

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Řídicí systém pro systémy V2H (Vehicle To Home)
Control System for V2H (Vehicle To Home) Systems

2020

Bc. Martin Kosinka

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Kosinka**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612T041 Řídicí a informační systémy

Téma: **Řídicí systém pro systémy V2H (Vehicle To Home)
Control System for V2H (Vehicle To Home) Systems**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací řízení provozu zařízení pro systémy V2H (Vehicle To Home). Cílem je analýza, implementace řídicího softwaru nabíjecí či vybíjecí stanice, realizace řídicí elektroniky pro vybraný komunikační protokol a integrace řešení do chytrého domu.

V souhrnu je práce charakterizována následujícími body:

1. Analýza systémů V2H.
2. Návrh a realizace řídicí elektroniky pro nabíjecí systémy Chademo.
3. Návrh a realizace propojení s vybíjecí stanicí.
4. Analýza, návrh a implementace řídicích algoritmů pro provoz v chytré domácnosti.
5. Zhotovení technologické dokumentace řešení.
6. Zhodnocení výsledků řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] MOLLOY, Derek. *Exploring Raspberry Pi: Interfacing to the Real World with Embedded Linux*. Indianapolis: Wiley, 2016. ISBN-13: 978-1119188681.
- [2] MONK, Simon. *Programming the Raspberry Pi, Second Edition: Getting Started with Python*. McGraw-Hill Education TAB, 2015. ISBN-13: 978-1259587405.
- [3] HAYES, John G. a Abas G. GOODRAZI. *Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles*. Wiley, 2018. ISBN-13: 978-1-119-06364-3.
- [4] HOROWITZ, Paul a Winfield HILL. *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, 2015. ISBN-13: 978-0521809269.
- [5] PUŽMANOVÁ, Rita. *Moderní komunikační sítě od A do Z*. Brno: Computer Press, 2006. ISBN 978-8025112786.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

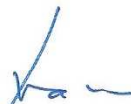
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Slanina, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 15. 5. 2020



Bc. Martin Kosinka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Slaninovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a věnovaný čas při tvorbě diplomové práce. Také bych rád poděkoval výzkumnému Centru ENET za poskytnutí prostředků pro realizaci a testování praktické části. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za jejich podporu při zpracování této diplomové práce.

Abstrakt

Systémy Vehicle To Home využívají energii z baterie elektromobilu k napájení chytrého domu a přebytečnou energii ukládají zpět do baterie elektrického vozidla. Náplní této diplomové práce je návrh a realizace řídicí jednotky pro správu energetických toků v systémech V2H. Zvoleným protokolem pro nabíjení/vybíjení elektromobilu je standard CHAdeMO, který umožňuje komunikaci po sběrnici CAN. Navržená řídicí jednotka s názvem Energy Flow Control Unit (EFCU) se skládá z jednodeskového počítače Raspberry Pi 3B+, navržené desky plošných spojů a elektroměru s komunikací po protokolu Modbus. Řídicí jednotka propojuje nadřazený systém chytrého domu, systém správy baterie elektromobilu BMS a obousměrný měnič (umožňující připojení elektrického vozidla do energetické infrastruktury chytrého domu).

Klíčová slova

Vehicle To Home, elektrické vozidlo, CHAdeMO, řídicí jednotka, BMS, Raspberry Pi, sběrnice CAN, tok energie, chytrý dům, Python

Abstract

Vehicle To Home systems use energy from electric vehicle battery to supply the smart home and store redundant energy back into the electric vehicle's battery. The content of this diploma thesis is the design and implementation of a control unit for energy flow management in V2H systems. The selected protocol for charging/discharging an electric vehicle is the CHAdeMO standard, which enables communication via the CAN bus. The designed control unit called Energy Flow Control Unit (EFCU) consists of a single-board computer Raspberry Pi 3B +, a designed printed circuit board and a power meter with communication via Modbus protocol. The control unit connects superior system of the smart home, electric vehicle battery management system BMS and bidirectional converter (enabling connection of the electric vehicle into the energy infrastructure of the smart home).

Key Words

Vehicle To Home, electric vehicle, CHAdeMO, control unit, BMS, Raspberry Pi, CAN bus, energy flow, smart home, Python

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Seznam ilustrací	9
Seznam tabulek	11
1 Úvod	12
2 Analýza systémů V2H	13
2.1 Obecný popis nabíjení baterií	14
2.2 Možnosti nabíjení elektrických vozidel vodivým propojením	15
2.3 Protokol CHAdeMO	16
2.4 Specifikace sběrnice CAN 2.0B	18
3 Návrh a realizace řídicí elektroniky pro nabíjecí systémy CHAdeMO	20
3.1 Řídicí jednotka Energy Flow Control Unit	21
3.2 Návrh nové řídicí jednotky EFCU	22
3.2.1 DPS řídicí jednotky EFCU	22
3.2.2 Zapojení řídicí jednotky EFCU	30
3.2.3 Elektroměr s digitální komunikací pomocí protokolu Modbus RTU	32
4 Návrh a realizace propojení s vybijecí stanicí	33
4.1 Analýza vybijecího procesu	34
5 Analýzy, návrh a implementace řídicích algoritmů pro provoz v chytré domácnosti	36
5.1 Analýza nabíjecího procesu	36
5.2 Sekvence CHAdeMO komunikace	37
5.3 Datové komunikační rozhraní s chytrým domem	40
5.3.1 Data určená nadřazenému systému	40
5.3.2 Data určená řídicí jednotce EFCU	41
5.4 Kritické požadavky na nabíjecí/vybíjecí stanici dle normy CHAdeMO	42
5.5 UML popis řídicích algoritmů EFCU	45
5.6 Implementace řídicích algoritmů	48
5.7 Uživatelské rozhraní řídicí jednotky EFCU	48
6 Testování řídicí jednotky EFCU	50
6.1 Nabíjení elektromobilu	50
6.2 Vybíjení elektromobilu	52
7 Závěr	53
Literatura	55

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Celé znění	Význam
AC	Alternating Current	Střídavý proud
BMS	Battery management system	System správy baterie
CAN	Controller Area Network	Typ sběrnice
CCS	Combined Charging System	Standard pro DC rychlonabíjení
DC	Direct Current	Stejnoseměrný proud
DPS	Deska plošných spojů	
EFCU	Energy Flow Control Unit	Řídicí jednotka energetických toků
EV	Electric vehicle	Elektrické vozidlo
GPIO	General-purpose Input/Output	Univerzální vstupní/výstupní pin
CHAdEMO	CHArge de MOve	„Nabít pro pohyb“ – Standard DC nabíjení elektrických vozidel
I ² C	Inter-Integrated Circuit	Sériové komunikační rozhraní
JSON	JavaScript Object Notation	Datový formát určený pro přenos dat
LED	Light Emitting Diode	Elektroluminiscenční dioda
Li-Ion	Lithium-Ion battery	Lithium-iontová baterie
PLC	Programmable Logic Controller	Programovatelný logický automat
RAM	Random Access Memory	Paměť s náhodným přístupem
SMD	Surface Mount Device	Součástka pro povrchovou montáž
SMT	Surface Mount Technology	Technologie povrchové montáže
SoC	State of Charge	Míra nabití (baterie)
SPI	Serial Peripheral Interface	Sériové komunikační rozhraní
THT	Through-hole technology	Technologie montáže součástek s drátovými vývody
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter	Součástka sloužící k asynchronnímu sériovému přenosu
V2G	Vehicle To Grid	Energetické propojení vozidla s elektrickou sítí
V2H	Vehicle To Home	Energetické propojení vozidla s domem
V2L	Vehicle To Load	Energetické propojení vozidla s centralizovanou skupinou spotřebičů
XML	eXtensible Markup Language	Obecný značkovací jazyk

