



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Návrh experimentální rychlodobíjecí stanice pro elektrická vozidla

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Ondřej Velechovský**

Vedoucí práce: Ing. Pavel Jandura, Ph.D.





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

Design of an experimental fast-charging station for electric vehicles

Master thesis

Study programme: N2612 – Electrical Engineering and Informatics

Study branch: 3906T001 – Mechatronics

Author: **Bc. Ondřej Velechovský**

Supervisor: Ing. Pavel Jandura, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Velechovský**
Osobní číslo: **M16000150**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Mechatronika**
Název tématu: **Návrh experimentální rychlodobíjecí stanice pro elektrická vozidla**
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se se všemi významnými světovými standardy pro rychlé dobíjení stejnosměrným proudem pro elektrická vozidla. Podrobně se pak zaměřte na stávající a budoucí standardy používané v EU.
2. Proveďte rešerši topologií moderních DC dobíjecích stanic. Zaměřte se i na HW/SW techniky umožňující sdílení výkonu stanice mezi více vozidel.
3. Navrhněte kompletní zapojení experimentální DC rychlodobíjecí stanice. Stanice musí podporovat alespoň jeden standard používaný v EU a být schopna nabíjet experimentální elektromobil TUL.
4. Stanici realizujte formou otevřeného demonstračního modelu a proveďte základní měření vybraných veličin při nabíjení.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah pracovní zprávy: 40–50 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] VELECHOVSKÝ, Ondřej. Návrh silové části veřejné dobíjecí stanice pro elektromobily. Liberec, 2016. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [2] IEC61851 Part 1: Charging of electric vehicles up to 250 A a.c. and 400 A d.c., Table 1 "Modes and permissible connections specified in 61851-1, First Edition 2003-04, IEC
- [3] TS D 0007:2012: Basic function of quick charger for the electric vehicle, First Edition 2013-05, JIS
- [4] DIN SPEC 70121:2014-12: Electromobility - Digital communication between a d.c. EV charging station and an electric vehicle for control of d.c. charging in the Combined Charging System, First Edition 2014-12, DIN

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Jandura, Ph.D.


Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 14. května 2018


prof. Ing. Zdeněk Pliva, Ph.D.
děkan




doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2017

Prohlášení

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

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

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

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

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

Datum: 14.5.2018

Podpis:



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Pavlovi Jandurovi, Ph.D. za jeho velkou pomoc a trpělivost při řešení této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mému otci, Stanislavu Velechovskému, za velmi přínosné rady a poskytnutí zázemí pro řešení této diplomové práce.

Tato práce byla podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je navrhnout funkční demonstrační model DC dobíjecí stanice pro elektrická vozidla, v souladu s příslušnými normami a s využitím vhodně zvolených komponent.

Tato diplomová práce se v úvodu zaměřuje na rozdělení a popsání základních standardů pro DC dobíjení elektrických vozidel jako jsou japonské CHAdeMO, evropské CCS nebo americká Tesla SuC.

Dále je v práci proveden zjednodušený návrh stanice s možností sdílení výkonu mezi více dobíjecích zásuvek, a to s využitím efektivní stykačové logiky. Návrh zahrnuje možnost dobíjení až dvou vozidel na čtyřech různých dobíjecích bodech (Nevázaná příloha 1).

Následuje návrh experimentální rychlodobíjecí DC stanice pro elektromobily, dle standardu CHAdeMO (ČSN EN 61851), s využitím výkonových dobíjecích modulů, řídicího počítače (Raspberry PI) a dalších nezbytných komponentů (Nevázaná příloha 1). Zapojení celé stanice je podrobně popsáno, jakož i všechny navržené přístroje a komponenty. Některé vybrané parametry (účinnost, výkony,...) jsou v závěru práce změřeny, jejich hodnoty vyhodnoceny a uvedeny v příslušných grafech.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektrické vozidlo, DC dobíjecí stanice, CHAdeMO, ČSN EN 61851

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to design a functional demonstration model DC charging station for electric vehicles in accordance with the relevant standards and with the use of suitably chosen components.

In the introduction this diploma thesis focuses on the description of basic standards for DC charging of electric vehicles such as Japanese CHAdeMO, European CCS or American Tesla Supercharger.

In addition, there is made a simple design of charging station with the ability to share power between multiple charging sockets with the use of effective contactor logic. The design includes the possibility of charging up to two vehicles at four different charging points (Unbound Annex 1).

The next part is the design of an experimental fast-charging DC station for electromobility, according to the CHAdeMO standard (ČSN EN 61851), using the charging power modules, the control computer and other necessary components (Unbound Annex 1). Wiring of the entire station is described in detail, as well as all the proposed devices and components.

Some selected parameters (efficiency, powers, ...) are measured at the end of the thesis and their values are evaluated and presented in the respective charts.

KEYWORDS

electric vehicle, DC charging station, CHAdeMO, ČSN EN 61851

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM NEVÁZANÝCH PŘÍLOH	12
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	12
ÚVOD	13
1. STANDARDY RYCHLODOBÍJENÍ DC PROUDEM	14
1.1 CHAdeMO – Typ A.....	16
1.2 CCS (Combined Charging System) – Typ B	19
1.3 Tesla Supercharger	20
1.4 GB/T 20234	22
2. TOPOLOGIE DC DOBÍJECÍCH STANIC	23
2.1 Topologie s vysokofrekvenčním transformátorem	23
2.2 Topologie s nízkofrekvenčním transformátorem	25
2.3 Koncept dobíjecí stanice se sdíleným výkonem	27
3. NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ STANICE	31
3.1 Použité součástky a přístroje.....	32
3.1.1 Hlavní jistič	32
3.1.2 Zdroj DC 12 V.....	32
3.1.3 Hlídač izolačního stavu	32
3.1.4 Raspberry PI a shield pro CAN komunikaci	33
3.1.5 Stykač ve stanici	34
3.1.6 Jištění DC výstupu	34
3.1.7 Dobíjecí kabel	35

3.1.8	Komunikační převodník.....	36
3.1.9	Výkonové dobíjecí moduly	38
3.2	Schéma v programu EPLAN	41
4.	MĚŘENÍ VYBRANÝCH PARAMETRŮ VÝKONOVÉHO DOBÍJECÍHO MODULU	48
5.	ZÁVĚR	53
	POUŽITÁ LITERATURA.....	55
	PŘÍLOHA 1 – TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Mapa umístění veřejných dobíjecích stanic	13
Obrázek 2 – Model AC dobíjecí stanice.....	14
Obrázek 3 – Dobíjecí konektor typu CHAdeMO.....	16
Obrázek 4 – Vnitřní schéma zapojení standardu CHAdeMO.....	17
Obrázek 5 – Stručná ukázka dobíjecího procesu	18
Obrázek 6 – Ukázka dobíjecích konektorů standardu CCS.....	19
Obrázek 7 - Největší systém dobíjecích stanic Tesl SuC.....	21
Obrázek 8 - Dobíjecí zásuvky na vozidle Tesla.....	22
Obrázek 9 – Dobíjecí modul od společnosti Electway.....	24
Obrázek 10 – Blokový diagram	25
Obrázek 11 - Schéma topologie s využitím síťového transformátoru	26
Obrázek 12 - První část návrhu sdílení výkonu	28
Obrázek 13 - Druhá část návrhu principu sdílení výkonu.....	29
Obrázek 14 - Principiální schéma modelu dobíjecí stanice.....	31
Obrázek 15 - Bender ISOMETER - IR155-3202.....	33
Obrázek 16 - Výkonový stejnosměrný stykač Gigavac.....	34
Obrázek 17 - Nákres dobíjecího kabelu	35
Obrázek 18 - Schéma převodníku.	36
Obrázek 19 – Plošný spoj komunikačního převodníku.	37
Obrázek 21 - Vrstva "bottom".....	38
Obrázek 20 - Vrstva "top".....	38
Obrázek 22 - Výkonový dobíjecí modul.	40
Obrázek 23 – Návrh zapojení výkonových dobíjecích modulů.	42
Obrázek 24 - Návrh zapojení hlídače izolačního stavu	43
Obrázek 25 - Schéma komunikačního převodníku.....	44
Obrázek 26 - Propojení mezi Raspberry PI a komunikačním převod....	45
Obrázek 27 - Propojení mezi komunikačním převodníkem a vozidlem. 45	
Obrázek 28 - Propojení mezi komunikačním převodníkem a zámkem . 46	
Obrázek 29 - Výstupní svorky a dobíjecí kabel.....	46
Obrázek 30 - Reálný tvar konektoru CHAdeMO.....	47

Obrázek 31 - Skutečné umístění měřících přístrojů.....	48
Obrázek 32 - Zapojení měřícího obvodu.....	49
Obrázek 33 - Pracovní oblast dobíjecího modulu.....	50
Obrázek 34 - Power factor.	51
Obrázek 35 - Mapa účinnosti výkonového modulu.....	52

SEZNAM NEVÁZANÝCH PŘÍLOH

Nevázaná příloha 1....Návrh sdílení výkonu mezi více dobíjecích zásuvek

Nevázaná příloha 2.....Schéma stanice v programu EPLAN

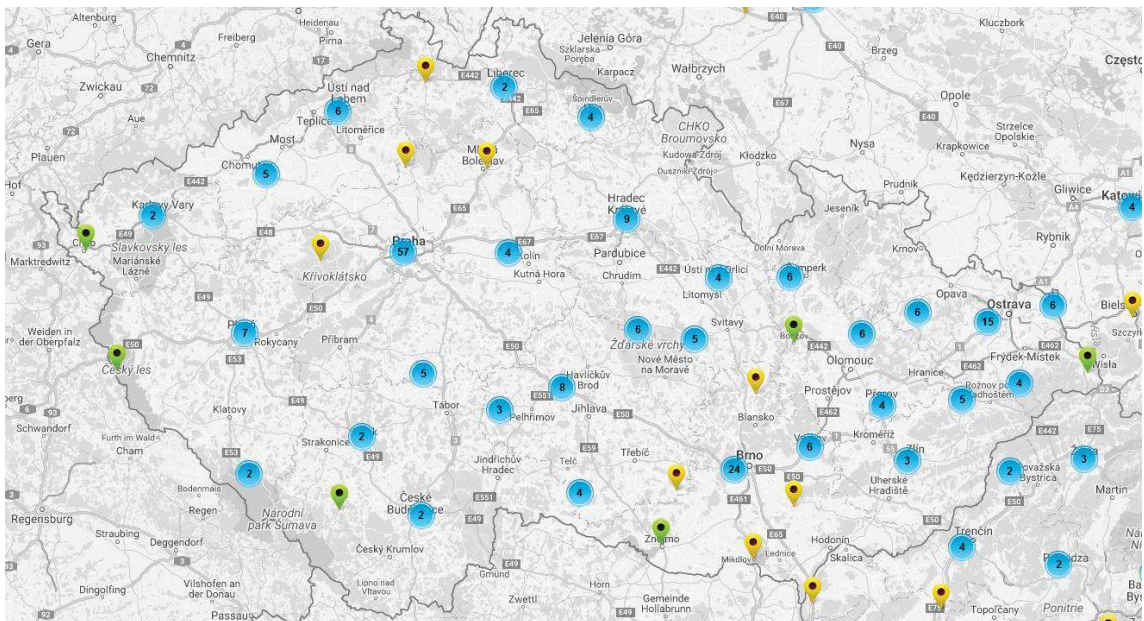
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VÝRAZŮ

AC	–	Alternating current; střídavý proud
DC	–	Directed current; stejnosměrný proud
CCS	–	Combined charging systém; kombinovaný systém nabíjení
PP	–	Proximity pilot;
CP	–	Control pilot;
PWM	–	Pulse width modulation; Pulzně šířková modulace
DIP	–	Dual in-line package; Přepínač
PFC	–	Power factor correction; Korekce účinníku
GPIO	–	General-purpose input/output; Univerzální vstup/výstup
SuC	–	Supercharger; Dobíjecí stanice společnosti Tesla

ÚVOD

Dobíjení elektromobilů je jedním z nejdůležitějších elementů elektromobilismu, a to z důvodu stále ještě ne úplně uspokojivé kapacity baterií těchto elektrických vozidel. Když porovnáme dojezd kupříkladu elektromobilu Tesla Model S (cca 550 km, dojezd se liší podle jednotlivých typů vozidel) a Škody Superb (cca 1100 km, dojezd se liší podle jednotlivých typů vozidel), vidíme, že dokonce i ten nejdokonalejší elektromobil (kterým v současnosti Tesla bezesporu je) ujede (na jedno dobití) přibližně poloviční vzdálenost než srovnatelný automobil.

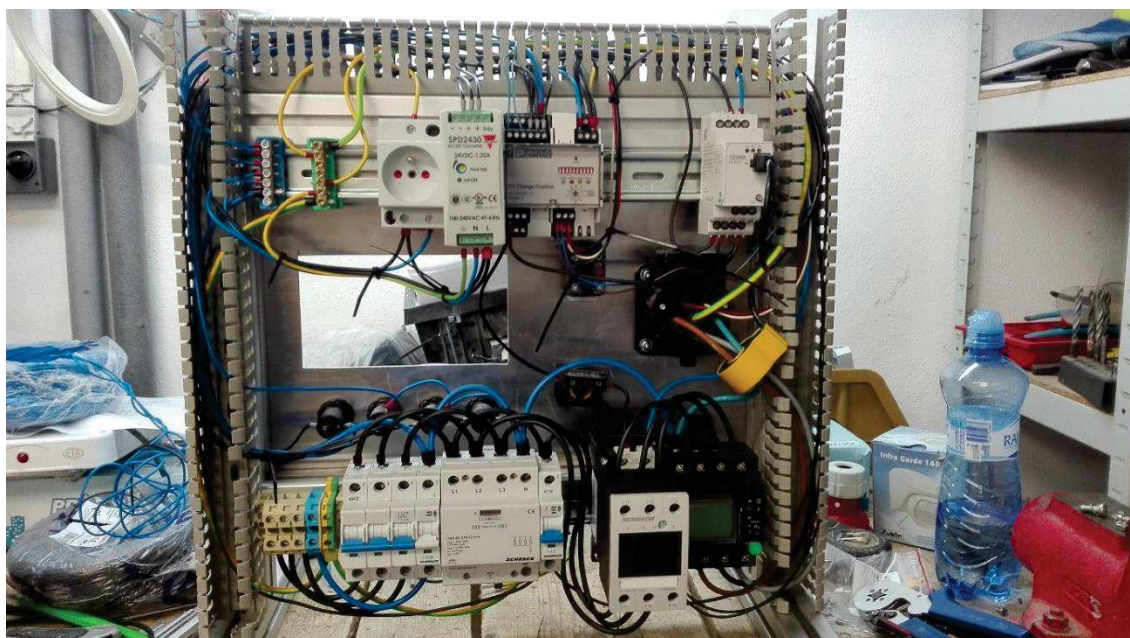
Síť veřejných dobíjecích stanic na našem území se velmi rychle rozrůstá (nutno podotknout, že je to hlavně díky skupině ČEZ a jejich projektu elektromobilita.cz). Na našem území se nyní nachází cca 250 veřejných dobíjecích stanic, z toho 6 tzv. Superchargerů (Tesla) a přibližně 100 rychlodobíjecích DC stanic (výhradně CHAdeMO a CCS).



Obrázek 1 – Mapa umístění veřejných dobíjecích stanic na území ČR. Tuto mapu můžeme najít na stránce evmapa.cz [1]. Aplikace EVmapa slouží k obsluze dobíjecích stanic (aktivace dobíjení, platba...). Na mapě vidíme, že je síť dobíjecích stanic už slušně rozšířena (Praha stále jednoznačně vede).

1. STANDARDY RYCHLODOBÍJENÍ DC PROUDEM

Veřejné dobíjecí stanice se v zásadě dělí na dvě kategorie – AC a DC. AC dobíjecí stanice dobíjí vozidlo (jak už název napovídá) střídavým proudem (dobíjení probíhá pomocí integrované dobíječky ve voze) a jsou zpravidla méně výkonné (běžné o výkonu 25 kW, například Renault Zoe však může být osazen 43kW palubní dobíječkou). Tomuto typu stanic jsem se věnoval v mé bakalářské práci „Návrh silové části veřejné dobíjecí stanice pro elektromobily. Liberec, 2016“ [2], kde je princip AC dobíjení popsán a navržen její výukový model.



Obrázek 2 – Model AC dobíjecí stanice. Jedná se o mnou vytvořený model silové části AC dobíjecí stanice, osazen zásuvkou typu "Mennekes" a s řídicí elektronikou od společnosti Phoenix Contact.

Oproti tomu DC dobíjecí stanice (známé také jako stanice „Režimu 4“) dobíjí vozidlo stejnosměrným proudem (vnitřní dobíječka je překlenuta, proud je přiveden přímo do baterií) a výkony se pohybují v řádech desítek kilowat. V této diplomové práci se věnuji pouze standardům DC dobíjení elektromobilů.

Dobíjení elektromobilů je v České republice (respektive Evropské unii) řešeno normou ČSN EN 61581. Její část ČSN EN 61851-23 [3][4], je zaměřena na DC dobíjecí stanice a jedná se o doplnění základní normy 61851-1 [5], která uvádí základní termíny (dobíjecí stanice, dobíjené vozidlo, atd.), a její rozšíření o specifikace definované pro DC dobíjecí stanice. Normou jsou dány také některé povinné a volitelné funkce, které musí DC dobíjecí stanice poskytovat (například ověření, že je vozidlo správně připojeno, kontrola spojitosti ochranného uzemnění...). Tyto funkce jsou pak v normě ČSN EN 61851-23 (popřípadě ČSN EN 61851-1) podrobně popsány.

