

**Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Bezdrátový přenos elektrické energie velkých výkonů

Ing. Martin Zavřel

Plzeň, 2022



Disertační práce

k získání akademického titulu doktor v oboru

Elektronika

Ing. Martin Zavřel

Bezdrátový přenos elektrické energie velkých výkonů

Školitel: Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.

Plzeň, 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem prameny, které cituji a uvádím v seznamu literatury. V předložené vědecké práci jsou použity obvyklé vědecké postupy.

V Plzni, 20. 12. 2021



.....
podpis

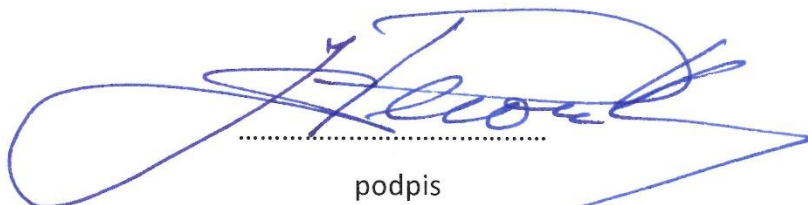
Poděkování

Zde bych rád poděkoval všem, kteří mě pozitivně ovlivnili při psaní této disertační práce. Hlavní poděkování patří panu Doc. Ing. Pavlu Drábkovi, Ph.D. a Doc. Ing. Vladimíru Kindlovi, Ph.D. za odbornou podporu a vedení ve všech etapách mého doktorského studia. Dále pak děkuji všem kolegům z fakulty Elektrotechnické Západočeské Univerzity v Plzni za vstřícnost a cenné odborné rady při zpracování předkládané disertační práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval mým rodinným příslušníkům a přátelům za vytvoření příjemných podmínek při mé práci.

Prohlášení řešitele projektu

Prohlašuji, že v rámci projektu 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, ve kterém byla zpracována tato disertační práce, bylo dosaženo předkládaných výsledků. Student se na těchto výsledcích podílel a to tak, že je hlavním autorem částí, které jsou představeny v této práci.

V Plzni, 30. 3. 2022



podpis

Prohlašuji, že v rámci studentských grantů SGS-2021-021 - Výzkum a vývoj perspektivních technologií v elektrických pohonech a strojích IV, ve kterých byla zpracována tato disertační práce, bylo dosaženo předkládaných výsledků. Student se na těchto výsledcích podílel a to tak, že je hlavním autorem částí, které jsou představeny v této práci.

V Plzni, 30. 3. 2022



podpis

Abstrakt

Tato disertační práce se zabývá technologií bezdrátového přenosu elektrické energie a její vhodnou aplikací v oblasti osobní a hromadné elektro-mobility, tedy v oblastech velkých přenášených výkonů na velkou přenosovou vzdálenost. Práce zachycuje aktuální trendy s přesahem na kabelové nabíjecí stanice a s přímou návazností k bezdrátovým nabíjecím stanicím elektromobilů.

Základním pilířem této práce je teoretický rozbor bezdrátového přenosu elektrické energie a souvisejících poznatků pro jeho aplikaci v bezdrátových nabíjecích stanicích elektromobilů. Druhý pilíř pak tvoří rozbor a volba vhodného výkonového řetězce takovéto nabíjecí stanice s náležitým popisem. Třetí opěrný bod práce tvoří rozbor a návrh vhodné strategie řízení s jeho implementací do mikro-kontroléru Texas Instruments. Čtvrtý bod práce diskutuje naměřená data na prototypch bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů a ztotožňuje je s teoretickými poznatky a předpoklady rovněž uvedenými v této práci.

Předkládaná práce uvádí ucelený teoretický základ a technický popis potřebný pro návrh, konstrukci a realizaci bezdrátové nabíjecí stanice pro elektro-mobilitu s optimalizovanými parametry. Rovněž tak práce prezentuje problematiku měření provozních elektromagnetických veličin s ohledem na ověření shody s platnými regulativními předpisy a normami.

Hlavním výstupem této disertační práce je experimentální prototyp bezdrátové nabíjecí stanice pro elektro-mobilitu s trvalým výstupním výkonem 65 kW a střední přenosovou vzdáleností o velikosti 20 cm.

Klíčová slova

Bezdrátový přenos elektrické energie, Bezdrátová nabíjecí stanice pro elektro-mobilitu, Elektro-mobilita, Vazební elementy, Simulační model, Řízení, Výkonový řetězec, Návrh, Optimalizace, Realizace, Měření.

Abstract

This dissertation thesis deals with wireless power transfer technology – its appropriate application in passenger and public electro-mobility, thus in areas of high transferred powers and large distances. This thesis capture actual trends with overlap to the cable charging stations and direct connection to the wireless charging stations of electric cars.

The basic thesis pillar is theoretical analysis of wireless power transfer and related knowledge for application in passenger and public electric cars. The second pillar is about analysis, selection and description of a suitable power chain with an appropriate description. The third thesis key point is about the wireless charger control approach, like are analysis and design of a suitable control strategy with its implementation in a microcontroller. The discussion about the measuring on laboratory prototype and its appropriate identification with knowledge and assumptions mentioned in this thesis is the subject of the fourth thesis pillar.

This dissertation thesis presents comprehensive theoretical basis and technical description needful for optimised design, construction and realization of electro-mobility wireless charging station. Thesis also presents the measuring issue of operating electromagnetics values with regard to the valid regulations and norms conformity validation.

The laboratory prototype of 65 kW electro-mobility wireless charger station of 20 cm average transfer distance is the main output of the presented thesis.

Keywords

Electric wireless power transfer, Electro-mobility wireless charger station, Electro-mobility, Coupling elements, Simulation model, Control, Power chain, Design, Optimization, Realization, Measurement.

Seznam symbolů a zkratk

∨	a současně (konjunkce)	ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
∧	nebo (disjunkce)	SAE	Society of Automotive Engineers
< ; >	uzavřený interval		
∈	je prvkem množiny		
NaN	číslo není k dispozici	Tx	vysílací (transceiver)
NC	nezapojeno (not connected)	Rx	přijímací (receiver)
Tab.	tabulka	RF	rádio-frekvenční
Obr.	obrázek	IP	internet protokol
™	symbol užívané obchodní značky	DHCP	dynamic host configuration protocol
n	obecné označení počtu prvků v kombinaci [-]	JSON	java script object notation
a, l	obecné označení délky strany předmětu [m]	http	hypertext transfer protocol
min	minimální hodnota	TCP	transmission control protocol
nom	jmenovitá hodnota	UDP	user datagram protocol
max	maximální hodnota	IEEE	institute of electrical and electronics engineering
		WLAN	Bezdrátová komunikační síť
USA	Spojené Státy Americké	CAN	datová sběrnice (controller area network)
EU	Evropská unie	CP	komunikační protokol (communication protocol), u výkladu norem SAE
EN	Angličtina (jazyk)		
CZ	Čeština (jazyk)		
		1	index veličin off-board vazebného elementu
ABB	Asea Brown Boveri (název společnosti)	2	index veličin on-board vazebného elementu
ČEZ	České energetické závody	bat	index veličin na svorkách baterie
TDK	Tokijský elektrický a chemický průmysl	u, v, w	označení fází distribuční sítě
QI	Wireless Power Consortium	AC	střídavý (alternating)
AFA	Air Fuel Alliance	DC	stejnsměrný (direct)
RICE	Research and Innovation Centre for Electrical Engineering	DC1	stejnsměrný meziobvod síťový usměrňovač – vstupní střídač
ICNIRP	International Commission on Non-ionizing radiation Protection	DC2	stejnsměrný meziobvod výstupní usměrňovač – stejnsměrný měnič

f	frekvence [Hz]	Kp	převodový poměr transformátoru [-]
ω	úhlová frekvence [rad s^{-1}]	Q_L, Q_C	činitel jakosti indukčnosti, kondenzátoru [-]
ω_0	rezonanční úhlová frekvence	h	označení harmonických složek neharmonického napětí/proudu [-]
f_m	frekvence modulovaného kmitočtu	ϵ_0, ϵ_r	permitivita vakua, permitivita relativní [Fm^{-1}]
f_{sw}	spínací frekvence měniče	μ_0, μ_r	permeabilita vakua, permeabilita relativní [Hm^{-1}]
f_0	hlavní rezonanční frekvence	ρ	rezistivita materiálu [Ωm]
f_{01}, f_{02}	postranní rezonanční kmitočty	ESR _L , ESR _C	parazitní sériový odpor indukčnost, kondenzátoru [Ω]
td	přenosová vzdálenost (transfer distance), např. mezi vazebnými elementy WPT [m]	τ	časová konstanta [s]
η	účinnost [%]	F	přenos dvoj baru/systému [dB]
B	magnetická indukce [T]	Y	obecné označení výstupu dvojbranu (například u přenosu)
E	intenzita elektrického pole [Vm^{-1}]	X	obecné označení vstupu dvojbranu (například u přenosu)
I, $i_{(t)}$	proud [A]	Q	elektrický náboj [C]
U, $u_{(t)}$	napětí [V]	φ	fázový posuv mezi signály [°]
U _{DS}	napětí na polovodičovém prvku [V]	δ	hloubka vniku při skin efektu [m]
P, $p_{(t)}$	činný výkon [W]	T	teplota [°C]
S, $s_{(t)}$	zdánlivý výkon [VA]	S	plocha/průřez [m^2]
R	Odpor [Ω]	C	kapacita [F]
R _{ekv}	ekvivalentní zátěžný odpor	S	plocha / průřez [m^2]
R _{z η_{max}}	zátěžný odpor optimalizovaný pro účinnost	Q	elektrický náboj [C]
R _z	zátěžný odpor pro AC	N	počet závitů cívky [-]
R _{zDC}	zátěžné odpor pro DC	d	substituční proměnná
Z	impedance [Ω]	Δ	velikost vyosení od neutrální polohy
Z _{cn}	impedance vztažená ke vstupním svorkám vazebných elementů WPT	ΔP	výkonové ztráty (tepelné)
L	indukčnost [H]	ΔC	tepelná změna kapacity
M	vzájemná indukčnost [H]		
K	činitel vazby magneticky vázaných indukčností [-]		
Φ	magnetický indukční tok [Wb]		
l_0, l_{fe}	střední délka dráhy magnetického indukčního toku, ve vzduchové mezeře, v magnetickém obvodu [m]		

bat	baterie	GA	off-board část (garage arrangement), u výkladu norem SAE
WPT	bezdrátový přenos elektrické energie (wireless power transfer)	VA	<i>on-board</i> část (vehicle arrangement), u výkladu norem SAE
WPCS	výkonová bezdrátová nabíjecí stanice (wireless power charging station)	$3_{ph}, 3_L$	tří fázové (three phases)
V→L	přenos energie z vozidla do domácnosti (osvětlení)	S-S, S-P	základní kompenzační topologie WPT – sériově-sériová, sériově paralelní
V→G	přenos energie z vozidla do distribuční sítě	P-S, P-P	základní kompenzační topologie WPT – paralelně-sériová, paralelně-paralelní
V→V	přenos energie z vozidla do vozidla (garáže)	HV	vysokonapěťové (high voltage), např. u baterií
PFC	obvod/filtr vylepšující účinník (power factor correction)	LV	nízkonapěťové (low voltage), např. u baterií
ACDC	obecné měniče, střídavý stejnosměrný	ISM	průmyslové, vědecké, medicínské (Industrial Scientific Medicine), např. u radiofrekvenčních pásem
DCAC	obecné měniče, stejnosměrný střídavý	exp.	experimentální (exp. prototyp)
DCDC	obecný měnič, stejnosměrný stejnosměrný	PWM	pulzní šířková modulace (pulse width modulation)
VSAR	napěťový pulzní usměrňovač (EN)	Z	třídy přenosových vzdáleností
NPU	napěťový pulzní usměrňovač (CZ)	z	střída řízení výstupního DCDC měniče (též bateriového)
SD	snižující (step down)), např. u pulzního měnič	z_s	střída obdélníkového napětí vstupního střídače
SU	zvyšující (step up), např. u pulzního měnič	Z_{3LNPU}	střída řízení síťového napěťového pulzního usměrňovače
OZ	operační zesilovač	Z_{DCDC}	střída řízení pomocného DCDC měniče
CC	konstantní proud (constant current), např. u nabíjení baterie	SW	software
CV	konstantní napětí (constant voltage), například u nabíjení baterie	HW	hardware
FOD	detekce cizích předmětů (foreign object detection), např. u WPT	CLK	perioda taktovacího kmitočtu mikro kontroléru
FOM	Figure of merit		
LOD	detekce živých organismů (life object detection), např. u WPT		
EM	elektromagnetický		
EMC	elektromagnetická kompatibilita		

f _{CLK}	taktovací kmitočet mikro kontroléru	Cu	měď
PRD	perioda periodického signálu	Al	hliník
PLL	obvod fázového závěsu (phase lock loop)	Si	křemíkový polovodičový prvek
kt	označení kroku výpočtu v mikro kontroléru	SiC	silikon-karbidový polovodičový prvek
μC, DSP	mikrokontrolér, též digitální signálový procesor	GaN	galium-nitridový polovodičový prvek
GPI	logické vstupy DSP	POM	polyoxymetylén (acetalový plast)
GPIO	logické vstupy/výstupy DSP	x,y,z	souřadný systém stacionární
ISR	SW rutina přerušení programu	d,q	souřadný systém elektrický rotující

Ve smyslu spisového jazyka českého a sjednocení názvosloví je v práci využíváno výhradně slova „nabít“ a jeho podob ve spojení s elektřinou, tj. například podob nabít, nabíjecí, nabitý, nabíjet apod.

Slovo „dobít“ je v některých svých podobách zaměnitelné s adekvátní podobou slova „nabít“, avšak nelze jej užít ve všech podobách vyžadovaných obsahem této disertační práce.

Spojení „nabjecí stanice“ je jedinou správnou možností, což výběr slova „nabít“ určuje.

Obsah

PROHLÁŠENÍ	3
PODĚKOVÁNÍ	3
PROHLÁŠENÍ ŘEŠITELE PROJEKTU	4
ABSTRAKT	5
KLÍČOVÁ SLOVA	5
ABSTRACT	6
KEYWORDS	6
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	7
1 ÚVOD	13
1.1 MOTIVACE	13
1.2 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	15
1.3 VYMEZENÍ VŮČI SYSTÉMŮM MALÝCH VÝKONŮ.....	20
1.4 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	22
1.5 METODY ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	23
2 TOPOLOGIE BEZDRÁTOVÉ NABÍJECÍ STANICE	24
3 NORMALIZACE WPT A WPCS V ELEKTRO-MOBILITĚ	28
4 BEZDRÁTOVÝ PŘENOS ELEKTRICKÉ ENERGIE - WPT	30
4.1 VAZEBNÍ ELEMENTY WPT.....	30
4.1.1 <i>Mikrovlnná vazba</i>	30
4.1.2 <i>Kapacitní vazba</i>	30
4.1.3 <i>Induktivní vazba</i>	32
4.1.4 <i>Induktivní rezonanční vazba</i>	33
4.2 ZÁKLADNÍ MODEL VAZEBNÝCH ELEMENTŮ	41
4.2.1 <i>Shrnutí závěrů ze základních modelů</i>	47
4.3 IMPEDANČNÍ MODEL S-S KONFIGURACE	48
4.4 MODEL S-S KONFIGURACE V ČASOVÉ OBLASTI	50
4.5 MODEL WPT V ČASOVÉ OBLASTI	52
4.6 NÁVRH VAZEBNÝCH ELEMENTŮ.....	56
4.6.1 <i>Vazební kondenzátor</i>	59
4.6.2 <i>Vazební cívka</i>	61
4.6.3 <i>Výkonová bilance vazebních elementů</i>	62
4.7 MECHANICKÝ NÁVRH.....	63
4.7.1 <i>Implementace WPT v elektro-mobilitě</i>	63
4.8 MĚNIČE WPT.....	66
4.9 ŘÍZENÍ WPT	66
4.9.1 <i>Shrnutí řízení WPT</i>	70
5 BEZDRÁTOVÁ NABÍJECÍ STANICE - WPCS	71
5.1 ZÁTĚŽ WPCS – TRAKČNÍ BATERIE	71
5.2 NÁVRH WPCS.....	74
5.2.1 <i>Regulace on-board části WPCS</i>	75
5.2.2 <i>Regulace off-board části WPCS</i>	78
5.2.3 <i>Simulace WPCS</i>	84
5.2.4 <i>Výkonový řetězec WPCS</i>	87
5.3 SHRNUTÍ WPCS.....	89
6 VERIFIKACE MĚŘENÍM NA EXPERIMENTÁLNÍM PROTOTYPU	91
6.1 EXPERIMENTÁLNÍ PROTOTYP	91

6.2	TESTY V REŽIMU „WPT TO ELECTRONIC LOAD“	94
6.3	TESTY V REŽIMU „BACK TO BACK“	95
6.4	TESTY NA BATERIOVÉ NÁHRADĚ („GRID TO BATTERY“).....	98
6.5	TESTY REGULACE VÝKONU STŘÍDOU VSTUPNÍHO STŘÍDAČE	101
6.6	SHRnutí VERIFIKACE MĚŘENÍM.....	103
7	ZÁVĚR	104
7.1	SHRnutí DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	106
7.2	PERSPEKTIVNÍ SMĚRY DALŠÍHO ZKOUMÁNÍ	106
7.3	VZTAH STUDENTA K DISERTAČNÍ PRÁCI	107
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	108
	SEZNAM PUBLIKACÍ A VÝSTUPŮ STUDENTA VZTAHUJÍCÍCH SE K DISERTAČNÍ PRÁCI	113
	OSTATNÍ PUBLIKACE A VÝSTUPY STUDENTA	115
	PŘÍLOHY	116
1	SAE TIR J2954 (REV. 2020-10) – VÝTAH.....	117
2	SAE TIR J2847/6 (REV. 2020-09) – ARCHITEKTURA KOMUNIKACE	141
3	SEZNAM PUBLIKAČNÍ ČINNOSTI AUTORA DISERTAČNÍ PRÁCE.....	146

1 Úvod

Tato disertační práce se zabývá problematikou bezdrátového přenosu elektrické energie a jeho aplikací v oblasti elektro-mobility coby bezdrátové nabíjecí stanice. Mezi cílené elektrické dopravní prostředky spadají především plně elektrické osobní automobily a autobusy hromadné dopravy. Jde tedy o problematiku bezdrátových nabíjecích stanic velkých výkonů v řádu desítek až stovek kilowattů. Práce rovněž zachycuje problematiku bezdrátového přenosu a bezdrátových nabíjecích stanic nižších výkonů v řádu desítek až stovek wattů. Cílenými dopravními prostředky v této výkonové hladině jsou pak například elektrické koloběžky, motorky, jízdní kola a podobně. Obecně lze zaměření zkoumané problematiky shrnout jako bezdrátové nabíjecí stanice pro malé dopravní prostředky, elektromobily a elektro-autobusy.

Tato disertační práce zachycuje vstupní poznatky, jejich modifikaci a optimalizaci pro návrh bezdrátových nabíjecích stanic pro elektro-mobilitu a charakteristická úskalí jejich konstrukce a chodu. Centrálním výstupem je pak ucelený dokument umožňující snadné pochopení problematiky a širších technických souvislostí spojených s výkonovým a regulačním návrhem.

Práce rovněž pojednává o praktické realizaci 65kW experimentálního prototypu bezdrátové nabíjecí stanice, na kterém byly experimentálně ověřeny teoretické předpoklady, poznatky a dopady optimalizačních procesů.

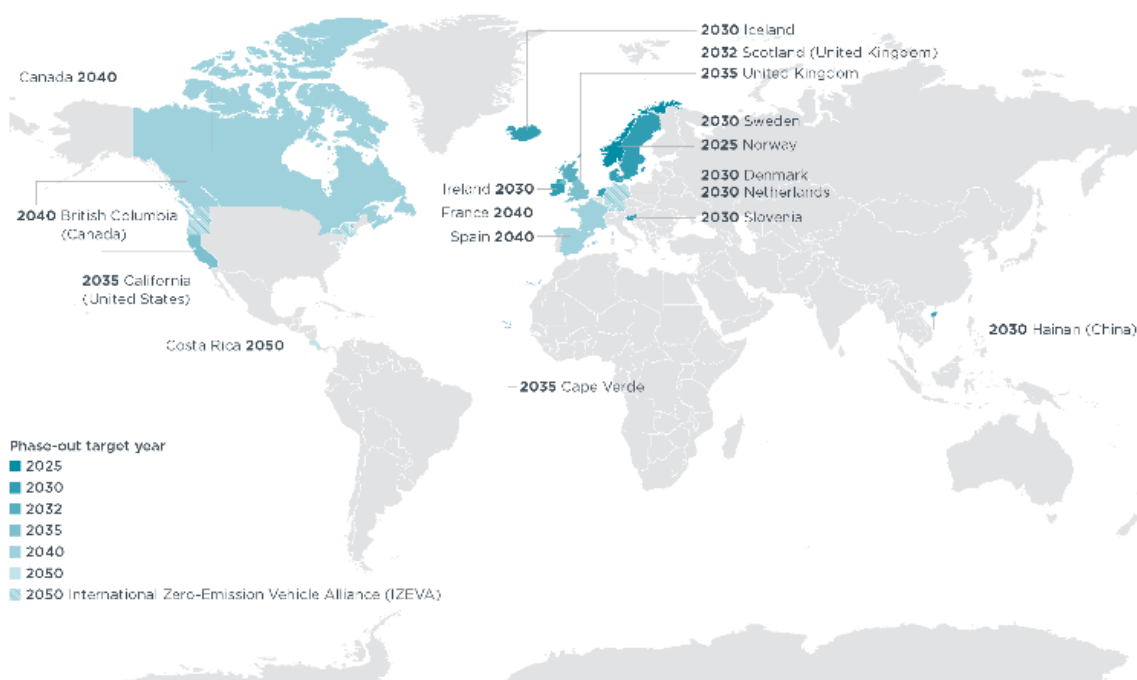
1.1 Motivace

Právě rozvoj elektro-mobility je v poslední době značně urychlován aktuální nízkou emisní politikou Evropské unie i většiny světa. Současně hojně diskutovaná automobilová emisní norma EURO 7 mimo jiné nastiňuje úplné ukončení výroby nových vozidel se spalovacími motory. Od roku 2025 by mělo docházet k postupnému útlumu jejich výroby až k úplnému ukončení v roce 2040 (předběžně). Obdobné plány prezentuje také USA či Kanada [1]. Regulační politika je stát od státu rozdílná, například EU plánuje regulativu vozidel se spalovacími motory vztáhnout pouze na osobní a lehká užitková vozidla, avšak existují i plány jiných zemí zahrnujících do omezení i hromadnou dopravu. Přehledně je zmíněná regulační politika zpracována v literatuře [2] a na [Obr. 1](#).

Norma Euro 7 je prozatím ve stádiu připomínkování a úprav, vzhledem k tomu se objevují zprávy o jejím zmírnění. Zajímavé reakce výrobců vozidel a expertů jsou obsaženy například v literatuře [3-4], je však jisté, že norma EURO 7 v neisté podobě vstoupí v platnost. Právě plně elektrická vozidla jsou jednou z možných nástupců, respektive náhrad, vozidel se spalovacími motory [2,3,4].

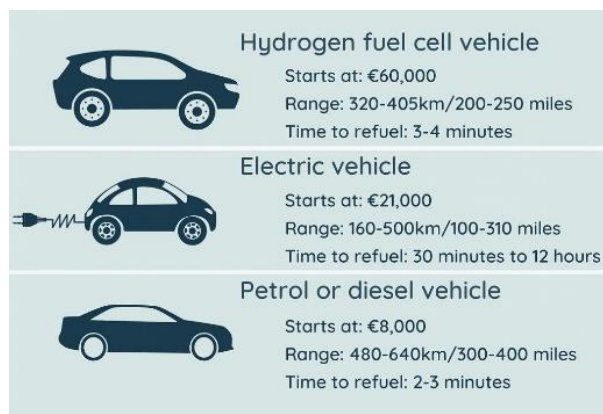
Prakticky všechny dnešní automobilky se prezentují čistě elektrickými modely vozidel a to nejen modely osobních vozů, ale také například vozů hromadné dopravy či vozů užitkových. Mezi ty neznámější osobní elektromobily lze zařadit například: Audi Q4 E-tron, Mercedes-Benz EQA, Skoda Enyaq iV, Porsche Taycan, BMW iX3, Lotus Evia, Nisan Ariya, Kia EV6, Hyundai Ioniq 5, Tesla Model Y [5, 6]. Z kategorie elektro-autobusů můžeme jmenovat například: Volvo 8400, Solaris Urbino xx electric, Mercedes Benz e-citago, Volvo 7900 electric či Iveco buss e-way [6].

Governments with set targets for phasing out all new sales of internal combustion engine passenger cars



Obr. 1 Národní, provinční a státní plány s definovaným vyřazením spalovacích motorů - [ZDROJ \[2\]](#)

Všechny elektrické dopravní prostředky spojuje potřeba nabíjení baterií, které, bohužel, zabere mnohem více času nežli doplnění standardních kapalných pohonných hmot. Velmi názorně je tato situace znázorněna na [Obr. 2](#), který je převzatý z literatury [\[7,8\]](#).



Obr. 2 Nabíjení energie vs. Dočerpání paliva – [ZDROJ \[7\]](#)

Z nynějšího pohledu je tedy elektro-mobilita silně perspektivní a lze očekávat její rozvoj. S tím úzce souvisí i rozvoj nabíjecích stanic a jejich podob či provedení, které by zmenšili rozdíl v „doplňování paliva“ mezi elektromobily a klasickými spalovacími automobily. Jedna z cest je přerušované krátkodobé nabíjení během cest (nákupy, úřady, práce, oběd, ...). Takováto strategie pochopitelně vede na častý úkon spočívající v připojení elektromobilu k nabíjecí stanici, aktivování nabíjení atd. Zde je bezdrátová nabíjecí stanice velkým přínosem a to nejen z pohledu uživatele, ale i z pohledu moderního města se sítěmi „Smart city“ a „Smart grid“. Bezdrátové nabíjecí stanice jsou zcela automatizované, nevyžadují zásah obsluhy a nabízejí řadu nadstavbových funkcí. O uvedeném přechodu od kabelových nabíjecích stanic

k bezdrátovým nabíjecím stanicím pojednává z pohledu uživatele i technika například literatura [9,10].

Na základě výše uvedeného je aplikace bezdrátových nabíjecích stanic v oblasti hromadné dopravy zcela logická. Automatické bezdrátové nabíječky ve stanicích a zastávkách umožní plně elektrifikovanou hromadnou dopravu bez potřeby dlouhých stání na konečných stanicích (kabelová nabíjecí stanice). Zároveň se tím stává myšlenka nezávislé městské elektrické trakce lépe realizovatelnou.

Motivace pro rozvoj bezdrátových nabíjecích stanic pro elektro-mobilitu je tedy dostatečná, navíc, díky jejich multioborovému charakteru je zajímavá i z pohledu vědeckého a vývojářského.

1.2 Analýza současného stavu poznání

V návaznosti na [Úvod](#) a [Motivaci](#) lze o bezdrátových nabíjecích stanicích pro elektro-mobilitu hovořit jako o perspektivní technologii a oblasti vědeckého zkoumání. To je také potvrzováno zájmem mnohých vědců i firem.

V této oblasti jsou v současnosti největšími komerčními hráči společnosti [Brusa](#), [Plugless Power](#), [WiTricity](#), kteří nabízejí kompletní bezdrátové nabíjecí stanice s výkonem od 3,3 do 11 kW. Například společnost Brusa zakládá svou prezentaci bezdrátové nabíjecí stanice na spolupráci s automobilkou [BMW-i](#), společnost Plugless Power pak sází na spolupráci s [Teslou™](#) a své prvenství v komerčně dostupné bezdrátové nabíjecí stanici. Parametrově nejlépe se jeví systém WiTricity, avšak pro kvalitní srovnání systémů jednotlivých společností jsou dostupné parametry nedostatečné. Hrubé srovnání je uvedeno v [Tab. I](#). V současné době tedy existují komerčně dostupné bezdrátové nabíjecí stanice s výkonem do 11 kW, který je, vzhledem k současným požadavkům na dojezd elektromobilů, ne zcela uspokojivý.

Tab. I Srovnání komerčně dostupných bezdrátových nabíjecích stanic

Výrobce	Brusa	Plugless Power	WiTricity
Výkon	11 kW	3,3 – 7,2 kW	3,6 – 11 kW
Účinnost	> 90 %	NaN	90 - 93 %
Přenosová vzdálenost	NaN	15,24 cm	10 – 25 cm
Obousměrnost	NaN	NaN	ano

Abychom se mohli bavit o bezdrátových nabíjecích stanicích coby nástupci či alternativě k dnes běžným kabelovým nabíjecím stanicím, je třeba se vůči nim vymezit. Zde můžeme z největších hráčů jmenovat například [ABB](#) a [Siemens](#). Porovnání těchto nabíječek a nabíječek společnosti [ČEZ](#) je uvedeno v [Tab. II](#). Zde je patrné zřejmé rozložení výkonu nabíjecí stanice pro domácnosti (do 11 kW), standartní veřejné stanice (do 22 kW) a supervýkonné veřejné či průmyslové nabíjecí stanice (nad 22 kW).

Tab. II Přehled nejběžnějších kabelových (kontaktních) nabíjecích stanic

Výrobce	Model	Výkon
ABB	AC destination	3 - 22 kW
	DC destination	11 to 24 kW
	DC fast	50 - 180 kW
	DC high power	175 - 350 kW
	vehicle to grid	
	overnight	50 - 150 kW
	Route panto	150 - 600 kW
Siemens	VersiCharge (Wallbox)	2,8 - 22 kW
	SICHARGE CC AC 22 (Nabíjecí sloupek)	2 * 22 kW
	SICHARGE D	160, 180 , 240, 300 kW
	CPC 50 + CPC 150 kW (Vysoce výkonné nabíjecí stanice)	150 / 2*75 kW
ČEZ	Přenosné nabíječky	3 kW
	Nástěnné wallboxy	3,7 ; 7 ; 11 ; 22 kW
	Nabíjecí stojany - domácnosti	3,7 ; 7 ; 11 ; 22 kW
	Nabíjecí stojany - veřejné	22 ; 26 ; 50 kW

Budeme-li se bavit o bezdrátových nabíjecích stanicích jako o náhradě (alternativě) kabelových nabíjecích stanic, je důležité provést průzkum nejen z oblasti výkonů, ale také z oblasti elektrické kompatibility výstupu, tedy předně výstupního napětí a proudu. Porovnáme-li data z katalogových listů jednotlivých nabíjecích stanic z Tab. II [\[11,12,13,14\]](#) dospějeme k výstupnímu napětí nabíječky 150 až 1000 V při proudech dle výkonové rovnice.

V souvislostech s moderními městskými aglomeracemi je třeba uvést možné začlenění do sítí „Smart City“ a „Smart Grid“ [\[15,16\]](#). Zde se mimo „časování“ nabíjení do dob přebytku elektrické energie nabízí také tzv. „Vehicle to grid“ technologie, což není nic jiného než obousměrná nabíjecí stanice, která umožňuje využití energie akumulované v baterii k pokrytí špičkových oblastí denního diagramu zatížení daného města, čtvrti, či jen domu. Právě v oblasti jedné domácnosti se tato vize jeví jako nejracionálnější. Varianty takovýchto

systémů můžeme shrnout jako: „Vehicle to Vehicle“, „Vehicle to Grid“, „Vehicle to Light / Home“. Trochu lepší představu o takovémto systému nastiňuje [Obr. 3](#).



Obr. 3 Vehicle to grid – plán Jižní Korey – ZDROJ: <https://www.smart-energy.com/regional-news/asia/vehicle-to-grid-south-koreas-kepcos-to-start-pilot-scheme/>

Mimo průmyslových společností se bezdrátovými nabíjecími stanicemi zabývá také mnoho vědců a výzkumníků, kteří se snaží vytvořit plně konkurenční bezdrátové nabíjecí stanice právě k těm středně a vysoce výkonným kabelovým. Podíváme-li se na [Tab. II](#), je zřejmé, že první milník je 50kW a dále 150kW bezdrátová nabíjecí stanice. Pochopitelně, ne každý výzkum se zabývá bezdrátovou nabíjecí stanicí jako celkem. Většina výzkumu se zaměřuje jen na dílčí části, jako jsou vazební elementy, samotný přenos elektrické energie, speciální měniče a jejich topologie, řízení, stínění, detekce cizích těles, detekce živých organismů apod. Hlavními současnými výzkumníky jsou například Johann Kolar (ETH Zúrich, ABB), ABB, Airbus či WitriCity.

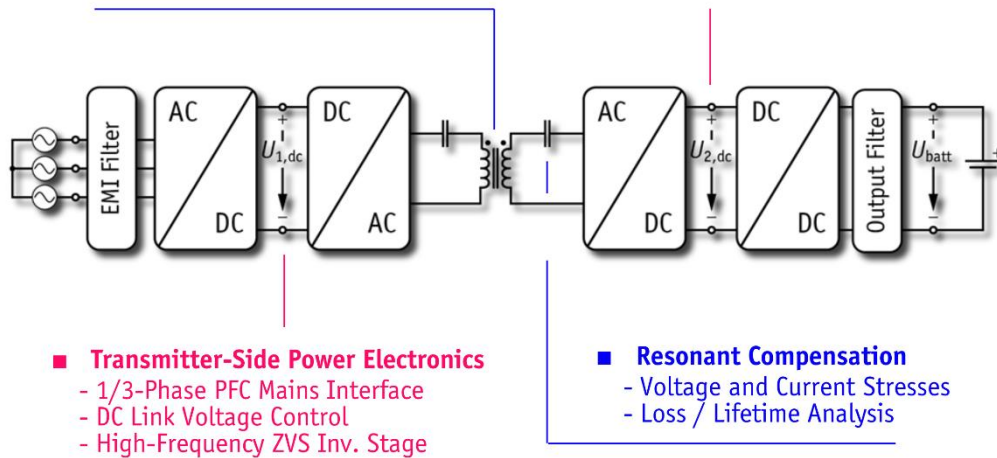
Například Johann Kolar pod záštitou ABB a ETH Zúrich zkonstruoval demonstrátor 50kW bezdrátového nabíjecího systému v dnes již standardní topologii dle [Obr. 4](#) (černě). Barevně je na [Obr. 4](#) popsáno dané řešení Kolarova demonstrátoru [[17](#),[18](#)]. Na dalším [Obr. 5](#) je možné si prohlédnout část fyzického řešení a napěťové hladiny v demonstrátoru [[18](#)].

■ **Transmission Coils**

- Magnetic Design using FEM
- Winding and Core Losses (FEM)
- Thermal Model
- Shielding of Stray Field

■ **Receiver-Side Power Electronics**

- Synchronous Rectification
- Battery Current Regulation
- Load Matching



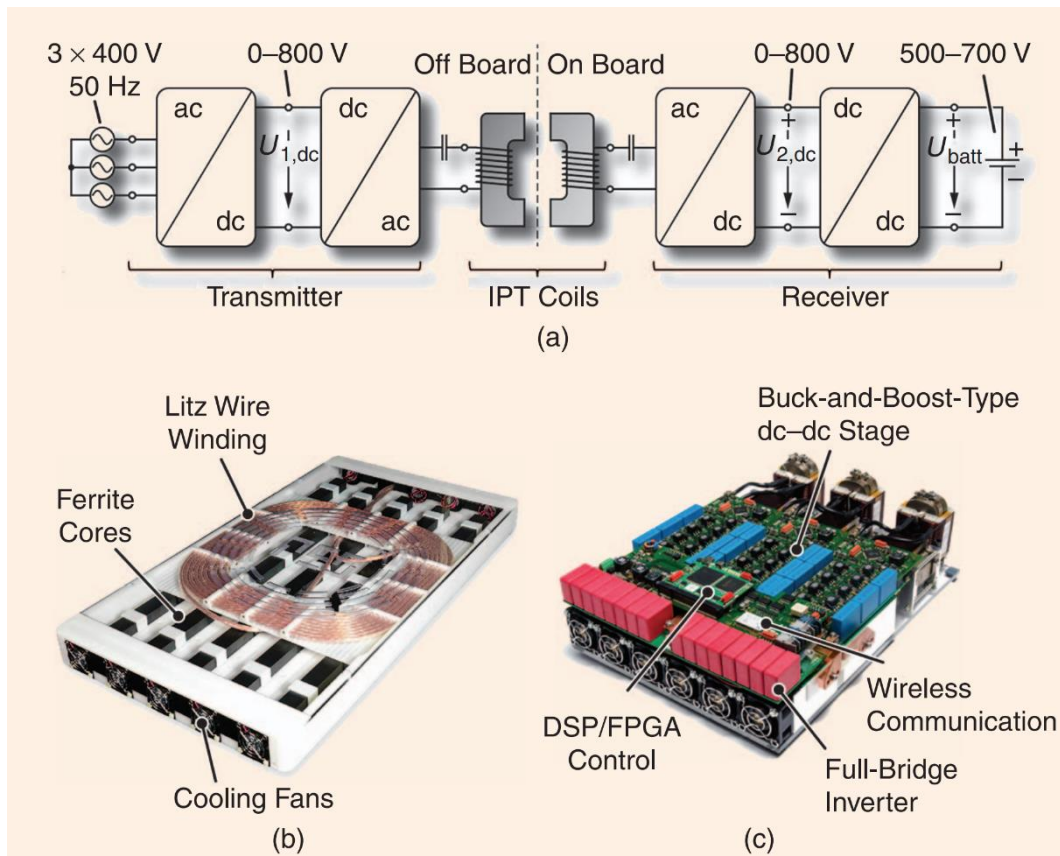
■ **Transmitter-Side Power Electronics**

- 1/3-Phase PFC Mains Interface
- DC Link Voltage Control
- High-Frequency ZVS Inv. Stage

■ **Resonant Compensation**

- Voltage and Current Stresses
- Loss / Lifetime Analysis

Obr. 4 Topologie a řešení Kolarova demonstrátoru – ZDROJ [17,18]



Obr. 5 Fyzické provedení a napěťové hladiny Kolarova 50kW demonstrátoru – ZDROJ [18]

Součástí každého takového systému je pochopitelně také řídicí elektronika, mikro-kontrolér a řídicí software. V této oblasti jsou výzkumné prameny již více strohé. Málokteré prameny toto uvádí jako celek [20-31] a těch, které pojednávají alespoň o části, není také mnoho. Částečně je aplikované řízení na Kolarově demonstrátoru naznačeno na Obr. 4 a v literatuře [17,18]. Trochu detailněji je pak toto řízení zachyceno v Patentu [19]. Literatury s podobnou strategií [22-23, 31] jsou spíše výjimkou poslední doby, výzkumníci aplikují převážně řízení změnou střídavosti střídače apod. [22,28], pomocí rekonfigurací obvodu [26,29,30], pomocí částečně aktivního usměrňovače [29] či pomocí řízení fázového posuvu napětí a proudu střídače [32].

Poznámka: Zatímco výkonové topologie jsou víceméně shodné napříč výzkumy, řízení a řídicí elektronika je zcela nejednotná. Je tedy nemístné zde uvádět jakýkoli obrázkový příklad...

Průzkumem současného stavu poznání lze výkonový bezdrátový přenos elektrické energie charakterizovat jako inovativní technologii s velkou perspektivou k budoucímu rozvoji. Současně lze říci, že jde o velmi mladou technologii posledních přibližně 10-ti let, která již dospěla k prvním komerčním aplikacím a výrobkům. Ty jsou zatím spíše výstředností a zdaleka nejsou plně konkurenceschopné dnešním řešením využívajících kabelového propojení nabíječky a vozidla. V dnešní době se právě první plně konkurenceschopné prototypy objevují mezi výzkumnými centry apod. Jak bylo uvedeno, jsou zdokonalovány všechny komponenty tak, aby byl maximalizován výkon, účinnost, bezpečnost a přidaná hodnota – například v podobě komfortu zcela bezobslužného provozu.

Představu o současném stavu poznání dokresluje také skutečnost existence prvních regulačních a normativních předpisů. Těch je v současnosti skutečně jen pár, což mladost a hloubkovou neznalost technologie jen potvrzuje. Mezi ty hlavní spadá SAE J2954 202010 [33], SAE J2847/6 202009 [34], které řeší přímo bezdrátové nabíjecí systémy elektromobilů a "ICIRP GUIDELINES for Limiting Exposure to Time-Varying electric and Magnetic Fields" [35], který je obecným předpisem ve vztahu elektromagnetického pole k lidskému zdraví. Tyto regulační a normativní předpisy jsou v disertační práci rovněž zohledněny a je na ně odkazováno.

1.3 Vymezení vůči systémům malých výkonů

Problematikou nízko-výkonových bezdrátových nabíjecích systémů se zabývá nepřehledné množství výrobců. Implementace těchto malých bezdrátových nabíječek je značně rozsáhlá napříč všemi možnými elektronickými zařízeními, ručním nářadím či malými dopravními prostředím. Zajímavostí je také implementace v přenosném elektrickém vybavení kuchyně.

Standardizované aplikace podléhají, pro své velké rozšíření a zajištění kompatibility napříč výrobci, podrobné a složité certifikaci na základě dvou hlavních organizací – „[Wireless Power Consortium](#)“ (QI) a „[Air Fuel Alliance](#)“ (AFA).

Nestandardizované aplikace, jako je například projekt RICE-Škoda Machine Tools (napájení a přenos dat senzorky rotujících částí strojů a zařízení) či RICE-AkuBech Power (nabíjení ručního nářadí s vysokou náročností na IP a prostory) přímo nespádají pod uvedené normalizační organizace ani pod normalizační předpisy výkonových systému bezdrátového přenosu. Takovéto aplikace je pak třeba řadit do třetí kategorie, která by měla splňovat EMC, hygienické limity, RF předpisy apod.

Jinými slovy, není-li požadována kompatibilita mezi zařízeními od různých výrobců, pak jsou uvedené certifikace nepodstatné a je třeba dodržet předpisy nadřazených norem. Obdobnou úvahu lze aplikovat i na vysokovýkonové aplikace. Půjde-li například o specifickou průmyslovou aplikaci, je možné se řídit nadřazenými normami, avšak půjde-li o aplikaci v elektro-mobilitě, pak je třeba dodržovat patřičné předpisy k ní se vztahující - např. SAE J2954 [33].

Náležitosti výkonových bezdrátových nabíjecích systémů pro elektro-mobilitu jsou diskutovány napříč touto disertační prací. Pro vymezení se vůči nízko-výkonovým aplikacím je možné uvést základní parametrizaci dle QI či AFA (viz. [Tab. III](#) a [Tab. IV](#)).

Tab. III Standarty nízko-výkonových bezdrátových přenosů energie – ZDROJ [64]

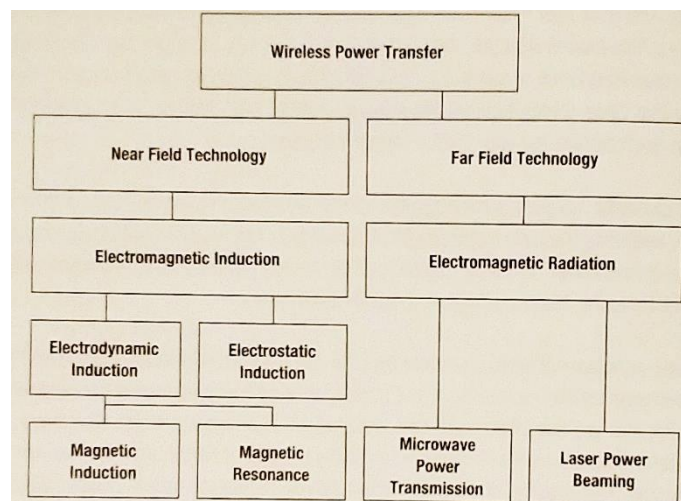
	AirFuel™ Alliance	Wireless Power Consortium
Výkon	1 W – 15 W / 70 W	5 W / 15 W / 60 W / 2,4 kW
Aplikace	Libovolná aplikace, libovolní umístění	Specifické umístění a aplikace
Vícenásobné nabíjení	Ano, včetně nerovnoměrného rozdělení výkonu	Jedno nabíjené zařízení v daný čas
Princip přenosu	Rezonanční	Induktivní, rezonanční
Komunikace	Nízko příkonové Bluetooth	Modulovaná na přenos výkonu (In-Band)

Tab. IV Základní charakteristika pro jednotlivé standardizace

AirFuel™ Alliance	Wireless Power Consortium
<p>Přenosová vzdálenost – až 50 mm</p> <p>Poloha Rx a Tx – dovoleno vyosení</p> <p>Jeden Tx může obsluhovat více Rx</p> <p>Frekvenční rozsah 6,78 MHz</p> <p>Komunikace v pásmu 2,4 GHz (BTLE)</p>	<p>Přenosová vzdálenost – až 10 mm</p> <p>Poloha Rx a Tx – přímo nad sebou</p> <p>Tx a Rx elementy jsou identické</p> <p>Pole přenosu musí být koncentrováno do prostoru mezi Rx a Tx</p> <p>Jeden Tx musí obsluhovat pouze jeden Rx</p> <p>Výkonové třídy 5, 15, 60 W a 2,4 kW</p> <p>Frekvenční rozsah 100 – 205 kHz (20-50 kHz pro 2,4 kW)</p> <p>Provedení cívek: vinuté na feritovém jádře / PCB provedení</p> <p>Komunikace modulovaná na výkonový přenos</p>

Z uvedených základních parametrů, především pak z přenosových vzdáleností a výkonových tříd, je zřejmá nevhodnost pro aplikaci v elektro-mobilitě.

Nízko-výkonovými systémy bezdrátového přenosu se zabývá publikace [64], která je velmi přehledně, detailně a dobře zpracovaná. Jako další informační zdroje lze použít internetové stránky organizací [QI](#) a [AFA](#).



Obr. 6 Technologie bezdrátového přenosu výkonu – ZDROJ [64]

1.4 Cíle disertační práce

Tato disertační práce zachycuje rozličné přístupy k výkonové topologii a řídicí struktuře, stejně tak, jako k aplikovanému řízení s cílem vymezit, upravit a vyvinout nejvhodnější výkonové a řídicí topologie a jejich kombinace pro následnou praktickou aplikaci v podobě experimentálního prototypu 65 kW bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů s maximalizovanou účinností, universalitou a praktičností. Přitom je využíváno vstupních poznatků ze studie současného stavu poznání uvedeného ve zkratce v předchozí [kapitole 1.2](#).

Pro udržení kvality práce a splnění hlavních cílů byly sestaveny dílčí cíle disertační práce:

- Souhrn topologií vazebných elementů, vytvoření simulačního modelu a definování vlastností.
- Výběr nejvhodnější topologie vazebných elementů a jejich aplikace v bezdrátové nabíjecí stanici.
- Definování variant výkonového a řídicího řetězce bezdrátové nabíjecí stanice, výběr té nejvhodnější varianty.
- Diskuze možných řídicích přístupů k bezdrátové nabíjecí stanici, definování té nejvhodnější a diskuze dopadů na bezdrátovou nabíjecí stanici.
- Ověření poznatků měření na experimentálním prototypu 65kW bezdrátové nabíjecí stanice pro elektromobily.

1.5 Metody řešení disertační práce

Tato disertační práce je členěna do sedmi hlavních kapitol, které se dále dělí na několik podkapitol tak, aby přehledně a srozumitelně obsáhli cíle této disertační práce.

[První kapitola](#) uvádí do dané problematiky a definuje její aktuální stav poznání, který je získán z rozboru literárních pramenů. Dále jsou v této kapitole vytyčeny hlavní cíle disertační práce, jejichž plnění je obsahem následujících kapitol.

[Druhá kapitola](#) pojednává o specifickém postupu návrhu bezdrátové nabíjecí stanice, definuje jednotlivé komponenty a ustanovuje názvosloví. Celkově tak zprostředkovává obecné názvosloví a postupy, které jsou během práce dodržovány. Součástí této kapitoly je i pohled na finální podobu optimalizované bezdrátové nabíjecí stanice pro elektromobily, která je použita pro porozumění následujícím kapitolám.

[Třetí kapitola](#) zprostředkovává velmi stručný pohled do normalizačních předpisů vztahujících se k bezdrátovým nabíjecím stanicím elektromobilů. Na základě několika konstatování v třetí kapitole je následně utvářena technická podoba zařízení.

[Čtvrtá kapitola](#) pojednává o bezdrátovém přenosu po fyzikální, respektive elektromagnetické, stránce. Definuje základní vlastnosti a charakteristiky pro různé topologie a konstrukce vazebných elementů. Hlavním výstupem čtvrté kapitoly je úplný a zjednodušený obvodový simulační model čtyř elementárních konfigurací vedených elementů a výběr nejvhodnější varianty pro vysoce výkonné systémy vhodné pro elektro-mobilitu.

[Pátá kapitola](#) využívá poznatků z kapitoly čtvrté a aplikuje je na systém bezdrátového přenosu elektrické energie. Přesněji řečeno, doplňuje vazebné elementy o základní a rozšiřující výkonovou a řídicí elektroniku potřebnou pro přenos elektrické energie vazebnými elementy a její úpravu. Rozšiřující část páté kapitoly je věnována řídicím přístupům k bezdrátové nabíjecí stanici, propojením s elektromobilem a uživatelem. Souhrnně se kapitola zabývá výkonovým řetězcem, řídicími topologiemi, jejich implementací v procesoru a jejich vlivem na parametry bezdrátové nabíjecí stanice.

[Šestá kapitola](#) diskutuje dílčí výsledky a technickou specifikaci vzniklého experimentálního prototypu 65 kW bezdrátové nabíjecí stanice. Na základě provedených měření na experimentálním prototypu je v této kapitole verifikováno navržené řízení a výkonový řetězec pro optimalizovanou bezdrátovou nabíjecí stanici.

Poslední [kapitola, sedmá](#), shrnuje hlavní poznatky a dosažená zlepšení. Jejím cílem je poskytnout velmi stručný přehled o výsledku této disertační práce a navrhnout perspektivní směry dalšího zkoumání. Součástí sedmé kapitoly je také vymezení přínosu autora této disertační práce k dosaženým výsledkům a prezentovanému obsahu.

2 Topologie bezdrátové nabíjecí stanice

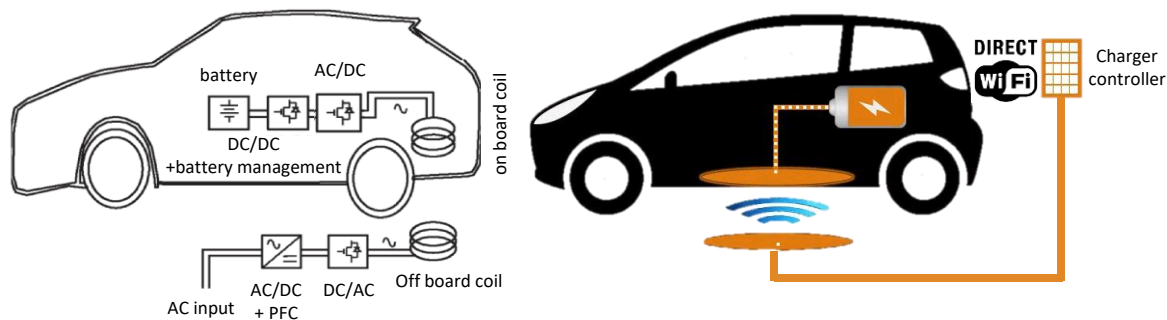
Bezdrátová nabíjecí stanice je komplexní multioborové zařízení, které ve své topologii snoubí polovodičové měniče, rozličné vazebné elementy mezi vysílací a přijímací stranou přenosu, mnoho možných řídicích topologií a jejich implementace a v neposlední řadě problematiku elektromagnetického pole, návrhu vazebných cívek a jeho vlivu na okolí a živé organismy.

Zcela populisticky lze bezdrátovou nabíjecí stanici ilustrovat pomocí [Obr. 7](#). Zde je také patrné její základní rozdělení na dvě části, tedy na „*on-board*“ a „*off-board*“ část. Trochu detailněji je bezdrátová nabíjecí stanice přiblížena na [Obr. 7](#) vlevo, kde je uvedena obvyklá skladba výkonového řetězce jednosměrné nabíjecí stanice. Jednotlivé komponenty jsou:

- AC/DC + PFC → vstupní usměrňovač s „Power Factor Correction“ (PFC)
- DC/AC → vstupní střídač
- Off-board coil → vazebný element na straně parkovacího stání
- On-board coil → vazebný element na straně vozidla
- AC/DC → výstupní usměrňovač
- DC/DC + battery management → měnič baterie

V případě obousměrné nabíjecí stanice je třeba zabezpečit jakousi symetrii výkonového řetězce podle rozhraní *on-board* a *off-board* části. Jednotlivé komponenty poté přecházejí do podob:

- VSAR → napěťový pulzní usměrňovač – režim usměrňovač / střídač
- DC-AC → napěťový střídač – režim střídač / synchronní usměrňovač
- Off-board coil → vazebný element na straně parkovacího stání
- On-board coil → vazebný element na straně vozidla
- AC-DC → napěťový střídač – režim synchronní usměrňovač / střídač
- DC-DC → obousměrný stejnosměrný měnič – režim snižující / zvyšující



Obr. 7 Bezdrátová nabíjecí stanice – populistická ilustrace – ZDROJ neznámý, obrázky google

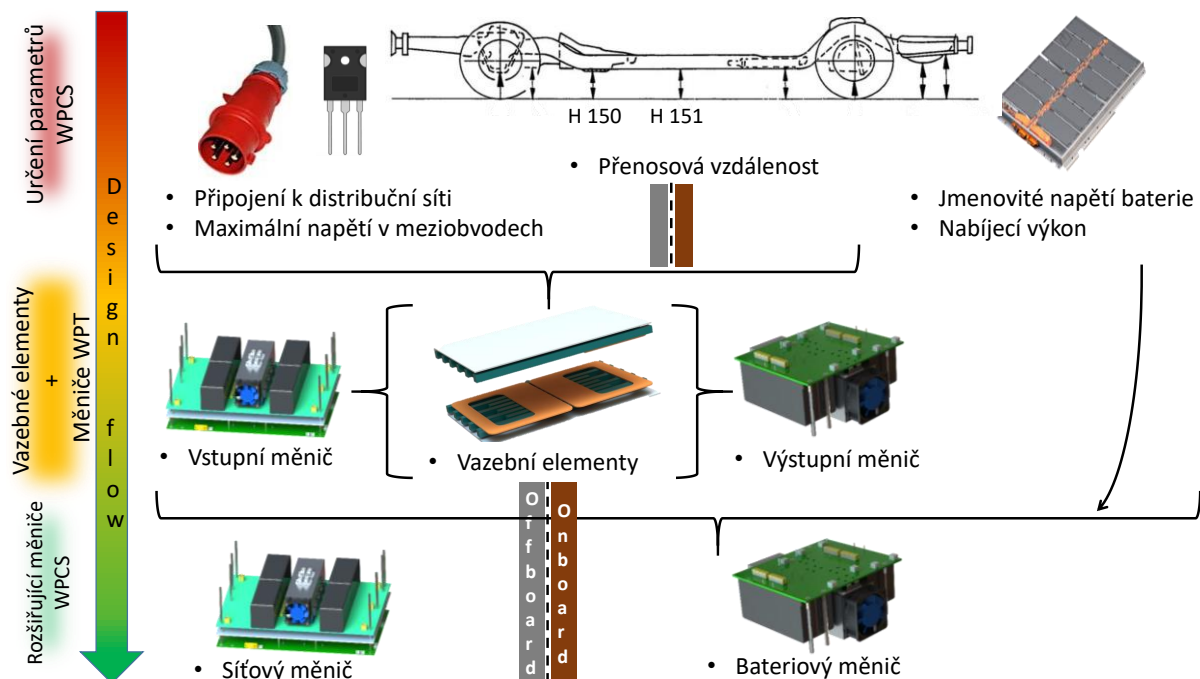
Návrh uvedeného výkonového řetězce, ať už jednosměrného, nebo obousměrného, je komplikovanou disciplínou, jejíž optimální postup je možné ilustrovat například pomocí [Obr. 8](#). Zde jsou patrná tři stádia návrhu:

- Definování cílených parametrů bezdrátové nabíjecí stanice (WPCS – wireless power charger station).**

Tento bod spočívá v definování požadovaných parametrů WPCS, tedy především v definování maximálního přenášeného výkonu a rozmezí přenosové vzdálenosti. Ve spojení s velikostí přenášeného výkonu je také nutné provést analýzu zdroje a zátěže, tedy možného připojení k elektrické síti a možných nabíjených baterií. Podrobněji je tento bod popsán v [kapitole 5](#).
- Návrh vazebných elementů a polovodičových měničů bezdrátového přenosu elektrické energie (WPT – wireless power transfer).**

Na základě stanovených požadovaných parametrů je možné provést návrh vazebných elementů a s tím spojené optimalizační procesy, kterými je docíleno vhodných rozměrů vazebných elementů, minimální váhy a ceny. Součástí návrhu vazebných elementů je také jejich mechanický a tepelný návrh. Na základě elektrického návrhu vazebných elementů je možné přistoupit k návrhu polovodičových měničů WPT, které jsou s vazebnými elementy úzce spjaty jak po stránce elektrické, tak po stránce mechanické. Podrobněji je tento bod popsán v [kapitole 4](#).
- Návrh polovodičových měničů bezdrátové nabíjecí stanice a baterie.**

Polovodičové měniče WPCS je možné označit jako jakési periférie WPT, kdy zprostředkovávají připojení WPCS k elektrické síti a nabíjené baterii. Obecně nemusejí být spjaty s vazebnými elementy, mohou být od vazebných elementů vzdálené apod. Detailněji je tento bod opět popsán v samostatné [kapitole 5](#).



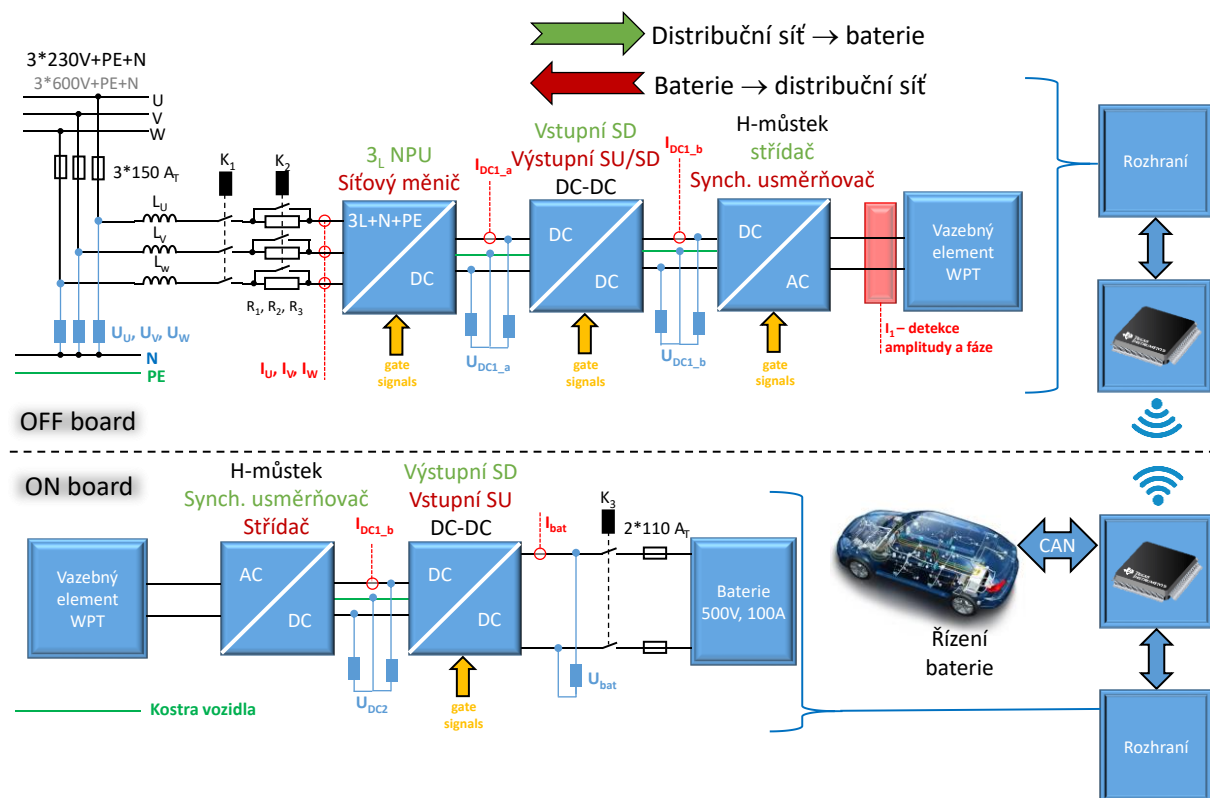
Obr. 8 Grafické znázornění postupu návrhu bezdrátové nabíjecí stanice pro elektro mobilitu

Pochopitelně je možné uvažovat o možných odlišných variantách výkonového řetězce. Z pohledu současného stavu věci je však prezentovaná varianta na [Obr. 7](#) tou nejnepohodnější. Její uvažované modifikace, z nichž některé byly aplikovány, jsou zachyceny v následujících kapitolách.