Seznam ilustrací

Obr. 2-1 V2H schéma	13
Obr. 2-2 Nabíjecí charakteristika Li-Ion článku [10].....	14
Obr. 2-3 Rozhraní konektoru CHAdeMO [16].....	16
Obr. 2-4 Rozložení vodičů na CHAdeMO zástrčce [4]	17
Obr. 2-5 Datový rámec zprávy na sběrnici CAN 2.0B [13].....	19
Obr. 3-1 Původní řešení zapojení nabíjecí stanice	20
Obr. 3-2 Blokové schéma řídicího systému EFCU [12]	21
Obr. 3-3 Schéma DC/DC měničů	22
Obr. 3-4 Signalizace logických napěťových úrovní, konektor napájení.....	23
Obr. 3-5 Schéma galvanicky odděleného digitálního výstupu.....	23
Obr. 3-6 Schéma digitálního vstupu.....	24
Obr. 3-7 Schéma obvodu pro detekci stavu zámku zástrčky	24
Obr. 3-8 Schéma převodníku z UART na RS-485.....	25
Obr. 3-9 Schéma převodníku ze sběrnice SPI na sběrnici CAN.....	26
Obr. 3-10 RTC modul na sběrnici I ² C	26
Obr. 3-11 TOP vrstva DPS v poměru 1:1	27
Obr. 3-12 BOTTOM vrstva DPS v poměru 1:1	27
Obr. 3-13 Osazená DPS řídicí jednotky EFCU.....	29
Obr. 3-14 Propojení DPS řídicí jednotky EFCU s CHAdeMO rozhraním [4]	30
Obr. 3-15 Nainstalovaná řídicí jednotka EFCU v rozváděči	31
Obr. 3-16 Nové řešení zapojení v rozváděči nabíjecí/vybíjecí stanice	31
Obr. 3-17 Elektroměr s digitální komunikací pomocí protokolu Modbus RTU	32
Obr. 4-1 Data v textovém logovacím souboru CHAdeMO komunikace.....	33
Obr. 4-2 Vybíjecí stanice SETEC Power	33
Obr. 4-3 Stav EV při vybíjení	34
Obr. 4-4 Míra nabití baterie EV při vybíjení.....	35
Obr. 4-5 Stav vybíjecí stanice při vybíjení.....	35
Obr. 5-1 Stav EV při nabíjení	36
Obr. 5-2 Stavový diagram CHAdeMO komunikace.....	38
Obr. 5-3 Sekvence digitálních signálů CHAdeMO komunikace	38
Obr. 5-4 Sekvenční diagram nabíjecího procesu [3][4]	39
Obr. 5-5 XML soubor pro předání dat do nadřazeného systému	40
Obr. 5-6 JSON soubor přijímaný z nadřazeného řídicího systému chytrého domu.....	41
Obr. 5-7 Prodleva mezi změnou hodnoty veličiny a přijetím změněné hodnoty vozidlem [4].....	43
Obr. 5-8 Data flow diagram EFCU.....	45
Obr. 5-9 Activity diagram optimalizačního plánu 1/2	46
Obr. 5-10 Activity diagram optimalizačního plánu 2/2	47
Obr. 5-11 Uživatelské rozhraní EFCU v terminálu	49
Obr. 6-1 Nabíjení: napěťový zdroj.....	50
Obr. 6-2 Nabíjení: nabíjecí proud	51
Obr. 6-3 Nabíjení: nabíjecí napětí.....	51

Obr. 6-4 Nabíjení: míra nabití baterie	51
Obr. 6-5 Vybíjení: napětí baterie	52
Obr. 6-6 Vybíjení: míra nabití baterie.....	52

Seznam tabulek

Tab. 2-1 Konektory, standardy a úrovně nabíjení EV [6][15][20][21].....	15
Tab. 2-2 Data odesílaná z EV do stanice [3][4]	17
Tab. 2-3 Data odesílaná ze stanice do EV [3][4]	18
Tab. 3-1 Seznam použitých součástí	28
Tab. 3-2 Požadavky na přesnost elektroměru [4].....	32
Tab. 4-1 Popis stavů EV při vybíjení [4]	34
Tab. 4-2 Popis stavů vybíjecí stanice [4]	35
Tab. 5-1 Popis stavů EV při nabíjení [4].....	36
Tab. 5-2 Kontroly v jednotlivých fázích nabíjení/vybíjení [3][4].....	42
Tab. 5-3 Požadavky na odezvu proudového výstupu nabíjecí/vybíjecí stanice [4]	42
Tab. 5-4 Požadavky na měření veličin a jejich odeslání po sběrnici CAN [4]	42
Tab. 5-5 Důležitá chybová kritéria (detekovaná vozidlem) [4]	43
Tab. 5-6 Důležitá chybová kritéria (detekovaná nabíjecí/vybíjecí stanicí) [4]	44

1 Úvod

V této diplomové práci se zabývám návrhem a realizací řídicí jednotky pro systémy Vehicle To Home, které spravují tok elektrické energie z/do baterie elektromobilu k napájení chytrého domu a ukládání přebytečné energie zpět do baterie elektrického vozidla. Cílem navržené řídicí jednotky s názvem Energy Flow Control Unit (EFCU) je propojení nadřazeného systému chytrého domu, systému správy baterií elektromobilu BMS a obousměrného měniče, řídicí jednotka musí zároveň zajistit funkční komunikaci s EV pomocí sběrnice CAN na zvoleném standardu CHAdeMO, komunikaci s nadřazeným systémem chytrého domu a obousměrným měničem.

V úvodní části diplomové práce popisují systémy V2H, zabývám se obecně problematikou nabíjení baterií a popisují možnosti nabíjení elektrických vozidel, což zahrnuje popis módů nabíjení, výčet dostupných standardů a uvedení jejich elektrických parametrů.

Návrh a realizaci řídicí jednotky EFCU popisují v následující kapitole. Zde se zabývám propojením se systémem Vehicle To Home a píšou o komponentech, z kterých se řídicí jednotka EFCU skládá, tím je jednodeskový počítač Raspberry Pi 3B+, navržená DPS a elektroměr s komunikací na protokolu Modbus. V této kapitole také rozebírám návrh DPS pro řídicí jednotku, to zahrnuje popis jednotlivých funkčních celků osazených na DPS a dokumentaci vedení spojů ve dvouvrstvé DPS. Na konci kapitoly popisují propojení řídicí jednotky EFCU se standardem CHAdeMO, způsob propojení a parametry elektroměru, napájení řídicí jednotky a její umístění v rozváděčové skříni nabíjecí/vybíjecí stanice.

Následující kapitola věnuje analýze komunikace po protokolu CHAdeMO, odposlechnuté na sběrnici CAN, mezi komerční vybíjecí stanicí SETEC Power a BMS elektromobilu, ke které se přistoupilo díky absenci placeného členství v asociaci CHAdeMO, které umožňuje přístup k podrobnému protokolu CHAdeMO. V další kapitole popisují sekvenci komunikace standardu CHAdeMO pomocí UML, formáty dat předávané v obou směrech komunikace mezi řídicí jednotkou EFCU a nadřazeným systémem chytrého domu, kritické požadavky na návrh nabíjecí/vybíjecí stanice dle normy CHAdeMO a algoritmy navrženého programu řídicí jednotky EFCU (pomocí UML). Také zde uvádím implementaci algoritmů a uživatelské prostředí programu.

V rámci poslední kapitoly dokumentují výsledky testování řídicí jednotky během nabíjení EV pomocí DC zdroje značky RS a vybíjení elektromobilu do odporové zátěže.

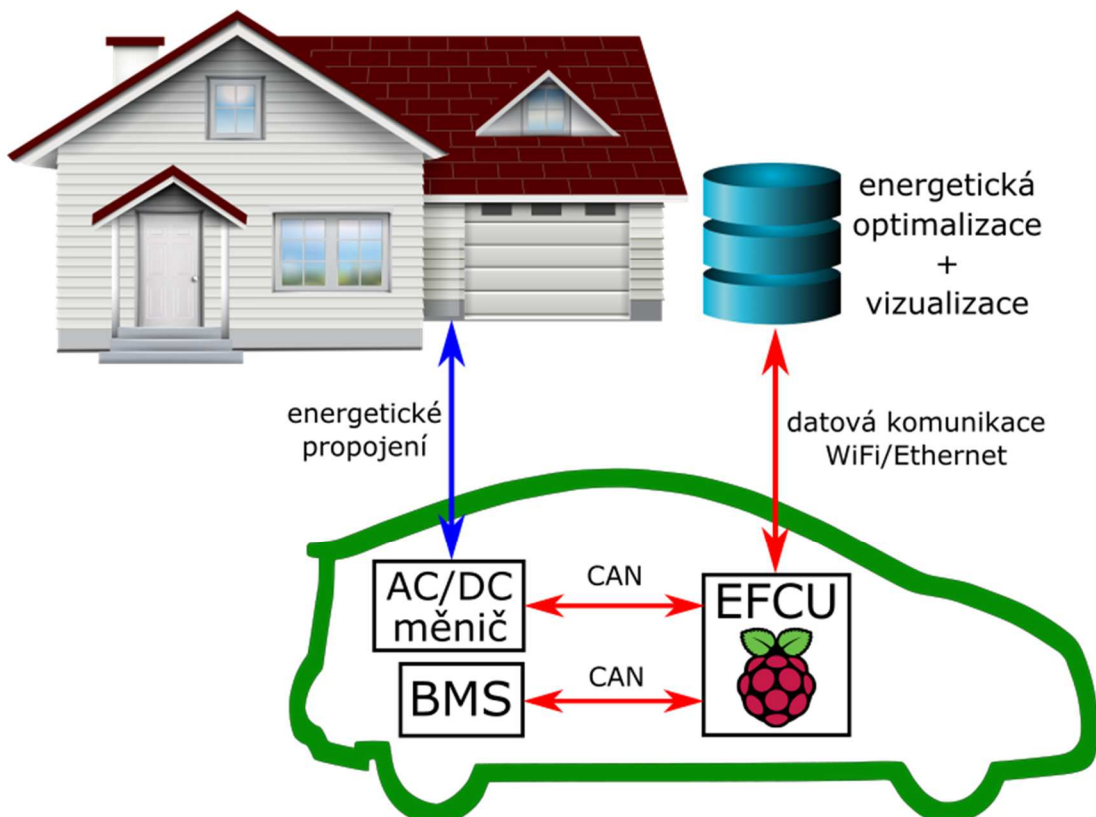
Jako testovací elektromobil k vývoji řídicí jednotky EFCU jsem měl k dispozici Nissan Leaf, který využívá elektrické rozhraní systému správy baterií CHAdeMO.