Norma ČSN EN 61851-23 dále definuje dobíjecí stavy stanice, a to „nepřipojeno“ (DC-A), „příprava“ (DC-B1 až DC-B3), „přenos energie“ (DC-C a DC-D), „vypnutí“ (DC-B'1 až DC-B'4), „chyba“ (DC-E) a „závada“ (DC-F).

Dobíjecím standardem definovaným normou ČSN EN 61851-23 je tzv. CHAdeMO (viz 2.1 CHAdeMO – Typ A), známý také pod označením „Typ A“ a tzv. CCS (Combined Charging System, viz 2.2 CCS – Typ B), neboli „Typ B“. Dalšími dobíjecími standardy jsou Tesla Supercharger (viz 2.3 – Tesla Supercharger) od společnosti Tesla a čínský GB/T (viz 2.4 GB/T 20234).

1.1 CHAdeMO – Typ A

Jedním z nejrozšířenějších standardů DC dobíjení (přes 17 000 stanic) je japonský standard CHAdeMO. Vznikl na základě dohody několika japonských automobilek (Nissan, Toyota, Mitsubishi...), čímž se okamžitě stal dominantním standardem na japonských ostrovech, odkud se rozšířil takřka po celém světě, a to i díky tomu, že tento standard obsahuje 32 % elektrických vozidel. CHAdeMO je definováno japonskou normou TS D 0007, která byla harmonizována s evropskými a následně i českými technickými normami a jako jedna z mála je k dispozici v překladu do češtiny („ČSN EN 61851-23, příloha AA“ [3]).

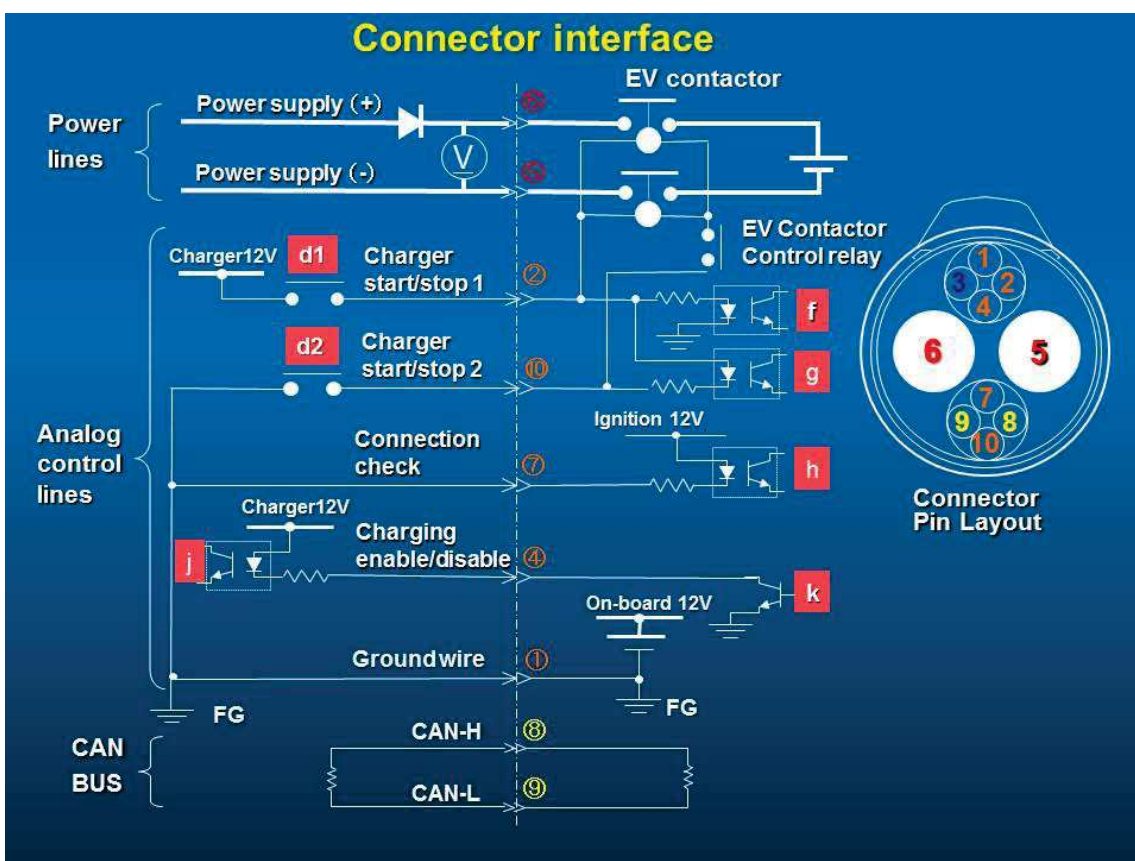
Implementace standardu CHAdeMO dodnes umožňuje nabíjet proudem pouze do hodnoty 125 A při napětí 500 V, tedy jeho maximální výkon je 62,5 kW (toto omezení je nevýhodou protokolu CHAdeMO a vzniklo nejspíše z důvodu, že vývojáři předpokládali 125 A jako dostatečné. Naštěstí se v nynější době pracuje na verzi CHAdeMO 1.2, která umožní dobíjet proudem o hodnotě až 400 A, respektive 200 kW).



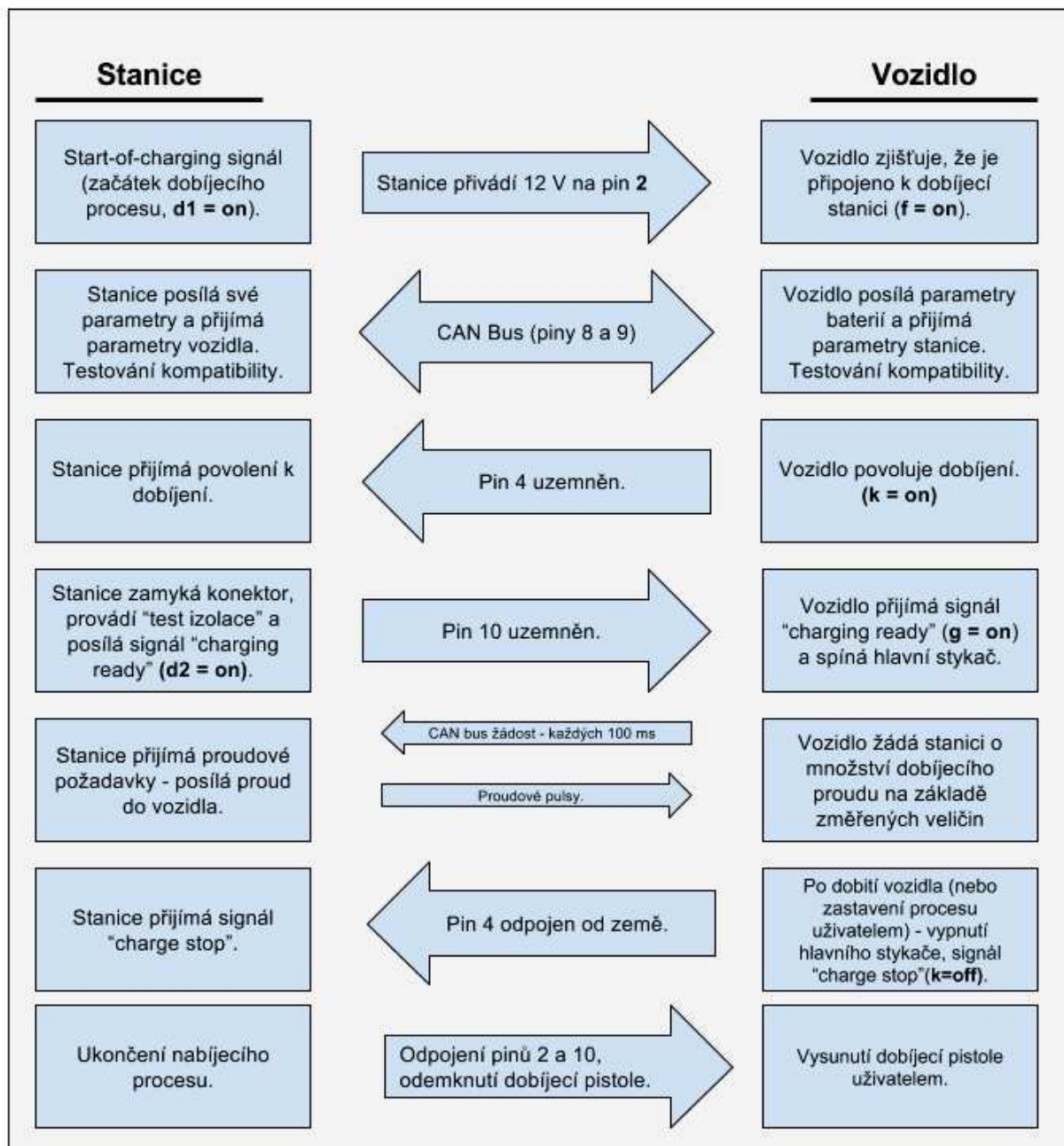
Obrázek 3 – Dobíjecí konektor typu CHAdeMO. Vidíme zde dva výkonové kolíky a osm komunikačních pinů (viz dále). Standardu CHAdeMO je často vytýkána velikost a nepraktičnost (používají doslova výraz „clunky“ – neohrabaný) dobíjecích „pistolí“. [6]

Komunikace mezi stanicí a vozidlem je řešena pomocí CAN komunikačního obvodu a požadavky na digitální komunikaci a detaily komunikačního protokolu jsou uvedeny v normě ČSN EN 61851-24.

Konektor dobíjecího standardu CHAdeMO obsahuje 10 pinů (2 výkonové, 5 analogových řídicích a 2 pro komunikaci CAN bus, 1 pin zůstává nevyužit) a bývá označován za zbytečně veliký (neohrabaný), ale díky velikosti a robustnosti je velmi odolný. Výkonové vodiče v dobíjecím kabelu mají průřez 35–40 mm², komunikace je pak vedena vodiči 0,75 mm². Zamykání konektoru ve vozidle v průběhu dobíjení je většinou řešeno solenoidem o napětí 12 V.



Obrázek 4 – Vnitřní schéma zapojení standardu CHAdeMO. Princip komunikace viz Obrázek 3. Vpravo vidíme označení jednotlivých vodičů CHAdeMO standardu. Kontakty 5 a 6 výkonové, 9 a 8 komunikace CAN, 3 je nevyužit a zbytek slouží k analogové komunikaci [7].

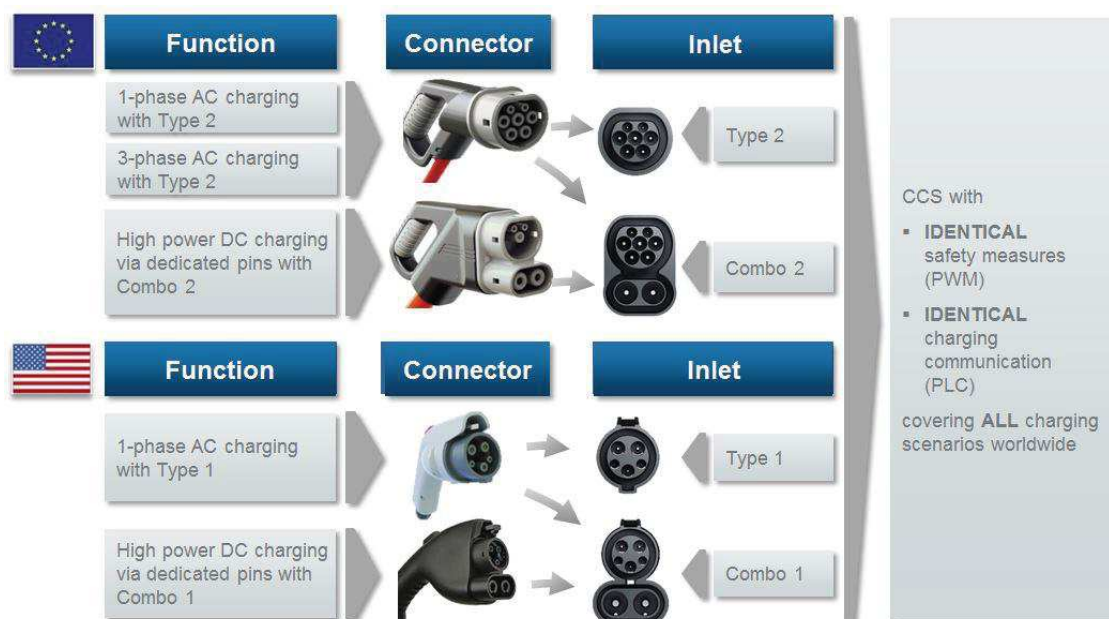


Obrázek 5 – Stručná ukázka dobíjecího procesu dle protokolu CHAdeMO. Zapojení viz Obrázek 3, komunikace probíhá po vodičích (pínech) CP, CP2, CP3 a CS. Dobíjení probíhá ve 100ms impulzech, vždy na žádost vozidla o dobíjecí proud.

1.2 CCS (Combined Charging System) – Typ B

Druhým standardem rychlého DC dobíjení vozidel je Combined Charging System (CCS, někdy se uvádí „Combo“) spravovaný skupinou CharIN, jejíž členové jsou automobilové a elektrotechnické společnosti z celého světa (např. Audi, Volvo, ABB, Volkswagen,...), a v současné době se s ním počítá jako hlavním standardem rychlodobíjení v celé Evropské unii. Tento standard je specifický hlavně tím, že umožňuje dobíjení jak DC, tak AC proudem. [8]

Nyní je maximální dobíjecí výkon DC standardu CCS 200 kW, pracuje se na výkonu až 350 kW (AC dobíjení je možno až na 43 kW). Dalším specifikem CCS je rozdílnost dobíjecího konektoru pro evropský a pro americký trh (viz Obrázek 6).



Obrázek 6 – Ukázka dobíjecích konektorů standardu CCS. Jedná se víceméně o spojení AC dobíjecího konektoru (v případě EU „Mennekes“) a pinů pro stejnosměrný dobíjecí proud. Vidíme, že na rozdíl od evropského standardu, ten americký neumožňuje třífázové AC dobíjení [8].

Pro komunikaci mezi vozidlem a stanicí využívá CCS tzv. „HomePlug GreenPhy“. Jedná se o PLC komunikaci (Power Line Communication), kde

je signál vysílán po vodiči „Control Pilot“. Tento vodič je tak sdílen pro komunikaci po standardu SAE J-1772 (popřípadě evropský ekvivalent IEC 62196-2 „Type 2“ – Mennekes) využívanou pro AC nabíjení a zároveň je využit pro přenos PLC modulovaných dat rychlostí až 10 mb/s pro potřeby DC nabíjení [9].

1.3 Tesla Supercharger

Tesla Supercharger je koncept dobíjecích stanic od průkopníka světového elektromobilismu společnosti Tesla, jejíž majitel Elon Musk je velký propagátor elektrických vozidel.

Jedním ze způsobů dobíjení elektromobilů, na kterých Tesla pracovala, byly tzv. „Tesla Stanice“, kde mělo docházet k výměně prázdných baterií za dobité. Takováto stanice vznikla však pouze jedna a v roce 2015 od tohoto konceptu společnost Tesla ustoupila (od počátku se jednalo spíše o pokus, zda by se tento princip dobíjení vozidel uchytil).

Tesla však měla od počátku v plánu vybudovat síť „klasických“ rychlodobíjecích stanic (tzv. Superchargerů, zkráceně SuC). Vozidla této značky mají svoji speciální dobíjecí zásuvku, tudíž nejsou kompatibilní s žádným světovým standardem a majitelé, kteří chtějí dobíjet na stanicích opatřených standardem CHAdeMO, si musejí zakoupit speciální adaptér (cena cca \$ 450).

Tesla Supercharger je DC dobíjecí stanice, která dokáže dobíjet výkonem až 145 kW dvě vozidla (jedna stanice = dva dobíjecí stojany), jedno vozidlo pak může být dobíjeno maximálně 120 kW (v budoucnu je v plánu zvýšení výkonu stanice až na 350 kW [10][11]). Stojany stanice jsou rozděleny na A – master a B – slave. Stojan A je napájen primárně, a až když vozidlo na stojanu A dosáhne určité hodnoty dobití, začne se (a však menší rychlostí) dobíjet vozidlo na stojanu B (z toho důvodu je vhodné využít neobsazenou dvojici stojanů, začít dobíjet na obsazené dvojici stojanů je mezi majiteli Tesly považováno za neslušné).

V minulosti bylo dobíjení na stanicích Supercharger pro majitele vozů Tesla bezplatné. To však od ledna 2017 neplatí. Místo toho má každý soukromý majitel 400 kW dobíjení ročně zdarma (přibližně 1600 km) a další dobíjení si musí zaplatit (u nás 1 kW = 5 Kč).

Bohužel, Tesla si úzkostlivě tají způsob komunikace mezi vozidlem a stanicí, vnitřní strukturu stanice a další specifikace Superchargeru. Jediné, co se o těchto stanicích ví, je, že každá obsahuje 12 modulů (jedná se o palubní dobíječky z vozidel Tesla Model S a Model X), každý o výkonu 16,5 kW, čímž je umožněno snadné dělení výkonu mezi dvě dobíjená vozidla a funkčnost i při poruše některého z modulů [12].



Obrázek 7 - Největší systém dobíjecích stanic Tesla Supercharger. Nachází se v Bussines Center Shanghai v Číně. Je zde umístěno 50 rychlodobíjecích superchargerů, které jsou k dispozici 24 hodin denně [13].