Otevře-li oblast řízení WPT a potažmo celé WPCS dospějeme k úplnému topologickému schématu WPCS uvedenému na [Obr. 9](#). Toto schéma je krom potřebných měřených veličin a řídicích signálů doplněno o modifikaci *off-board* části, která spočívá v zařazení DC-DC měniče mezi napěťový pulzní usměrňovač a vstupní střídač, což umožňuje řízení vstupního napětí od nulových hodnot. Důvod této modifikace je objasněn v [kapitole 5](#). Současně pak tato modifikace umožňuje plnohodnotný obousměrný chod WPCS.

Samotné regulační schéma, nejnepohodnější pro danou výkonovou topologii WPCS, je odvozeno z teoretických a praktických poznatků dosažených v průběhu řešení této práce. Jeho odvození a implementace je součástí samostatné [kapitoly 5](#). Finální podoba regulační strategie je pak naznačena na [Obr. 10](#). Uvedená regulační strategie zachycuje obousměrnou variantu WPCS umožňující režim „Vehicle to Grid“ a dosažení maximální možné účinnosti a ekonomické jednoduchosti.

Jiné topologie a strategie řízení jsou obsahem následujících kapitol, jakožto vědecky či technicky zajímavé řešení.



Obr. 9 Úplné topologické schéma WPCS

		Topologie	Regulační strategie	Regulovaná veličina	Akční veličina
Tok výkonu		3 fáze NPU Střídač	Aktivní	CC-CV $f_{grid} + R_{eqv}$	U_{DC1} f_m
		1_L SD/NC	Aktivní / NC	CC-CV / NC NC	U_{DC1} / NC NC
		H-můstek Střídač S. usměrňovač	Obdélník 25 – 50 % Obdélník, 50 %	f_0 Střída	f_{sw} PWM
					
		H-můstek S. usměrňovač Střídač	Obdélník, 50 % Obdélník 25 – 50 %	f_0	f_{sw}
		1_L SD/SU	Aktivní	Konstantní R_{eqvDC} U_{DC1}	Střída
					

CAN komunikace

Obr. 10 Aplikovaná regulační strategie obousměrné WPCS

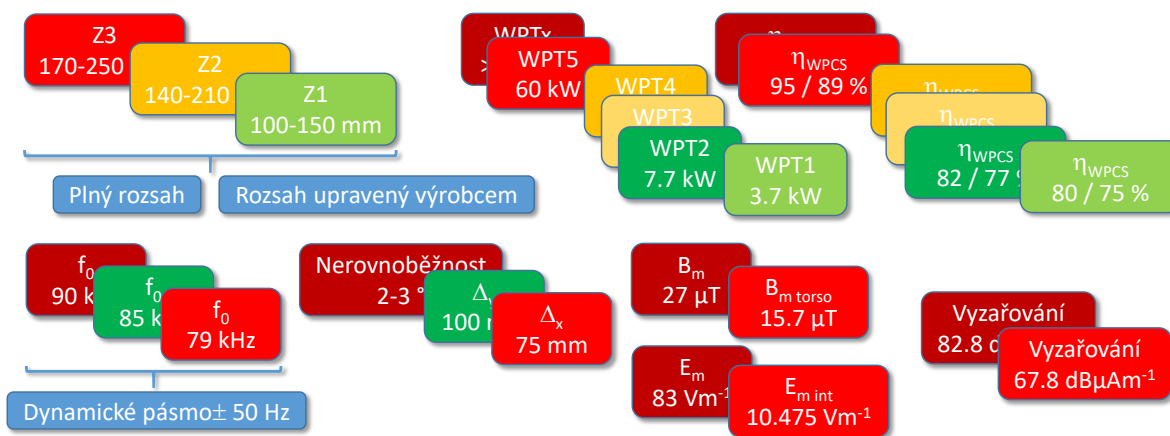
Základní legenda k obrázkům (též uvedeno v [seznamu symbolů a zkratk](#)): VSAR – voltage source active rectifier (napěťový pulzní usměrňovač) ; SD – step down DC-DC (snižující pulzní DC-DC) ; SU – step up (zvyšující pulzní DC-DC) ; NC – not connected (nezapojen) ; CC – CV – constant current – constant voltage charging cycle (cyklus nabíjení baterie – konstantní proud – konstantní napětí) ; f_m – frekvence modulovaného kmitočtu ; f_{sw} – spínací frekvence měniče ; f_0 – hlavní rezonanční frekvence ; sync. Rectifier – synchronní usměrňovač ; R_{ekv} – ekvivalentní zátěžný odpor WPT.

3 Normalizace WPT a WPCS v elektro-mobilitě

Bezdrátové nabíjecí stanice pro elektro-mobilitu nutně spadají pod vysokovýkonné systémy bezdrátového přenosu energie. Jako takové se neřídí standardy [QI](#) a [AFA](#), ale normou SAE J2954 - „Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment methodology“.

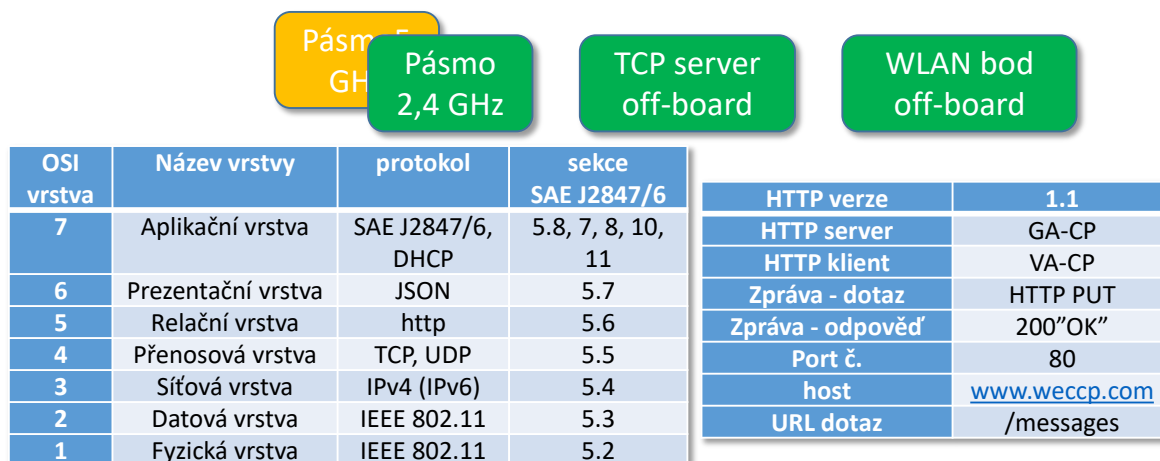
SAE J2954 [\[33\]](#) ([Příloha 1](#)) je hlavní norma zastřešující WPCS pro elektro-mobilitu. Mezi hlavní podružnou patří SAE J2847/6 [\[34\]](#) ([příloha 2](#)), která se zabývá komunikací mezi on-board a off-board stranou systému; mezi hlavní odkazovanou pak patří ICNIRP GUIDELINES [\[35\]](#) zabývající se vlivem EM pole na člověka (resp. živé organismy) ([Obr. 13](#)).

Základní požadavky na WPCS shrnuje [Obr. 11](#). Popis jednotlivých částí zprostředkovává [Příloha 1](#), jakožto výtah normy SAE J2954. Současně je třeba systém vybavit systémy FOD („foreign object detection“) a LOD („live object detection“) zajišťující bezpečnost provozu WPCS.



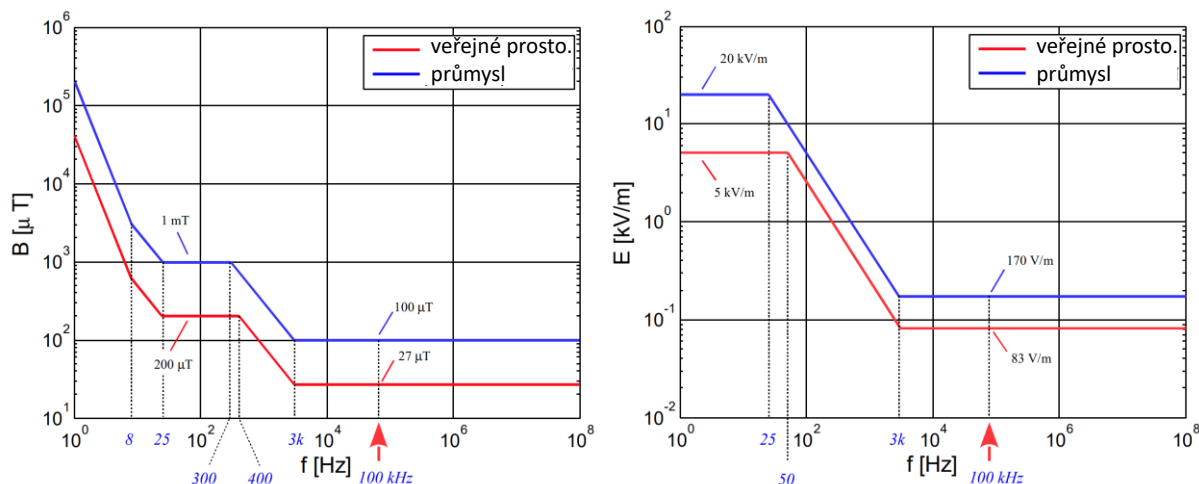
Obr. 11 Základní přehled o normalizaci dle SAE J2954

Z hlediska komunikace je normou stanovena WLAN ([Obr. 12](#)) – viz. [Příloha 2](#) a norma SAE J2847/6 [\[34\]](#). Detailní popis a pochopení předepsané komunikace není předmětem této disertační práce.



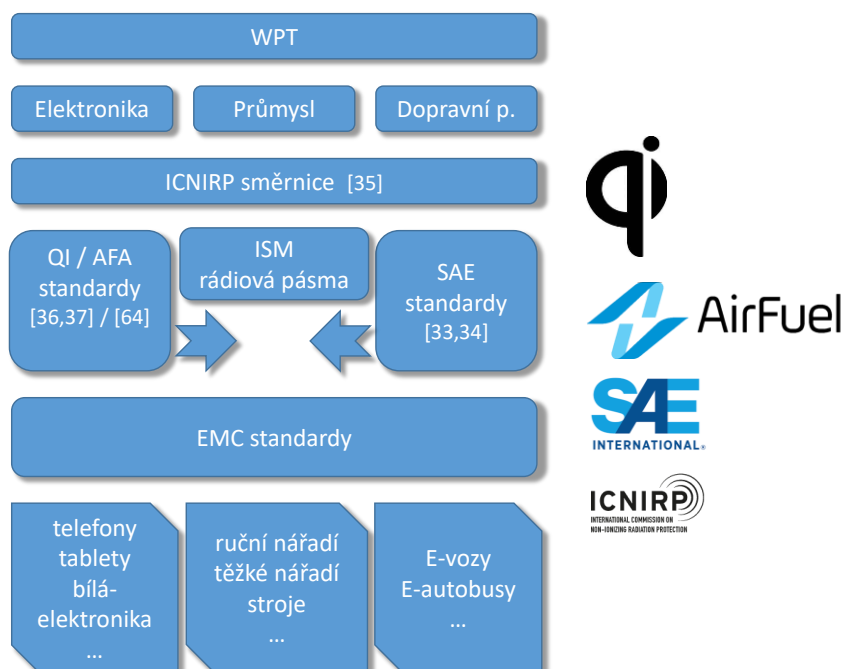
Obr. 12 Základní přehled nastavení komunikace dle SAE J2847/6

WPCS se dále řídí normou „ICNIRP GUIDELINES for Limiting Exposure to Time-Varying electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz)“, která definuje vliv neionizujícího záření na člověka a jeho hygienické limity, které WPT nesmí překročit. Jejich grafické znázornění; poskytuje [Obr. 13](#). Zpracování této normy ve vztahu k WPCS pro elektro-mobilitu je přehledně zapracované do SAE J2954.



Obr. 13 Limity magnetické indukce a intenzity elektrického pole (1 Hz – 100 kHz)

Vzniklý normalizační mix a odvětví bezdrátového přenosu energie, nabíjení a nabíjecích stanic vyobrazuje [Obr. 14](#). Pro potřeby této disertační práce, tedy pro potřeby WPCS v elektro-mobilitě postačuje jeho pravý sloupec. Zbýlé dva sloupce spadají pod nízko-výkonné systémy WPT (WPCS) dle [kapitoly 1.3](#).



Obr. 14 Normalizace ve WPT

4 Bezdrátový přenos elektrické energie - WPT

Pomineme-li normalizační problematiku, je možné WPT rozdělit na dvě podtémata a to na [vazební elementy](#) a [polovodičové měniče neoddělitelné od WPT](#) (polovodičové měniče WPT). Tyto podkapitoly přímo staví na normalizaci ve WPT z [kapitoly 3](#) a [Přílohy 1](#) a [Přílohy 2](#) této disertační práce.

4.1 Vazební elementy WPT

Vazební elementy pro vysoce výkonné systémy bezdrátového přenosu elektrické energie lze charakterizovat očekávanými vysokými provozními proudy, vysokým napětím a silným pracovním elektromagnetickým polem. Vzhledem k těmto kvantifikátorům lze usoudit na aplikaci základních principů vazby mezi elementy, tak, aby byla zajištěna nízká cena, dlouhá životnost a velká robustnost.

Obecně lze vazební elementy, respektive vazbu mezi elementy pro bezdrátový přenos elektrické energie, rozdělit podle fyzikálního principu na elementy využívající vazbu [mikrovlnnou](#), [kapacitní](#) nebo [induktivní](#), tak jak uvádí následující podkapitoly.

4.1.1 Mikrovlnná vazba

Mikrovlnné vazební elementy, lépe nazvané antény, přenášejí energii pomocí rádiových vln, které se velmi dobře šíří prostředím na velké vzdálenosti. Z principu je tedy přenos touto technologií možný jak na značné vzdálenosti, tak s předpokládanou vysokou účinností. Avšak skutečnost v podobě negativního vlivu rádiových vln na živé organismy uvedené výhody zcela poníží. Mikrovlnné vazební elementy jsou v oblasti vysoko-výkonových přenosů překonaným řešením.

Jedním možným příkladem může být nabíjecí stanice Volvo Technologies [38], jejíž přenášený výkon dosahoval 10 kW na přenosové vzdálenosti 4 m s dosahovanou přenosovou účinností 84 %.

4.1.2 Kapacitní vazba

Vazební elementy založené na kapacitní vazbě jsou jakýmsi protipólem k mikrovlnným, neboť se zde přenosová vzdálenost pohybuje maximálně v řádech nižších jednotek centimetrů. Právě na minimálních přenosových vzdálenostech jsou kapacitní vazby nenahraditelné, jako je tomu například v medicínském prostředí [39-43], či pro speciální elektroniku.

Protiklad k mikrovlnné vazbě tvoří vazba kapacitní také v oblasti EMC a ICNIRP, jelikož k přenosu elektrické energie zde dochází mezi dvěma elektrodami (např. jednoduché deskové topologie s plochou S) s malou vzájemnou vzdáleností (přenosovou vzdáleností td). Vzniklý „kondenzátor“ je navíc nutně vzduchový, což značně omezuje dosažitelné kapacity, podobně jako možné rozměry samotných elektrod, jež se musejí podříditi napájenému zařízení. Dosahované kapacity ([rov. 1](#)) jsou tedy v řádu pF.

Pokud aplikujeme základní definici výkonu a upravíme ji pro kapacitní vazbu, dostaneme maximální teoretický přenášený výkon ([rov. 2](#)). Jak je zřejmé, pro malé dosahované kapacity bude i přenášený výkon značně malý. Rozšíříme-li rovnici o úplné náhradní schéma

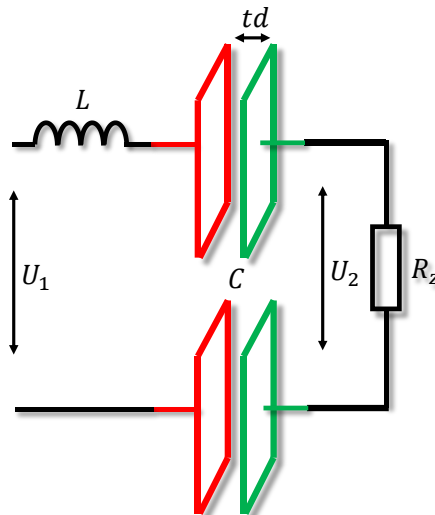
bezdrátového přenosu elektrické energie s kapacitní vazbou, pak dostaneme celkový maximální přenositelný výkon jako (rov. 3).

Kompenzační indukčnost (rezonanční) je značena jako L a celkový (i parazitní) odpor jako R . Vzniklá hlavní rezonanční frekvence sériové LCRC kombinace je pak značen jako ω . Principiálně je obvod naznačen na Obr. 15.

$$C = \frac{\epsilon S}{td} \quad \text{rov. 1}$$

$$P_{C \max} \approx 2\omega CU^2 \quad \text{rov. 2}$$

$$P_{\max} = \frac{\omega CU^2 \left(\sqrt{4 + \omega^2 C (R^2 C + L(LC\omega^2 - 4))} - \omega RC \right)}{2(\omega^2 LC - 2)^2} \quad \text{rov. 3}$$



Obr. 15 Principiální schéma kapacitní vazby

Dosahované přenositelné výkony pomocí kapacitní vazby jsou tedy velmi malé a to i ve stavu přesné rezonance. Podobný postup je možné provést také pro základní vztah účinnosti, který též vede na neuspokojivé výsledky. Účinnosti kapacitních vazeb se pohybují jen okolo 50 %.

Z těchto důvodů je kapacitní vazba zcela neaplikovatelná ve výkonových systémech pro elektro-mobilitu.

4.1.3 Induktivní vazba

Posledním známým principem vazby mezi vysílacím a přijímacím elementem je vazba induktivní. Je založena na principu vzduchového transformátoru s velmi těsnou magnetickou vazbou [44-47]. Jinými slovy jde o bezkontaktní konektorové propojení, v literatuře označované jako „Cordless charging“, které je naznačené na [Obr. 16](#).



Obr. 16 Bezdrátové nabíjení založené na induktivní vazbě – ZDROJ vlevo[48], vpravo [49]

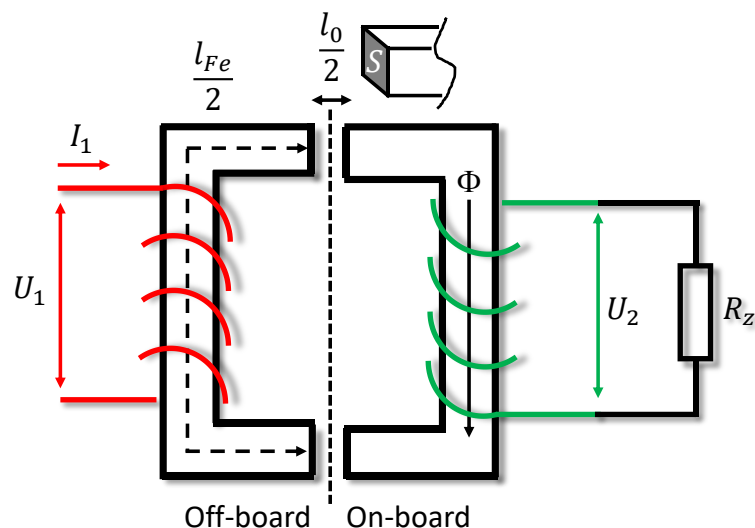
Základním principem je tedy zákon elektromagnetické indukce, který staví na znalosti indukčního toku magnetickým obvodem. Pokud zanedbáme reálné rozptylové toky a uvážíme harmonické napájení, pak můžeme na základě Hopkinsonova zákona uvést velikost indukčního toku jako ([rov. 4](#)), kde je jasně patrný nepříznivý vliv vzduchové mezery. Při definování teoretických možností WPT s induktivní vazbou je možné uvést maximální teoretický výkon dosažitelný z indukovaného napětí jako ([rov. 5](#)), kde je vliv vzduchové mezery ještě více citelný, podobně jako v případě teoretické účinností ([rov. 6](#)).

$$\Phi_{(t)} = \frac{\mu_0 S}{l_0 + \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}}} N I_m \sin(\omega t) \quad \text{rov. 4}$$

$$P_{max} = \frac{1}{R_z} \left(\frac{d\Phi_{(t)}}{dt} \right)^2 = \frac{1}{R_z} \left[\frac{S \mu_0}{\left(l_0 + \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}} \right)} N \omega I_m \right]^2 = \frac{1}{R_z} d^2 \quad \text{rov. 5}$$

$$\eta = \frac{d^2}{R_z U_1 I_1} \quad \text{rov. 6}$$

Schematicky je situace naznačena na [Obr. 17](#), který zároveň poskytuje výklad použitých proměnných v předešlých rovnicích. Používaný pojem přenosová vzdálenost td je shodný s parametrem $\frac{l_0}{2}$.



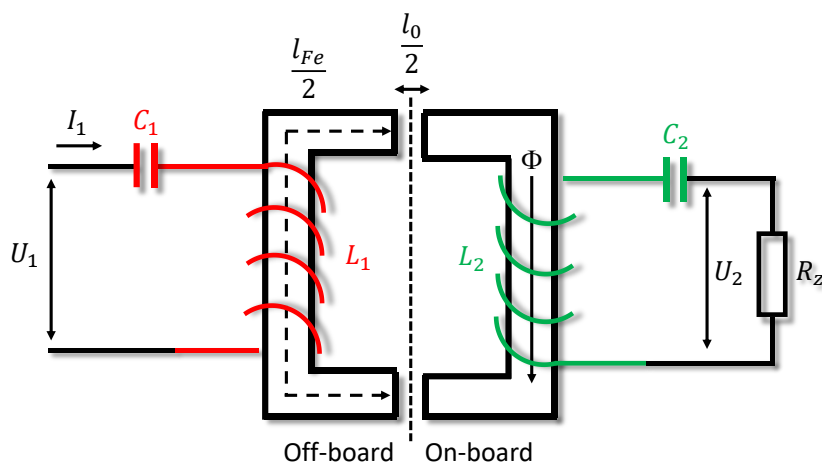
Obr. 17 Principiální schéma indukční vazby

Při minimalizaci vzduchové mezery jsou výkony přenositelné indukční vazbou velké, podobně jako je velká i teoretická účinnost přenosu. Při požadavku na zvětšení vzduchové mezery se však situace obrací a je třeba přejít k indukční rezonanční vazbě či inovativním odvozeným topologiím indukční vazby.

4.1.4 Indukční rezonanční vazba

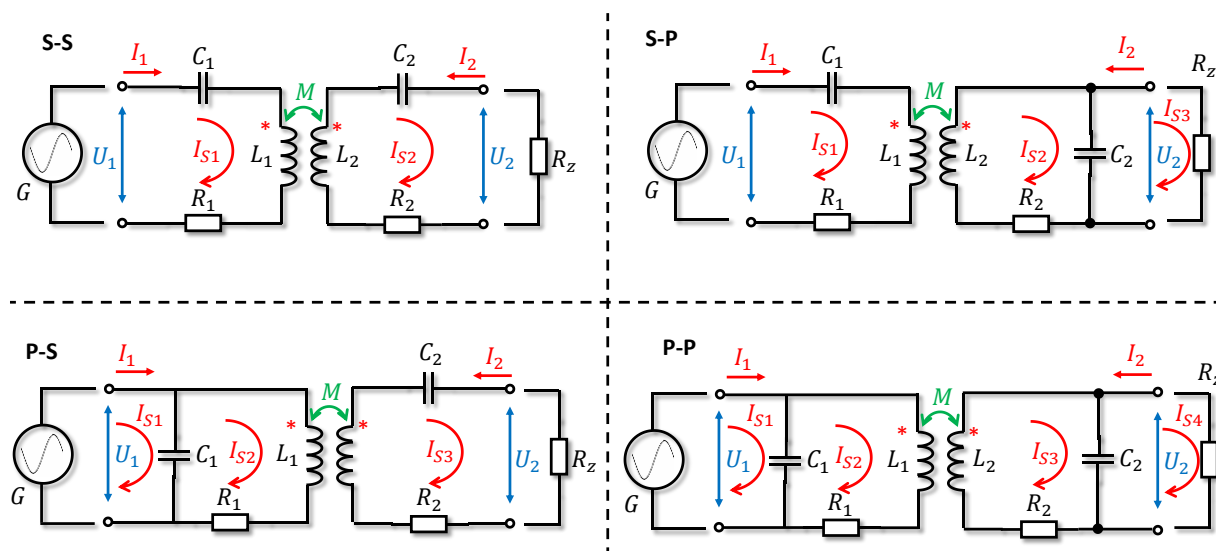
Jde o vazbu založenou na indukční vazbě, která využívá principů rezonance ke kompenzaci jalové složky proudu vazebné indukčnosti. Ke kompenzaci se používají vysokojakostní kondenzátory v různých spojeních s vazebnými elementy.

Rezonanční vazba je tak nejvhodnější pro aplikace v elektro-mobilitě [51-52], kde je požadavek na velké přenášené výkony, účinnost a přenosovou vzdálenost. Principiálně je indukční rezonanční vazba naznačena na Obr. 18. Její možné provedení lze rozdělit na čtyři základní topologie a nepřehledné množství odvozených topologií.



Obr. 18 Principiální schéma indukční rezonanční vazby v sériově sériové topologii

Základní topologie induktivní rezonanční vazby jsou sériově-sériová (S-S), sériově-paralelní (S-P), paralelně-sériová (P-S) a paralelně-paralelní (P-P). Jejich elektrická schémata jsou zachycena na [Obr. 19](#). Zmíněné odvozené topologie jsou pak vždy modifikací, která danou základní topologii rozšiřuje o indukčnost (indukčnosti) či kondenzátor (kondenzátory) nebo o jejich kombinace. Abychom mohli přistoupit k úvahám o možných odvozených topologiích, je třeba blíže popsat ty základní.



Obr. 19 Základní topologie induktivní rezonanční vazby

Hlavní indukčnosti L_1 a L_2 představují vazebné indukčnosti, jejichž proud je kompenzován kondenzátory C_1 a C_2 . Celkový parazitní odpor, který vytváří tepelné ztráty, je reprezentován prvky R_1 a R_2 . Zátěž přenosu elektrické energie mezi vazebnými elementy představuje odpor R_z . Vazba mezi primárním a sekundárním vazebným elementem je dána vzájemnou indukčností M , ovlivněnou především činitelem vazby ([rov. 7](#)).

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{M}{L} ; L_1 = L_2 \quad \text{rov. 7}$$

Zcela elementární úvahou je zavedení matematického popisu jednotlivých konfigurací, které bude dále možné využít v návrhových a simulačních postupech.

4.1.4.1 S-S kompenzace

S-S kompenzaci je možné popsat pomocí smyčkových proudů dle ([rov. 8](#)), jejím aplikováním na obvod S-S kompenzace dostaneme rovnice vazby v časové oblasti ([rov. 9](#)), které je možné dále upravit pomocí symbolicko-komplexní metody (SKM) do maticového tvaru ([rov. 10](#)).

$$\begin{aligned} i_{s1}(t) &= i_1(t) \\ i_{s2}(t) &= -i_2(t) \end{aligned} \quad \text{rov. 8}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_1} \int_0^T i_{s1(t)} dt + u_{c1(0)} + L_1 \frac{di_{s1(t)}}{dt} - M \frac{di_{s2(t)}}{dt} + R_1 i_{s1(t)} - u_1(t) &= 0 \\ \frac{+1}{C_2} \int_0^T i_{s2(t)} dt - u_{c2(0)} + L_2 \frac{di_{s2(t)}}{dt} - M \frac{di_{s1(t)}}{dt} + R_2 i_{s2} + R_2 i_{s2} &= 0 \end{aligned} \quad \text{rov. 9}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{s1} \\ \bar{I}_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 - \frac{j}{\omega C_1} & -j\omega M \\ -j\omega M & R_1 + R_2 + j\omega L_2 - \frac{j}{\omega C_2} \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{rov. 10}$$

Dále je možné vazbu popsat pomocí impedance vztažené k napájecímu zdroji G ([rov. 11](#)), díky čemuž je možné snadno odvodit chování vazby v různých provozních podmínkách.

$$\begin{aligned} Z_{cn} &= \\ &= \frac{j - C_2 R_z (2\pi f_0) - j(C_1 L_1 + C_2 L_2)(2\pi f_0)^2 + C_1 C_2 R_z R_1 (2\pi f_0)^3 + j C_1 C_2 (L_1 L_2 - M^2)(2\pi f_0)^4}{C_1 2\pi f_0 (C_2 2\pi f_0 (L_2 2\pi f_0 - j R_z) - 1)} \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Rov.} \\ 11 \end{array}$$

Jelikož se jedná o induktivní rezonanční vazbu, je třeba správně stanovit rezonanční kmitočet a velikost kompenzačních kondenzátorů. Zavedeme-li základní zjednodušení výkonového systému v S-S topologii ([rov. 12](#)), můžeme pro hlavní rezonanční kmitočet psát [rov. 13](#) a pro postranní rezonanční kmitočty [rov. 14](#).

$$\begin{aligned} L_1 &= L_2 = L \\ C_1 &= C_2 = C \\ R_1 &= R_2 = R \end{aligned} \quad \text{rov. 12}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{rov. 13}$$

$$\begin{aligned} f_{01} &= \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+M)C}} \\ f_{02} &= \frac{1}{2\pi\sqrt{(L-M)C}} \end{aligned} \quad \text{rov. 14}$$

Pokud se na stanovení rezonančního kmitočtu podíváme z pohledu impedancí, platí pro velikost sekundárního kompenzačního kondenzátoru [rov. 15](#), avšak z pohledu primárního kompenzačního kondenzátoru (tedy z pohledu celého obvodu, nikoliv jen sekundární části) se situace značně komplikuje do podoby [rov. 16](#). Dosazením rov. 15 do rov. 16 dostaneme velikost C_1 nezávisle na frekvenci napájecího zdroje ([rov. 17](#)).

$$C_2 = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_2} \quad \text{rov. 15}$$

$$\begin{aligned} \text{Im}\{Z_{cn}\} = 0 \rightarrow C_1 = & \\ = \frac{1 + C_2(2\pi f_0)^2 (C_2 R_z^2 + L_2(C_2 L_2(2\pi f_0)^2 - 2))}{L_1(2\pi f_0)^2 + C_2(M^2 + C_2 L_1 R_z^2 - 2L_1 L_2)(2\pi f_0)^4 + L_2 C_2^2(L_1 L_2 - M^2)(2\pi f_0)^6} & \text{rov. 16} \end{aligned}$$

$$C_1 = \frac{C_2 L_2}{L_1} \quad \text{rov. 17}$$

Platí-li (rov. 15-17) je zřejmé, že u S-S konfigurace je primární a sekundární kondenzátor totožný ve všech provozních režimech. Je tedy nezávislý na přenosové vzdálenosti či vyosení (td) a velikosti zátěže (R_z). To se pochopitelně jeví jako velká výhoda oproti ostatním třem základním topologiím – viz kapitoly [4.1.4.2](#) až [4.1.4.4](#).

4.1.4.2 S-P konfigurace

Podobný postup jako u S-S kompenzace (topologie) je možné aplikovat i pro S-P topologii, kde z metody smyčkových proudů (dle [rov. 18](#)) vychází soustava rovnic v časové oblasti ([rov. 19](#)). Aplikací SKM následně dospějeme k maticovému zápisu dle [rov. 20](#).

$$\begin{aligned} i_{s1}(t) &= i_1(t) \\ i_{s2}(t) &= -i_2(t) \\ i_{s3}(t) &= -i_2(t) \end{aligned} \quad \text{rov. 18}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_1} \int_0^T i_{s1}(t) dt + u_{c1(0)} + L_1 \frac{di_{s1}(t)}{dt} - M \frac{di_{s2}(t)}{dt} + R_1 i_{s1}(t) - u_1(t) &= 0 \\ \frac{1}{C_2} \int_0^T i_{s2}(t) - i_{s3}(t) dt + U_{C2(0)} + L_2 \frac{di_{s2}(t)}{dt} - M \frac{di_{s1}(t)}{dt} + R_2 i_{s2}(t) &= 0 \\ \frac{1}{C_2} \int_0^T i_{s3}(t) - i_{s2}(t) dt + U_{C2(0)} + R_z i_{s3}(t) &= 0 \end{aligned} \quad \text{rov. 19}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{s1} \\ \bar{I}_{s2} \\ \bar{I}_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 - \frac{j}{\omega C_1} & -j\omega M & 0 \\ -j\omega M & R_2 + j\omega L_2 - \frac{1}{j\omega C_2} & \frac{j}{\omega C_2} \\ 0 & \frac{j}{\omega C_2} & R_z - \frac{j}{\omega C_2} \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{rov. 20}$$

S-P konfiguraci je také možné popsat pomocí impedanční rovnice z pohledu zdroje ([rov. 21](#)). Sekundární kompenzační kapacita se řídí Thomsonovým vztahem, avšak kapacitu primární je třeba stanovit jako kompenzační pro celý obvod, musí tedy platit [rov. 22](#) – [rov. 23](#).

$$Z_{cn} = \frac{-j}{\omega C_1} - j\omega \left(\frac{M^2 \omega (C_2 R_z \omega - j)}{C_1 (C_2 L_2 \omega^2 - 1) - j\omega L_2} \right) \quad \text{rov. 21}$$

$$\begin{aligned} \text{Im}\{Z_{cn}\} = 0 \rightarrow C_1 &= \\ &= \frac{L_2^2 \omega^2 + R_z^2 (C_2 L_2 \omega^2 - 1)^2}{L_1 \omega^2 (L_2^2 \omega^2 + R_z^2 (\omega^2 C_2 L_2 - 1)) - \omega^4 M^2 (L_2 \omega^2 C_2^2 R_z^2 + L_2 - C_2 R_z^2)} \end{aligned} \quad \text{rov. 22}$$

$$C_1 = \frac{C_2 L_2^2}{L_1 L_2 - M^2} \quad \text{rov. 23}$$

Jak je z [rov. 23](#) patrné, primární kompenzační kapacita je při S-P kompenzaci závislá na vzájemné indukčnosti a tím pádem také na činiteli vazby a vzájemné poloze obou elementů. V konečném důsledku je S-P vazba náchylná na velikost přenosové vzdálenosti td a vzájemnému vyosení vysílacího a přijímacího elementu ($\Delta X, \Delta Y, \dots$).

I v případě S-P konfigurace jsou uvažovány totožné elementy na on-board a *off-board* straně a [rov. 12](#) – [rov. 14](#) tedy zůstávají v platnosti.

4.1.4.3 P-S konfigurace

Podobný postup je možné aplikovat i pro kompenzace paralelní na vstupu. Pro P-S kompenzaci platí metoda smyčkových proudů dle [rov. 24](#) – [rov. 25](#), kterou je možné upravit pomocí SKM do maticového tvaru ([rov. 26](#)).

$$\begin{aligned} i_{s1}(t) &= i_1(t) \\ i_{s2}(t) &= i_{12}(t) \\ i_{s3}(t) &= -i_3(t) \end{aligned} \quad \text{rov. 24}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_1} \int_0^T i_{s1}(t) - i_{s2}(t) dt + U_{C1(0)} - u_{1(t)} &= 0 \\ \frac{-1}{C_1} \int_0^T i_{s1}(t) - i_{s2}(t) dt - U_{C1(0)} + L_1 \frac{di_{s2}(t)}{dt} - M \frac{di_{s3}(t)}{dt} + R_1 i_{s2}(t) &= 0 \\ \frac{1}{C_2} \int_0^T i_{s3}(t) dt + U_{C2(0)} + L_2 \frac{di_{s3}(t)}{dt} - M \frac{di_{s1}(t)}{dt} + R_2 i_{s3}(t) + R_z i_{s3}(t) &= 0 \end{aligned} \quad \text{rov. 25}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{s1} \\ \bar{I}_{s2} \\ \bar{I}_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{j}{\omega C_1} & \frac{j}{\omega C_1} & 0 \\ \frac{j}{\omega C_1} & R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) & -j\omega M \\ 0 & -j\omega M & R_2 + R_z + j\left(\omega L_2 - \frac{j}{\omega C_2}\right) \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{rov. 26}$$

Vyjádření celkové impedance P-S kompenzace z pohledu zdroje je odvozeno v [rov. 27](#). Její úpravou pro úplnou kompenzaci obvodu dostaneme vztah pro primární kompenzační kapacitu ([rov. 28](#)), kterou je možné dále upravit do tvaru nezávislého na kmitočtu a posléze doplnit o podmínku shodných elementů. Dostaneme tak základní vztah pro stanovení velikosti primární kapacity ([rov. 29](#)). Sekundární kapacita se opět řídí Thomsonovým vztahem.

$$Z_{cn} = \frac{L_1 C_2 R_z \omega^2 - j\omega L_1 + jC_2 \omega^3 (L_1 L_2 - M^2)}{L_1 C_1 \omega^2 - C_2 \omega (\omega L_2 + C_1 \omega^3 (M^2 - L_1 L_2) + jL_1 C_1 R_z \omega^2 - jR_z) - 1} \quad \text{rov. 27}$$

$$\begin{aligned} \text{Im}\{Z_{cn}\} = 0 &\rightarrow C_1 = \\ &= \frac{L_1 C_2 \omega^2 (C_2 L_1 R_z^2 + M^2 - 2L_1 L_2) + C_2 \omega^4 (L_1 L_2 - M^2)}{L_1^2 \omega^2 + L_1 C_2 \omega^4 (C_2 L_1 R_z^2 + 2M^2 - L_1 L_2) + C_2 \omega^6 (-L_1 L_2 + M^2)^2} \end{aligned} \quad \text{rov. 28}$$

$$C_1 = \frac{C_2 L_2}{L_1 + \frac{M^4}{L_1 L_2 C_2 R_z^2}} \rightarrow C_1 = \frac{L^3 C_2^2 R_z^2}{L^3 C_2 R_z^2 + M^4} \approx \frac{k_1 R_z^2}{k_2 R_z^2 + M^4} \quad \text{rov. 29}$$

Jak je patrné z [rov. 29](#), tak P-S kompenzace vykazuje primární kompenzační kapacitu závislou nejen na vzájemné indukčnosti, ale také na velikosti zátěžného odporu. Tímto se P-S kompenzace jeví jako prozatím nejméně výhodná.

4.1.4.4 P-P konfigurace

Zcela analogicky dostaneme základní rovnice také pro P-P kompenzaci, tedy rovnice z aplikace smyčkových proudů v časové oblasti ([rov. 30](#) – [rov. 31](#)), které je možné upravit metodou SKM do maticového tvaru ([rov. 32](#))

$$\begin{aligned} i_{s1}(t) &= i_1(t) \\ i_{s2}(t) &= i_{12}(t) \\ i_{s3}(t) &= -i_{22}(t) \\ i_{s4}(t) &= -i_2(t) \end{aligned} \quad \text{rov. 30}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_1} \int_0^0 i_{s1}(t) - i_{s2}(t) dt + u_{C1}(t) - u_{1(t)} &= 0 \\ \frac{-1}{C_1} \int_0^0 i_{s1}(t) - i_{s2}(t) dt - u_{C1}(t) + R_1 i_{s2}(t) + L_1 \frac{di_{s2}(t)}{dt} - M \frac{di_{s3}(t)}{dt} &= 0 \\ \frac{1}{C_2} \int_0^0 i_{s3}(t) - i_{s4}(t) dt + u_{C2}(t) + R_2 i_{s3}(t) + L_2 \frac{di_{s3}(t)}{dt} - M \frac{di_{s2}(t)}{dt} &= 0 \\ \frac{-1}{C_2} \int_0^0 i_{s3}(t) - i_{s4}(t) dt + u_{C2}(t) + R_z i_{s4}(t) &= 0 \end{aligned} \quad \text{rov. 31}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{s1} \\ \bar{I}_{s2} \\ \bar{I}_{s3} \\ \bar{I}_{s4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{j}{\omega C_1} & \frac{j}{\omega C_1} & 0 & 0 \\ \frac{j}{\omega C_1} & R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) & -j\omega M & 0 \\ 0 & -j\omega M & \frac{j}{\omega C_2} & 0 \\ 0 & 0 & R_z - \frac{j}{\omega C_2} & \frac{j}{\omega C_2} \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{rov. 32}$$

Impedance vyjádřená ke svorkám zdroje ([rov. 33](#)) je upravena podmínkou na vykompenzovaný obvod, čímž je možné stanovit velikost primárního kompenzačního kondenzátoru ([rov. 34](#)). Úpravou ([rov. 34](#)) je možné odvodit vztah nezávislý na kmitočtu a dále jej upravit pro případ shodných elementů ([rov. 35](#)).

$$Z_{cn} = \frac{j\omega L_1 R_z + \omega^3(M^2 - L_1 L_2) + jC_2 R_z \omega^3(M^2 - L_1 L_2)}{R_z + j\omega(L_2 + C_1 M^2 \omega^2 - C_1 L_1 L_2 \omega^2) - R_z \omega^2(C_1 L_1 + C_2 L_2) + C_1 C_2 R_z \omega^4(L_1 L_2 - M^2)} \quad \text{rov. 33}$$

$$\begin{aligned} \text{Im}\{Z_{cn}\} = 0 &\rightarrow C_1 = \\ &= \frac{L_1(L_2^2 \omega^2 + R_z^2(C_2 L_2 \omega^2 - 1)^2) - M^2 \omega^2(L_2 + L_2 C_2^2 R_z^2 \omega^2 - C_2 R_z^2)}{L_1^2 R_z^2 \omega^2 + \omega^4(L_1 L_2 - M^2)(L_1 L_2 - 2L_1 C_2 R_z^2 - M^2) + C_2^2 R_z^2 \omega^6(M^2 - L_1 L_2)} \end{aligned} \quad \text{rov. 34}$$

$$C_1 = \frac{C_2 L_2^2 (L_1 L_2 - M^2)}{(L_1 L_2 - M^2)^2 + \frac{C_2 R_Z^2 M^4}{L_2}} \rightarrow C_1 = \frac{L^4 (LC - M^2)}{L^4 + M^2 (M^2 + CR_Z^2 M^2 - 2L^2)}$$

rov.
35

Jak je patrné z [rov. 35](#), tak P-P kompenzace vykazuje primární kompenzační kapacitu závislou nejen na vzájemné indukčnosti, ale také na velikosti zátěžného odporu. Tímto se P-P kompenzace jeví také jako nejméně výhodná.

4.2 Základní model vazebných elementů

Tato kapitola si klade za cíl detailnější rozbor vlastností základních topologií induktivně rezonanční vazby pomocí modelů založených na odvozených rovnicích v prostředí [Matlab R2020b](#) (Matlab-Script). Aby bylo možné k takovému modelování přistoupit, je třeba jej svázat s nějakou, alespoň ilustrativní, sestavou vazebných elementů. V případě této disertační práce je za tímto účelem použit experimentální prototyp 65kW WPT o parametrech dle [Tab. V](#).

Tab. V Základní parametry experimentálního prototypu 65 kW WPT

Parametr	Hodnota	Jednotka
L_1, L_2	120	μH
C_1, C_2	30	nF
R_1, R_2	76	$\text{m}\Omega$
f_0	83,882	kHz
f_{01}	74,14	kHz
f_{02}	98,86	kHz
k	0,28	-
M	33,60	μH

Uvedený experimentální prototyp není svázán jen s touto kapitolou, ale slouží jako pomůcka napříč celou disertační prací, která problém nejprve jmenuje, poté teoreticky popisuje a následně aplikuje na uvedeném experimentálním prototypu.

První pokusy s WPT byly prováděny na systému o přenosové frekvenci 235 kHz, jelikož v tehdejší době byly vztažné normy SAE J2954 ještě v nedohlednu. Později, když zmíněné normy vstoupily v platnost, byl již systém na 235 kHz odměřen a nasimulován. Bylo jej tedy třeba přezkoumat pro oblast nižšího pracovního kmitočtu 85 kHz a vyššího výkonu (5 kW \rightarrow 65 kW). Tento, z vnějšku částečně nucený, vývoj však přinesl jakési hlubší poznání charakteristického chování vazebných elementů a udal potřebu vytvoření nástrojů pro mnohem konkrétnější návrh WPT.

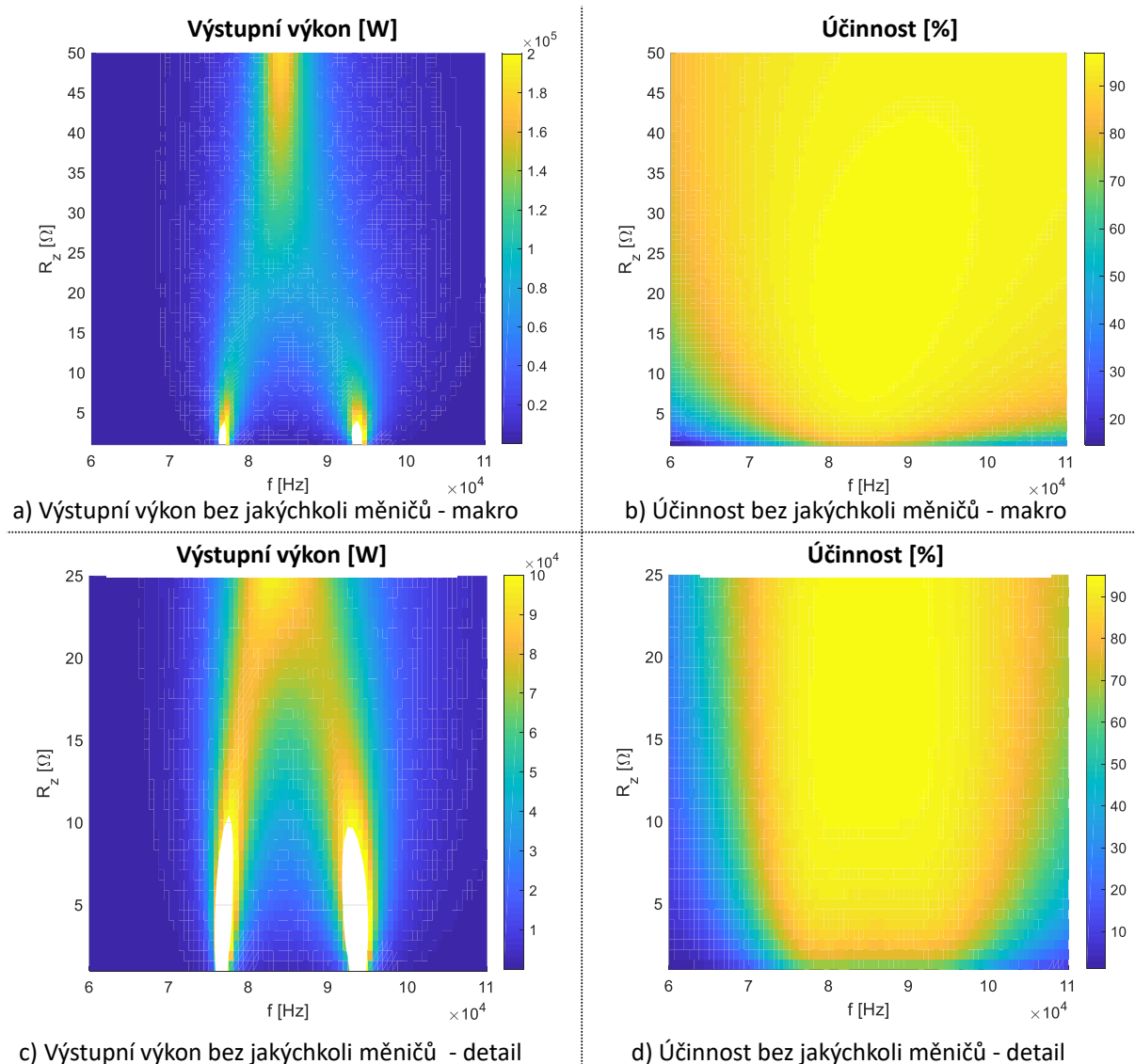
Podoba základních modelů, měření a závěrů z uvedených začátků jsou obsahem tezí k této disertační práci a publikační činnosti vztahující se k tématu této disertační práce.

Tato disertační práce z uvedených publikací a poznatků pochopitelně vychází.

Vytvořením simulačního modelu vazebných elementů pomocí přímého řešení rov. [10](#), [20](#), [26](#), [32](#) je možné získat základní grafickou představu o jejich vlastnostech. Při řešení byly použity vnější obvodové parametry dle [Tab. VI](#), které byly dále zúženy pro vyšší přehlednost [Obr. 20](#) – [Obr. 23](#)). Uvedené obrázky zachycují postupně pro S-S, S-P, P-S a P-P závislosti výkonu a přenosové účinnosti na proměnném zátěžném odporu R_z a frekvenci napájecího napětí f .

Tab. VI Vnější obvodové parametry základního modelu vazebných elementů

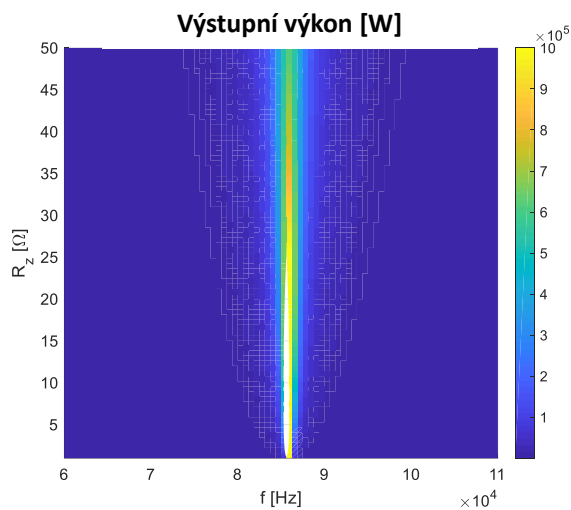
Parametr	Hodnota	Jednotka
U_1	1500	V
f	60 - 110	kHz
R_z	1 - 100	Ω



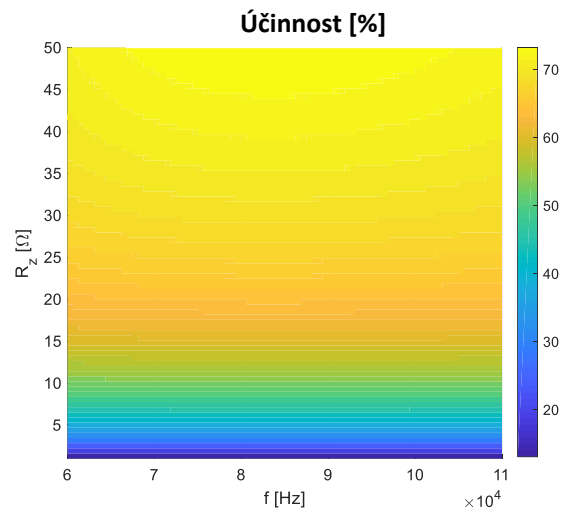
Obr. 20 Základní model vazebných elementů S-S konfigurace

[Obr. 20](#) zachycuje základní vlastnosti S-S konfigurace vazebných elementů. V části *a)* je uvedena závislost výstupního výkonu v celkovém pohledu. Část *c)* pak zachycuje detail v běžné provozní oblasti, jež je odvozena později. Pravou polovinu Obr. 20 tvoří vyobrazení přenosové účinnosti - část *b)* zachycuje opět celkový pohled a část *d)* detailní pohled na oblast reálného provozu.

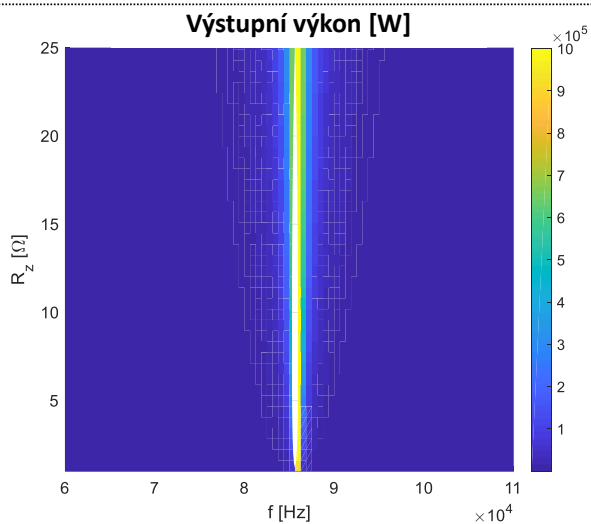
Z Obr. 20 je možné usoudit na vysokou přenosovou účinnost nezávislou na zátěžném odporu R_z , avšak závislou na kvalitě nastavení rezonanční frekvence. V části *a)* a *c)* je patrná charakteristická oblast vysokých výkonů zaujímající tvar obráceného „Y“, jakožto přechod od postranních rezonančních frekvencí k hlavní. Právě této charakterové vlastnosti je v práci následně využíváno.



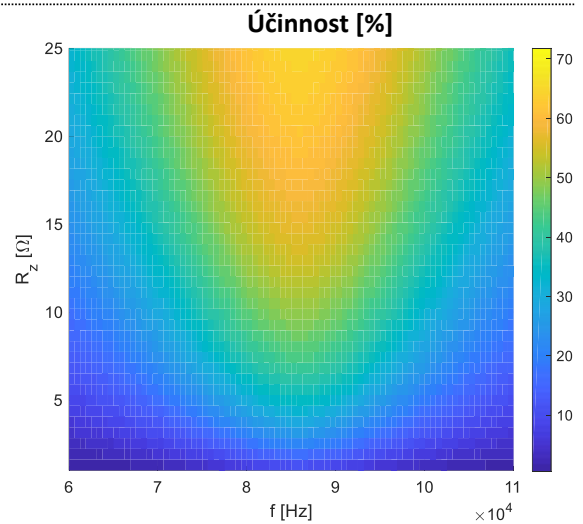
a) Výstupní výkon bez jakýchkoli měničů - makro



b) Účinnost bez jakýchkoli měničů - makro



c) Výstupní výkon bez jakýchkoli měničů - detail



d) Účinnost bez jakýchkoli měničů - detail

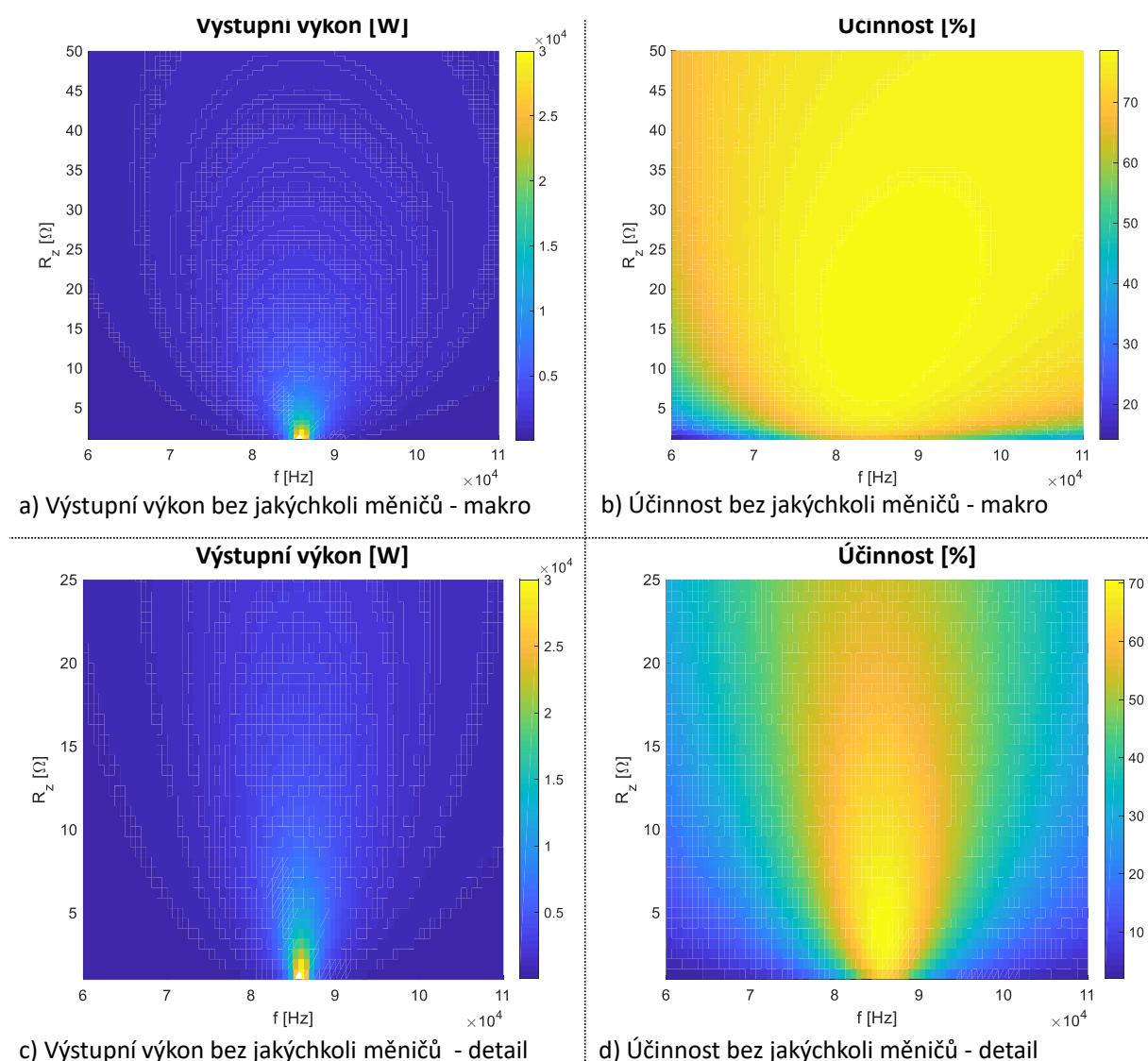
Obr. 21 Základní model vazebných elementů S-P konfigurace

[Obr. 21](#) je členěn analogicky s [Obr. 20](#). V jeho pravé části je uvedena teoretická přenosová účinnost za stejných podmínek. Na první pohled je tak možné rozpoznat charakter závislosti účinnosti na zátěžném odporu a také značný pokles dosahovaných hodnot účinnosti oproti S-S konfiguraci. Levá část Obr. 21 je věnována závislosti výstupního výkonu, kde je rovněž pozorovatelný zcela odlišný charakter. Dosahované výkony jsou však s S-S konfigurací velikostně negativně nesrovnatelné.