2 Analýza systémů V2H

Vychází se z předpokladu, že elektrická vozidla jsou většinu času zaparkovaná, tudíž by v tomto čase mohla sloužit jako úložiště elektrické energie. Při přebytku elektřiny z obnovitelných zdrojů by se baterie EV nabíjela a v případě nedostatku elektrické energie, by elektromobil sloužil jako zdroj elektřiny. Navíc by mohl elektromobil sloužit jako záložní zdroj, při výpadku elektrické energie. Elektrické vozidlo by se v tomto systému přepínalo mezi módy generátor/spotřebič.

V2X je obecný termín pro systémy, které využívají elektrickou energii z elektromobilů. Podkategorií jsou systémy V2H (Vehicle To Home), které využívají elektřinu k napájení domu, další systémy spadající pod termín V2X jsou systémy, které nesou označení V2G (Vehicle To Grid), tyto systémy dodávají přebytečnou energii z EV zpět do elektrické sítě. Pod termín V2X spadají také systémy V2L (Vehicle To Load), kde elektromobil slouží jako zdroj elektrické energie pro centralizovanou skupinu spotřebičů. Tento výčet systémů spadajících pod termín V2X není konečný.

Vize systémů V2H je pracovat s energetickými plány chytrého domu, podle kterých se elektromobil přepíná mezi módy generátor/spotřebič. Energetické plány zahrnují údaje o spotřebičích, generátorech a akumulátorech v rámci infrastruktury chytrého domu, mimo tyto údaje zahrnují uživatelský požadavek na minimální dojezd vozidla a časy příjezdu/odjezdu EV. Na Obr. 2-1 je znázorněno schéma propojení jednotlivých funkčních jednotek v rámci systému Vehicle To Home. [6]



Obr. 2-1 V2H schéma

2.1 Obecný popis nabíjení baterií

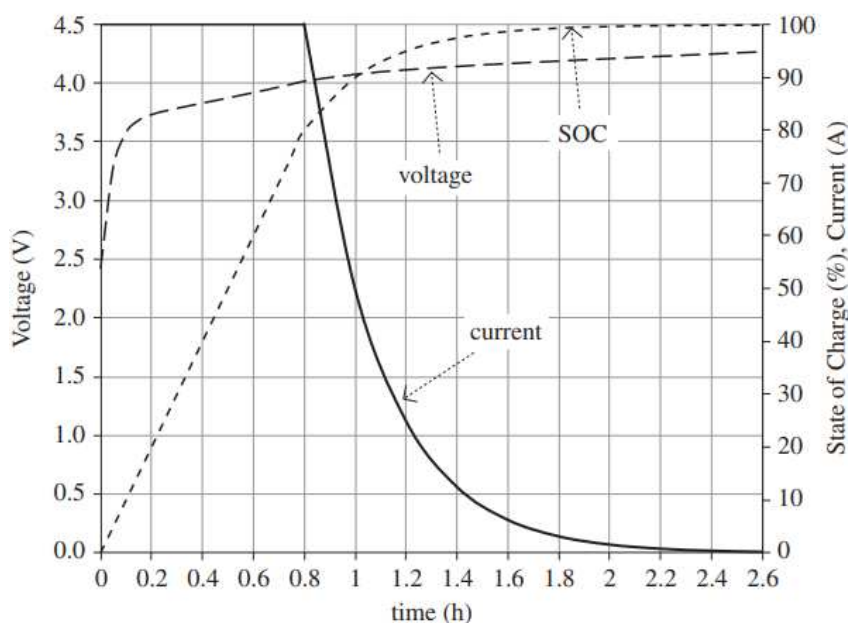
Pod pojmem „baterie“ je v automobilovém průmyslu myšlen akumulátor (sekundární článěk), což je zdroj elektrické energie, který je potřeba nejprve nabít. Primární články, na rozdíl od sekundárních, poskytují elektrickou energii ihned po zhotovení, ale není možné je opětovně nabít. Sekundárními články jsou například Nikl-metal hydridový akumulátor (NiMH), Olověný akumulátor (PbA) nebo Lithium-iontová baterie (Li-Ion). Baterie v elektrickém vozidle se skládá z mnoha sekundárních článků. Sériovou kombinací sekundárních článků získáváme vyšší napětí baterie a paralelní kombinací se dosáhne vyššího výstupního proudu. V elektrických vozidlech se používá sériově-paralelní zapojení článků, aby se dosáhlo zároveň vyššího napětí, výstupního proudu, a tím pádem vyššího výkonu a výdrže baterie.

Nabíjecí profil všech akumulátorů (sekundárních článků) je podobný. Při nízké míře nabití (SoC) snesou vysoký nabíjecí proud a po dosažení určité SoC nebo napětí se nabíjecí proud omezí, aby se články baterie nabily na požadované maximální napětí, které vychází z požadavků na jejich dlouhodobou životnost a fyzických vlastností baterií.

Pro Li-Ion články, které se používají v bateriích elektrických vozidel, se přibližně po dosažení 80 % míry nabití (SoC) začíná snižovat velikost nabíjecího proudu, to souvisí s tím, že do této míry nabití se na články uplatňuje vysoko-výkonové nabíjení. V porovnání s časem nabíjení z nízké úrovně nabití do 80 % SoC trvá nabíjení z 80 % na 100 % SoC ztelně déle. Charakteristika nabíjení Li-Ion článku je vyobrazena na Obr. 2-2. Z grafu je zřejmé, že k nabití Li-Ion článku z 0 na 80 % SoC je potřeba přibližně 30 % z celkového času nabíjení.

Lithium-iontové baterie mají několik výhod oproti ostatním technologiím. Tím je velká hustota energie, vysoká kapacita s malým objemem a hmotností, skoro žádné samovybíjení, nepřítomnost paměťového efektu a vyšší nominální napětí článku.

Mezi nevýhody Li-Ion baterií patří jejich stárnutí (bez ohledu na jejich používání), nebezpečí výbuchu při špatném zacházení a nesvědčí jim úplné vybití. [10]



Obr. 2-2 Nabíjecí charakteristika Li-Ion článku [10]

2.2 Možnosti nabíjení elektrických vozidel vodivým propojením

Hlavní dělení nabíjecích systémů elektrických vozidel je na AC a DC nabíjení. AC nabíjení využívá AC/DC měniče umístěného uvnitř vozidla a lze jej realizovat pomocí jednofázového nebo třífázového síťového elektrického připojení. V případě DC nabíjení je AC/DC měnič umístěn mimo vozidlo v externí nabíjecí stanici. Díky neomezuující velikosti měniče a nabíjecí stanice se DC nabíjení používá pro nejvýkonnější nabíjení EV. [5][6]

Existují čtyři způsoby nabíjení EV vodivým propojením:

- 1) Mód 1: AC nabíjení z domácí zásuvky.
- 2) Mód 2: AC nabíjení z domácí zásuvky s kabelem se zabudovaným ochranným zařízením.
- 3) Mód 3: AC nabíjení využívající specializované zařízení, tzv. „Wallbox“, který je umístěn mimo vozidlo a obsahuje řídicí a ochranný mechanismus pro nabíjení.
- 4) Mód 4: DC nabíjení s externí nabíjecí stanicí, která obsahuje AC/DC měnič a zajišťuje komunikaci s vozidlem. [1]

Módy 3 a 4 zajišťují maximální bezpečnost, a zároveň umožňují řízení nabíjecího procesu.

Používané konektory, standardy a druhy nabíjení jsou vypsány v Tab. 2-1, kde je také uveden druh nabíjení, počet fází (u AC nabíjení), napětí, maximální proud a maximální výkon nabíjení. První dva uvedené druhy konektorů jsou určeny pro AC nabíjení a poslední tři pro DC nabíjení. Konektor J-Plug (Type 1) a speciální konektor pro elektromobily od firmy Tesla, se používají ve Spojených státech, konektor Mennekes (Type 2) a Combo 2 jsou určeny pro nabíjení v rámci Evropské unie. Standardy CCS, CHAdeMO a Tesla Supercharging definují DC rychlonabíjení. [6][21]

Komunikaci mezi stanicí a EV je ve standardu CCS realizována pomocí modulace vysokofrekvenčního signálu (Power Line Communication) ve vodiči Control Pilot (CP). Standard CHAdeMO využívá pro komunikaci s EV digitální sběrnici CAN. [2][3]