1.4 GB/T 20234

GB/T je název pro čínské normy a GB/T 20234 je tedy norma týkající se dobíjení elektromobilů (dobíjení DC proudem se věnuje norma GB/T 20234.3). Jedná se o nejrozšířenější dobíjecí standard na světě. Čínská vláda dokonce přiměla automobilku Tesla začít montovat na své vozidlo vedle svých dobíjecích zásuvek také zásuvku typu GB/T 20234.



Obrázek 8 - Dobíjecí zásuvky na vozidle Tesla. Vlevo můžeme vidět dobíjecí standard GB/T 20234 DC verzi a vpravo dobíjecí standard GB/T 20234 AC verzi (téměř totožná jako evropský „Type 2“) [14]. Tesla umístěním standardu GB/T na svá vozidla reagovala na velký nárůst prodeje elektromobilů v Číně. Tyto GB/T zásuvky se na vozidle nacházejí za předním blatníkem, původní zásuvka Tesla Supercharger je pak umístěna na svém klasickém místě v zadní části vozu. [15]

Dobíjecí standard GB/T 20234.3 obsahuje 9 kontaktů, jeho maximální výkon je 300 kW (což je v současné době nejvíce ze všech standardů) a komunikuje pomocí protokolu CAN. Dobíjecí stanice s touto zásuvkou se vyskytují pouze v Číně a neplánuje se, že by měla proběhnout jakákoli expanze do zbytku světa (a to především z důvodu nepříliš velké kvality čínských elektromobilů).

2. TOPOLOGIE DC DOBÍJECÍCH STANIC

V zásadě musí každá dobíjecí stanice obsahovat oddělovací transformátor, usměrňovač a DC/DC měnič. Tato elektronika však bývá v různých stanicích řešena rozdílně. Základním bezpečnostním požadavkem pro každý druh dobíjecí stanice je galvanické oddělení elektrické sítě od bateriového systému vozidla. Toho se v praxi dosahuje dvěma cestami – DC/DC měniče s nízkofrekvenčním (síťovým) transformátorem (LF), usměrňovačem a neizolovaným DC/DC měničem a spínané zdroje s vysokofrekvenčním transformátorem (HF).

2.1 Topologie s vysokofrekvenčním transformátorem

Prvním typem topologií dobíjecích stanic jsou tzv. výkonové dobíjecí moduly (spínané zdroje, vysokofrekvenční transformátor). Výhodou výkonových dobíjecích modulů je vysoká provozuschopnost stanice a hlavně to, že se díky nim stává stanice modulární, což umožňuje její případné jednoduché opravy (v případě poruchy jednoho modulu stanice funguje díky ostatním) a dělení výkonu mezi více dobíjených vozidel.

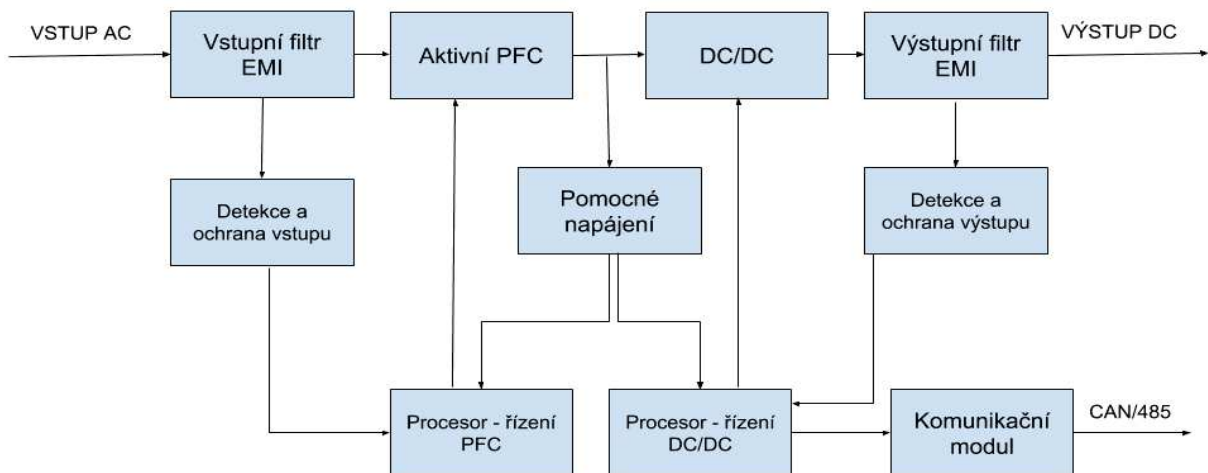
Největší a neznámější společností, jejíž stanice jsou postaveny na topologii výkonových dobíjecích modulů, je ABB (dodavatel stanic pro ČEZ) se svými stanicemi ABB Terra [16]. ABB používá svoje vlastní výkonové dobíjecí moduly (kupříkladu v 50kW stanici Terra 53 jich je 5, každý o výkonu 10 kW), které jsou řízeny tak, že lze každému upravit výkon dle příkonu, který máme k dispozici (když máme například pouze 30 kW, lze moduly omezit takovým způsobem, aby stanice fungovala i za těchto podmínek).

V této práci se zaměřím na dobíjecí modul od čínské společnosti Electway, typ UR50030-E. Jedná se o modul s výstupním napětím 150–500 V. Modul je napájen třífázovým napětím a výstupní proud je až 37,5 A.



Obrázek 9 – Dobíjecí modul od společnosti Electway. Na displeji můžeme zobrazovat výstupní veličiny a pracovní status modulu. [17]

Výkonový modul UR50030-E [17] se skládá z vstupního EMI filtru, třífázového aktivního PFC, převodníku DC/DC, pomocného zdroje, ochrany a detekce vstupu a výstupu. Vstupní EMI filtr a aktivní PFC upravují a vyhlazují vstupní signál tak, aby splňoval požadavek na THDi signálu méně než 5 %. Aktivní PFC je řízen procesorem (DSP), který generuje signál PWM. DC/DC převodník je pak opět řízen kontrolérem a upravuje výstupní DC napětí tak, aby měl požadovanou hodnotu a stabilitu. Pomocný zdroj napájí řídicí kontrolér (DC proudem z PFC). Modul UR50030-E obsahuje také komunikační protokoly CAN a 485 neboli MODBUS-RTU.



Obrázek 10 – Blokový diagram a stručná ukázka funkčního principu výkonového dobíjecího modulu Electway UR50030-E.

Nevýhodou výkonových modulů je jejich složitější nebo komplexnější elektronické zapojení oproti topologii „se síťovým transformátorem“ (viz 3.2 Topologie s nízkofrekvenčním transformátorem), s čímž souvisí cena a také vyšší pravděpodobnost poruch (ta je ale kompenzována modularitou topologie, tudíž poruchy nemají příliš velký vliv na chod stanice jako celku).

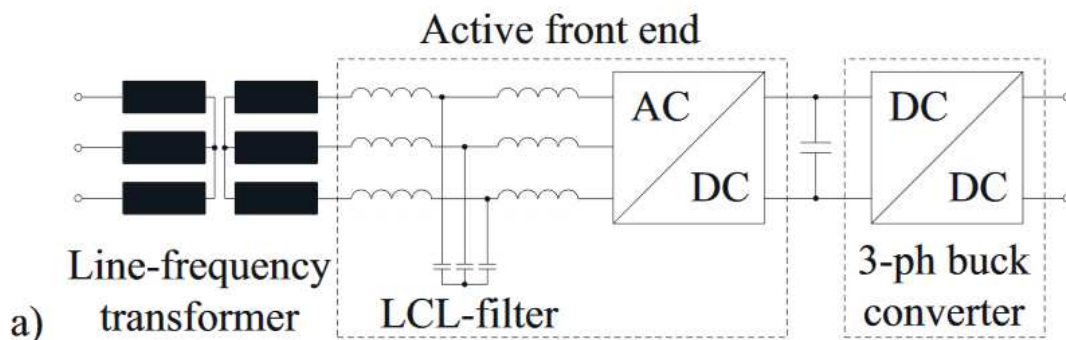
2.2 Topologie s nízkofrekvenčním transformátorem

Druhou topologií je kombinace síťového transformátoru, filtru, usměrňovače a DC/DC měniče (bez galvanického oddělení). Síťový transformátor slouží ke galvanickému oddělení rozvodné sítě od vysokonapětového okruhu vozidla a za ním je umístěn vstupní LCL filtr kvůli rušení. Následuje třífázový aktivní usměrňovač, který zajišťuje regulaci účinníku a produkuje stejnosměrné napětí v meziobvodu (nemusí se jednat nutně o aktivní usměrňovač, v některých stanicích je využit pouze pasivní, ovšem za cenu zhoršených vlastností stanice, kupříkladu není možné vracet energii zpět do

sítě). Galvanicky neoddělený DC/DC měnič pak zajišťuje regulaci DC napětí na požadovanou hodnotu dle dobíjecího cyklu. Topologie je popsána v článku „Ultra-Fast DC-Charge Infrastructures for EV-Mobility and Future Smart Grids“ [18].

Jedním z velkých výrobců používajících tuto topologii je společnost Siemens. Ta ve svých dobíjecích stanicích instaluje svoje osvědčené DC/DC měniče řady Sinamics DCP (to je zřejmě jeden z hlavních důvodů, proč se společnost Siemens uchýlila k této topologii, měla DCP měniče už vyvinuté a otestované, což společnost ABB neměla a musela by vyvíjet svoje) [19].

Musíme však říci, že topologie se síťovým transformátorem a DC/DC měniči není v zásadě horší než topologie se spínanými zdroji využívána společností ABB. Liší se pouze v nutnosti instalace většího vstupního transformátoru pro celou stanici (v případě poruchy je stanice nepoužitelná), na druhou stranu má jednodušší (a spolehlivější) elektroniku, tudíž menší poruchovost.



Obrázek 11 - Schéma topologie s využitím síťového transformátoru. Jako DC/DC měniče jsou ve stanicích od společnosti Siemens využity jejich Sinamics DCP. Společnost ABB dříve také testovala tento princip, nakonec však vyvinula své výkonové moduly (spínané zdroje). [18]

2.3 Koncept dobíjecí stanice se sdíleným výkonem

Je vhodné, aby jedna dobíjecí stanice byla schopna obsloužit více dobíjecích vozidel, a to ať už z důvodu toho, že různá vozidla mívají různé dobíjecí standardy (nejčastěji CCS a CHAdeMO), popřípadě aby bylo možné dobíjet více vozidel (v uvažovaném případě dvě) najednou.

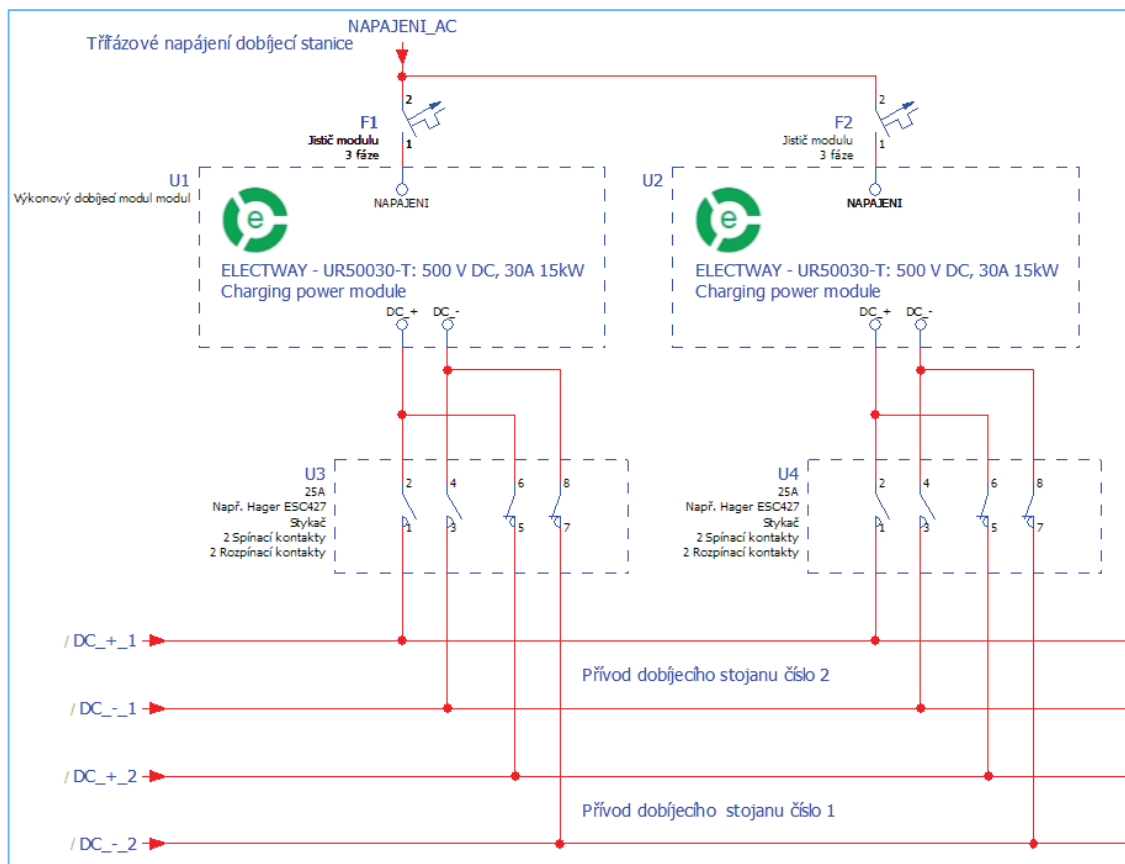
V tomto případě jsme navrhli nejjednodušší řešení pomocí stykačové logiky s využitím standardních průmyslových stykačů, které mají dva spínací a dva rozpínací kontakty. Tyto stykače směřují tok stejnosměrného proudu z výkonového dobíjecího modulu do jednoho či druhého dobíjecího stojanu (respektive vozidlové zásuvky). Stykače slouží pouze k určení směru toku stejnosměrného proudu, tudíž se přepínají pouze při vypnutém výstupu dobíjecího modulu, čímž zamezíme vznikům oblouků a můžeme použít stykače s nižším jmenovitým proudem než v případě přepínání se zapnutými dobíjecími moduly.

Řízení stykačů by v tomto návrhu mělo na starost nadřazené PLC, které by řídilo spínání a rozpínání kontaktů. Každý stojan (či dokonce zásuvka) by pak musel mít svůj řídicí mikrokontrolér (v případě CCS standardu bude brzy v prodeji řídicí jednotka dobíjení od společnosti Phoenix Contact. CHAdeMO lze realizovat pomocí běžného průmyslového PLC s CAN komunikačním modulem. Pro realizaci funkčního učebního modelu stanice bude dočasně využito vývojového kitu Raspberry Pi s CAN shieldem, dokud nebude uvolněn do výroby kontrolér od společnosti Phoenix Contact.).

Přívod každého výkonového modulu je zvlášť jištěn jističem (můžeme použít i stykač, ale jistič je dostačující), aby mohl být v případě poruchy vypnut a vyměněn bez vlivu na chod zbytku stanice (stanice bude mít pouze snížený dobíjecí výkon a v případě našeho řešení bude fungovat pouze jeden stojan). V reálném případě se však využívá více dobíjecích modulů na jednu stanicí (Tesla Supercharger – 12 modulů), kde je vliv jednoho rozbitého modulu minimální.

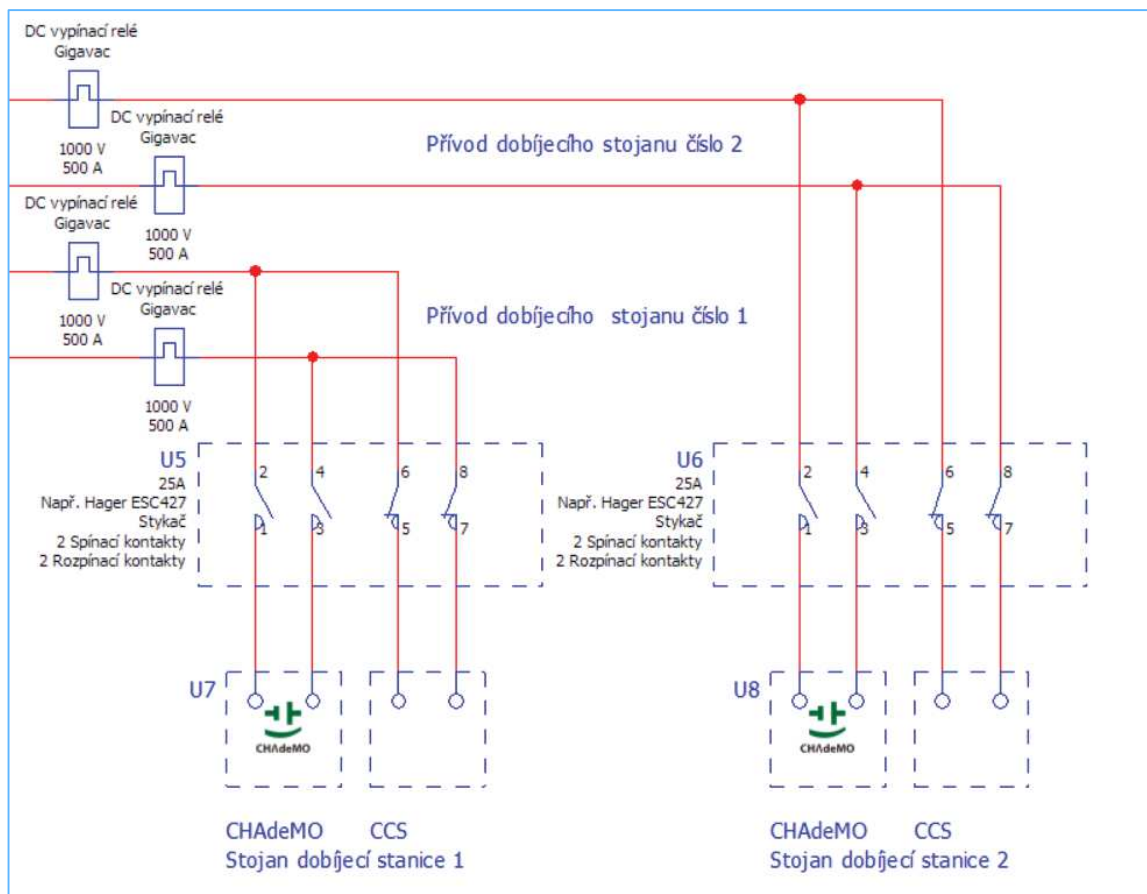
Zjednodušený návrh sdílení výkonu dobíjecí stanice najdeme v Nevázané příloze 1. Jedná se o „EPLAN“ schéma, kde jsou zjednodušeně znázorněny pouze výkonové prvky a řídicí elektronika je zanedbána.

