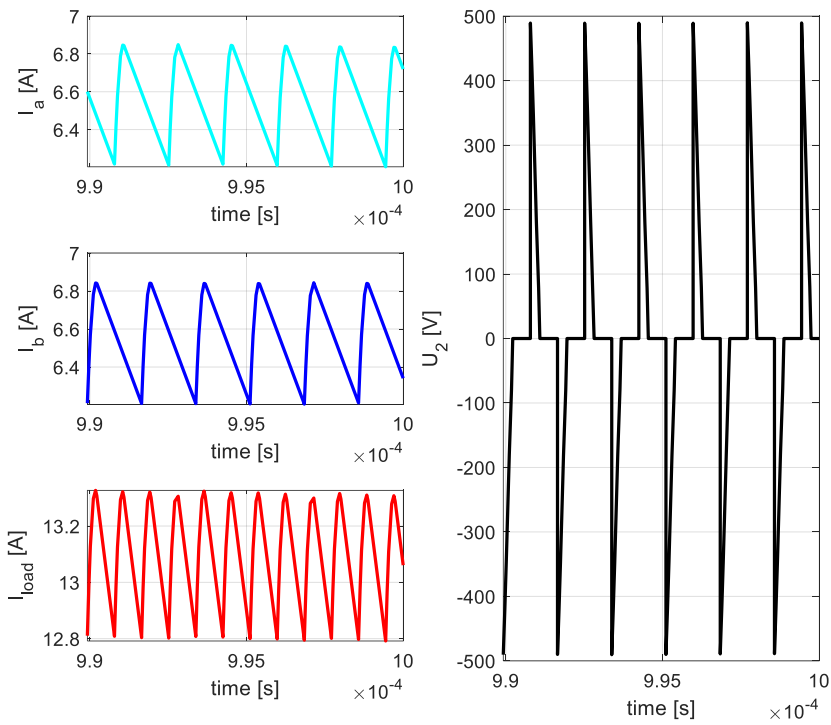


Obr. 12 Simulační schéma - Simulink

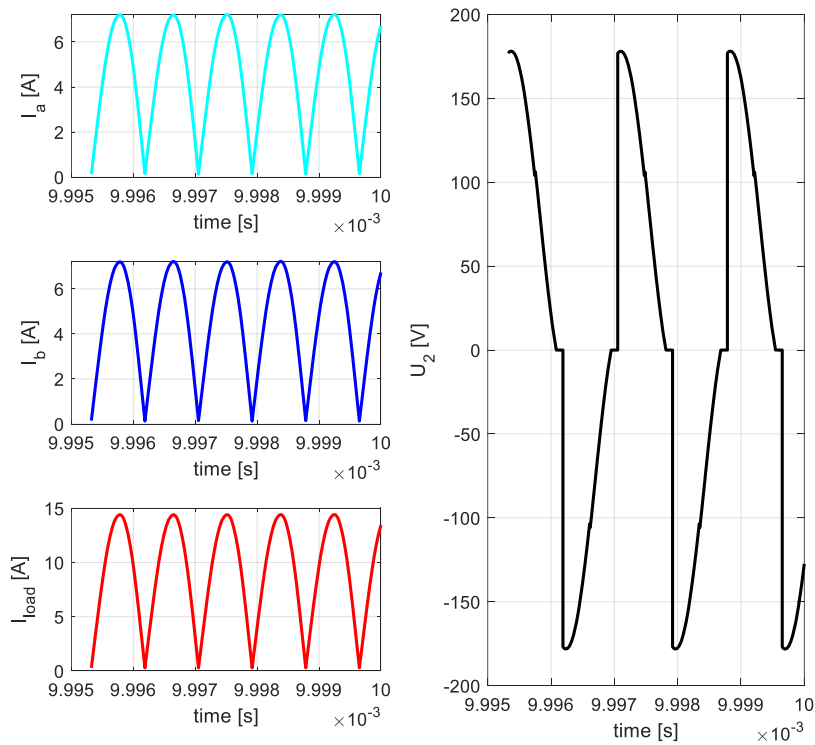
Obr. 13 Simulační schéma – Plecs (sestupně pro varianty: direct, DCDC, I_{type} , U_{type}).

Průběhy na následujících Obr. 14 – 17 jsou výsledkem simulace pro $R_{load} = R_{load\ opt}$ a reprezentují: I_a a I_b - proudy jednotlivými větvemi usměrňovače, I_{load} - proud zátěže, I_{DCDC} - proud z usměrňovače do DCDC měniče a U_2 - napětí na svorkách přijímacího vazebného elementu.





Obr. 16 Model v časové oblasti – I_{type}



Obr. 17 Model v časové oblasti – U_{type}

V případě přímého připojení zátěže (Obr. 14) jsou prezentované průběhy zcela ideální. Proudů I_a a I_b se doplňují do pulznosti proudu I_{load} . Napětí U_2 je obdélníkového charakteru, dané diodovým usměrňovačem a kapacitou na stejnosměrné straně. Současně zde pro prezentovaný případ $R_{load} = R_{load\ opt}$ platí $U_{1m} = U_{2m}$ a $I_{1m} = I_{2m}$.

V případě připojení zátěže přes kombinaci diodového usměrňovače a DCDC měniče v režimu pulzního měniče pro zvyšování odporu (Obr. 15) jsou prezentované průběhy opět zcela ideální ($R_{load} = 6,37\ \Omega$, $duty-cycle = 0,75$).

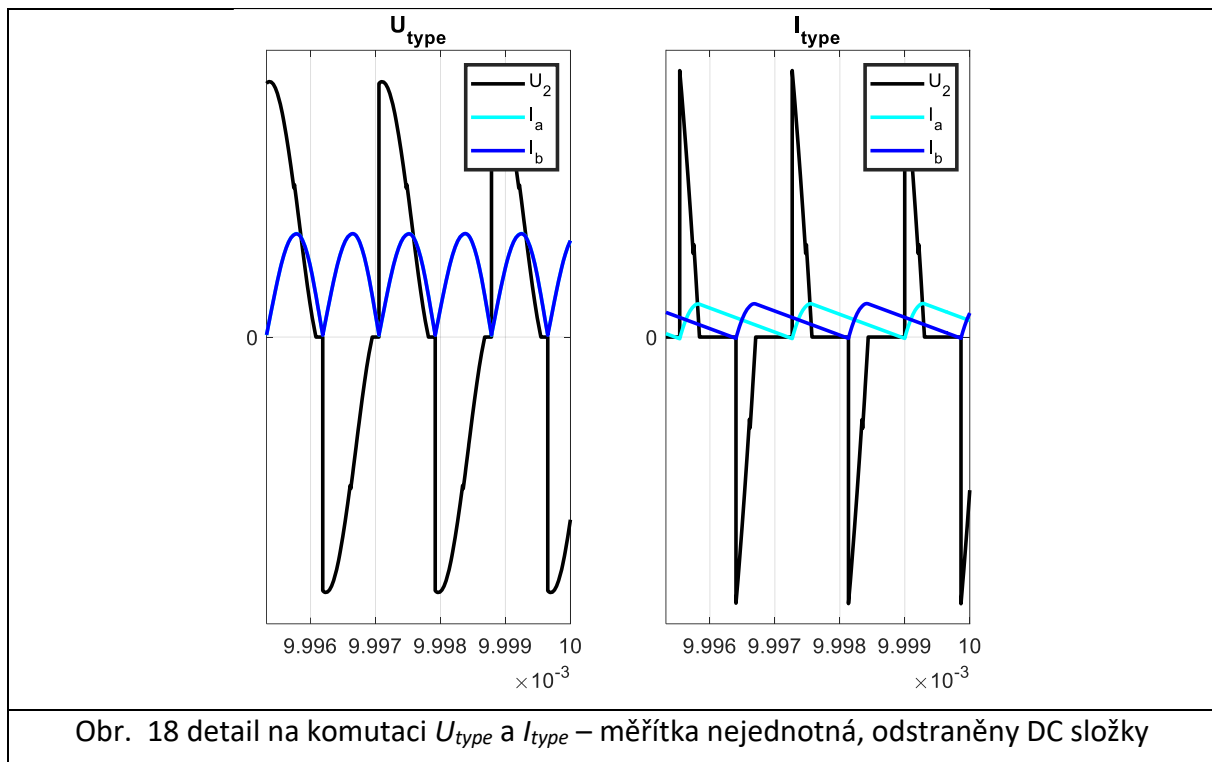
V případě varianty s L_{type} usměrňovačem je patrný posuv 90° mezi proudy I_a a I_b , které se po sečtení doplňují do proudu I_{load} . Míra zvlnění proudů je dána velikostí induktorů usměrňovače, jak dále ilustruje Obr. 19. Vzhledem k trojúhelníkovému charakteru odebíraného proudu lze očekávat velmi nepříznivý průběh napětí na vazebných elementech, které se v sériově-sériové konfiguraci chovají jako velmi tvrdý zdroj proudu. V okamžiku komutace diod dochází k extrémně rychlému nárůstu napětí a jeho pozvolnému klesání během nárůstu proudu indukčnostími k hodnotě I_{load} . Po odeznění tohoto přechodného (Obr. 18) děje je napětí U_2 prakticky nulové. Amplituda pulzu U_2 je dána rov. 16.