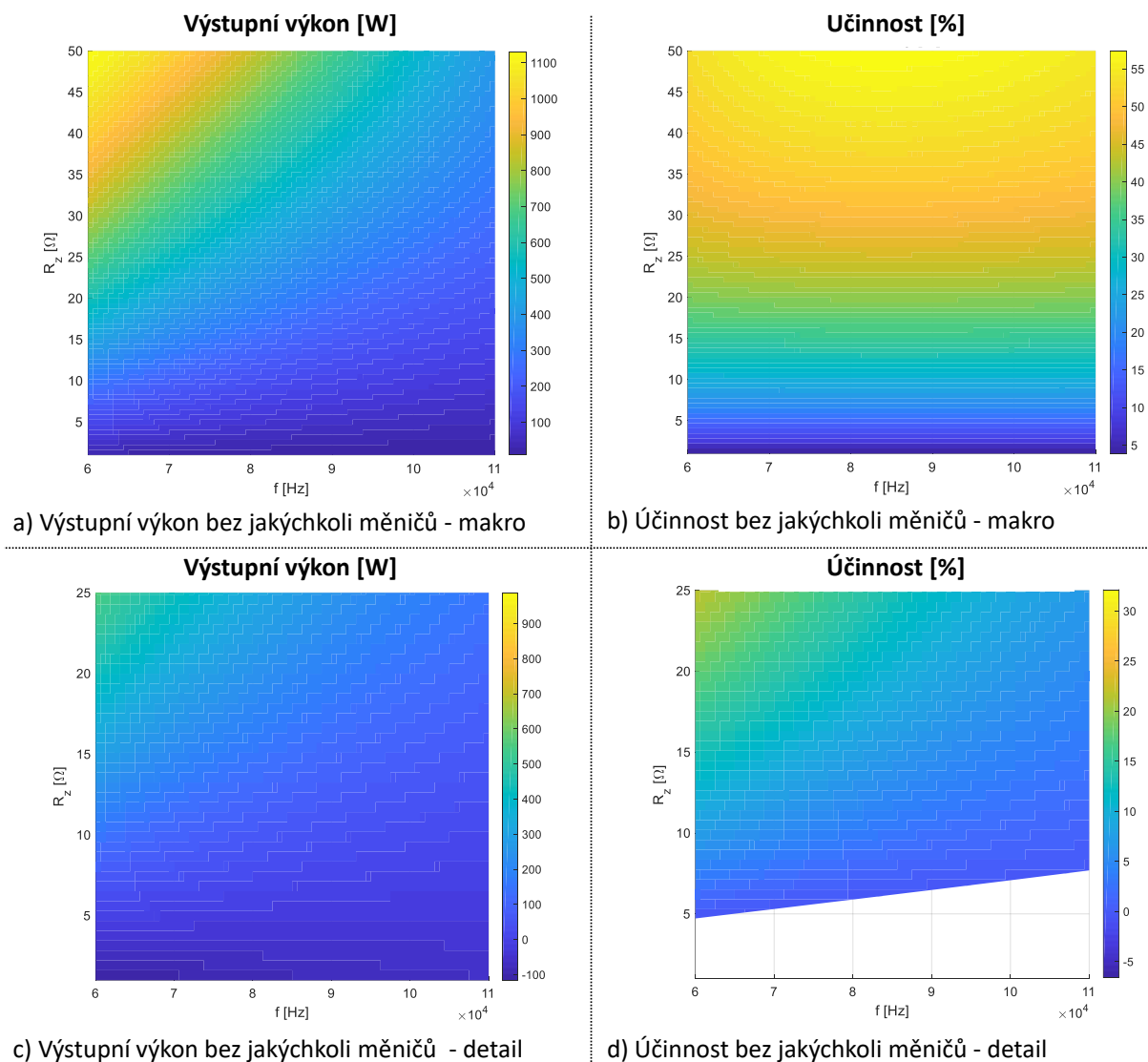
Následující [Obr. 22](#) a [Obr. 23](#) zachycují konfigurace vazebných elementů paralelní na vstupu. Obr. 22 zachycuje konfiguraci P-S a Obr. 23 zachycuje konfiguraci P-P.

Levá část obou obrázků zachycuje průběh přenášeného výkonu a jeho teoreticky dosahované hodnoty. Jak je z obrázku zřejmé, tak konfigurace paralelní na vstupu jsou pro aplikaci ve vysoce výkonných WPT zcela nevhodné a to jak z pohledu charakteru závislosti přenášeného výkonu, tak z pohledu jeho dosahovaných hodnot.

V Pravých částech obou obrázků je opět uvedena teoreticky dosahovaná účinnost v závislosti na zátěžném odporu a frekvenci napájecího zdroje. Při pozorném sledování je zřejmá charakterová shoda průběhu účinnosti mezi konfiguracemi sériovými na výstupu a paralelními na vstupu. Dosahované přenosové účinnosti jsou pak velmi malé, podobně jako je tomu u S-P konfigurace.



Obr. 22 Základní model vazebných elementů P-S konfigurace

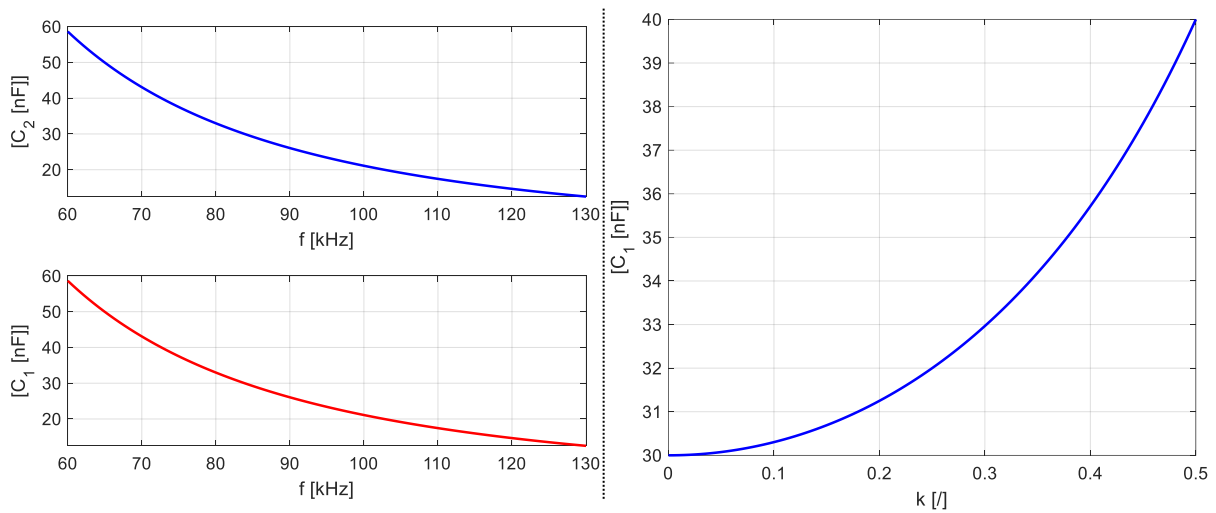


Obr. 23 Základní model vazebných elementů P-P konfigurace

Druhá část základního modelu se opírá o řešení rov. [15](#), [17](#), [23](#), [29](#), [35](#), které vyjadřují velikosti primární (C_1) a sekundární (C_2) kompenzační kapacity pro jednotlivé topologie vazebných elementů.

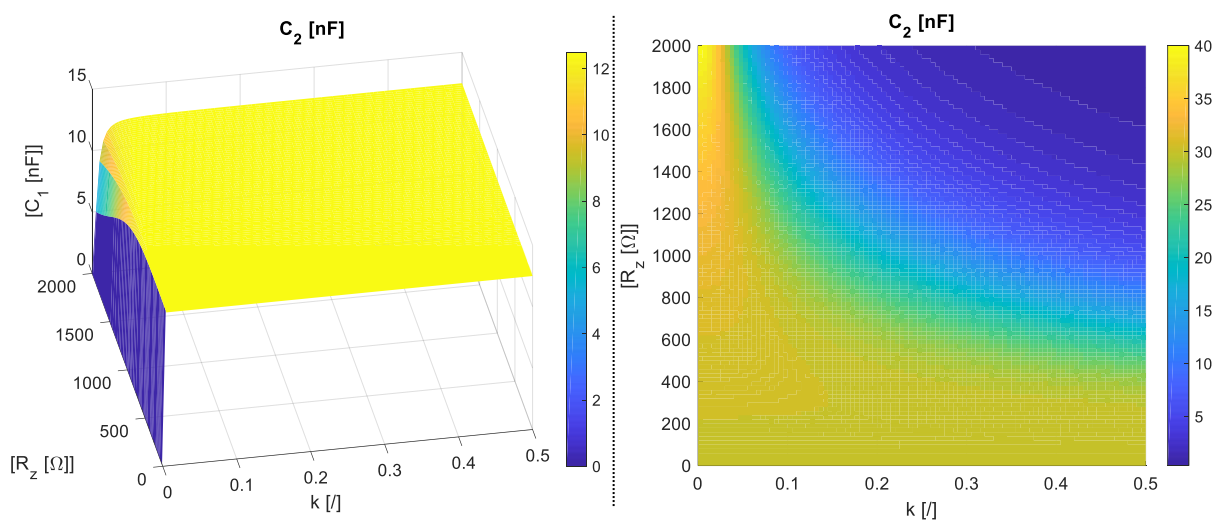
Nejjednodušší případ nastává pro S-S konfiguraci, kdy přímým řešením rov. 15 a rov. 17 dostaneme zcela elementární závislost ([Obr. 24](#) vlevo) udanou čistě Thomsonovým vztahem. Kompenzační kapacity S-S konfigurace jsou tedy závislé pouze na frekvenci napájecího zdroje, který je svázán normativními předpisy na $85 \text{ kHz} \pm 5 \text{ kHz}$.

Složitější případ nastává u S-P konfigurace, kde dle rov. 23 existuje závislost primární kompenzační kapacity na činiteli vazby ([Obr. 24](#) vpravo), respektive na vzájemné indukčnosti či vzájemné poloze obou vazebných elementů.



Obr. 24 Závislost kompenzační kapacity – vlevo pro S-S konfiguraci; vpravo pro S-P konfiguraci

V případě konfigurací paralelních na vstupu je situace komplikována nejen závislostí C_1 na činiteli vazby, ale také na velikosti zátěžného odporu R_z . Závislost C_1 pro P-S a P-P konfiguraci zachycuje [Obr. 25](#).



Obr. 25 Závislost primární kompenzační kapacity – vlevo pro P-S konfiguraci; vpravo pro P-P konfiguraci

4.2.1 Shrnutí závěrů ze základních modelů

Při hodnocení výsledků základního modelu jednotlivých topologií je třeba držet na paměti cílenou aplikaci zkoumaných vazebných elementů v elektro-mobilitě. Tedy v oblasti charakteristické vysokými přenášenými výkony (10-ky až 100-ky kW), velkou přenosovou vzdáleností (15 – 25 cm) a proměnnými parametry k a R_z . Ve spojení s elektro-mobilitou je parametr k proměnným především díky rozličné přenosové vzdálenosti a nepřesnému parkování. Parametr R_z vytváří proměnnou ve spojení s charakteristickým nabíjecím cyklem baterií CC-CV („constant current - constant voltage“). Velikost R_z je pak dána ekvivalentním odporem napájeného obvodu *on-board* elektroniky, tedy také ekvivalentním proměnným odporem nabíjené baterie, který se pohybuje v řádu stovek mili-Ohmů až jednotek Ohmů.

S-S konfigurace vykazuje vysoké přenosové účinnosti a velké dosahované výkony při malých hodnotách zátěžného odporu a oba kompenzační kondenzátory jsou nezávislé na obvodových parametrech. S-S konfigurace se pro své vlastnosti jeví jako vhodná konfigurace vazebných elementů pro elektro-mobilitu a jiné podobné vysokovýkonné aplikace bezdrátového přenosu elektrické energie.

S-P konfigurace vykazuje velké přenosové účinnosti pro vyšší hodnoty zátěžného odporu, avšak celkově jsou tyto účinnosti přibližně o 20 % nižší oproti S-S konfiguraci. Vysoké výkony jsou dosahovány v širokém spektru velikosti zátěžného odporu. Z hlediska závislosti primární kompenzační kapacity na činiteli vazby se S-P konfigurace jeví jako nevhodná pro aplikaci v elektro-mobilitě.

Konfigurace paralelní na vstupu (P-S a P-P konfigurace) jsou charakteristické celkově nižšími přenášenými výkony, kterých je dosahováno u P-P konfigurace při vysokých zátěžných odporech. Z tohoto pohledu se tak jeví jako nevhodné pro aplikaci v elektro-mobilitě. Účinnosti konfigurací paralelních na vstupu jsou srovnatelné s S-P konfigurací, jsou tedy nízké. Konfigurace paralelní na vstupu také vykazují značnou závislost primární kompenzační kapacity na činiteli vazby a zátěžném odporu. Celkově jsou tak konfigurace paralelní na vstupu nevhodné pro vysokovýkonné aplikace.

Na základně tohoto shrnutí je možné provést volbu vhodné konfigurace vazebných elementů pro aplikaci v elektro-mobilitě, což ilustruje Obr. 26. Dále se tato disertační práce zabývá jen S-S konfigurací vazebných elementů.

Na Obr. 26 jsou také uvedeny další doplňující kritéria volby vhodné konfigurace, jako je například charakter zdroje či překryvy maximálních hodnot výkonnosti a účinnosti mapy.

Skrytý důvod značného rozdílu účinnosti S-S konfigurace a konfigurací ostatních vychází z harmonické analýzy daného obvodu, kdy paralelní kompenzace vede na „zkratový charakter“ obvodu pro vyšší harmonické složky. Jsou-li tyto obsaženy v napájecím napětí, pak jsou i odebírány ve spektru proudu zdroje, avšak nejsou dále postoupeny na výstupní svorky on-board vazebného elementu.

Z umístění kompenzačního kondenzátoru v náhradním schématu dané kompenzace také vychází charakter přenosu (zdroje pro zátěž R_z) – proudový / napěťový, jenž je též důležitým ukazatelem dosahované účinnosti ve spojení s malým R_z při nabíjení trakční baterie.



Vysoká účinnost

Velký přenášený výkon

Nezávislost na provozních podmínkách

	S-S	S-P	P-S	P-P
Závislost C_1 na k	ne	malá	ano	ano
Závislost C_1 na R_z	ne	ne	ano	ano
R_z pro velké výkony	malé	velké	malé	velké
R_z pro vysokou účinnost	malé	velké	malé	velké
Vysoká účinnost	ano	střední	ne	ne
Přenášený výkon	velký	střední	malý	malý
Překryv P_{max} a η	ne	ne	částečný	částečný
Závislost η na k	malá	malá	střední	velká
Typ zdroje	proudový	napěťový	napěťový	proudový



Obr. 26 Porovnání základních konfigurací z hlediska vhodnosti pro aplikaci v elektro-mobilitě

4.3 Impedanční model S-S konfigurace

Na základě impedančních rovnic jednotlivých kompenzačních topologií vazebných elementů (rov. 11, 21, 27, 33) je možné sestavit impedanční modely jednotlivých konfigurací, které blíže vyjadřují charakterové vlastnosti jednotlivých topologií.

Úplný impedanční model S-S konfigurace je možné založit na přepisu rov. 11 do tvaru rov. 36 a rov. 37, které je možné dále pohodlně upravovat a řešit. Právě z pohledu řešení těchto rovnic je třeba objasnit průnik výkonové a účinnosti mapy S-S konfigurace. Podíváme-li se na Obr. 20 dole pozorně, dospějeme k závěru, že maximální účinnost je dosahována v oblasti sběhu od postranních rezonančních kmitočtů k hlavnímu rezonančnímu kmitočtu. Detailněji je tato skutečnost ilustrována Obr. 27.

$$Z_{te(\omega_0)} = \frac{k_1}{k_2} + \frac{k_3 - jC^2\omega_0^4 M^2}{k_2} \quad \text{rov. 36}$$

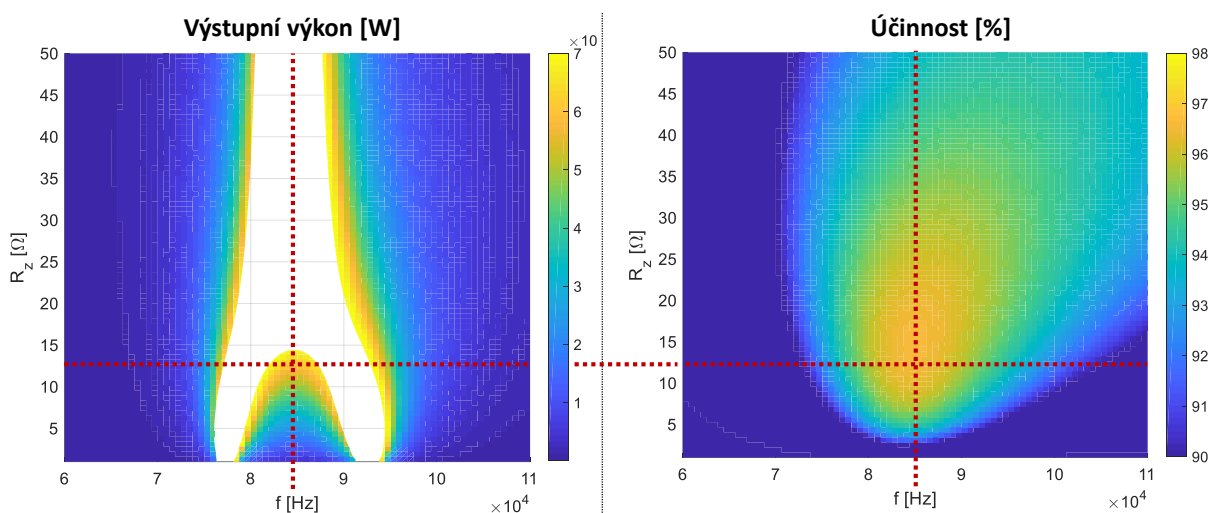
$$\begin{aligned} K_1 &= j - CR_L\omega_0 - 2jCL\omega_0^2 + LR_L C^2\omega_0^3 \\ K_2 &= \omega_0 C(CL\omega_0^2 - jC\omega_0 R_L - 1) \\ K_3 &= jC^2 L^2 \omega_0^4 \end{aligned} \quad \text{rov. 37}$$

Naznačené nastavení optimálního zátěžného odporu (Obr. 27) je možné odvodit také matematicky. Vezmeme-li definiční vztah pro účinnost, rozepíšeme jej a položíme jeho první derivaci podle zátěžného odporu rovnou nule, pak dostaneme právě optimální hodnotu zátěžného odporu z hlediska maximalizace účinnosti (rov. 38). Pokud dále uvážíme minimální návrhový (i reálný) parazitní odpor R , pak je možné s akceptovatelnou chybou psát rov. 39. Dosadíme-li do rov. 39 uvedený modelový příklad, dostaneme hodnotu $R_{L\eta_{max}} = 18,5 \Omega$, což je, dle očekávání, ve shodě s grafickým odvozením na Obr. 27.

$$R_{z\eta_{max}} = \sqrt{R^2 + M^2\omega_0^2} \quad \text{rov. 38}$$

$$R_{z \eta_{max}} = M\omega_0$$

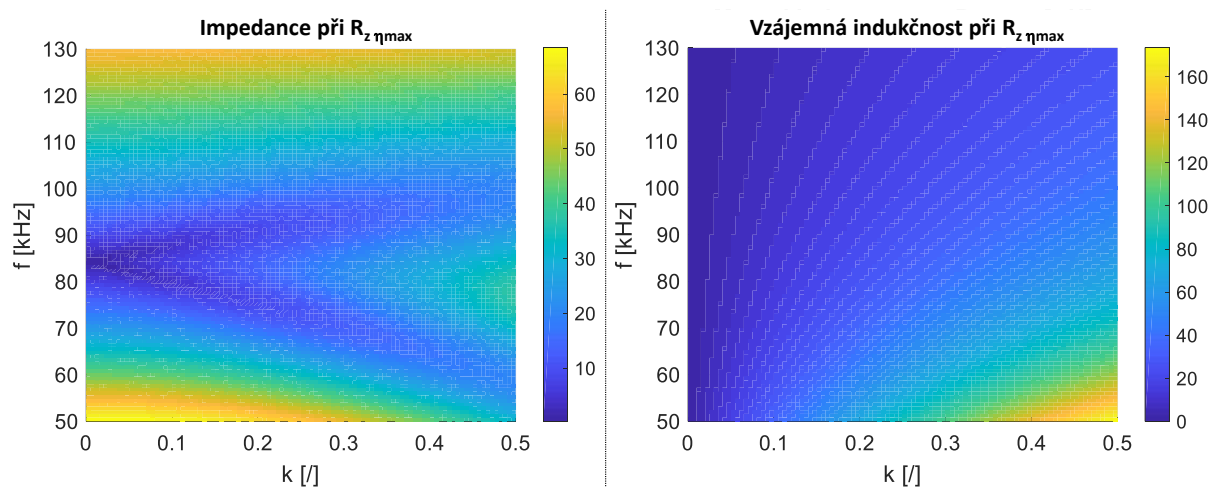
rov. 39



Obr. 27 Grafické odvození optimálního zátěžného odporu

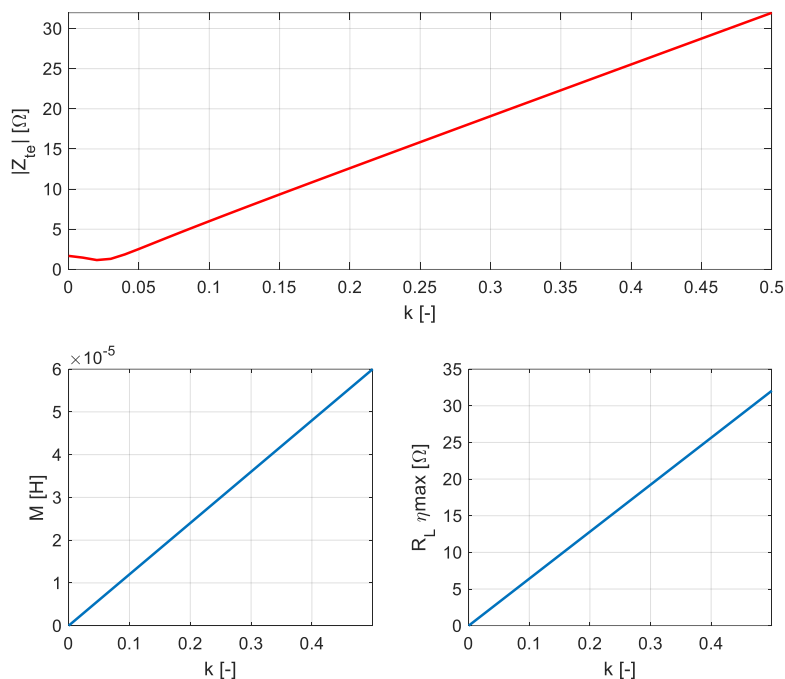
Dosažením [rov. 39](#) do [rov. 36](#) a [rov. 37](#) je možné vytvořit impedanční model S-S konfigurace, o který je možné opřít další zkoumání uvedené v této práci. Zcela obecně lze rov. 36 vyjádřit pro proměnnou vazbu a získat [Obr. 28](#), z jehož levé části vychází možný rozsah činitele vazby pro daný kmitočet a to tak, že je třeba hodnotu $R_{z \eta_{max}}$ udržovat co nejbližší celkové vztažné impedanci. Závislost vzájemné indukčnosti S-S konfigurace vazebných elementů je pro případ proměnného kmitočtu vykreslena v pravé části Obr. 28.

Hlavní význam [Obr. 28](#) spočívá v objasnění vlivu frekvenčního nastavení WPT, které je dále využíváno v aplikovaném [řízení WPCS](#). Kombinací Obr. 27 a Obr. 28 dostaneme možný frekvenční rozsah tak, aby při změnách vztažné impedance S-S konfigurace nebyl dotčen přenášený výkon ani účinnost, k čemuž může dojít například změnami teplot či zátěžného odporu R_L ($R_L \approx R_z$ v [rov. 11](#)).



Obr. 28 Impedanční model S-S konfigurace pro proměnnou frekvenci – vlevo: závislost vztažné impedance ke zdroji ; vpravo: závislost vzájemné indukčnosti.

Pokud zavedeme ideální případ, kdy kmitočet napájecího zdroje je právě rovný aktuálnímu hlavnímu rezonančnímu kmitočtu, pak můžeme impedanční model uvést ve 2D grafice ([Obr. 29](#)). Výhodou 2D impedančního modelu je mnohem vyšší přehlednost a snazší usouzení na chování S-S konfigurace vazebných elementů při reálných provozních podmínkách, což je zcela podstatné pro správný návrh polovodičových měničů a řízení WPT / WPCS.



Obr. 29 Impedanční model S-S konfigurace pro hlavní rezonanční kmitočet

4.4 Model S-S konfigurace v časové oblasti

Pro další rozšíření vazebných elementů o polovodičové měniče WPT je model založený na SKM nedostatečný, neboť je třeba řešit reálný vliv vazebných elementů na měnič a naopak.

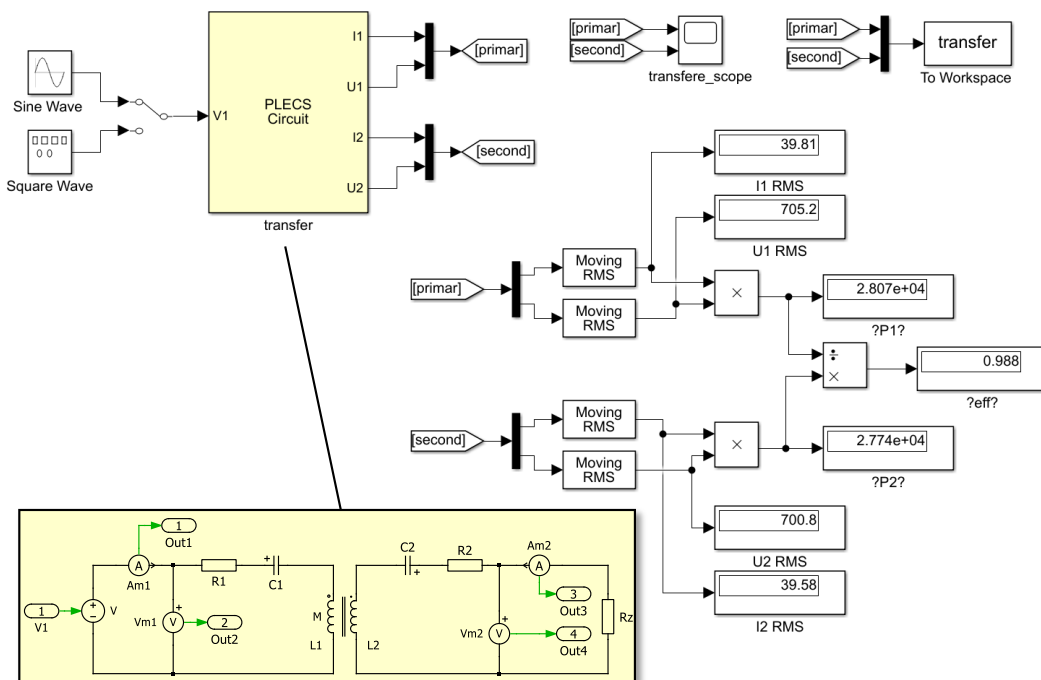
K časovému modelu je možné přistoupit přímou aplikací [rov. 9](#) do simulačního algoritmu, například jako Matlab code. Tato metoda vede při dalším rozšiřování simulace o měniče apod. ke značnému zneprůhlednění a to i v případě využívání funkcí a jejich uspořádání ve stromové struktuře. Alternativou je tvorba modelu v [Simulinku](#), který je, ze své blokové podstaty, přehledný i pro velké sestavy.

Před přechodem od přímého řešení [rov. 9](#) k variantě využívající [Simulink](#) bylo provedeno srovnání výsledků obou metod s naprosto nepatrnými odchylkami. Další simulace v časové oblasti jsou prováděny pouze v prostředí [Simulink](#), [Plecs](#), ...

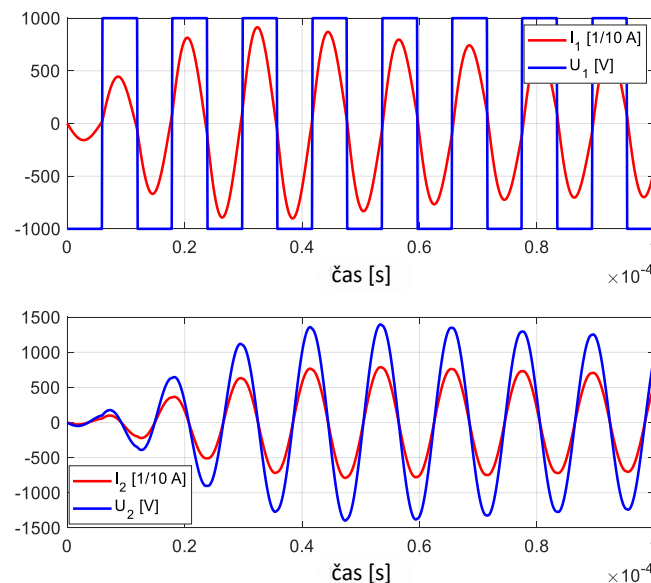
Časový model S-S konfigurace realizovaný v Simulinku je uveden na [Obr. 30](#). Výkonový obvod vazebných elementů realizovaný v bloku Plecs ([Obr. 28](#) dole) je shodný s [Obr. 19](#). Vstup výkonové části tvoří dva signálové generátory, čímž je umožněna volba mezi zdrojem sinusového a obdélníkového signálu. Výstup výkonového bloku tvoří naměřené napětí a proudy S-S konfigurace vazebného elementu. Ty jsou dále zpracovávány a vykreslovány dle schéma na [Obr. 30](#) vpravo.

Volba mezi sinusovým a obdélníkovým napájením je dána postupným odvozením simulačního schématu. Pro ověření správného nastavení a zapojení je využit sinusový zdroj, kdy se výkonový blok i bloky dalšího zpracování měřených signálů chovají fyzikálně čitelně a jednoduše. Vyobrazené hodnoty veličin z [Obr. 30](#) jsou korektní pouze pro případ sinusového napájení. Následně je třeba objasnit průběhy obvodových veličin nejen pro sinusové napájení, ale také pro obdélníkové, neboť v reálném případě je výkonový blok napájen obdélníkovým zdrojem napětí s vysokou strmostí $\frac{du}{dt}$. Odezva výkonového bloku na takovéto napájení je uvedena na [Obr. 31](#).

Parametry simulace jsou: pevný simulační krok 100 ns, čas simulace 50 ms, počet vzorků plovoucích RMS 100 bodů, velikost napájecího napětí 1000 V_{amp}.



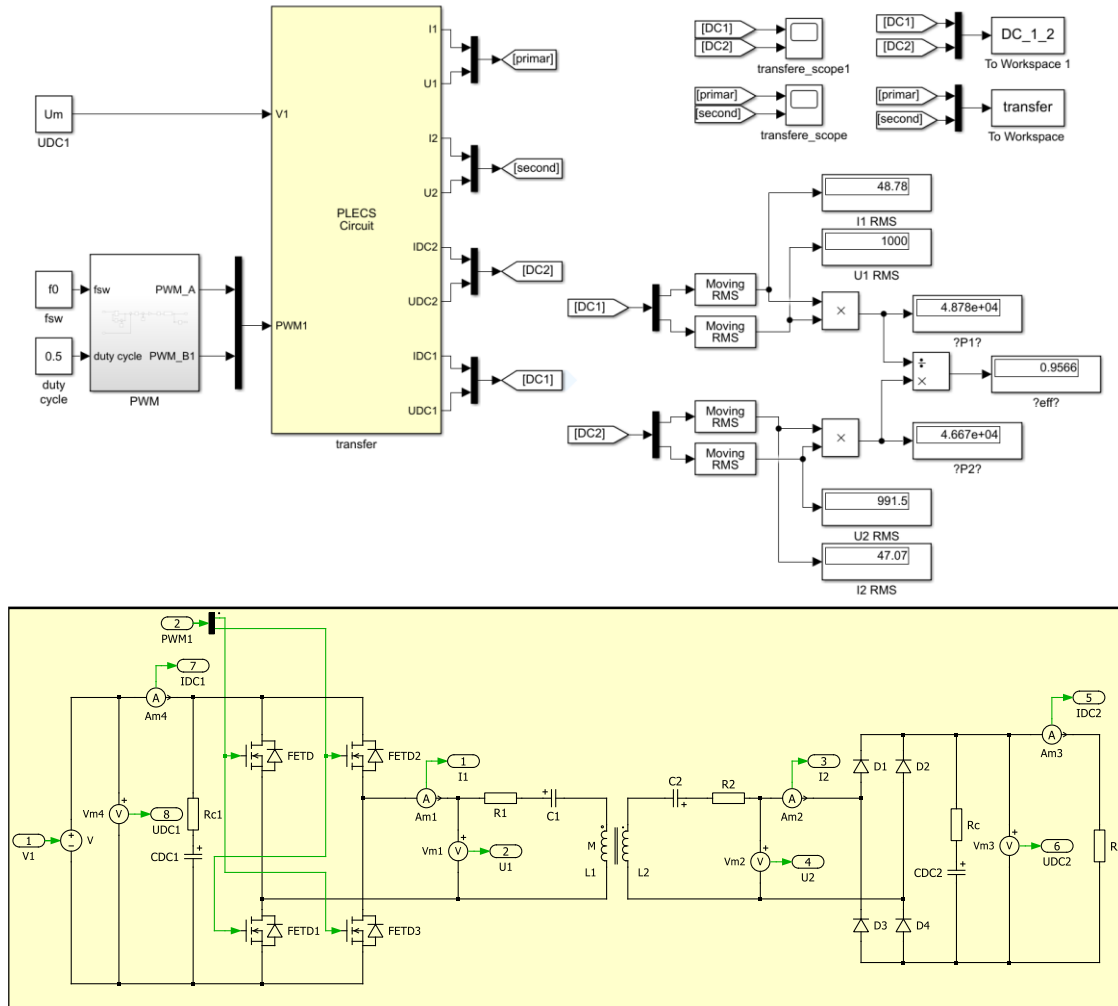
Obr. 30 Model S-S konfigurace v časové oblasti



Obr. 31 průběhy napětí a proudů na vazebném elementu

4.5 Model WPT v časové oblasti

Rozšířením modelu vazebných elementů z [Obr. 30](#) o polovodičové měniče WPT, tedy o vstupní střídač a výstupní usměrňovač, je možné vytvořit model WPT. Tento je uveden na [Obr. 32](#) pod názvem Základní model WPT.



Obr. 32 Základní model WPT

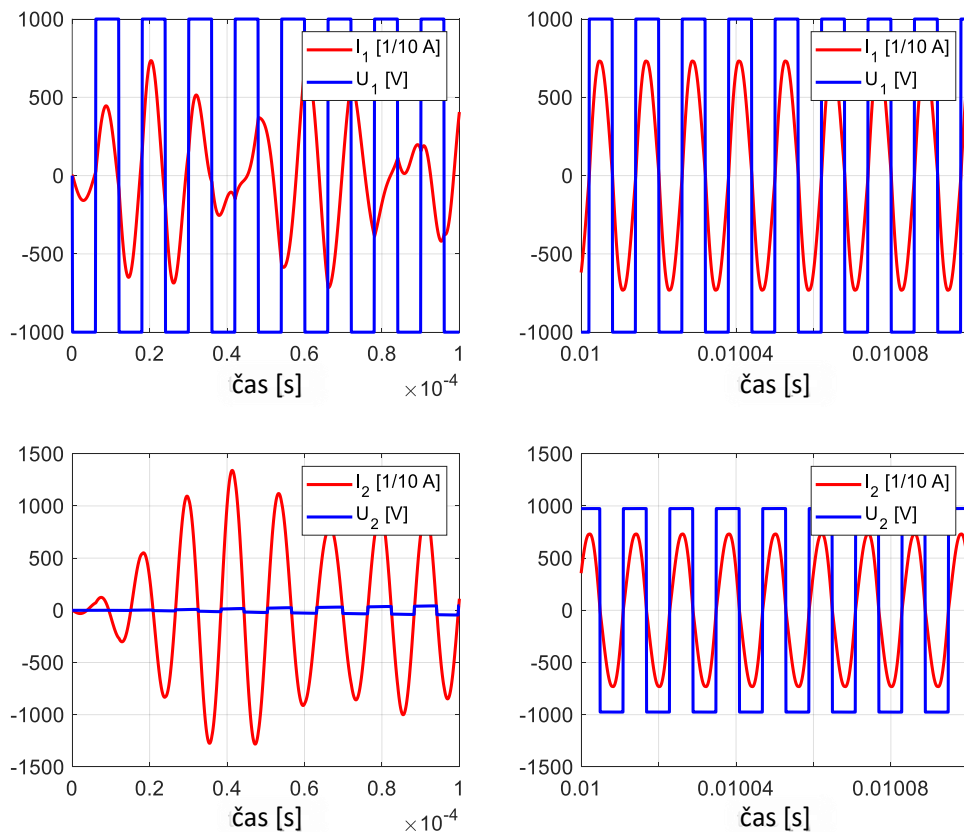
Vzhledem k rozšíření modelu o usměrňovač je nutné zavést přepočítání ekvivalentního zátěžného odporu R_z na ekvivalentní stejnosměrný zátěžný odpor $R_{z DC}$ ([rov. 40](#)), který respektuje vliv impedančního přenosu usměrňovače. Pro náš modelový příklad činí dopočtená hodnota $R_{z DC} = 15 \Omega$.

$$R_{z DC} = \frac{\pi^2}{8} M \omega_0 = \frac{\pi^2}{8} R_z \quad \text{rov. 40}$$

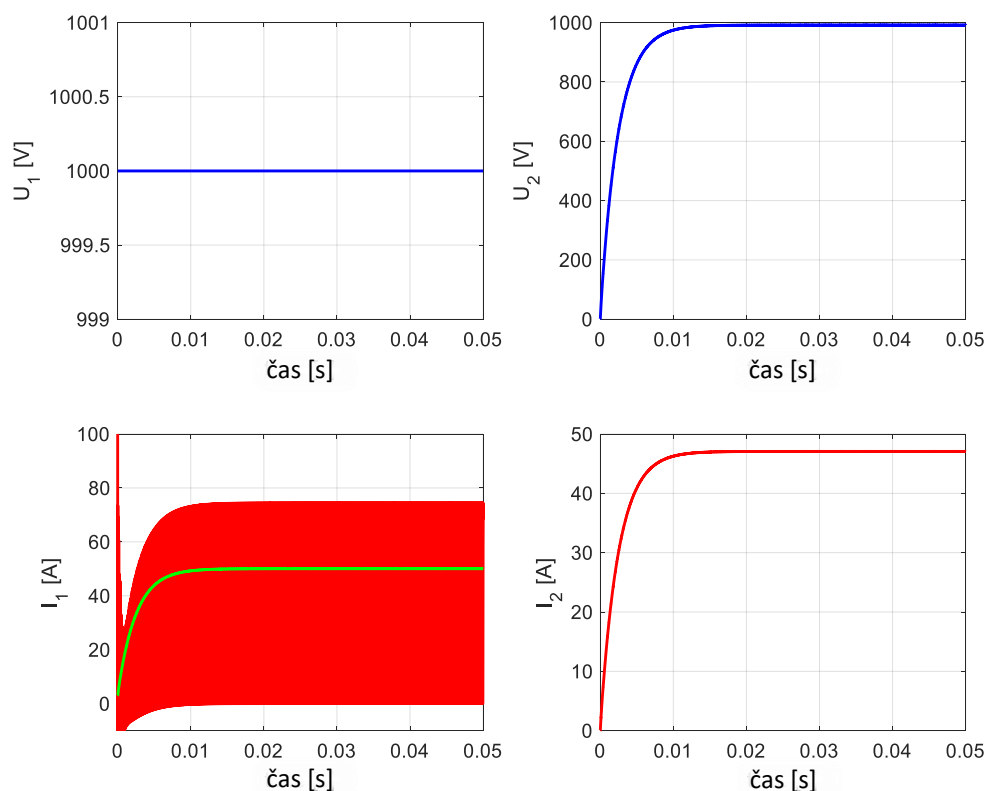
Hodnoty přidávaných pasivních prvků C_{DC1} a C_{DC2} jsou stanoveny jako vstupní / výstupní filtry příslušných napěťových měničů [53-55] na základě stanoveného dovoleného zvlnění napětí v meziobvodech. Parametry aktivních prvků jsou dány katalogovými parametry vybraných součástek pro 65kW prototyp WPCS, jejichž výběr, popis a dimenzování není součástí této disertační práce.

Simulované průběhy WPT jsou uvedeny na [Obr. 33](#) a [Obr. 34](#). Obr. 33 ve své levé části zachycuje start systému WPT z nulových počátečních podmínek. Pravé část pak zachycuje ustálený stav při $U_{DC1} = 1000$ V, jak zachycuje [Obr. 34](#), který uvádí poměry na stejnosměrných meziobvodech $DC1$ (vstupní meziobvod vstupního střídače) a $DC2$ (výstupní meziobvod výstupního usměrňovače).

Na první pohled je z [Obr. 33](#) zřejmý vliv přidávaných polovodičových měničů na průběhy přenosu elektrické energie (vazebných elementů). Především se jedná o start přenosu ovlivněný startem magneticky vázaných rezonančních obvodů nabájených zdrojem obdélníkového napětí a o charakter výstupního napětí z vazebných elementů U_2 (Obr. 33 vpravo dole) ovlivněného činností usměrňovače s kapacitou na výstupu.



Obr. 33 Průběhy napětí a proudů na vazebném elementu – základní model WPT ; vlevo: start WPT z nulových počátečních podmínek ; vpravo: ustálený stav při $U_{DC1} = 1000$ V



Obr. 34 Průběhy napětí a proudů stejnosměrných meziobvodů DC1 a DC2 - základní model WPT

Na základě průběhů z [Obr. 33](#) a [Obr. 34](#) je možné potvrdit pravdivost odvození přenosového poměru. Uvažovaná S-S konfigurace vazebních elementů využívá zcela identický pár - oba vazební elementy mají tedy stejné jak mechanické, tak elektrické parametry. Jelikož jde o variantu vzduchového transformátoru, pak musí za kompenzačními kondenzátory platit obecný vztah pro převodový poměr transformátoru kp . Jeho úpravou dostaneme podobu využitelnou v této aplikaci ([rov. 41](#)), která je platná v případě dodržení [rov. 40](#) a [rov. 12](#).

$$U_2 = \frac{U_1}{kp} \wedge I_2 = kp I_1; \frac{N_1}{N_2} = kp = 1 \quad \text{rov. 41}$$

Současně je na [Obr. 33](#) a [Obr. 34](#) možné pozorovat malou nepřesnost nastaveného spínacího kmitočtu f_{sw} vůči reálnému rezonančnímu kmitočtu f_0 , který je ovlivněn parazitními parametry prvků, především pak sériovým odporem indukčnosti $ESRL$ a kondenzátoru $ESRC$. Tyto parazitní odpory je pochopitelně nutné návrhem i konstrukcí minimalizovat za účelem dosažení maximálních činitelů jakosti Q_L a Q_C ([rov. 42](#)). V reálném případě, nejen z důvodu maximalizace účinností, je $ESRL$ a $ESRC$ co nejvíce minimalizováno a je tedy možné jejich vliv na f_0 ve výpočtech zanedbat.

$$Q_L = \frac{\omega_0 L}{ESRL} = \frac{\omega_0 L}{R} \quad ; \quad \omega_0 = 2\pi f_{01} \vee \omega_0 = 2\pi f_{02} \quad \text{rov. 42}$$

$$Q_C = \frac{1}{ESRC \cdot \omega_0 C}$$

Jelikož jsou vazební elementy WPT napájeny obdélníkovým napětím o vysoké strmosti spínání, nabízí se otázka, je-li impedanční rovnice (rov. 11) uvedena v korektní podobě. Právě z tohoto důvodu je třeba zavést pojem frekvenční selektivnost vazebného elementu a tedy i impedanční rovnice. S vlivem frekvenční selektivnosti vazebných elementů souvisí i charakteristický tvar impedance na Obr. 28. Obecně platí, že vazební elementy jsou vysokojakostním ($Q_x \gg 100$) rezonančním obvodem s prakticky dokonalou impedanční selektivitou, díky čemuž je rov. 11 možné přepsat do tvaru rov. 43, která definuje vztažnou impedanci ke zdroji pro f_0 jako reálnou a pro ostatní kmitočty jako nekonečnou.

$$Z_{cn(h=1)} = \frac{j - CR_z(2\pi f_{(h=1)}) - j2CL(2\pi f_{(h=1)})^2 + C^2R_zR_1(2\pi f_{(h=1)})^3 + jC^2(L^2 - M^2)(2\pi f_{(h=1)})^4}{(2C\pi f_{(h=1)})^2(2L\pi f_{(h=1)} - jR_z) - 2C\pi f_{(h=1)}}; \quad \text{Rov. 43}$$

$$; f_{(h=1)} = f_{01} \wedge Z_{cn(h \neq 1)} \rightarrow \infty$$

Po těchto úpravách je třeba zvážit vliv činitelů jakosti a selektivní impedance na účinnost přenosu. Základní vztah pro účinnost je dán rov. 44, kterou je možné rozšířit o základní vztahy S-S konfigurace a definiční vztahy činitelů jakosti do podoby rov. 45, která vyjadřuje teoretickou maximální účinnost v závislosti na velikosti činitele jakosti (rov. 45 současně koresponduje s graficky nalezenými maximy na Obr. 27). Tato závislost pak udává, že maximalizace činitele jakosti má pozitivní dopad na účinnost, podobně jako je tomu s velikostí činitele vazby. Činitel vazby je však dán velikostí vazebný indukčnosti, geometrie vinutí, přenosové vzdáleností apod. Není tedy možné jej jednoduše maximalizovat pomocí HW návrhu. Vzniklý problém je však možné vcelku elegantně vyřešit pomocí úprav základní rovnice pro činitel vazby (rov. 7) do podoby rov. 46. odtud je patrný hlavní prostředek k maximalizaci přenosové účinnosti vazebných elementů, tedy maximalizace velikosti napájecího napětí U_1 . To je také hlavní důvod, proč experimentální prototyp 65kW WPCS pracuje s U_1 o velikosti až 1200 V.

$$\eta_{trans} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{R_z |\bar{I}_2|^2}{\Re\{\bar{U}_1 \bar{I}_1^*\}} \quad \text{rov. 44}$$

$$\eta_{trans \max} = \frac{k^2 Q^2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q^2})^2} \approx 1 - \frac{2}{kQ} \quad \text{rov. 45}$$

$$k = \frac{8}{L \pi^2} \frac{U_1^2}{\omega_0 P_2} \quad \text{rov. 46}$$

4.6 Návrh vazebných elementů

Vazební elementy bezdrátového přenosu elektrické energie jsou složeny ze dvou hlavních komponent – z vazebných cívek a z kompenzačních kondenzátorů. Na oba komponenty jsou kladeny specifické nároky tak, aby bylo dosaženo maximalizace [rov. 45](#), přenášeného výkonu a splnění hygienických limitů a normativních předpisů – viz [kapitola 3](#).

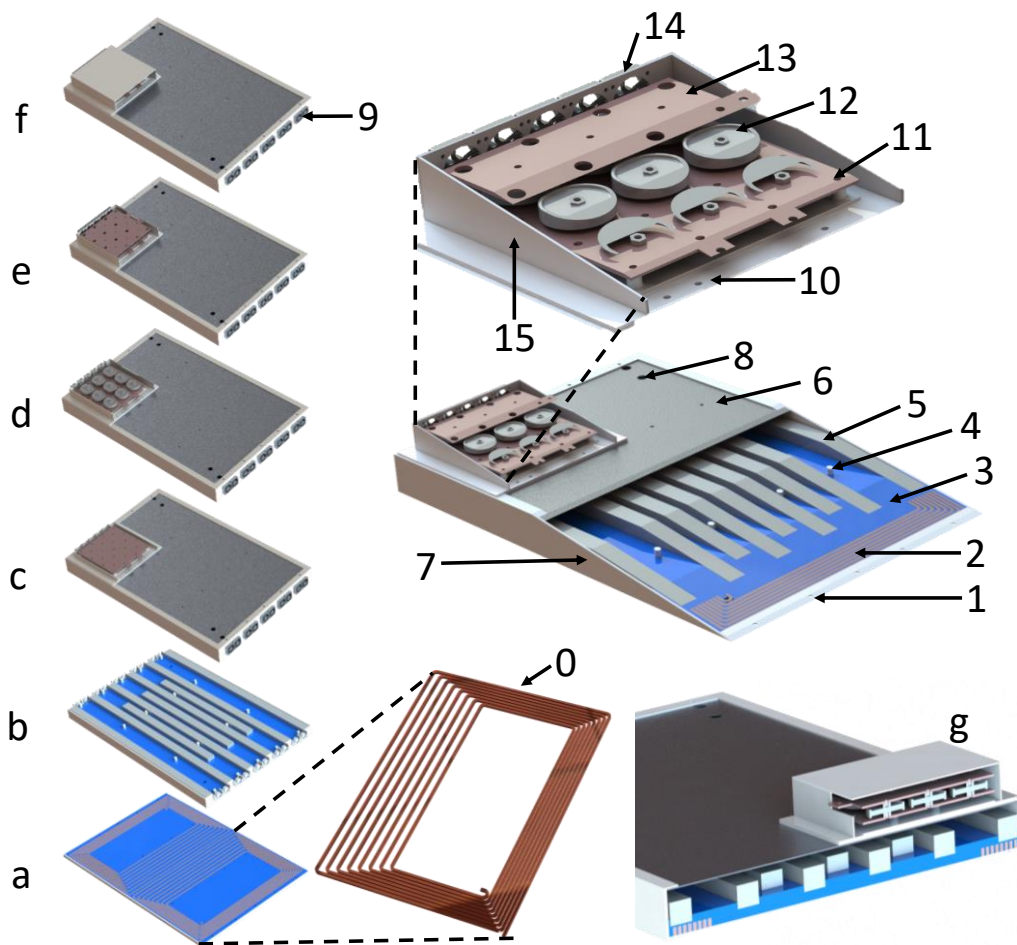
Samotným elektromagnetickým návrhem pro experimentální prototyp se věnuje Doc. Ing. Vladimír Kindl Ph.D. Elektrický, mechanický, tepelný, funkční, ... návrh je řešen jako součást této disertační práce.

Ústřední obrázek k návrhu vazebných elementů ([Obr. 35](#)) zachycuje kompletní skladbu vazebného elementu.

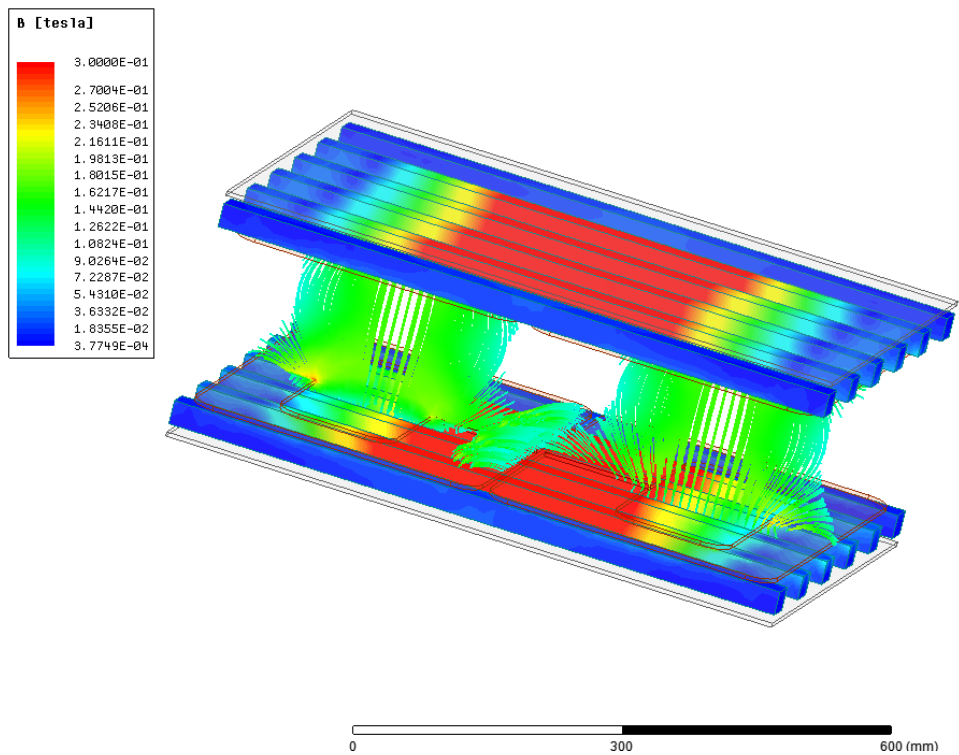
- **V jeho levé části je uveden postupný horizontální řez – a)** Cu Litz-wire vinutí uložené v POM ([polyoxymetylen](#)) kostře; **b)** hlavní feritový (N-78 [\[62\]](#)) magnetický obvod uložený v mělkých drážkách POM kostry; **c)** Al masivní stínění (2 mm elox Al) uložené na POM sloupcích uchycených ke kostře; **d)** polovina vazebného kondenzátoru uloženého v POM pouzdře; **e)** vazebný kondenzátor; **f)** kompletní vazebný element; **g)** pro doplnění - vertikální řez vazebného elementu.
- **Pravá část Obr. 35** poukazuje na jednotlivé části vazebného elementu – **0)** polovina Cu [Litz-wire](#) vinutí; **1)** spodní krycí deska vinutí (POM / plexisklo); **2)** vinutí; **3)** POM rám s úplnými drážkami pro vinutí, částečnými drážkami pro magnetický obvod a konstrukčními otvory; **4)** POM distanční sloupky pro uchycení Al stínění aj.; **5)** feritový (N-78 [\[62\]](#)) magnetický obvod; **6)** masivní Al stínění (2 mm); **7)** boční kryt plnící funkci ochrannou a funkci vzduchového tunelu; **8)** otvory pro vývody vinutí; **9)** čelní kryt s ventilátory na obou stranách; **10)** elektroizolační a mechanická základna vazebného kondenzátoru; **11)** spodní elektroda; **12)** paralelně řazené kondenzátory; **13)** horní elektroda; **14)** čelní kryt s ventilátory; **15)** elektromechanický kryt kondenzátoru.

Vinutí vazebného elementu je provedeno v topologii „double D“ ([Obr. 35 – a](#) , [0](#)). Díky tomuto provedení je minimalizována střední dráha rozptylového toku a velikost rozptylového toku samotná. Magnetický model vazebných elementů, uvedený na [Obr. 36](#), uvedené předpoklady potvrzuje a je tedy možné usoudit na vysokou účinnost přenosu, splnění hygienických limitů magnetického pole a splnění podmínek EMC – viz [kapitola 3](#).

Z rozložení magnetické indukce v magnetickém obvodu vazebných elementů je dobře patrná „funkce“ zapojení „double-D“, které velmi striktně usměrňuje magnetické pole uvnitř a mezi vazebními elementy. Pro dosažení tohoto efektu je nutný správný návrh drážkové vzdálenosti ve středové části a v ostatních částech vinutí, které je elektricky spojeno sériově a magneticky také sériově.



Obr. 35 3D návrh vazebného elementu 65 kW WPCS

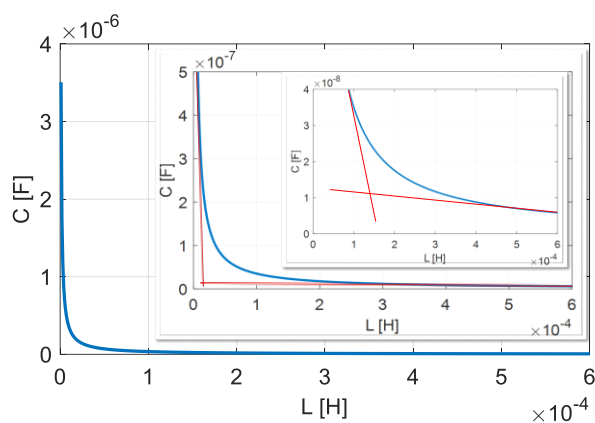


Obr. 36 Magnetická indukce v magnetickém obvodu vazebných elementů

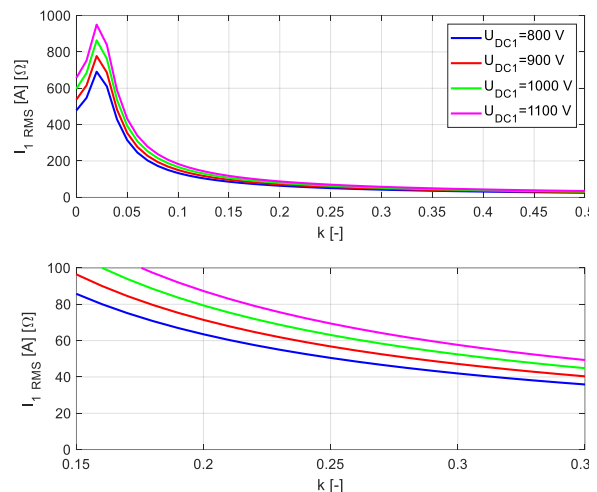
Pokud znovu uvážíme rov. [7](#), [12](#), [13](#), [14](#), [15](#), [17](#), [34](#), [41](#), [42](#) a zjednodušené elektrické schéma S-S konfigurace vazebných elementů z [Obr. 19](#), pak je možné provést analýzu možného průniku vhodné indukčnosti vazebné cívky L a vhodné kapacity kompenzačního kondenzátoru C pro daný rezonanční kmitočet f_0 (85 kHz). Pro experimentální prototyp je tento průnik uvedený na [Obr. 37](#).

Z [rov. 44](#) a impedančního modelu S-S konfigurace ([kapitola 4.3](#)) je možné derivovat jmenovitý proud vazebných elementů a jejich obecnou zatěžovací charakteristiku, která je vyobrazena na [Obr. 38](#) a na jejímž základě je možné provést elektrický návrh vazebných elementů. Předně pak volby vhodného průniku L a C pro nastavení daného f_0 .

S ohledem na uvedené skutečnosti (přenášené proudy a výkony) je za reálné velikosti kapacit možné považovat jednotky, maximálně nižší desítky, nano-Farad. Tak jak je vyznačeno červenými čarami na [Obr. 37](#), které vymezují realizovatelnou oblast. Jelikož indukčnost je vcelku jednoduše upravitelná elektromagnetickým návrhem, tak je třeba provést nejprve proveditelný návrh kompenzačního kondenzátoru.



Obr. 37 Analýza průniku vhodné kapacity a indukčnosti



Obr. 38 Obecná zatěžovací charakteristika vazebných elementů S-S konfigurace

4.6.1 Vazebný kondenzátor

Proudová zátěž kompenzačního kondenzátoru je dána zatěžovací charakteristikou vazebného elementu, neboť u S-S konfigurace jím prochází celý pracovní proud. Velkou roli zde hraje také princip rezonance RLC sériového obvodu, kdy je třeba provést správné napěťové dimenzování kondenzátoru (rov. 47) na základě impedancí, bezpečnostního napěťového koeficientu ($k_{uc} = 1,333$) a jakosti kondenzátoru (rov. 42), resp. Ztrátovém úhlu $\tan \delta$ (rov. 47). V neposlední řadě je třeba volit vhodnou konstrukci kompenzačního kondenzátoru z pohledu minimalizace rozměrů a hmotnosti.

$$U_{C\ amp} = I_{1\ amp} \left(\frac{k_{uc}}{2\pi f_0 C} + ESR_C \right) \quad \text{rov. 47}$$

$$ESR_C = \omega_0 C \tan \delta \Leftrightarrow ESL_C \rightarrow 0$$

Pro uváděný experimentální prototyp činí výpočtové napětí kondenzátoru 8,5 kV při pracovních proudech $I_1 \leq 100$ A. Přenášený činný výkon pak dosahuje minimálně 65kW. Těmto parametrům a Obr. 37 vyhovuje jen několik málo (paralelně řazených) komerčně dostupných kondenzátorů (využití jednoho kusu komerčně dostupného kondenzátoru je neproveditelné jak z technického hlediska, tak z pohledu proudové zatížitelnosti, či z pohledu rozměrů apod.).