Na Obrázku 12 můžeme vidět první část návrhu. Nachází se zde dva dobíjecí moduly (v reálu jich samozřejmě může být více), které jsou jištěny třífázovým jističem (v návrhu použita zjednodušená forma – jednofázový jistič). Dále zde vidíme nákresy dvou stykačů se spínacími a rozpínacími kontakty (opět se jedná o zjednodušení z důvodu větší zřejmosti principu). Stykače se mohou přepnout až po potvrzení vypnutí výstupu dobíjecího modulu, což by bylo řešeno softwarově. Následují dvě dvojice výkonových dobíjecích vodičů (na schématu označeny DC_+ a DC_-).



Obrázek 12 - První část návrhu sdílení výkonu. V horní části vidíme jištěné dobíjecí moduly, níže se nacházejí dva stykače, které dokáží přepínat výkon na dvě dvojice výkonových dobíjecích vodičů k jednotlivým stojanům.

Na Obrázku 13 jsou pak velmi zjednodušeně znázorněny dva typy dobíjecích zásuvek (CCS a CHAdeMO), ke kterým je stejnosměrný proud přiveden opět přes dva stykače, a i v tomto případě samozřejmě musí platit, že k přepnutí stavu stykače může dojít až po potvrzení vypnutí výstupu dobíjecího modulu. Problémem zůstává, že komunikace vozidla se stanicí ve standardu CCS se zásadně liší od komunikace ve standardu CHAdeMO.



Obrázek 13 - Druhá část návrhu principu sdílení výkonu. Vidíme zde 4 dobíjecí zásuvky, na každém stojanu CCS a CHAdeMO. Přívodní kabely do stanice jsou chráněny ochranným relé od společnosti Gigavac (800 V/350 A).

V současné době je směřování výkonu minimálně mezi dvě dobíjecí zásuvky (CCS a CHAdeMO, nebývá to však dělení v poměru 50/50, ale spíše určení jedné aktivní zásuvky) bezpodmínečné u téměř každé veřejné rychlo-dobíjecí stanice a to z důvodu velkého počtu různých dobíjecích standardů. Jednou z prvních „vlastovek“ možného zlepšení situace je dohoda evropských

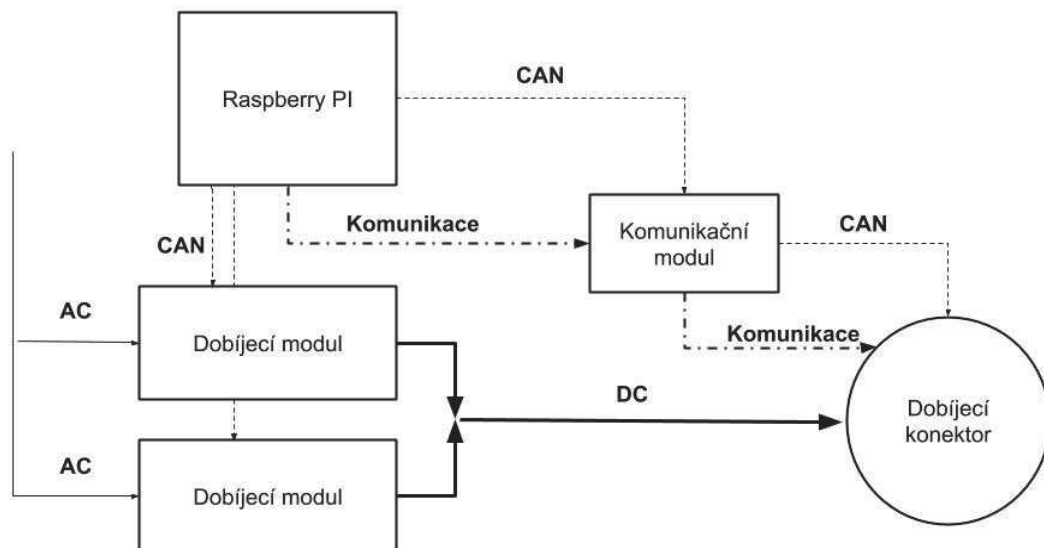
automobilek a EU k prosazování standardu CCS na území evropských států [20]. Výjimkou však nadále zůstává automobilka Tesla, která bude instalovat svoji dobíjecí stanici Supercharger (na území Evropské unie je však Tesla nově povinna instalovat na své dobíjecí stanice zásuvky standardu CCS.)

3. NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ STANICE

Další částí této diplomové práce je návrh experimentálního modelu rychlodobíjecí DC stanice fungující na standardu CHAdeMO dle norem 61851 (části 1, 23 a 24) [3]. Návrh dobíjecí stanice je postaven na základě topologie s využitím dvou spínaných zdrojů (výkonové dobíjecí moduly Electway UR50030-E, viz 3.1 Topologie s vysokofrekvenčním transformátorem).

Komunikaci mezi stanicí (moduly, uživatelským rozhraním) a vozidlem zajišťuje řídicí počítač Raspberry PI, ve kterém bude naprogramován základní protokol komunikace CAN daný normou ČSN EN 61851-24 a také základní funkce dobíjecí stanice (ukazatel spotřeby, doba trvání dobíjecího cyklu, indikace chyb, atd.), naprogramování řídicího počítače není předmětem této diplomové práce.

Na Obrázku 14 můžeme vidět velmi zjednodušený blokový diagram modelu dobíjecí stanice. Jsou zde načrtnuty dva výkonové dobíjecí moduly (napájené ze sítě), řídicí počítač, komunikační modul a dobíjecí konektor.



Obrázek 14 - Principiální schéma modelu dobíjecí stanice. Čáry znázorňují kabely a chybí zde velká část přístrojů (jističe, pojistky...).

3.1 Použité součástky a přístroje

V této části představím hlavní součástky a přístroje, které jsem v návrhu použil. Vynechány jsou některé méně podstatné součástky (svorky, nulové sběrnice...), jejichž podrobný popis je zbytečný (některé budou popsány v dalších kapitolách).

3.1.1 HLAVNÍ JISTIČ

Základní jisticí prvek, který slouží převážně jako hlavní vypínací prvek (jelikož model je napájen z klasické třífázové zásuvky, která je už sama o sobě jištěna), je třífázový jistič B63/3 (například od Schrack, OEZ, atd.). V případě reálné instalace by zde ještě musel být nouzový vypínač, ten však v tomto demonstračním modelu vynecháváme.

3.1.2 ZDROJ DC 12 V

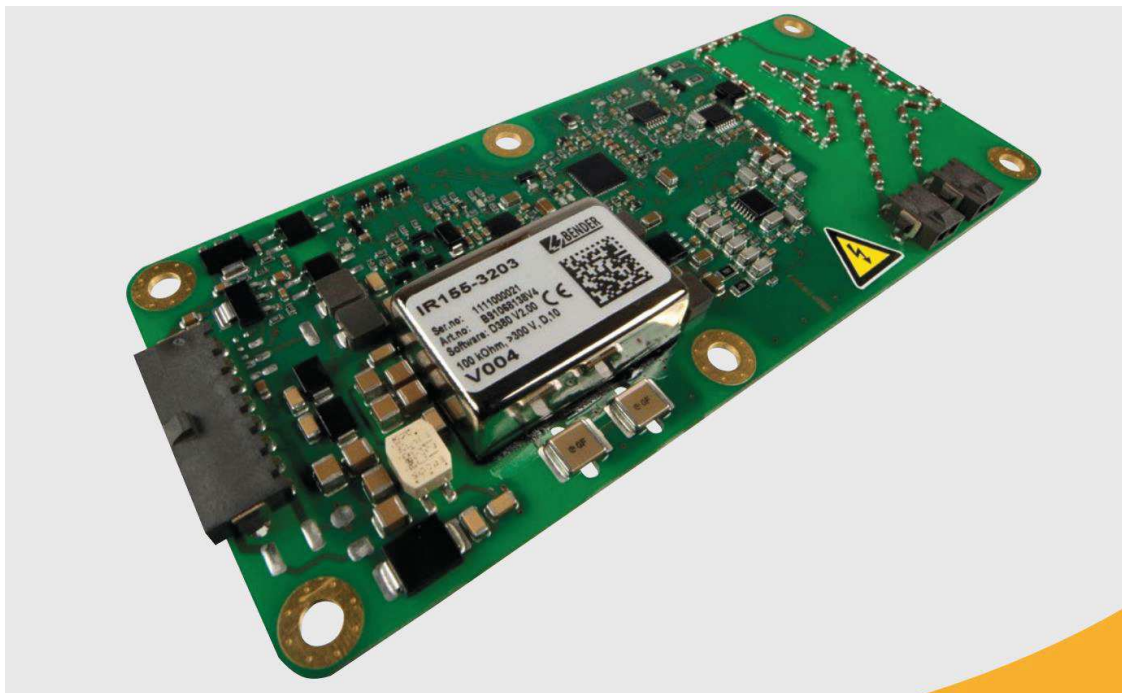
Ke spínání hlavního dobíjecího stykače umístěného ve stanici a ke komunikaci mezi stanicí a dobíjeným vozidlem dle standardu CHAdeMO je, kromě CAN, potřeba také DC 12 V. To nám v modelu poskytne zdroj od společnosti Phoenix Contact UNO-PS/1AC/12DC/30W.

3.1.3 HLÍDAČ IZOLAČNÍHO STAVU

Jednou z funkcí, kterou musí DC rychlodobíjecí stanice dle normy obsahovat, je „trvalá kontrola spojitosti ochranného vodiče“. Norma přesně říká: „Stanice systému A (CHAdeMO) musí měřit unikající proud mezi sekundárním obvodem a svým krytem nebo mezi sekundárním obvodem a podvozkem

vozidla.“ [3] Tuto funkci zajišťuje přístroj ISOMETER IR155-3203 od společnosti Bender.

Norma dále říká, že maximální detekční čas poruchy musí být menší než 1 s a zároveň minimální reakční čas musí být vyšší než 0,2 s (prevence falešné poruchy). V případě poruchy se stavový výstup ISOMETERU OK_{HS} přepne z 2 V (bezporuchový stav) na 0 V (porucha).



Obrázek 15 - Bender ISOMETER - IR155-3202 obsahuje dva druhy výstupů - OK (pouze status, 2 V – 0 V) a PWM (data výstup, různé frekvence jsou různé stavy izolačního odporu). [21]

3.1.4 RASPBERRY PI A SHIELD PRO CAN KOMUNIKACI

K řízení stanice je použit řídicí počítač Raspberry PI 3 model B. Jeho vstupy a výstupy GPIO (3,3 V, 5 V a 0 V) jsou využity k ovládní jednotlivých spínačů, které jsou definovány v normě (pomocí „komunikačního modulu“, viz 4.1.8 Komunikační převodník) a zajišťuje komunikaci po protokolu CAN (k tomu je na Raspberry připevněn rozšiřující CAN board PiCAN2 Duo) mezi vozidlem a stanicí. Raspberry PI a obrazovka pro uživatelské rozhraní jsou

napájeny svými napájecími zdroji, které jsou umístěny v zásuvkách uvnitř dobíjecí stanice.

3.1.5 STYKAČ VE STANICI

Stanice obsahuje stykače na DC silových vodičích (takové stykače jsou však dle normy na straně vozidla) z důvodu bezpečnosti a pro případ budoucích změn. Jedná se o výkonové stykače pro stejnosměrný proud od společnosti Gigavac, typ GX23BA, které jsou řízeny cívkou o napětí 12 V, maximální proud je až 350 A a pracovní napětí se pohybuje až po 800 V.



Obrázek 16 - Výkonový stejnosměrný stykač Gigavac GX23BA. Jeho přítomnost ve stanici není vyžadována normou. Je umístěn jak na DC+, tak i na DC-. [22]

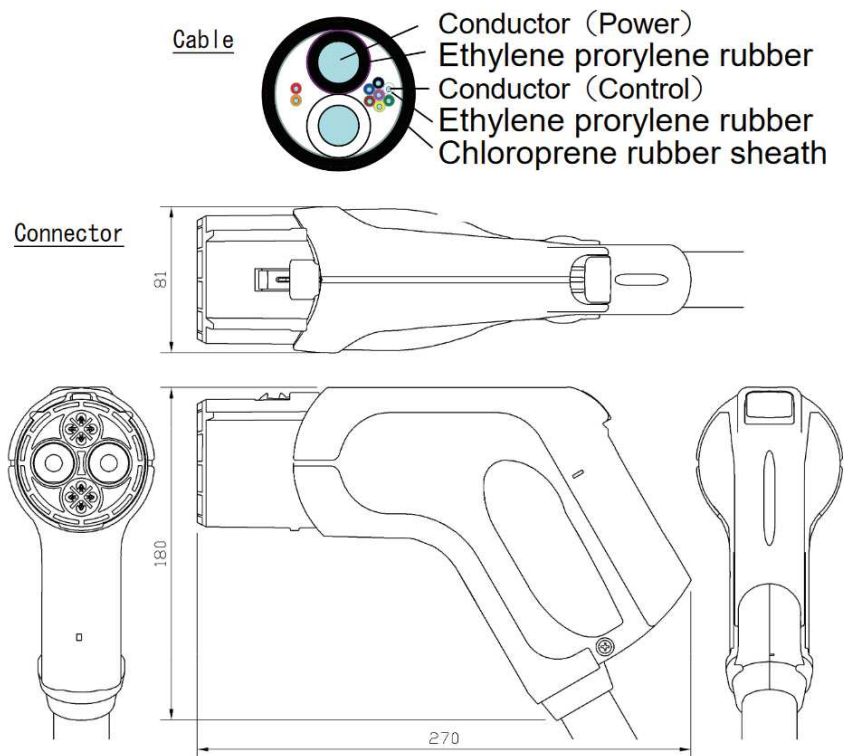
3.1.6 JIŠTĚNÍ DC VÝSTUPU

Norma říká, že ve výstupním obvodu dobíjecí stanice (výkonový DC výstup) musí být umístěna nadproudová ochrana, aby zabránila nebezpečí při případné poruše modulu. Z tohoto důvodu je na kladném výstupu každého

výkonového dobíjecího modulu navržen pojistkový odpojovač Noark Ex9FPN 40A, který tuto ochranu bez problému zastane.

3.1.7 DOBÍJECÍ KABEL

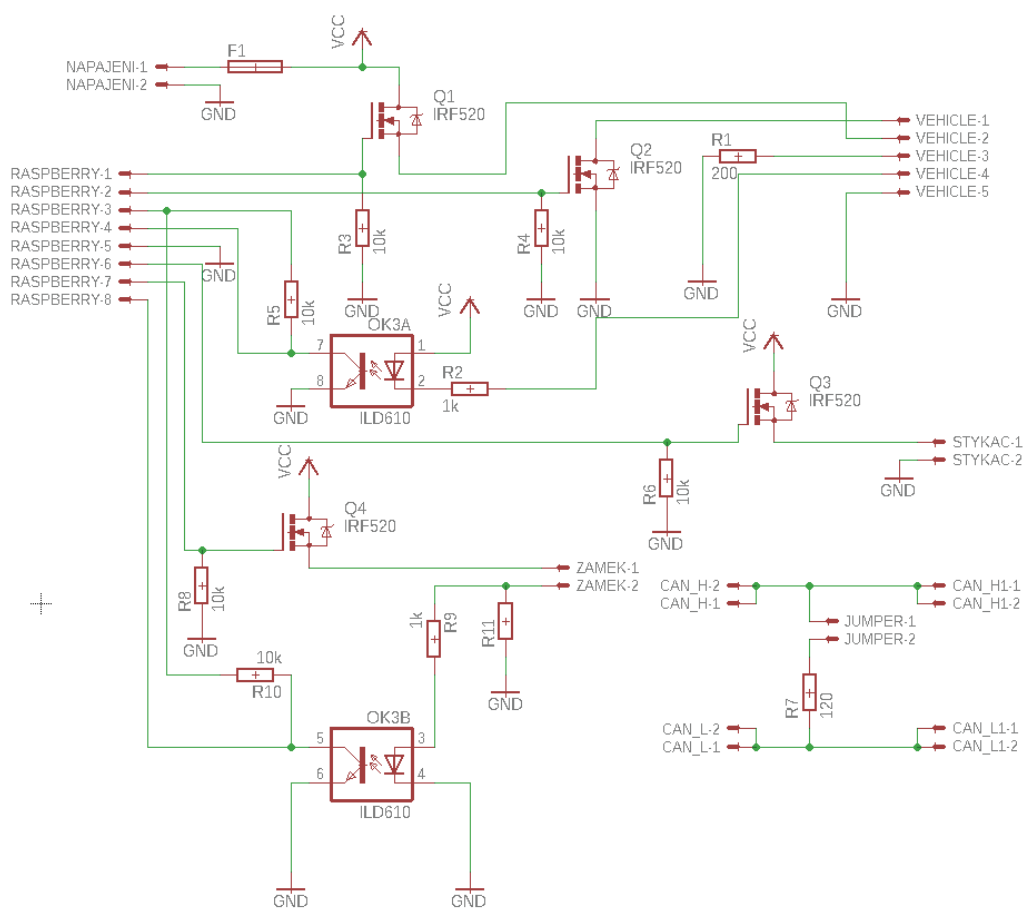
Dobíjecí kabel je od společnosti Fujikura, typ E55057-35. Jedná se o 5 m dlouhý kabel obsahující 11 vodičů daných normou [3] (2 výkonové, zbytek signalizace a komunikace) s dobíjecím CHAdeMO konektorem pistolového tvaru se zamykačím tlačítkem a indikační LED. Dobíjecí proud může být až 125 A (výkonové vodiče mají průřez 35 mm², ostatní pak 0,75 mm², přesně jak je řečeno v normě). Zámek dobíjecího konektoru je řešen 12 V solenoidem a k vytažení konektoru ze zásuvky je potřeba síla 100 N.