V případě varianty s U_{type} usměrňovačem je patrný posuv 0° mezi proudy I_a a I_b , které se po sečtení doplňují do proudu I_{load} . Tento navíc nevykazuje stejnosměrný offset. V závislosti na kvalitě (činiteli vazby) common-mode induktoru jsou proudy půlvlnného charakteru, což má pozitivní dopad na průběh napětí U_2 . V okamžiku komutace dochází k nárůstu napětí a zvyšování proudu induktorem. Po dosažení hodnoty $I_{load\ ef}$ začíná U_2 volně klesat v trendu I_{load} (Obr. 18). Amplituda pulzu U_2 je dána rov. 17.

$$U_{2m} = L \frac{I_{2rms}}{tc} = L \frac{\frac{I_{load}\pi^2}{2\sqrt{2}}}{L_{itype} R_{load} I_{load}} = L \frac{\frac{I_{load}\pi^2}{2\sqrt{2}}}{\frac{1}{2f_0} \frac{I_{load} R_{load}}{L_{itype}}} = L \frac{\frac{I_{load}\pi^2}{2\sqrt{2}}}{\frac{1}{2f_0}} =$$

$$L \frac{\pi^2 f_0 I_{load}}{2\sqrt{2}} ; \text{ pro daný příklad je } I_{load} \approx 12$$
rov. 15

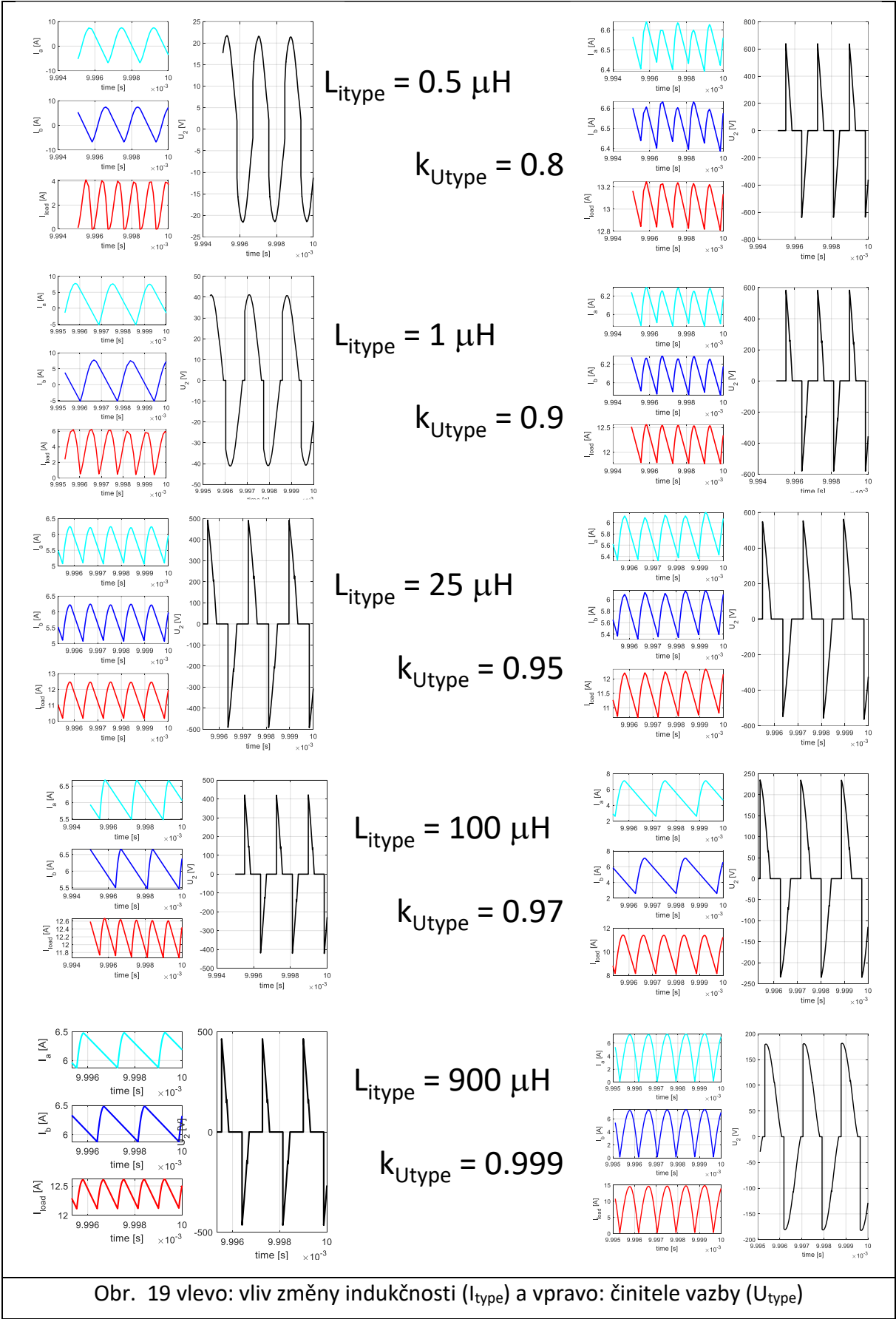
$$U_{2m} = L \frac{I_{2rms}}{tc} = \frac{\frac{I_{load\ m}}{\sqrt{2}}}{\frac{1}{2f_0}} = 2L f_0 I_{load\ m} ; \text{ pro daný případ je } I_{load\ m} \approx 15 \text{ a } k \rightarrow 1$$
rov. 16



Za účelem objasnění vlivu velikosti indukčnosti na I_{type} usměrňovač (Obr. 19 vlevo) a vlivu velikosti činitele vazby na U_{type} usměrňovač (Obr. 19 vpravo) byla provedena patřičná simulační analýza (při neměnných ostatních parametrech) jejíž hlavní závěry jsou:

- Snižování indukčnosti pod výpočtovou hodnotu ($900 \mu\text{H}$) vede na pokles střední hodnoty proudů až do oblasti vzniku okruhových proudů. To má za následek snížení komutačního napětí, avšak také účinnosti a přenositelného výkonu.
- Snižování činitele vazby pod hodnoty 0.97 (u experimentálního přípravku > 0.99) vede na pozvolný přechod od U_{type} usměrňovači k I_{type} usměrňovači. Zpočátku jen roste komutační napětí, které později saturuje a začne rapidně klesat střední hodnota proudů.

Porovnáním rov. 16, 17 a Obr. 19 lze stanovit U_{type} usměrňovač jako vhodnější pro reálnou aplikaci vlivem násobně nižšího přepětí ($\frac{\pi^2}{2}$). Současně je průběh komutačního napětí U_{type} usměrňovače mnohem příznivější z pohledu EMC i samotných diod apod.



Obr. 19 vlevo: vliv změny indukčnosti (L_{type}) a vpravo: činitele vazby (U_{type})


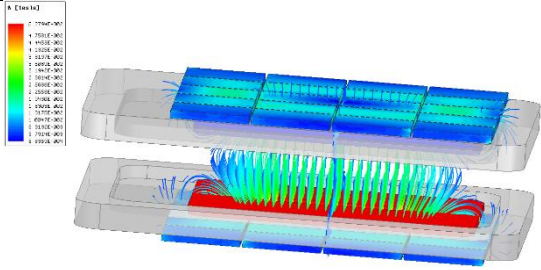


4 Měřící stanoviště

Měřící stanoviště je vybaveno testovanou sestavou dle Tab. I a doplněno o měřící zařízení dle Tab. III. Z výkonového analyzátoru a osciloskopu jsou data ukládána do PC, kde jsou posléze vyhodnocována pomocí Matlab skriptů.

Tab. III Měřící instrumentace

Měřící vybavení	Osciloskop	Tektronix MSO4000
	Výkonový analyzátor	Yokogawa ...

Vazebné elementy bezdrátového přenosu elektrické energie jsou vyobrazeny na Obr. 20. Jejich simulované elektromagnetické pole je ilustrováno pomocí intenzity magnetického pole na Obr. 21 pro případ $I_1 = I_2 = 10$ A. Vazebné elementy jsou začleněny do testované sestavy, kde tvoří především zdroj on-board výkonového řetězce ve čtyřech variantách. Jejich podoba je vyobrazena na fotografiích jako Obr. 22 (usměrňovač + DCDC měnič) a Obr. 23 (přípravek pro U_{type} a I_{type} usměrňovač).

	
<p>Obr. 20 vazebné elementy WPT - fotografie</p>	<p>Obr. 21 vazebné elementy WPT – model magnetické indukce</p>
	
<p>Obr. 22 Testovací sestava – usměrňovač + DCDC</p>	<p>Obr. 23 U_{type} / I_{type} přípravek</p>

5 Experimentální ověření

Výsledky z experimentálního ověření jsou prezentovány třemi způsoby. Předně jsou odměřeny účinnosti mapy a mapy proudu zátěže jako ekvivalent ke kapitole 3.1. Dále je provedeno měření časových průběhů sledovaných obvodových parametrů pro optimální nastavení zátěžného odporu dle kapitoly 2 jako ekvivalent ke kapitole 3.3. Posléze je provedeno měření vlivu proměnného zátěžného odporu na zmíněné časové průběhy.

Cílenou aplikací pro zařízení zkoumané v této zprávě je nabíjení baterií. Výsledky z měření při nabíjení baterie jsou prezentovány v kapitole 5.3.

5.1 Výkonové mapy a mapy proudu zátěže

Následující Obr. 24 – 27 vyobrazují naměřené účinnosti mapy, mapy proudu zátěže a jsou dále doplněny o závislost přenosové účinnosti na proudu zátěží při konstantním, optimálním zátěžném odporu.