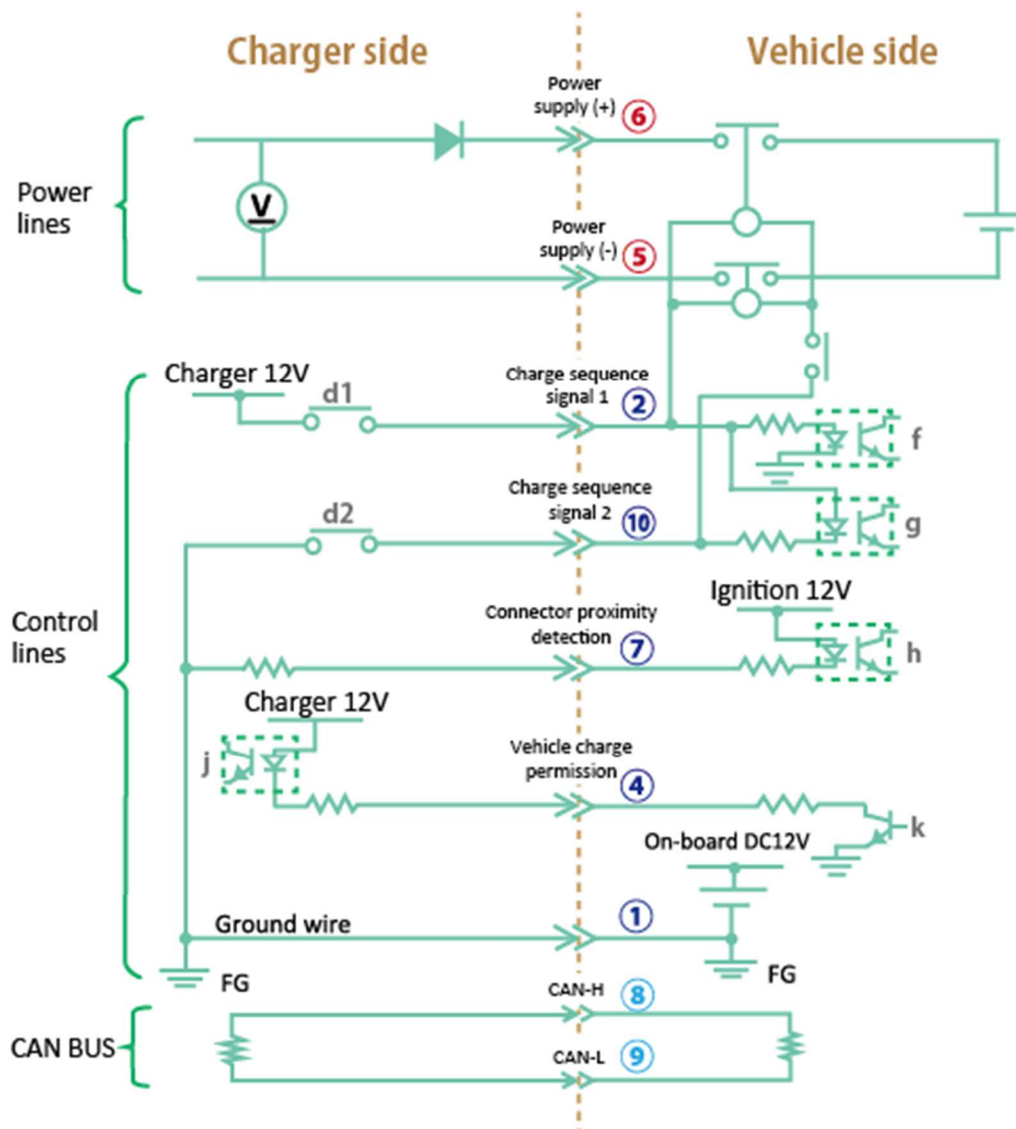
Tab. 2-1 Konektory, standardy a úrovně nabíjení EV [6][15][20][21]

Konektor	Standard (mód nabíjení)	Druh nabíjení	Počet fází, napětí a max. proud	Maximální výkon
J-Plug (Type 1) (US)	SAE J1772 (1)	AC level 1	1 f, 120 V, 16 A	1,9 kW
		AC level 2	1 f, 240 V, 80 A	19,2 kW
IEC 62196 Mennekes (Type 2) (EU)	IEC 62196 (2)	AC level 1	1 f, 230 V, 32 A	7,4 kW
		AC level 2	3 f, 400 V, 32 A	22 kW
Combo 1 / Combo 2 (US/EU)	SAE J1772 CCS (4)	DC level 1	200–450 V DC, 80 A	36 kW
		DC level 2	200–450 V DC, 200 A	90 kW
		DC level 3	200–600 V DC, 400 A	240 kW
CHAdeMO	CHAdeMO (4)	DC level 3	200–1000 V DC, 600 A	500 kW
Speciální konektor (US) Type 2 / Combo 2 (EU)	Tesla V3 Supercharging (4)	DC level 3	až 500 V DC, ---	250 kW

2.3 Protokol CHAdeMO

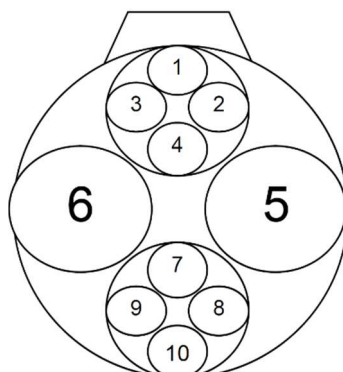
Pro začlenění elektrického vozidla do systému Vehicle To Home se v rámci této diplomové práce používá protokol pro DC rychlonabíjení CHAdeMO, který umožňuje komunikaci s EV pomocí digitální sběrnice CAN.

Protokol CHAdeMO byl představen v Japonsku, v nejnovější verzi umožňuje nabíjet s výkonem až 500 kW a maximálním stejnosměrným proudem 600 A (ve verzi 3.0). K nabíjení se používá kabel se speciálním konektorem, který obsahuje dva silové, čtyři signálové vodiče, dva komunikační vodiče po sběrnici CAN a zemnicí vodič viz Obr. 2-3. [5][15]



Obr. 2-3 Rozhraní konektoru CHAdeMO [16]

Rozložení vodičů na zástrčce CHAdeMO kabelu je znázorněno na Obr. 2-4, kde čísla vodičů odpovídají číslům na schématu rozhraní viz Obr. 2-3.



Obr. 2-4 Rozložení vodičů na CHAdeMO zástrčce [4]

V Tab. 2-2 jsou vypsána data, která jsou posílána z EV do stanice po sběrnici CAN. EV posílá do stanice 3 zprávy, každá zpráva obsahuje 8 bytů dat, ID jednotlivých zpráv jsou uvedeny v šestnáctkové soustavě.

Tab. 2-2 Data odesílaná z EV do stanice [3][4]

CAN ID	Byte (bit)	Popis
H'100	0, 1, 2, 3	Rezervováno
	4, 5	Maximální napětí baterie EV
	6	Konstanta k výpočtu míry nabití baterie EV
	7	Rezervováno
H'101	0	Rezervováno
	1	Maximální doba nabíjení (po 10 s)
	2	Maximální doba nabíjení (po minutě)
	3	Odhadovaný čas nabíjení (po minutě)
	4	Rezervováno
	5, 6	Jmenovitá kapacita baterie EV
	7	Rezervováno
H'102	0	Číslo CHAdeMO protokolu
	1, 2	Cílové napětí baterie EV
	3	Žádaný nabíjecí proud
	4(0)	Chyba: Přepětí baterie
	4(1)	Chyba: Podpětí baterie
	4(2)	Chyba: Odchylka proudu baterie
	4(3)	Chyba: Vysoká teplota baterie
	4(4)	Chyba: Odchylka napětí baterie
	5(0)	Příznak povolení nabíjení EV
	5(1)	Pozice řadicí páky EV
	5(2)	Chyba nabíjecího systému
	5(3)	Stav stykače EV
	5(4)	Požadavek na ukončení nabíjení
	6	Míra nabití baterie EV
	7	Rezervováno

Data odesílaná ze stanice do EV popisuje Tab. 2-3. V tomto směru komunikace se posílají 2 zprávy.

Tab. 2-3 Data odesílaná ze stanice do EV [3][4]

CAN ID	Byte (bit)	Popis
H'108	0	Identifikátor podpory detekce spečení kontaktů
	1, 2	Dostupné výstupní napětí
	3	Dostupný výstupní proud
	4, 5	Prahové napětí pro ukončení nabíjení
	6	Rezervováno
	7	Rezervováno
H'109	0	Číslo CHAdeMO protokolu
	1, 2	Aktuální výstupní napětí
	3	Aktuální výstupní proud
	4	Rezervováno
	5(0)	Stav stanice (standby/charging)
	5(1)	Porucha stanice
	5(2)	Stav zámku zástrčky CHAdeMO kabelu
	5(3)	Kompatibilita baterie s výstupním napětím stanice
	5(4)	Porucha nabíjecího systému
	5(5)	Příznak konce nabíjení
	6	Zbývající čas nabíjení (po 10 s)
	7	Zbývající čas nabíjení (po minutě)

Standard CHAdeMO používá sběrnici CAN ve verzi 2.0B, která je popsána v následující kapitole. Přenosová rychlost je stanovena na 500 kb/s. Zprávy (popsané v Tab. 2-2 a Tab. 2-3) jsou odesílané ve vzestupném pořadí (podle jejich ID), každá zpráva se posílá s periodou 100 ms, kde maximální časový rozptyl činí 10 ms. [4]

2.4 Specifikace sběrnice CAN 2.0B

Controller Area Network (CAN) je sériová komunikační sběrnice, a zároveň protokol, vyvinutý firmou Robert Bosch GmbH a používaný převážně v automotive průmyslu. Tuto sběrnici je ale možné použít v jakékoliv aplikaci požadující řízení v reálném čase, používá se například v průmyslové automatizaci. Skrze komunikační sběrnici CAN lze dosáhnout přenosové rychlosti 1 Mbit/s.