Obrázek 17 - Nákres dobíjecího kabelu. V horní části můžeme vidět průřez dobíjecího kabelu se dvěma silovými DC vodiči a osmi řídicími vodiči. Ve spodní části nákresu vidíme dobíjecí konektor zobrazený ze čtyř stran. [23]

3.1.8 KOMUNIKAČNÍ PŘEVODNÍK

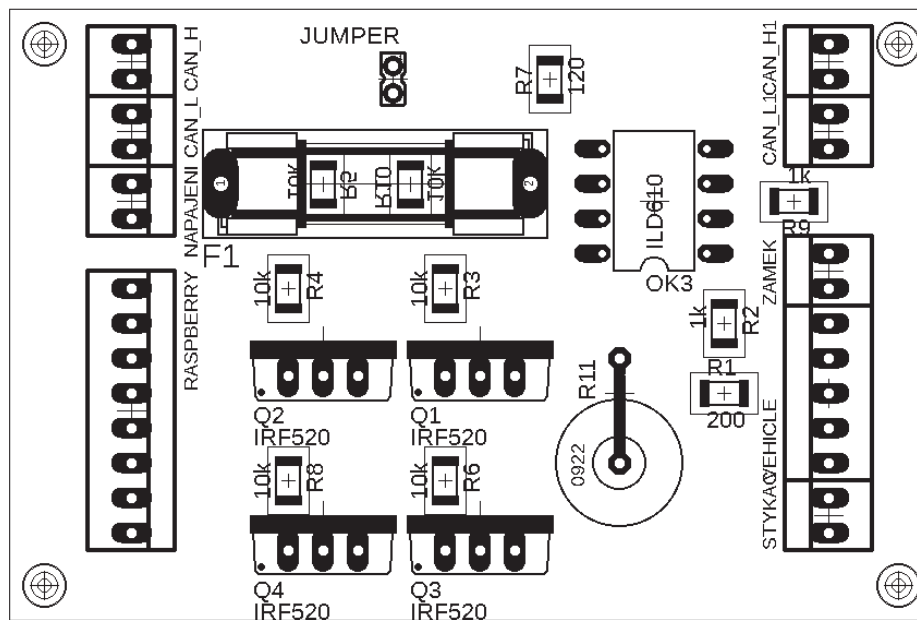
Komunikace mezi stanicí a vozidlem dle standardu CHAdeMO musí být řešena signálem o hodnotě 12 V stejnosměrně. Tato hodnota se používá také k zamykání zámku na dobíjecím konektoru a k ovládání výkonového stykače ve stanici. Výstupy počítače Raspberry PI jsou však na úrovni maximálně 5 V. Z tohoto důvodu jsem navrhl jednoduchý převodník, díky kterému může Raspberry PI ovládat i napětí na úrovni 12 V. Napájení převodníku je pomocí výše zmíněného zdroje (4.1.2 Zdroj 12 V).



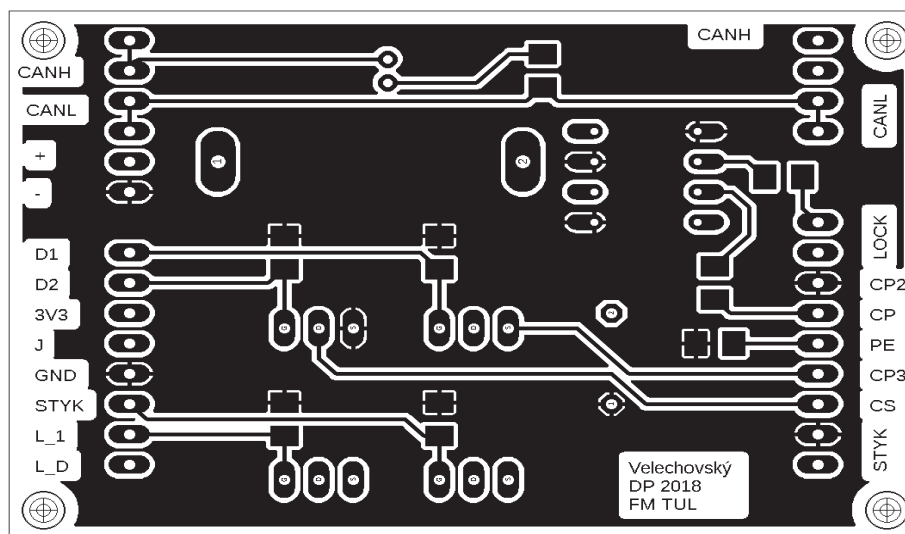
Obrázek 18 - Schéma převodníku. Převodník slouží pro zajištění řízení systému, pomocí vstupů a výstupů GPIO Raspberry PI.

Převodník obstarává dvě základní funkce. První funkcí je spínání spínačů pro komunikaci s vozidlem (dle normy nazvané d_1 , d_2 , spínané napětí je 12 V [3]), spínání cívky stykače (12 V) a spínání přívodu napětí k zámku dobíjecího konektoru (12 V). Tato funkce je řešena pomocí tranzistorů IRF520, na jejichž gate je přiveden signál z výstupu počítače Raspberry PI (GPIO – 3,3 V). Tímto je tranzistor sepnut a na výstupní pin převodníku je přivedeno napětí 12 V (spínač d_1 , výstup CP, viz obrázek 3, spínač cívky stykače a zámku dobíjecího konektoru), případně je vstupní signál přiveden na zem (spínač d_2 , výstup CP2, viz Obrázek 4).

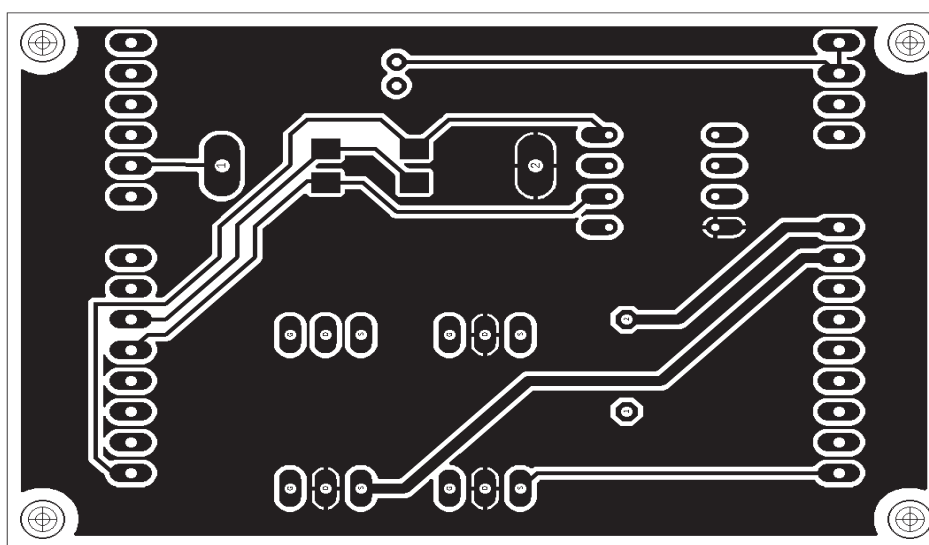
Druhou funkcí převodníku je detekce sepnutí vstupního signálu. K tomuto řešení jsou v převodníku navrženy optočleny ILD610, kde jeden detekuje sepnutí spínače k ve vozidle (optočlen j , výstup CP3, viz Obrázek 4) a druhý detekuje správné zamčení zámku dobíjecího konektoru. Na převodníku je z jedné strany přiveden a z druhé vyveden CAN signál, přičemž můžeme pomocí jumperu připojit nebo odpojit 120Ω terminálový rezistor.



Obrázek 19 – Plošný spoj komunikačního převodníku. V levé části jsou umístěny vstupy a výstupy do Raspberry PI, v pravé se pak nacházejí vstupy a výstupy do vozidla (dobíjecího kabelu) a na stykač.



Obrázek 21 - Vrstva "top" plošného spoje komunikačního převodníku



Obrázek 20 - Vrstva "bottom" plošného spoje komunikačního převodníku

3.1.9 VÝKONOVÉ DOBÍJECÍ MODULY

Jak již je uvedeno v kapitole 3.1 (Topologie s vysokofrekvenčním transformátorem), je tento demonstrativní model navržen s použitím dvou výkonových dobíjecích modulů od firmy Electway, typ UR50030-E (výstupní

napětí až 500 V, proud až 37,5 A). Moduly bývají běžně instalovány do „šuplíkových“ racků (tedy při případném servisu či výměně se modul nemusí náročně odpojovat, ale stačí ho pouze vytáhnout a zasunout nový), které nám bohužel společnost Electway nezaslala. Připojení tak musí být klasické, tedy pomocí svorek.

Výrobce udává, že moduly mohou pracovat až do teploty okolí 65 °C (v klasických uzavřených stanicích musí být přídavná ventilace, tu v tomto otevřeném demonstrativním modelu můžeme vynechat) a až do výšky 1000 m n. m..

Dále je výrobcem deklarováno stejnosměrné výstupní napětí 150–500 V, výstupní proud 1–37,5 A, zapnutí dobíjecího procesu do 8 s, maximální zvlnění výstupu menší než 1 % a přesnost úrovně výstupního proudu a napětí menší než 0,5 %. Hluk přístroje za chodu by neměl (ve vzdálenosti 1 m) překročit hodnotu 60 dB. Tyto hodnoty jsou ověřeny vlastním měřením v kapitole 5 (Měření vybraných parametrů výkonového dobíjecího modulu) [17].

Dalšími ochrannými funkcemi těchto modulů je například:

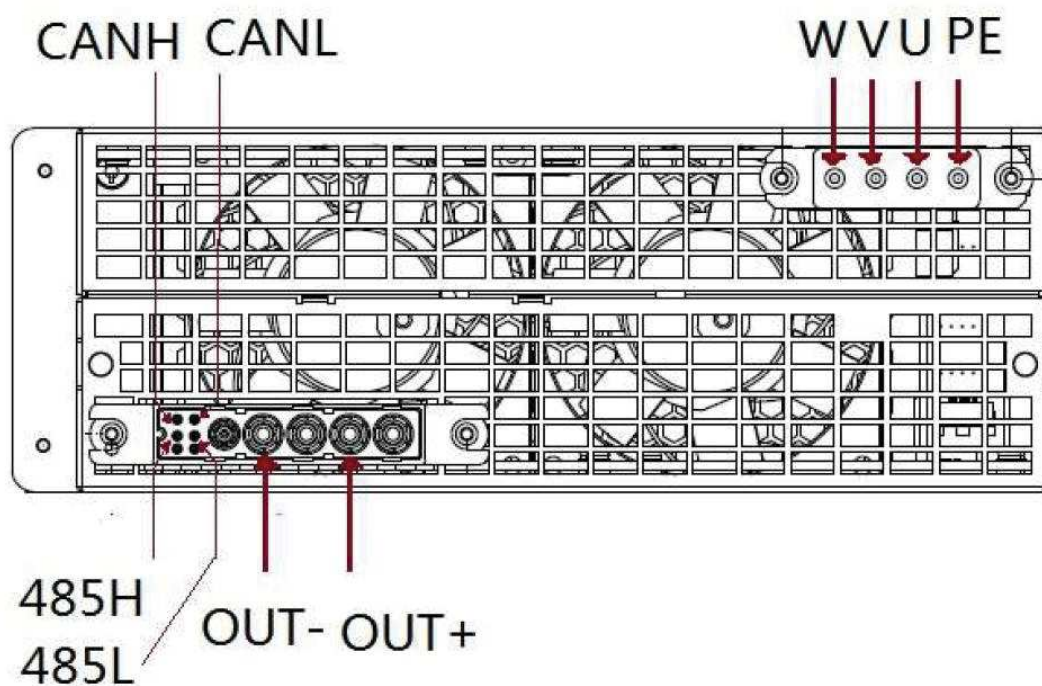
- Ochrana proti zkratu
- Ochrana proti přepětí na výstupu (500 V ± 10 V)
- Ochrana proti přepětí na vstupu (120 %)
- Ochrana proti podpětí na vstupu (80 %)
- Ochrana proti přehřátí modulu
- Vypnutí při jedné chybějící fázi na vstupu

Po sběrnici CAN modul obsahuje tyto funkce:

- Vzdálená komunikace (real-time statusy ochran a chyb)
- Vzdálený monitoring (hodnoty napětí, proudu, jakož i údaje o dělení výkonu mezi jednotlivými moduly)
- Vzdálené ovládání (zapnutí, vypnutí...)
- Vzdálená regulace (regulace výstupního proudu)

Díky možnosti ovládat, regulovat a přijímat data od modulu pomocí sběrnice CAN lze vytvořit relativně snadný program, který by (na základě normy ČSN EN 61851) zajišťoval základní řízení komunikace mezi modulem a dobíjeným vozidlem (viz kapitola 2.1 CHAdeMO).

Modul také obsahuje jednoduché menu (displej a dvě tlačítka), pomocí kterých můžeme přepínat mezi manuálním a automatickým módem, zjišťovat aktuální nastavení modulu (případně ho měnit) a kde se zobrazují případné poruchy. Dále jsou na přední straně modulu tři LED, přičemž zelená slouží k indikaci pracovního statusu, žlutá k indikaci stavu ochrany a červená k indikaci poruchy.



Obrázek 22 - Výkonový dobíjecí modul. Na nákresu vidíme zadní část výkonového dobíjecího modulu Electway UR50030-E. V pravém horním rohu se nachází vstupní napájecí svorky, vlevo dole pak DC výstup (OUT) a CAN komunikace. RS485 je v tomto návrhu nevyužit. V přední části modulu se nachází displej, dvě ovládací tlačítka a několik indikačních LED. [17]

3.2 Schéma v programu EPLAN

Schématický návrh demonstračního modelu rychlodobíjecí stanice pro elektromobily vytvořený v programu EPLAN (verze 2.6, licence Education), se skládá z šesti schématických listů a můžeme ho najít na konci této práce jako Nevázanou přílohu 2.

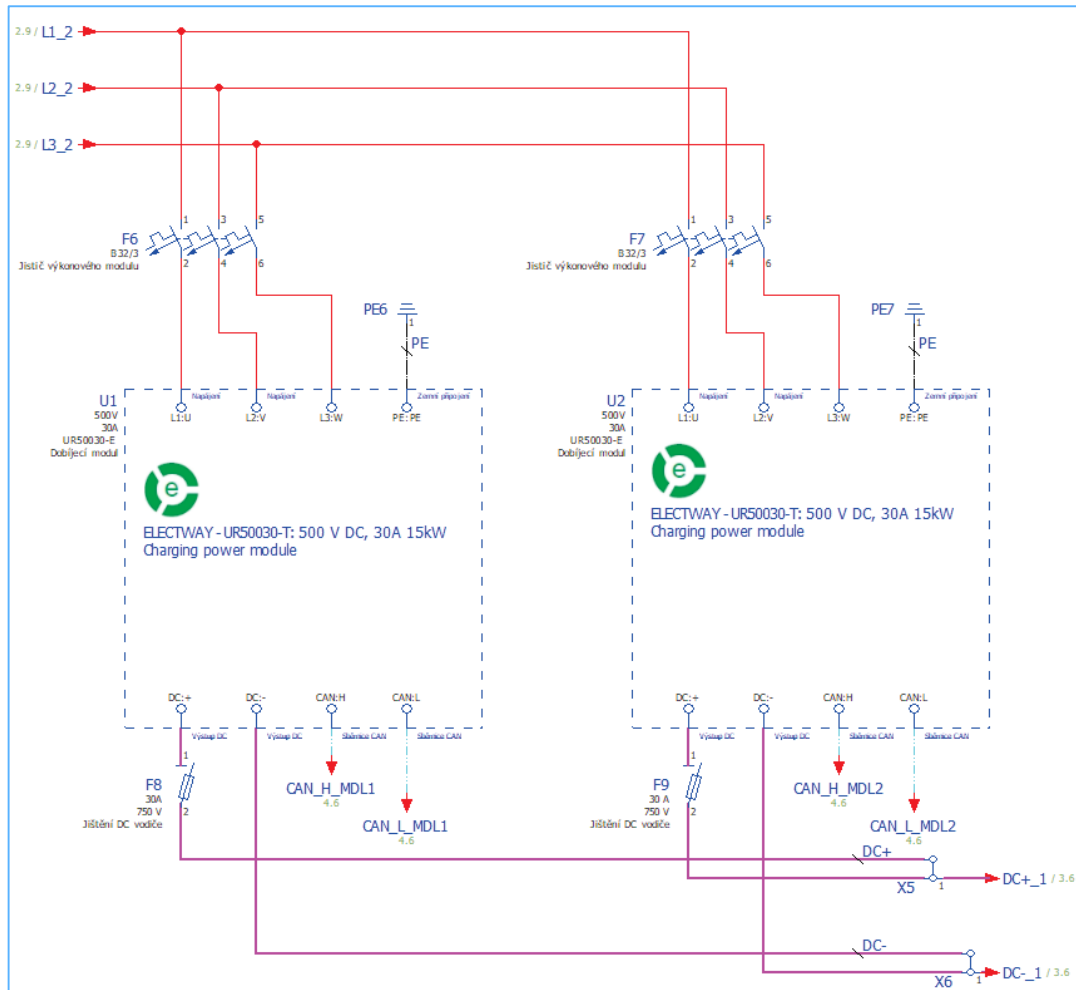
Silové DC vodiče uvnitř modelu stanice (dalo by se říci v rozváděči) jsou navrženy na průřez 6 mm^2 (za jednotlivými výkonovými dobíjecími moduly, za DC svorkami, tzn. po spojení výstupů modulů, se průřez zvyšuje na 10 mm^2), komunikační vodiče pak o průřezu $0,75 \text{ mm}^2$.