Pro experimentální prototyp byla zvolena paralelní kombinace devíti (n_{par}) vysokojakostních kondenzátorů Vishay řady 715C (Obr. 39). V Tab. VII jsou uvedeny parametry dvou možných typů. V levém sloupci preferovaný (menší) 15kV typ a v pravém sloupci možná 20kV (větší) alternativa.

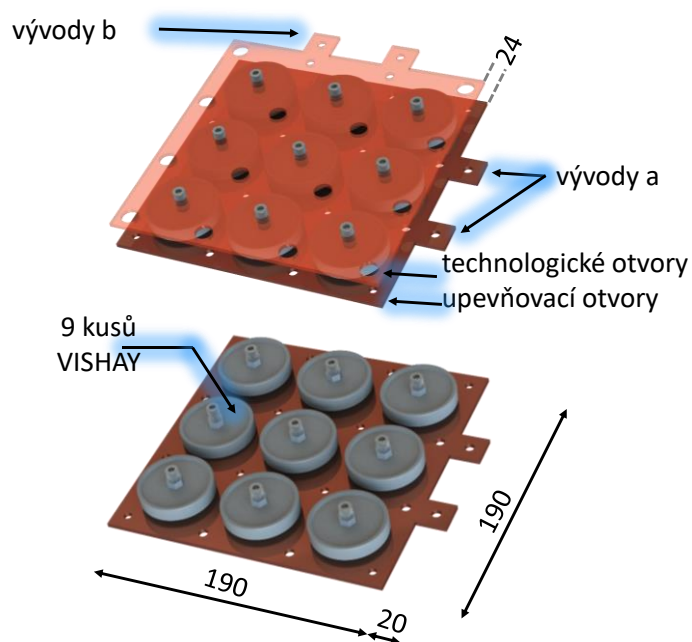
Tab. VII Parametry komerčně dostupných kondenzátorů

Parameter	715C15KTD33	715C20KTD33	Jednotka / Poznámka
Kapacita (C_{par})	3300	3300	pF
Napětí SC	15	20	kV _{DC}
Napětí AC	10	14	kV _{RMS}
Ztrátový faktor ($\tan \delta$)	0,4	0,4	% at 100 kHz
Dielektrikum	N4700	N4700	keramika
Průměr	48	56	mm
Výška	18	21	mm

V souvislosti s vývojem vazebných elementů WPT byla provedena studie alternativních možností v oblasti vazebných kondenzátorů. Jako možná alternativa byl navržen kompenzační kondenzátor vlastní konstrukce, který byl postaven na bázi dielektrika AD 1000 s lisovanými Cu elektrodami v pětivrstvé deskové topologii.

Parazitní parametry ESRC a ESLC prototypu vlastního kompenzačního kondenzátoru však nedosáhly předpokládaných hodnot a musela být zvolena varianta využívající komerčně dostupné kondenzátory. Ostatní parametry plně splnili návrhové a teoretické předpoklady.

Mechanický návrh je uveden na [Obr. 39](#), přičemž tento splňuje požadavky na napěťové, proudové a tepelné dimenzování. Pochopitelně je také brán ohled na minimalizaci ztrát, jak je pro WPT typické. Aby bylo dosaženo minimalizace těchto ztrát, je třeba při návrhu optimalizovat proudové dráhy a rozložení proudové hustoty, proto je z mechanického návrhu na [Obr. 39](#) patrné dělení kondenzátoru do dvou sub-kondenzátorů a otvory upravující proudové cesty.



Obr. 39 3D návrh vazebného kondenzátoru pro 65 kW prototyp (v mm)

Minimální tloušťka elektrod je ovlivněna skin efektem a jeho hloubkou vniku ([rov. 48](#)), která pro pracovní kmitočtové pásmo 85 ± 5 kHz činí 0,237 až 0,213 mm. Proto je minimální tloušťka elektrod stanovena na 0,5 mm. Na základě definice Joulovo ztrát je nyní možné stanovit ztráty v elektrodách ([rov. 49](#)) na 334 mW (pro experimentální prototyp).

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_{Cu}}{\pi f_0 \mu_0 \mu_r}} \quad \text{rov. 48}$$

$$\Delta P_{plane} = 2I_{1RMS}^2 \rho_{Cu} \frac{a}{S_{plane} \delta} \quad \text{rov. 49}$$

Ke ztrátám také přispívá samotná jakost použitých komerčně dostupných kondenzátorů, jež jsou v počtu 9-ti (n_{par}) kusů spojeny elektrodami do paralelní kombinace. Vzniklé ztráty je možné stanovit pomocí [rov. 50](#) na 124 W.

$$\Delta P_{VISHAY} = I_{1RMS}^2 \frac{\tan \delta_{VISHAY}}{\omega_0 C_{VISHAY} n_{par}} \quad \text{rov. 50}$$

Celkové ztráty na kompenzačním kondenzátoru je možné popsat [rov. 51](#). Vzhledem k relativně vysokým ztrátám na kondenzátorech Vishay je třeba provést tepelné dimenzování. To sebou přináší zesílení Cu elektrod na 3 mm (větší tloušťka je vyžadována i z pohledu mechanické tuhosti) pro dosažení odvodu tepla z kondenzátorů. Vzniklou teplosměnnou plochu elektrod a samotných kondenzátorů je nutné ofukovat proudem vzduchu, tak aby bylo zaručeno akceptovatelné provozní oteplení ([Obr. 35](#)).

$$\Delta P_C = I_{1RMS}^2 (R_{plane} + ESR_{VISHAY}) = I_{1RMS}^2 ESR_C \quad \text{rov. 51}$$

4.6.2 Vazebná cívka

Na základě průniku vhodných kapacit a indukčností je při znalosti kompenzační kapacity možné stanovit indukčnost vazebné cívky na 120 μH (pro experimentální prototyp) a provést její elektromagnetický návrh. Vzniklá geometrie a provedení je možné dále využít pro elektrický a mechanický návrh.

Cívka je tvořena [Litz-Wire](#) vodičem (slaněný vodič z izolovaných vláken) o 2835 vláknech s průměrem 0,071 mm a celkovým průřezem vodiče 11,23 mm². Použitím takového Cu vodiče je eliminován vliv hloubky vniku. Pro dosažení malého ESR_L a malé proudové hustoty je vinutí provedeno dvojicí paralelně spojených vodičů ($S_w = 22,46 \text{ mm}^2$).

Pro Joulovo ztráty ve vinutí lze psát [rov. 52](#), která je obecně známá. Pro experimentální prototyp je délka vodiče (l_v) 86 m s průřezem (S_v) 22,46 mm². Joulovo ztráty ve vinutí tedy činí 360 W.

$$\Delta P_{winding} = I_{1RMS}^2 \rho_{Cu} \frac{l_v}{S_v} = I_{1RMS}^2 ESR_L \quad \text{rov. 52}$$

Druhou část dominantních ztrát ve vazebných elementech tvoří ztráty v magnetickém obvodu, který je tvořen feritovými „hranoly“ o parametrech uvedených v [Tab. VIII](#). Střední výpočtová magnetická indukce (B_{core}) je dána elektromagnetickým návrhem ([Obr. 36](#)). Počet feritových dílců ([EPCOS - TDK Electronics B67345B0002X087](#)) je 63 ks. Dosazením hodnot do [rov. 53](#) dostaneme ztráty v magnetickém obvodu. Pro experimentální prototyp dostaneme $\Delta P_{core} = 95 \text{ W}$.

$$\Delta P_{core} = \frac{B_{core}}{B_v} P_v m_{core} \quad \text{rov. 53}$$

Tab. VIII Parametry použitých feritových jader v experimentálním prototypu
[EPCOS - TDK Electronics B67345B0002X087](https://www.tdk.com/electronic-components/ferite-core-components/ferite-core-components-tdk-epcos)

Parametr	Hodnota	Jednotka / Poznámka
Rozměry (a*b)	30*27	Mm
Délka (l)	93	mm
Relativní ztráty (P_{core})	3,6	mWg ⁻¹ at 100 mT at 100 °C
Váha (m_{core})	200	g

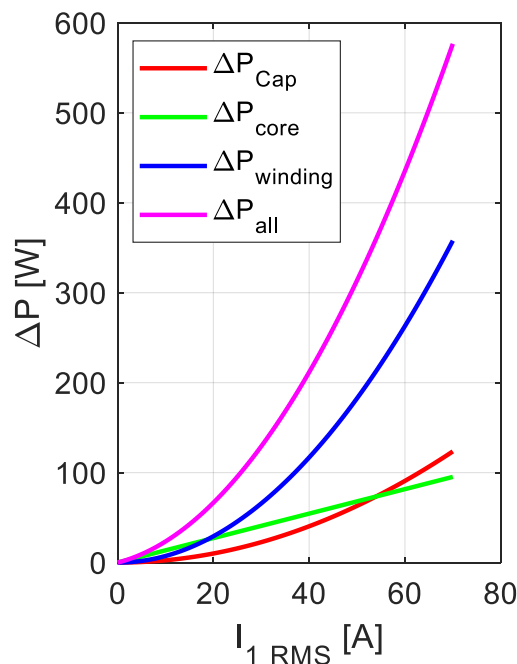
Celkové ztráty na cívce vazebných elementů (455 W) jsou pak dány součtem ztrát ve vinutí a v magnetickém obvodu (a přidavných ztrát, které jsou velmi malé a zanedbatelné). Obdobně jako u kompenzačního kondenzátoru, tak i u cívky je třeba provést tepelný návrh, čímž se zajistí odvod ztrátového tepla a udržení maximální dovolené teploty. Jak je patrné z [Obr. 35](#), odvod tepla z vazebné cívky je realizován na straně magnetického obvodu pomocí nuceného proudění vzduchu. To zajišťují ventilátory osazené po obou kratších stranách vazebného elementu (jeden jako tlačný, druhý jako tažný).

4.6.3 Výkonová bilance vazebných elementů

Základní výpočet ztrát na vazebném elementu je proveden pro nejméně příznivý případ s návrhovou rezervou, tedy pro $I_1 = 100 A_p$. Reálný provoz však vyžaduje znalost rozložení výkonových ztrát napříč rozličným zatížením. To zachycuje výkonová bilance vazebného elementu vyobrazená na [Obr. 40](#).

Při znalosti výkonové bilance je možné aktivně řídit průtok vzduchu kompenzačním kondenzátorem a vazebnou cívkou. Pro experimentální prototyp činí maximální průtok vzduchu kondenzátorem $0,8 m^3min^{-1}$ a indukčností $1,6 m^3min^{-1}$.

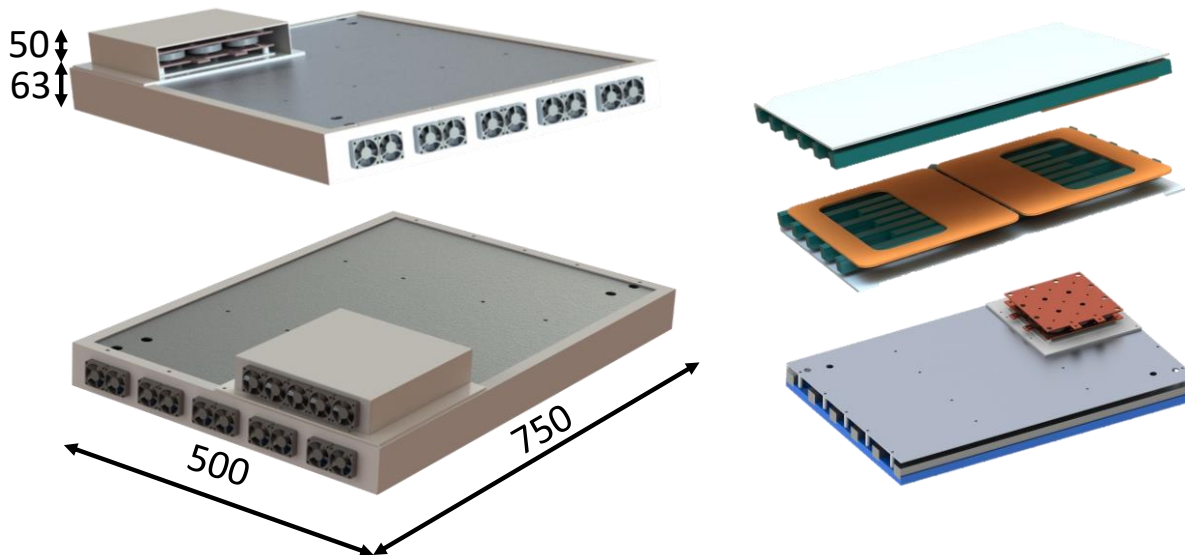
Pro případ jmenovitého výkonu experimentálního prototypu (65 kW) činí celkové ztráty na jednom vazebném elementu 580 W.



Obr. 40 Bilance výkonových ztrát ve vazebném elementu – experimentální prototyp

4.7 Mechanický návrh

Mechanický návrh vazebného elementu pro experimentální prototyp je popsán v [kapitole 4.6](#) jako popis [Obr. 35](#). Ilustraci mechanického návrhu z [Obr. 35](#) doplňuje [Obr. 41](#), který zachycuje celkový 3D model (vlevo) a základní funkční sestavu (vpravo).

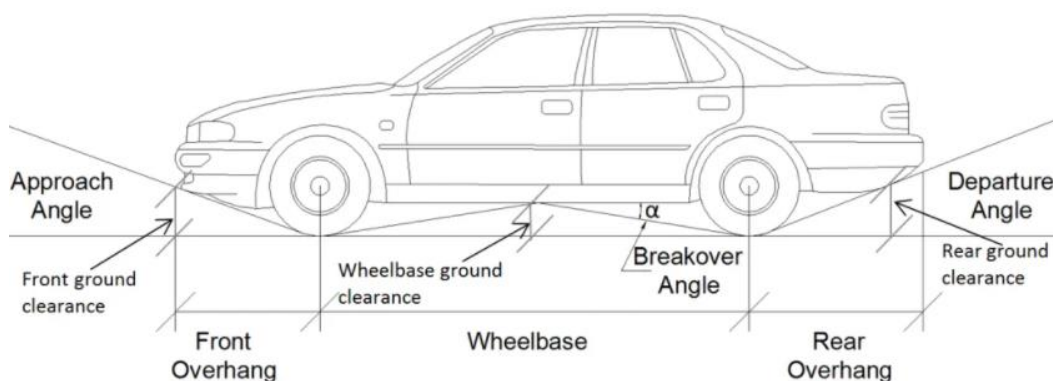


Obr. 41 Mechanický návrh vazebného elementu – experimentální prototyp

4.7.1 Implementace WPT v elektro-mobilitě

Vhodné spojení vazebných elementů, respektive celé WPCS, je pro mechanický návrh WPT jedna z klíčových podmínek. Malá tloušťka vazebných elementů je z velké části intuitivní podmínkou, mimo toho je však třeba uvažovat i ostatní zástavbové rozměry a reálné přenosové vzdálenosti – viz [kapitola 3](#) a [příloha 1](#).

Jedna z hlavních podmínek, přenosová vzdálenost, vychází z technických údajů podvozku cíleného vozidla. Pro vozidla obecně platí souhrn norem (SAE), které mimo jiného definují základní normované údaje o provedení podvozku, jak zachycuje [Obr. 42](#).



Obr. 42 Normalizované parametry podvozku vozidla – ZDROJ: [58]

V oblasti osobních elektromobilů se výška podvozku pohybuje od cca 16-ti do cca 21-ti cm. Vybrané modely a jejich přesné výšky podvozku jsou zachyceny v [Tab. IX](#). Elektro-busy a jiná užitková vozidla s výškou podvozku od cca 26 do 30 cm na ta osobní, dá se říci, navazují. Výšky podvozku vybraných elektro-busů zachycuje [Tab. X](#).

U elektro-busů nebývá výška podvozku běžně udávána, je nahrazována uživatelským parametrem v podobě výšky nástupní roviny, běžněji „boarding step“. Výška podvozku pak bývá o cca 5 až 10 cm nižší (s velkým prostorem pro zastavení).

Tab. IX Výška podvozku vybraných osobních elektro vozů – [ZDROJ \[59\]](#)

E-vozidlo	Světlá výška
Skoda EnyaQ iV	18,6 cm
Skoda Karoq	17,3 cm
Tesla Y	16,7 cm
Tesla ID4	21 cm

Tab. X Výška podvozku vybraných e-autobusů – [ZDROJ \[59\]](#)

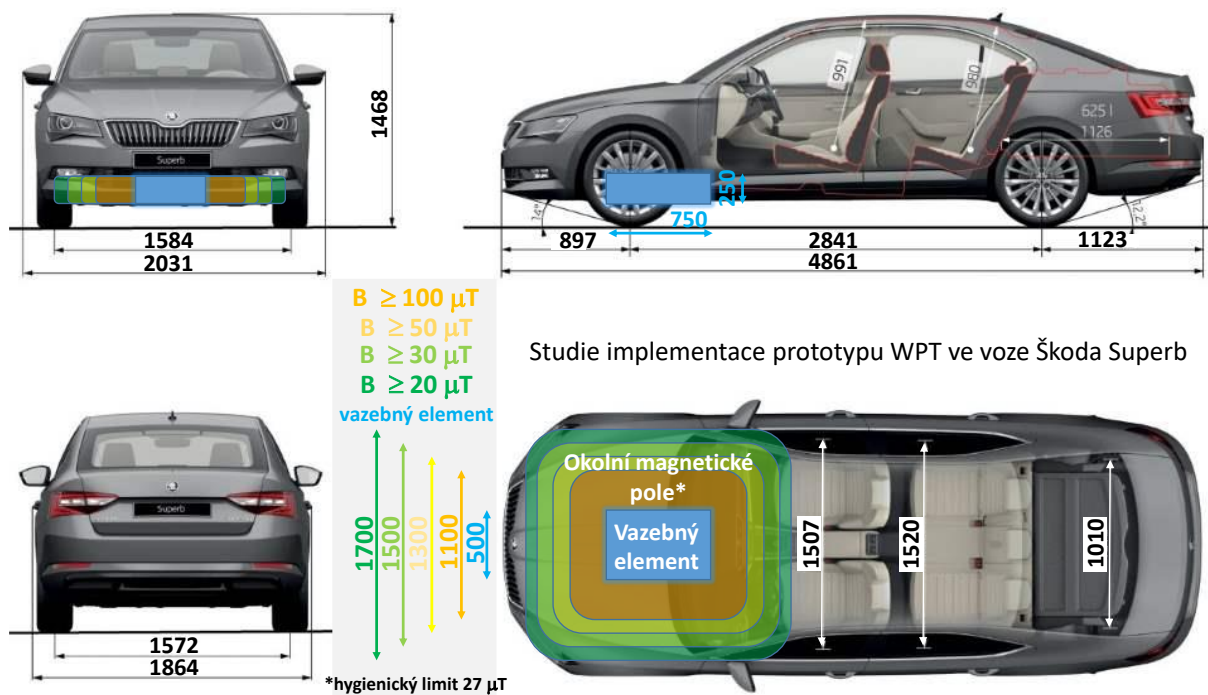
E-autobus	Světlá výška	Nástupní schod
Volvo 8400	26 cm	
Solaris Urbino xx electric	≈27 cm	32 cm
Mercedes Benz e-citago	≈32 cm	37 cm
Volvo 7900 electric	27,5 cm	
Iveco buss e-way	30 cm	

Zatímco u elektromobilů je předpokládána montáž nad roviny podvozku, tedy řekněme do motorového prostoru či prolisu, tak u elektro-busů je předpokládána montáž na či pod podvozek. Rozsah přenosových vzdáleností je na základě dat z [Tab. IX](#), [Tab. X](#) a předpokládané montáže možné definovat jako [rov. 54](#). Pro prezentovaný experimentální prototyp odpovídá interval rov. 54 činiteli vazby od 0,2 do 0,3 – viz [Obr. 38](#).

$$t_d \in \langle 15 ; 25 \rangle \text{ cm}$$

rov. 54

Studie implementace experimentálního prototypu 65kW WPT (vzniklý jako hlavní výsledek této disertační práce) do běžného vozidla Škoda Superb je vyobrazena na [Obr. 43](#). Spolu s umístěním a rozměry vozidla i vazebného elementu je na [Obr. 43](#) zachycena i okolní naměřená intenzita magnetického pole, což je další důležitá část návrhu vazebných elementů, přímo související s elektromagnetickým návrhem. Intenzity magnetického pole jsou měřeny při plném výkonu experimentálního prototypu a přenosové vzdálenosti 20 cm. Přesné výsledky z tohoto měření zachycuje [Tab. XI](#).



Obr. 43 Implementace vazebných elementů experimentálního prototypu ve voze Škoda Superb

Tab. XI Naměřená okolní intenzita magnetického pole – experimentální prototyp.

$P_2 = 65 \text{ kW}$							
$l_x \text{ [cm]}$	$B \text{ [uT]}$			$l_y \text{ [cm]}$	$B \text{ [uT]}$		
	$td = 15\text{cm}$	$td = 20\text{cm}$	$td = 25\text{cm}$		$td = 15\text{cm}$	$td = 20\text{cm}$	$td = 25\text{cm}$
20		185		20		255	
25		136		25		140	
30	85	100	95	30	140	110	170
35		75		35		77	
40		52		40		55	
45		45		45		47	
50		35		50		33	
55		25		55		24	
60	13	23	15	60	22	22	30
90	6	9	6,2	90	10	9,5	11
120	3,3	5	3	120	5	4,3	4,5

4.8 Měníče WPT

Měníče WPT jsou základní a nezbytnou funkční součástí bezdrátového přenosu energie, v konečném důsledku tedy také WPCS. Vstupní střídač a výstupní usměrňovač zajišťují správnou funkci vazebných elementů a současně umožňují základní řízení přenášeného výkonu – viz [kapitola 4.9](#).

O zapojení a topologii měničů WPT vypovídá například Obr. 9. Měníče WPT jsou vždy v jednofázové můstkové topologii, zpravidla oba řešené jako identické střídače.

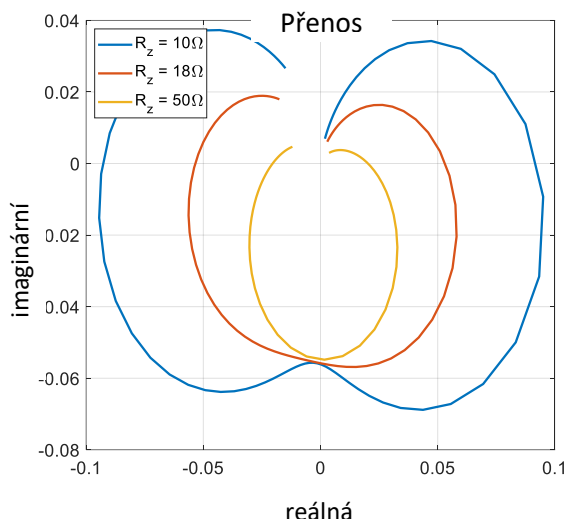
Elektrický, mechanický ani tepelný návrh měničů WPT není předmětem této disertační práce.

4.9 Řízení WPT

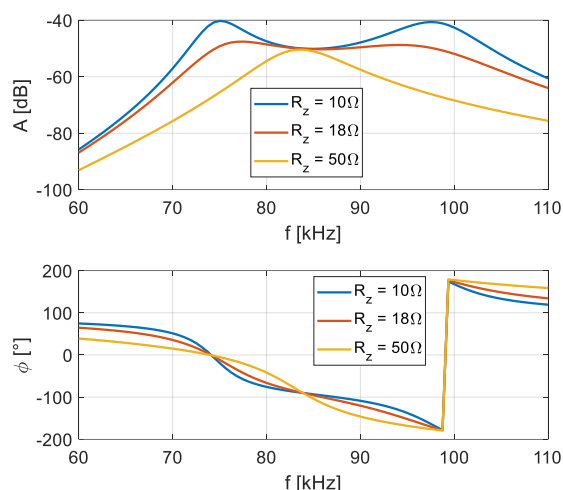
Na vazební elementy je třeba nahlížet jako na velmi tvrdý proudový zdroj s přenosovou charakteristikou odvozenou z [rov. 10](#) jako [rov. 55](#). Přenosovou rovnici je možné numericky řešit ([Obr. 44](#)) a stanovit amplitudovou (AFCH) a fázovou frekvenční charakteristiku (FFCH) ([Obr. 45](#)).

$$F_{1(j\omega)} = \frac{Y_{j\omega}}{X_{j\omega}} = \frac{I_2}{U_1} \quad \text{rov. 55}$$

Tento pohled v zásadě nepřináší žádné nové informace oproti předchozímu popisu, je však tím nejpřehlednějším. Na základě FFCH je zřejmý vázový posuv -90° mezi vstupem a výstupem vazebných elementů, jenž je ovlivněn přesností nastaveného rezonančního kmitočtu. Na základě FFCH je také možné usoudit na krajní stabilní kmitočty odpovídající posuvu 0° a -180° při nulových bezpečnostech ve fázi. Korespondující AFCH je jen jiným obrazem impedanční mapy z [Obr. 28](#). Přínosem je zde jasné objasnění proudového charakteru zdroje nezávislého na zatížení. Je však třeba udržovat maximální účinnost přenosu, jejíž charakter [Obr. 45](#) nereflektuje ([rov. 39](#) musí být platná – $R_z = 18,5 \Omega$ pro experimentální prototyp).



Obr. 44 Přenos vazebných elementů



Obr. 45 Amplitudová a fázová charakteristika vazebných elementů

Z přenosové funkce vazebných elementů vychází první požadavek na regulaci, tedy nastavení a udržení ideálně přesné napájecí frekvence f_{U1} na hodnotě aktuální rezonanční frekvence.

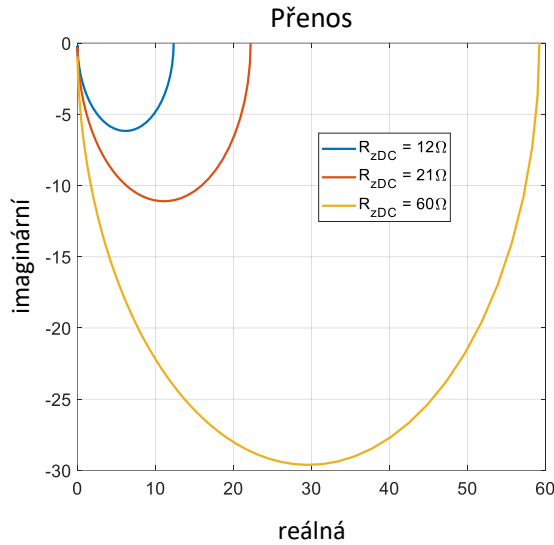
Další regulace na vysokofrekvenční straně je značně komplikovaná, proto je nutné další regulace realizovat na úrovni vstupního DC1 a výstupního DC2 meziobvodu.

Mezi výstupním elementem a DC2 je vložen můstkový synchronní usměrňovač s maximální spínací rychlostí $\tau_u = 10$ ns (experimentální prototyp). Jeho přenos je stanoven dle [rov. 56](#) a vyobrazen na [Obr. 46](#) a [Obr. 47](#), kde je patrný pro (kmitočty 85 ± 5 kHz) prakticky ideální přenos. Důležité je, že F_u definuje velikost výstupního napětí v závislosti na velikosti R_{ZDC} a současně vylučuje možnost chodu přenosu s velkým zátěžným odporem či zcela bez zátěže.

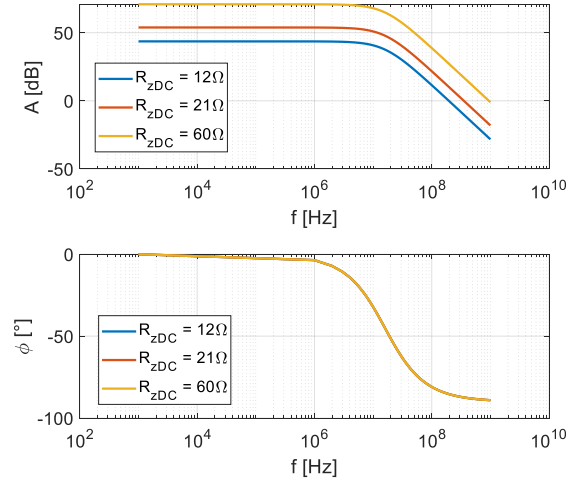
$$F_u(j\omega) = \frac{Y_{j\omega}}{X_{j\omega}} = \frac{U_{DC2}}{I_2} = \frac{\pi^2}{8} R_{ZDC} e^{-j\omega\tau_u} = \frac{\frac{\pi^2}{8} R_{ZDC}}{1 + j\omega\tau_u} \quad \text{rov. 56}$$

Z [rov. 56](#) také vychází jeden regulační stupeň volnosti v podobě regulace výkonu velikostí zátěžného odporu R_{ZDC} dle [rov. 57](#). Jak je však zjevné z účinnosti mapy na [Obr. 27](#), takováto regulace vede na proměnlivou (klesající) účinnost přenosu. Je vhodná spíše jako pomůcka velmi jemného doregulování požadovaného výkonu.

$$P_{DC2} = R_{ZDC} I_{DC2}^2; I_{DC2} = konst. \quad \text{rov. 57}$$



Obr. 46 Přenos usměrňovače



Obr. 47 Amplitudová a fázová charakteristika usměrňovače

Vazební elementy jsou napájeny pomocí vstupního střídače v jednofázové můstkové topologii. Při jeho modulaci je využíváno vysoké frekvenční selektivity vztahné impedance přenosu, čímž je možné jej řídit na obdélníkové výstupní napětí o frekvenci f_0 . Přenos takového střídače je dán [rov. 58](#).

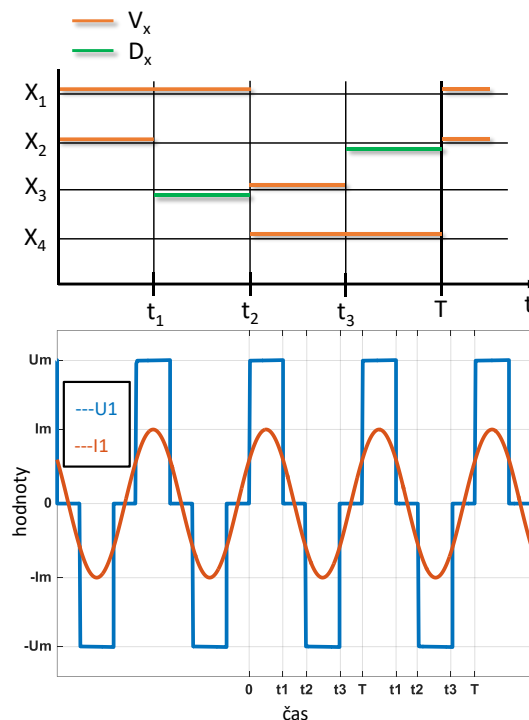
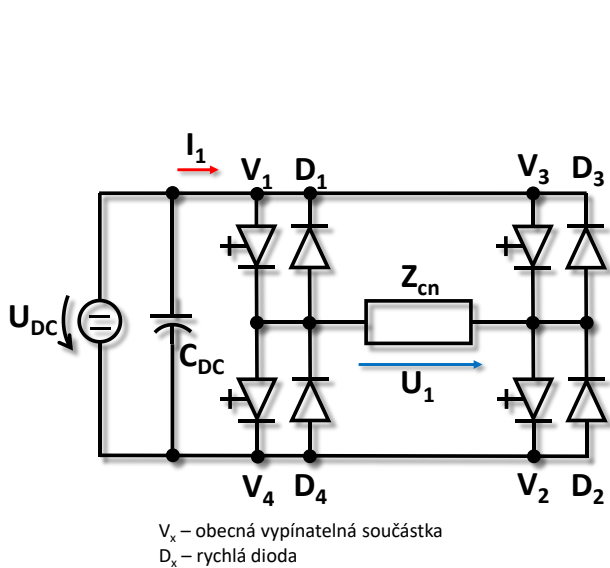
$$F_S(j\omega) = \frac{Y_{j\omega}}{X_{j\omega}} = \frac{k_s}{1 + j\omega\tau_s};$$

$$a) \tau_s = \frac{1}{f_0} \vee b) \tau_s = \max(t_{on}, t_{off}) \quad \text{rov. 58}$$

$$a) k_s = \frac{U_{DC1}}{u_{sř}} \vee b) k_s = \frac{2 z_s U_{DC1}}{u_{sř}}; u_{sř} = 1$$

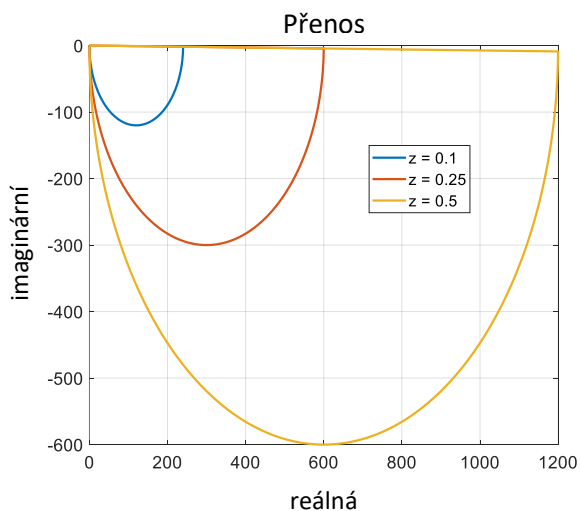
Na základě přenosu střídače z [rov. 58](#) je možné definovat další dva stupně volnosti pro řízení WPT a to: **a)** řízení výkonu pomocí velikosti střídy obdélníkového výstupu střídače; **b)** řízení výkonu pomocí velikosti napětí v meziobvodu DC1. Pro případ **a)** vstupuje v platnost [rov. 59](#), kde je třeba charakterizovat časový průběh $u_{1(t)}$, který je dán typickým spínacím diagramem ([Obr. 48](#)) minimalizujícím ztráty přenosu a střídače samotného. Výstupní obdélníkové napětí a proud I_1 s říditelnou střídou je pro $z_s = 0,25$ uvedeno na [Obr. 48](#) dole. Při znalosti časového průběhu $u_{1(t)}$ je možné [rov. 28](#) přepsat do tvaru [rov. 60](#). Přenosové charakteristiky pro uvedený případ jsou uvedeny na [Obr. 49](#) a [Obr. 50](#). (konkrétní hodnoty jsou dány experimentálním prototypem).

$$S_1 = \frac{U_1^2}{Z_{cn}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_{1(t)}^2 dt}}{Z_{CN}}; Z_{CN} = f\{f_0, R_z\} \vee \varphi_{Zcn} \approx 0 \quad \text{rov. 59}$$

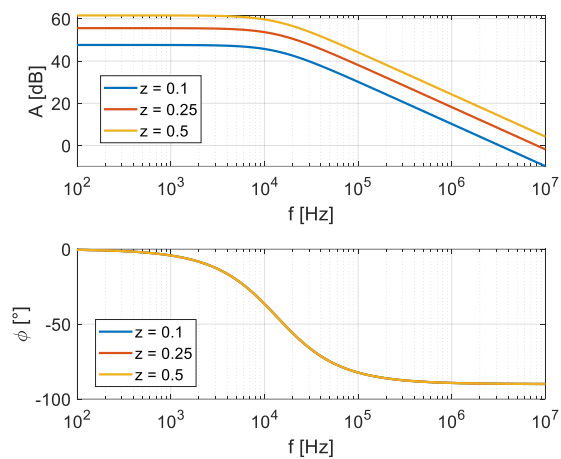


Obr. 48 Modulace vstupního střídače pro $z < 0,25$

$$P_1 = \frac{(2z_s U_{DC1})^2}{Z_{cn}} \cos \varphi_{zcn}; Z_{CN} = f \{f_0, R_z\} \vee \varphi_{zcn} \approx 0 \quad \text{rov. 60}$$



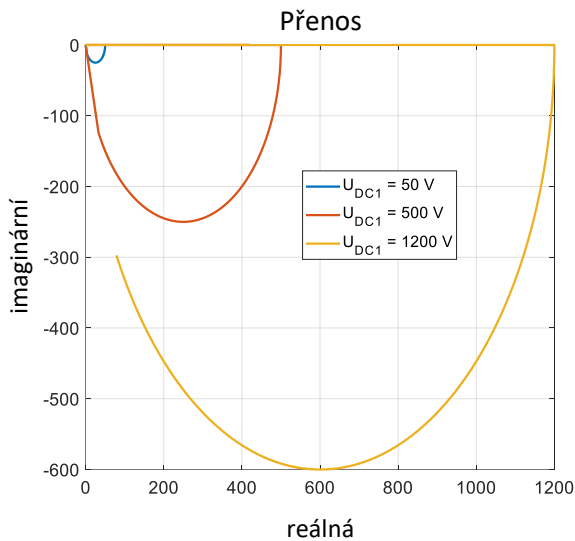
Obr. 49 Přenos střídače pro $z = 0,25$



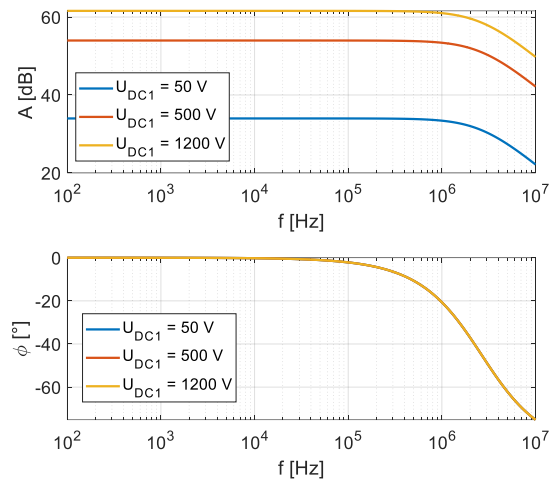
Obr. 50 Amplitudová a fázová charakteristika střídače pro $z = 0,25$

Pro případ řízení střídače je dále charakteristická mez $z = 0,25$, neboť pro nižší střídy razantně klesá účinnost přenosu a střídače samotného – viz [kapitola 6.5](#). Tímto je pochopitelně omezena i říditelnost výkonu. Význam této metody zůstává pro malé regulační změny či snížení výkonu pod možnost nadřazené regulace výkonu. Nadřazenou regulací výkonu se stává varianta **b)**, tedy řízení výkonu pomocí velikosti napětí v meziobvodu DC1. Tato metoda je výhodná „neomezeným“ intervalem velikosti U_{DC1} a tedy i P_1 a značným frekvenčním pásmem omezeným jen rychlostí polovodičových spínacích prvků. Přenosové

charakteristiky pro nadřazenou regulaci výkonu jsou uvedeny na [Obr. 51](#) a [Obr. 52](#) (konkrétní hodnoty jsou opět dány experimentálním prototypem).



Obr. 51 Přenos střídače pro $z = 0,5$



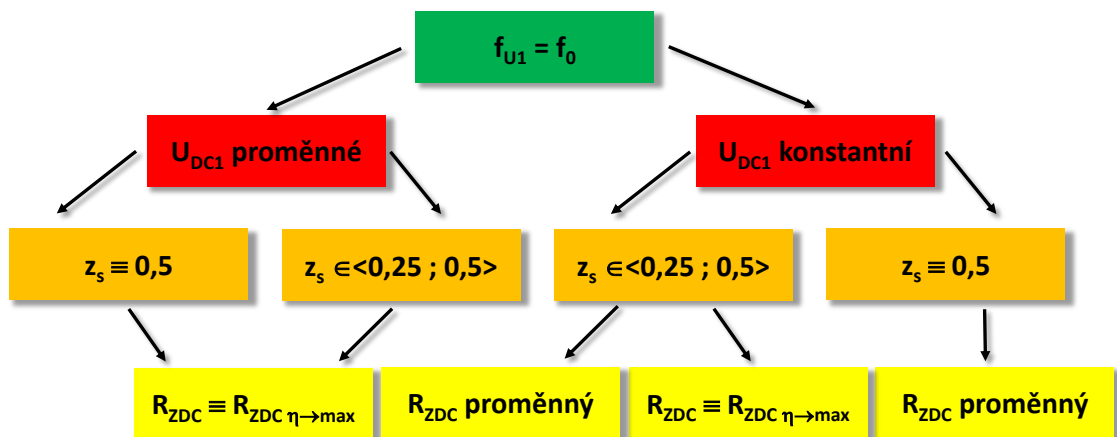
Obr. 52 Amplitudová a fázová charakteristika střídače pro $z = 0,5$

4.9.1 Shrnutí řízení WPT

Dílčím závěrem z [kapitoly 4.9](#) této disertační práce jsou přenosové charakteristiky (samotného přenosu, výstupního usměrňovače a vstupního střídače) a stupně volnosti řízení WPT. Tyto jsou:

- Kmitočet napájecího napětí f_{U1}
- Velikost zátěžného odporu R_{ZDC}
- střída obdélkového výstupu střídače z_s
- Velikost napětí meziobvodu U_{DC1}

Přičemž na základě porovnání přenosů a charakteristických vlastností S-S konfigurace vazebných elementů jsou definovány vhodnosti a omezení jednotlivých stupňů volnosti, čímž je možné konkretizovat podobu řízení WPT [Obr. 53](#). Výběr té nejvhodnější možnosti se odvíjí od již prezentovaných vlastností, teoretických předpokladů a od vlastností a teoretických předpokladů, které jsou prezentovány v následující části této disertační práce.



Obr. 53 Možné kombinace stupňů volnosti řízení WPT

Při tomto stavu poznání lze jen označit proměnnou střidu vstupního střídače za neefektivní a neúčinné řešení regulace výkonu, čímž zůstávají dva možné stupně volnosti v podobě U_{DC1} a R_{ZDC} .

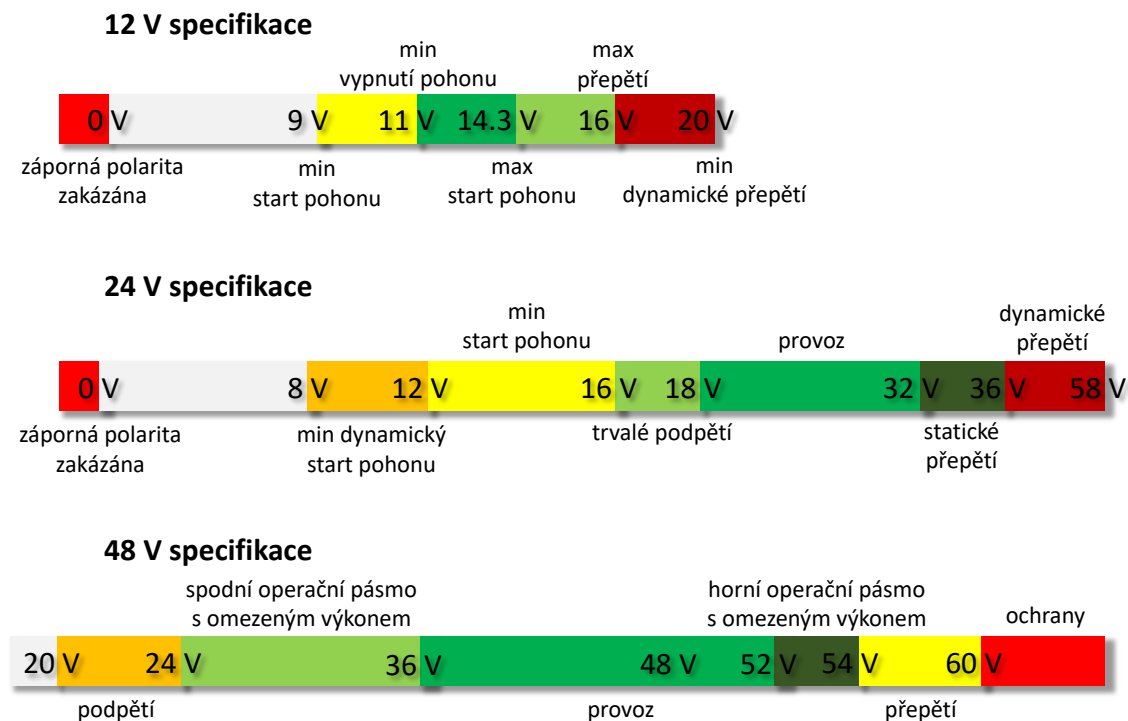
5 Bezdrátová nabíjecí stanice - WPCS

Bezdrátová nabíjecí stanice pro elektro-mobilitu (WPCS) je samostatně funkčním zařízením využívající jako hlavní komponentu samostatně funkční systém WPT. V principu jde o rozšíření WPT z kapitoly 4 o měniče WPCS, které zajišťují napájení WPT a výstupní přizpůsobení obvodových parametrů WPT zátěži. Spolu s HW „přizpůsobením“ se měniče WPCS mohou starat o regulaci WPCS. Oddělení části WPT a WPCS je naznačeno například na Obr. 8.

5.1 Zátěž WPCS – trakční baterie

Typická zátěž WPCS je tvořena trakční baterií s charakteristickými vlastnostmi a potřebami. Výkony a napětí jsou přitom rozdílné model od modelu a rok od roku. Zcela hrubě lze baterie pro elektromobil rozdělit podle napěťových tříd [57]: Nízkonapěťové (Low Voltage- LV) a vysokonapěťové (High Voltage - HV).

LV specifikace jsou vyobrazeny na Obr. 54, jedná se o specifické napěťové hladiny pro malá (někdy též osobní) elektrická vozítka s výkony maximálně jednotky kW. Právě vzhledem k požadovaným výkonům (běžně 500 W až 5 kW) pro takováto vozítka je v současné době využívána výhradně 48V specifikace.



Obr. 54 Nízkonapěťové (Low voltage - LV) specifikace pro elektro-mobilitu

Pro výkonnější vozidla a tedy i pro osobní a hromadnou elektro-mobilitu je třeba přejít k HV specifikacím. V oblasti HV specifikace nepanuje takový řád jako u LV specifikací, dokonce zde existují dva předpisy, které nejsou v úplné shodě: „E-mobility performance class for passenger

vehicles“ a „E-mobility performance class for commercial vehicles / busses“. Oba předpisy lze shrnout pomocí [Tab. 12](#) a [Tab. 13](#).

Tab. XII Výkonnostní tabulka pro osobní elektromobily - [ZDROJ \[57\]](#)

E-mobility performance class overview for passenger vehicles										
		Mild Hybrid			Full Hybrid/Plug-in		EV (Batt/RE/FC)			Unit
		12 V	48 V	HV	mid	Power	Small car	Medium car	Sports car	
max. EM Power	motor-based	4	12	20	60	100	60	100	180	kW
max. EM Speed	motor-based	50	150	150	200	300	200	300	500	Nm
DC voltage	max. (generator-based)) min. (motor-based)	15	60	200	400	450	400	400	450/800	V
		12	36	120	300	250	300	300	300/600	V
max. current	DC AC	333	333	167	200	400	200	333	550/280	A
		350	500	500	600	800	250	450	1000/500	A
Speed/crankshaft speed ratio or max. EM speed		3	1	1	1	1	10–15 k/min		bis 20 k/min	
Power ratio max./duration		2	2	2	2	2.5	1.5	1.5	2	

Tab. XIII Výkonnostní tabulka pro komerční elektromobily a elektro-busy – [ZDROJ \[57\]](#)

E-mobility performance class overview for commercial vehicles/buses										
		Mild Hybrid (up to approx. 40% internal combustion engine power)				Plug-in Hybrid 7.5–12 t	EV/RE/FC			Unit
		< 7.5 t	7.5–12 t	> 12 t	Bus (18 t)		< 7.5 t	7.5–12 t	Bus (18 t)	
max. EM Power	motor-based	50	65	120	120	90	100	120	2x 120	kW
max. EM Speed	motor-based	350	450	1000	1000	500	350	450	2x 500	Nm
DC voltage	max. (generator-based)) min. (motor-based)	400	420	420/800	420/800	420	420	420	800	V
		280	300	300/600	300/600	300	300	300	600	V
max. current	DC AC	180	220	400/200	400/200	300	330	400	400	A
		300	350	450/250	450/250	450	450	450	2x 250	A
Speed/crankshaft speed ratio or max. EM speed		1	1	1	1–1.6	1	10 k/min	10 k/min	10 k/min	
Power ratio max./duration		1.5	1.5	2	2	1.8	2	2	2	
Remarks		Apparently no longer pursued						Apparently no longer pursued	Axis with 2 EM	

Pro ztotožnění se s aktuální situací v reálném provozu je na [Obr. 55](#) vyobrazena trakční baterie určená pro plně elektrické osobní automobil Škoda ANYAQ iV s nabízenými kapacitami baterie 55, 62 a 85 kW, čemuž odpovídají jmenovitá napětí 355, 400, 533 V. To ostatně [Obr. 53](#) v přeneseném smyslu ilustruje. Objasnění uvedených napětí nevychází jen z řazení bateriových bloků (modulů) v baterii, ale také z [Tab. XII](#), kde jednotlivé baterie spadají do výkonnostních tříd „Small car“, „Medium car“ a „Sport car“.

82 kWh

12 cell modules (24x Li-ion cell)
288 Li-ion cells



62 kWh

9 cell modules (24x Li-ion cell)
216 Li-ion cells



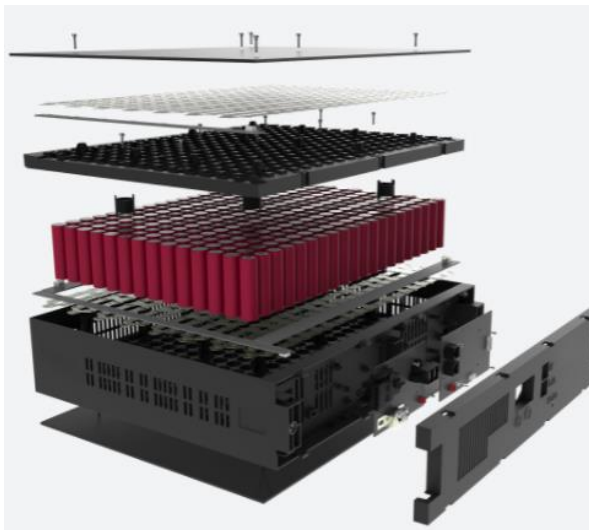
55 kWh

8 cell modules (24x Li-ion cell)
192 Li-ion cells



Obr. 55 Škoda ANYAQ iV baterie (různé verze) - [ZDROJ \[59\]](#)

V případě elektro-busů či elektrických užitkových vozidel ([Obr. 56](#)) platí výkonnostní třídy dle [Tab. XIII](#). Nekomerční vozidla, jako jsou například závodní vozy E-formule ([Obr. 57](#)), nepodléhají uvedeným omezením, avšak řídí se vlastními předpisy, které jsou prezentovaným velmi podobné.



Obr. 56 BMZ trakční baterie – ZDROJ: <https://bmz-group.com/index.php/en/battery-systems-en/e-mobility-en>



Obr. 57 BMW formule-E baterie – sezóna 2020 – ZDROJ: obrázky GOOGLE

Právě z výkonů, napětí a proudů baterií vychází dimenzování WPCS. U WPCS je, obdobně jako u kabelových nabíjecích stanic, třeba zaručit velký interval výstupních napětí až do 1000 V. V případě experimentálního prototypu byla pro nominální provoz uvažována 85kWh baterie pro Škoda ANYAQ iV, která umožňuje vysokorychlostní nabíjení výkonem až 50 kW.

Moderní trakční baterie jsou postaveny na bázi Lithia a nabíjeny standartním CC-CV (constant current - constant voltage) cyklem. Základní vztahy charakterizující nabíjení baterie jsou dány [rov. 61 – 64](#). [Rov. 61](#) popisuje nárůst napětí baterie ($U_{bat\ c}$) v závislosti na maximálním uložitelném náboji ($Q_{bat\ max}$), vnitřním odporu baterie (R_{int}) a přiloženému napětí (U_{bat}) vztahenému k vnitřnímu napětí (U_{int}).

$$U_{bat\ c} = \frac{U_{bat\ max}}{Q_{bat\ max}} \int_0^t \frac{u_{bat}(t) - u_{int}(t)}{R_{int}} dt ; \quad \text{rov. 61}$$

$$u_{bat}(t) \leq U_{bat\ max}$$

Proud baterie (I_{bat}) je dán [rov. 62](#), která tvoří základní vztah pro regulaci v CC režimu. Druhou základní vlnici ([rov. 63](#)) tvoří vztah pro ekvivalentní odpor baterie vztažený ke svorkám ($R_{bat\ eqv}$)

$$I_{bat} = \frac{U_{bat} - U_{int}}{R_{int}} \quad \text{rov. 62}$$

$$R_{bat\ eqv} = R_{int} + \frac{U_{bat}}{I_{bat}} \quad \text{rov. 63}$$

[Rov. 64](#) má pouze formální charakter, neboť definuje vztah mezi uložitelným nábojem v baterii, jejím maximálním napětím ($U_{int\ max}$) a kapacitou baterie (C_{bat}).

$$C_{bat} = \frac{Q_{bat\ max}}{U_{int\ max}} \quad \text{rov. 64}$$

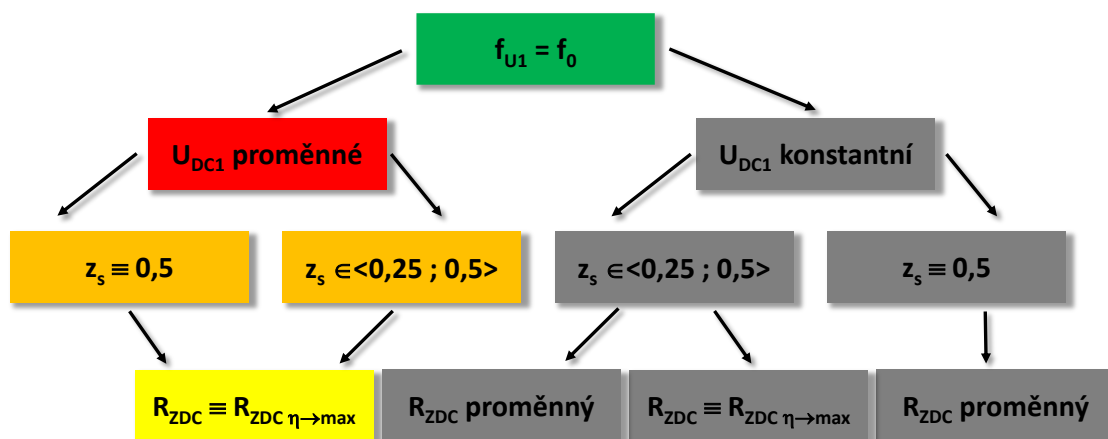
Další rozvinutí nabíjecího procesu a jeho spojení s WPCS je ovlivněn zvolenou topologií a řízením WPCS, jak popisuje následující [kapitola 5.2](#).

5.2 Návrh WPCS

Návrh WPCS je ovlivněn volbou strategie řízení, neboť ta určuje akční a regulované veličiny a v důsledku pak stanovuje skladbu výkonového řetězce, tedy použité polovodičové měniče. Při řešení této disertační práce byly postupně uvažovány tři topologie řízení založené na totožném výkonovém řetězci: distribuční *sít'-3_LACDC-DCAC-ACDC-DCDC-baterie*.

- V prvním případě jde o dnes nejrozšířenější přístup, kdy síťový usměrňovač je konstantně nastaven, respektive je neřízený (může být diodový) a výstupní DCDC měnič obstarává řízení nabíjení baterie v CC-CV cyklu.
- Druhý případ předpokládá minimalizaci složitosti *on-board* strany, kde je výstupní DCDC měnič vyřazen a celé nabíjení je řízeno vstupním síťovým usměrňovačem.
- Poslední varianta je tím nejdokonalejší a současně velmi jednoduchým řešením, kdy výstupní DCDC měnič zaujímá funkci aktivního impedančního přizpůsobení a vstupní usměrňovač řídí nabíjení baterie.

Dále se tato disertační práce zabývá výhradně regulační strategií uvedenou na [Obr. 58](#).



Obr. 58 Zvolená strategie řízení WPCS

5.2.1 Regulace on-board části WPCS

Zvolený způsob regulace využívá *on-board* řízení pro zajištění impedančního přizpůsobení vazebných elementů a zátěže ve smyslu splnění [rov. 39](#) při impedančním přenosu usměrňovače dle [rov. 40](#). Za tímto účelem je výstupní DCDC měnič řízen jako pulzní měnič pro zvyšování odporu (snižující pulzní měnič napětí), který se řídí [rov. 65](#).

$$R_{zDC} = \frac{R_{bat\ eqv}}{z^2}; z \in \langle 0; 1 \rangle \quad \text{rov. 65}$$

Dosažením [rov. 63](#) do [rov. 65](#) a rov. 65 do [rov. 40](#) dostaneme [rov. 66](#) položenou jako ekvivalent k požadovanému odporu dle [rov. 39](#). Takto vzniklou exaktní rovnici je pro potřeby regulace možné zjednodušit na elementární vztah ([rov. 67](#)) využívající pouze měřené obvodové veličiny U_{bat} , I_{bat} a U_{DC2} , I_{DC2} .

$$R_z = 8 R_{int} \frac{1 + \frac{U_{bat}}{U_{bat} - U_{int}}}{(\pi z)^2} = M\omega = R_{z\ \eta max} \quad \text{rov. 66}$$

$$R_z = \frac{8}{\pi^2} \frac{U_{DC2}}{I_{DC2}} = \frac{8}{\pi^2} \frac{U_{bat}}{z^2 I_{bat}} = M\omega = R_{z\ \eta max} \quad \text{rov. 67}$$

Pro zajištění správné funkce impedančního přizpůsobení je třeba definovat hlavní podmínky provozu. Jako první podmínka je uvedena [rov. 68](#), která konkretizuje funkci pulzního měniče pro zvyšování odporu. Reálné hodnoty $R_{bat\ eqv}$ jsou velmi malé, maximálně v řádu malých jednotek Ohm, zatímco požadované R_z se pohybuje, nejen pro experimentální prototyp, v řádu nižších desítek.

$$R_{DC2} \geq R_{bat\ eqv} \quad \text{rov. 68}$$

V návaznosti na Ohmův zákon je možné definovat krajní maximální proud baterií při jejím maximálním napětí (CV část nabíjení) ([rov. 69](#)). Maximální nabíjecí proud v CC části nabíjení je pak dán parametry baterie ($I_{bat\ max} = I_{bat\ max\ CC}$). Výsledný interval možných nabíjecích proudů ([rov. 70](#)) tvoří hlavní omezovač pro CC-CV regulaci, přičemž $I_{bat\ min}$ se řídí [rov. 71](#).

$$I_{bat \max CV} = \frac{U_{bat \max}}{R_{eqv}} \quad \text{rov. 69}$$

$$I_{bat} \in (\langle I_{bat \min} ; I_{bat \max CC} \rangle \wedge \langle I_{bat \min} ; I_{bat \max CV} \rangle) \quad \text{rov. 70}$$

Interval z [rov. 70](#) je třeba upravit na reálné podmínky. Horní mez je dána čistě omezením baterie, zatímco dolní mez může být z hlediska výkonových měničů problematická. Předně jde o vliv přerušovaných proudů na účinnost a říditelnost pulzního měniče pro zvyšování odporu. Současně je přerušovaný proud, tedy zvlnění nabíjecího proudu, problematický i pro samotný nabíjecí proces baterie. Interval z rov. 70 je třeba upravit o podmínku z [rov. 71](#), kdy amplituda zvlnění výstupního proudu $I_{d\delta M}$ ([rov. 72](#)) musí být přiměřeně malá. Proměnná L_{DC3} představuje velikost pracovní indukčnosti výstupního DCDC měniče.

$$I_{d\delta M} \ll I_{bat \min} \quad \text{rov. 71}$$

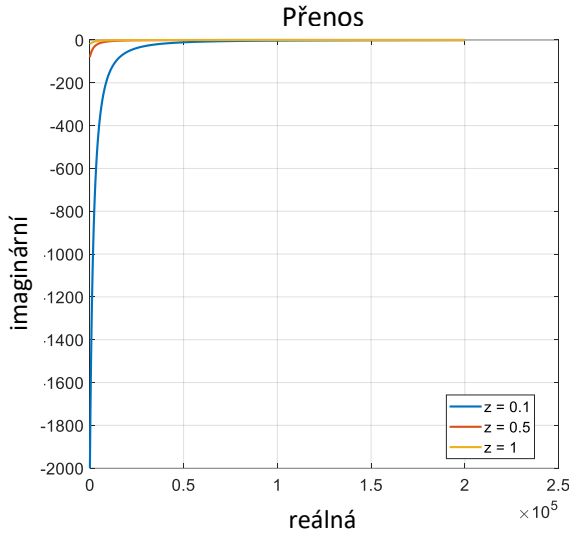
$$I_{d\delta M} = \frac{U_{DC2}}{8 n L_{DC3} f_{sw DCDC}} \quad \text{rov. 72}$$

Současně je třeba zaručit chod WPT do zátěže, tedy omezit interval z zespolu, například na 0,1. Horní mez $z = 1$ nastává při poklesu proudu pod interval [rov. 70](#). Tento stav však není neslučitelný s provozem WPT, avšak snižuje jeho účinnost.