Protokol CAN 2.0 B je definován ve dvou vrstvách ISO/OSI modelu: fyzické a linkové. Linková vrstva je v tomto protokolu rozdělena do podvrstvy LLC (Logical Link Control) a MAC (Medium Access Control).

Podvrstva Logical Link Control je zodpovědná za filtrování jednotlivých zpráv. Rozhoduje o tom, které zprávy se předají MAC vrstvě k odeslání a které z přijatých zpráv (obdržených z MAC vrstvy) se použijí a předají aplikační vrstvě. Představuje rozhraní mezi podvrstvou MAC a aplikační vrstvou, implementovanou na řídicí platformě. V případě potřeby informuje o přetížení sběrnice nebo umožňuje management pro obnovu dat. V této vrstvě je umožněno provádět částečné modifikace.

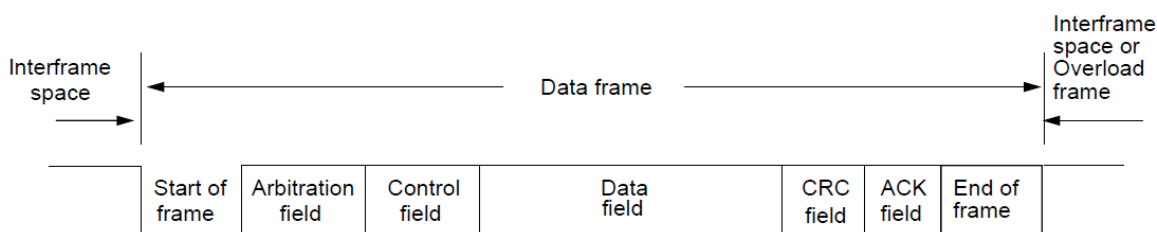
Medium Access Control je podvrstva, která má na starost arbitráž na sběrnici, kontrolu chyb v jednotlivých datových rámcích, vysílání poruchových signálů a rozklad rámců na bity předávané fyzické vrstvě k odeslání. Také řeší časování mezi příjmem/odesláním jednotlivých bitů a rozhoduje, kdy je sběrnice volná k přenosu a kdy se naopak zahájí příjem. Funkce této vrstvy musí zůstat zachovány.

Fyzická vrstva zajišťuje přenos jednotlivých bitů pomocí definovaného elektrického signálu (závislého na konkrétní aplikaci) mezi jednotlivými uzly. V rámci jedné topologie musí zůstat fyzická vrstva neměnná. Přenosová rychlost je v rámci jedné topologie jednotná, její hodnota se nastavuje podle potřeb konkrétní aplikace.

Sběrnice CAN obsahuje flexibilní topologii, ve které se mohou přidávat jednotlivé uzly, aniž by bylo nutné měnit hardwarovou či softwarovou konfiguraci. Předávané zprávy obsahují jednoznačné identifikátory (ID), pomocí kterých jsou v dané aplikaci reprezentována konkrétní data. Skrze sběrnici CAN nejsou data předávána od konkrétního uzlu A do konkrétního uzlu B, ale data jsou poslána skrze metodu broadcast všem uzlům a jednotlivé uzly si vyfiltrují zprávy, které jsou pro ně určeny. Tím je umožněn simultánní příjem jedné zprávy více uzly, tzv. multicast.

Jedná se o tzv. „multi-master“ sběrnici, ve které jakýkoliv uzel může zahájit komunikaci s tím, že přístup ke sběrnici získá uzel nebo uzly, které odesílají zprávu s největší prioritou. Priority zpráv jsou na sběrnici CAN statické a jsou odvozeny od jejich ID. Zpráva s nižší hodnotou ID má vyšší prioritu.

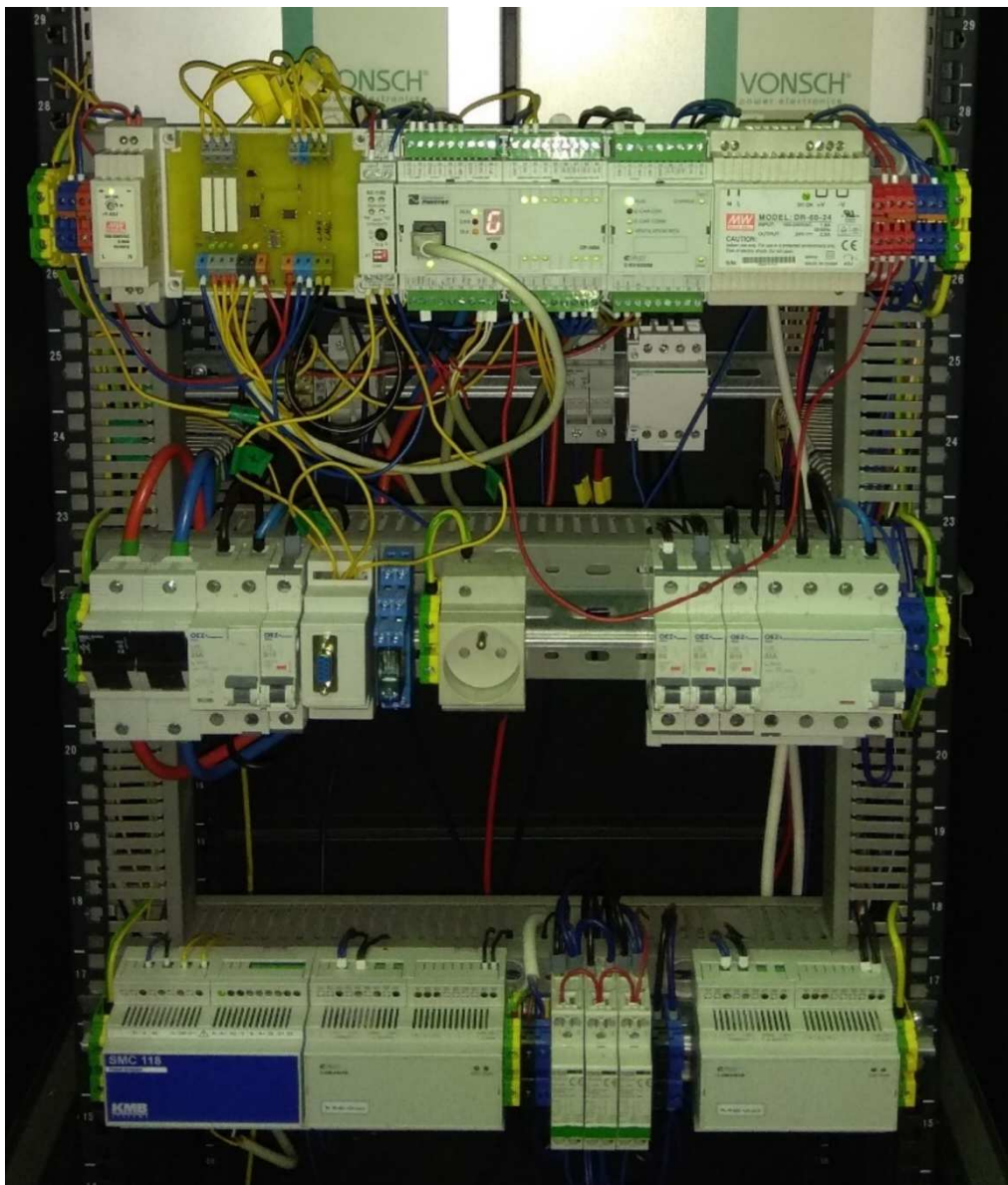
Protokol sběrnice CAN 2.0B definuje dva druhy formátu zpráv: „Standard“ s 11 bitovým ID a „Extended“ s 29 bitovým ID. V protokolu CHAdeMO se používají zprávy ve formátu „Standard“. Formát datového rámce je vyjádřen na Obr. 2-5. ID jednotlivých zpráv je uvedeno v položce „Arbitration field“, v části „Control field“ se uvádí počet bytů (0 až 8) odeslaných v datovém poli. Na sběrnici CAN 2.0B je umožněno posílat zprávy s rozdílnou délkou datového pole. Standard CHAdeMO definuje zprávy pouze s 8 bytovými datovými poli viz Tab. 2-2 a Tab. 2-3. Za datovým polem je v datovém rámci umístěn CRC kontrolní součet a pole pro potvrzení příjmu zprávy. Uzel, který přijme platnou zprávu, potvrdí přijetí odesláním kopie zprávy na sběrnici s potvrzením v položce „ACK field“.