Porovnáním klíčových bodů z měření, simulací a výpočtů je možné sestavit Tab. IV, ze které vyplívají následující závěry:

- Jsou potvrzeny teoretické poznatky a simulace
- Reálné účinnosti jsou oproti simulovaným výrazně nižší. To je však dáno jednak neúplnou simulací výkonového řetězce a druhá neoptimalizovaným reálným výkonovým řetězce (jinými slovy, co bylo hotové, použilo se).
- Při porovnání η_{max} a η při $I_{load} = 10$ je situace zcela vyrovnaná pro všechny varianty krom přímého připojení. Zde je třeba provést hodnocení přímo z Obr. 24 – 27.

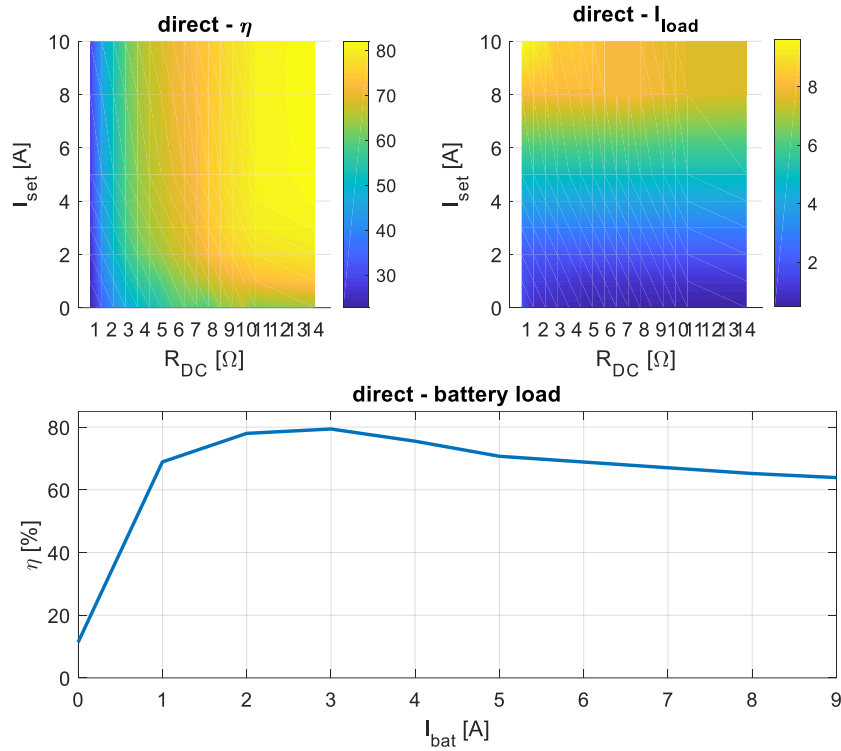
Tab. IV Měřicí instrumentace

Varianta	$R_{load\ opt}$		η_{max}		η při $I_{load} = 10\ A$	
	simulace	měření	simulace	měření	simulace	měření
Přímé připojení	11,5	14	$\approx 95,7$	80	$\approx 95,7$	60
DCDC	---	---	$\approx 95,7$	80	$\approx 95,7$	80
Itype	1,8	2	$\approx 95,7$	≈ 78	$\approx 95,7$	≈ 78
Utype	2,8	7	$\approx 95,7$	≈ 78	$\approx 95,7$	≈ 78

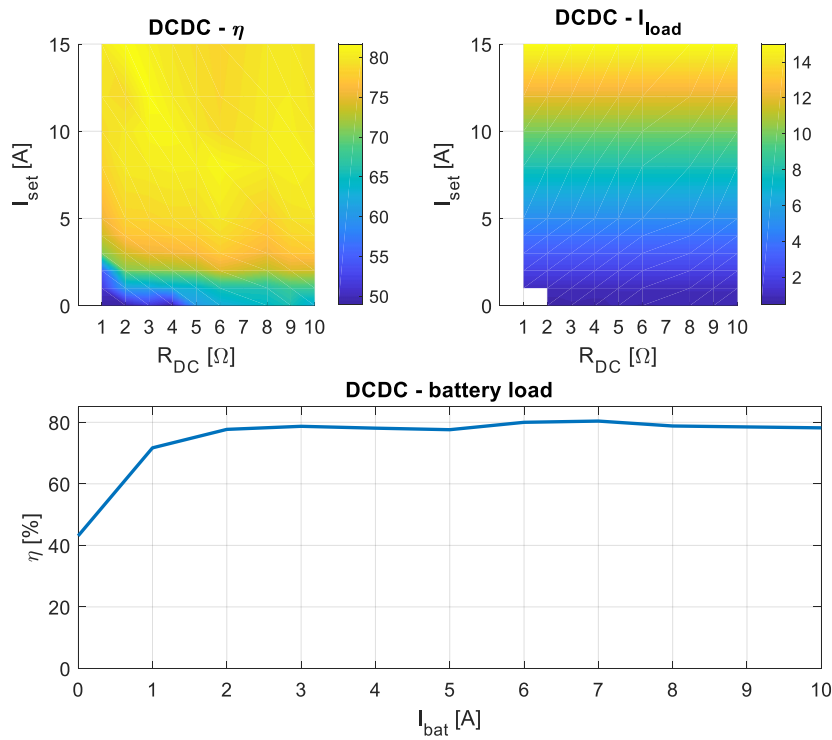
Z přímého porovnání Obr. 24 až 27 vychází jasná závislost přenosové účinnosti na zátěžném odporu takto:

- Přímé připojení zátěže přes usměrňovač k vazebnému elementu je vhodné pouze pro neměnné specifické zátěže, na které jsou vazebné elementy navrženy.
- Varianta využívající DCDC měnič v režimu zvyšujícího měniče odporu jako aktivní přizpůsobení impedance je vhodná pro širokou škálu zátěžných odporů a přenášených výkonů. Omezení zde tvoří pouze velmi malé proudy zátěže.

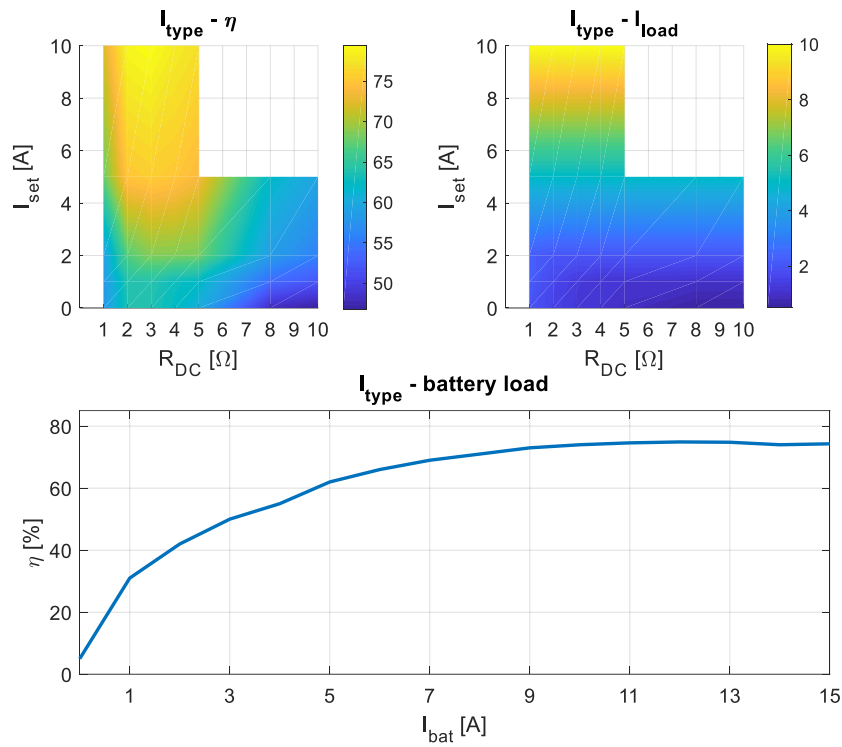
- Varianta s I_{type} usměřovačem je vhodná pro velmi malé zátěžné odpory a vyšší proudy. Oblast efektivního využití je zde velmi úzká a nedovoluje tak prakticky žádnou změnu zátěžného odporu.
- Varianta s U_{type} usměřovačem je vhodná pro vyšší hodnoty zátěžného odporu a středně vysoké proudy, Oblast efektivního využití je zde vcelku široká, především do oblastí vyšších zátěžných odporů, což přináší možnost provozní změny zátěžného odporu.