Na prvním listu (1 Přívod) jsou zakresleny přívodní svorky napájení stanice (to je řešeno pěti-žilovým napájecím kabelem ukončeným třífázovou vidlicí do zásuvky), u kterých jsou uvedeny její připojovací podmínky (v těch je uvedena nutná přepětová ochrana na straně napájecí sítě, což bude v tomto případě splněno, jelikož stanice bude napájena z třífázové zásuvky uvnitř budovy „L“ Technické univerzity v Liberci, která již je přepětovou ochranou chráněna. S přepětovou ochranou uvnitř modelu stanice se tedy nepočítá, i když by zde dle normy být měla. [3]) Dále je na tomto listu navržen hlavní jistič (viz 4.1.1 Hlavní jistič), ještě před ním je však umístěna samostatně jištěná servisní zásuvka (funkční i při vypnutém hlavním jističi). Za jističem se pak nacházejí dvě jištěné zásuvky (B6/1) pro připojení napájecího zdroje řídicího počítače Raspberry PI a obrazovky (viz 4.1.4 Raspberry PI).

Druhý list (2 Zdroj DC 12 V) obsahuje pouze (B6/1) pomocný zdroj napětí 12 V DC (viz 4.1.2 Zdroj 12 V). Výstupy z tohoto zdroje jsou pak pomocí několika svorek rozvedeny do různých částí stanice (schématu).

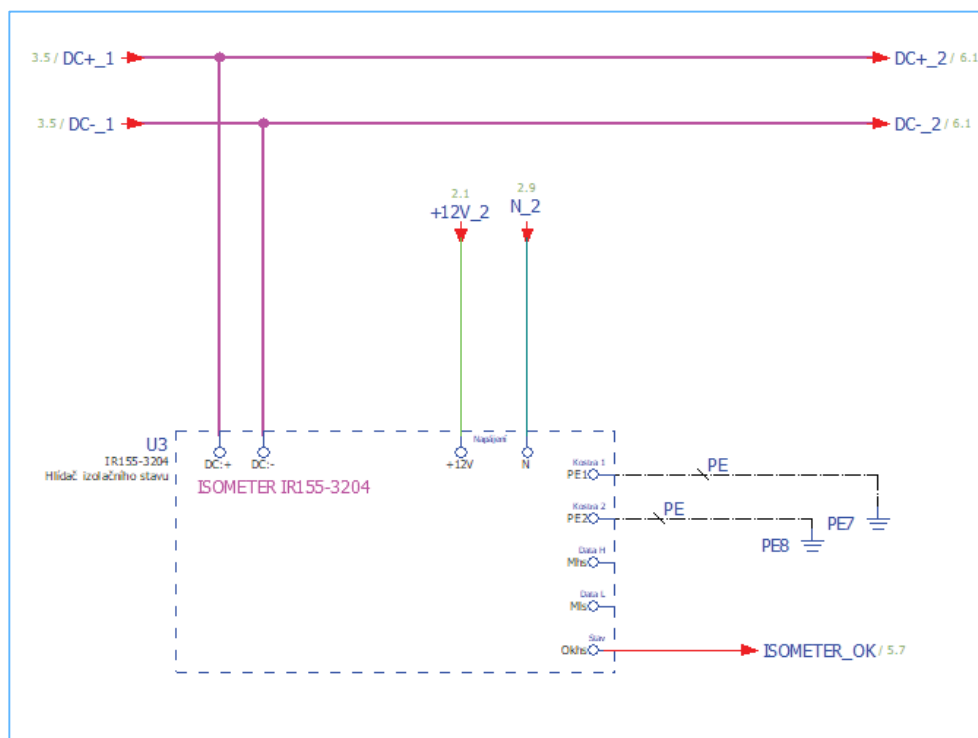
Na třetím listu (3 Výkonové moduly, Obrázek 23) je navrženo zapojení dvou výkonových modulů a hlídač izolačního stavu. Výkonové dobíjecí moduly (viz 4.1.9 Výkonové dobíjecí moduly) jsou jištěny dvěma jističi (B32/3), aby mohl být vypnut od napájení každý zvlášť (v případě poruchy, výměny, atd.). Přívodní napájecí vodiče jsou dimenzovány na průřez 6 mm^2 (vodič

PE na 4 mm²). Kladná výstupní svorka (DC+) každého z modulů je jištěna pojistkovým odpojovačem (4.1.6 Jištění DC výstupu). Moduly jsou připojeny ke sběrnici CAN.



Obrázek 23 – Návrh zapojení výkonových dobíjecích modulů (U1 a U2) v programu EPLAN (levá část schématu). Každý modul má svoji adresu a je připojen na sběrnici CAN bus.

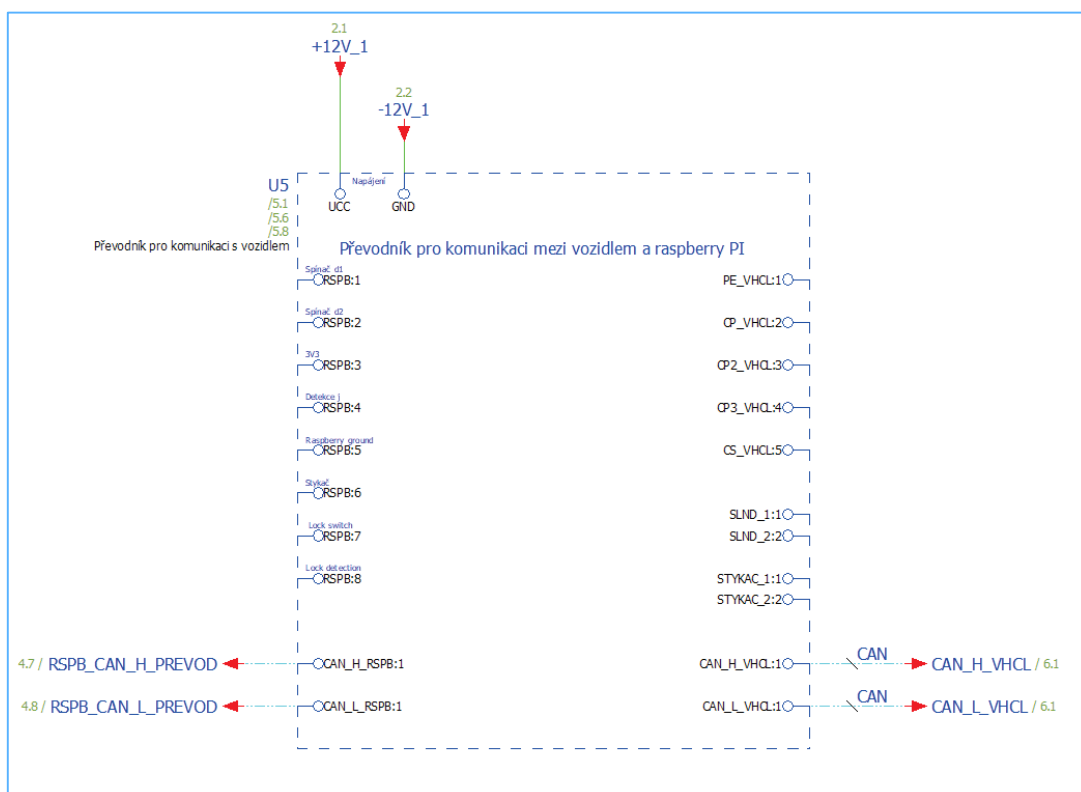
V pravé horní části třetího listu schématu je navrženo zapojení hlídače izolačního (viz 4.1.3 Hlídač izolačního stavu, Obrázek 24). Tento přístroj (U3) je zapojen paralelně k silovým DC vodičům vycházejícím z výkonových dobíjecích modulů, je napájen 12 V DC, ve dvou místech připojen na PE sběrnici a jeho výstup OK_{HS} je přiveden do řídicího počítače Raspberry PI (GPIO 5).



Obrázek 24 - Návrh zapojení hlídače izolačního stavu (U3). Datové výstupy MHS a MLS zůstávají nevyužity.

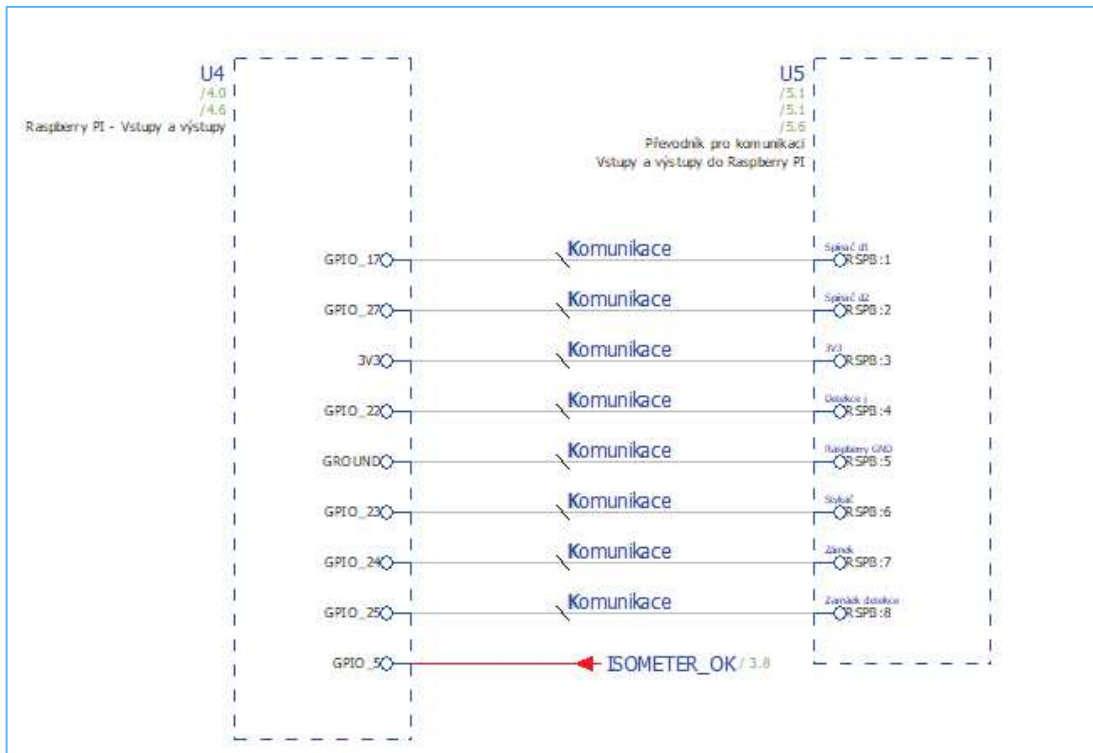
List číslo 4 (4 Raspberry PI) ukazuje v levé části zjednodušené schéma řídicího počítače Raspberry PI (jedná se o „black box“ pojmenovaný U4 se všemi GPIO vstupy a výstupy a zdírkami pro připojení napájení a obrazovky. Vstupy a výstupy zde nejsou obsazeny, jelikož je jejich využití ukázáno až na dalších listech projektu, protože je schéma počítače rozděleno na více částí, podobně jako se to dělá u PLC karet). V pravé části listu se pak nachází (opět zjednodušené) schéma přídatného boardu PiCAN2 DUO (pojmenován stejně jako Raspberry PI – U4), který umožňuje řídicímu počítači komunikaci po sběrnici CAN. Tento board je v reálu připevněn přímo na Raspberry PI pomocí jeho vstupů a výstupů GPIO, které však nechává volně k dispozici a využívá jen některé (GPIO 4, 26, 14, 15, 2, 3, SPI_MOSI, SPI_MISO, SPI_SCLK, SPI_CE0, SPI_CE1, 5 V, 3,3 V a GROUND). Kvůli přehlednosti schématu nejsou propojení těchto GPIO s Raspberry PI nakresleny, ale jsou pouze vypsány uvnitř schématu PiCAN2 DUO, na jehož spodní části se nachází dva páry výstupů pro CAN komunikaci (moduly a vozidlo) a také externí napájení 12 V.

List číslo 5 (5 Komunikační převodník) ukazuje zjednodušené schéma zapojení vstupů a výstupu komunikačního převodníku (U5) mezi Raspberry PI a vozidlem, stykačem a zámek dobíjecího konektoru. V levé horní části listu (Obrázek 25) se nachází celý převodník se všemi vstupy a výstupy (v tomto případě je však zapojen pouze CAN bus a napájení).

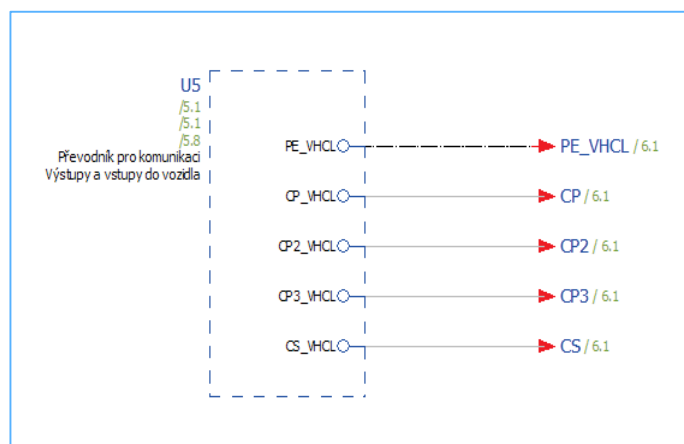


Obrázek 25 - Schéma komunikačního převodníku. Na levé straně jsou vstupy a výstupy pro Raspberry PI, v pravě pak vstupy a výstupy do vozidla (dobíjecího kabelu) a stykače.

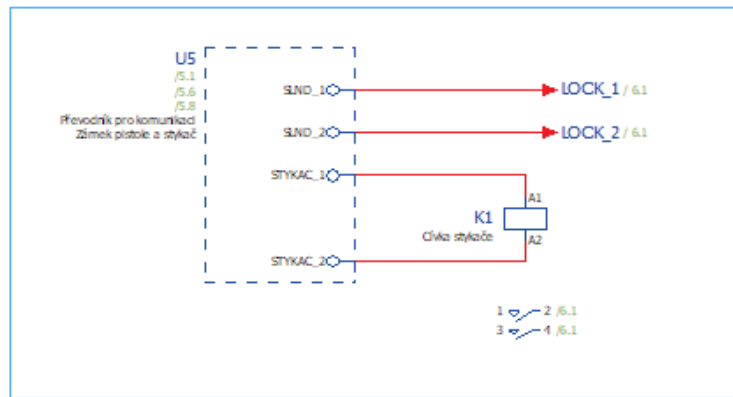
V pravé horní části tohoto listu (Obrázek 26) se nachází schéma propojení mezi Raspberry PI a komunikačním převodníkem, pod ním pak schéma propojení mezi převodníkem a vozidlem (respektive výstupními svorkami stanice, Obrázek 27) a v pravé dolní části listu pak propojení mezi komunikačním převodníkem a zámek dobíjecího konektoru a také stykačem (signály jsou opět přivedeny nejprve na výstupní svorky stanice, Obrázek 28).



Obrázek 26 - Propojení mezi Raspberry PI a komunikačním převodníkem. Na obrázku je zobrazeno propojení vstupů a výstupů řídicího počítače s vstupy a výstupy komunikačního převodníku. Vidíme, že spínače d1 a d2 ovládají GPIO výstupy číslo 17 a 27. Následuje přivedení napětí 3,3 V do převodníku. Detekce sepnutí spínače „j“ je přivedeno na GPIO číslo 22. Stykač je spínán výstupem GPIO číslo 23, zámek pak GPIO číslo 24 a detekce jeho zamknutí zajišťuje vstup GPIO 25. Na GPIO číslo 5 je přiveden poruchový signál z hlídače izolačního stavu (viz 4.1.3).