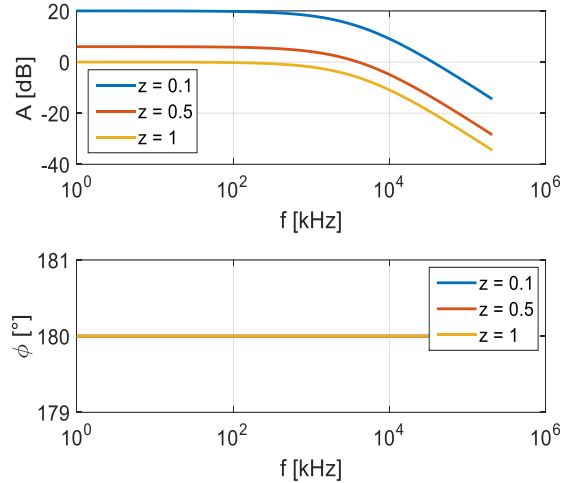
Definovaný výstupní DCDC měnič je možné začlenit do sestavy WPCS, respektive vřadit za výstupní usměrňovač WPT a stanovit jeho obrazový přenos. Při začleňování do řetězce WPCS vzniká pro DCDC měnič celá řada parametrů, jež hrají svoji roli, lze je však eliminovat do přenosu z [rov. 73](#), kde $f_{sw DCDC}$ pak označuje spínací frekvenci výkonových prvků výstupního DCDC měniče.

$$F_{DCDC(j\omega)} = \frac{Y_{j\omega}}{X_{j\omega}} = \frac{\frac{1}{Z^2}}{\left(j + \frac{j\omega}{f_{sw DCDC}}\right)^2} \quad \text{rov. 73}$$

Přenosové charakteristiky pro experimentální prototyp pracující s $f_{sw DCDC} = 25$ kHz a $R_{z DC} = 15 \Omega$ jsou uvedeny na [Obr. 59](#) a [Obr. 60](#). Zde je nejdůležitější relativně malý kmitočet zlomu amplitudové charakteristiky, kdy jsou děje rychlejší než 1 kHz „tlumeny“. Charakter fázového posuvu je pak důležitý pro návrh zpětné vazby regulátoru a regulátoru $R_{z DCDC}$ vůbec.



Obr. 59 Přenos výstupního DCDC měniče – exp. prototyp



Obr. 60 Amplitudová a fázová charakteristika výstupního DCDC měniče – exp. prototyp

Vcelku komplikovanou problematikou je dynamicky se měnící velikost optimálního $R_{z_{DCDC-\eta_{max}}}$, který se řídí [rov. 40](#) – je tedy přímo závislý na velikosti vzájemné indukčnosti mezi vazebnými elementy WPT a dle [rov. 7](#) také na činiteli vazby. V konečném důsledku je pak optimální nastavení $R_{z_{DCDC-\eta_{max}}}$ závislé na přenosové vzdálenosti, vyosení apod. - zkrátka na vzájemné poloze vazebných elementů, jak ilustruje [Obr. 29](#). Kompenzační technika vychází z [rov. 74](#), kde se koeficienty k_1 , k_2 a k_3 řídí [rov. 37](#). Proměnou zde zůstává pouze vztažená impedance ke zdroji, kterou je možné, díky absolutní dominanci činné složky výkonu, vyjádřit [rov. 75](#). [Rov. 76](#) slouží jako formální upřesnění výpočtu velikosti aktuálního odporu zátěže vztaženého ke svorkám vazebného elementu *on-board* části WPT.

$$M_{(kt)} = \sqrt{\frac{Z_{te(kt)}k_2(kt) - k_1(kt) - k_3(kt)}{jC^2\omega_0^4}} \quad \text{rov. 74}$$

$$Z_{te(kt)} = \frac{\pi u_{DC1(kt)}}{4 i_{DC1(kt)}} \quad \text{rov. 75}$$

$$R_{L(kt)} = \frac{8 u_{DC2(kt)}}{\pi^2 i_{DC2(kt)}} \quad \text{rov. 76}$$

Jelikož se popis problematiky konkretizuje k implementaci v reálném mikro kontroléru, tak jsou [rov. 74](#) až [rov. 76](#) doplněny o indexaci aktuálního výpočetního cyklu (kt). Tento není prováděn kontinuálně, jelikož není předpokládána rychlá a neustálá změna vzájemné pozice vazebných elementů či parametrů baterie. Výpočet regulační smyčky výstupního DCDC měniče je možné omezit na relativně vzdálená přerušení. To pochopitelně neplatí pro měření a z něj čerpající SW ochrany.

5.2.2 Regulace off-board části WPCS

Regulace *off-board* části se, na základě [Obr. 58](#), dělí do tří částí, tedy na regulaci frekvence napětí U_1 , regulaci napětí v meziobvodu U_{DC1} a regulaci střídavého napětí U_1 . Jednotlivé části jsou spolu více či méně provázané, podobně, jako jsou provázané na *on-board* část WPCS. To je také hlavní rozdíl, neboť *on-board* část regulace je na *off-board* části zcela nezávislá, nicméně za provázanost z *on-board* části na *off-board* část může být považováno měření obvodových veličin a jejich komunikování.

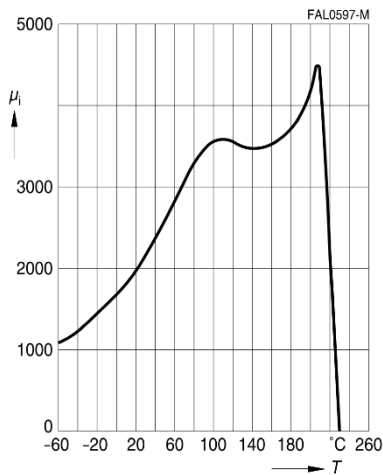
Na základě impedančního modelu z [Obr. 27](#) a [rov. 15](#), [17](#) je možné definovat základní požadavky na regulaci frekvence U_1 . Nejdůležitější poznatek je nezávislost hlavního rezonančního kmitočtu f_0 na zátěži R_{zDC} a přenosové vzdálenosti t_d . Hlavním úkolem regulace f_{U1} na hodnotu f_0 dle [rov. 13](#) je především kompenzace tepelných změn parametrů rezonančního obvodu. Pomineme-li tepelné změny parazitních $ESRL$ a $ESRC$, které ovlivní především jakost L a C a tím velikost činných ztrát, pak mají dominantní vliv na tepelnou změnu parametrů rezonančního obvodu materiálové vlastnosti magnetického obvodu vazebných indukčností a dielektrika kompenzačních kondenzátorů. O této části regulace pojednává [kapitola 5.2.2.1](#).

Nezávisle na regulaci f_{U1} je na základě popsaných vlastností WPT možné rozvést problematiku regulace nabíjecího výkonu WPCS ([kapitola 5.2.2.2](#)) a jejího připojení k distribuční síti elektrické energie ([kapitola 5.2.2.3](#)).

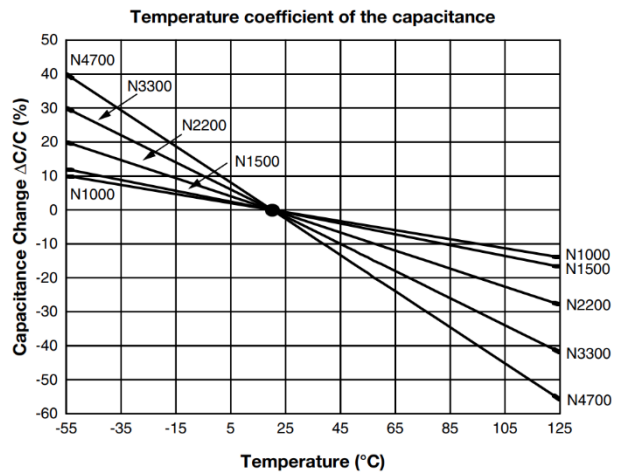
5.2.2.1 Regulace na f_0

Magnetický obvod vazebné cívky je tvořen feritovými segmenty z materiálu N79 [\[62\]](#). Pro experimentální prototyp byly vybrány segmenty Epcos TDK ([kapitola 4.6.2](#)) s tepelnou závislostí dle [Obr. 61](#). Kompenzační kondenzátor musí být volen z vysokonapěťové vysokojakostní řady (většinou označovány jako RF-HV kondenzátory), jejichž dielektrikum je povětšinou tvořeno speciálními keramikami N2200, N3300 či N4700 [\[63\]](#). V případě experimentálního prototypu byl zvolen kondenzátor Vishay ([kapitola 4.6.1](#)), jehož tepelná charakteristika je uvedena na [Obr. 62](#).

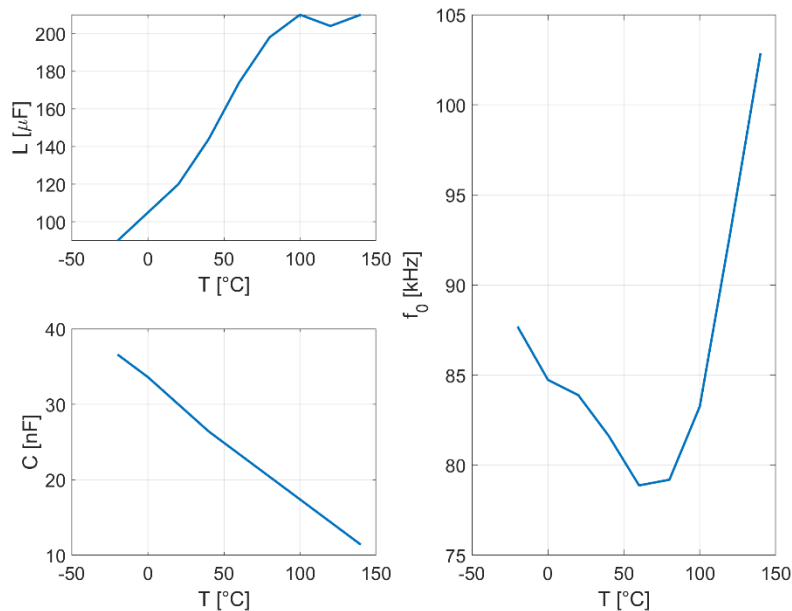
Rozšíříme-li [rov. 15](#) a [rov. 17](#) o další stupeň volnosti v podobě tepelných závislostí prvků vazebných elementů, pak dospějeme k charakteristické závislosti f_0 na teplotě (T), jak uvádí [Obr. 63](#). Uvažovaná okolní provozní teplota vazebného elementu činní -25 až 40 °C s možným oteplením vlivem ztrát až na 100 °C. Tímto je také dána možná změna f_0 v intervalu 79 až 88 kHz (pro experimentální prototyp), kterou je možné stanovit řešením [rov. 77](#).



Obr. 61 Závislost relativní permeability na teplotě – materiál N78 – [ZDROJ: \[62\]](#)



Obr. 62 Teplotní závislost kapacity – použitý materiál N4700 – [ZDROJ: \[63\]](#)



Obr. 63 tepelná závislost L , C a f_0 – exp . prototyp

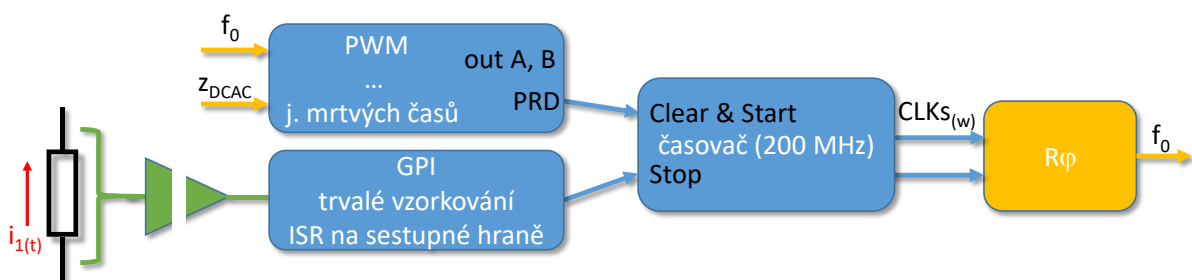
$$f_0(T) = \left(2\pi \sqrt{\mu_r(T) \frac{L(20^\circ\text{C})}{\mu_r(20^\circ\text{C})} \left[\frac{\Delta C}{C} \frac{C(20^\circ\text{C})}{100} + C(20^\circ\text{C}) \right]} \right)^{-1} \quad \text{rov. 77}$$

Pro regulaci na f_0 se nabízí využití principů fázového závěsu s cíleným nulovým fázovým posuvem $\varphi_{U1} \rightarrow \varphi_{I1} = 0$. Zobecněním [rov. 16](#) a dosazením do výpočtu úhlu komplexního čísla dostaneme základní regulační vztah ([rov. 78](#)).

$$\varphi_{UI} = \arctg \left(\frac{2\pi f_{sw} L - \frac{1}{2\pi f_{sw} C}}{R} \right) = 0 \quad \text{rov. 78}$$

Zajistit regulačně platnost [rov. 78](#) je však, vzhledem k relativně velkému kmitočtu, vcelku obtížné, především z pohledu měření a časování. Základní synchronizační impuls je možné realizovat skrze PWM modulátor vstupního střídače (například coby vzestupnou hranu U_1), Druhý synchronizační signál pro fázový závěs je pak nutné získat z měření proudu I_1 , coby průchod nulou.

Pro regulaci f_0 ve zpětnovazební smyčce vznikl obvod z [Obr. 64](#). Proud je snímán pomocí měřícího odporu (1-ky $m\Omega$) a pomocí izolovaného operačního zesilovače v kombinaci s klopným obvodem přiváděn na GPI mikroprocesoru. Tento je kontinuálně snímán a nastaven na falling-edge ISR, ve kterém je zastaven časovač. Časovač je opětovně spouštěn s periodou PWM modulátoru vstupního napětí U_1 , tedy v okamžiku U_1 rising-edge. Pro zcela doregulovanou soustavu se tedy hodnota řídí [rov. 79](#) a pro dynamicky se měnící stavy pak [rov. 80](#) (kt představuje diskrétní čas).



Obr. 64 regulace kmitočtu U_1 na $f_{0(T)}$

$$CLK_{sw} = \frac{1}{2} \frac{f_{CLK}}{f_{0(T)}} \quad \text{rov. 79}$$

$$CLK_{sw(k+1)} = \frac{1}{2} \frac{f_{CLK}}{f_{sw(k)}} \quad \text{rov. 80}$$

Během řešení této disertační práce bylo ve spojení s problematikou stanovení průchodu proudu I_1 nulou zkoumáno několik přístupů založených na různých principech. Od snímání magnetického pole pomocí cívky v blízkém poli vodiče I_1 , přes analogový D-type PLL obvod s napěťovým výstupem, standartní digitální PLL až po variantu uvedenou v této disertační práci.

Současně s měřením průchodu I_1 nulou byla rozvíjena technika měření amplitudy I_1 , ta byla vyřešena precizními detektory špičkových hodnot na bázi OZ, avšak pro chod WPCS je zcela zbytečná a tudíž zde není popisována.

5.2.2.2 Regulace nabíjecího výkonu

Hlavní úkol *off-board* regulace je zajištění požadovaných parametrů pro nabíjení baterií, tedy velikost nabíjecího proudu v CC části nabíjecího cyklu a v CV části velikosti napětí na svorkách baterie. Jinými slovy jde úkol označit jako regulaci nabíjecího výkonu napěťově tvrdé zátěže.

Pro přenos výkonu na vazebných elementech platí rovnost výkonů z [rov. 81](#), kterou je pro případ uvažovaného jednotkového převodu ($kp = 1$) možné upravit na elementární vztah z [rov. 82](#).

$$P_2 = P_1 \eta_{transfer} \rightarrow P_2 = \frac{U_1^2}{kp^2 R_Z} = P_{DC2}; \text{ při zanedbání ztrát} \quad \text{rov. 81}$$

$$P_2 \approx \frac{U_1^2}{R_Z} \approx I_1^2 R_Z \Leftrightarrow kp = 1 \quad \text{rov. 82}$$

Dále musí platit výkonová ekvivalence v celém WPCS, kdy při zanedbání ztrát můžeme psát [rov. 83](#), z níž lze odvodit vztah pro řízení velikosti I_{bat} , respektive U_{bat} , s využitím U_1 jako akční veličiny. Dosazením [rov. 82](#) do rov. 83 při započtení požadované regulované veličiny dostaneme vztah z [rov. 84](#), respektive z [rov. 85](#).

$$U_{bat} I_{bat} \approx U_{2DC} I_{2DC} \approx U_{1DC} I_{1DC} \quad \text{rov. 83}$$

$$U_{bat} = \frac{1}{I_{bat \max}} \frac{U_{DC1}^2}{R_{LDC}} \Leftrightarrow U_{2m} = U_{DC2} \quad \text{rov. 84}$$

$$I_{bat} = \frac{1}{U_{bat \max}} \frac{U_{DC1}^2}{R_{LDC}} \Leftrightarrow U_{2m} = U_{DC2} \quad \text{rov. 85}$$

Potřebné napětí prvního DC meziobvodu UDC_1 je nastavováno pomocí 3LNPU dle [rov. 86](#), kde Z_{3LNPU} je nastavováno regulací 3LNPU v „dq“ souřadném systému.

$$U_{DC1} = \frac{\sqrt{3} U_{U(1)m}}{Z_{3LNPU}} \quad \text{rov. 86}$$

Rozšíříme-li regulační možnosti o snižování nabíjecího výkonu pod možnosti 3LNPU, tedy o řízení výkonu pomocí střídy vstupního střídače z_s (**var_a**), pak musíme zahrnout harmonickou skladbu napájecího napětí WPT (U_1), která se řídí [rov. 87](#). Úpravou rov. 87 o výkonovou ekvivalenci WPCS ([rov. 83](#)) a [rov. 21](#) dostaneme [rov. 88](#). Pro potřeby regulace samotné pak postačí zjednodušený vztah z [rov. 89](#) a [rov. 90](#) založený na [rov. 84](#), [85](#), [88](#).

$$U_{1(1)ef} = \frac{2}{\sqrt{2}\pi} U_{DC1} [1 - \cos(2\pi z_s)]; z_s \in (0,25; 0,5) \quad \text{rov. 87}$$

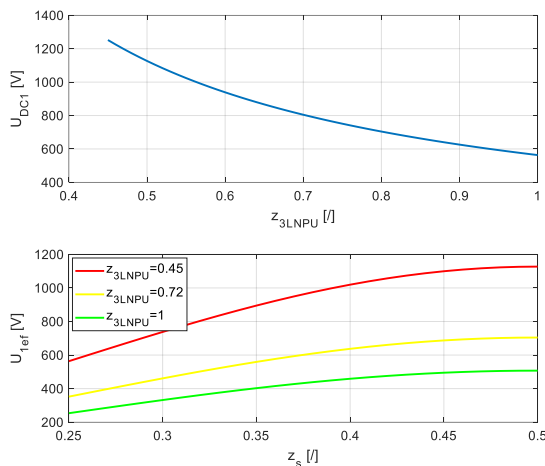
$$P_1 = \frac{2U_{DC1}^2}{Z_{cn}\pi^2} [1 - \cos(2\pi z_s)]^2 = U_{bat} I_{bat} = P_{bat} \quad \text{rov. 88}$$

$$U_{bat} \approx \frac{1}{I_{bat\ max}} \frac{(2z_s U_{DC1})^2}{R_{L\ DC}} \quad \text{rov. 89}$$

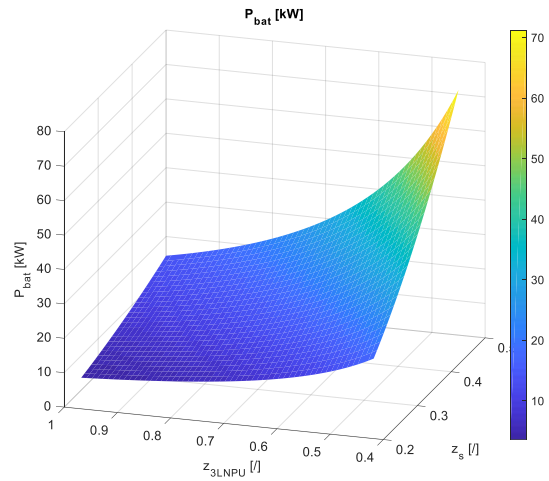
$$I_{bat} \approx \frac{1}{U_{bat\ max}} \frac{(2z_s U_{DC1})^2}{R_{L\ DC}} \quad \text{rov. 90}$$

Z charakteru rov. 86 je možné usoudit na nepřímo úměrnou závislost akční a regulované veličiny a stanovit minimální napětí U_{DC1} dané minimální hodnotou $z_{3LNPU} \cong 0,9$, která se řídí nadřazenou regulací na kvalitu odebíraného proudu z distribuční sítě ([kapitola 5.2.2.3](#)). Nižší napětí U_{DC1} je pak možné při zhoršené kvalitě odebíraného proudu. Aby byla zajištěna regulovatelnost nabíjecího výkonu od nižších hodnot, tak je třeba doplnit WPCS o řízení U_1 pomocí z_s či pomocným snižujícím DCDC měničem (var_b).

Pomocná regulace využívající jako akční veličinu z_s dosahuje uspokojivých výsledků, avšak neumožňuje regulaci od nulového nabíjecího výkonu. Pro případ experimentálního prototypu jsou charakteristiky regulace P_{bat} pomocí z_{3LNPU} a z_s uvedeny na [Obr. 65](#) a [Obr. 66](#).

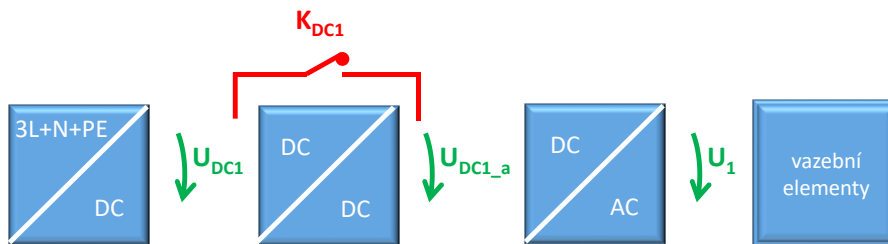


Obr. 65 charakteristiky řízení U_{DC1} a U_1 (var_a)



Obr. 66 Charakteristika řízení P_{bat} (var_a)

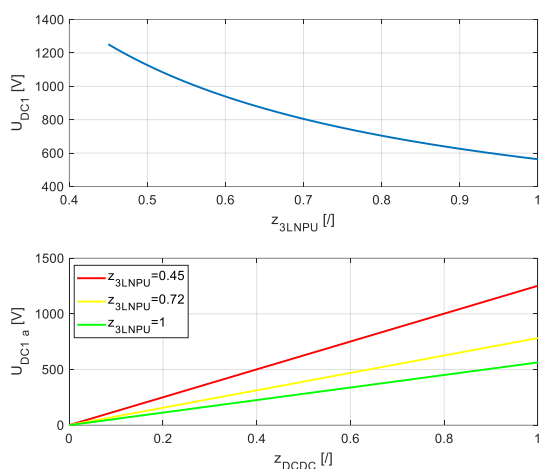
Optimálnější varianta (**var_b**) spočívá ve vřazení pomocného snižujícího DCDC měniče mezi 3LNPU a vstupní DCAC, který je v případě nepotřeby vyřazen ([Obr. 67](#)). Toto řešení s sebou přináší složitější a větší *off-board* část, současně však umožňuje regulaci nabíjecího výkonu od nulových hodnot při minimálním vlivu na účinnost. To ostatně dokládají charakteristiky z [Obr. 68](#) a [Obr. 69](#), kde se uplatňuje obecně známá charakteristika DCDC měniče. Velikost nabíjecího výkonu z [rov. 91](#) pak vychází z úprav [rov. 89](#) a [rov. 90](#).



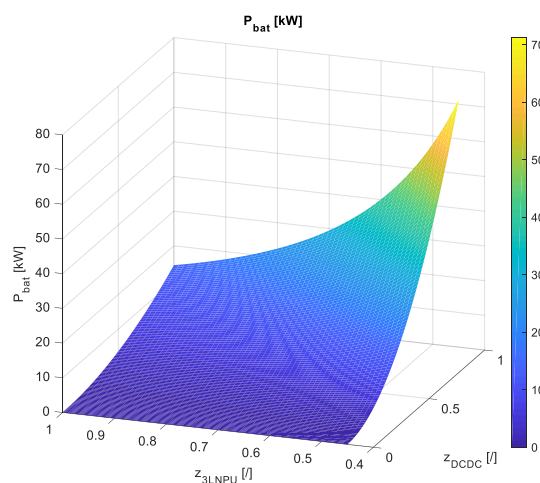
Obr. 67 Ilustrativní schéma off-board části WPCS s pomocným DCDC měničem

$$P_{bat} \approx \frac{(z_{DCDC} U_{DC1})^2}{R_{LDC}}$$

rov. 91



Obr. 68 charakteristiky řízení U_{DC1} a U_1 (var_b)

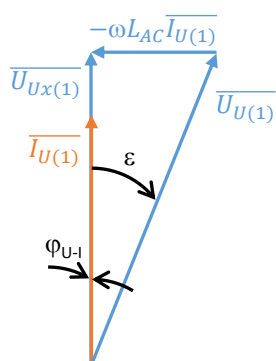


Obr. 69 Charakteristika řízení P_{bat} (var_b)

5.2.2.3 Připojení k distribuční síti

Pro WPCS s velkými nabíjecími výkony je připojení k distribuční síti realizováno skrze napěťový pulzní usměrňovač v 3-fázové topologii. Tímto je zaručeno splnění požadavků na THDI a $\cos \varphi$ odebíraného výkonu. Regulace, která se o uvedené stará, je nadřazena regulaci U_{DC1} a realizována obecně známou vektorovou řídicí technikou 3LNPU.

Pokud například pro fázi U sestavíme fázorový diagram (Obr. 70) s předpokladem $\varphi_{U1-11} = 0^\circ$, pak je možné definovat potřebné nastavení úhlu ε (rov. 92) a poměrného sepnutí z_{3LNPU} (rov. 93) pro dosažení potřebné velikosti U_{DC1} při $\varphi_{U1-11} = 0^\circ$. Pro odebíraný proud z fáze y pak platí (rov. 94).



$$\varepsilon = \arctg \left(\frac{\omega L_{AC} I_{y(1)m}}{U_{yx(1)m}} \right) \quad \text{rov. 92}$$

$$z_{3LNPU} = \frac{U_{DC1}}{\sqrt{3} U_{U(1)m}} \quad \text{rov. 93}$$

$$I_{y(1)m} = \frac{2 U_{DC1} I_{DC1}}{3 U_{yx(1)m}} \quad \text{rov. 94}$$

Obr. 70 charakteristiky řízení U_{DC1} a U_1 (var_b)

Systémy s malým výkonem je možné, i současně vhodné, k síti připojovat skrze diodový můstkový usměrňovač. Tím je celá regulace nabíjecího výkonu přesunuta na pomocný DCDC měnič. Maximální návrhové napětí vazebných elementů je tedy omezeno amplitudou napětí v síti a kvalita odebíraného výkonu principem diodových usměrňovačů.

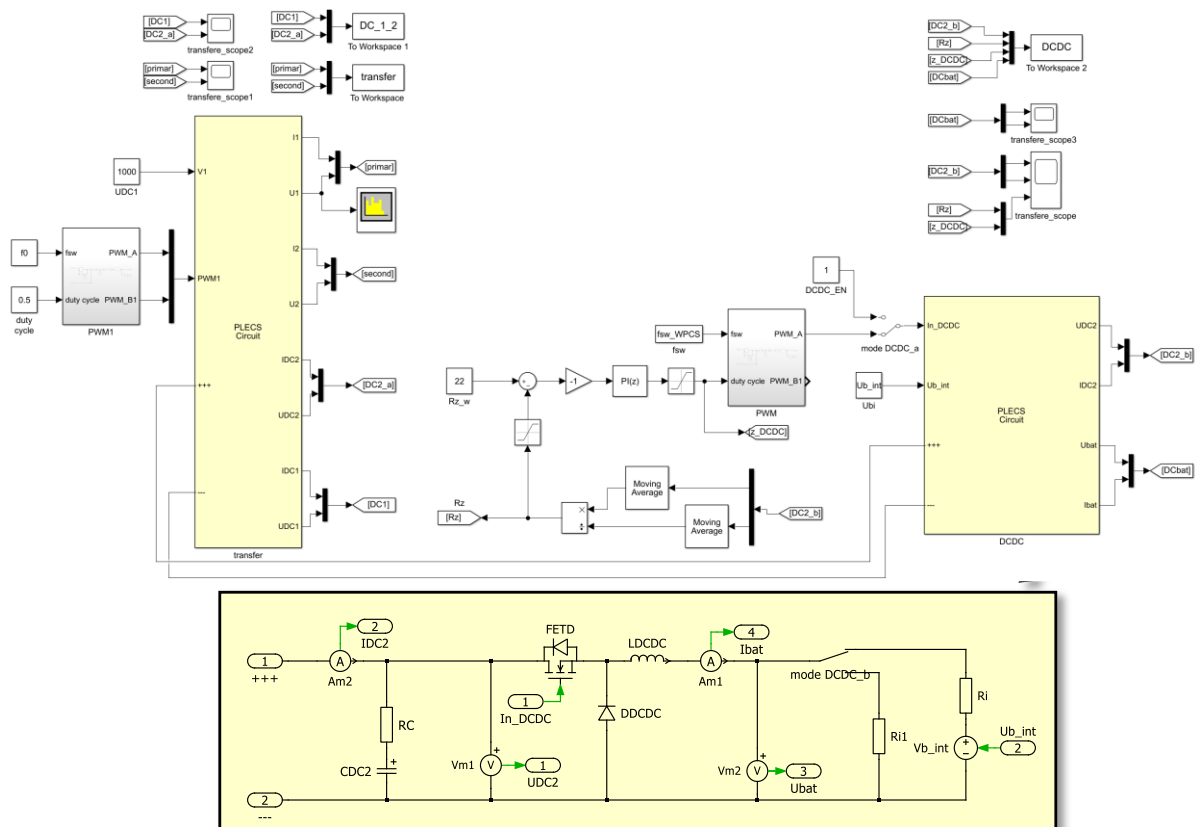
5.2.3 Simulace WPCS

Simulace WPCS navazuje na model WPT v časové oblasti z [kapitoly 4.5](#), do nějž je doplněna výkonová topologie a strategie řízení dle návrhu WPCS z [kapitoly 5.2.1](#) a [5.2.2](#). Hlavním cílem je simulační ověření navrženého regulačního přístupu a poskytnutí podkladů pro obvodové a tepelné návrhy jednotlivých měničů.

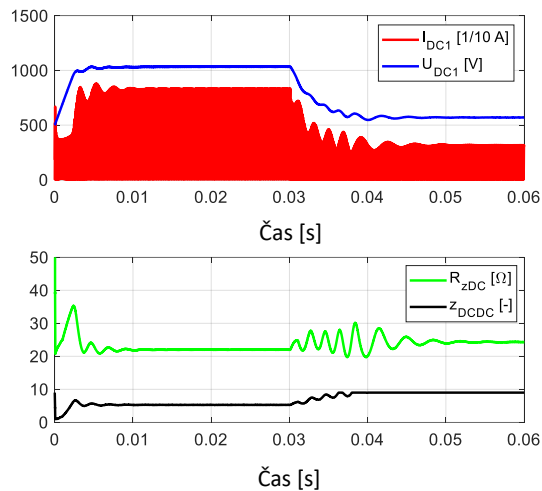
Simulace WPCS, stejně jako model WPT, je řešena v diskretním čase s pevným simulačním krokem 100 ns a s nulovými počátečními podmínkami.

Vydeme-li nejprve z [kapitoly 5.2.1](#) – Návrh regulace *on-board* části, dospějeme k simulačnímu schématu dle [Obr. 71](#), které zachycuje regulační a výkonový blok výstupního DCDC měniče v režimu impedančního přizpůsobení. Odpovídající simulované průběhy pro napětí $U_{DC1} = 1000 \text{ V}$ v čase 0 až 0.03 s a $U_{DC1} = 500 \text{ V}$ v čase 0.03 až 0.6 s zachycuje [Obr. 72](#) a [Obr. 73](#). Hlavní výstup zde tvoří [Obr. 72](#) dole, který zachycuje průběh regulovaného R_{zDC} . [Obr. 73](#) zachycuje poměry na bateriové náhradě dle [Obr. 71](#) vpravo dole.

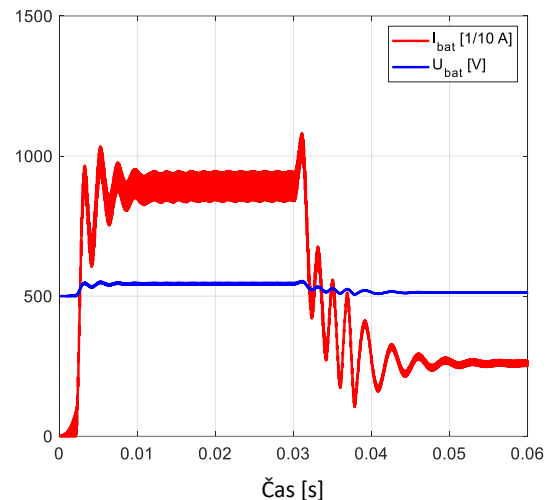
Z průběhů na [Obr. 72](#) a [Obr. 73](#) lze potvrdit korektnost uvedených předpokladů a navrhované topologie řízení *on-board* strany WPCS. Nastavení regulátorů je provedeno dle skutečného nastavení v prototypu experimentálního prototypu, na kterém jsou průběhy téměř dokonale hladké, což lze přisoudit absenci jakýchkoli tlumících prvků a parazit v simulačním schématu.



Obr. 71 Simulační schéma WPT + on-board část WPCS



Obr. 72 Simulace výstupního DCDC – $U_{DC1} = 1000 \text{ V} / 500 \text{ V}$

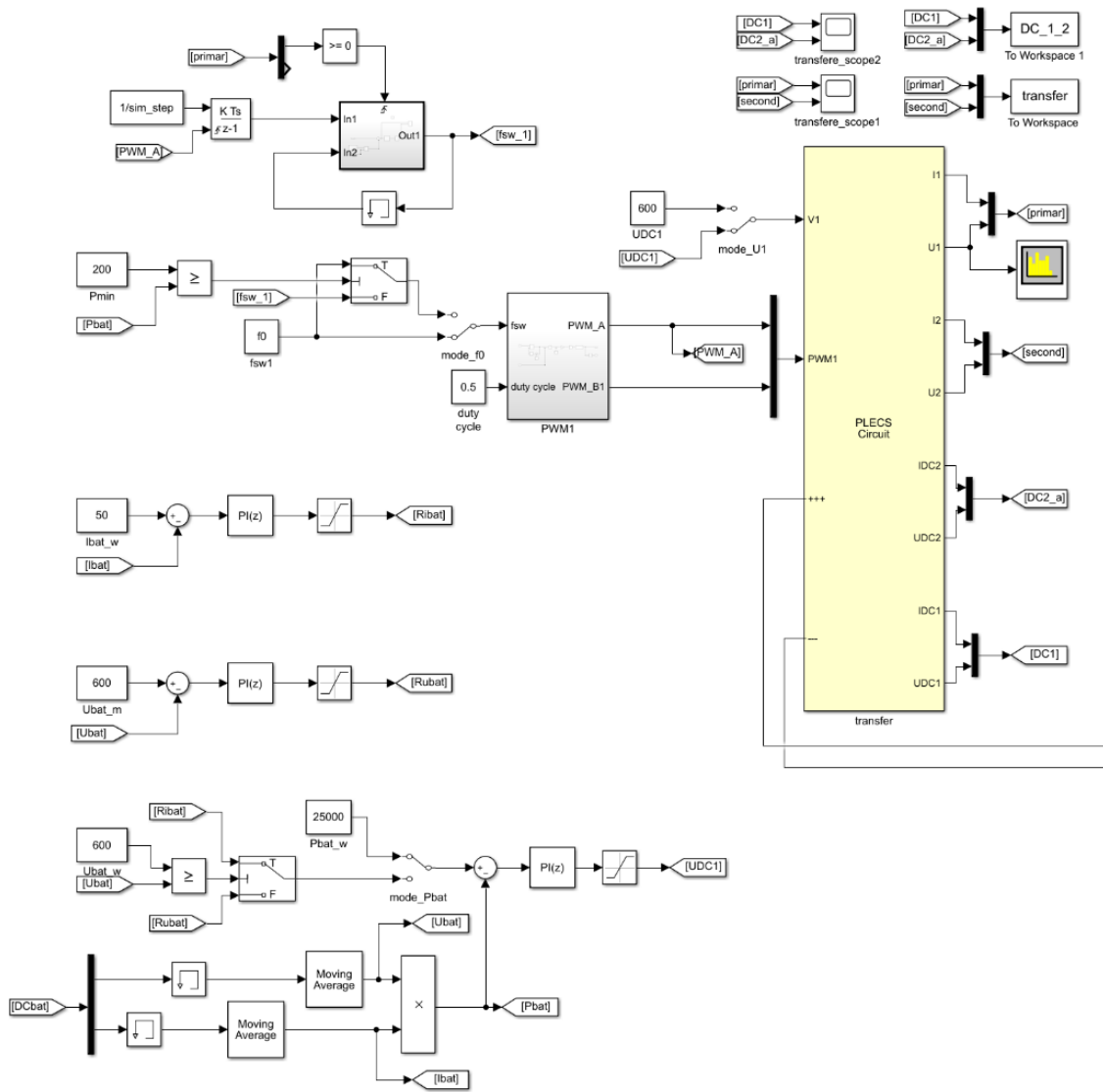


Obr. 73 Poměry na batérii při použití výstupního DCDC měniče – $U_{DC1} = 1000 \text{ V} / 500 \text{ V}$

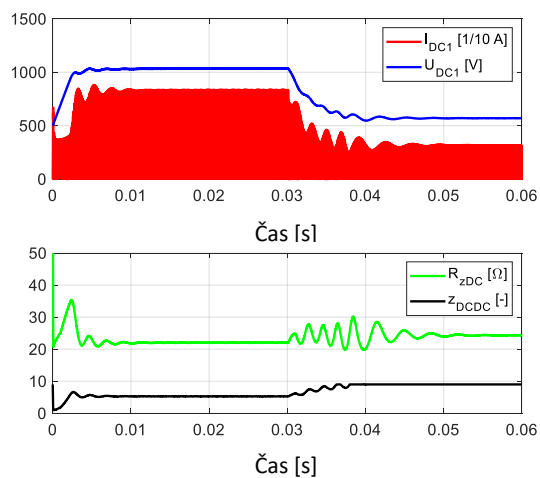
[Obr. 71](#) je možné doplnit o regulační schéma *off-board* strany a získat tak úplné simulační schéma WPCS, avšak pro udržení přehlednosti simulačního schéma [Obr. 74](#) neobsahuje bloky vstupního usměrňovače (kombinaci 3LNPU a pomocného snižujícího DCDC měniče – viz [Obr. 81](#)). Tyto jsou bez vlivu na výpovědi schopnost simulačních výsledků nahrazeny přímým zadáváním napětí U_{DC1} . Simulované průběhy pro schéma dle [Obr. 74](#) jsou zachyceny na [Obr. 75](#) a [Obr. 76](#). Požadovaný nabíjecí výkon je pro čas od 0 do 0.03 s nastaven na 50 kW a pro čas od 0.03 s do 0.06 s na 25 kW. Výsledkem je ztotožnitelný průběh všech pozorovaných veličin s [Obr. 72](#) a [73](#), čímž je zcela potvrzena správnost řízení.

Součástí regulace *off-board* části WPCS je také regulace kmitočtu U_1 na aktuální rezonanční kmitočet vazebných elementů f_0 . Ta je na [Obr. 74](#) také zachycena a při simulacích ověřena. Rozdíl oproti teoretickému popisu zde tvoří zanesení rozhodovací úrovně výkonu pro volbu zdroje požadovaného kmitočtu U_1 . Kmitočet je do dosažení rozhodovacího výkonu pevně nastaven a až po jeho překročení je regulován. Důvodem je pouze zjistitelnost průchodu I_1 nulou (Pro malé výkony je navíc vliv tepelných změn prvků vazebných elementů takřka nulový).

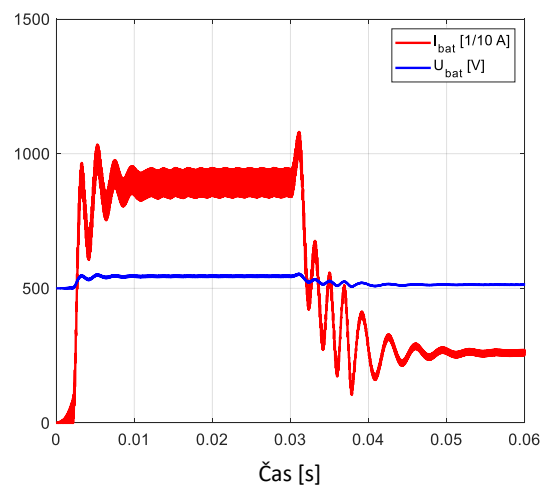
Regulační průběhy při povolení nadřazené CC-CV regulace jsou vyobrazeny na [Obr. 77](#) a [Obr. 78](#). Tyto obrázky zachycují stejné průběhy jako obrázky předchozí, avšak při požadavku na nabíjecí proud $I_{bat} = 100 / 50 / 100 \text{ A}$ při časech 0-0,1 / 0,1-175/0,175-0,25 s.



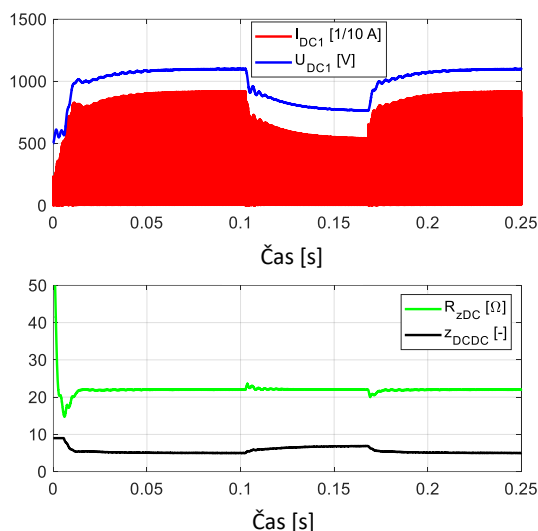
Obr. 74 Simulační schéma off_board části WPCS



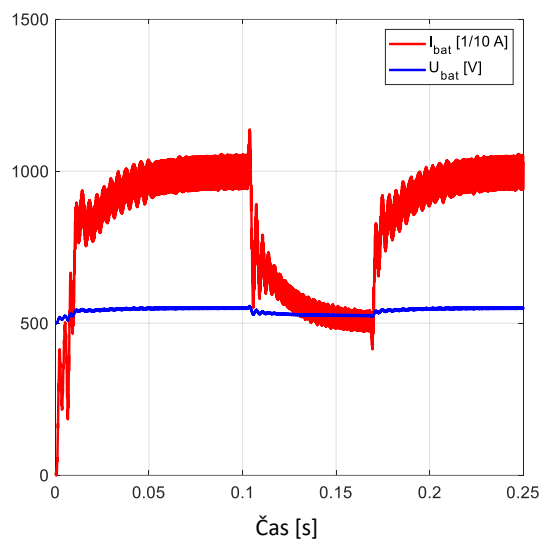
Obr. 75 Simulace WPCS – $P_{bat,w} = 50 \text{ kW} / 25 \text{ kW}$



Obr. 76 Poměry na betriji při WPCS - $P_{bat,w} = 50 \text{ kW} / 25 \text{ kW}$



Obr. 77 Simulace WPCS – $I_{bat_w} = 100/50/100$ A



Obr. 78 Poměry na betriji při WPCS - $I_{bat_w} = 100/50/100$ A

Součástí všech regulačních bloků implementovaných do DSP je ochrana před skokovými a rychlými přechodnými ději včleněním definovaných strmostí změn požadovaných veličin. Tím je zajištěna maximální možná stabilita systému a hladké přechodné děje bez kmitů rezonančního obvodu. Uvedené průběhy z [Obr. 72](#), [73](#), [75](#), [76](#), [77](#), [78](#) jsou odezvou na prudkou skokovou změnu, což je nejhorší možný případ, který je pomocí vsazených ramp potlačen.

5.2.4 Výkonový řetězec WPCS

Při znalosti regulační strategie a vlastností WPT/WPCS je možné provést návrh výkonového řetězce WPCS, který se řídí specifickým postupem, jenž je znázorněn na [Obr. 10](#).

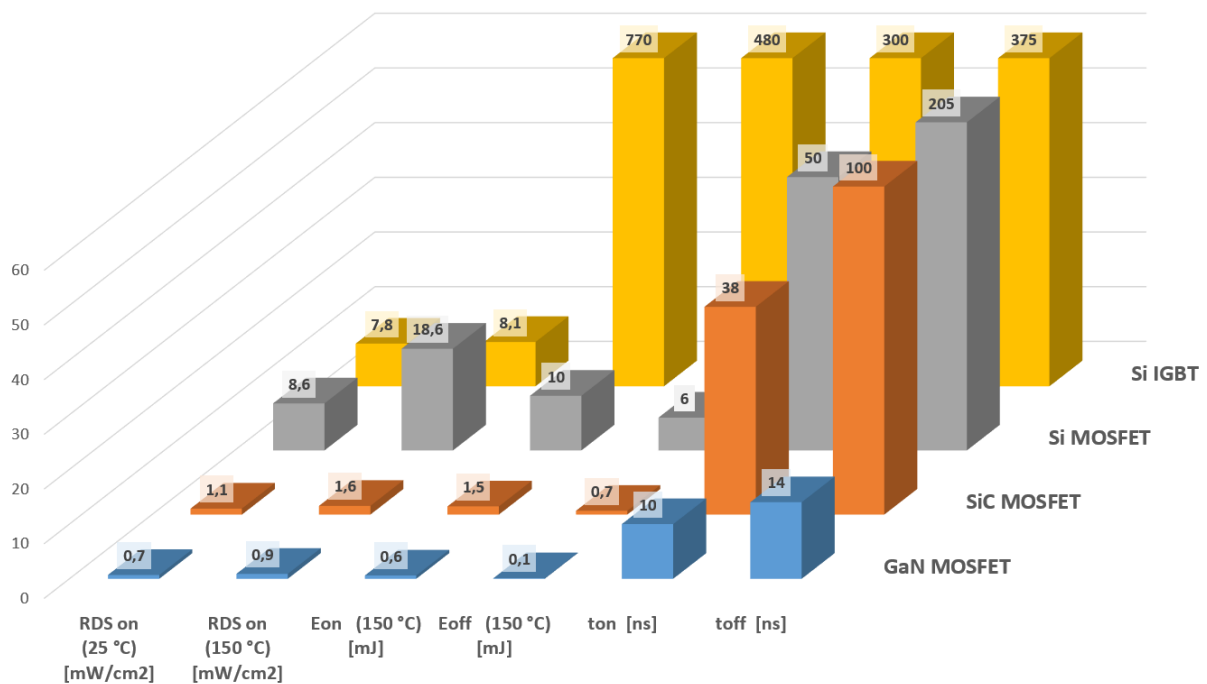
První etapa vychází z definovaného nabíjecího výkonu a samotného návrhu vazebných elementů, jak uvádí [kapitola 4.6](#) a [kapitola 4.7](#) této disertační práce. Důležitými parametry jsou především: napětí DC meziobvodů U_{DC1} a U_{DC2} pro maximální výkon ; dále zatěžovací charakteristika dle [Obr. 38](#), jenž definuje proudová zatížení výkonového řetězce ; dále optimální zátěžný odpor pro maximalizaci účinnosti ; dále pak normativně daný pracovní kmitočet a podobně.

Součástí první etapy je také definování okrajů systému WPCS, tedy připojení k síti a uvažované baterie pro nabíjení (respektive vybíjení v „battery to grid“ režimu). Připojení k síti popisuje [kapitola 5.2.2.3](#) této disertační práce jako připojení skrze diodový usměrňovač pro malé výkony či napěťový pulzní usměrňovač pro velké výkony. Z pohledu opačného, tedy z pohledu baterie, je možné využít poznatků z [kapitoly 5.2](#).

Prostřední část horní třetiny [Obr. 9](#) zachycuje nutnost definování přenosové vzdálenosti a ostatních mechanických rozměrů vazebných elementů, jež přesahují rámec této disertační práce do oblasti návrhu vazebných elementů. Tento návrh je respektován skrze jejich zatěžovací charakteristiky ([Obr. 38](#)).

Na základě definovaných vnějších obvodových parametrů vazebných elementů je možné provést návrh měničů WPT a při doplnění o definované parametry zátěže také návrh vnějších měničů WPCS.

Návrh částí výkonového obvodu je specifický velkým přenášeným výkonem při velké pracovní frekvenci WPT a důrazným požadavkem na maximalizaci účinnosti celého řetězce WPCS. První důležitá volba tedy spočívá ve výběru samotné technologie použitých polovodičových prvků, jejichž srovnání zachycuje [Obr. 79](#). Vzhledem k velké spínací frekvenci u měničů WPT je volba SiC prvků jednoznačná (GaN nedosahují požadovaných napětí $U_{DS}=1700$ V pro vysoce výkonné systémy). Vnější měniče WPCS sice takto vysoké spínací frekvence nevyžadují (např. 25 kHz), nicméně zde přetrvává požadavek na maximalizaci účinnosti, což opět vede na použití SiC výkonových prvků.



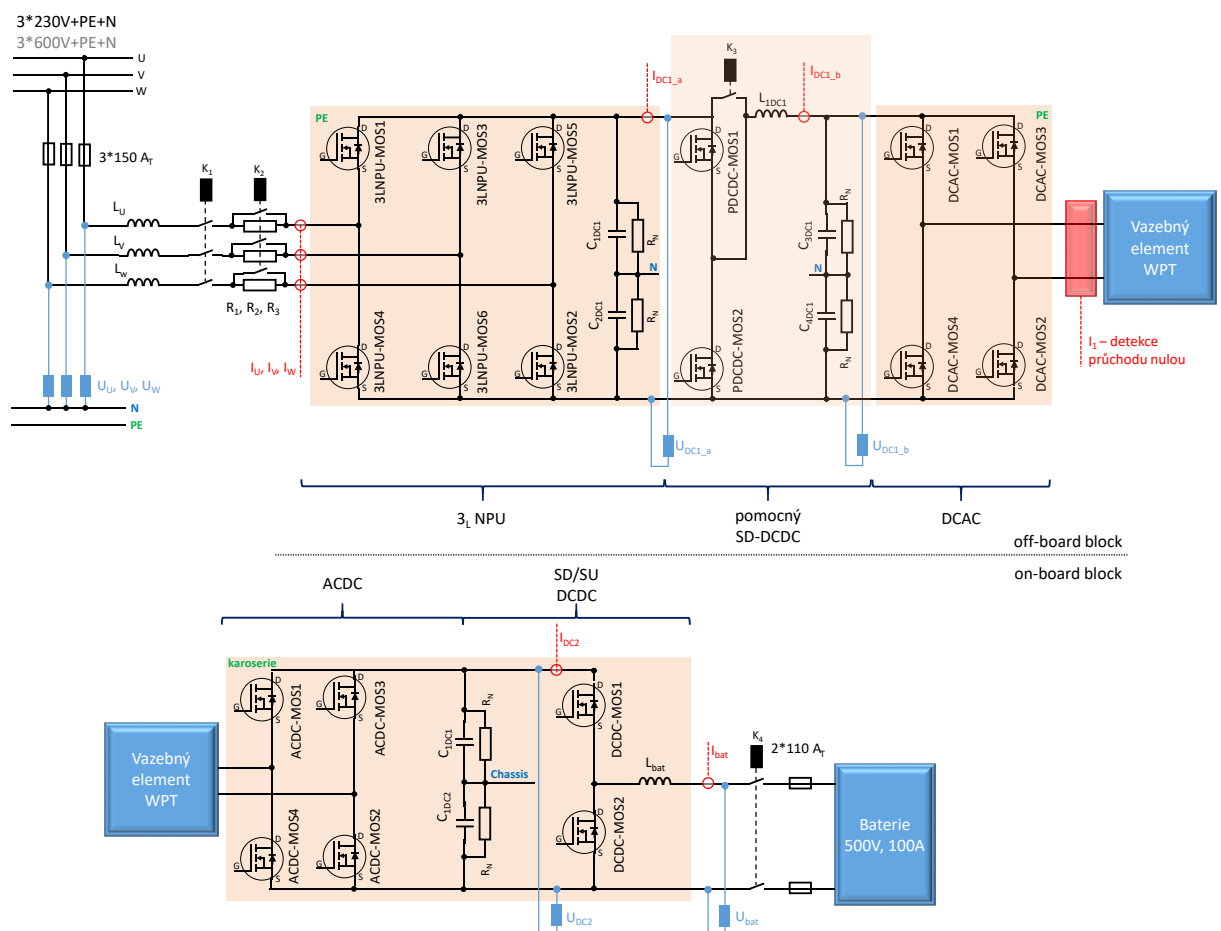
Obr. 79 Porovnání technologií vybraných polovodičových součástek

Po objasnění použité technologie výkonových prvků je možné přistoupit k ovládacímu, výkonovému a tepelnému návrhu jednotlivých částí řetězce WPCS naznačeného na [Obr. 10](#). Nicméně toto není hlavní náplní prezentované disertační práce.

5.3 Shrnutí WPCS

WPCS tvoří velmi širokou komplexní problematiku snoubící několik oborových směrů. Záměr této disertační práce je omezen na výběr a návrh nejvhodnější topologie výkonových bloků WPCS a jejich neoptimalnějšího řízení. Velmi stěžejní je zde aplikace WPCS v elektromobilitě, tedy jako bezdrátová nabíjecí stanice pro elektromobily.

Z hlediska výkonové topologie je jako neoptimalnější varianta odvozena kombinace 3LNPU - pomocný DCDC měnič - vstupní můstkový střídač - vazební elementy - synchronní diodový usměrňovač - výstupní DCDC měnič. To pro případ nabíjení baterie v režimu „grid to battery“. Případ obrácený, tedy „battery to grid“, je při odvozování topologie také zohledněn - jde o topologii obousměrnou. Její finální podoba je uvedena na [Obr. 80](#). Funkce a režimy jednotlivých bloků jsou snadno odvoditelné a zároveň jsou popsány v této disertační práci.



Obr. 80 Výkonová topologie WPCS v obousměrné variantě

Řízení WPCS ve výkonové topologii dle [Obr. 80](#) je uvedeno na [Obr. 81](#). Tento respektuje odvozenou strategii řízení WPCS z [kapitoly 5](#) a umožňuje obousměrný tok energie. Plynulý přechod mezi režimy „grid to battery“ a „battery to grid“ není možný, vždy je třeba WPCS odstavit, přepnout směr toku energie a znovu s výkonem najet, neboť při změně toku energie dochází ke změně funkce jednotlivých výkonových bloků WPCS. Současně je plynulý přechod zcela nevhodný. Obr. 81 zachycuje regulační obvod pro „grid to battery“ režim.

6 Verifikace měření na experimentálním prototypu

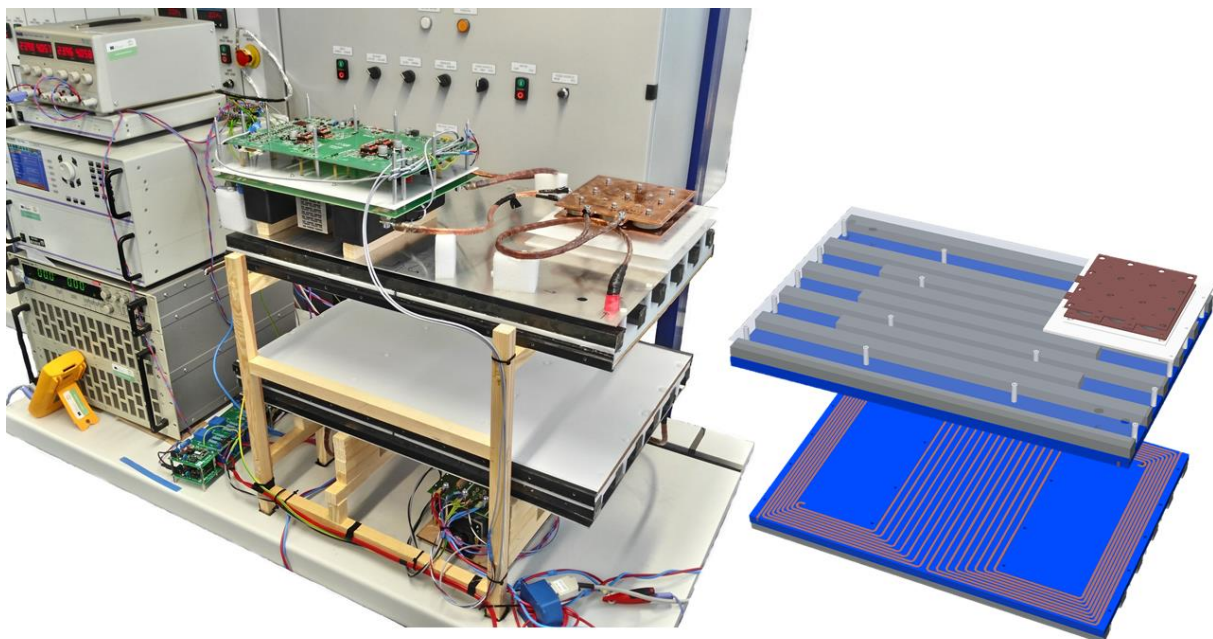
Závěry z této disertační práce byly implementovány do experimentálního prototypu WPCS o jmenovitém výkonu 65 kW. Elektrický a tepelný návrh jednotlivých bloků není předmětem této disertační práce a nebude zde tudíž verifikován. Řídící obvody jsou pak založeny na prověřených topologiích ovládaných dvojicí mikro-kontrolérů od Texas Instruments TMS320F28377 propojených komunikací CAN.

Měření obvodových veličin na systému WPCS je realizováno dvojicí osciloskopů *Tektronix MSO 4104B* a výkonovým analyzátozem *ZES Zimmer LMG 500*.

Samotné verifikace jsou provedeny ve třech režimech a to v „[WPT to load](#)“ zapojení pro ověření správné funkce WPT ; v „[back to back](#)“ zapojení pro prvotní testy a testy na plném výkonu a v „[grid to battery](#)“ režimu pro ověření správné funkce při nabíjení baterie.