Obr. 2-5 Datový rámec zprávy na sběrnici CAN 2.0B [13]

3 Návrh a realizace řídicí elektroniky pro nabíjecí systémy CHAdeMO

V původním řešení bylo řízení DC nabíječky skrze protokol CHAdeMO realizováno pomocí PLC TECOMAT Foxtrot CP-1004. Programovatelný logický automat obsahuje komunikační modul SC-1102, který zajišťuje komunikaci po sběrnici CAN a je vybaven dvěma digitálními výstupy pro řízení sekvence nabíjení a digitálním vstupem pro detekci povolení nabíjecího procesu od elektrického vozidla. Zapojení původního řešení v rozváděči je vyobrazeno na Obr. 3-1. S původním řešením se dostaneme v rámci nabíjecího procesu na začátek nabíjení, kdy se očekává příchod proudového požadavku z elektrického vozidla. Podle požadovaného proudu by se měl začít regulovat výstupní proud nabíječky. [7]



Obr. 3-1 Původní řešení zapojení nabíjecí stanice

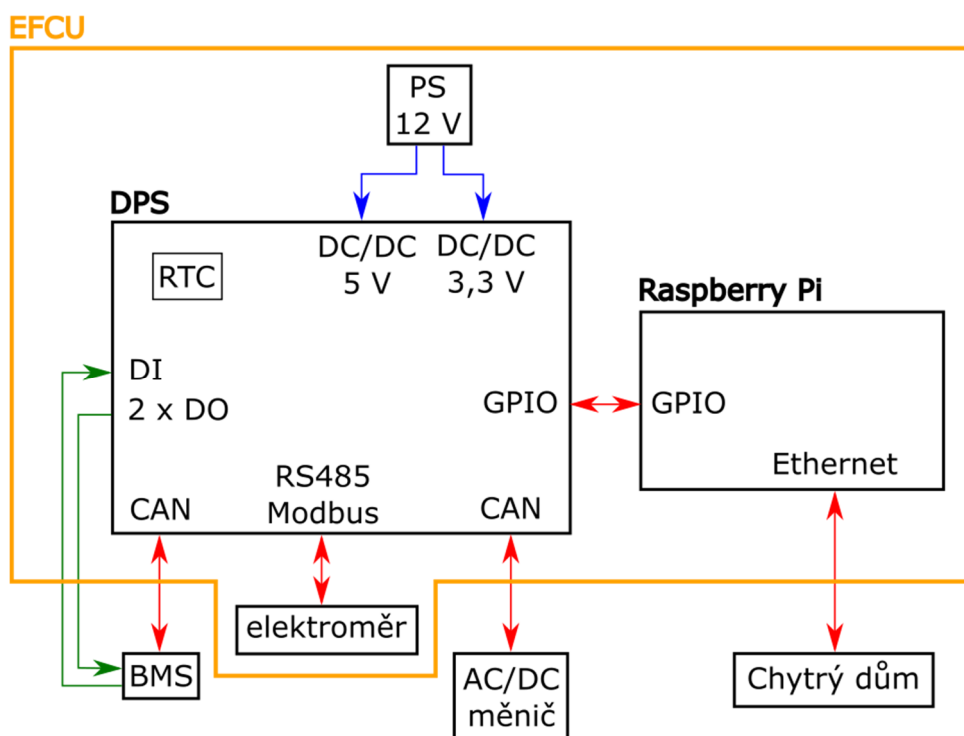
3.1 Řídicí jednotka Energy Flow Control Unit

Energy Flow Control Unit (ve zkratce EFCU) je řídicí jednotka energetických toků, která má za úkol zajistit řízení obousměrného měniče, komunikaci s BMS elektrického vozidla a komunikaci s chytrým domem. Řídicí jednotka EFCU využívá standard pro stejnosměrné rychlonabíjení CHAdeMO, který pro řízení nabíjení/vybíjení využívá digitální sběrnici CAN a sekvenční řídicí signály. Obr. 3-2 znázorňuje blokové schéma řídicí jednotky EFCU.

Obousměrný měnič umožňuje připojení EV do energetické infrastruktury domu pomocí AC kabelu, díky tomu se elektrické vozidlo může chovat jako zdroj nebo spotřebič elektrické energie. Jednotka BMS poskytuje informace o stavu baterie, stavu nabíjecího/vybíjecího procesu a posílá požadavek na nabíjecí proud. S obousměrným měničem a BMS se EFCU propojí pomocí průmyslové sběrnice CAN ve verzi 2.0B. Komunikační rychlost s BMS je nastavena podle definice v protokolu CHAdeMO na 500 kb/s, s obousměrným měničem je komunikační rychlost stanovena na 250 kb/s. K chytrému domu se EFCU připojí pomocí technologie Ethernet.

Standard CHAdeMO požaduje, aby nabíjecí/vybíjecí stanice posílala po celou dobu komunikace po sběrnici CAN naměřené hodnoty aktuálního stejnosměrném proudu a napětí. Díky tomu je součástí řídicí jednotky EFCU elektroměr s digitální komunikací na protokolu Modbus, který zajistí měření těchto veličin po dobu komunikace s EV.

V navržené topologii je řídicí jednotka EFCU umístěna spolu s obousměrným měničem v nabíjecí/vybíjecí stanici, která je umístěna v rámci infrastruktury domu. Jedná se o tzv. „off-board“ topologii, kde je EFCU a měnič umístěn mimo vozidlo. Propojení s EV je zde realizováno pomocí CHAdeMO kabelu s DC silovými vodiči, komunikačními a signalizačními vodiči. S chytrým domem je jednotka EFCU propojena fyzicky pomocí technologie Ethernet. [12]



Obr. 3-2 Blokové schéma řídicího systému EFCU [12]

Do budoucna je plánovaná tzv. „on-board“ topologie, kde by řídicí jednotka EFCU byla spolu s obousměrným měničem instalována do elektromobilu. Vozidlo by bylo propojeno s energetickou infrastrukturou domu pouze pomocí AC kabelu a komunikace s řídicím systémem chytrého domu by byla zajištěna pomocí technologie WiFi nebo Bluetooth. Návrh a realizace této topologie je náročná, protože by se záruka EV musela vztahovat také na řídicí jednotku EFCU a obousměrný měnič. Topologie „on-board“ je výhodná pro cílového zákazníka, který nebude muset dokupovat externí nabíjecí stanici. [12]

3.2 Návrh nové řídicí jednotky EFCU

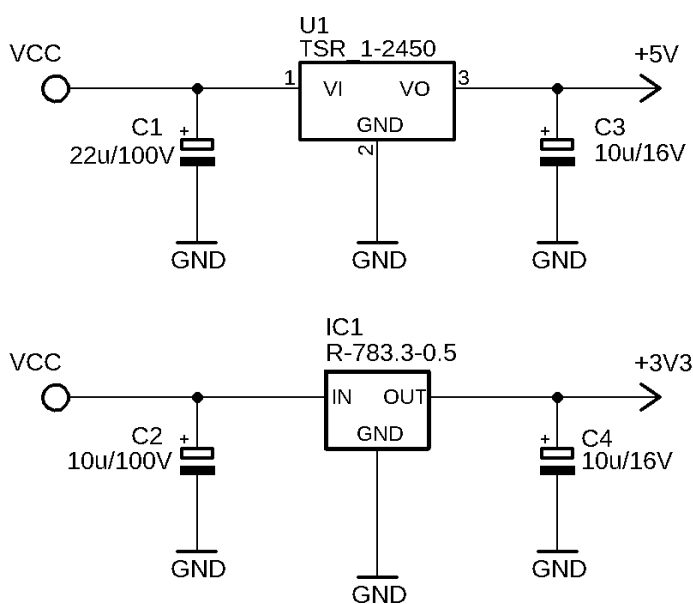
Nová řídicí jednotka pro kontrolu energetických toků v rámci systému Vehicle To Home dostala název „Energy Flow Control Unit“, ve zkratce EFCU.

V novém řešení se (pro jednoduchost při testování) jako řídicí jednotka zvolil jednodeskový počítač Raspberry Pi 3B+ (dále se uvádí pouze Raspberry Pi). K Raspberry Pi se vyvinula deska plošného spoje, na které jsou realizovány dvě sběrnice CAN, sběrnice RS-485, tři galvanicky oddělené digitální výstupy spínané pomocí relé a digitální vstup. [11]

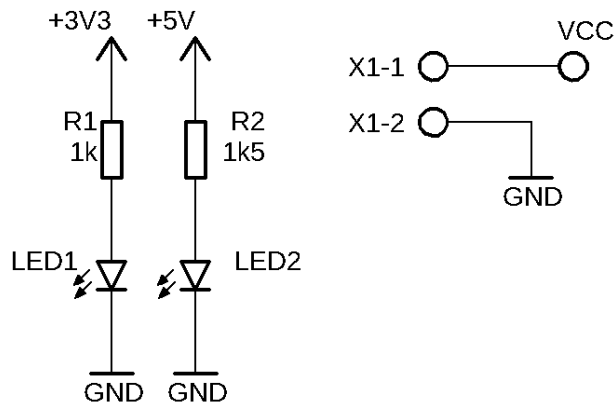
3.2.1 DPS řídicí jednotky EFCU

DPS je osazena dvěma DC/DC měniči pro konverzi 12 V napájecího napětí na logické napěťové úrovně 5 V a 3,3 V viz Obr. 3-3. Přítomnost napětí 5 V a 3,3 V na výstupech měničů je signalizována pomocí LED viz Obr. 3-4.