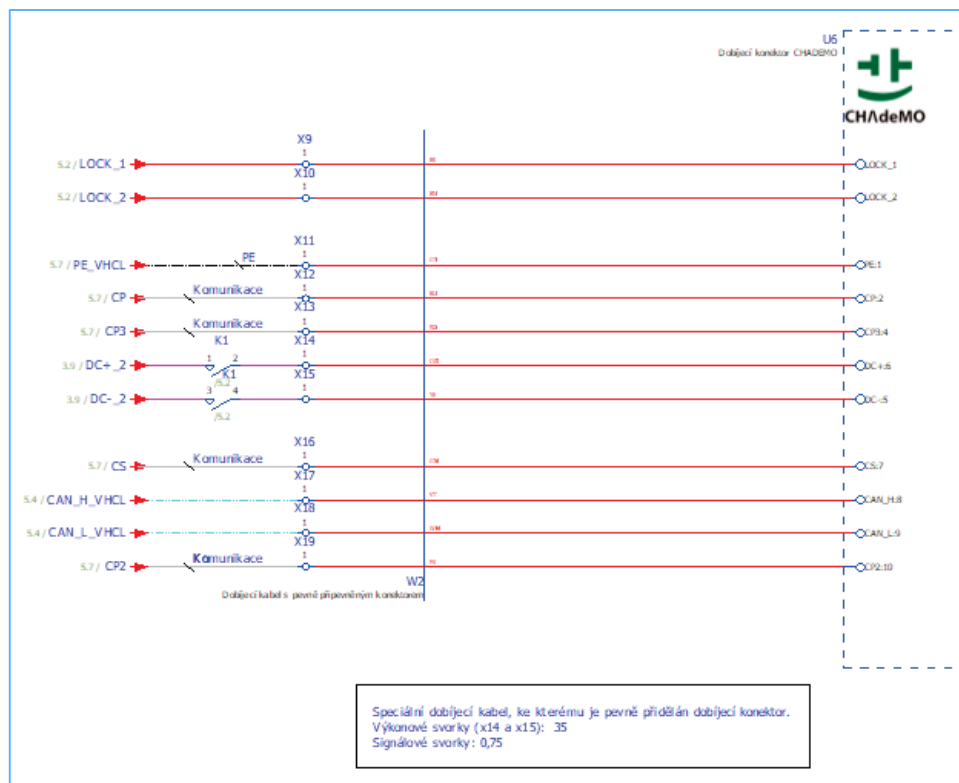


Obrázek 27 - Propojení mezi komunikačním převodníkem a vozidlem. Funkce, názvy a počet vodičů je dán normou (viz 2.1).



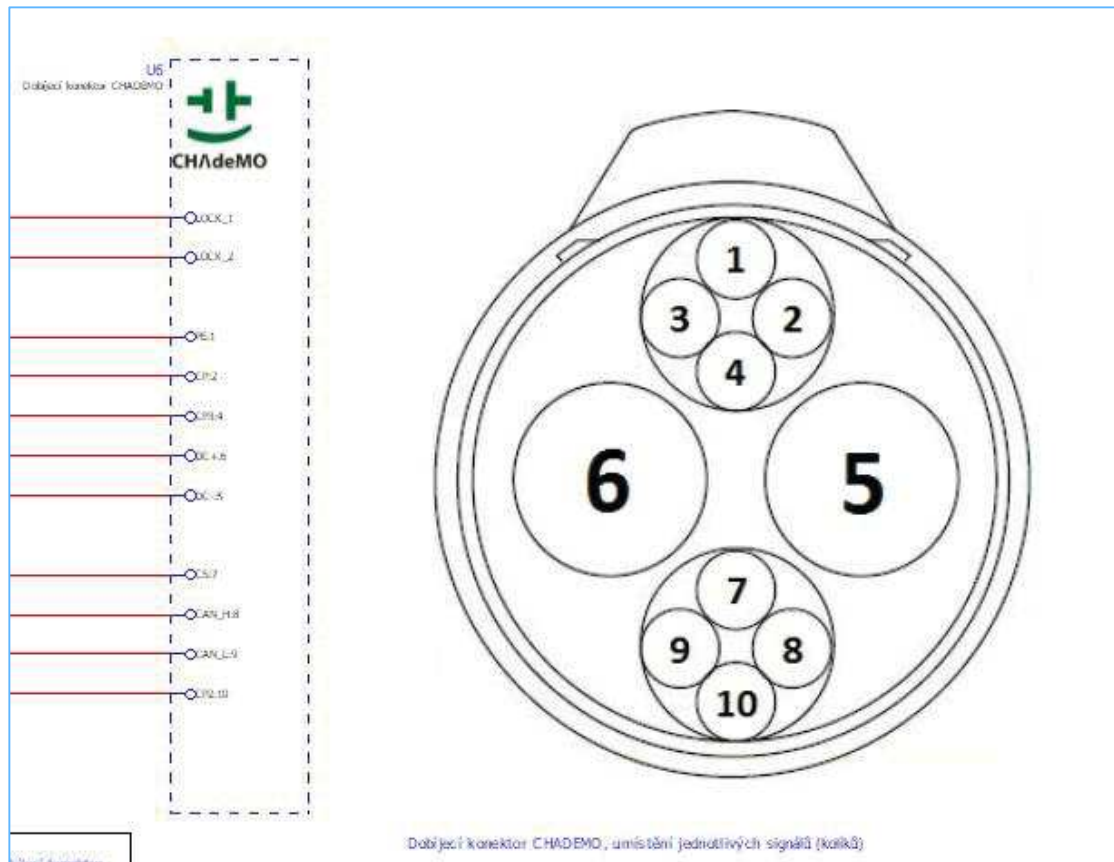
Obrázek 28 - Propojení mezi komunikačním převodníkem a zámkem dobíjecího konektoru (respektive stykačem).

Na posledním listu projektu (6 Dobíjecí kabel) se nacházejí výstupní svorky stanice, na kterých je připojen dobíjecí kabel (viz 4.1.7 Dobíjecí kabel). Na výkonových DC vodičích před svorkami jsou ještě spínací kontakty výstupních stykačů (viz 4.1.5 Stykač ve stanici). Dobíjecí kabel je nakreslen



Obrázek 29 - Výstupní svorky a dobíjecí kabel. Konektor kabelu zjednodušen do tvaru "black boxu". Na silových vodičích DC+ a DC- vidíme spínací kontakty stykačů.

zjednodušeně jako kabel a „black box“ se svorkami (U6, viz Obrázek 29), skutečný tvar je pak ukázán v pravé části listu (Obrázek 30).



Obrázek 30 - Reálný tvar konektoru CHAdeMO. Tento obrázek ve schématu má za úkol ukázat skutečné umístění jednotlivých pinů dobíjecího konektoru. Zámek konektoru na obrázku vpravo vyobrazen není.

4. MĚŘENÍ VYBRANÝCH PARAMETRŮ VÝKONOVÉHO DOBÍJECÍHO MODULU

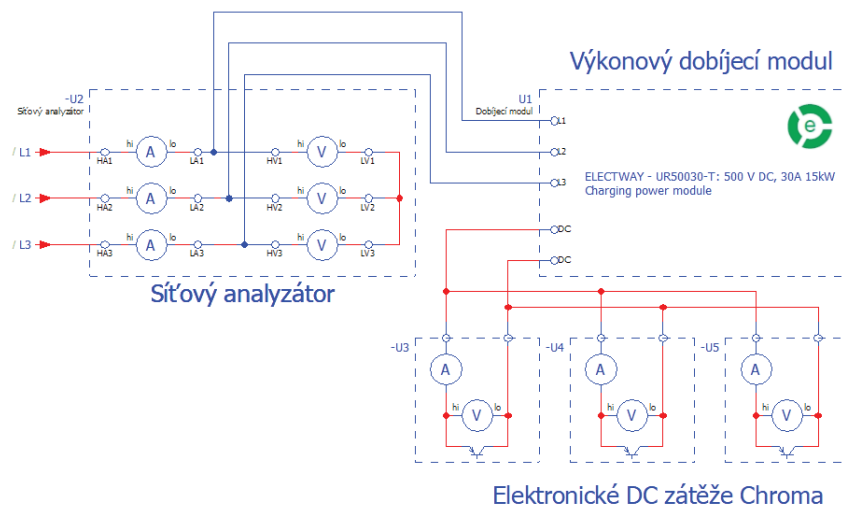
Poslední částí této diplomové práce je proměření a zanalyzování vstupních a výstupních parametrů modulů výkonového dobíjecího modulu Electway UR50030-E (viz 4.1.9 Výkonové dobíjecí moduly).

Jako měřicí přístroj je využit analyzátor sítě PA4400 od společnosti AV Power. Jedná se o třífázový síťový analyzátor, který dokáže měřit proud, napětí, výkon, power factor (účinník) a mnoho dalších veličin. Proudové omezení tohoto analyzátoru je 18 A, což je při zátěži, kterou používáme, (viz dále) dostatečné.



Obrázek 31 - Skutečné umístění měřicích přístrojů. V levé části obrázku vidíme síťový analyzátor (vepředu) a výkonový dobíjecí modul (vzadu). V pravé části se nacházejí programovatelné zátěže Chroma.

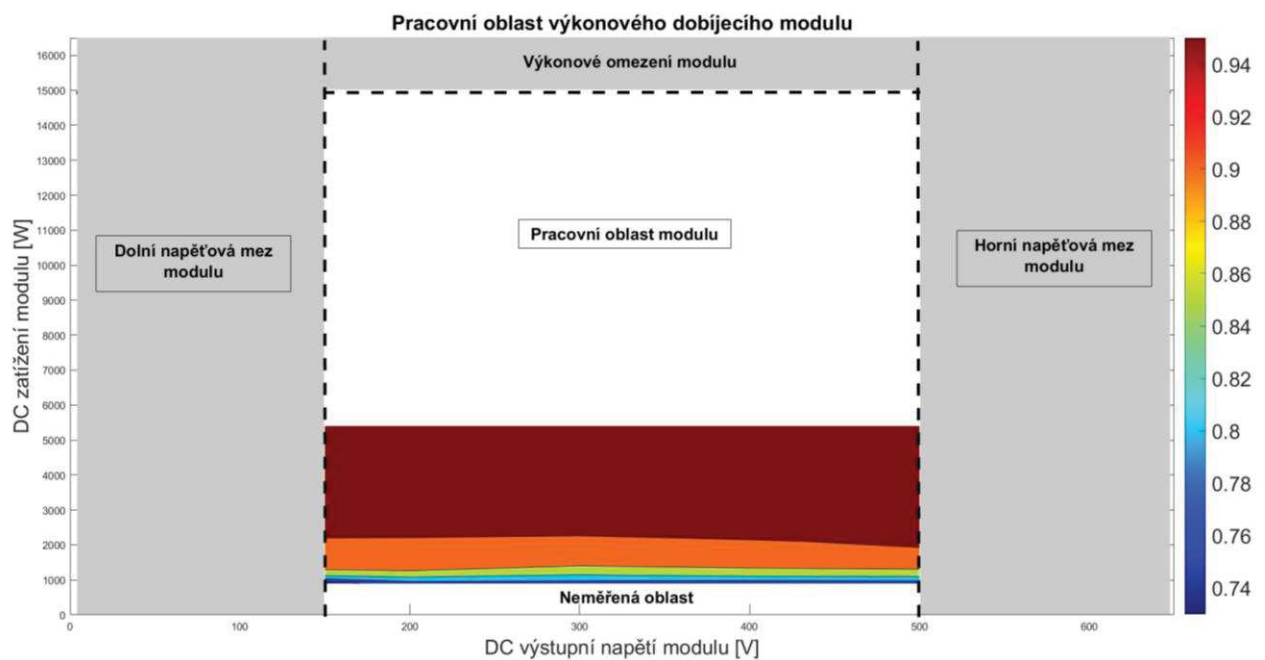
Jako zátěž pro dobíjecí moduly jsou použity programovatelné zátěže Chroma typ 63802. Každá má parametry 1,8 kW, 18 A, AC 350 Vrms (DC 500 V) a dohromady tedy máme k dispozici téměř 6 kW elektronické zátěže, která simuluje baterie dobíjeného vozidla (zátěž může pracovat jak v režimu AC, tak i v režimu DC), bohužel nám však umožní proměřit pouze třetinu z celého výkonu modulu (viz obrázek 33). Tyto zátěže dokáží měřit napětí, proud, činný výkon a další veličiny, tudíž není potřeba používat externí měřicí přístroje.



Obrázek 32 - Zapojení měřicího obvodu. Jedná se o zjednodušený náčrt zapojení měřicího obvodu, kde jsou v síťovém analyzátoru (vlevo) vidět ampérmetry a voltmetry (reálně se musí propojit zdířky). K analyzátoru je připojen vstup modulu a na výstup jsou připojeny vstupy jednotlivých zátěží, které se postupně zapínají, čímž se celková zátěž zvyšuje.

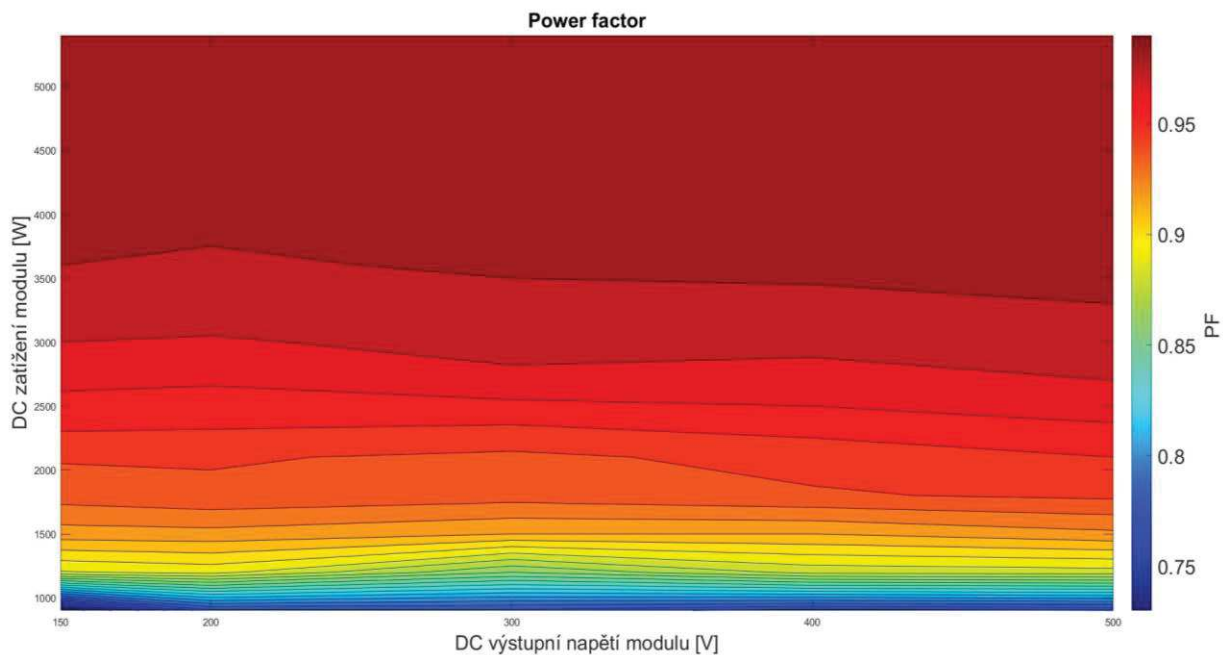
Samotné měření probíhá v zapojení dle Obrázku 32, tedy že analyzátor sítě měří vstupní veličiny modulu - činný a jalový výkon, účinník (uveden jako PF – power factor), napětí a proud a jsou měřeny průběhy pro pět výstupních DC napětí modulu (od nejnižšího možného napětí 150 V až po nejvyšších 500 V). Pro každé výstupní napětí je zvyšována zátěž (po 300W krocích). Dolní hranice zátěže je 900 W (pro hodnoty nižší už analyzátor sítě neukazoval relevantní hodnoty, což není zas takový problém, jelikož zátěž nižší než přibližně 1 kW se v reálu nevyskytuje).

Naměřené hodnoty jsou k nahlédnutí jako Příloha 1. Zajímavé je sledovat, jak je důležité výstupní napětí modulu (tzn. napětí baterií), kdy pro nejvyšší zátěž (5400 W) a nejnižší napětí (150 V) je dobíjecí proud až 35 A, avšak pro tutéž zátěž, ale nejvyšší napětí (500 V) je dobíjecí proud třetinový (10 A). To do budoucna značí možnost dobíjet daleko vyššími výkony oproti současnému stavu (například firma Porsche vyvíjí elektromobil, který bude osazen bateriemi o napětí 800 V).



Obrázek 33 - Pracovní oblast dobíjecího modulu. Na grafu můžeme vidět znázornění pracovní a měřené oblasti výkonového modulu. Na ose x (DC výstupní napětí modulu) je vidět omezení 150 V – 500 V. Pod naměřenými daty (barevná oblast) vidíme neměřenou oblast (DC zátěž modulu nižší než 1000 W). Dále je zvýrazněno výkonové omezení modulu (15000 W). Vidíme, že jsme schopni změřit pouze třetinu z celého výkonu modulu.