6.1 Experimentální prototyp

Experimentální prototyp v laboratoři RICE zachycuje [Obr. 82](#). V jeho levé části je patrná měřicí instrumentace – shora: laboratorní zdroj pro napájení elektroniky ; zdroj pro napájení LEM čidel proudu ; výkonový analyzátor LMG 500 ; elektronická zátěž. Uprostřed [Obr. 82](#) je možné pozorovat – shora: desku řídicí elektroniky *off-board* části ; izolační desku mezi řídicí a výkonovou elektronikou ; výkonový blok ; vazební elementy ; elektroniku *on-board* části. Doplněk [Obr. 82](#) tvoří vpravo vyobrazený průhledný model vazebních elementů.

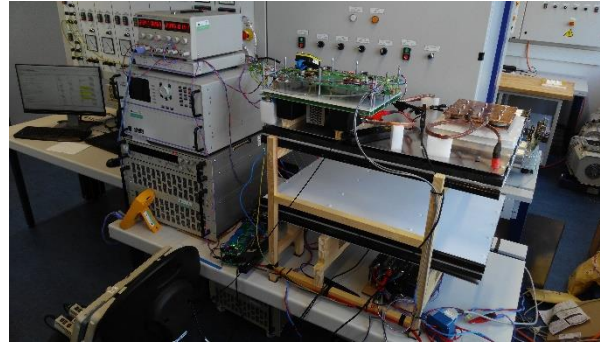


Obr. 82 Experimentální prototyp

Následující [Obr. 83](#) a [Obr. 84](#) zachycují celkový pohled na měřicí stanoviště. Jsou zde navíc patrné osciloskopy a PC pro programování, ovládání laboratorního vybavení a sběr měřených dat. Na [Obr. 83](#) je také patrná druhá elektronická zátěž (pod stolem) v paralelním režimu.



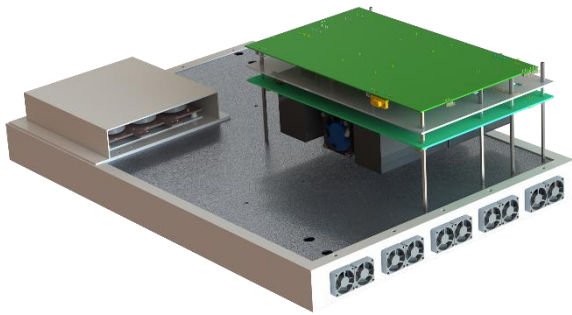
Obr. 83 Měřicí stanoviště – pohled a



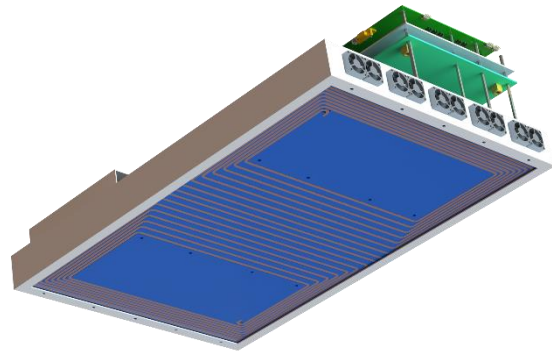
Obr. 84 Měřicí stanoviště – pohled b

Dřevěný přípravek podpírající vazební elementy umožňuje nastavit uvažované přenosové vzdálenosti.

Vazební elementy experimentálního prototypu 65kW WPCS jsou uvedeny na [Obr. 85 – 86](#) (3D model) a na [Obr. 87 – 88](#) (fotografie). Vybrané elektronické bloky systému WPCS jsou uvedeny na [Obr. 89 – 90](#) (3D modely) a na [Obr. 91 – 92](#) (fotografie).



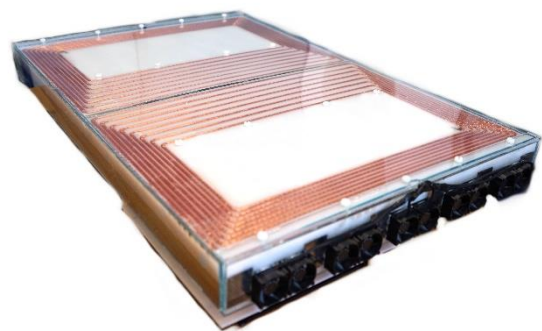
Obr. 85 3D model vazebného elementu – pohled a



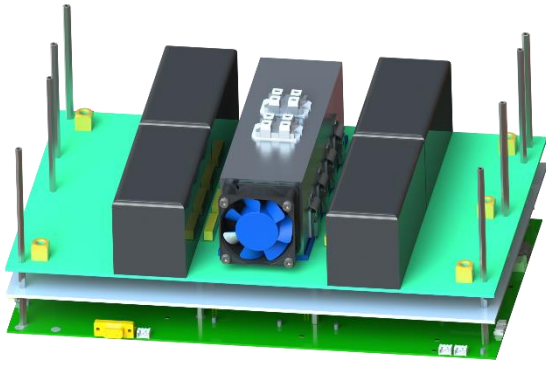
Obr. 86 3D model vazebného elementu – pohled b



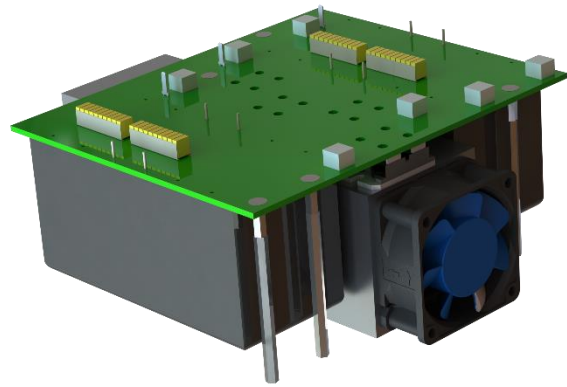
Obr. 87 Fotografie vazebného elementu – pohled a



Obr. 88 Fotografie vazebného elementu – pohled b



Obr. 89 3D model elektroniky off-board části



Obr. 90 3D model usměrňovače



Obr. 91 Fotografie elektroniky off-board části



Obr. 92 Fotografie usměrňovače

Reálné parametry experimentálního prototypu jsou uvedeny v [Tab. XIV](#), která popisuje všechny důležité parametry.

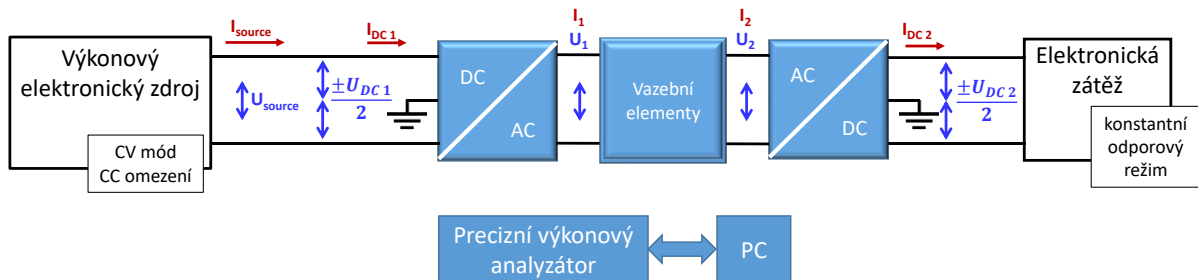
Tab. XIV Parametry exp. prototypu 65kW WPCS

Parametr	Symbol [jed.]	Hodnoty			Podmínky /Poznámka
		min.	nom.	max.	
Napájecí napětí	U_{in} [V]	3*400	3*400	3 * 600	3 * 600 V
Odebíraný proud	I_{in} [A]	0		3 * 100	je podporováno
Výstupní napětí	U_{DC2} [V]	0		1100	---
Výstupní proud	I_{DC2} [A]	0		75	$T_{ch} = 100$ °C
Výstupní výkon	P_{out} [W]	0		65	při $t_d = 20$ cm
Přenosová vzdálenost	t_d [cm]	15	20	25	20 cm jmenovitě
Účinnost	η [%]	94	95	96	---
Baterie	U_{bat} [V]		500	1000	---
	I_{bat} [A]	0	100	150	

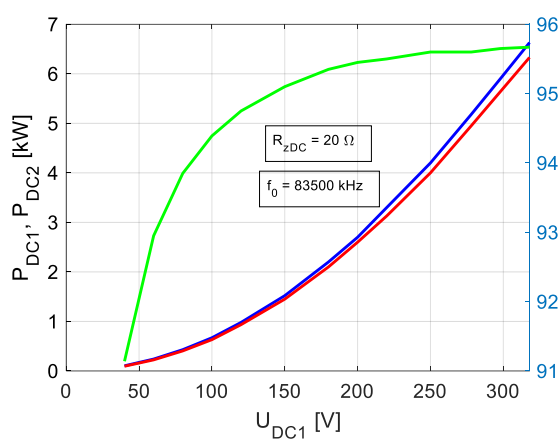
6.2 Testy v režimu „WPT to electronic load“

Testy v režimu „WPT to electronic load“ jsou specifické pro prvotní oživení WPT části systému WPCS. Testované bloky jsou: vstupní střídač, vazební elementy a výstupní usměrňovač. Zapojení měřícího stanoviště a nastavení zdroje se zátěží je uvedeno na [Obr. 93](#). Limit pro dosažitelný výkon zde tvoří výkonové omezení elektronické zátěže. Tento limit činí 7,5 kW, respektive 15 kW při paralelním chodu dvou elektronických zátěží (800 V / 75 A / 7,5 kW).

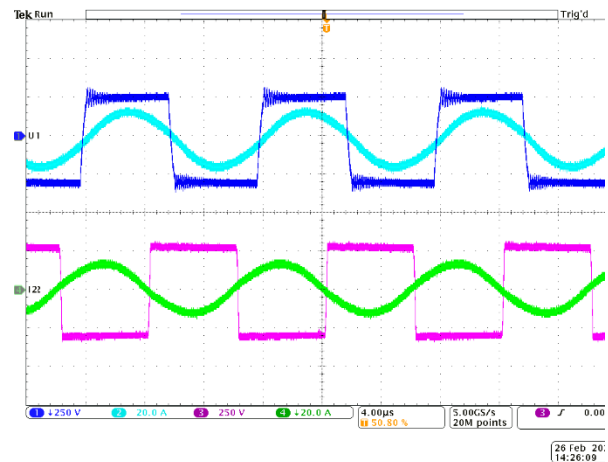
Výsledky měření do výkonu 7 kW jsou uvedeny na [Obr. 94](#). Časové průběhy hlavních obvodových veličin vazebných elementů jsou uvedeny na [Obr. 95](#). Tyto prezentované záznamy z měření potvrzují správnou funkci WPT a je tedy možné provést testy na jmenovité přenášené výkony.



Obr. 93 Zapojení měřícího stanoviště pro režim „WPT to load“



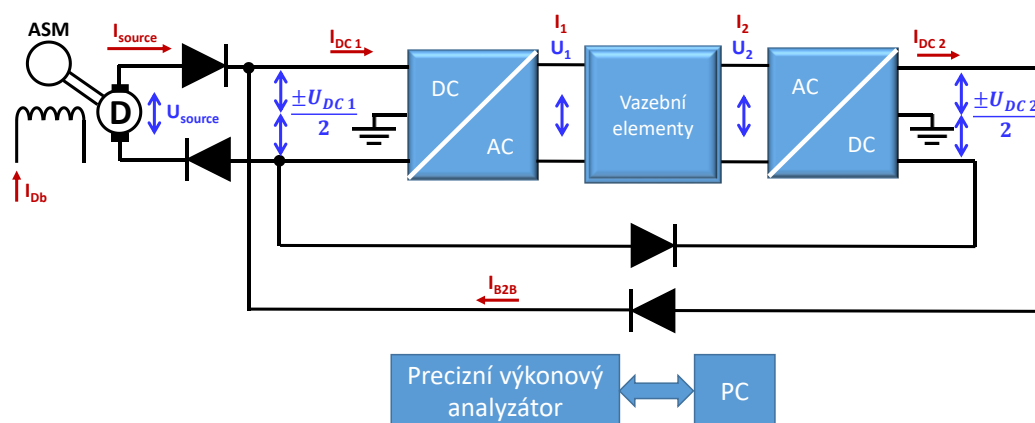
Obr. 94 Přenosová charakteristika WPT



Obr. 95 charakterické veličiny WPT při $U_{DC1} = 250 \text{ V}$ – modrá: U_1 ; modrá světlá: I_1 ; červená: U_2 ; zelená: I_2 .

6.3 Testy v režimu „Back to Back“

Testy WPT do plného přenášeného výkonu byli provedeny v „Back to Back“ zapojení, čímž byla zajištěna nejen hospodárnost testů, ale také testování při optimálních provozních podmínkách bez nutnosti použití impedančního přizpůsobení. Zapojení pro tyto testy je uvedeno na [Obr. 96](#). Jako zdroj zde slouží cize buzené dynamo o parametrech 1600 V / 60 A, kde napětí U_{DC1} bylo nastavováno pomocí budícího proudu I_{db} . Vsazené diody zajišťují jednosměrný tok energie a jednoznačnost měření.



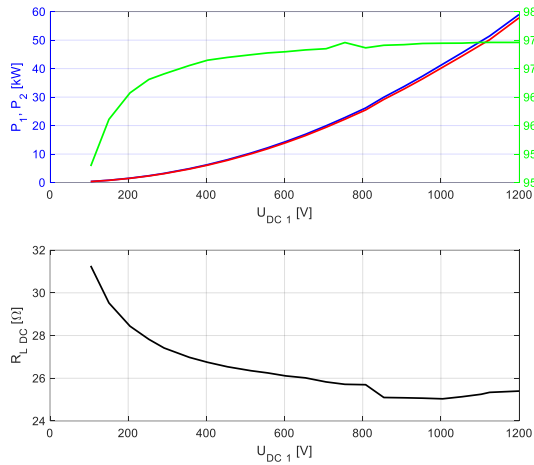
Obr. 96 Zapojení měřícího stanoviště pro režim „Back to Back“

Testování WPT v tomto režimu bylo provedeno do jmenovitých výkonů pro jmenovitou přenosovou vzdálenost 20 cm a krajní přenosové vzdálenosti 15 a 25 cm. Výsledné charakteristiky jsou uvedeny na [Obr. 97, 98](#) pro 15cm, na [Obr. 99, 100](#) pro 20cm a na [Obr. 101, 102](#) pro 25cm přenosovou vzdálenost.

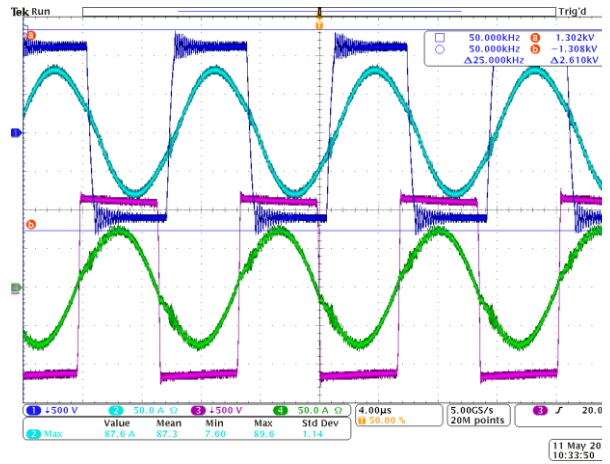
Na obrázcích je patrná přirozená zátěž WPT blížíci se rovnici (39), impedančním modelem ([Obr. 28](#)) a zatěžovací charakteristikou z [Obr. 38](#). Dosahovaná DC-DC účinnost η_{DC-DC} , tedy účinnost řetězce DCAC-coupling elements-ACDC dosahuje 95 % ($t_d = 25$ cm) až 97,5 % ($t_d = 15$ cm). Dosahovaný výkon pro $t_d = 25$ cm činí 58 kW (omezeno proudem), pro $t_d = 15$ cm pak činí 60 kW (omezeno napětím) a pro $t_d = 20$ cm pak činí 70 kW.

Časové průběhy hlavních obvodových veličin vazebních elementů jsou téměř ideální.

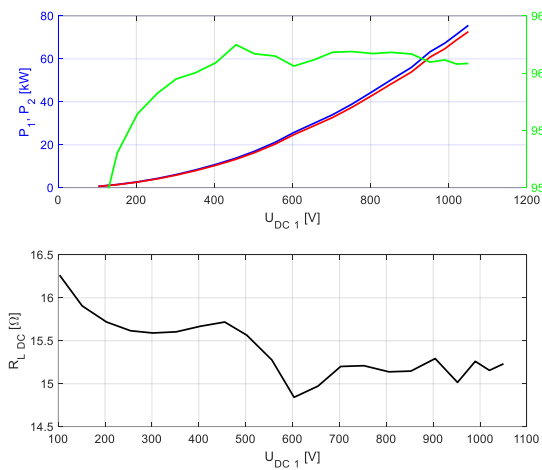
Tyto testy tímto prokázaly schopnost WPT přenést požadovaný výkon v uvažovaných provozních podmínkách.



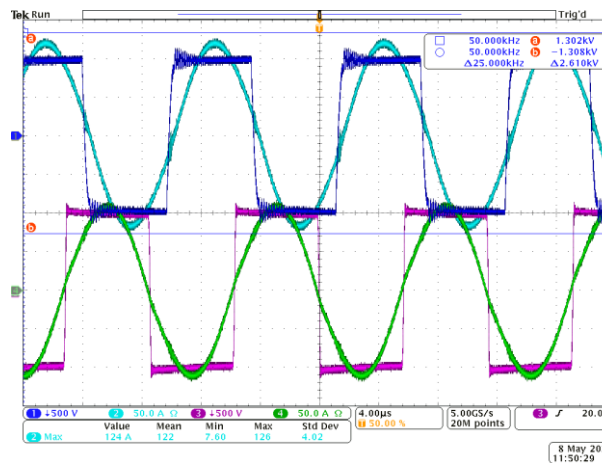
Obr. 97 Přenosová charakteristika WPT – $t_d = 15$ cm



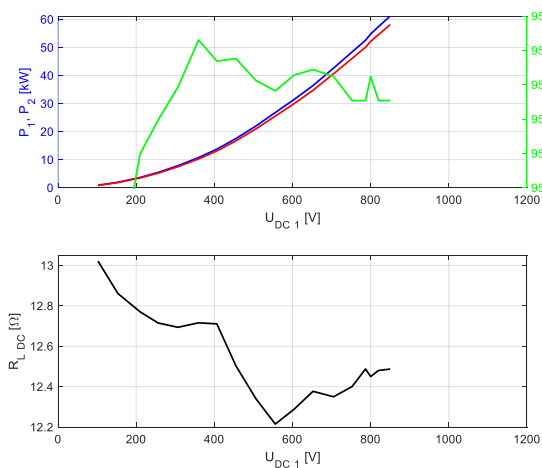
Obr. 98 charakteristické veličiny WPT při $U_{DC1} = 1200$ V a $t_d = 15$ cm – modrá: U_1 ; modrá světlá: I_1 ; červená: U_2 ; zelená: I_2 .



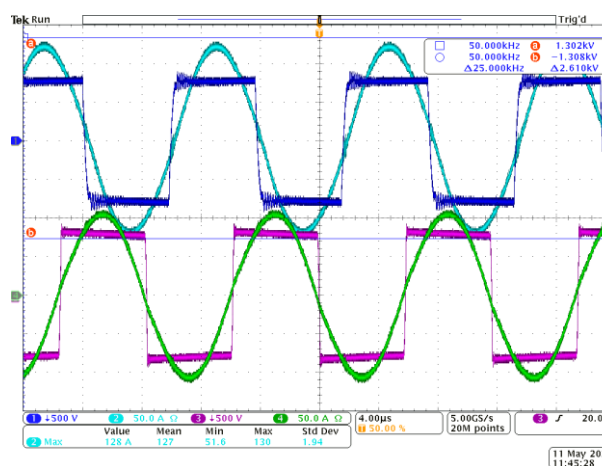
Obr. 99 Přenosová charakteristika WPT – $t_d = 20$ cm



Obr. 100 charakteristické veličiny WPT při $U_{DC1} = 1050$ V a $t_d = 20$ cm – modrá: U_1 ; modrá světlá: I_1 ; červená: U_2 ; zelená: I_2 .



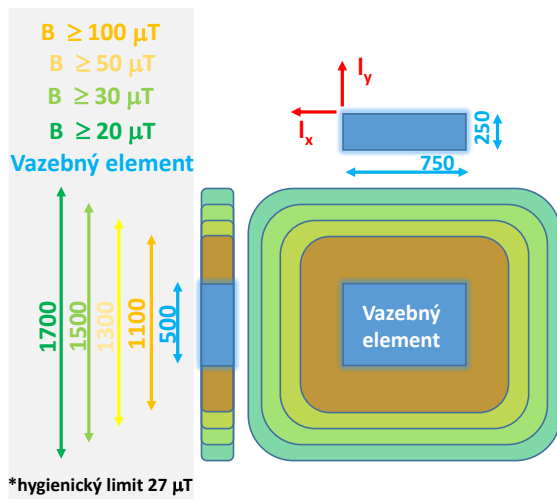
Obr. 101 Přenosová charakteristika WPT – $t_d = 25$ cm



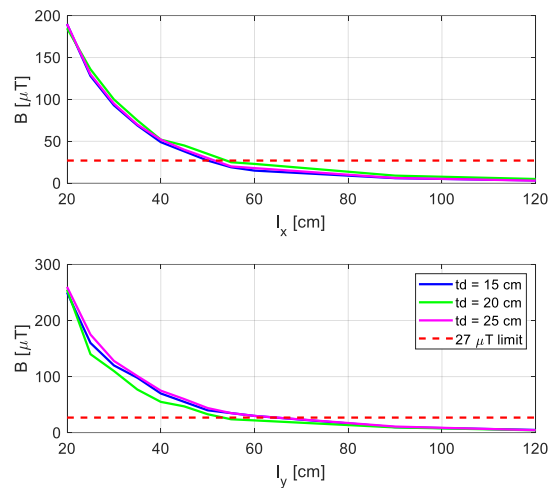
Obr. 102 charakteristické veličiny WPT při $U_{DC1} = 850$ V a $t_d = 25$ cm – modrá: U_1 ; modrá světlá: I_1 ; červená: U_2 ; zelená: I_2 .

Nezbytnou součástí testů na maximálních výkonech je měření okolního magnetického a elektrického pole ve smyslu splnění hygienických limitů dle ICNIRP [36] a EMC. Zpracované výsledky měřené magnetické indukce zachycuje [Obr. 103](#). Data z měření jsou pak vyobrazena na [Obr. 104](#). Z obou obrázků je zřejmé splnění ICNIRP limitů ve vzdálenosti 60 cm od vazebných elementů (měřeno v rovině středu nastavené přenosové vzdálenosti).

Doplněním WPT o vnější části WPCS je možné provést testy na WPCS, jak uvádí následující kapitola.



Obr. 103 Okolní magnetické pole při $P_{\text{bat}} = 65 \text{ kW}$



Obr. 104 Okolní magnetické pole při $P_{\text{bat}} = 65 \text{ kW}$ - graf

6.4 Testy na bateriové náhradě („Grid to battery“)

Testy na bateriové náhradě umožňují ověření regulace WPCS ve smyslu zvolené regulační strategie z [Obr. 81](#), tedy regulační strategie označené touto disertační prací jako nejvhodnější. Schéma zapojení měřícího stanoviště pro tyto testy je uvedeno na [Obr. 105](#), kde je mimo jiného patrná náhrada baterie pomocí druhého dynama v režimu konstantního budícího proudu, tedy v režimu konstantního indukovaného napětí U_i , které se stává vnitřním napětím baterie $U_{b \text{ int}}$. Ostatní parazitní veličiny dynama a silového rozvodu v laboratořích reprezentují průměrnou až horší trakční baterii. Regulace WPCS v těchto testech pracuje dle [Obr. 81](#) s tím, že vstupní usměrňovač a pomocný DCDC měnič plně nahrazuje napájecí dynamo ovládané požadavkem na budící proud – obdobně jako je tomu při simulacích WPCS na [Obr. 71, 74](#).

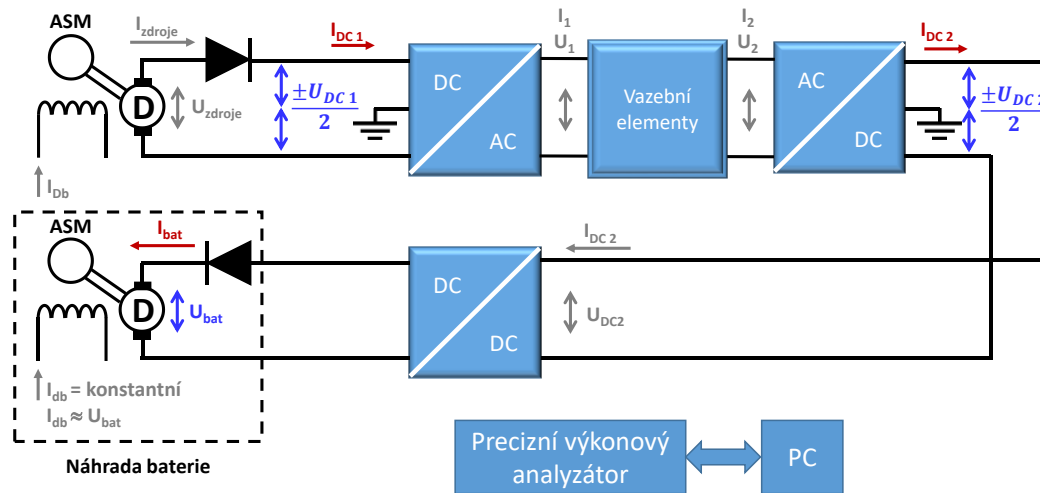
Měřené veličiny výkonovým analyzátozem jsou v [Obr. 105](#) označeny barevně. Ty neměřené, nebo snímané osciloskopem jsou ponechány šedé. Výstupem těchto testů je ověření zvolené regulace WPCS při použití dvou různých napětí baterie. [Obr. 106 – 109](#) zachycují výsledky z měření na 500V baterii a [Obr. 110 – 113](#) zachycují výsledky při použití 250V baterie.

Každá ze skupin obrázků zachycuje: vpravo nahoře - charakteristiky WPCS ; vlevo nahoře - poměry na impedančním přizpůsobení ; vlevo dole - průběhy vazebných elementů ; vpravo dole - průběhy charakteristických veličin impedančního přizpůsobení a baterie.

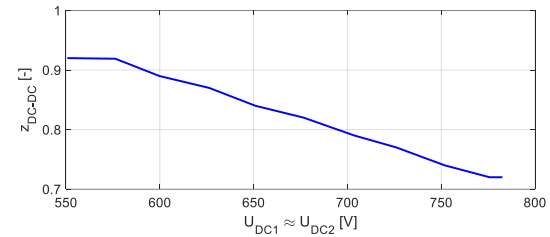
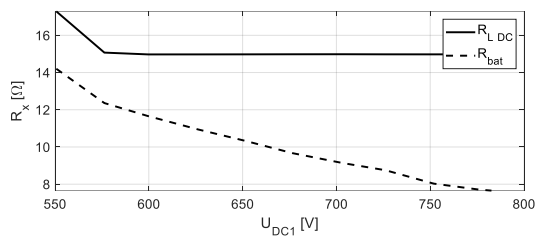
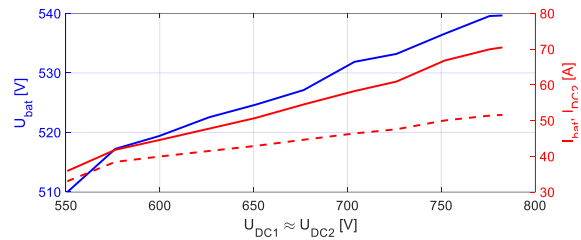
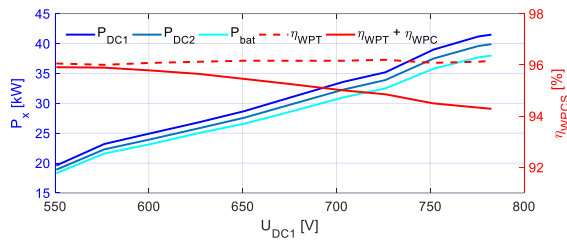
Hlavní závěr zde tvoří ověření správné funkce impedančního přizpůsobení, nastavení kmitočtu napětí U_1 a regulace výkonu $P_{bat \ p}$ při optimální účinnosti WPC a WPCS. Jak je dobře objasnitelné na základě uvedených obrázků – průběh R_z , R_{bat} , P_x a časových průběhů z osciloskopů.

Testy WPCS v tomto režimu probíhaly s využitím dynam s parametry 800 V / 70 A / 50 kW. Maximální napětí 800 V je pak pro tyto testy zcela limitující, neboť nelze zajistit jmenovitou velikost napětí UDC1. Testy jsou tak prováděné do výkonu na baterii cca 40 kW.

Porovnáme-li časové průběhy testů dle [kapitoly 6.3](#). a této kapitoly, pak dospějeme k závěru, že při aktivním řízení zátěžného odporu WPCS dle (33) jsou průběhy ideálně hladké. To je další důležitý poznatek hovořící o správném odvození regulační strategie.

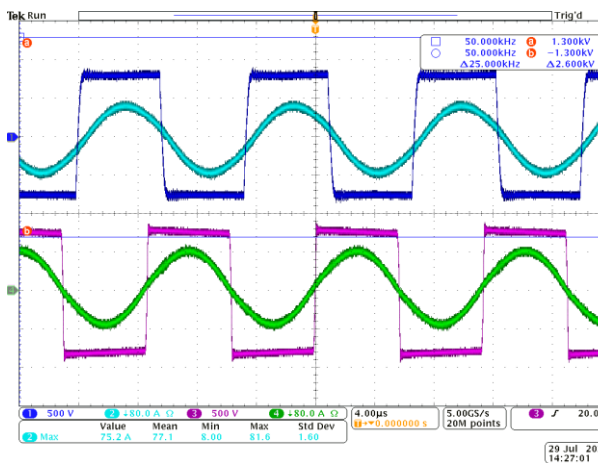


Obr. 105 Zapojení měřícího stanoviště pro režim „Grid to battery“

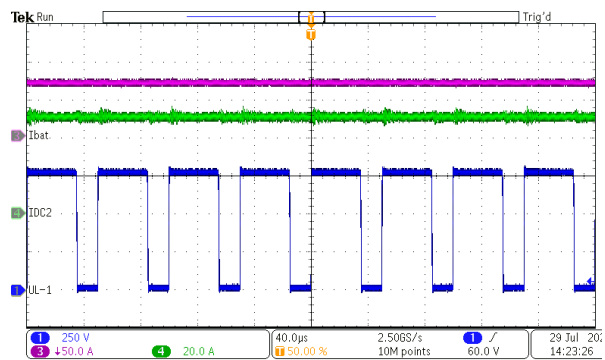


Obr. 106 Přenosová charakteristika WPCS – $t_d = 20$ cm, $U_{b,int} = 500$ V

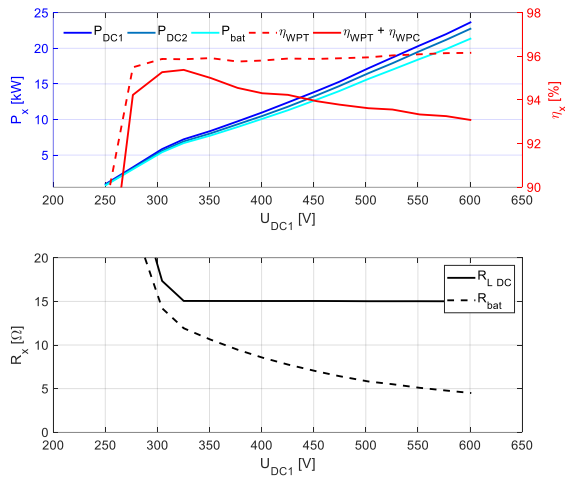
Obr. 107 Poměry na výstupním DCDC – $t_d = 20$ cm, $U_{b,int} = 500$ V



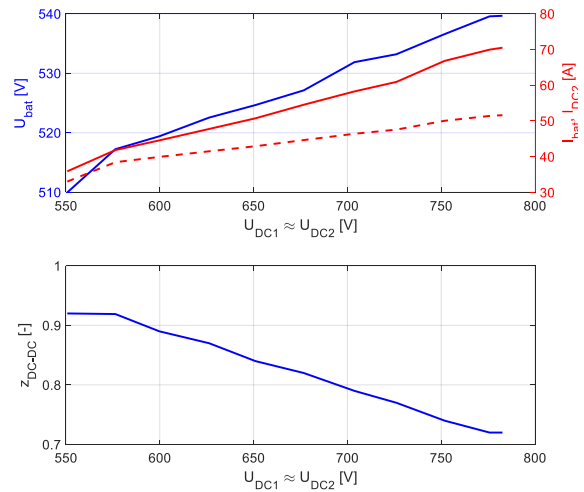
Obr. 108 charakteristické veličiny WPT při $U_{DC1} = 782$ V a $t_d = 20$ cm – modrá: U_1 ; modrá světlá: I_1 ; červená: U_2 ; zelená: I_2 .



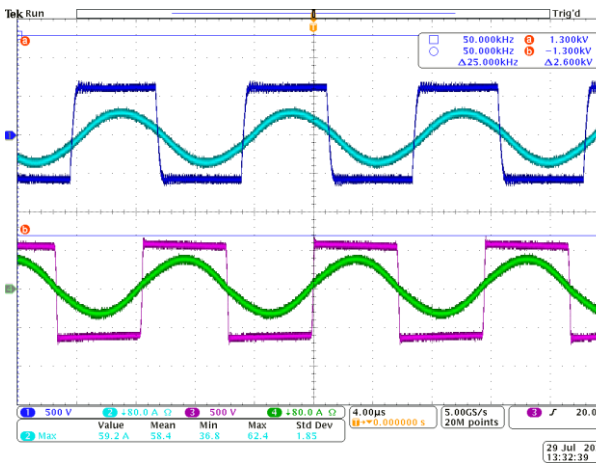
Obr. 109 charakteristické veličiny DCDC při $U_{DC1} = 782$ V a $t_d = 20$ cm – modrá: U_{LDCDC} ; červená: I_{bat} ; zelená: I_{bat} .



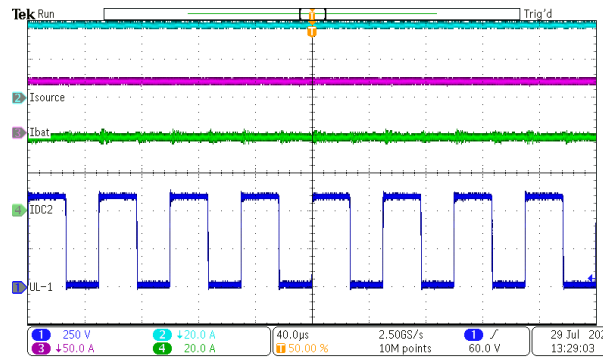
Obr. 110 Přenosová charakteristika WPCS – $t_d = 20$ cm, $U_{b,int} = 250$ V



Obr. 111 Poměry na výstupním DCDC - $t_d = 20$ cm, $U_{b,int} = 250$ V



Obr. 112 Charakteristické veličiny WPT při $U_{DC1} = 600$ V a $t_d = 20$ cm – modrá: U_1 ; modrá světlá: I_1 ; červená: U_2 ; zelená: I_2 .



Obr. 113 charakteristické veličiny DCDC při $U_{DC1} = 600$ V a $t_d = 20$ cm – modrá: U_{DCDC} ; červená: I_{bat} ; zelená: I_{bat} .

Jako výstupní DCDC měnič v režimu aktivního impedančního přizpůsobení byl použit univerzální laboratorní měnič založený na SKIIP-II 1700V modulech s ne zcela dobrými parametry z pohledu ztrát. Při použití měniče postaveném na SiC prvcích s minimálním RDS ON a dobrými parametry zpětných diod a využitím obousměrné MOSFET vodivosti lze očekávat průběh účinnosti DCDC měniče s mnohem méně klesající tendencí. Pro ověření navržené regulace je však univerzální měnič zcela postačující.

6.5 Testy regulace výkonu střídou vstupního střídače

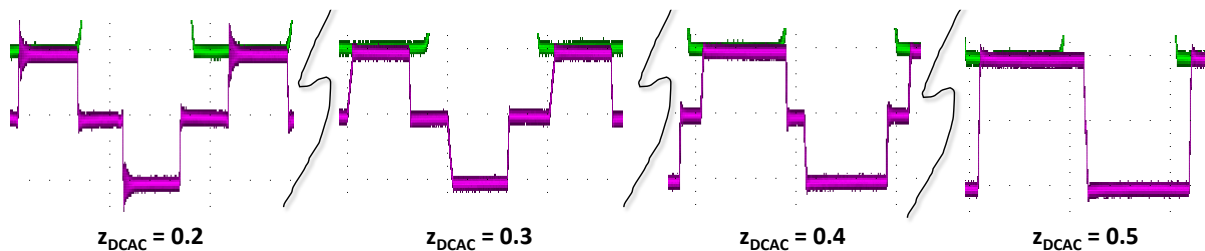
Možnost regulace přenášeného, respektive nabíjecího, výkonu pomocí střídou vstupního střídače, tedy pomocí střídou napětí U_1 , je diskutována v [kapitole 4.9](#) a v [kapitole 5.2.2.2](#). Uvedené teoretické předpoklady a simulační výsledky jsou zde verifikovány pomocí měření závislosti přenosové účinnosti a nabíjecího výkonu na z_{DCAC} a R_{zDC} .

[Obr. 115](#) ilustruje naměřené závislosti spolu s různými kombinacemi regulačních přístupů. Levá polovina [Obr. 115](#) zachycuje měření při aktivní regulaci kmitočtu U_1 , pravá polovina jej pak uvažuje konstantní. Současně je z [Obr. 115](#) odečitatelný vliv aktivní ($R_{zDC} = 15 \Omega$) a neaktivní regulace ekvivalentního zátěžného odporu WPT. Hlavní přínos [Obr. 115](#) spočívá ve vymezení oblasti s akceptovatelnou účinností WPT, čemuž odpovídají dosažitelná snížení nabíjecího výkonu.

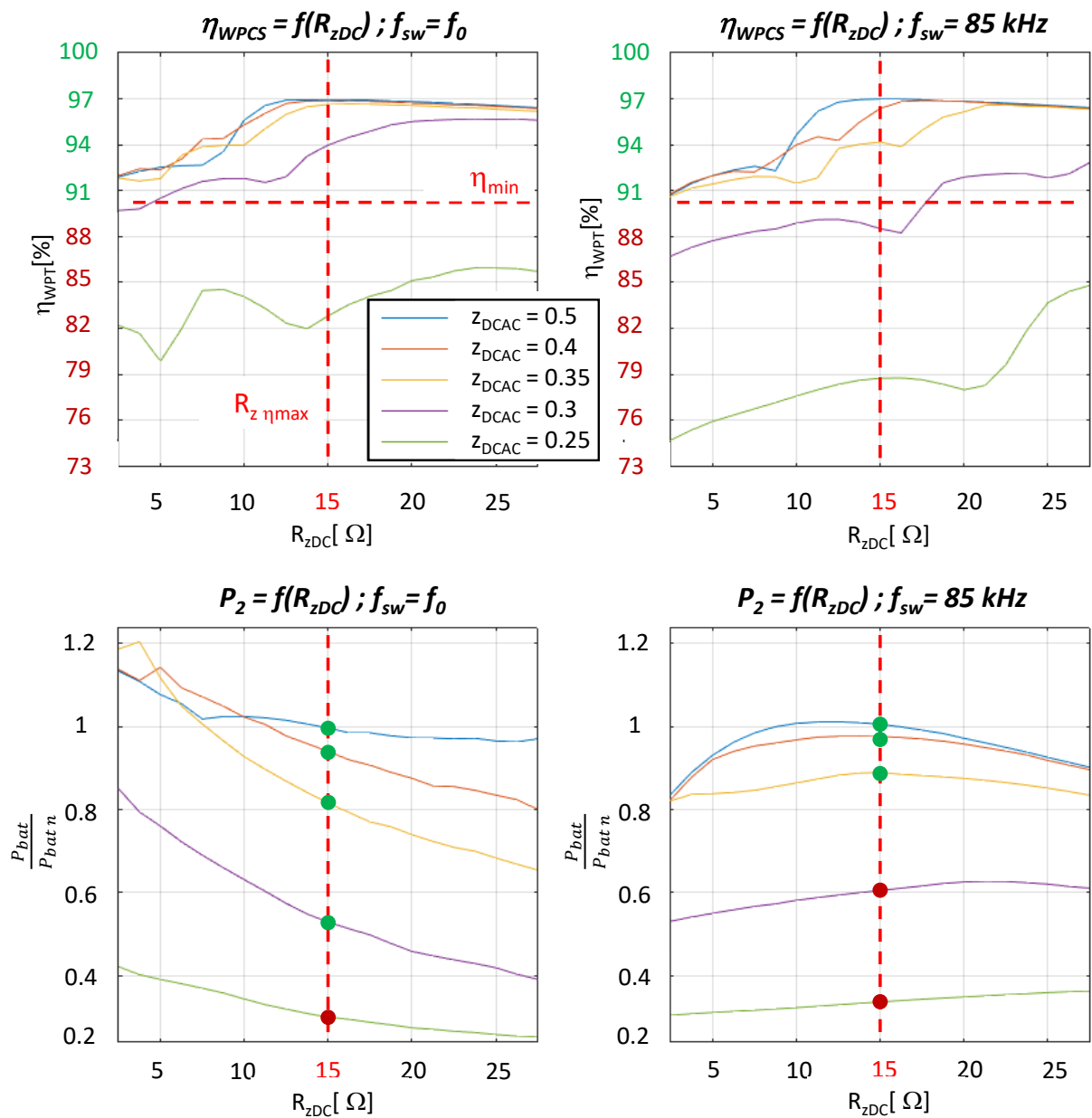
V případě optimálního nastavení, tedy aktivní regulace f_{U1} i R_{zDC} , je ve shodě s teoretickými předpoklady možné řídit výkon pomocí z_{DCAC} až na 0,5 násobek jmenovitého výkonu. V jiných případech je možnost snížení výkonu značně omezena až k 0,9 násobku jmenovitého výkonu.

Dílčí poznatek spočívá ve spojitosti střídou a kmitočtu U_1 . Fázový posuv mezi U_1 a U_2 se vlivem elektromagnetické indukce U_2 mění se střídou U_1 a je třeba ho kompenzovat změnou f_{U1} .

Naměřené průběhy napětí U_1 pro různé nastavení z_{DCAC} při použití spínacího diagramu dle [Obr. 48](#) jsou uvedeny na [Obr. 114](#).



Obr. 114 Průběh U_1 pro různé nastavení z_{DCAC}



Obr. 115 Závislosti účinnosti a přeneseného výkonu na proměnné střídě vstupního střídače

6.6 Shrnutí verifikace měření

Na základě porovnání dosažených výsledků pro prezentované řízení a další dvě testovaná je možné sestavit [Tab. XV](#) porovnávající hlavní sledovaný parametr WPCS a to celkovou účinnost. Porovnané regulační přístupy jsou zvoleny na základě jejich použití v dostupných bezdrátových systémech.

Tab. XV Porovnání WPCS při různých strategiích řízení

Řízený parametr		$\eta_{DC\ to\ DC}$ [%]	η_{DCDC} [%]	η_{WPC} [%]
3_L NPU	Výstupní DCDC			
U_2	CC/CV	90,19	86,37	78,9
CC/CV	Přímé spojení	82,06	99,5	80
CC/CV	R_{ekv}	96,2	98,5	92

První přístup řídí napětí U_{DC1} na konstantní hodnotu a celé nabíjení zajišťuje výstupní DCDC měnič v CC-CV režimu. Takovéto systémy bývají často vybaveny vazebnými elementy s převodem různým od jedné. To však vede na nižší univerzalitu a úzkou oblast aplikace. Jelikož není zajištěno impedanční přizpůsobení, je dosahovaná účinnost WPT velmi malá. Velký rozptyl střídý výstupního DCDC měniče má pak za následek jeho velmi malou účinnost.

Lepší varianta řízení WPCS je uvedena jako druhá. Zde je CC-CV cyklus nabíjení zajištěn řízením napětí U_{DC1} , avšak není zde provedeno aktivní impedanční přizpůsobení zátěže, které je v těchto systémech nahrazeno přesně stanoveným převodem vazebných elementů pro konkrétní, aplikace, nebo jen velmi malou oblast. Takovéto řízení je dnes zcela běžné pro elektroniku, ruční nářadí apod.

Navrhovaná varianta řízení je uvedena jako třetí. Svými vlastnostmi kombinuje předchozí dvě uvedené strategie, avšak je vhodná pro vysoce výkonné systémy s převodem vazebných elementů rovným jedné a neznámou bateriovou zátěží. Tedy pro elektro-mobilitu bez ohledu na značku a model vozidla.

Verifikace popisované regulační strategie a výkonového řetězce WPCS v této disertační práci je tedy úspěšná.

Detailní výkonová bilance optimálně navrženého WPCS uvádí [Obr. 116](#).

7 Závěr

Bezdrátové nabíjecí stanice pro elektro-mobilitu jsou hojně diskutovaným tématem poslední doby. Pro svoji specifickou podobu a požadavky na ně kladené, tvoří samostatné odvětví bezdrátového přenosu elektrické energie. Není je tedy možné jakkoliv připodobňovat či spojovat s bezdrátovými nabíječkami přenosné elektroniky či průmyslových aplikací.

WPCS jsou vysoce výkonná zařízení určená pro laickou obsluhu a na veřejných prostranstvích. Ve spojení s těmito aspekty je třeba zabezpečit jejich elektrickou a elektromagnetickou bezpečnost. Nejen to zajišťuje regulativní předpis SAE J2954, který je zatím jediným, jenž se zabývá aplikací v elektro-mobilitě. To je současně nesporná výhoda např. proti aplikacím v přenosné elektronice, kde jsou současně známé 3 velké normativní organizace...

SAE J2954 se ve smyslu elektromagnetické bezpečnosti odvolává na ICNIRP [35] jenž mimo jiného stanovuje hygienické limity okolního pole na $27 \mu\text{T}$ a 83 Vm^{-1} pro oblasti, kde se běžně nevyskytuje trup a hlava člověka. Zajištění zmíněné bezpečnosti sdružuje pod detekci cizích předmětů (FOD) a detekci živých předmětů (LOD). SAE J2954 dále řeší i otázku EMC a EMI.

Normování dle SAE J2954 také definuje výkonnostní třídy, které souvisejí s elektrickým dimenzováním, respektive návrhem, WPCS. Mechanické aspekty návrhu WPCS norma SAE J2954 též popisuje a definuje základní přenosové vzdálenosti, jejich tolerance a možnosti vyosení či náklonu. Rovněž je stanoven vztažný souřadnicový systém a definovány základních mechanické parametry.

Přímou otázku vazebných elementů SAE J2954 popisuje ve smyslu definování základní skladby vazebného elementu a uvažovaných geometrií vinutí vazebná indukčnosti.

Součástí SAE J2954 je též odkaz na SAE 2847/6, která se zabývá normalizací komunikace u WPCS pro elektro-mobilitu. Jako základní komunikace zde slouží internetový protokol s WI-FI komunikačním kanálem a definovanými základními zprávami.

Na základě takto ohraničené a definované problematiky aplikace WPCS v elektro-mobilitě je možné provést návrh výkonové, regulační i mechanické části WPCS tak, jak uvádí tato disertační práce.

Základními cíli této disertační práce byl výběr nejvhodnější topologie vazebných elementů a výkonového řetězce WPCS ve spojení s definováním nejvhodnější regulační strategie pro zajištění dobré regulovatelnosti nabíjecího výkonu při vysoké celkové účinnosti WPCS. Tyto cíle jsou v práci obsáhle řešeny a jejich výsledky jsou:

1. Na základě detailního rozboru základních principů bezdrátového přenosu energie z hlediska účinnosti, hospodárnosti a dosažitelných přenášených výkonů na dostatečně velkou přenosovou vzdálenost byl zvolen induktivní přenos v plně kompenzované variantě, tedy přenos založený na magneticky vázaných cívkách s rezonančním obvodem.
2. Zvolený fyzikální princip přenosu elektrické energie je možné realizovat ve čtyřech základních topologiích rezonančního obvodu. Na základě jejich

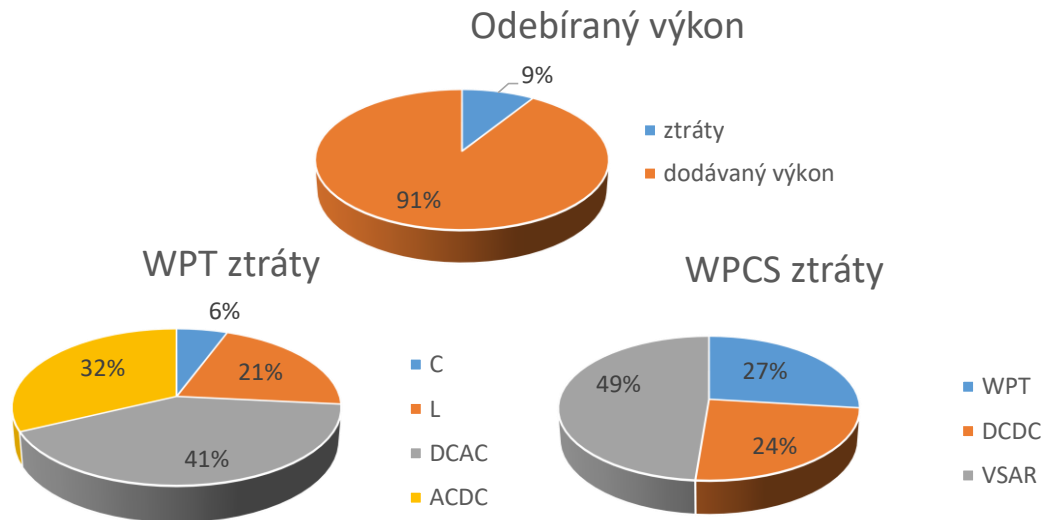
matematického popisu a analytického i numerického rozboru byla zvolena sériově sériová topologie jako ta nejvhodnější.

3. Pro S-S topologii vazebných elementů byl sestaven simulační model v časové oblasti, impedanční a přenosové charakteristiky a základní vlastnosti potřebné pro návrh WPT.
4. Neoptimálnější podmínky pro přenos elektrické energie mezi vazebnými elementy nastává pro případ ekvivalentní zátěže optimalizované na účinnost přenosu a maximalizovaný činitel vazby pomocí maximalizace amplitudy napájecího napětí vysílacího vazebného elementu (maximalizace FOM).
5. Na základě zatěžovacích charakteristik respektujících výše zmíněné aspekty a uvažované provozní polohy vazebných elementů, je možné provést elektrický návrh vazebných elementů, který je nutné spojit s jejich magnetickým návrhem.
6. Další krok pro splnění cílů disertační práce je návrh výkonové elektroniky WPT a způsobu řízení WPT. Pro zajištění obousměrného přenosu výkonu přes vzduchovou mezeru byla zvolena symetrická HW a nesymetrická SW topologie, kdy výkonový měnič na vstupu i na výstupu je v HW topologii jednofázového můstkového střídače, avšak jednou je řízen jako střídač a podruhé jako synchronní usměrňovač.
7. Na znalosti WPT byl sestaven optimální způsob řízení nabíjecího výkonu, kdy je předně nutné udržovat optimální zátěžný odpor pomocí aktivního impedančního přizpůsobení. To vede na výstupní DCDC měnič v režimu aktivního impedančního přizpůsobení v obousměrné topologii. Měnič totiž musí pro případ přenosu energie z baterie do distribuční sítě zajistit navýšení napětí na hodnotu napájecího napětí vazebného elementu. Samotné řízení nabíjecího výkonu je možné realizovat dvěma způsoby a to velikostí napájecího napětí WPT a střídou vstupního střídače WPT. Nad rámec SAE J2954 je možné rozšířit regulační rozsah nabíjecího výkonu, pomocí snižujícího DCDC měniče až k nule. Primárním měničem zajišťujícím regulaci výkonu je 3-fázový napěťový pulzní usměrňovač.
8. Připojení WPCS k distribuční síti musí splňovat požadavky na THDi a $\cos \varphi$ dle požadavku SAE J2954 a místních regulativních předpisů. To je také druhý úkol 3-f NPU.

Takto, ve zkratce popsáný, systém WPCS je ve smyslu dosažení cílů disertační práce simulován a měřen na experimentálním prototypu 65kW WPCS. Měření i simulace bylo porovnáváno při aplikaci tří přístupů k řízení WPCS. Tím prvním bylo řízení navržené touto disertační prací, druhým bylo řízení pouze sekundární strany a třetím řízení pouze primární strany. Z dosažených výsledků experimentálních měření vyplývá potvrzení správné funkce navrženého výkonového řetězce a řídicí topologie. Současně se potvrdily předpoklady o vysoké účinnosti systému.

Detailní výkonová bilance optimálně navrženého WPCS po stránce výkonové i regulační, tak jak tato disertační práce popisuje, je uvedena na [Obr. 116](#). Z této bilance lze učinit závěr ověřující uvedené teoretické účinnosti a ztráty jednotlivých částí WPCS. Návrhové ztráty

na C činí 124 W, na L 455 W a na měničích WPT 1600 W, jak uvádí [kapitola 4.6](#). Tedy, celkem činí teoretické ztráty experimentálního prototypu WPT 2760 W, což činí 4,2 % ztrát. Zbylé účinnosti výstupního DCDC měniče (98,5 %) a 3LNPU (96 %) odpovídají dalším 5,4 % ztrát. Z naměřených hodnot vychází ztráty WPT na 4 % a ztráty WPCS na 9 %, jak zachycuje [Obr. 116](#). Teoretické a měřené hodnoty jsou tedy v dobré shodě.



Obr. 116 Distribuce výkonových ztrát na kompletním WPCS

7.1 Shrnutí dosažených výsledků

Hlavní cíle předkládané disertační práce byly splněny a dosahují vynikajících výsledků. Teoretické poznatky byly simulovány v prostředí Matlab/Simulink/PLECS a následně verifikovány na postaveném experimentálním prototypu WPCS o výkonu 65 kW. Odvozená optimální výkonová a regulační topologie pro WPCS v elektro-mobilitě je tek ověřená, plně funkční a dosahuje skvělých výsledků a zlepšení oproti ostatním, jak je v práci hojně diskutováno a shrnuto nejen v [Tab. XV](#).

Práce poskytuje obsáhlý a komplexní teoretický popis i implementační mechanismy pro návrh a stavbu WPCS s optimalizovanou účinností a řízením nabíjecího výkonu v oblasti osobní, hromadné i nákladní elektro-mobility.

WPCS odvozená touto disertační prací rovněž splňuje dotčené pasáže SAE J2954 a místních regulativních předpisů pro elektrotechniku.

7.2 Perspektivní směry dalšího zkoumání

Hlavní výstup této disertační práce tvoří experimentální prototyp 65kW WPCS v optimalizované výkonové a regulační topologii, tak jak popisuje tato disertační práce. Směry dalšího zkoumání by tedy měli vést k dalšímu zdokonalení experimentálního prototypu a vytvoření průmyslového provedení WPCS pro elektro-mobilitu.

V zásadě jsou nyní možné tři směry dalšího zkoumání, které společně vyústí v plně samostatný funkční prototyp WPCS. Prvním je optimalizace řetězce výkonových měničů, spočívající ve zjednodušení celého WPCS. Druhým směrem je optimalizace SW navržené topologie řízení.

Třetím směrem je implementace systémů FOD a LOD do vazebných elementů 65kW WPCS (řešeno na předchozím 5kW prototypu).

Jakousi paralelní větev dalšího výzkumu může tvořit výzkum odvozených topologií vazebných elementů WPT ve spojení se systémy WPT pro elektro-mobilitu. Odvozenou topologií se rozumí základní topologie (S-S, S-P, P-S či P-P) doplněná o další pasivní prvky L a C v různých kombinacích za účelem omezit či odstranit nějakou nepříznivou vlastnost základní topologie, jako je například nekontrolovaný nárůst napětí U_{DC2} při odpojení R_{ZDC} apod. Nevýhodou jsou zde právě přidávané prvky L a C ve spojení s velkými přenášenými výkony.

Druhou paralelní větev pak může tvořit další navýšení přenášeného výkonu, což by ovšem vedlo na nutnost stavby nových, značně finančně nákladných, vazebných elementů.

Jako nejperspektivnější směr dalšího zkoumání se tedy jeví optimalizace odvozené výkonové a regulační topologie a jejich finální integrace do samostatně funkčního prototypu.

7.3 Vztah studenta k disertační práci

Tato disertační práce je řešena v rámci projektů uvedených v „[Prohlášení řešitele projektu](#)“ v řešitelském týmu: Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D., Doc. Ing. Vladimír Kindl, Ph.D., Ing. Tomáš Kavalír, Ph.D. a Ing. Martin Zavřel.

Kapitola 4.1, jakožto matematický popis vazebných elementů, tvoří převzatý základ (z habilitační práce Doc. Ing. Vladimíra Kindla, Ph.D.) pro navazující samostatně vytvářenou práci.

V průběhu práce se objevují zmínky o magnetickém (elektromagnetickém) návrhu vazebných elementů. Ten byl prováděn s využitím programu Ansys Doc. Ing. Vladimírem Kindlem, Ph.D.

Ostatní části předkládané disertační práce jsou prací autora. Během samostatné práce probíhaly v rámci řešitelského týmu konzultace, na jejichž základě probíhala práce na této disertační práci. Jednotlivé části disertační práce tak obsahují myšlenky a závěry Doc. Ing. Pavla Drábka, Ph.D. a Doc. Ing. Vladimíra Kindla, Ph.D.

Části, které nejsou předmětem této disertační práce, ale byly v rámci řešení projektu provedeny a vedly k dokončení experimentálního prototypu WPCS byly prací autora této disertační práce a uvedených členů řešitelského týmu. Části spojené s elektromagnetickým návrhem vazebných elementů byly konzultovány s Doc. Ing. Vladimírem Kindlem, Ph.D., části spojené s výkonovým řetězcem, měniči a jejich kompletním návrhem s Doc. Ing. Pavlem Drábkem, Ph.D. a části spojené s řídicí a signálovou elektronikou s Ing. Tomášem Kavalírem, Ph.D.. Pochopitelně, uvedené rozložení konzultantů není výhradní.