Obvody na DPS jsou napájeny z těchto DC/DC měničů. Jednodeskový počítač Raspberry Pi není výkonově zatěžován odběrem z pinů GPIO, které pracují na napěťové úrovni 3,3 V.

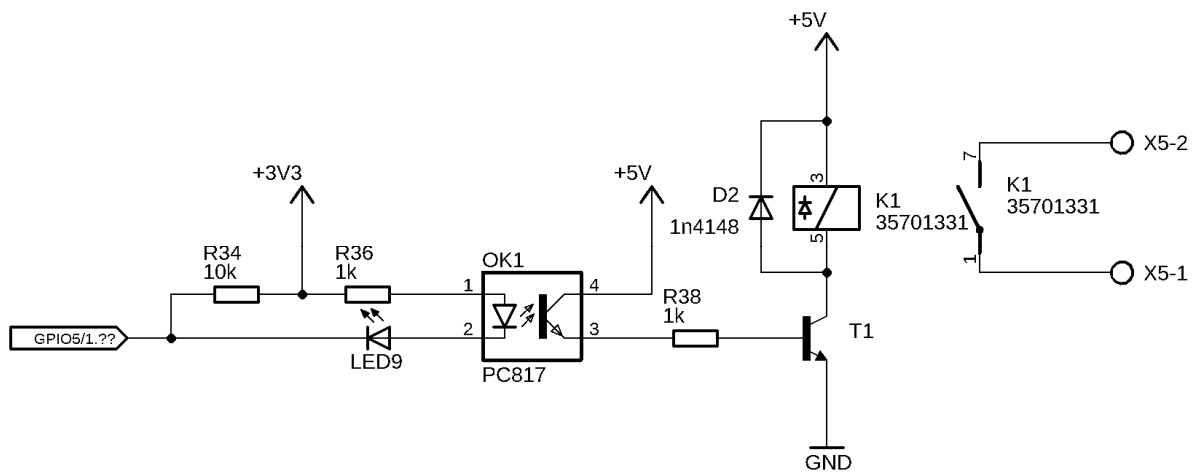


Obr. 3-3 Schéma DC/DC měničů



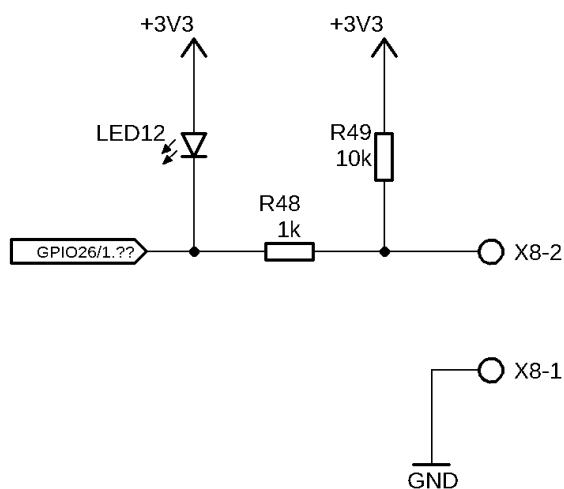
Obr. 3-4 Signalizace logických napěťových úrovní, konektor napájení

Digitální výstupy obsahují signalizační LED, aby byla obsluha informována o sepnutém stavu digitálního výstupu. Budící část tranzistoru (pracujícího ve spínacím režimu) je galvanicky oddělena od GPIO pinů Raspberry Pi pomocí optočlenu viz Obr. 3-5.



Obr. 3-5 Schéma galvanicky odděleného digitálního výstupu

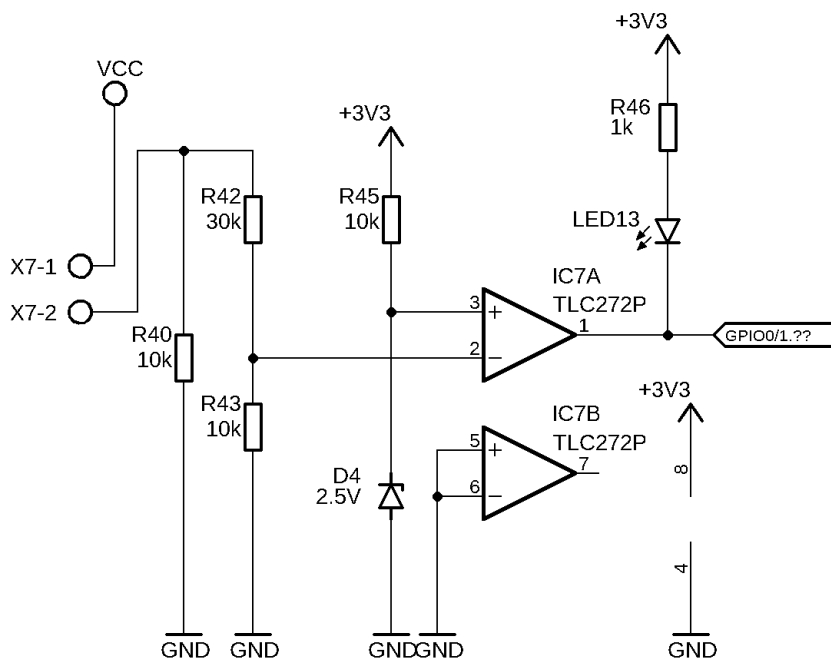
Deska plošných spojů je osazena digitálním vstupem se signalizační LED bez galvanického oddělení viz Obr. 3-6, protože se tento vstup připojuje k optočlenu, který zajistí galvanické oddělení.



Obr. 3-6 Schéma digitálního vstupu

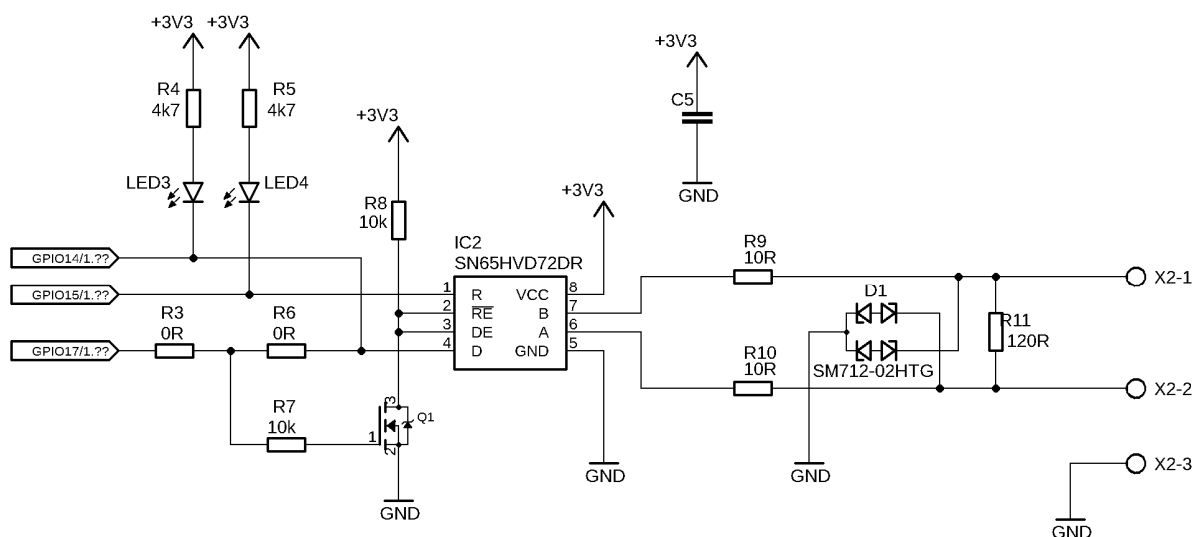
Nabíjecí stanice musí mít možnost zamčení zástrčky nabíjecího CHAdeMO kabelu, která musí být zamčená od počátku izolačního testu do ukončení nabíjení. Zároveň je za potřeby informovat obsluhu o zamčeném stavu zástrčky. [4]

Zámek zástrčky CHAdeMO kabelu je zamknut při sepnutém reléovém výstupu řídicí jednotky. Detekce zamčeného stavu je provedena pomocí operačního zesilovače zapojeného jako komparátor. Signalizace o zamčeném stavu je pro obsluhu zajištěna pomocí LED viz Obr. 3-7.