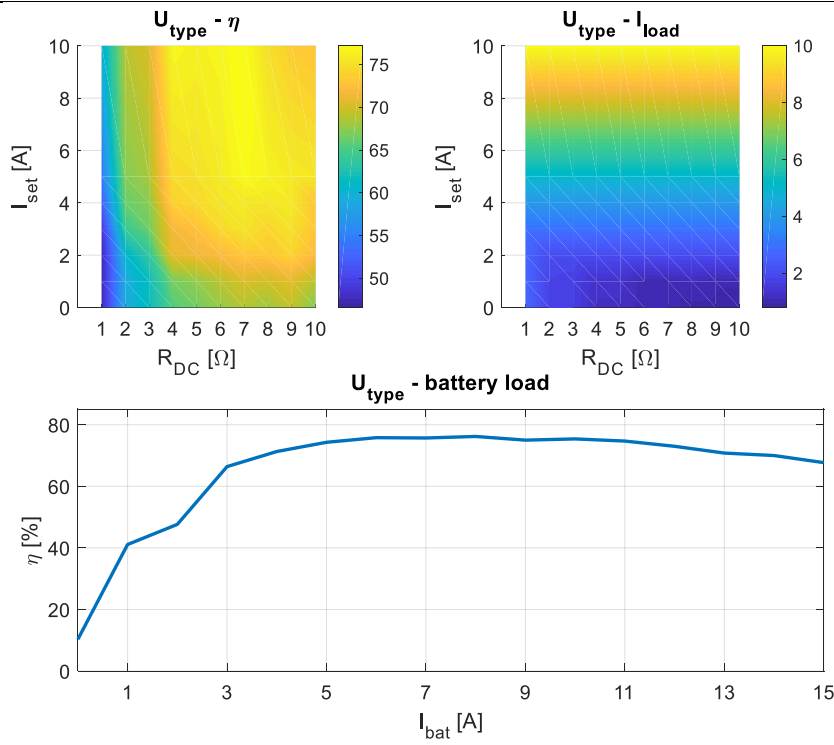
Obr. 24 charakterová mapa – přímé připojení baterie



Obr. 25 charakterová mapa – připojení baterie přes DCDC

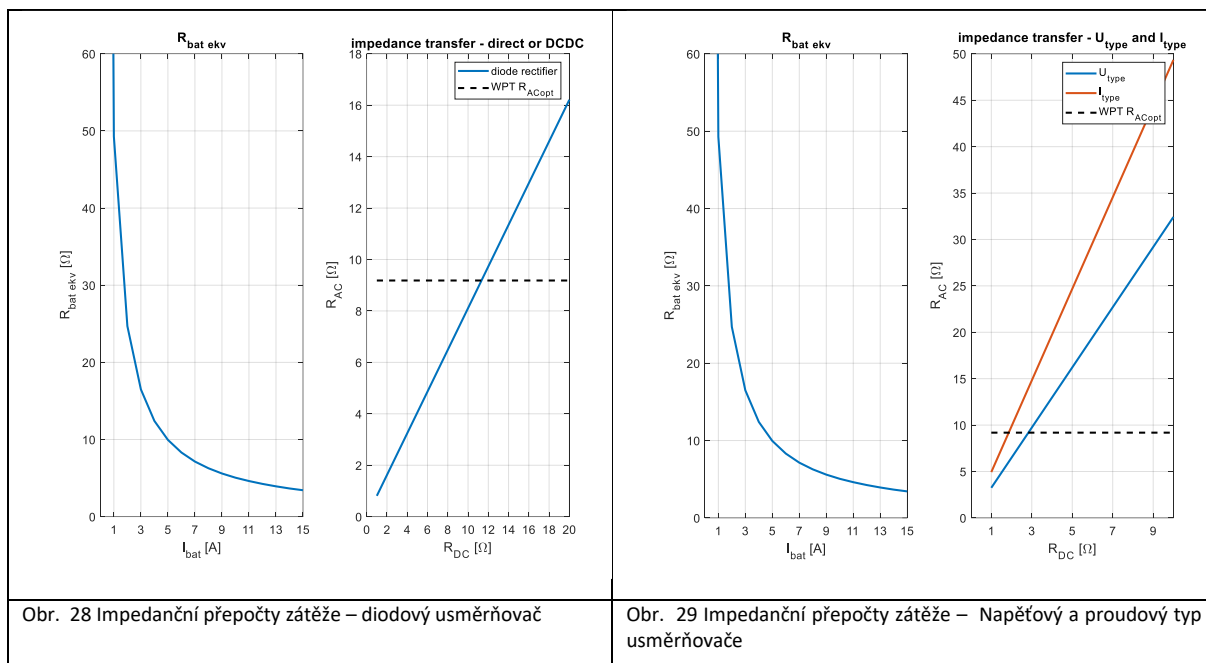


Obr. 26 charakterová mapa – Proudový typ usměrňovače



Obr. 27 charakterová mapa – Napěťový typ usměrňovače

Obrázky 24 – 27 uvádí zátěž jako ohmickou hodnotu, ta je však reálně dána ekvivalentním odporem nabíjené baterie, jejíž charakteristika je uvedena na Obr. 28 a 29 vlevo. Pravá část Obr. 28 zachycuje impedanční převod diodového usměrňovače a pravá část Obr. 29 zachycuje impedanční převod I_{type} a U_{type} usměrňovače.



5.2 Časové průběhy

Časové průběhy sledovaných obvodových veličin jsou důležité pro ověření kapitoly 3.3 a z ní vyplívajících teoretických předpokladů.

Mezi sledované veličiny spadá:

- Napětí na svorkách vysílacího vazebného elementu – světle modrá
- Proud vysílacím vazebným elementem – tmavě modrá
- Napětí na přijímacím vazebném elementu – zelená
- Proud přijímacím vazebným elementem / větví U_{type} a I_{type} usměrňovače

Hlavním cílem je zde ověřit průběhy napětí na přijímacím vazebném elementu a proudu větví usměrňovače při použití varianty I_{type} nebo U_{type} usměrňovače – Tab. V:

Tab. V Hlavní hodnoty sledovaných veličin

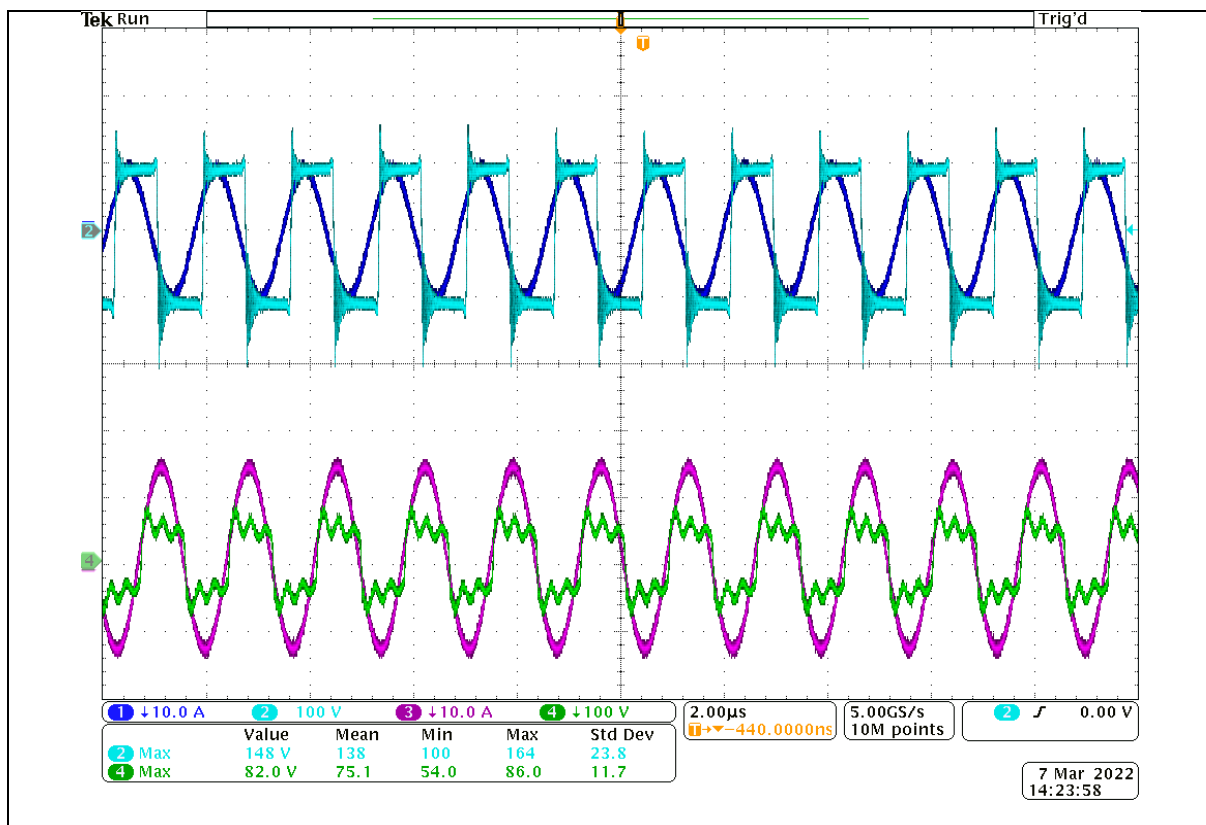
Varianta	U_2 [Vp]		I_a [Ap]	
	simulace	měření	simulace	měření
I_{type}	500	500	6,4	5,5
U_{type}	180	250 (180 bez oscilací)	8	9

Velmi důležité je zde také porovnání napětí a proudů vysílacího vazebného elementu napříč variantami.