Speciální mechanické práce na opracování dílů WPCS byly prováděny na RTI/ZČU ve spolupráci s Ing. Tomášem Kavalírem, Ph.D.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] European Commission, European Emission Vehicle Standard – Euro 7, , citováno 17. 11. 2021, dostupné online z: https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12313-European-vehicle-emissions-standards-Euro-7-for-cars-vans-lorries-and-buses_en.
- [2] icct (the internal council on clean transportation), Growing momentum: Global overview of government targets for phasing out sales of new internal combustion engine vehicles, available online: <https://theicct.org/blog/staff/global-ice-phaseout-nov2020>, 11 November 2020.
- [3] Bauer, C.; Scheid, L.; Goulding Carroll, S., EU plotting ban on internal combustion engine as for 2025: industry, in EURACTIV.com, available online: <https://www.euractiv.com/section/circular-economy/news/eu-plotting-ban-on-internal-combustion-engine-as-of-2025-industry/>, 2.3.2021
- [4] VDMA – Mechanical Engineering industry, Plans for EURO 7 standard must be changed – Combustion engine leads to green future. Available online: <https://pr.euractiv.com/pr/vdma-plans-euro-7-standard-must-be-changed-combustion-engine-leads-green-future-213480>, 18 Feb 2021
- [5] Autocar, New electric cars 2021: what's coming and when?, available online: <https://www.autocar.co.uk/car-news/new-cars/new-electric-cars-2021>, 20. April 2021.
- [6] Commonly available car or busses manufacturers products datasheets on manufacturers web pages, available online.
- [7] Euronews.green, Hydrogen fuel cell vs electric cars: what you need to know couldn't task, available online: <https://www.euronews.com/green/2020/02/13/hydrogen-fuel-cell-vs-electric-cars-what-you-need-to-know-but-couldn-t-ask>, 14.2.2020
- [8] Huang, Haijian & Niederberger, Markus. (2019). Towards fast-charging technologies in Li + /Na + storage: from the perspectives of pseudocapacitive materials and non-aqueous hybrid capacitors. *Nanoscale*. 11. 10.1039/C9NR05732C.
- [9] Amin, A.; Tareen, W.U.K.; Usman, M.; Ali, H.; Bari, I.; Horan, B.; Mekhilef, S.; Asif, M.; Ahmed, S.; Mahmood, A. A Review of Optimal Charging Strategy for Electric Vehicles under Dynamic Pricing Schemes in the Distribution Charging Network. *Sustainability* **2020**, *12*, 10160. <https://doi.org/10.3390/su122310160>
- [10] BRUSA, Applications powered by Brusa, available online: <https://www.brusa.biz/applications/?lang=en>, 15.6.2021
- [11] <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:4cdfc562-ff6d-429b-aa80-bc5a51e6a1be/dc-wallbox-cpc20-final.pdf>
- [12] <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:a6369d83-66a3-4597-901a-d7824a71acc3/datasheet-cpc50m-cz.pdf>
- [13] <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK1074920233&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [14] <https://new.abb.com/ev-charging/terra-dc-wallbox>
- [15] <https://service.ihned.cz/smartcity/>
- [16] <https://uvtnet.cz/smart-city-co-jsou-chytra-mesta>
- [17] Johann W. Kolar, Roman Bosshard, Inductive EV battery Charging Systems – Requirements, Basics, Limitations, Future research, ETH Zürich, ABB, IECON 2016, 2016
- [18] Johann W. Kolar, Roman Bosshard, Inductive Power Transfer for Electric Charging –

- Technical Challenges and Tradeoffs, IEE power electronic magazine, 2016, DOI: 10.1109/MPEL.2016.2583839, available online: [https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/7_Inductive Power Transfer for Electric Vehicle Charging Bosshard 01.pdf](https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/7_Inductive_Power_Transfer_for_Electric_Vehicle_Charging_Bosshard_01.pdf)
- [19] ABB Technology AG, Inductive Power Transfer System and Method for Operating an inductive Power tranfare System, původce: R. Bosshard, C. Francisco, G. Guanghai, G. Beat, J. W. Kolar, W. Bernhard, IPC: H02J5/00, CN104953686A, CN104953686B, EP2928038A1, US2015280455A1, US9843199B2, Přihlášeno 3.3.2015
- [20] Y. Lu, F. Mao and R. P. Martins, "Bi-directional Battery-to-Battery Wireless Charging Enabled by Reconfigurable Wireless Power Transceivers (Invited Paper)," *2018 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuits (EDSSC)*, Shenzhen, 2018, pp. 1-2, doi: 10.1109/EDSSC.2018.8487127
- [21] S. Das and S. Chakraborty, "Fast charging a 12V battery using wireless power transfer concept," *2018 International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering (ICRIEECE)*, Bhubaneswar, India, 2018, pp. 3156-3160, doi: 10.1109/ICRIEECE44171.2018.9009109.
- [22] Z. Huang, I. W. lam, I. U. Hoi, C. Lam, P. Mak and R. P. Martins, "Self-Contained Solar-Powered Inductive Power Transfer System for Wireless Electric Vehicle Charging," *2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Macao, Macao, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/APPEEC45492.2019.8994554
- [23] Y. Honda, L. Lin and M. Fukui, "An optimal wireless power transfer system for Lithium-ion battery charge," *2016 IEEE 6th International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin)*, Berlin, 2016, pp. 57-61, doi: 10.1109/ICCE-Berlin.2016.7684717
- [24] Y. Zhang, Z. Zhao and Y. Jiang, "Modeling and analysis of wireless power transfer system with constant-voltage source and constant-current load," *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Cincinnati, OH, 2017, pp. 975-979, doi: 10.1109/ECCE.2017.8095891
- [25] Y. Zhang, K. Chen, F. He, Z. Zhao, T. Lu and L. Yuan, "Closed-Form Oriented Modeling and Analysis of Wireless Power Transfer System With Constant-Voltage Source and Load," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 3472-3481, May 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2465847
- [26] M. Khalilian and P. Guglielmi, "A Hybrid Topology Wireless Power Transfer System with Constant Current or Constant Voltage Output for Battery Charging Application," *2019 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)*, Torino, Italy, 2019, pp. 1-6, doi: 10.23919/EETA.2019.8804539
- [27] J. Lu, G. Zhu, D. Lin, Y. Zhang, H. Wang and C. C. Mi, "Realizing Constant Current and Constant Voltage Outputs and Input Zero Phase Angle of Wireless Power Transfer Systems With Minimum Component Counts," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, doi: 10.1109/TITS.2020.2985658
- [28] K. Song, Z. Li, J. Jiang and C. Zhu, "Constant Current/Voltage Charging Operation for Series-Series and Series-Parallel Compensated Wireless Power Transfer Systems Employing Primary-Side Controller," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 9, pp. 8065-8080, Sept. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2767099
- [29] I. lam et al., "Constant-Frequency and Non-Communication-Based Inductive Power Transfer Converter for Battery Charging," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, doi: 10.1109/JESTPE.2020.3004259
- [30] Y. Li, Q. Xu, T. Lin, J. Hu, Z. He and R. Mai, "Analysis and Design of Load-Independent

- Output Current or Output Voltage of a Three-Coil Wireless Power Transfer System," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 2, pp. 364-375, June 2018, doi: 10.1109/TTE.2018.2808698
- [31] Z. Huang, C. Lam, P. Mak, R. P. d. S. Martins, S. Wong and C. K. Tse, "A Single-Stage Inductive-Power-Transfer Converter for Constant-Power and Maximum-Efficiency Battery Charging," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 9, pp. 8973-8984, Sept. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.2969685
- [32] Z. Li, G. Wei, S. Dong, K. Song and C. Zhu, "Constant current/voltage charging for the inductor–capacitor–inductor-series compensated wireless power transfer systems using primary-side electrical information," in IET Power Electronics, vol. 11, no. 14, pp. 2302-2310, 27 11 2018, doi: 10.1049/iet-pel.2018.5314
- [33] SAE International. *Standards.sae* [online]. USA: SAE J 2954 „Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment methodology”, publikováno: 26.5.2016, revidováno: 20.10.2020 [cit. 24.09.2021]. Dostupné z: https://www.sae.org/standards/content/j2954_202010/
- [34] SAE International. *Standards.sae* [online]. USA: SAE J2847/6 „Communication for Wireless Power Transfer Between Light-Duty Plug-in Electric vehicles and wireless EV charging stations“, publikováno: 5.8.2015, revidováno: 29.09.2020 [cit. 24.09.2021]. Dostupné z: https://www.sae.org/standards/content/j2847/6_202009/
- [35] ICNIRP, ICIRP GUIDELINES for Limiting Exposure to Time-Varying electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz), Dostupné online: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdL.pdf>, Health Physics, 99(6): 218-836, 2010, cit. 1.10.2021
- [36] Wireless Power Consortium, Qi specifications, version 1.3, 2021, dostupné online z: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/knowledge-base/specifications/download-the-qi-specifications.html>
- [37] Wireless Power Consortium, online: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/>
- [38] N. Shinohara, "Wireless power transmission progress for electric vehicle in Japan," 2013 IEEE Radio and Wireless Symposium, Austin, TX, 2013, pp. 109-111. doi: 10.1109/RWS.2013.6486657
- [39] S. Hui and W. Ho, "A new generation of universal contactless battery charging platform for portable consumer electronic equipment," in Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, vol. 1, June 2004, pp. 638–644 Vol.1
- [40] A. Hu, C. Liu, and H. L. Li, "A novel contactless battery charging system for soccer playing robot," in Mechatronics and Machine Vision in Practice, 2008. M2VIP 2008. 15th International Conference on, Dec. 2008, pp. 646–65
- [41] K. Piipponen, R. Sepponen, and P. Eskelinen, "A biosignal instrumentation system using capacitive coupling for power and signal isolation," Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, vol. 54, no. 10, pp. 1822–1828, Oct. 2007
- [42] A. Sodagar and P. Amiri, "Capacitive coupling for power and data telemetry to implantable biomedical microsystems," in Neural Engineering, 2009. NER '09. 4th International IEEE/EMBS Conference on, May 2009, pp. 411–414
- [43] C. Liu and A. Hu, "Steady state analysis of a capacitively coupled contactless power transfer system," in Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE, Sept. 2009, pp. 3233–3238

- [44] U. K. Madawala and D. J. Thrimawithana, "A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 10, pp. 4789- 4796, Oct. 2011. doi: 10.1109/TIE.2011.2114312
- [45] N. A. Keeling, G. A. Covic and J. T. Boys, "A Unity-Power-Factor IPT Pickup for High-Power Applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 2, pp. 744-751, Feb. 2010
- [46] K. W. Klontz, A. Esser, R. R. Bacon, D. M. Divan, D. W. Novotny and R. D. Lorenz, "An electric vehicle charging system with 'universal' inductive interface," Conference Record of the Power Conversion Conference - Yokohama 1993, Yokohama, Japan, 1993, pp. 227-232. doi: 10.1109/PCCON.1993.264219
- [47] S. Moon, B. C. Kim, S. Y. Cho and G. W. Moon, "Analysis and design of wireless power transfer system with an intermediate coil for high efficiency," 2013 IEEE ECCE Asia Downunder, Melbourne, VIC, 2013, pp. 1034-1040. doi: 10.110
- [48] Altfuels, One Last Day With an EV, cit. 2.10.2021, online, dostupné z: <http://www.altfuels.org/events/testdriv/farewell.shtml>
- [49] Altfuels, Quick Chargers for Electric Vehicles, cit. 2.10.2021, online, dostupné z: <http://www.altfuels.org/events/otherafv/quikchrg.shtml>
- [50] J. T. Boys, G. A. J. Elliott and G. A. Covic, "An Appropriate Magnetic Coupling Co-Efficient for the Design and Comparison of ICPT Pickups," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 1, pp. 333-335, Jan. 2007. doi: 10.1109/TPEL.2006.887590
- [51] Chwei-Sen Wang, O. H. Stielau and G. A. Covic, "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 5, pp. 1308- 1314, Oct. 2005
- [52] F. Vondrášek, výkonová elektronika – svazek I – Přehled výkonových polovodičových součástek, ZČU v Plzni, 1994, ISBN: 80-7082-136-1
- [53] F. Vondrášek, Výkonová elektronika – svazek II – Měniče s vnější komutací, ZČU v Plzni, 1994, ISBN: 80-7082-137-1
- [54] F. Vondrášek, Výkonová elektronika – svazek III – Měniče s vlastní komutací, ZČU v Plzni, 1998, ISBN: 80-7082-485-9
- [55] F. Vondrášek, J. Langhammer, A. Peroutka, J. Měsíček, J. Molnár, Projektování výkonových polovodičových měničů – vybrané stati, ZČU v Plzni, 2008, ISBN: 978-80-7043-653-0
- [56] ZVEI – Die Elektroindustrie, German electrical and Electronic Manufacturer's association, Voltage classes for electric mobility, available online: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2014/april/Voltage_Classes_for_Electric_Mobility/Voltage_Classes_for_Electric_Mobility.pdf , published 2013, cited 22.10.2021.
- [57] Figure available on webpage <https://groundclearances.com/>
- [58] Commonly available car or busses manufacturers products datasheets on manufacturers web pages, available online
- [59] Skoda auto, Skoda ENYAQ iV productlist, available online: <https://www.skoda-auto.cz/modely/enyaq/enyaq-iv>, 2021
- [60] Skoda Media Room, Skoda ENYAQ iV – baterie, available online: https://www.skoda-storyboard.com/cs/08_enyaq_iv_battery_system/, 29.3.2021
- [61] Epcos AG TDK group company, Ferrites and accessories – SIFERRIT material N87,

- material datasheet, 2017, citováno: 1.11.2021, dostupné online: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/528882/71e02c7b9384de1331b3f625ce4b2123/pdf-n87.pdf>
- [62] Vishay, Ceramic DC Disc, RFI, and Safety Cypacitors – General Information, 2021, citováno: 1.11.2021, dostupné online: <https://www.vishay.com/docs/23140/geninfodcdiscrfisafe.pdf>
- [63] Würth elektronik eiSos GmbH & CO. KG, Cem Som, Dr. Michael A. de Rooij, Triology of wireless power transfer, 1.2019, ISBN.: 978-3-89929-371-5
- [64] Airfuel Alliance (AFA), A Global Coalition of Companies Working Together to Create a Wire-Free World, dostupné online: <https://airfuel.org/>, citováno 26.11.2021.
- [65] Lingea, Slovník současné češtiny, 1. 12. 2011, ISBN: 978-80-87471-27-2, dostupné v elektronickém aktualizovaném provedení na: <https://www.nechybujte.cz/slovník-soucasne-cestiny> , aktualizovaná verze k 2018, cit. 2021.

Seznam publikací a výstupů studenta vztahujících se k disertační práci

- [1] [8]KINDL, V. KAVALÍR, T. ZAVŘEL, *Stínění EM pole výkonového WPT systému „RICE ver.1“*. Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [2] [9]ZAVŘEL, *Základní měření na systému WPT*. Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [3] [10]ZAVŘEL, KINDL, V. Porovnání různých konfigurací systému bezdrátového přenosu výkonu. In *Elektrické pohony : XXXV. konference (ELPO 2017)*. Plzeň: Česká elektrotechnická společnost ČSVTS, 2017. s. 1-6. ISBN: 978-80-02-02724-9
- [4] [11]ZAVŘEL, KINDL, V. DRÁBEK, P. *Řízení systému WPT na optimální účinnost a výkon s regulací výkonu*. Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [5] [12]ZAVŘEL, *Orientační měření blízkého elektrického pole nižších kmitočtů*. In *Elektrotechnika a informatika 2017. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 83-86. ISBN: 978-80-261-0712-5
- [6] [13]ZAVŘEL, DRÁBEK, P. KINDL, V. *Simulace WPT v okamžitých hodnotách*. Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [7] [15]KAVALÍR, T. KINDL, V. TURJANICA, P. PUŠMAN, L. JÁRA, M. ZAVŘEL, *Jednotka pro bezdrátové napájení miniaturních senzorů včetně sběru a přenosu dat ze senzorů*. 2017.
- [8] [17]ZAVŘEL, *Návrh a realizace kompenzačního kondenzátoru bezdrátového přenosu energie s rezonanční vazbou*. In *Elektrotechnika a informatika 2018. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018. s. 161-164. ISBN: 978-80-261-0785-9
- [9] [18]KINDL, V. ZAVŘEL, DRÁBEK, P. KAVALÍR, T. High efficiency and power tracking method for wireless charging system based on phase-shift control. *Energies*, 2018, roč. 11, č. 8, s. 1-19. ISSN: 1996-1073
- [10] [19]KINDL, V. PECHÁNEK, R. ZAVŘEL, M. KAVALÍR, T. Inductive coupling system for e-bike wireless charging. In *12th International Conference Elektro 2018 : conference proceedings*. Piscataway: IEEE, 2018. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-4759-2
- [11] [21]ZAVŘEL, KINDL, V. Comparison of various configuration of wireless power transfer system. *Transactions on Electrical Engineering*, 2018, roč. 7, č. 2, s. 32-36. ISSN: 1805-3386
- [12] [23]ZAVŘEL, KINDL, V. Optimal efficiency and power control of high efficient wireless power transfer system. In *Mechatronics 2017 : Recent Technological and Scientific Advances (Advances in Intelligent Systems and Computing; Vol. 644)*. Cham: Springer, 2018. s. 50-57. ISBN: 978-3-319-65959-6 , ISSN: 2194-5357
- [13] [24]KINDL, V. ZAVŘEL, KAVALÍR, T. Minimization of equivalent series resistance of coupling coils for wireless power transfer applications. In *Mechatronics 2017 : Recent Technological and Scientific Advances (Advances in Intelligent Systems and Computing; Vol. 644)*. Cham: Springer, 2018. s. 43-49. ISBN: 978-3-319-65959-6 , ISSN: 2194-5357
- [14] [29]ZAVŘEL, DRÁBEK, P. KINDL, V. *Kooperace systému WPT s baterií*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [15] [30]ZAVŘEL, M. Srovnání základních strategií a topologií pro nabíjení akumulátorů s využitím systému bezdrátového přenosu výkonu. In *Elektrotechnika a informatika 2019. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2019. s. 161-164. ISBN: 978-80-261-0871-9

- [16] [34]ZAVŘEL, M. KINDL, V. *Systém na detekci cizích předmětů a živočichů v aktivní zóně systému WPT*. Západočeská univerzita v Plzni, 2019.
- [17] [35]ZAVŘEL, M. KAVALÍR, T. DRÁBEK, P. KINDL, V. *Kompenzační kondenzátor vlastní konstrukce pro 5kW prototyp systému WPT*. Západočeská univerzita v Plzni, 2019.
- [18] [36]ZAVŘEL, M. DRÁBEK, P. KINDL, V. KAVALÍR, T. *Základní návrh bloků bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů*. Západočeská univerzita v Plzni, 2020.
- [19] [37]KINDL, V. FRIVALDSKÝ, M. ZAVŘEL, M. PAVELEK, M. Generalized design approach on industrial wireless chargers. *Energies*, 2020, roč. 13, č. 11, s. 1-16. ISSN: 1996-1073
- [20] [39]KINDL, V. PECHÁNEK, R. ZAVŘEL, M. KAVALÍR, T. TURJANICA, P. Inductive coupling system for electric scooter wireless charging: electromagnetic design and thermal analysis. *Electrical Engineering. Archiv für Elektrotechnik*, 2020, roč. 102, č. 1, s. 3-12. ISSN: 0948-7921
- [21] [40]ZAVŘEL, M. DRÁBEK, P. KINDL, V. KAVALÍR, T. *Strategie řízení bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů*. Západočeská univerzita v Plzni, 2020.
- [22] [41]KINDL, V. TURJANICA, P. TYRPEKL, M. KAVALÍR, T. ZAVŘEL, M. *Návrh vazebných prvků WPT pro bateriové systémy ručního náradí*. Západočeská univerzita v Plzni, 2020.
- [23] [42]FRIVALDSKÝ, M. PAVELEK, M. KINDL, V. ZAVŘEL, M. Wireless power transfer system design methodology - analysis, design, verification. In *13th International Conference Elektro 2020 : conference proceedings*. Piscataway: IEEE, 2020. s. 1-6. ISBN: 978-1-72817-542-3
- [24] [44]ZAVŘEL, M. KINDL, V. KAVALÍR, T. DRÁBEK, P. Design and construction of high-quality capacitor for high frequency and power application. *Communications -Zilina-*, 2021, roč. 23, č. 1, s. C1-C6. ISSN: 1335-4205
- [25] [45]KINDL, V. FRIVALDSKY, M. ŠKORVAGA, J. ZAVŘEL, M. Theoretical and practical design approach of wireless power systems. In *Wireless Power Transfer – Recent Development, Applications and New Perspectives*. London : IntechOpen, 2021, s. 1-33. ISBN: 978-1-83968-802-7
- [26] [47]KINDL, V. TURJANICA, P. KAVALÍR, T. PUŠMAN, L. ZAVŘEL, M. ELIS, L. SKALA, B. *Návrh vazebných prvků pro bezdrátové napájení sensoriky rotačních strojů v kompenzační topologii LCC-S*. Západočeská univerzita v Plzni, 2021.
- [27] [48]KINDL, V. TURJANICA, P. KAVALÍR, T. PUŠMAN, L. ZAVŘEL, M. ELIS, L. SKALA, B. *Návrh vazebných prvků pro bezdrátové nabíjení ručního náradí v kompenzační topologii LCC-P*. Západočeská univerzita v Plzni, 2021.
- [28] [49]KINDL, V. TURJANICA, P. KAVALÍR, T. PUŠMAN, L. ELIS, L. ZAVŘEL, M. *Alternativní topologie usměrňovače pro systémy WPT s nízkou ekvivalentní zátěží*. Západočeská univerzita v Plzni, 2021.
- [29] [50]TYRPEKL, M. TURJANICA, P. KINDL, V. POLÁČEK, L. ZAVŘEL, M. *Analýza bezdrátové nabíječky od společnosti BOSCH*. Západočeská univerzita v Plzni, 2021

Ostatní publikace a výstupy studenta

- [1] [1]STREIT, L. ZAVŘEL, MAJORSZKÝ, J. Jednofázový střídač pro Teslův transformátor. In *Elektrotechnika a informatika 2012. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 123-124. ISBN: 978-80-261-0119-2
- [2] [2]STREIT, L. ZAVŘEL, *Jednofázový střídač s fázovým závěsem*. 2012.
- [3] [3]STREIT, L. ZAVŘEL, *Návrh čtyřfázových měničů pro modulárních vysokonapěťové topologie*. ZČU v Plzni : Neuveden, 2014.
- [4] [4]STREIT, L. ZAVŘEL, *Prototype of low-voltage low-power modular power electronics converter - popis výstupu*. Západočeská univerzita v Plzni, 2015.
- [5] [5]ZAVŘEL, *Napěťový střídač s SiC moduly*. In *Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 155-158. ISBN: 978-80-261-0516-9
- [6] [6]ZAVŘEL, STREIT, L. *Třífázový střídač 50 kW s SiC tranzistory*. 2016.
- [7] [7]ZAVŘEL, *Měřicí stanoviště a měření na systému WPT*. Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [8] [14]SOUKUP, R. VIK, R. ČENGERY, J. KAVALÍR, T. PUŠMAN, L. ZAVŘEL, „*Energy harvesting*“ systém pro smart textilie s indukčním nabíjením a superkapacitorem. 2017.
- [9] [16]ZAVŘEL, *Laboratorní model 1f polořízeného usměrňovače*. 2018.
- [10] [20]ZAVŘEL, M. KINDL, V. PECHÁNEK, R. Control strategy of cooler for diminishing dimensions and extending service lifetime of inverter. In *12th International Conference Elektro 2018 : conference proceedings*. Piscataway: IEEE, 2018. s. 1-6. ISBN: 978-1-5386-4759-2
- [11] [22]ZAVŘEL, DRÁBEK, P. KEHL, Z. *Přízpusobovací jednotka SKIIP pro MLC interface*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [12] [25]ZAVŘEL, *Laboratorní model 1f plně řízeného usměrňovače*. 2018.
- [13] [26]VEG, L. ZAVŘEL, *Oteplovací zkouška kostry vysokorychlostního stroje (měření I. a II.)*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [14] [27]JANOUSH, Š. ZAVŘEL, ŠESTÁK, M. *Testování vysokootáčkového stroje pro trakční pohon*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [15] [28]JANOUSH, Š. DRÁBEK, P. ZAVŘEL, *Návrh zkušebního standu pro vysokootáčkový stroj pro trakční pohon (řídící algoritmy)*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [16] [31]FRANC, J. PECHÁNEK, R. KINDL, V. ZAVŘEL, M. Ventilation system with skewed rotor cooling ducts of 40-MW synchronous machine: a case study. *Electrical Engineering. Archiv für Elektrotechnik*, 2019, roč. 101, č. 1, s. 203-211. ISSN: 0948-7921
- [17] [32]ZAVŘEL, DRÁBEK, P. KOŠAN, T. *Modul transcieveru CAN pro MLC interface*. Západočeská univerzita v Plzni, 2019.
- [18] [33]ZAVŘEL, *Laboratorní model 1f softstartéru*. 2019.
- [19] [38]ZAVŘEL, M. KINDL, V. PECHÁNEK, R. FRANC, J. Sensorless control strategy of cooler for reduction dimensions and operating characteristic improvement in double three-phase inverter. *Electrical Engineering. Archiv für Elektrotechnik*, 2020, roč. 102, č. 1, s. 117-127. ISSN: 0948-7921
- [20] [43]MOLNÁR, J. PEROUTKA, Z. JÁRA, M. VOTAVA, M. ZAVŘEL, M. *Generátor sítě 50 kW (Elektroline - zhotovení prototypu)*. Elektroline a.s., 2020.
- [21] [46]SKALA, B. KLOUDA, O. ONDŘEJ, Š. KUBAŇ, M. KINDL, V. ČERMÁK, R. VEG, L. TYRPEKL, M. ZAVŘEL, M. FRANK, Z. *Protokol o měření dekompenzační tlumivky TTC*

34075 – 0024 – Závislost magnetických ztrát na rostoucí frekvenci při zachování poměru U/f . ELZAT spol. s r.o., 2021.

Přílohy

- | | |
|---|-----|
| 1. SAE TIR J2954 (rev. 2020. 10) – výtah | 116 |
| 2. SAE TIR J2847/6 (rev. 2020. 9) – výtah | 140 |
| 3. Seznam publikací autora disertační práce | 145 |

1 SAE TIR J2954 (rev. 2020-10) – výtah

1.1 Výkonnostní třídy

Výkonové třídy WPCS jsou definovány na základě vstupního (odebíraného výkonu) do pěti kategorií uvedených v Tab_P. I. SAE J2954 dělení WPT1-3 chápe jako omezení místopisnými poměry distribuční soustavy, kdy pro Evropské poměry platí WPT3. Dodatečné třídy WPT4-5 jsou normou uváděné jako připravované, jinými slovy, nejsou komerčně běžně dostupné

Tab_P. I: WPCS výkonnostní třídy – ZDROJ [33]

	WPT1	WPT2	WPT3	WPT4	WPT5
P _{grid}	0 to 3,7 kVA	0 to 7,7 kVA	0 to 11,1 kVA	22 kVA	60 kVA

1.2 Přenosová vzdálenost

Přenosová vzdálenost WPCS respektive WPT je normou poněkud obskurně uchopena. Takzvané Z-třídy definují přenosovou vzdálenost mezi povrchem parkovacího stání a spodní hranou *on-board* vazebného elementu, kde je systém schopen dodávat požadovaný výkon. První dva sloupce Tab_P. II definují základní Z-třídy odvislé od různých výšek podvozku různých automobilů při jejich různých zatíženích. Druhé dva sloupce pak uvádí tzv. GA Z-třídy, které mají spojitost s univerzálností systému. Norma definuje tzv. operační třídy I-GA a II-GA. Operační třída I-GA označuje systém schopný dodávat požadovaný výkon v celém rozsahu GA Z-třídy, zatímco operační třída II-GA povoluje rozsah GA Z-třídy zmenšit pro specifické aplikace, domácí nabíjení, či daný typ vozu. Operační třídy je tedy možné shrnout takto: operační třída I-GA zahrnuje veřejné a průmyslové nabíjecí stanice ; operační třída II-GA zahrnuje domácí nabíjecí stanice a specifické aplikace.

Tab_P. II: Třídy přenosových vzdáleností – ZDROJ [33]

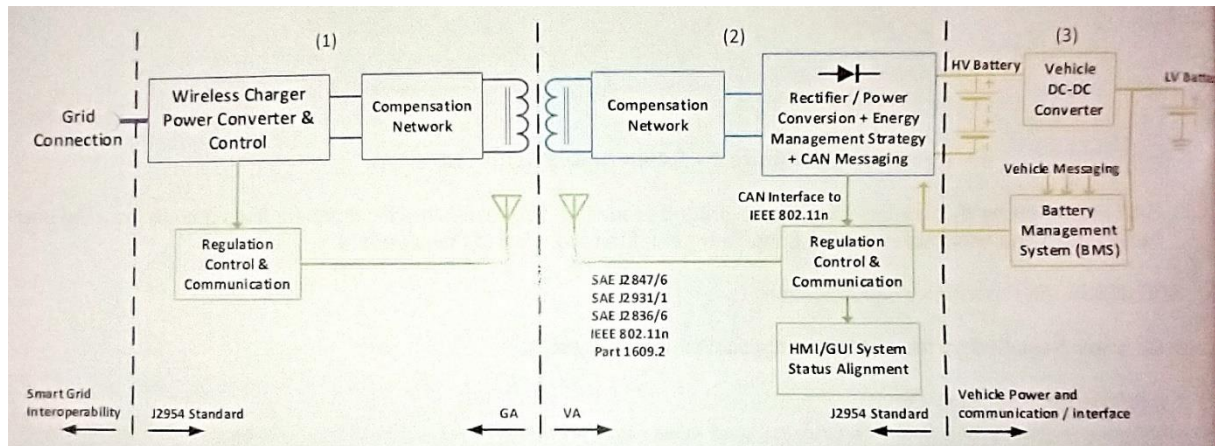
Z-třída	VA element přenosová vzdálenost (mm)	GA Z-třída	VA element přenosová vzdálenost (mm)	
Z1	100 to 150	GA Z1	100 to 150	
Z2	140 to 210	GA Z2	100 to 210	
Z3	170 to 250	GA Z3	100 to 250	
		GA operační třída	Třída I-GA*	Třída II-GA**
* Úplný GA Zx rozsah pro univerzální aplikaci				
** Zkrácený GA Zx rozsah pro specifickou aplikaci				

1.2.1 Uložení elementů

V souvislosti s Z-třídami je třeba objasnit povolené uložení *off-board* vazebného elementu jako: povrchové uložení (element ležící na povrchu stání) ; zapuštěné uložení (element v mělké kapse stání) a vestavěné uložení (element zalitý ve stání).

1.3 Funkce a provoz

Norma SAE J2954 definuje tři základní funkční bloky WPCS zajišťující: funkci přenosu výkonu ; funkci komunikační a funkci ochranou a bezpečností.



Obr_P. 1: Typické funkční bloky WPCS – ZDROJ [33]

1.3.1 Přenos výkonu

Technologie WPCS sestává ze tří hlavních částí: (1) měnič připojení k síti spolupracující s vysokofrekvenčním usměrňovačem a *off-board* vazebným elementem zajišťujícím výkonový přenos – GA část WPCS ; (2) *On-board* vazebný element s vysokofrekvenčním usměrňovačem, filtrací kompenzací a regulačními obvody spolu s nezbytnou výkonovou elektronikou pro nabíjení, komunikaci s GA apod ; (3) sekundární systém uložení energie, battery management a související moduly pro vozidlovou komunikaci (CAN, LIN) komunikující SOC apod. Vše zachycuje Obr. 10.

Měnič připojení k síti by měl být situovaný v prostoru parkovacího místa. Funkcí tohoto měniče je zprostředkovat z energie distribuční sítě energii o potřebných parametrech pro zajištění přenosu výkonu požadované velikosti skrze proud induktivní rezonanční vazby o nominální frekvenci 85 kHz. Tento měnič musí zahrnovat aktivní způsob řízení zkreslení odebíraného výkonu (power factor correction). Síťový měnič může být připojen k jedné či několika GA vazebným elementům umístěným v jednotném prostoru – skupina nabíjecích stanic, parkovací dům apod.

Na straně vozidla systém obsahuje vazebný element pracující na magnetické rezonanci GA vazebného elementu. Dále je přijatá energie upravena pomocí výkonových bloků na parametry potřebné pro nabíjené baterie.

Součástí jsou mechanismy umožňující odstavení systému v případě poruchy či chyby a komunikační rozhraní pro *GA-LA-vehicle* komunikaci.

Na základě popisu výkonového řetězce z normy SAE J2954 lze odvodit uvažovanou strategii řízení a to řízení U_{DC1} na nominální, konstantní hodnotu napětí spolupracující s výstupním DCDC měničem v režimu CC-CV nabíjení baterie. Pozitivní je, že norma je omezena jen na základní popis výkonového řetězce, což umožňuje aplikaci bloků zlepšujících účinnost apod. Toho je využito v topologii řízení a výkonového řetězce této disertační práce.

1.3.2 Komunikace

Komunikační systém přenáší informace mezi VA a GA částmi za účelem zajištění regulace přenášeného výkonu. Komunikace také zprostředkovává přenos povelových signálů o stavu nabíjení do a z vozidla.

Komunikace je nezbytná také z pohledu bezpečnosti výkonového přenosu a přenosu informací o provozních podmínkách GA a VA strany.

Komunikace je sestavena pomocí protokolu blíže diskutovaného v SAE J2847/6 a v Příloze 2.

1.3.3 Bezpečnostní funkce

Prioritním úkolem před a při přenosu energie je detekce jakýchkoliv objektů, které mohou být zahřívány na nebezpečnou teplotu vlivem pracovního EM pole přenosu. Pro bližší informace přejděte ke kapitole 1.15.

Během přenosu výkonu je důležité ochránit lidi před vznikajícím EM polem. Tato problematika je řešena dvojitým přístupem, podle způsobu ohrožení. Zatímco osoby v okolí vozidla a v něm jsou chráněny polohou a přísnými hygienickými limity EM okolního pole (kapitola 1.15), tak osoby vstupující do aktivní oblasti přenosu – například lehnutím si pod automobil – musejí být chráněné aktivně pomocí systému detekce živých objektů (FOD), který je blíže popsán v kapitole 1.15.

Vozidlové komponenty WPCS musí splňovat přísná normativní příkázání dle ISO 26262 vztahující se k nebezpečí úrazu elektrickým proudem vlivem disfunkce, poruchy apod. Návrh WPCS se musí vyvarovat nedetekovatelné nebezpečné poruše v jakékoliv své části a současně jím pasivně i aktivně předcházet.

1.4 Popis funkce WPCS

Při parkování na místě vybaveném SAE J2954 kompatibilním GA systémem se řidič řídí příslušnými pokyny. GA a VA části zahájí výměnu informací pomocí komunikačního kanálu a ověří svoji kompatibilitu. V případě své kompatibilitosti proběhne pozivování elementů. Po dosažení vzájemné pozice elementů v požadované toleranci může započít nabíjecí proces.

Při jakékoliv neshodě výše uvedeného nesmí dojít k povolení nabíjecího procesu.

Nabíjení probíhá na základě požadavků vozidlového energetického uložistiště. Komunikace mezi vozidlem, GA a VA částí systému může být přímá, nebo zprostředkovaná skrze VA část.

GA a VA část systému musejí zajistit svoji vlastní bezpečnost provozu ve vztahu k teplotě, proudům a napětím. V případě nebezpečí musí být systém odstaven.

1.4.1 Frekvence přenosu energie

SAE TIR J2954 stanovuje pro své kompatibilní zařízení frekvenci přenosu, tedy hlavní rezonanční kmitočty kompenzovaných vazebných elementů v rozsahu 79 až 90 kHz. Tato frekvence je přitom řízena GA částí.

Nominální frekvence přenosu přitom činí 85 kHz. Za účelem optimalizování přenosové účinnosti může být pracovní frekvence nastavena v rozsahu stanoveném výše. Určení této frekvence by mělo být provedeno během startu systému a ustáleno do dosažení 25% výkonu přenosu. Během nabíjení by stanovená frekvence měla zůstat konstantní, maximálně mírně se měnící v rozsahu ± 50 Hz.

Tab_P. III: Pracovní frekvence přenosu - ZDROJ [33]

	min	nom	max
f_0 [kHz]	79	85	90
Dynamická změna [Hz]	-50	f_0	+50

1.4.2 Ustavování elementů

Za účelem zajištění kompatibilitosti a zajištění přenosu požadovaného výkonu je nutné definovat pozicování elementů.

SAE J2954 připouští rozdílné rozměry GA a VA vazebného elementu, proto je vzájemná neutrální pozice definována jako pozice, kdy pracovní střed VA elementu zaujímá pozici přímo nad pracovním středem GA elementu. Vychýlení od této vzájemné pozice je nazýváno tolerance zarovnání.

V případě stejných GA a VA elementů je pracovní střed totožný s jejich geometrickými středy, avšak pro různé elementu může být geometrický střed od pracovního rozdílný, čímž vzniká neutrální offset tolerance zarovnání.

Více informací o neutrálním zarovnání je obsaženo v 1.11.

1.4.3 Fyzické rozměry a parametry

SAE J2954 definuje orientaci XY takto: směr osy X je totožný se směrem pohybu vozidla.

SAE J2954 definuje výšku GA elementu jako vzdálenost od povrchu parkovacího stání po horní hranu GA vazebného elementu. Maximální doporučená výška GA elementu je 70 mm. Tento rozměr může být upraven na základě lokálních požadavků – může být větší či menší podle lokálních doporučení.

Poloha GA elementu v prostoru parkovacího stání by měla být volena tak, aby při dokonalém pozicování vazebných elementů nedocházelo k přesahování obrysů nabíjeného vozidla přes obrysy parkovacího stání. To SAE J2954 ilustruje v kapitole 14.D na str.110.

Z pohledu VA elementu je normalizace spíše nulová. Parametry jako rozměry elementu instalační výška ve smyslu narušení výšky podvozku a pozice instalace elementu je ponechána jako OEM. Je pouze pamatováno na parkování popředu a pozadu, kdy je element umístěn

v přední či zadní části parkovacího stání, přičemž VA element je vždy umístěn v přední části vozidla.

1.5 Výkon, kompatibilitnost a bezpečnostní požadavky

1.5.1 Základní ustanovení

Požadavky, testovací konfigurace a testy popsané v SAE J2954 zajišťují, že systémy jsou kompatibilní, splňují výkonnostní požadavky a jsou v normálním provozu bezpečné.

Systém musí splňovat:

- Kompatibilní komunikaci na úrovni: metoda/protokol/zpráva
- Nezbytný nabíjecí výkon musí být zajištěn během celého nabíjení při dodržení pracovní teploty a bezpečnou reakcí na jakékoliv narušení pracovní zóny přenosu (FOD/LOD detekce)
- Shodu s požadavky EMC
- Shodu s požadavky EMF
- Dále pro případ operační třídy I-GA
 - Měla by být použita kruhová topologie cívky splňující předpis normované GA cívky v příloze B normy SAE J2954 na str. 105.
 - Měla by mít shodnou funkcionalitu jako GA v příloze B normy SAE J2954 na str. 105 a splňovat všechny požadavky na limity EMC z SAE J2954.
 - Měla by se řídit komunikačními a řídicími protokoly z kapitol 12 (str. 53) a 13 (str. 59) normy SAE J2954.
 - Měla by být schopna pracovat s testovací stanicí VAs z normy SAE J2954.
 - Měla by být certifikována národní testovací stanicí ve smyslu shody s normou SAE J2954 a UL2750.
 - Měla by mít certifikát o shodě s lokálními předpisy pro běžný prodej a nasazení.
- Dále pro případ třídy II-GA
 - Měla by splňovat výkonové, bezpečnostní a EMC požadavky ve spojení se všemi produkty určenými pro společný provoz při daných přenosových vzdálenostech. Testování je doporučené pomocí SAE J2954 testovací stanice VAs.
 - Měla by se řídit komunikačními a řídicími protokoly z kapitol 12 (str. 53) a 13 (str. 59) normy SAE J2954.
 - Měla by být certifikována národní testovací stanicí ve smyslu shody s normou UL2750.
 - Měla by mít certifikát o shodě s lokálními předpisy pro běžný prodej a nasazení.

1.6 Požadavky na přenos výkonu

1.6.1 Pozivování elementů – zarovnání

SAE J2954 systém v libovolné operační třídě by měl být schopný pracovat v celém rozsahu X, Y, Z povoleného vyosení za účelem pokrytí běžné nepřesnosti při parkování. Nejhorší případ v rovině X,Y nastává, když je vyosení v obou směrech na maximálních povolených hodnotách, které jsou uvedeny v Tab_P. IV. Nepřesnost v osy Z je dána operační třídou a jejími limity, které jsou také uvedeny v Tab_P. IV.

Součástí možných vyosení je také odchylka od rovnoběžnosti GA a VA elementu související s náklonem vozidla. Uvažované maximální hodnoty Tab_P. IV také zachycuje.

Tab_P. IV: Limity možných vyosení - ZDROJ [33]

Směr vyosení		GAs	VAs
ΔX [mm]		± 75	± 75
ΔY [mm]		± 100	± 100
Z rozsah	Třída I-GA	Všechny Z-třídy	Všechny Z-třídy
	Třída II-GA	Specifikace výrobce	
Rotace X [°]		2	2
Rotace Y [°]		2	2
Rotace Z [°]		3	3

1.6.2 Výstupní napětí a výkon

Některé dnešní elektro-mobily pracují s napětím HV baterie až 900 V, nicméně běžné normalizované napětí HV baterie dle SAE J2954 dosahuje 280 až 400 V.

Ve vztahu k výkonnostním třídám WPCS pro třídu I-GA platí nutnost říditelnosti výkonu v celém rozsahu dané výkonové třídy. Pro případ třídy II-GA toto neplatí, interval může být zkrácen.

Norma SAE J2954 v kapitole 8.2.6 na str. 24 upravuje spodní hranici všech výkonových tříd na 1 KVA.

1.6.3 Power factor

Účinník je důležitý parametr vypovídající o bezpečné a efektivní činnosti WPCS z pohledu napájecí sítě. Z nadřazených norem obecně vychází účinník 0,99 pro běžný provoz zařízení a 0,95 pro jakýkoliv provozní stav. Pochopitelně, uvedené hodnoty podléhají místní regulativě, která je dále upravuje.

1.6.4 Účinnost WPCS

Účinnost WPCS je definována jako účinnost celého systému WPCS od svorek připojení k distribuční síti po vysokonapěťové svorky baterie (viz. Obr_P. 1).

Pro každý testovaný WPCS systém nesmí celková účinnost při maximálním výkonu poklesnout pod 85 % při nulovém vyosení a přenosové vzdálenosti uprostřed zvolené Z-třídy. Pro ostatní případy nesmí celková účinnost poklesnout pod 80 %.

Tab_P. V: Minimální účinnost WPCS - ZDROJ [33]

GA-VA stejné výkonové třídy	WPT třídy	V optimální poloze	Při vyosení (v dané toleranci)
	WPT1	80 %	75 %
	WPT2	82 %	77 %
	WPT3	85 %	80 %
	WPT4	88 %*	83 %*
	WPT5	91 %*	86 %*
	* Nespecifikováno v SAE J2954		
Nestejně GA-VA	Stejná výkonová třída		80 %
	Odlišnost jedné výkonové třídy		77%
	Odlišnost dvou výkonových tříd		75 %

1.6.5 Kompatibilitnost napříč výkonnostními třídami

WPCS v třídě I-GA navržené pro výkonnostní třídu WPT3 by měla být schopna kooperovat s výkonnostními třídami WPT1 a WPT2 do jejich maximálního výkonu.

WPCS v třídě II-GA by měla být schopna kooperovat s WPCS od minimálního výkonu WPT1 do výkonu stanoveném výrobcem.

Zařízení ve třídě I-GA by mělo být schopné pracovat se zařízením libovolné Z-třídy v oblasti průniku Z-tříd obou zařízení.

Zařízení v třídě II-GA navržené pro specifickou přenosovou vzdálenost nemusí být kompatibilní s jiným zařízením a výkonový přenos tedy nemusí být inicializován.

1.6.6 Příspěvek pohyblivá reaktance

GA reaktance (impedance WPT vztažená ke svorkám zdroje: Z_c) je závislá na změnách přenosové vzdálenosti či na parametrech elektroniky. Systém by měl být schopný pracovat s těmito změnami, či je kompenzovat. Kompenzace může snížit namáhání GA a VA elektronických součástí a snížit ztráty WPCS.

Více detailů zachycuje příloha J normy SAE J2954 na str. 134.

1.6.7 Bezpečnostní požadavky

1.6.7.1 Bezpečný provoz / žádný provoz

Dojde-li při výměně informací mezi GA a VA částí WPCS k nepotvrzení kompatibility, pak nesmí být výkonový přenos spuštěn.

Není-li vozidlo zaparkováno v toleranci vyosení GA a VA elementu, musí být zaručeno splnění požadavků EMF, v opačném případě nesmí být výkonový přenos spuštěn.

Byl-li výkonový přenos spuštěn a dojde k pohybu vozidla mimo devinované vyosení GA a VA elementu, pak musí platit předchozí tvrzení.

1.6.7.2 Zahřívání cizích objektů

Provozní magnetické pole WPT může způsobit zahřívání kovových předmětů. V důsledku může dojít k nebezpečí vzplanutím hořlavých materiálů či poškození GA vazebného elementu.

Kapitola 16 normy SAE J2954 na str. 69specifikuje testy pro minimální požadavky v souvislosti s tímto nebezpečím.

1.6.7.3 Vliv elektromagnetického pole

Vysoké úrovně časově proměnného EM pole mohou být člověku nebezpečné. ICNIRP v souvislosti s tím vydala normativní průvodce v roce 1998, 2010 a 2020 specifikující doporučené maximální limity magnetického a elektrického pole o specifických frekvencích.

Normativní doporučení bylo také vydáno pro osoby používající elektronické medicínské implantáty, jako jsou například Cardiac Implantable Electronic Devices (CIED).

1.6.7.4 Ochrana živých objektů (LOD)

Pro zajištění ochrany živých objektů ve specifických oblastech elektromobilu a jeho okolí nesmí produkované EM pole v daném prostoru překročit ICNIRP limity. Měření je specifikováno v kapitole 10 normy SAE J2954 na str. 40.

Systém WPCS a především pak aktivní zóna WPT musejí být navrženy tak, aby splňovali ICNIRP limity v prostorách, kde se běžně vyskytují lidé. Pokud se však člověk dostane do prostoru aktivní zóny (pod auto) během výkonového přenosu, musí toto být detekováno a musí dojít k neprodlenému odstavení WPCS. Blížeji se tímto zabývá kapitola 16.2.2 normy SAE J2954 na str. 73.

1.7 Elektromagnetická kompatibilita

Problematika týkající se elektromagnetické kompatibility (EMC), elektromagnetické bezpečnosti (EMF) je věnována kapitola 10 normy SAE J2954 na str. 40.

Tato kapitola (kapitola 9 z normy SAE J2954 na str. 27) je informativní. Obsahuje procesní návrhy, ale normativní doporučení se mohou lišit podle místních normativních předpisů. Systémy by měly být testovány na EMC s využitím referenčních zařízení dle přílohy A (str. 75) a přílohy B (str. 105) normy SAE J2954.

Testování EMC je rozděleno do dvou částí – „component testing“ (testování WPCS) a „vehicle testing“ (testování s vozidlem).

1.7.1 EMC stanice WPCS (component testing)

Testování WPCS jakožto „component testing“ je prováděné před montáží a zapojením na vozidle a stojí na úrovni typové zkoušky. Tabulka 10 „Table 10 - component-level EMC - off-board components“ zachycuje všechny prováděné zkoušky, příslušné IEC normy a testovací podmínky. Tabulka 10 je uvedena v normě SA J2954 na str. 28.

Elektromagnetická imunita (EMI) je testována dle IEC 61000-4-3 od 80 do 2000 MHz s úrovní testů 30 V/m (záření) a dle IEC 61000-4-6 s úrovní 30Vrms (po vedení).

Uspořádání testu popisují Obr. 6,7,8 z normy SAE J2954 na str. 29,30,31.

1.7.1.1 Vyzařované rušení

WPCS by mělo být testováno na vyzařované emise do okolí. Měření je prováděné pomocí antény ve vzdálenosti 3 až 10 m (10 m doporučeno) dle ANSI V63.30. Doporučený limit je pro pásmo 79 až 90 kHz 82,8 dB μ A/m, přičemž při instalaci WPCS ve vzdálenosti minimálně 10 m od ostatních citlivých zařízení může být limit poníženo o 15 dB na 67,8 dB μ A/m.

Uspořádání měřicího stanoviště popisují Obr. 9A-C z normy SAE J2954 na str. 32-34.

1.7.1.2 Emise šířené po vedení

Norma SAE J2954 tento případ přímo neřeší, pouze se odvolává na místní předpisy vztahující se k přípojnému bodu distribuční sítě a na požadavky dané výrobcem vozidla.

1.7.1.3 Ostatní rušení

Elektrostatické výboje (ESD) dle IEC 61000-4-2.

Odolnost před harmonickým zkreslením dle IEC 60204-1

Rychlé přechodné děje

Dle IEC 61000-6-2

Poklesy napětí, výpadky a různé napájecí hladiny dle IEC 61000-4-11

Odolnost před magnetickým polem dle IEC 61000-4-8

1.7.1.4 EMC testy – on-board vozidlové elektronické systémy

Vozidlová elektronika by měla být testována podle požadavků výrobce vozidla jako originální vybavení výrobce (OEM).

Následující normalizační předpisy by měly být splněny pro zajištění bezproblémové spoluekistence *on-board* elektroniky WPT a vozidlové elektroniky: CISPR 25 – kapitola 6.2 a 6.4 ; ISO 11452-2 ; ISO 11452-4 ; ISO 7637-2 ; ISO 7637-3 ; ISO 10605.

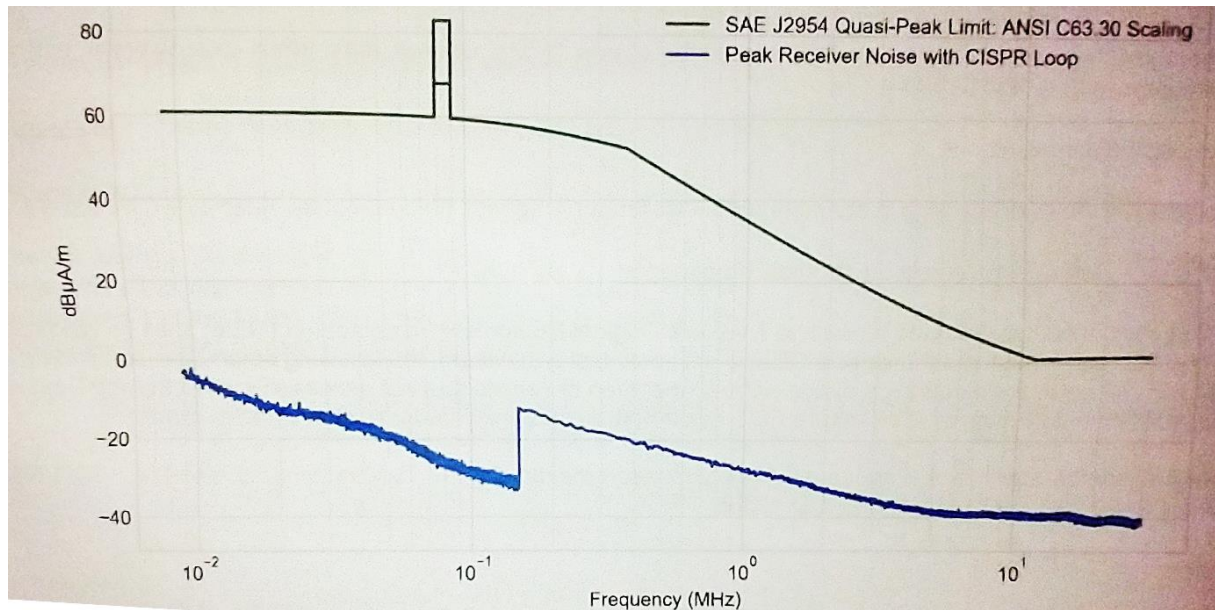
1.8 Testování s vozidlem (vehicle testing)

1.8.1.1 Emise vyzařováním při přenosu výkonu

Procedura testování s vozidlem je v normě SAE J2954 jako vyvíjená ve shodě s CISPR 11, CISPR 12 a ANSI C63.30.

Limity vyzařovaného rušení se shodují s testováním samotného WPCS bez vozidla a jsou graficky vyobrazeny na Obr_P. 2 a na Obr. 10 normy SAE J2954 na str. 36.

Emise WPCS jsou klasifikovány jako průmyslové, výzkumné a medicínské.



Obr_P. 2 Limity vyzařovaného rušení - ZDROJ [33]

Norma SAE J2954 dále upravuje měřící pracoviště na str. 37-39 pomocí obrázků a poznámek.

1.8.1.2 Emise rušení šířené po vedení

Emise šířené po vedení – viz kapitola 1.7.1.2 a 1.7.1.4

1.8.1.3 Odolnost WPCS instalovaného na vozidla

Odolnost před vyzařovaným rušením – v závislosti na výrobci vozidla, tedy OEM

Odolnost před rušením šířením po vedení – OEM vozidla

Elektrostatické výboje – OEM vozidla

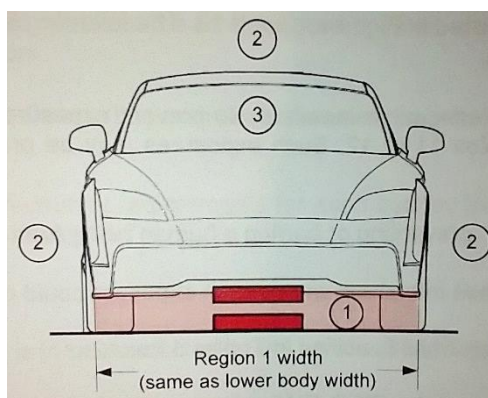
1.9 EMF ve vztahu k lidem a elektronickým implantátům

EMF WPCS ve vztahu k lidem a elektronickým implantátům se řídí normativním doporučením ICNIRP 2020. Za účelem korespondování SAE J2954 a ICNIRP 2020 jsou definovány základní prostory WPCS a nabíjeného vozidla – viz Obr_P. 3-4 z normy SAE J2954 (Figure 12-13) str. 41-42.

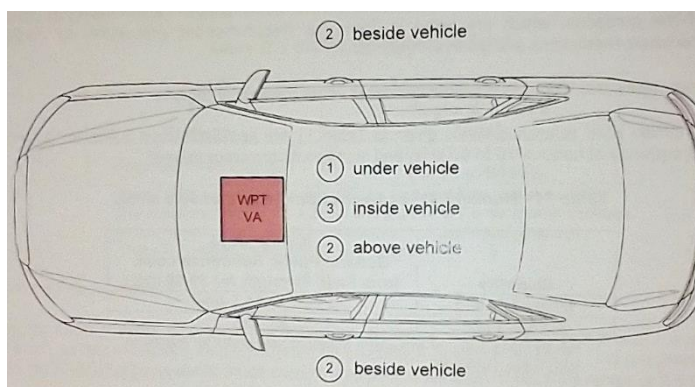
Detailně se měření, podmínkami, limity a měřicím stanovištěm ve vztahu k EMF a implantátům věnuje SAE J2954 v kapitole 10 na str. 40 až 53.

Prostory jsou popsány jako:

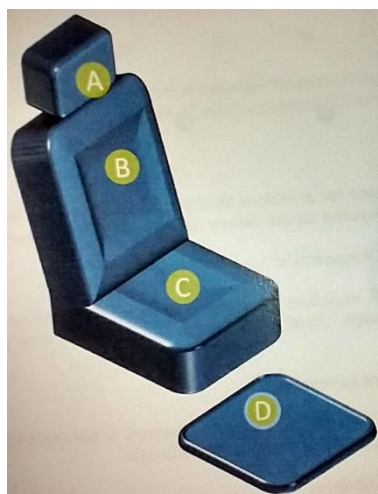
- Prostor 1 je prostor pod vozidlem zahrnující vazební elementy WPT a nesmí přesáhnout vnější obrys spodní stavby karoserie.
- Prostor 2 je okolní prostor vozidla. Nezakrývá-li vozidlo GA část WPT, pak je prostor 2 bezprostředně v okolí GA vazebného elementu a nad i pod ním.
- Prostor 3 je vnitřní prostor kabiny vozidla blžeji rozčleněn na Obr_P. 5.



Obr_P. 3 EMF prostory – přední pohled - ZDROJ [33]



Obr_P. 4 EMF prostory – horní pohled - ZDROJ [33]



Obr_P. 5 Členění prostoru 3 – pozice cestujícího

Region 1 musí být vybaven měřením/detekcí živých objektů, čímž je zajištěna ochrana před nebezpečnými úrovněmi EM pole. Zároveň je však možné toto zabezpečit třemi způsoby:

- Aktivní či pasivní ochrana spočívající například v optických závorách či mechanických zábranách
- Detekce živých objektů s odstavením přenosu výkonu
- Zajištěním pracovního EM pole s úrovněmi nižšími než povolení limity.

Všechna místa v regionu 2 a 3 nesmějí přesáhnout úroveň EM pole danou Tab_P. VI - zelená a zároveň pro místa s možností běžného výskytu těla (trupu) člověka úroveň EM pole dle Tab_P. VI - červená.

Tab_P. VI Dovolené limity EM pole v oblastech 2 a 3 – ZDROJ [33]

	Celá oblast 2 a 3	Torzo člověka oblast 2 a 3
Magnetické pole	27 μT / 21.5 $\text{Am}^{-1}_{\text{rms}}$ *1)	15.7 μT / 11.9 $\text{Am}^{-1}_{\text{rms}}$ *2)
Elektrické pole	83 $\text{Vm}^{-1}_{\text{rms}}$	83 $\text{Vm}^{-1}_{\text{rms}}$
Vnitřní elektrické pole	10,475 Vm^{-1} při 85 kHz	
*1) použít 3-osou 100 cm ² sondu magnetického pole, pásmo 79-90 kHz		
*2) 100 cm ² sonda, 2*2 cm měřicí síť, 4-násobné opakování, pásmo 79-90 kHz		

1.10 Dotykový proud

Dotykový proud je definován jako proud, který může nastat, pokud se osoba současně dotkne dvou vodivých částí vozidla, nabíjecího systému, okolí vozidla či země. Amplituda takového dotykového proudu pak závisí na impedanci vzniklé vybíjecí smyčky.

Limity dovoleného dotykového proudu jsou dány Tab_P. VII stanovené ve shodě s ICNIRP limity pro běžná veřejná prostranství v pásmu dotykového proudu 2,5 až 100 kHz. Výchozí normou je IEC 60990, která řeší dotykové napětí u automobilů.

Tab_P. VII Limity dotykového napětí a proudu

	IEC 60990	ICNIRP
Limit dotykového proudu	75 mV_{rms}	0.2*f(kHz) mA_{rms}

Norma IEC 60990 rovněž předepisuje hlavní měřicí body dotykových napětí, které SAE J 2954 přijímá. Tyto jsou uvedeny v tab_B. VIII.

Tab_P. VIII Základní měřicí body dotykového napětí a proudu

Měření	Testovací terminál A	Testovací terminál B
1	Karosérie vozu (např. západka dveří)	Zemní plocha přímo pod Terminálem A
2	Kovový kryt nabíjecího systému (ovládání/display)	Zemní plocha přímo pod Terminálem A
3	Karosérie vozu	Kovový kryt nabíjecího systému (ovládání/display)
4	Dodatečné kovové komponenty nabíjecího systému	Dodatečné kovové komponenty nabíjecího systému

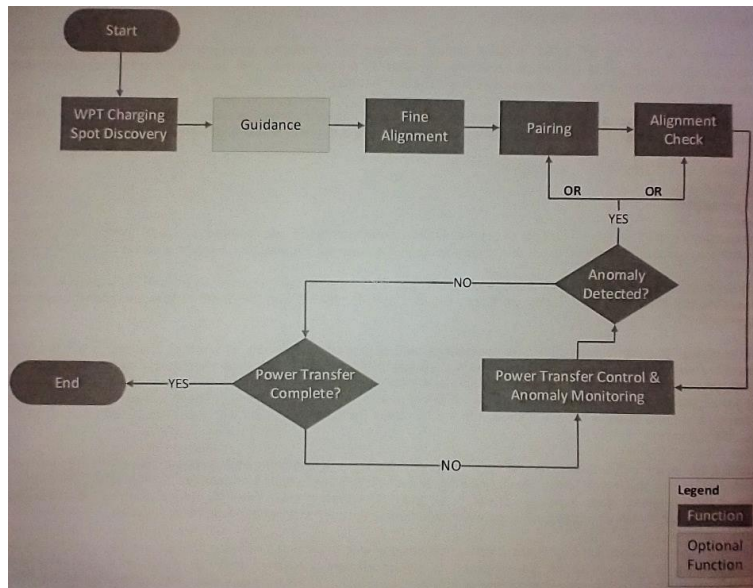
1.11 Komunikace a ustavování

Činnost WPCS vyžaduje komunikování velkého množství dat mezi GA a VA stranou tak, aby byla zajištěna funkčnost a bezpečnost výkonového přenosu a nabíjení baterie elektrovozidla. Komunikaci zprostředkovává fyzická vrstva bezdrátové komunikace, respektive její moduly.