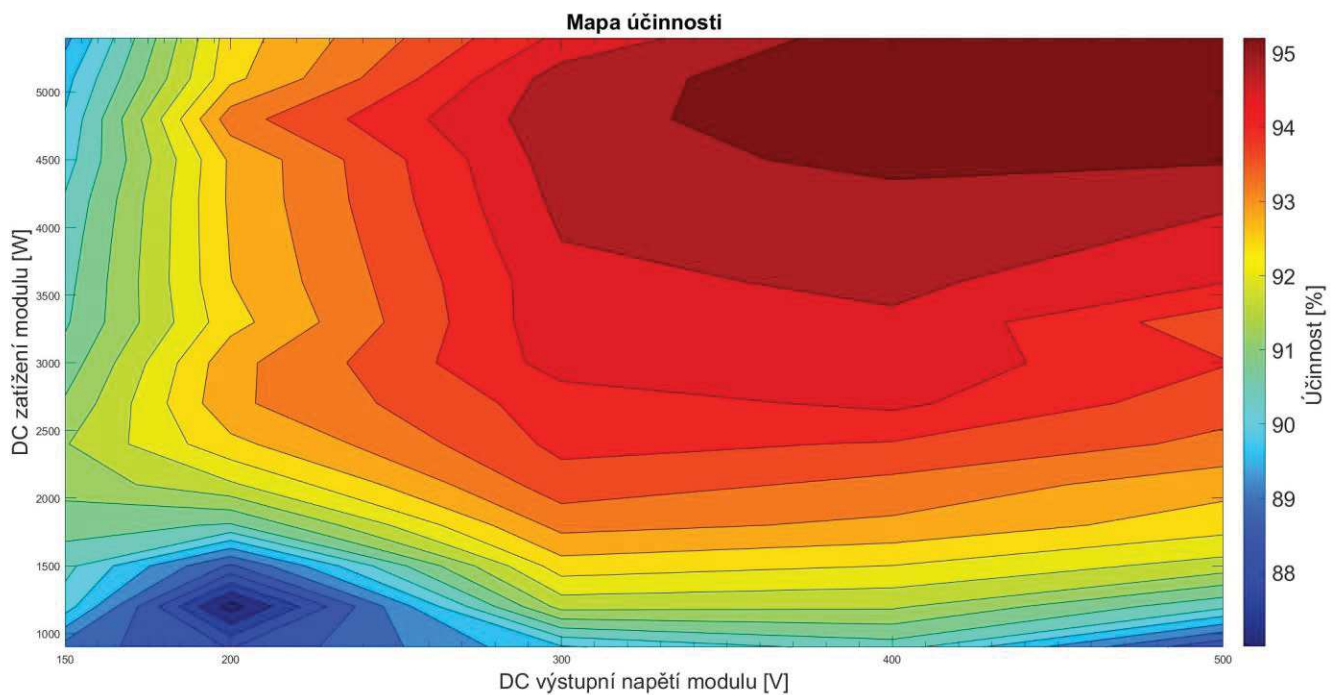
Z naměřených dat jsem se především zaměřil na průběh velikosti účinníku (power factor, Obrázek 34) a na průběh účinnosti modulu (Obrázek 35), kterou jsem určil prostým podělením příkonu do modulu (z analyzátoru sítě) a činného výkonu na zátěžích.



Obrázek 34 - Power factor. Vidíme, že hodnoty power factoru rostou v závislosti na přidané DC zátěži (a tedy odebíranému proudu). Výstupní DC napětí modulu na velikost PF nemá vliv.

Na účinník nemá DC výstupní napětí modulu téměř žádný vliv (maximálně mírně roste s vyšším napětím). Zřejmé však je, že se zvyšující se DC zátěží roste od hodnoty 0,72 při 1000 W až po 0,99 při 5400 W.

Účinnost modulu pak jednoznačně závisí jak na DC výstupním napětí modulu, tak na připojené DC zátěži (čím vyšší napětí a zátěž, tím vyšší účinnost a to od cca 85 % při 150 V a 1000 W zátěže až po téměř 95 % při 500 V a 5400 W zátěže).



Obrázek 35 - Mapa účinnosti výkonového modulu. Vidíme jednoznačný nárůst účinnosti modulu se zvyšováním DC výstupního napětí a DC zátěže. Nízká účinnost při 200 V DC výstupního napětí a 1200 W DC zatížení může být způsobena chybou měření.

5. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámit se se standardy DC dobíjení elektromobilů (s velkým důrazem na normu ČSN EN 61851 a její přílohy), na základě nabytých vědomostí navrhnout experimentální model rychlodobíjecí stanice (včetně návrhu na sdílení výkonu mezi více dobíjecích zásuvek) a nakonec změřit některá vybraná data z komponent využitých v tomto návrhu.

V úvodu práce jsou uvedeny a krátce představeny přední světové DC dobíjecí standardy. Dále je práce zaměřena převážně na standard CHAdeMO, který je využit i v samotném návrhu experimentálního modelu dobíjecí stanice.

Sdílení výkonu je řešeno efektivní stykačovou logikou. V práci je uveden jednoduchý nákres sdílení výkonu ze dvou výkonových dobíjecích modulů do dvou dobíjecích zásuvek (Nevázaná příloha 1).

Samotný návrh experimentální dobíjecí DC stanice je k práci přiložen jako Nevázaná příloha 2 (schéma v programu EPLAN). V návrhu je jako provizorní řídicí kontrolér využit mikropočítač Raspberry PI, ale v budoucnu se počítá s využitím řídicí jednotky od společnosti Phoenix Contact, která zatím stále není dokončena.

Měření parametrů navržených výkonových modulů se opozdilo, a to z důvodu jejich zdlouhavé dodávky od čínského dodavatele, který je zaslal s několikaměsíčním zpožděním. Nejdůležitější parametry však naměřeny byly a jsou k dispozici jako Příloha 1. Dále jsme byli omezeni nedostatečným výkonem zátěží, které měly simulovat dobíjené vozidlo. Z tohoto důvodu byla proměřena jen třetina z celkového pracovního rozsahu dobíjecích modulů (což není až tak na škodu, jelikož při vyšších výkonech by se námi sledované veličiny příliš nelišily.)

Otevřený demonstrační model dobíjecí stanice pro elektromobily byl sestaven z důvodu proměření parametrů, a tudíž byla otestována funkčnost

výkonových dobíjecích modulů. Na tuto práci je možno dále navázat a model dobíjecí stanice sestavit do tvaru uzavřeného rozváděče s uživatelským rozhraním.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *EVmapa* [online]. Troubsko: EV Select s.ro., 2018 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: www.evmapa.cz
- [2] VELECHOVSKÝ, Ondřej. *Návrh silové části veřejné dobíjecí stanice pro elektromobily*. Liberec, 2016. Bakalářská práce. TUL, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií.
- [3] ČSN EN 61851-23: *Systém nabíjení elektrických vozidel vodivým propojením - Část 23: Všeobecné požadavky*. 2. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [4] TS D 0007:2012: Basic function of quick charger for the electric vehicle, First Edition 2013-05, JIS
- [5] ČSN EN 61851 - 1: *Systém nabíjení elektrických vozidel vodivým propojením - Část 1: Všeobecné požadavky*. 2. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [6] *TFLcar* [online]. USA: Road Chaser, 2017 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: https://www.tflcar.com/wp-content/uploads/2017/08/2017_nissan_leaf_39.jpg
- [7] *My E-life Now* [online]. USA, 2015 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.mye-lifenow.com/2012/07/char-demo-connector-interface-technical.html>
- [8] *CharIN* [online]. Německo: CharIN, 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.charinev.org/>
- [9] IN SPEC 70121:2014-12: *Electromobility - Digital communication between a d.c. EV charging station and an electric vehicle for control of d.c. charging in the Combined Charging System*, First Edition 2014-12, DIN
- [10] *Inside EVs* [online]. USA: Motorsport Network, 2015 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://insideevs.com/abb-joins-charin-150-kw-charging-coming-soon-350-kw-targeted-future/>
- [11] *Hybrid.cz* [online]. Praha: Chamanne s.r.o, 2016 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/elon-musk-naznacuje-supercharger-v3-s-vykonem-pres-350-kw-ostrovni-funkci>
- [12] *Tesla* [online]. USA: Tesla CO, 2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: https://www.tesla.com/en_EU/
- [13] *Teslarati: First look at world's largest Tesla Supercharger station in Shanghai, China* [online]. USA: Teslarati, 2017 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.teslarati.com/first-look-teslas-worlds-largest-supercharger-station-shanghai-china/>

- [14] *Teslarati: Tesla updates Model S/X charge port to support China's charging standard* [online]. USA: TESLARati, 2017 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.teslarati.com/tesla-model-s-advertise-tv-product-placement-larry-david-curb-your-enthusiasm>
- [15] *Tesla Charge Port China* [online]. 2018 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=diSAwAVVgOs>
- [16] *Electric Vehicle Infrastructure: Terra 53 multi-standard DC charging station*. Netherlands: ABB, 2017. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://new.abb.com/ev-charging/products/car-charging/multi-standard/terra-53-cjg>
- [17] *UR50030-E: Datasheet and user manual*. 1. GuangDong, China: Electway, 2015. Dostupné z: http://www.electway.net/product/500VDC_30A_15kW_charging_power_module.html
- [18] AGGELER, D., F. CANALES, H. ZELAYA, De La PARRA, A. COCCIA, N. BUTCHER a O. APELDOORN. Ultra-fast DC-charge infrastructures for EV-mobility and future smart grids. In: *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*. IEEE, 2010, 2010, s. 1-8. DOI: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638899. ISBN 978-1-4244-8508-6. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5638899/>
- [19] *Siemens Charging Stations* [online]. Munich, Germany: Siemens, 2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/home/products/mobility/road-solutions/electromobility/ecars-high-power-charging-infrastructure.html>
- [20] *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2014/94/EU: o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva*. In: . Rada EU: Evropská unie, 2014, L307/1.
- [21] *Bender-ES* [online]. Spain: Bender Iberia S.L.U., 2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: http://www.bender-es.com/en/products/c/insulation_monitoring__1/special_applications__4/isometerr_ir155-3203_ir155-3204__343.html
- [22] *Gigavac: Advanced switching solutions* [online]. USA: GIGAVAC, 2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.gigavac.com/products/gx23ba>
- [23] *Fujikura E55057-35* [online]. China: Electway, 2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.electway.net/upload/file/1474431931.pdf>

PŘÍLOHA 1 – TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT

Tabulka 1 - Naměřené hodnoty pro DC výstupní napětí 150 V. P_A = příkon modulu, P_Z = činný výkon na zátěži, S = jalový výkon modulu, PF = power factor (učínik), I_A = proud tekoucí do modulu, I_Z = proud tekoucí do zátěže.

Zátěž [W]	P_A [W]	P_Z [W]	S [VA]	PF	I_A [A]	I_Z [A]
900	1010,0	899,0	1250,0	0,73	1,81	5,31
1200	1328,0	1197,9	1490,0	0,89	2,22	7,96
1500	1652,5	1495,9	1789,0	0,923	2,66	9,95
1800	1972,0	1794,2	2090,0	0,94	3,11	11,94
2100	2293,0	2094,5	2424,0	0,946	3,56	13,95
2400	2614,0	2393,7	2728,0	0,958	4,01	15,94
2700	2951,0	2692,9	3106,0	0,965	4,49	17,94
3000	3290,0	2992,8	3385,0	0,972	498	19,95
3300	3627,0	3291,3	3707,0	0,978	5,46	21,9
3600	3961,0	3591,0	4035,0	0,981	5,941	23,95
3900	4294,0	3888,9	4368,0	0,983	6,44	25,9
4200	4631,0	4188,6	4706,0	0,983	6,93	27,9
4500	4975,0	4488,5	5055,0	0,983	7,45	29,9
4800	5317,0	4787,7	5400,0	0,983	7,97	31,9
5100	5660,0	5086,0	5755,0	0,984	8,5	33,9
5400	6018,0	5385,0	6122,0	0,984	9,03	35,94

Tabulka 2 - Naměřené hodnoty pro DC výstupní napětí 200 V. P_A = příkon modulu, P_z = činný výkon na zátěži, S = jalový výkon modulu, PF = power factor (učínik), I_A = proud tekoucí do modulu, I_z = proud tekoucí do zátěže.

Zátěž [W]	P_A [W]	P_z [W]	S [VA]	PF	I_A [A]	I_z [A]
900	1016,0	897,9	1293,0	0,78	1,93	4,48
1200	1376,0	1197,2	1539,8	0,894	2,28	5,98
1500	1686,0	1495,9	1822,3	0,924	2,7	7,47
1800	1977,0	1794,2	2094,0	0,943	3,1	8,96
2100	2277,0	2093,5	2405,0	0,946	3,54	10,47
2400	2582,0	2393,2	2697,0	0,957	3,97	11,97
2700	2893,0	2693,9	2999,0	0,964	4,41	13,46
3000	3215,0	2992,5	3312,0	0,971	4,87	15,96
3300	3552,0	3291,0	3633,0	0,977	5,32	16,47
3600	3870,0	3591,0	3949,0	0,98	5,81	17,96
3900	4190,0	3889,6	4265,0	0,982	6,26	19,46
4200	4511,0	4189,4	4586,0	0,983	6,75	20,96
4500	4834,0	4489,2	4913,0	0,983	7,32	22,45
4800	5126,0	4789,0	5250,0	0,983	7,72	24,95
5100	5489,0	5087,9	5580,0	0,984	8,22	25,46
5400	5817,0	5387,0	5920,0	0,983	8,72	26,9

Tabulka 3 - - Naměřené hodnoty pro DC výstupní napětí 300 V. P_A = příkon modulu, P_z = činný výkon na zátěži, S = jalový výkon modulu, PF = power factor (učínik), I_A = proud tekoucí do modulu, I_z = proud tekoucí do zátěže.

Zátěž [W]	P_A [W]	P_z [W]	S [VA]	PF	I_A [A]	I_z [A]
900	998,0	897,7	1274,0	0,78	1,88	2,99
1200	1305,0	1197,4	1512,0	0,864	2,223	3,99
1500	1615,0	1495,9	1758,2	0,918	2,6	4,99
1800	1923,0	1794,9	2045,0	0,94	3,02	5,98
2100	2230,0	2092,4	2360,0	0,943	3,46	6,98
2400	2542,0	2392,2	2658,0	0,956	3,9	7,98
2700	2857,0	2691,5	2964,0	0,97	4,36	8,98
3000	3163,0	2991,0	3257,0	0,975	4,8	9,97
3300	3475,0	3290,6	3565,0	0,979	5,25	10,97
3600	3791,0	3589,4	3869,0	0,982	5,69	11,97
3900	4102,0	3888,7	4176,0	0,983	6,15	12,97
4200	4413,0	4188,3	4488,0	0,983	6,6	13,97
4500	4724,0	4488,1	4802,0	0,983	7,07	14,97
4800	5036,0	4787,3	5119,0	0,983	7,54	15,97
5100	5354,0	5086,3	5499,0	0,984	8,01	16,97
5400	5700,0	5386,3	5760,0	0,984	8,49	17,96

Tabulka 4 - Naměřené hodnoty pro DC výstupní napětí 400 V. P_A = příkon modulu, P_z = činný výkon na zátěži, S = jalový výkon modulu, PF = power factor (učiník), I_A = proud tekoucí do modulu, I_z = proud tekoucí do zátěže.

Zátěž [W]	P_A [W]	P_z [W]	S [VA]	PF	I_A [A]	I_z [A]
900	990,0	896,9	1295,0	0,77	1,91	2,24
1200	1306,0	1197,2	1480,0	0,885	2,17	2,99
1500	1620,0	1496,8	1760,0	0,918	2,59	3,74
1800	1927,4	1794,7	2039,0	0,944	2,99	4,49
2100	2239,0	2092,9	2354,0	0,948	3,46	5,24
2400	2546,0	2392,5	2652,0	0,96	3,89	5,99
2700	2850,0	2693,0	2942,0	0,969	4,33	6,74
3000	3160,0	2991,1	3242,0	0,974	4,76	7,49
3300	3474,0	3291,1	3545,0	0,979	5,21	8,24
3600	3783,0	3590,0	3848,0	0,983	5,66	8,98
3900	4091,0	3889,4	4151,0	0,985	6,1	9,73
4200	4406,0	4189,0	4456,0	0,986	6,56	10,48
4500	4709,0	4488,5	4764,0	0,987	7,01	11,23
4800	5015,0	4788,2	5074,0	0,988	7,42	11,98
5100	5326,0	5087,5	5392,0	0,988	7,94	12,73
5400	5642,0	5386,5	5709,0	0,988	8,39	13,48

Tabulka 5 - Naměřené hodnoty pro DC výstupní napětí 500 V. P_A = příkon modulu, P_z = činný výkon na zátěži, S = jalový výkon modulu, PF = power factor (učiník), I_A = proud tekoucí do modulu, I_z = proud tekoucí do zátěže.

Zátěž [W]	P_A [W]	P_z [W]	S [VA]	PF	I_A [A]	I_z [A]
900	1016,0	898,5	1305,0	0,774	1,93	1,8
1200	1323,0	1197,3	1493,0	0,887	2,2	2,39
1500	1630,0	1496,9	1763,0	0,925	2,59	2,99
1800	1939,0	1795,1	2045,0	0,947	3,01	3,59
2100	2251,0	2092,4	2358,0	0,954	3,46	4,19
2400	2558,0	2391,9	2653,0	0,964	3,89	4,79
2700	2871,0	2691,8	2952,0	0,972	4,33	5,39
3000	3181,0	2991,0	3252,0	0,977	4,78	5,99
3300	3490,0	3272,0	3553,0	0,981	5,22	6,58
3600	3802,0	3590,0	3860,0	0,984	5,65	7,18
3900	4108,0	3889,0	4161,0	0,987	6,11	7,78
4200	4416,0	4189,2	4470,0	0,988	6,57	8,38
4500	4713,0	4488,8	4770,0	0,988	7,01	8,98
4800	5021,0	4788,1	5076,0	0,989	7,43	9,58
5100	5328,0	5087,7	5388,0	0,989	7,93	10,18
5400	5638,0	5386,8	5694,0	0,99	8,4	10,77