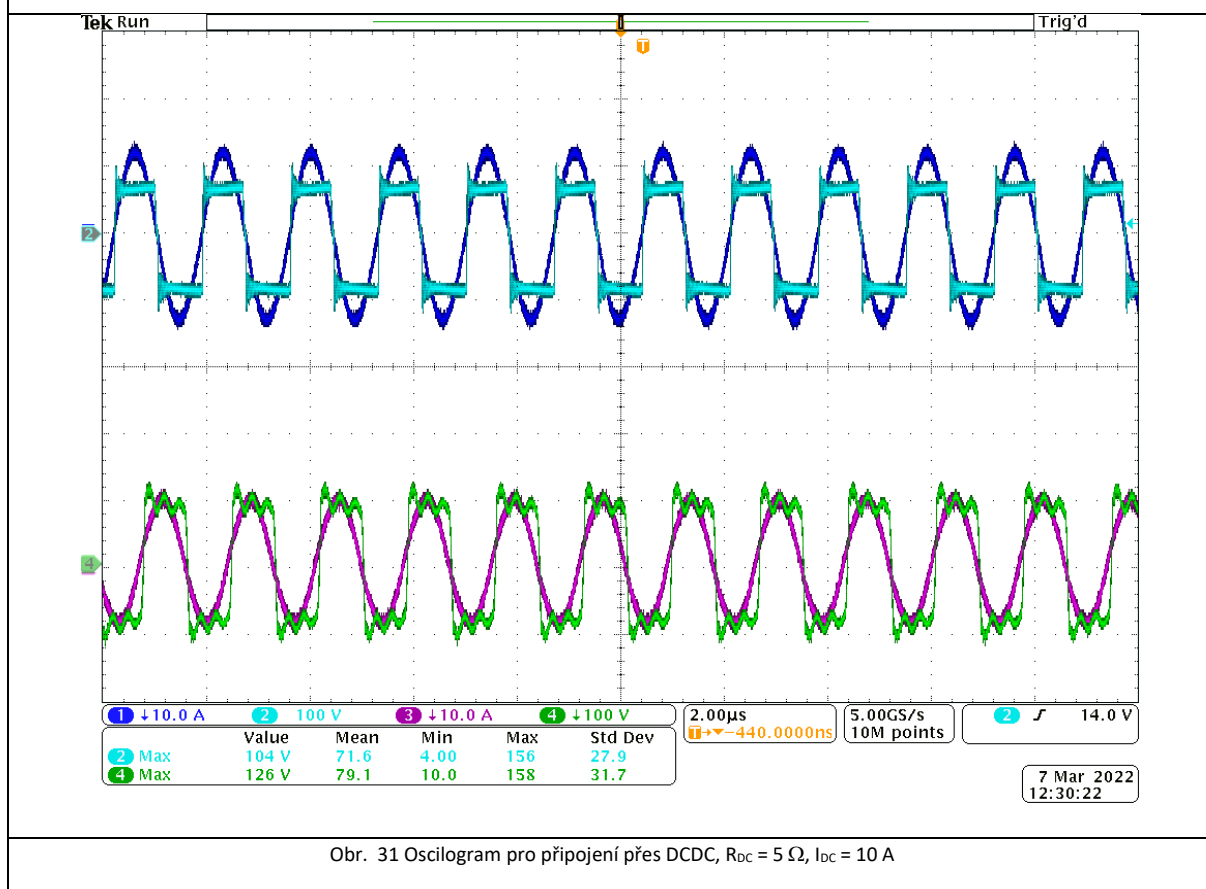
Pokud označíme variantu přímého připojení jako referenční, pak varianta s DCDC měničem výrazně snižuje ztráty na vysílací straně na úkor strany přijímací jako celku, nikoliv jen vazebného elementu.

Oproti variantě s přímým připojením jsou varianty I_{type} a U_{type} usměrňovače vhodné pro přesun ztrát na vysílací stranu ve prospěch strany přijímací a to jak v samotném vazebném elementu, tak celé přijímací elektronice.

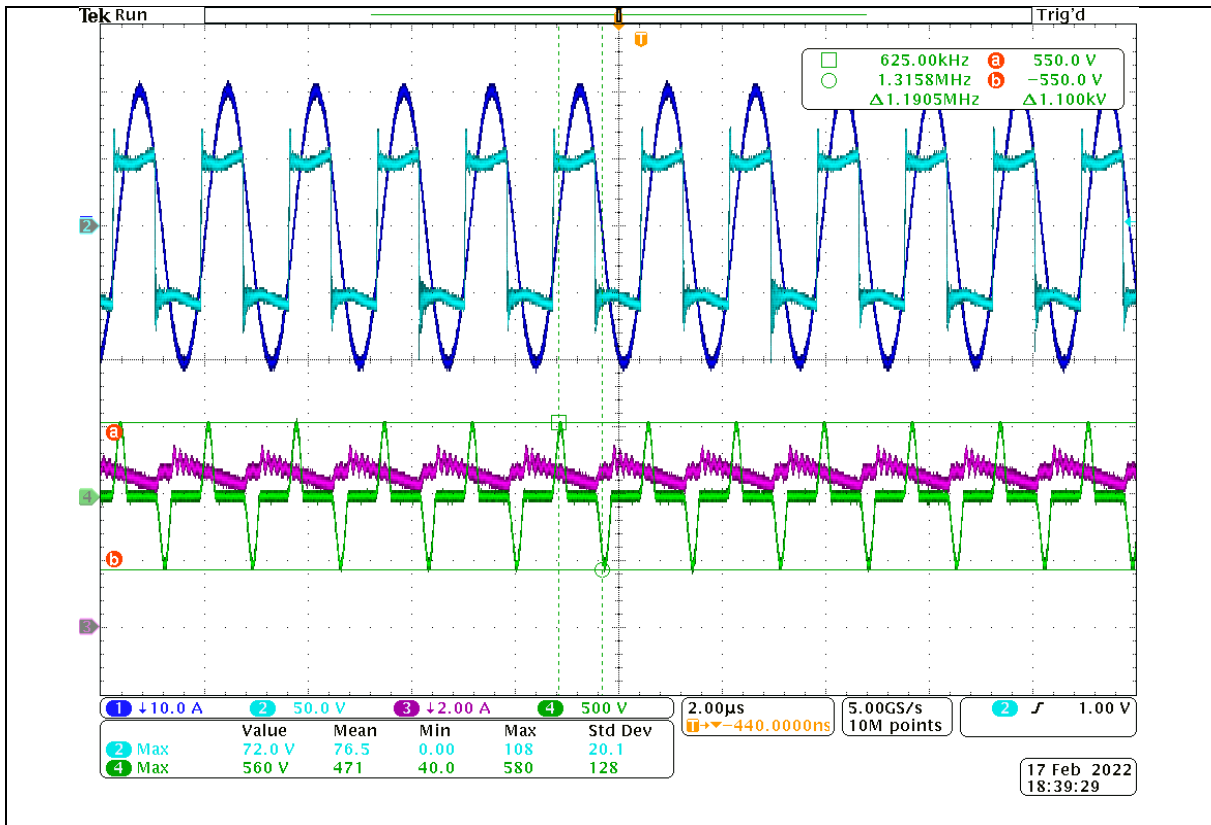
Velmi zajímavé je také chování napětí a proudu vysílacího elementu při změnách zátěže, kdy proud prakticky od nulových přenášených výkonů limituje k dvojnásobku maximálního proudu varianty s přímým připojením. Při zvyšování výkonu se proud prakticky nemění, roste pouze napětí. Varianty s I_{type} a U_{type} usměrňovačem tak vykazují trvalé maximální Jouleho ztráty na vysílacím vazebném elementu bez ohledu na velikost přenášeného výkonu. Tento jev vzniká pouze v kombinaci ze zátěží typu baterie, kdy v jistých obvodových stavech zmíněných usměrňovačů dochází k vybuzení vysílacího elementu z přijímacího elementu. Tento jev nebyl prozatím blíže zkoumán.



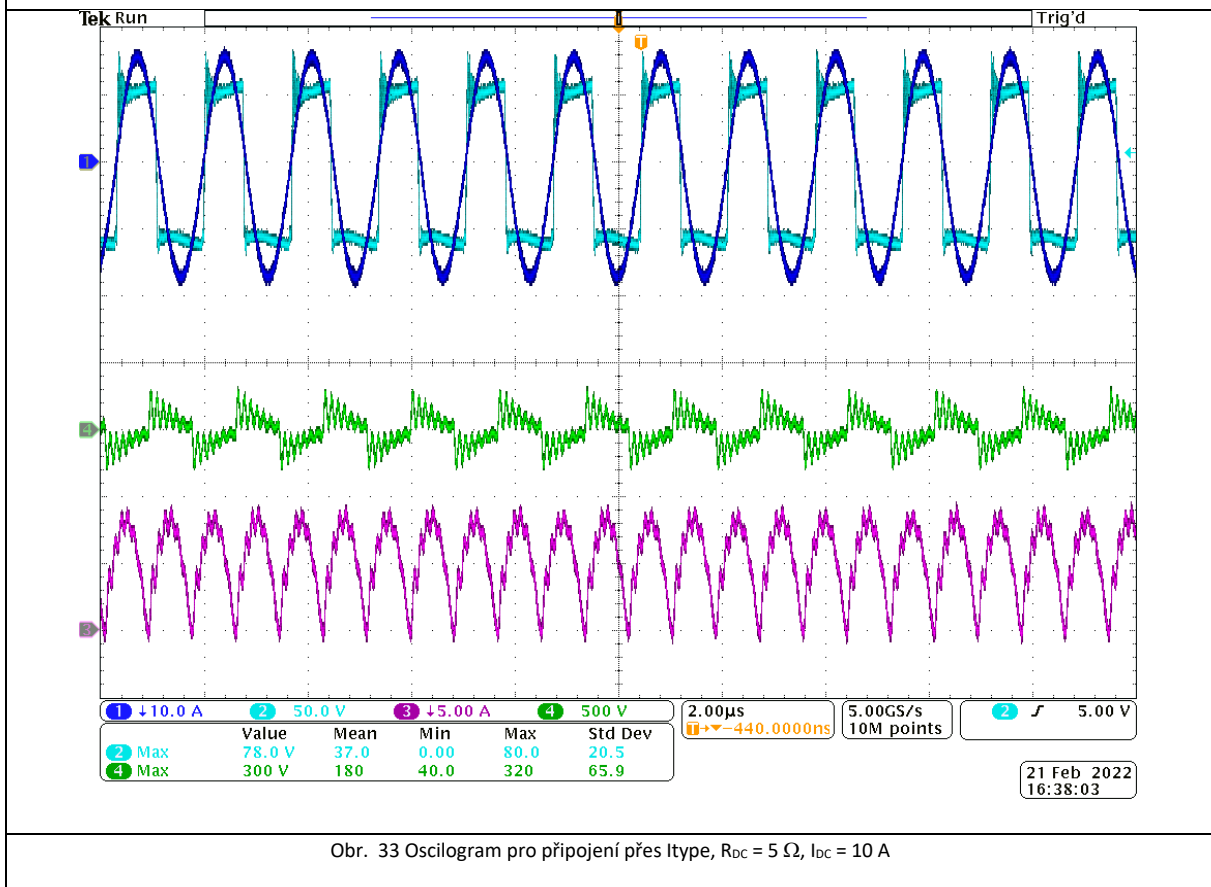
Obr. 30 Oscilogram pro přímé připojení, $R_{DC} = 5 \Omega$, $I_{DC} = 8,5 A$