SAE J2954 GA a VA části se pro zabezpečení komunikace opírají o SAE J2836/6 ; SAE J2847/6 a SAE J2931/6.

WPCS je pohodlná pro svou bezdrátovou podstatu. Jeden z výhod spočívá ve flexibilitě mezi nabíjecí stanicí a vozidlem. Zatímco jsou povoleny relativně velké tolerance vyosení GA a VA elementů, tak na straně vozidla je vyžadována alespoň základní přesnost parkování (přiblížení), čímž je zajišťována základní podmínka bezpečného a účinného nabíjení. To je úkol pro řidiče, asistenty řidiče a parkovací automatické systémy vozidla.

SAE J2954 tým nabádá výrobce vozidel a výrobce WPCS ke stanovení základní metody pro přiblížení VA elementu k GA elementu ve formě standardizování – přesné přiblížení, párování a kontrola přiblížení. Seznam potenciálně vhodných metod pro přesné přiblížení a párování je uveden v příloze M, N, O a P normy SAE J2954 na str. 166, 171, 176 a 192.



Obr_P. 6 Základní proces komunikace a chodu WPCS – ZDROJ [33]

1.11.1 Vyhledávání WPCS

Vyhledávání WPCS je rozšiřující nezávislý systém, který může být připojený k internetu. Jde o asistenční systém umožňující řidiči snadno nalézt WPCS nabíjecí stanici.

1.11.2 Průvodce

Jinými slovy podpůrné funkce využívající GA-VA komunikaci s cílem zprostředkovat manuální či plně automatické pozivování VA na GA. Toto není popisováno s SAE J2954, ale v SAE J2847/6.

Základní doporučení jsou:

- Průvodce by měl fungovat na vzdálenost nejméně 6 m.
- Průvodce by měl zajistit přiblížení vozidla do požadované přesnosti přiblížení na první pokus.

1.11.3 Přesné přiblížení

Jde o základní asistent nadřazený průvodci, který zprostředkovává přesné přiblížení VA na GA. Systém by měl pracovat na vzdálenost 1,5 m. Povolené tolerance přiblížení jsou uvedené v Tab_P. IV a v normě SAE J2954 v kapitole 8.2.2 na str. 22.

Zcela minimálními požadavky jsou:

- Pro třídu I-GA musí být použita stejná metoda finálního přiblížení.
- Proces finálního přiblížení musí započít kdekoli mezi 0,5 – 1,5 m od přesného přiblížení, nebo pokud dojde k inicializaci komunikace mezi GA a VA.
- Proces finálního přiblížení je zakončen kontrolou správného přiblížení v povolených tolerancích.

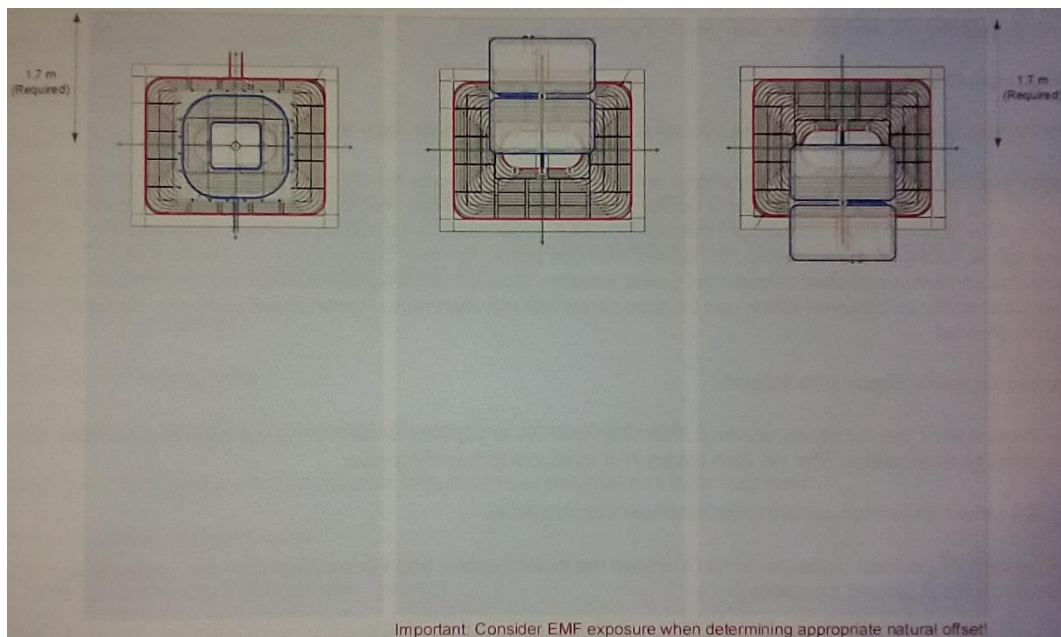
1.11.3.1 Hrubý proces finálního přiblížení:

- VA číst požádá o metodu pro finální přiblížení
- Řidič (nebo automatický parkovací systém vozidla) navede vozidlo na vyžadovanou polohu, zatímco VA monitoruje přesnost přiblížení.
- Pokud pozicování nevedlo k dosažení požadované přesnosti parkování, pak je řidič upozorněn na nutnost opakování procesu.

1.11.3.2 Přirozený offset mezi kruhovou a DD topologií vazebných cívek

Norma SAE J2954 počítá se dvěma topologiemi vazebných cívek a to kruhovou topologií a DD (double D, topologie dvojitého D) topologií. Z jejich geometrie a tvaru EM pole v jejich okolí vychází přirozený offset nulové polohy od jejich geometrických středů. Toto zachycuje Obr_P. 7 a kapitola 12.4.2 normy SAE J2954 na str. 56-57.

Jinými slovy, měla by být zajištěna kompatibilita GA v kruhové topologii s VA v DD topologii a naopak.



Obr_P. 7 Přirozený offset mezi kruhovou a DD topologií vazebných cívek.

1.11.3.3 Párování a kontrola přesného přiblížení

Proces párování ne jakýmsi bezpečnostním testem, zdali se dané VA nachází nad příslušným GA, s nímž komunikuje GA-VA komunikačním kanálem.

Kontrola přesného přiblížení je prováděna pro zaručení, že VA je připravena přijímat energii z GA. Spočívá v komunikaci kompatibility a kontroly přenosu výkonu.

Proces kontroly přenosu výkonu spočívá v:

- VA požádá o minimální výkon, který GA umožňuje.
- GA po rampě nastaví požadovaný výkon
- GA a VA provedou měření ověřující shodu vysílaného a přijímaného výkonu. Současně dojde k inicializaci přenosové vzdálenosti a dalších potřebných parametrů pro regulaci.
- Jsou-li inicializační měření v nastavených tolerancích, pak může VA započít s požadavky na přenos nabíjecího výkonu.
- Pokud v libovolném bodu nárůstu výkonu dojde k výchylce od normálních hodnot, poté je kontrola přiblížení vyhodnocena jako chyba.

Plné znění párování a kontroly přesného přiblížení je uvedeno v kapitole 12.5-6 normy SAE J2954 na str. 58-59.

1.12 Stabilita řízení a diagnostika (monitoring)

1.12.1 Základní stavy a cyklické kontroly

Základní stavy

- Před inicializací
- Zapínání a kontrola přenosu výkonu
- Vypínání
- Přenos výkonu a optimalizace
- Chybový stav

Cyklická kontrola přenosu výkonu

- Kontrola kompatibilitosti
- Inicializace nabíjecího cyklu
- Kontrola parametrů GA a jejich spárování s možnými požadavky VA
- Modifikace procesu přenosu výkonu podle vnějších a vnitřních podmínek
- Ukončení nabíjecího cyklu.

1.12.2 Regulace

Pro zajištění sparného nabíjení při dodržení nastavených limitů by WPCS měla být vybavena množstvím senzorů obvodových i neobvodových veličin za účelem detekování chybových událostí. SAE 2847/6 definují komunikační zprávy pro přenos vyhodnocení těchto událostí.

GA by měla být vybavena ochranou před přenosem výkonu v případech selhání řídicího programu. Za tímto účelem je třeba implementace „watchdog“ časovače či funkcionálně větveného SW a nadřazené kontroly.

Pro zajištění stability během inicializace párování by GA a VA měli pracovat s komunikačním protokolem dle SAE J5847/6.

VA komunikuje limity parametry nabíjení do GA, které se jim snaží vyhovět. Základní limity jsou:

- Implementace výkonové rampy a její možné strmosti – 0,25 až 2 kW^s⁻¹.
- GA musí aktualizovat regulační data spolu s daty zasílanými z VA minimálně s rychlostí 500 Hz. Tak aby byla zajištěna rychlá odezva na změny v nabíjecím obvodu a WPCS.
- Pokud je na straně VA provedena regulace výkonu či jiných parametru WPCS, pak je minimální rychlost regulační smyčky VA 50 Hz.
- Změny v regulaci výkonu by neměli způsobovat regulační překmity vyšší nežli 10 % požadované hodnoty. To platí především pro proudy.
- Regulační změny GA i VA by neměli způsobit překmit nabíjecího výkonu větší nežli 10 % z požadavku.
- Při vypínání systému platí předepsaná strmost změn výkonu 0,25 až 2 kW^s⁻¹ s výjimkou požadavku na 0 kW.

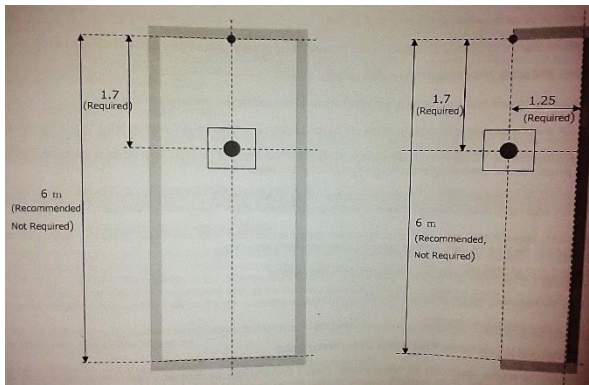
Při vzniku chybového stavu musí být splněny tyto požadavky:

- VA část systému musí být schopna ochránit sama sebe před zničením a nemusí se přitom řídit předchozími provozními podmínkami.
- GA musí být schopna rychle snížit a vypnout proud GA cívkou.
- Pro případ ztráty komunikace od VA musí být GA schopno zahájit snižování výkonu a vypnutí výkonového přenosu do 4 s od ztráty komunikace.
- Nouzové či krizové vypnutí musí GA provést sestupnou rampou výkonu a vypnutím přenosu výkonu do 1s od detekování chybového stavu.

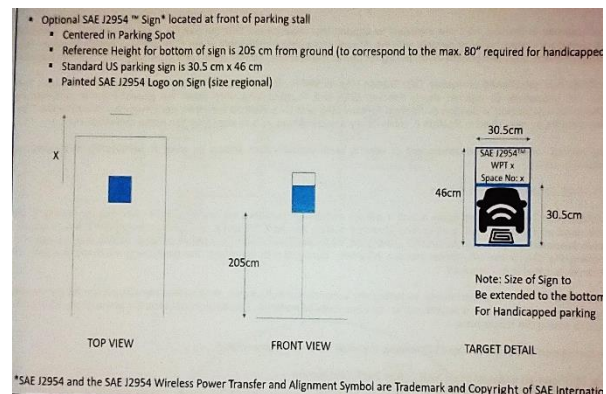
Během přenosu výkonu je možné upravovat pracovní kmitočet bezdrátového přenosu energie dle kap. 1.4.1 tohoto výtahu či kap. 6.4.2 normy SAE J2954 na str. 20

1.13 Parkovací stání

SAE J2954 definuje minimální požadavky na parkovací stání vybavené systémem WPCS na základě normalizovaných parkovacích stání (příloha D normy SAE J2954 na str. 110) a požadavků WPCS dle Obr_P. 8-9. Detailněji se tímto zabývá norma SAE J2954 v kapitole 14 na str. 61-63.



Obr_P. 8 Parkovací stání WPCS - výkres - ZDROJ [33]



Obr_P. 9 Parkovací stání WPCS - označení - ZDROJ [33]

1.14 Výkonové testy

Testy systému WPCS jsou začleněny do kapitol normy SAE J2954:

- EMC testy – kapitola 9 na str. 27 (kapitola 1.7 tohoto výtahu)
- EMF testy – kapitola 10 na str. 40 (kapitola 1.8 tohoto výtahu)
- Testy přenosu výkonu 15.1. na str. 64 (kapitola 1.14.x tohoto výtahu)
- Testy vztažené k bezpečnosti – kapitola 16 na str. 69 (kapitola 1.15 tohoto výtahu)

SAE J2954 definuje normalizovanou testovací stanici VA výkonových tříd WPT1-3 (Příloha A normy SAE J2954 na str. 75) a GA (Příloha B normy SAE J2954 na str. 105). Všechny GA a VA produkty musejí být testovány výkonnostní a bezpečnostní podmínky definované v kapitole 8 SAE J2954 a to i pro případ testování GA a VA jednoho výrobce.

Během testů komponent i systému na vozidle je nutné dodržet elektromagnetickou bezpečnost definovanou v kapitole 10 SAE J2954.

1.14.1 SAE J2954 WPCS testovací stanice

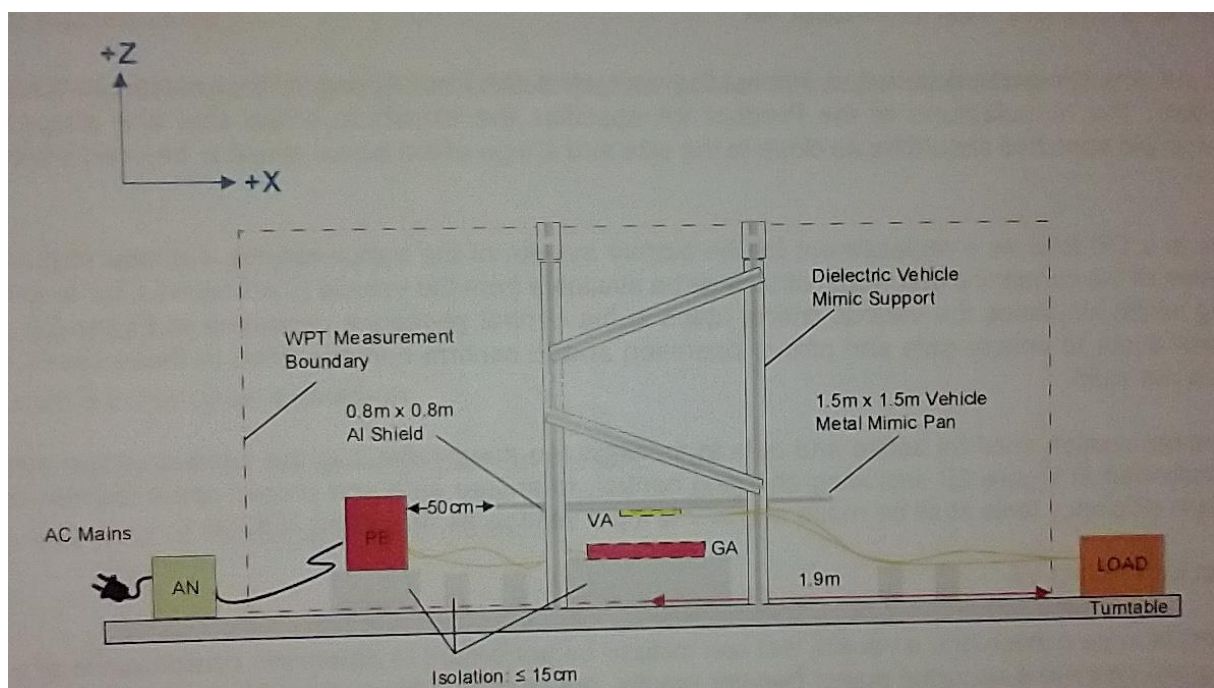
SAE J2954 testovací stanice umožňuje úpravu vzájemné polohy GA a VA vazebného elementu v osách X, Y, Z a rovnoběžnosti vrcholových úhlů os X, Y, Z. Požadovaná přesnost nastavování je 1 mm. Vzniklý ustavovací systém může být automatizován, ale to není podmínkou.

Materiál pro rám testovací stanice včetně všech jeho ustavovacích a spojovacích komponent nesmí být kovový, kovové materiály jsou přípustné v prostorech pod Al stíněním GA elementu a nad Al stíněním VA elementu.

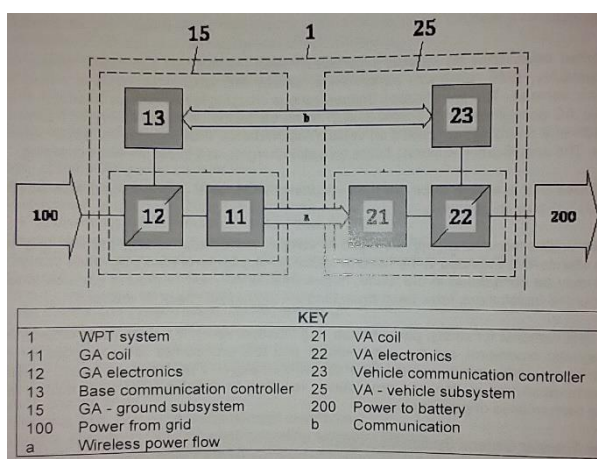
Pokud je rám testovací stanice využíván k EMC testům, měl by umožňovat také otáčení celého WPCS.

Podobu SAE J2954 WPCS testovací stanice zachycuje Obr_P.10 a Obr_P. 12:

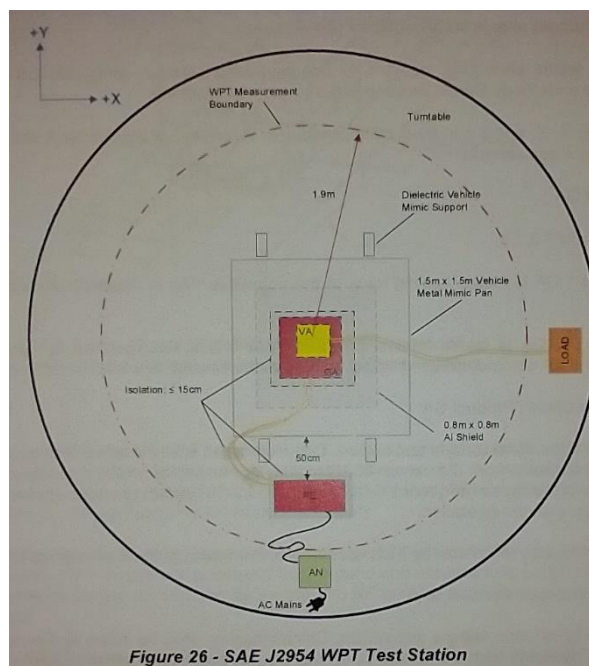
- GA elektronika a vazebný element jsou reprezentovány jako funkce přenosu výkonu v blocích 12 a 11 Obr_P. 11. GA komunikační moduly jsou reprezentovány coby komunikační funkce bloky 12 a 13.
- VA elektronika a vazebný element reprezentují bloky 21 a 22. VA komunikační moduly pak bloky 22 a 23.
- Při testech různých typů GA a VA je třeba zohlednit velikost a tvar Al stínění, které má zabránit proniknutí EM pole do okolních kovových materiálů. Jelikož stínění VA nemusí být optimalizované na dané GA a naopak, tak může dojít k zahřívání samotného stínění i okolních předmětů, které je při testech třeba monitorovat.



Obr_P. 10 SAE J2954 testovací stanice WPT (boční pohled) – ZDROJ [33]



Obr_P. 11 SAE J2954 WPT diagram (ISO 19363) - ZDROJ [33]



Obr_P. 12 SAE J2954 testovací stanice WPT, horní pohled - ZDROJ [33]

1.14.2 Testy WPCS jako komponentu

Není-li plátové Al stínění součástí návrhu vazebného elementu, ale je počítáno jako součást vozidla, pak toto musí být respektováno při testování adekvátní náhradou Al stínění.

Výstup VA bloku WPCS je připojen k DC zátěži coby náhradě baterie. Komunikace WPCS a vozidla by měla být aktivní a vozidlová strana nahrazena simulátorem. Testování by mělo projít všechny kritické body vyplývající z diagramu na Obr_P. 6.

GA strana WPCS by měla být v běžném provozu.

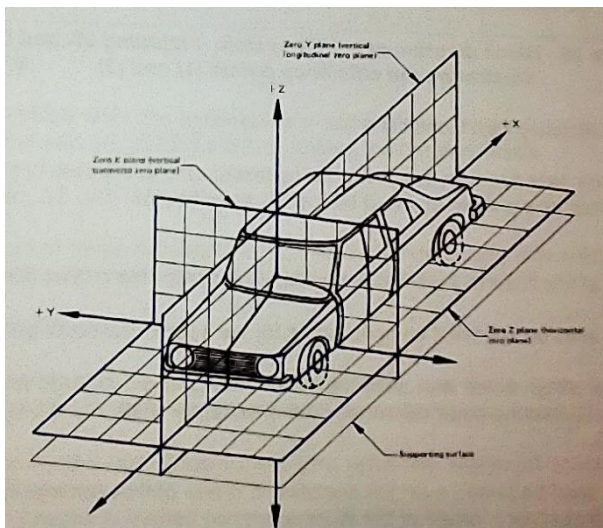
1.14.3 Vozidlové testy WPCS

Zatímco testy WPCS coby komponentu jsou velmi komfortní, tak vozidlové testy přináší časovou i systémovou náročnost spojenou s nabíjením skutečné baterie s pomalu se měnícím SOC. Testování specifických bodů při vozidlových WPCS testech je tedy obtížné, avšak zprostředkovává relevantnější výsledky.

Dodatečné stínění či jeho adekvátní náhrada z komponentních testů není povoleno. Současně s vozidlovými testy WPCS je třeba kontrolovat teplotu podvozku a podlahy automobilu.

Ustavování vazebných elementů může být zajištěno kolečkovými podložkami pod koly vozidla či GA částí WPCS.

1.14.4 Souřadnicový systém



- X - kladná ve směru couvání vozidla
- Y - kladná ve směru zatáčení doprava
- X,Y = 0,0 - je definována středem GA vazebné cívky
- Z - 0 je definována povrchem parkovacího stání, kladná směrem vzhůru

Obr_P. 13 SAE J2954 souřadnicový systém- ZDROJ [33]

1.14.5 Testovací prostředí

Prostředí pro testování WPCS jako komponentu i pro vozidlové testy by mělo mít teplotu okolí $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Proudění vzduchu v okolí WPCS by nemělo přesáhnout $0,5\text{ms}^{-1}$ a žádné dodatečné chlazení či ventilátory by neměly být používány, pokud nejsou definovány výrobcem či pro zajištění bezpečnosti.

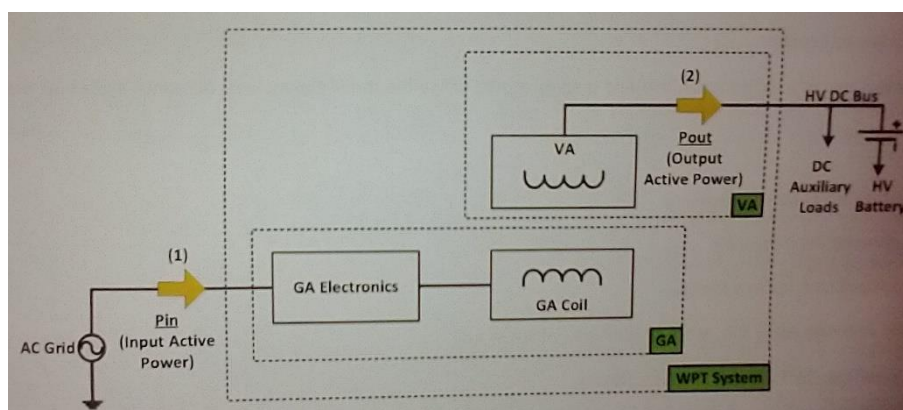
Měřicí a ostatní vybavení by mělo být zemněno za účelem zamezení úrazu RF proudem či popálení vlivem RF potenciálů.

Pokud je kovová část WPT izolována, pak musí být splněna podmínka dotykového proudu.

RF proudy by měli být ve shodě s UL 2594.

1.14.6 Testování účinnosti WPCS

Účinnost systému WPCS by měla být objasněna měřením výkonu odebíraného z AC sítě a výkonu dodávaného z VA části WPCS, který napájí baterii a pomocná zařízení. Účinnost WPCS je pak poměr výstupního výkonu ke vstupnímu vyjádřená v procentuální míře.



Obr_P. 14 Blokový diagram WPCS ilustrující měření účinnosti – ZDROJ [33]

Vstupní výkon by měl být měřen na vstupních svorkách GA části WPCS s použitím patřičného vybavení – popisuje IEC 61000-3-7.

Výstupní výkon by měl být měřen podle dané konfigurace a třídy:

- WPCS třídy I-GA by měli být testovány napříč všemi VA částmi z přílohy A normy SAE J2954 na str. 75 napříč plného rozsahu přenosové vzdálenosti a při třech referenčních napětích baterie (280, 350 a 420 V) při ekvivalentním sériovém odporu 0,15 Ω .
- WPCS třídy II-GA by měl být testován napříč plným rozsahem přenosových vzdáleností při třech referenčních napětích baterie (280, 350 a 420 V) při ekvivalentním sériovém odporu 0,15 Ω .

Při testování WPCS s výrobcem definovaným výstupním napětím a rozsahem přenosových vzdáleností je měření účinnosti prováděno takto:

- Měření se provádí při minimální, maximální a prostřední přenosové vzdálenosti definované výrobcem
- Měření se provádí ve všech vyoseních ve směrech X,Y, definovaných výrobcem, s inkrementy menšími nežli 50 % maximálního vyosení v daném směru.
- Mělo by být testováno pro různé úhly nerovnoběžnosti GA a VA ve všech vrcholových úhlech X, Y, Z.

Měření účinnosti se provádí na zahřátém systému minimálně 5 minut po dosažení maximálního výkonu a po ustálení teploty. Teplota WPCS může být měřena na povrchu GA vazebného elementu kontaktní metodou či pomocí kalibrovaného IR měřidla na daný povrch.

SAE J2954 definuje podobu měřící tabulky na str. 69.

1.15 Ověření bezpečnosti

Měření výkonu a testování účinnosti ověřuje, jak dobře zařízení pracuje. Bezpečnostní testy ověřují, je-li zařízení schopno bezpečně pracovat a to jak ve vztahu k okolním zařízením, tak ve vztahu k uživatelům apod.

1.15.1 Ověření bezpečnosti před zahájením přenosu

Předpokladem je inicializovaná a ověřená komunikace dle SAE J2847/6. Komunikací předané informace mezi GA a VA a naopak ověří kompatibilitu obou částí WPCS. Pokud jsou části nekompatibilní, další proces nesmí být povolen.

Jsou-li části kompatibilní, pak může být provedena kontrola finálního přiblížení, kontrola vyosení a kontrola přenosu výkonu.

1.15.2 Ověření bezpečnosti během přenosu

V případě jakéhokoliv přerušení procesu nabíjení nesmí systém automaticky obnovit svoji činnost, pokud není manuálně restartován, nebo pokud nadřazený systém neověří, že je bezpečné systém WPCS restartovat.

1.15.3 Ověření bezpečnosti ve vztahu k cizím kovovým předmětům

Potenciální nebezpečí při vniknutí kovového předmětu do aktivní zóny přenosu vychází z jeho zahřátí na nebezpečnou teplotu pro sebe či pro své okolí (dotyk, tavení, hoření, výbuch).

Jedna z možností je monitorovat charakteristiku EM pole GA elementu, druhá je využití nezávislého systému FOD na přenosu.

Testovací objekty jsou definovány normou SAE J2954 na papírový svazek se sponou, fólie s papírovým podkladem, mince, hřebík, alabal, ocelová tyč. Sledované parametry a bližší specifikace testovacích předmětů je uvedena v Tab. 23 normy SAE J2954 na str. 71.

1.15.4 Testování WPCS bez FOD

Výrobce může definovat a označit body a orientace maximální magnetické indukce na povrchu GA vazebného elementu. Je-li těchto bodů více, pak musejí být označeny všechny. GA a VA jsou usazeny do polohy s maximální magnetickou indukcí.

První test spočívá v umístění testovacího předmětu na bod největší magnetické indukce a WPCS se spustí na plný výkon po dobu 10-ti minut. Test se opakuje pro různá natočení testovacího předmětu. Pokud nedojde ke vznícení či tavení, test je úspěšný.

Druhý test spočívá ve vložení testovacího předmětu do aktivní zóny WPT přenášející plný výkon. Předmět se vkládá do míst maximální magnetické indukce a měří se jeho povrchová teplota. Je-li tato teplota nižší než 80 °C, pak je test úspěšný. Překročí-li 80°C, pak se vyjme z EM pole a měří se jeho teplota po 30 s a 60 s. Poklesne-li teplota povrchu po 60 s pod 80 °C, pak je test také úspěšný.

1.15.5 Testování WPCS s FOD

Oproti předchozímu musí výrobce označit také body s největší pravděpodobností nedetekovatelnosti cizího předmětu systémem FOD.

1.15.5.1 Vložení objektu před spuštěním přenosu

První test spočívá ve vložení předmětu na bod maximální magnetické indukce a spuštění přenosu. Pokud nedojde ke spuštění přenosu a pokud je předmět detekován, pak je test úspěšný.

Druhý test předpokládá umístění předmětu na bod s nejméně pravděpodobnou detekovatelností. Systém se zapne a zvyšuje se jeho výkon:

- Pokud nedojde ke spuštění přenosu a předmět je detekován, pak je test úspěšný.
- Pokud se přenos spustí, ale s narůstajícím výkonem dojde k detekování cizího předmětu, pak je test také úspěšný.
- Pokud ani po dosažení maximálního výkonu nedojde do 5–ti minut k detekování cizího předmětu, pak rozhoduje o úspěšnosti testu dosažená povrchová teplota, podobně jako v 1.15.4.

1.15.5.2 Vložení objektu po spuštění přenosu

Testování FOD v tomto režimu je efektivnější, pokud je pro první testy zapnuta pouze signalizace detekování cizího předmětu. Testy se zapnutým automatickým vypnutím výkonového přenosu je prováděn až po ověření funkční detekce.

Vyhodnocovací kritérium pro FOD vychází opět z teploty 80 °C a 5-ti minutového pravidla (jejího dosažení, rychlosti chladnutí) a ze stavu detekování cizího předmětu systémem FOD. Tedy jako v předchozích případech. Testování je prováděno pro čtyři případy:

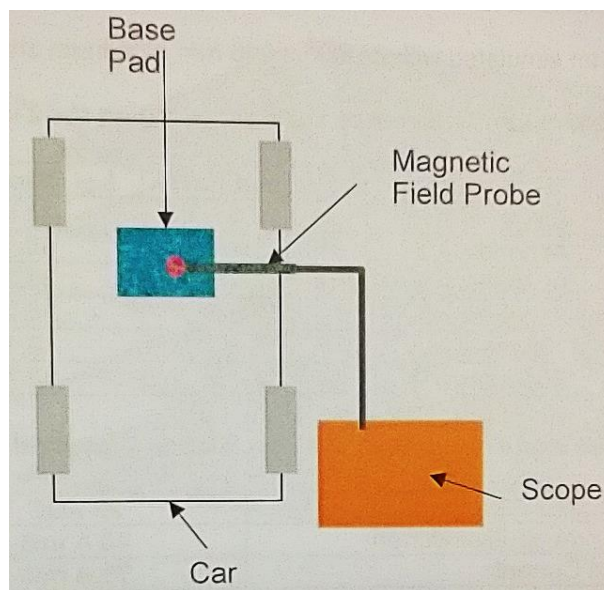
1. Po dosažení a ustálení plného výkonu dojde ke vložení cizího předmětu na bod maximální magnetické indukce
2. Po dosažení a ustálení maximálního výkonu je cizí předmět náhodně vložen do aktivní zóny přenosu
3. Po dosažení a ustálení maximálního výkonu je cizí předmět vložen na bod s nejméně pravděpodobnou detekovatelností
Po dosažení a ustálení maximálního výkonu je cizí předmět vložen na druhý bod s nejméně pravděpodobnou detekovatelností.

1.15.6 Testování systému detekce živých předmětů (LOD)

V prvním kroku testování LOD je třeba vyznačit hranici překročení magnetické indukce $27 \mu\text{T}$ pro nejnepříznivější přenosovou vzdálenost a vyosení.

Živý objekt je předpokládán jako pohybující se rychlostí 1000mms^{-1} a proto je hranice, kde musí dojít k detekci FOD, před hranicí limitní magnetické indukce. Stanovení této bezpečnostní hranice je provedeno na základě normované rychlosti FOD a změřené rychlosti poklesu magnetické indukce po vybavení FOD. Živý objekt tedy nesmí být za žádných okolností a ani na okamžik vystaven nadlimitní magnetické indukci.

Měření dle Obr_P.15 je měřen čas od inicializace FOD (ručně spuštěné) po čas poklesu magnetické indukce pod $27\mu\text{T}$.



Obr_P. 15: Měření rychlosti poklesu magnetické indukce - ZDROJ [33]

Po stanovení bezpečnostní linie je proveden test FOD ve smyčce pomocí testovacího předmětu. Dojde-li k vybavení FOD před vyznačenou bezpečnostní linií, pak je test úspěšný.

Pro testování se z důvodu bezpečnosti nepožívá živá lidská ruka, ale její adekvátní náhrada v podobě 5cm koule naplněné vodou.

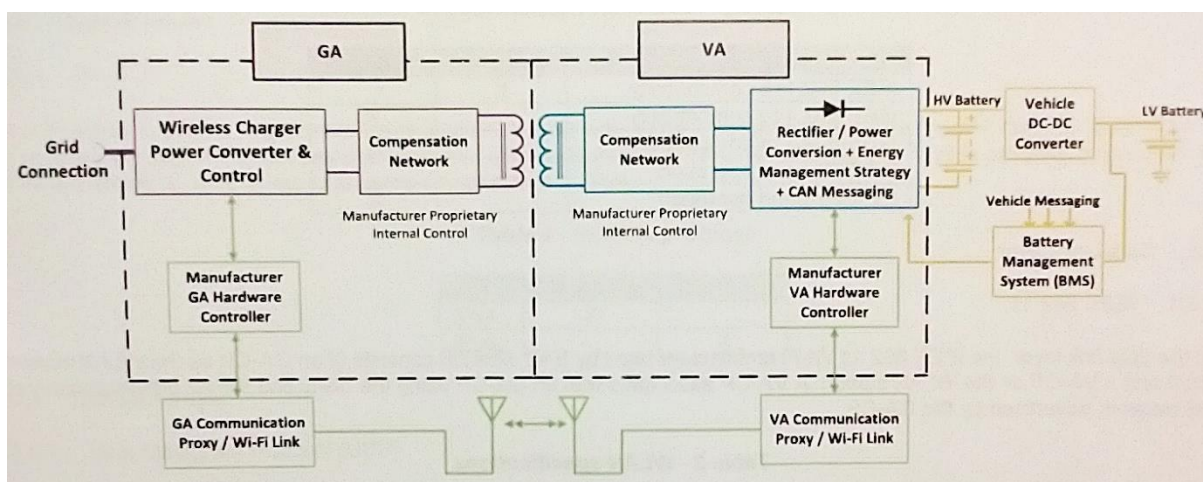
1.16 Životnost

Odolnost a životnost systému WPCS spadá pod tyto normy: UL 2750, SAE J1211.

2 SAE TIR J2847/6 (rev. 2020-09) – Architektura komunikace

Předmětem tohoto výtahu normy SAE J2841/6 je omezen pouze na definování architektury komunikačního systému jakožto potřebného údaj pro návrh HW WPCS.

Jsou-li GA a VA části WPCS vyrobeny týměž výrobce, pak je doporučena integrace WI-FI WLAN komunikačního rozhraní do hlavní regulační smyčky WPCS, jak zachycuje Obr_P. 16. Komunikace důležitých regulačních a stavových dat pak probíhá skrze standartní WI-FI komunikační interface.



Obr_P. 16 Blokové schéma WPCS – WI-FI komunikace – ZDROJ [34]

2.1 Aplikace Proxy

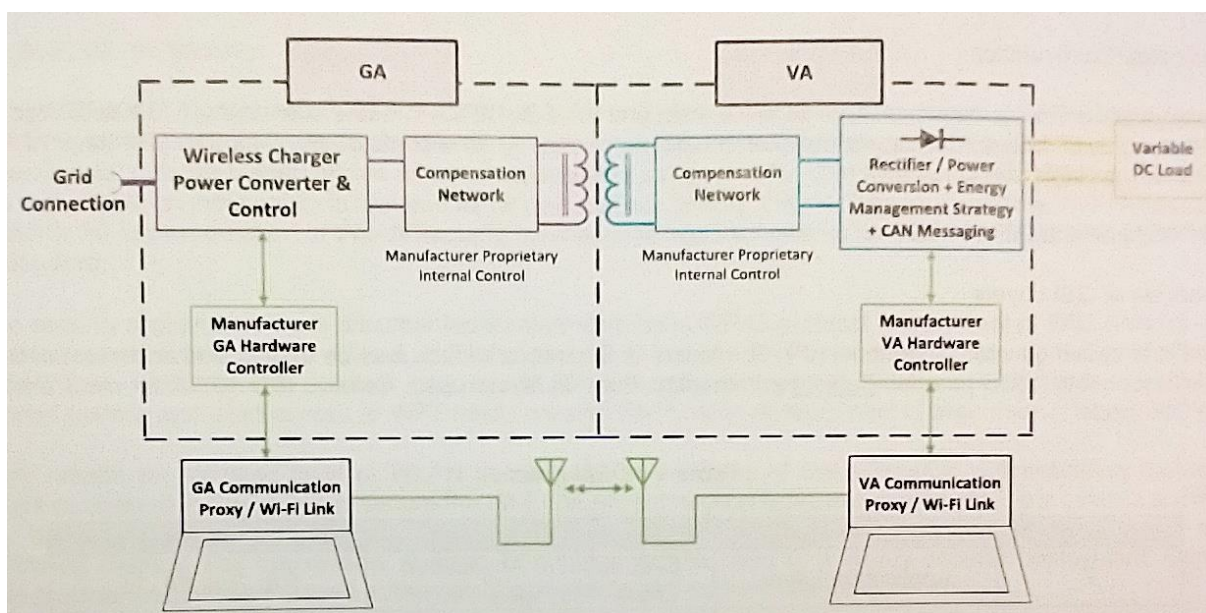
SAE J2847/6 definuje protokol pro komunikaci dat nezbytných pro regulaci přenosu výkonu mezi GA a VA částí WPCS. Použitý protokol (sestavení zpráv) pro tuto komunikaci je na bázi JSON. Rozhraní a zprávy jsou označovány jako VA-CP pro vozidlovou část a GA-CP pro nevozidlovou část WPCS.

Minimální implementační požadavky jsou:

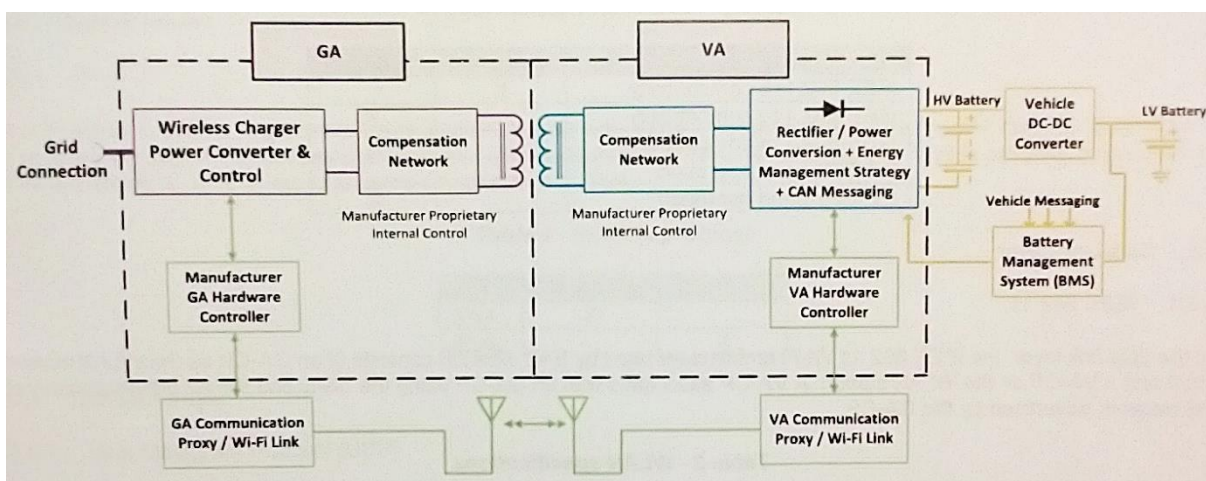
- Komunikační rozhraní a kontroléry kompatibilní mezi GA a VA
- Překládání WPCS datových zpráv do SAE J2847/6 JSON formátu a naopak
- Interface s IEEE 802.11n WIFI čip setem nebo kompatibilní
- VA – klient ; GA – připojovací bod
- Pro testování WPCS v laboratorních podmínkách je povoleno použití PC v komunikačním řetězci (programování, ladění, testy, ...), jak ilustruje Obr_P. 17.

Aplikace Proxy pro řízení WPCS musí být oddělená od ostatních komunikací, jako je například autorizace, placení, chytré nabíjení, „vehicle to grid“ servis apod. Tyto nadřazené komunikace jsou označovány jako „high level communications“ a vyžadují mnohem složitější struktury a vybavení (RCUs, datové uložště, kryptování, ...)

Základní funkce VA-CP a GA-CP je překládat a přenášet omezené množství informací (čísla) potřebných pro inicializaci, řízení, vypínání a nabíjení ve standardizovaných JSON zprávách. Obr_P. 18 ilustruje SAE J2847/4 komunikační PROXY jako samostatný systém pro vozidlové testy WPCS, nicméně vzhledem k omezené paměti a procesovým nárokům je doporučena integrace VA-CP a GA-CP v existujícím WI-FI systému výrobce WPCS, OEM WI-FI modulu či jiném dostupném bezdrátovém systému.



Obr_P. 17 GA a VA část WPCS s komunikací SAE J2847/6 – testovací stanoviště pro komponentní testy – ZDROJ [34]



Obr_P. 18 GA a VA část WPCS s komunikací SAE J2847/6 – testovací stanoviště pro vozidlové testy – ZDROJ [34]

2.2 Technické požadavky

SAE J2847/6 je založena internetovém protokolu (IP). Vrstvy síťové struktury jsou ztotožnitelné se systémem „Open System Interconnection“ (OSI) dle ISO 10731. Základ pak zachycuje Tab_P. IX

Tab_P. IX OSI vrstvy

OSI vrstva	Název vrstvy	Síťový protokol	Sekce normy SAE J2847/6
7	Aplikační vrstva	SAE J2847/6, DHCP	5.8, 7, 8, 10, 11
6	Prezentační vrstva	JSON	5.7
5	Relační vrstva	http	5.6
4	Přenosová vrstva	TCP, UDP	5.5
3	Síťová vrstva	IPv4	5.4
2	Datové spojení	IEEE 802.11	5.3
1	Fyzická vrstva	IEEE 802.11	5.2

2.2.1 Fyzická vrstva

IEEE 802.11, známá jako WI-FI je komunikační standard specifikující fyzickou a spojovací vrstvu pro SAE J2847/6. Verze aplikovaná pro SAE J2847/6 (rev. 2020/9) je IEEE Std 802.11n-2009. Doporučené a základní vlastnosti pro SAE J2847/6 uvádí Tab_P. X.

Tab_P. X IEEE 802.11 specifikace pro SAE J2847/6

	Základní	Doporučené
IEEE 802.11b kompatibilita	X	
IEEE 802.11g kompatibilita		X
IEEE 802.11n kompatibilita		X
2,4 GHz pásmo	X	
5,0 GHz pásmo		X

2.2.2 Spojovací vrstva

Tab_P. XI WLAN specifikace pro SAE J2847/6

WLAN připojovací bod	GA-CA
WLAN stanice	VA-CP
zabezpečení	WPA2

2.2.2.1 Wi-Fi WLAN zabezpečení

SAE J2847/6 vyžaduje použití WPA2 pro zabezpečení WI-FI WLAN ve smyslu IEEE 802.11i-2004.

Jelikož bezpečnostní vývojáři mají zdokumentované bezpečnostní chyby WPA2 protokolu, tak je pro SAE J2847/6 doporučena dodatečná ochrana zpráv, která v normě není řešena. Souhrnně řečeno, SAE J2847/6 je doporučena pro známé WLAN prostředí v domácím sektoru, testovacích centrech či laboratořích.

Jako rozšiřující zabezpečení pro požití v neznámém prostředí je doporučen „extensible authentication protocol“ (EAP) definovaný v RFC 5247. EAP tvoří druhou vrstvu autentizačního protokolu, která může být aplikována na libovolnou drátovou i bezdrátovou síť.

EAP přenosová vrstva (EAP-TLS) je podporována všemi současnými výrobci WLAN HW a SW. EAP-TLS zprostředkovává vzájemnou autentizaci v síti za pomoci klientských a serverových certifikátů.

Varianta „tunneled transport layer security“ - EAP-TTLS vyžaduje primárně pouze certifikát serverové strany, avšak pro potřebu oboustranné autentifikace je vyžadován také certifikát klientský.

Certifikáty tedy musejí být součástí EAP-TLS a EAP-TTLS zabezpečení a to jak na straně serverové, tak na straně klientské.

2.2.3 Síťová vrstva

Internetový protokol (IP) je nezbytný pro spojení datových paketů se sítí. Základním kritériem pro SAE J2847/6 je IPv4. Podpora IPv6 je doporučena. Hlavním důvodem tohoto dělení je zpětná nekompatibilita IPv6 k IPv4.

Tab_P. XII Internetový protokol

	Základní	Doporučený
IPv4	X	
IPv6		X

2.2.4 Přenosová vrstva

Skládá se z UDP – „user datagram protocol“ a TCP – „Transmission Control protocol“.

UDP je protokol s kratší odezvou nežli TCP a je používán pouze při přiřazování IP adresy. Detailně se tímto zabývá RFC 768 a SAE J2847/6 v kapitole 5.8.1 na str. 15.

TCP je protokol pro přenos dat s vestavěnými ochranami, jako je například kontrola datového toku či přetížení. Základní dělení rolí mezi GA a VA zachycuje Tab_P. XIII.

Tab_P. XIII Specifikace TCP

TCP server	GA-CP
TCP klient	VA-CP

2.2.5 Relační vrstva

Součástí relační vrstvy je „Hypertext Transfer Protocol“ (HTTP) s parametry dle Tab. XIV.

Tab_P. XIV specifikace HTTP

HTTP verze	1.1
HTTP server	GA-CP
HTTP klient	VA-CP
Požadavek na zprávu	HTTP PUT
Odpověď na zprávu	200"OK"
Číslo portu	80
Host	www.weccp.com
URL požadavku	/messages

„Domain name system“ (DNS) není u WPCS použita, neboť jde o komunikaci mezi dvěma IP adresami v režimu jeden-na-jednoho mezi VA-CP a GA-CP. Spárování tedy probíhá pouze na základě IP adres během DHCP inicializace – viz kapitola 5.8.1 normy SAE J2847/6 na str. 15.

Ukázky HTTP zpráv jsou uvedeny na str. 14 normy SAE J2847/6.

2.2.6 Prezentační vrstva

Člověkem čitelná formát použitá pro prezentační vrstvu je „Java Script object notation“ (JSON) definující zprávy v páru název-hodnota. Blíže je aplikace podle SAE J2847/6 uvedena v kapitole 12 normy na str. 63 v podobě matice zpráv.

2.2.7 Aplikační vrstva

Je využíván „dynamic host configuration protocol“ (DHCP).

SAE J2847/6 aplikační vrstva pracuje se správami v párech požadavek-odpověď na synchronním HTTP protokolu. Rozvrh zpráv tvoří komunikaci synchronní z principu – VA-CP vždy vysílá požadavek a čeká na adekvátní odpověď z GA-CP před odesláním datové zprávy.

3 Seznam publikační činnosti autora disertační práce

3.1 2012

[1]STREIT, L. ZAVŘEL, MAJORSZKÝ, J. Jednofázový střídač pro Teslův transformátor. In *Elektrotechnika a informatika 2012. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 123-124. ISBN: 978-80-261-0119-2

[2]STREIT, L. ZAVŘEL, *Jednofázový střídač s fázovým závěsem*. 2012.

3.2 2014

[3]STREIT, L. ZAVŘEL, *Návrh čtyřfázových měničů pro modulárních vysokonapěťové topologie*. ZČU v Plzni : Neuveden, 2014.

3.3 2015

[4]STREIT, L. ZAVŘEL, *Prototype of low-voltage low-power modular power electronics converter - popis výstupu*. Západočeská univerzita v Plzni, 2015.

3.4 2016

[5]ZAVŘEL, Napěťový střídač s SiC moduly. In *Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 155-158. ISBN: 978-80-261-0516-9

[6]ZAVŘEL, STREIT, L. *Třífázový střídač 50 kW s SiC tranzistory*. 2016.

[7]ZAVŘEL, *Měřicí stanoviště a měření na systému WPT*. Západočeská univerzita v Plzni, 2016.

[8]KINDL, V. KAVALÍR, T. ZAVŘEL, *Stínění EM pole výkonového WPT systému „RICE ver.1“*. Západočeská univerzita v Plzni, 2016.

[9]ZAVŘEL, *Základní měření na systému WPT*. Západočeská univerzita v Plzni, 2016.

3.5 2017

[10]ZAVŘEL, KINDL, V. Porovnání různých konfigurací systému bezdrátového přenosu výkonu. In *Elektrické pohony : XXXV. konference (ELPO 2017)*. Plzeň: Česká elektrotechnická společnost ČSVTS, 2017. s. 1-6. ISBN: 978-80-02-02724-9

[11]ZAVŘEL, KINDL, V. DRÁBEK, P. *Řízení systému WPT na optimální účinnost a výkon s regulací výkonu*. Západočeská univerzita v Plzni, 2017.

[12]ZAVŘEL, Orientační měření blízkého elektrického pole nižších kmitočtů. In *Elektrotechnika a informatika 2017. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 83-86. ISBN: 978-80-261-0712-5

[13]ZAVŘEL, DRÁBEK, P. KINDL, V. *Simulace WPT v okamžitých hodnotách*. Západočeská univerzita v Plzni, 2017.

[14]SOUKUP, R. VIK, R. ČENGERY, J. KAVALÍR, T. PUŠMAN, L. ZAVŘEL, *„Energy harvesting“ systém pro smart textilie s indukčním nabíjením a superkapacitorem*. 2017.

[15]KAVALÍR, T. KINDL, V. TURJANICA, P. PUŠMAN, L. JÁRA, M. ZAVŘEL, *Jednotka pro bezdrátové napájení miniaturních senzorů včetně sběru a přenosu dat ze senzorů*. 2017.

3.6 2018

- [16]ZAVŘEL, *Laboratorní model 1f polořízeného usměrňovače*. 2018.
- [17]ZAVŘEL, Návrh a realizace kompenzačního kondenzátoru bezdrátového přenosu energie s rezonanční vazbou. In *Elektrotechnika a informatika 2018. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018. s. 161-164. ISBN: 978-80-261-0785-9
- [18]KINDL, V. ZAVŘEL, DRÁBEK, P. KAVALÍR, T. High efficiency and power tracking method for wireless charging system based on phase-shift control. *Energies*, 2018, roč. 11, č. 8, s. 1-19. ISSN: 1996-1073
- [19]KINDL, V. PECHÁNEK, R. ZAVŘEL, M. KAVALÍR, T. Inductive coupling system for e-bike wireless charging. In *12th International Conference Elektro 2018 : conference proceedings*. Piscataway: IEEE, 2018. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-4759-2
- [20]ZAVŘEL, M. KINDL, V. PECHÁNEK, R. Control strategy of cooler for diminishing dimensions and extending service lifetime of inverter. In *12th International Conference Elektro 2018 : conference proceedings*. Piscataway: IEEE, 2018. s. 1-6. ISBN: 978-1-5386-4759-2
- [21]ZAVŘEL, KINDL, V. Comparison of various configuration of wireless power transfer system. *Transactions on Electrical Engineering*, 2018, roč. 7, č. 2, s. 32-36. ISSN: 1805-3386
- [22]ZAVŘEL, DRÁBEK, P. KEHL, Z. *Přizpůsobovací jednotka SKIIP pro MLC interface*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [23]ZAVŘEL, KINDL, V. Optimal efficiency and power control of high efficient wireless power transfer system. In *Mechatronics 2017 : Recent Technological and Scientific Advances (Advances in Intelligent Systems and Computing; Vol. 644)*. Cham: Springer, 2018. s. 50-57. ISBN: 978-3-319-65959-6 , ISSN: 2194-5357
- [24]KINDL, V. ZAVŘEL, KAVALÍR, T. Minimization of equivalent series resistance of coupling coils for wireless power transfer applications. In *Mechatronics 2017 : Recent Technological and Scientific Advances (Advances in Intelligent Systems and Computing; Vol. 644)*. Cham: Springer, 2018. s. 43-49. ISBN: 978-3-319-65959-6 , ISSN: 2194-5357
- [25]ZAVŘEL, *Laboratorní model 1f plně řízeného usměrňovače*. 2018.
- [26]VEG, L. ZAVŘEL, *Oteplovací zkouška kostry vysokorychlostního stroje (měření I. a II.)*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [27]JANOUSH, Š. ZAVŘEL, ŠESTÁK, M. *Testování vysokootáčkového stroje pro trakční pohon*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [28]JANOUSH, Š. DRÁBEK, P. ZAVŘEL, *Návrh zkušebního standu pro vysokootáčkový stroj pro trakční pohon (řídící algoritmy)*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [29]ZAVŘEL, DRÁBEK, P. KINDL, V. *Kooperace systému WPT s baterií*. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.

3.7 2019

[30]ZAVŘEL, M. Srovnání základních strategií a topologií pro nabíjení akumulátorů s využitím systému bezdrátového přenosu výkonu. In *Elektrotechnika a informatika 2019. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2019. s. 161-164. ISBN: 978-80-261-0871-9

[31]FRANC, J. PECHÁNEK, R. KINDL, V. ZAVŘEL, M. Ventilation system with skewed rotor cooling ducts of 40-MW synchronous machine: a case study. *Electrical Engineering. Archiv für Elektrotechnik*, 2019, roč. 101, č. 1, s. 203-211. ISSN: 0948-7921

[32]ZAVŘEL, DRÁBEK, P. KOŠAN, T. *Modul transceiveru CAN pro MLC interface*. Západočeská univerzita v Plzni, 2019.

[33]ZAVŘEL, *Laboratorní model 1f softstartéru*. 2019.

[34]ZAVŘEL, M. KINDL, V. *Systém na detekci cizích předmětů a živočichů v aktivní zóně systému WPT*. Západočeská univerzita v Plzni, 2019.

[35]ZAVŘEL, M. KAVALÍR, T. DRÁBEK, P. KINDL, V. *Kompenzační kondenzátor vlastní konstrukce pro 5kW prototyp systému WPT*. Západočeská univerzita v Plzni, 2019.

3.8 2020

[36]ZAVŘEL, M. DRÁBEK, P. KINDL, V. KAVALÍR, T. *Základní návrh bloků bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů*. Západočeská univerzita v Plzni, 2020.

[37]KINDL, V. FRIVALDSKÝ, M. ZAVŘEL, M. PAVELEK, M. Generalized design approach on industrial wireless chargers. *Energies*, 2020, roč. 13, č. 11, s. 1-16. ISSN: 1996-1073

[38]ZAVŘEL, M. KINDL, V. PECHÁNEK, R. FRANC, J. Sensorless control strategy of cooler for reduction dimensions and operating characteristic improvement in double three-phase inverter. *Electrical Engineering. Archiv für Elektrotechnik*, 2020, roč. 102, č. 1, s. 117-127. ISSN: 0948-7921

[39]KINDL, V. PECHÁNEK, R. ZAVŘEL, M. KAVALÍR, T. TURJANICA, P. Inductive coupling system for electric scooter wireless charging: electromagnetic design and thermal analysis. *Electrical Engineering. Archiv für Elektrotechnik*, 2020, roč. 102, č. 1, s. 3-12. ISSN: 0948-7921

[40]ZAVŘEL, M. DRÁBEK, P. KINDL, V. KAVALÍR, T. *Strategie řízení bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů*. Západočeská univerzita v Plzni, 2020.

[41]KINDL, V. TURJANICA, P. TYRPEKL, M. KAVALÍR, T. ZAVŘEL, M. *Návrh vazebných prvků WPT pro bateriové systémy ručního nářadí*. Západočeská univerzita v Plzni, 2020.

[42]FRIVALDSKÝ, M. PAVELEK, M. KINDL, V. ZAVŘEL, M. Wireless power transfer system design methodology - analysis, design, verification. In *13th International Conference Elektro 2020 : conference proceedings*. Piscataway: IEEE, 2020. s. 1-6. ISBN: 978-1-72817-542-3

[43]MOLNÁR, J. PEROUTKA, Z. JÁRA, M. VOTAVA, M. ZAVŘEL, M. *Generátor sítě 50 kW (Elektroline - zhotovení prototypu)*. Elektroline a.s., 2020.

3.9 2021

[44]ZAVŘEL, M. KINDL, V. KAVALÍR, T. DRÁBEK, P. Design and construction of high-quality capacitor for high frequency and power application. *Communications -Zilina-*, 2021, roč. 23, č. 1, s. C1-C6. ISSN: 1335-4205

[45]KINDL, V. FRIVALDSKY, M. ŠKORVAGA, J. ZAVŘEL, M. Theoretical and practical design approach of wireless power systems. In *Wireless Power Transfer – Recent Development, Applications and New Perspectives*. London : IntechOpen, 2021, s. 1-33. ISBN: 978-1-83968-802-7

[46]SKALA, B. KLOUDA, O. ONDŘEJ, Š. KUBAŇ, M. KINDL, V. ČERMÁK, R. VEG, L. TYRPEKL, M. ZAVŘEL, M. FRANK, Z. *Protokol o měření dekompenzační tlumivky TTC 34075 – 0024 – Závislost magnetických ztrát na rostoucí frekvenci při zachování poměru U/f*. ELZAT spol. s r.o., 2021.

[47]KINDL, V. TURJANICA, P. KAVALÍR, T. PUŠMAN, L. ZAVŘEL, M. ELIS, L. SKALA, B. *Návrh vazebných prvků pro bezdrátové napájení senzoriky rotačních strojů v kompenzační topologii LCC-S*. Západočeská univerzita v Plzni, 2021.

[48]KINDL, V. TURJANICA, P. KAVALÍR, T. PUŠMAN, L. ZAVŘEL, M. ELIS, L. SKALA, B. *Návrh vazebných prvků pro bezdrátové nabíjení ručního nářadí v kompenzační topologii LCC-P*. Západočeská univerzita v Plzni, 2021.

[49]KINDL, V. TURJANICA, P. KAVALÍR, T. PUŠMAN, L. ELIS, L. ZAVŘEL, M. *Alternativní topologie usměrňovače pro systémy WPT s nízkou ekvivalentní zátěží*. Západočeská univerzita v Plzni, 2021.

[50]TYRPEKL, M. TURJANICA, P. KINDL, V. POLÁČEK, L. ZAVŘEL, M. *Analýza bezdrátové nabíječky od společnosti BOSCH*. Západočeská univerzita v Plzni, 2021.