Obr. 31 Oscilogram pro připojení přes DCDC, $R_{DC} = 5 \Omega$, $I_{DC} = 10 A$



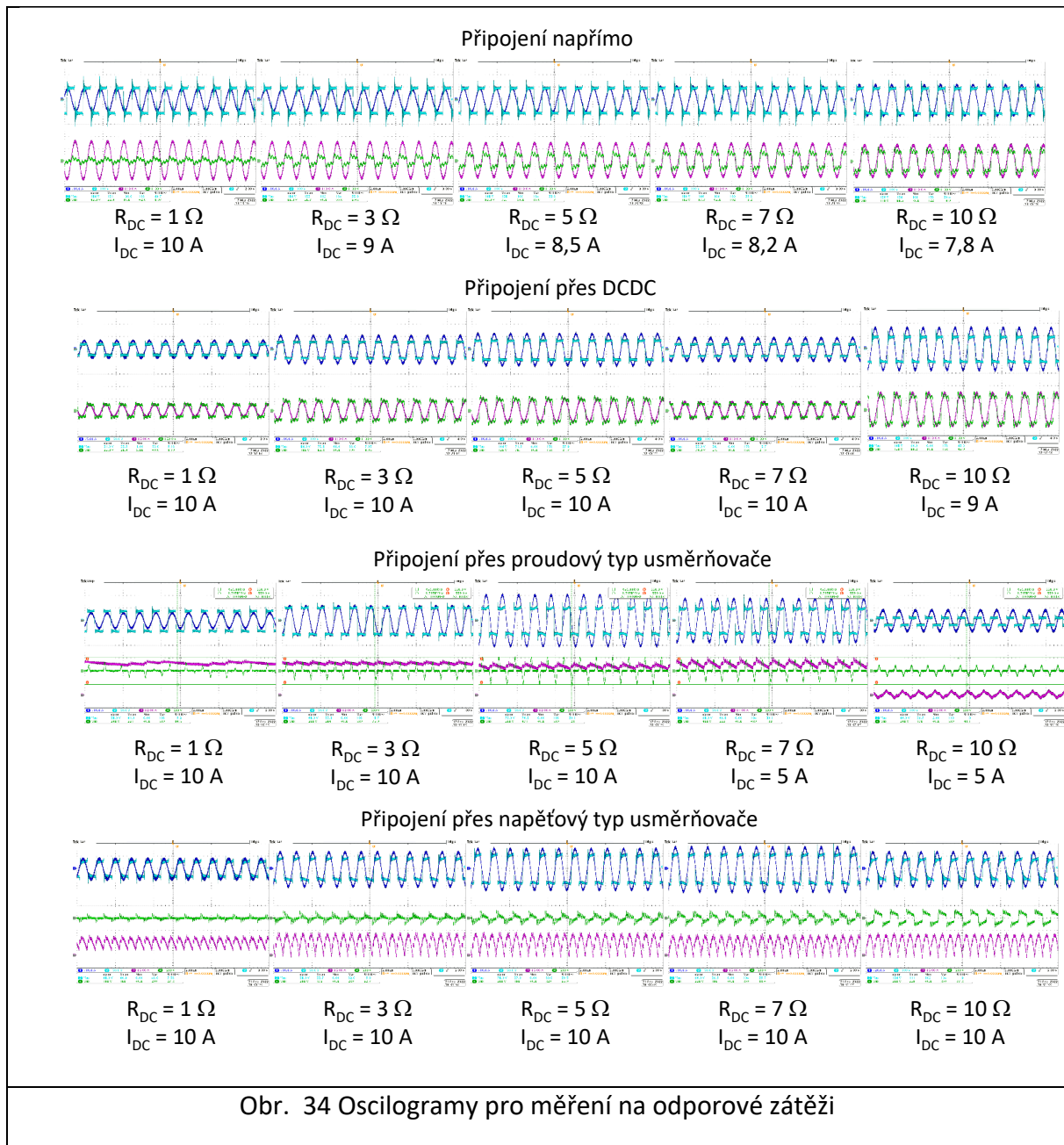
Obr. 32 Oscilogram pro připojení přes Itype, $R_{oc} = 5 \Omega$, $I_{bc} = 10 A$



Obr. 33 Oscilogram pro připojení přes Itype, $R_{oc} = 5 \Omega$, $I_{bc} = 10 A$

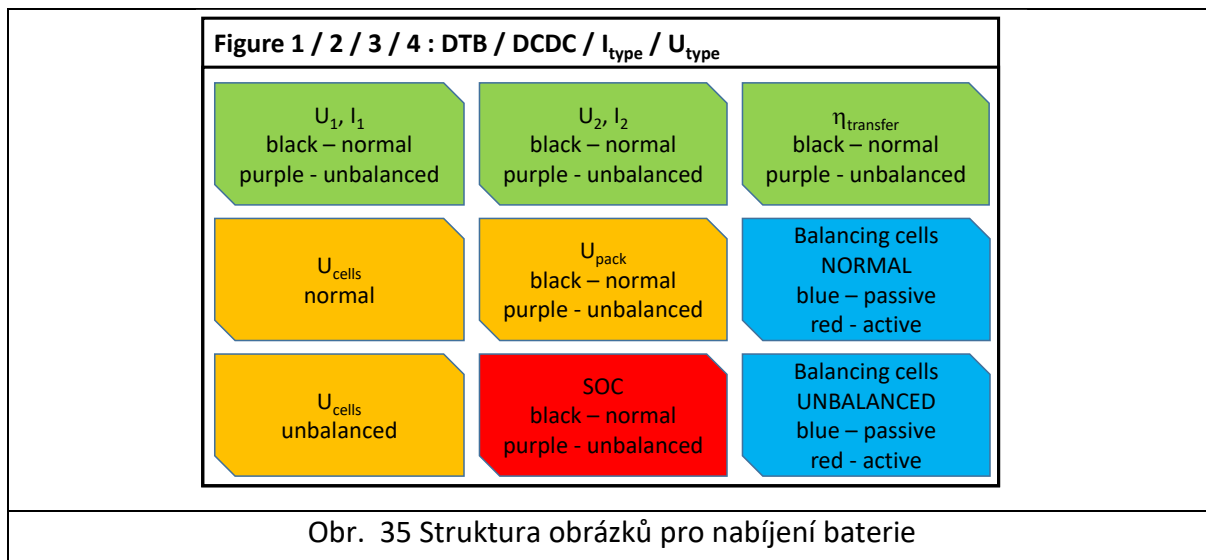
5.2.1 Vliv proměnné zátěže na časové průběhy

Obr. 34 provádí srovnání jednotlivých variant při různých hodnotách čistě odporové zátěže. Měřítko oscilogramů se v krajních bodech mohou měnit...



5.3 Testy při nabíjení baterie

Tyto testy byly provedeny pro dva stavy samotné baterie – pro nerozbalancovaný akupack a pro rozbalancované tři články (krajní, prostřední a poslední článek akupacku). Vždy bylo prováděno nabíjení z cca 90 %SOC do 100 %SOC při podmínkách CC-CV cyklu 8 A / 53 V. Výsledkem těchto měření jsou záznamy pro každou variantu zkoumaného systému. Tyto záznamy jsou zachyceny na Obr. 36 – 39 ve struktuře dle ilustrace na Obr. 35. Důležité hodnoty jsou ze záznamů nabíjení přeneseny do následujících Tab. VI, VII. Obecnou představu o chování systému a baterie při nabíjení zkoumanými variantami obvodu je třeba sestavit na základě detailní prohlídky Obr. 36 – 39.

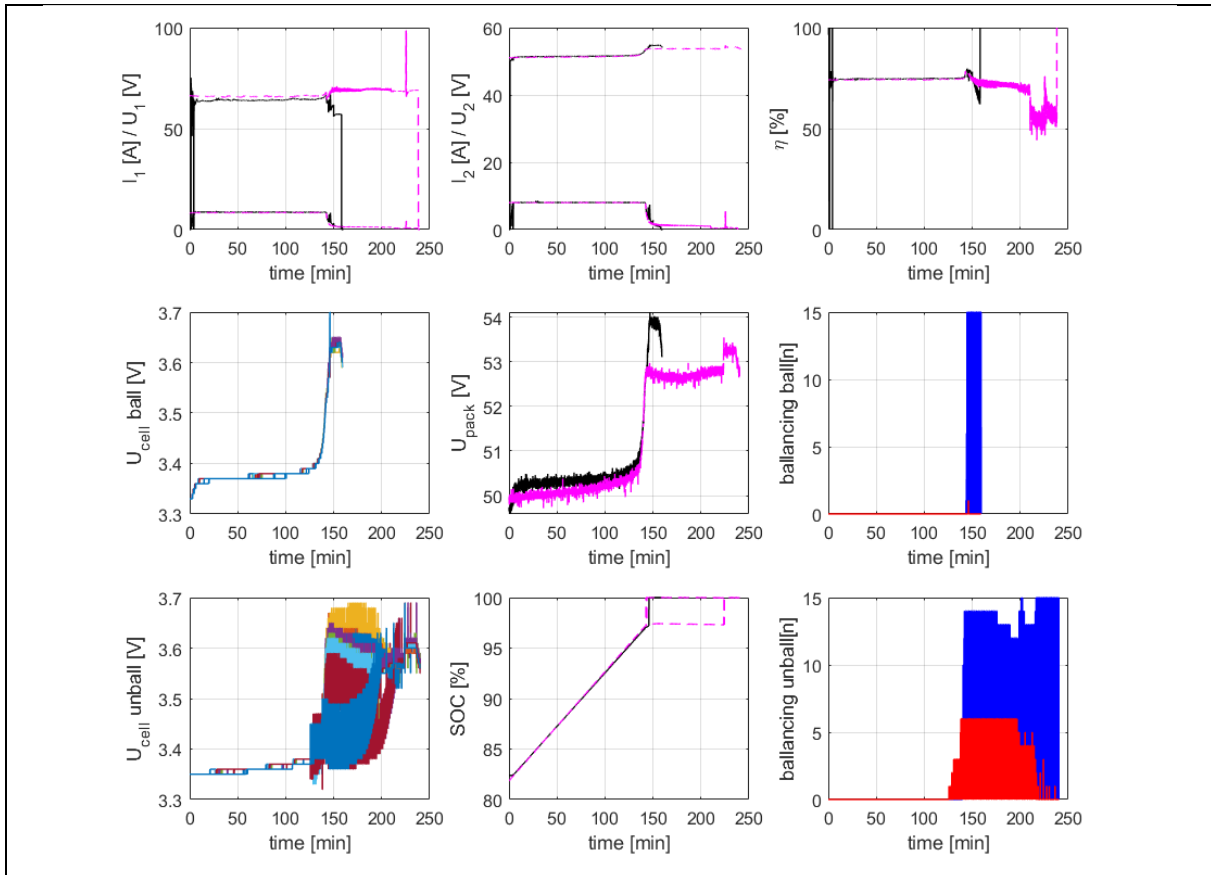


Tab. VI Srovnání účinností přenosu při nabíjení baterie

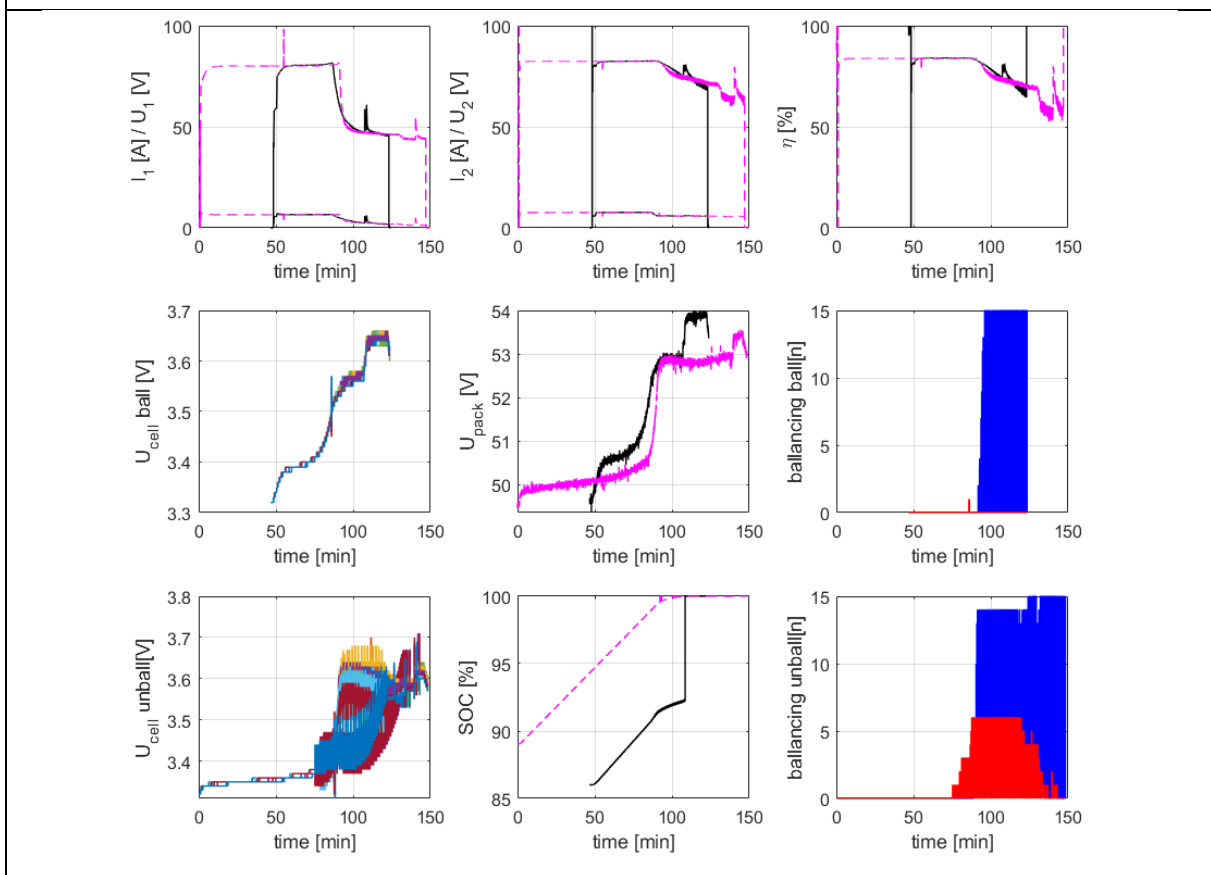
varianta	η_{trans} při SOC = 90 %		η_{trans} při SOC = 95 %		η_{trans} při SOC = 99 %	
	normal	unbalanced	normal	unbalanced	normal	unbalanced
Přímé připojení	75 %	75 %	75 %	75 %	79 %	49 %
DCDC	84 %	84 %	84 %	84 %	77 %	78 %
I_{type}	74 %	74 %	74 %	74 %	30 %	20 %
U_{type}	76 %	76 %	76 %	76 %	34 %	70 %

Tab. VII Srovnání doby nabíjení baterie

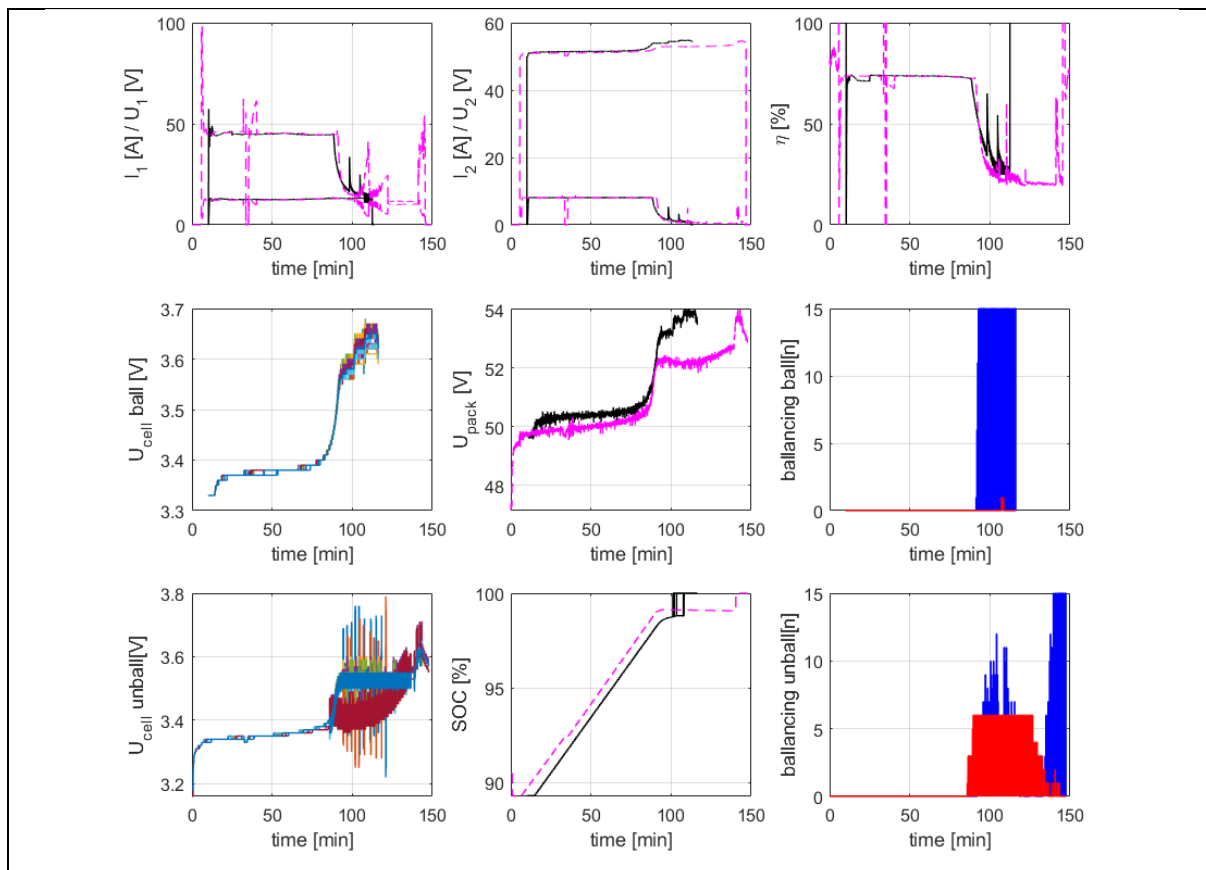
varianta	Nabíjecí čas 90 – 100 %SOC	
	normal	unbalanced
Přímé připojení	71 min	148 min
DCDC	42 min	97 min
I_{type}	86 min	127 min
U_{type}	90 min	105 min



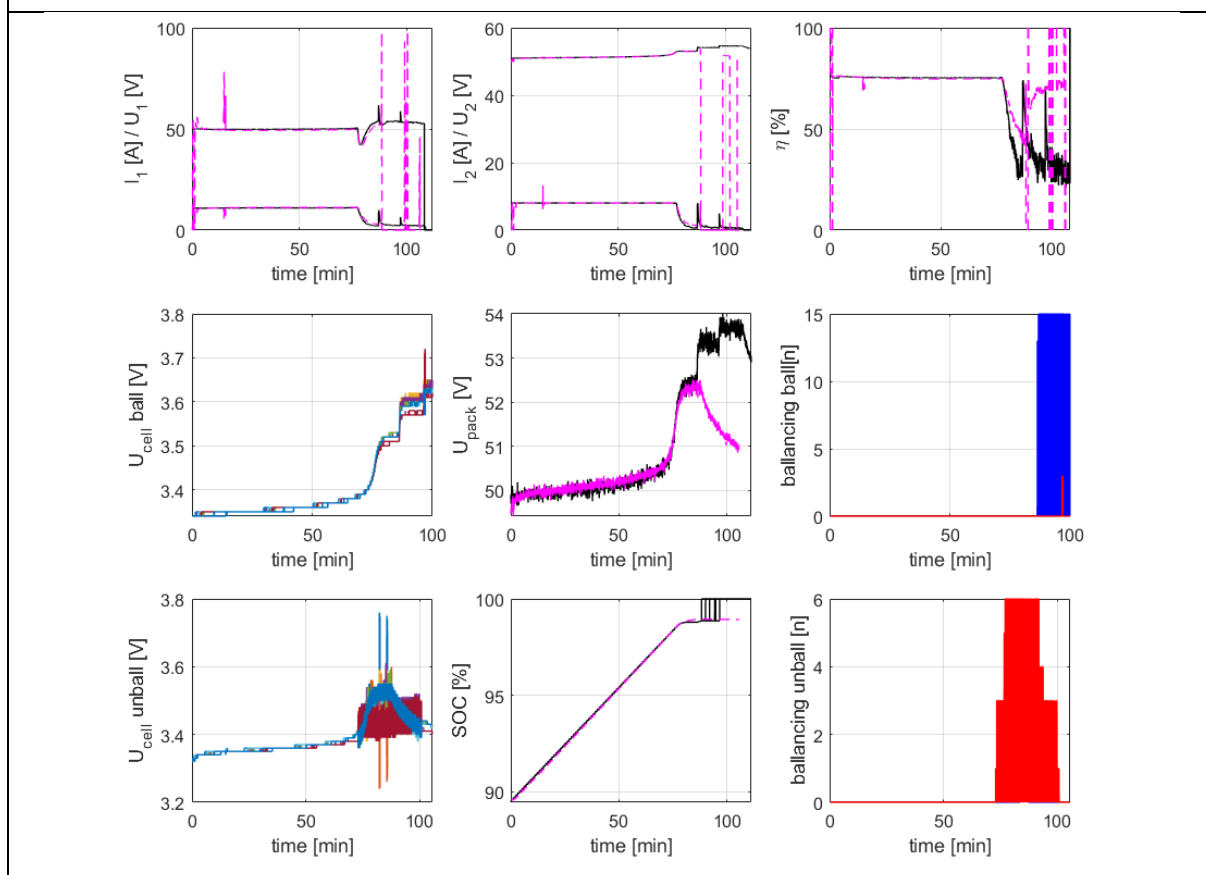
Obr. 36 Test nabíjením baterie – Přímé připojení baterie



Obr. 37 Test nabíjením baterie – připojení baterie přes DCDC



Obr. 38 Test nabíjením baterie – Připojení baterie přes proudový typ usměrňovače



Obr. 39 Test nabíjením baterie – Připojení baterie přes napěťový typ usměrňovače

Zhodnocení nabíjení je z hlediska vnějšího pohledu dostatečně zhodnoceno v Tab. VI, VII se závěry:

- Nejhorší účinnost je dosahována při přímém připojení zátěže
- Nejlepší a konstantní účinnost je dosahována při variantě využívající DCDC měnič jako aktivní impedanční přizpůsobení
- Varianty I_{type} a U_{type} jsou víceméně rovnocenné, avšak U_{type} varianta dosahuje vyšších účinností při balancování.
- Z hlediska délky nabíjení je hodnocení v podobného duchu, neboť délka nabíjení je ve všech případech ovlivňována především účinností.

Mimo účinnosti přenosu má na délku nabíjení také vliv nabíjecího procesu v baterii. Zkoumáním Obr. 36 – 39 lze z tohoto pohledu vyvodit následující závěry:

- Všechny varianty obvodu v případě nerozvážené baterie vedou na „brždění“ nabíjení pasivním balancováním. V případě rozvážené baterie je situace stejná, až na případ U_{type} usměrňovače. To je dáno charakterem jeho výstupu, jakožto čistě napěťového.
- Aktivní balancování se uplatňuje ve všech případech nabíjení rozvážené baterie.
- Ostatní průběhy nevykazují zvláštnosti a odlišnosti...

Poznámka: Průběh SOC na Obr. 37 – nerozvážená varianta (černá) je zanesen s chybou výpočtu SOC...

Poznámka: Průběhy nabíjení pro případ nerozvážené a rozvážené baterie jsou sesazovány v průběhu vykreslování a mohou vykazovat drobné časové neshody...

6 Závěr

Díličí závěry jsou součástí textu této výzkumné zprávy...

Hlavním cílem tohoto výzkumného úkolu bylo stanovit možné alternativní provedení on-board strany výkonového řetězce systému bezdrátové nabíjecí stanice. Zkoumané varianty byly: připojení přes diodový usměrňovač coby elementární, dále připojení přes odvozené topologie diodových usměrňovačů a připojení přes kombinaci diodový usměrňovač a DCDC měnič v režimu zvyšujícího pulzního měniče napětí.

Ze získaných poznatků lze **potvrdit nevhodnost připojení pouze přes můstkový diodový usměrňovač** a to především pro chybějící možnost jakéhokoliv impedančního přizpůsobení krom samotného návrhu systému.

Jako další, již jen méně vhodné, lze označit odvozené varianty diodového usměrňovače. Tyto varianty již poskytují možnost úpravy impedančního přizpůsobení a to například přechodem z jednoho typu na druhý (I_{type} / U_{type}). Souhrnně jsou si odvozené varianty rovnocenné, avšak v detailech vychází varianta s napěťovým výstupem (s common-mode induktorem) jako více vhodná, neboť je jednodušší na návrh, prostorově menší, nevykazuje velká komutační přepětí a má výstup napěťového charakteru. **V případě kvalitního návrhu a stanovení mezí změny zátěže jsou varianty účinnostně srovnatelné s variantou využívající DCDC měnič. Obecně jsou tyto varianty vhodnější pro neměnnou zátěž, nežli pro baterii.**

Jako nejvhodnější varianta vychází využití aktivního impedančního přizpůsobení nabíjené baterie vazebným elementům bezdrátového přenosu elektrické energie, kdy je dosahováno násobně vyšší účinnosti a její stálosti napříč celým nabíjením v CC-CV cyklu. Jediné úskalí zde tvoří oblast velmi malých nabíjecích proudů, které vedou na přerušované proudy DCDC měniče a snižování přenosové účinnosti. Toto je však možné z velké míry eliminovat vhodným návrhem.

V řešení tohoto výzkumného úkolu je poukázáno na jistou vlastnost odvozených topologií diodového usměrňovače umožňující přesun Joulových ztrát z přijímací strany bezdrátového přenosu na vysílací. Tato vlastnost byla také měřením prokázána. Pro speciální aplikace tak může být U_{type} usměrňovač vhodnější volbou. Například pro vzduchotěsné aplikace apod.

Literatura

- [1] V. Kindl a spol., Alternativní topologie usměrňovače pro systémy WPT s nízkou ekvivalentní zátěží, VZ č. XXXXXX, ZČU v Plzni, 2021,

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma zkoumaného systému	6
Obr. 2 Grafické odvození optimálního zátěžného odporu (65 kW prototyp WPCS)	7
Tab. I Testovaná sestava a její varianty	10
Tab. II porovnání zjištěných optimálních $R_{load\ opt}$	13
Tab. III Měřicí instrumentace	20
Tab. IV Měřicí instrumentace	21
Obr. 25 charakterová mapa – připojení baterie přes DCDC.....	23
Tab. V Hlavní hodnoty sledovaných veličin	25
Tab. VI Srovnání účinností přenosu při nabíjení baterie	30
Tab. VII Srovnání doby nabíjení baterie	30
Obr. 36 Test nabíjením baterie – Přímé připojení baterie	31

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	12.4.2022	M. Zavřel