Obr. 3-7 Schéma obvodu pro detekci stavu zámku zástrčky

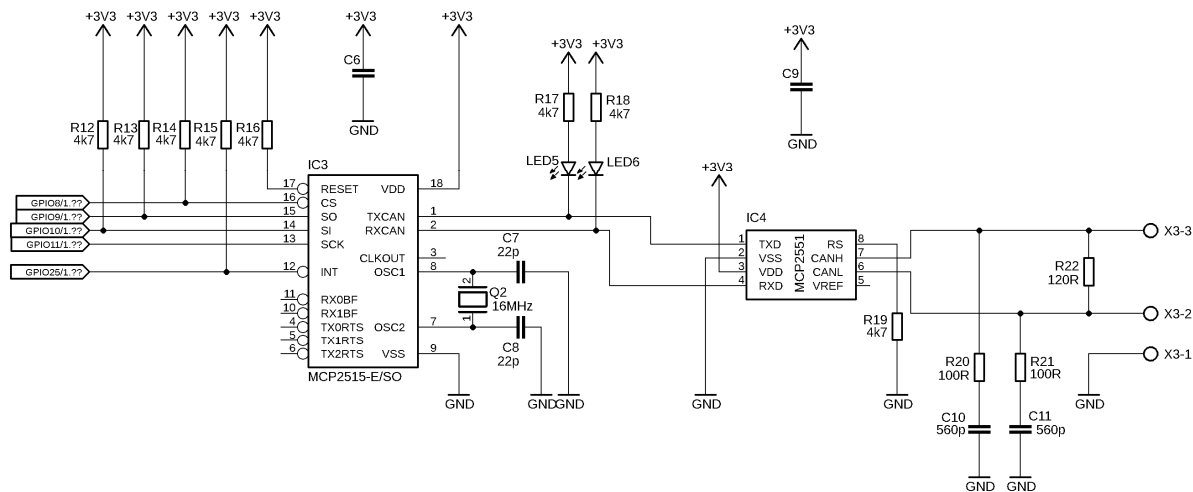
Raspberry Pi obsahuje UART (součástku zajišťující komunikaci pomocí asynchronního sériového komunikačního protokolu). Součástka SN65HVD72 od firmy Texas Instruments umožňuje připojit sériové komunikační piny ke sběrnici RS-485. RS-485 je průmyslová sériová komunikační sběrnice pracující jako poloviční duplex (v konkrétní okamžik probíhá komunikace pouze jedním směrem). Tato součástka podporuje 3,3 V napětíovou logiku, na které pracují piny Raspberry Pi, proto není nutné provést napětíový převod. Vysílání a příjem po sériové komunikační sběrnici jsou signalizovány pomocí dvou LED. Schéma zapojení je zobrazeno na Obr. 3-8.



Obr. 3-8 Schéma převodníku z UART na RS-485

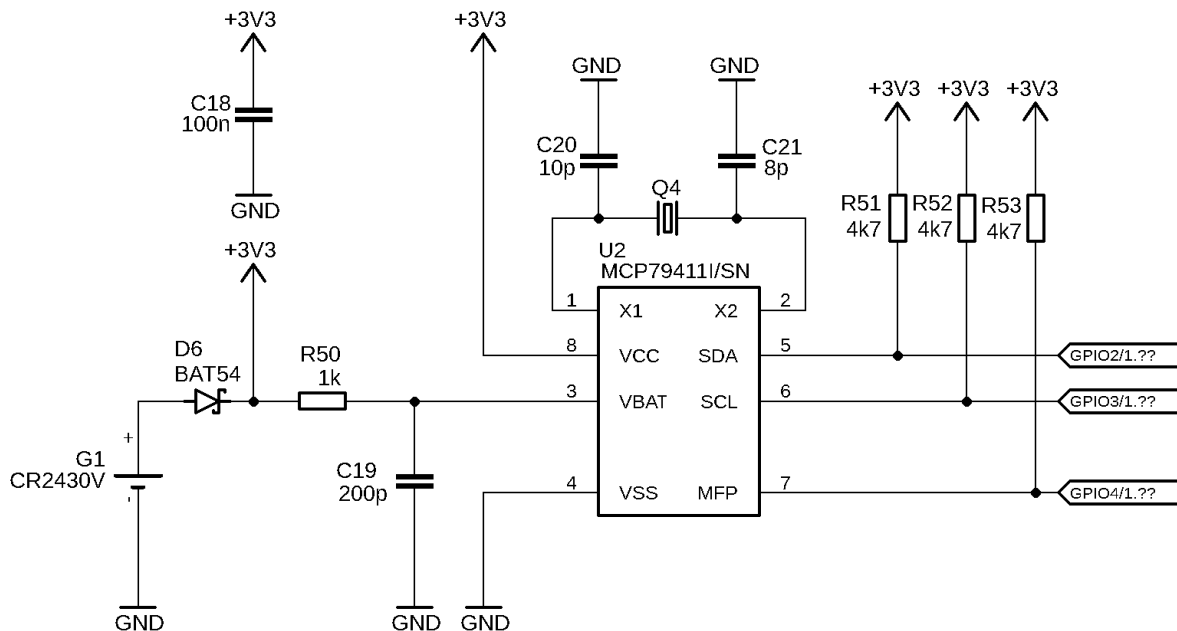
Jelikož Raspberry Pi není vybaveno rozhraním pro sběrnici CAN, tak se musel navrhnout převodník z některého dostupného rozhraní na platformě Raspberry Pi. Tato platforma obsahuje rozhraní SPI, I²C a UART. Pro realizaci bylo vybráno rozhraní SPI a převodník MCP2515, který potřebuje ke své správné funkci externí krystal. Byl zvolen 16 MHz krystal, jeho hodnota je důležitá pro následné softwarové nastavení. Další nutnou součástí obvodu je takzvaný transceiver, který vytváří fyzickou vrstvu sběrnice CAN v souladu s normou ISO 11898, protože součástka MCP2515 používá pouze vstup RXCAN a výstup TXCAN, ale nevytváří fyzickou vrstvu sběrnice. Vhodným transceiverem byl model SN65HVD231QDG4 od firmy Texas Instruments, protože pracuje s napětím 3,3 V stejně jako převodník MCP2515. Tudíž nebylo potřeba navrhovat převodníky napětí. (U transceiverů pracujících na 5 V se osazují oboustranné převodníky napětíových úrovní tvořené N-MOSFET tranzistorem s ochrannou diodou a dvěma pull-up rezistory.) Probíhající komunikace je indikována pomocí LED na straně odesílání i příjmu. Schéma připojení CAN sběrnice k platformě Raspberry Pi je vyobrazeno na Obr. 3-9.

Navržený plošný spoj obsahuje dvě rozhraní pro sběrnici CAN, jedno pro komunikaci s BMS elektrického vozidla a druhou pro komunikaci s obousměrným měničem, který umožňuje tok elektrické energie jednak z domu do EV, tak i z EV zpět do domu. (Koncept elektrického propojení V2H.)



Obr. 3-9 Schéma převodníku ze sběrnice SPI na sběrnici CAN

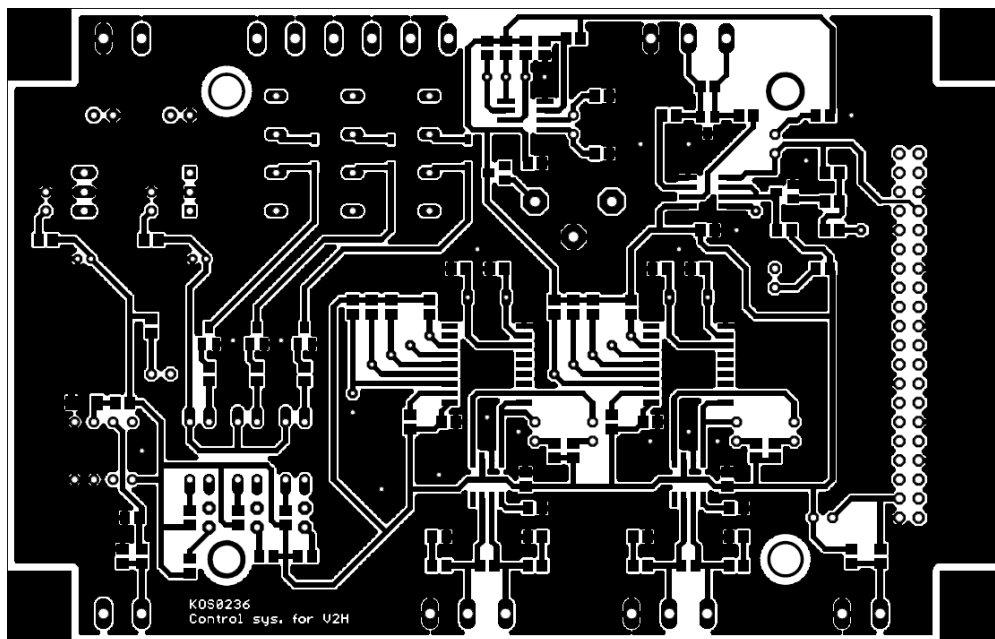
Jelikož Raspberry Pi neobsahuje hodiny reálného času, tak se DPS osadila čipem MCP79411 od firmy Microchip. Tento čip obsahuje hodiny reálného času s kalendářem, non-volatilní EEPROM paměť o velikosti 1 kb a baterií zálohovanou statickou paměť RAM o velikosti 64 bytů. Komunikačním rozhraním tohoto čipu je I²C, pomocí kterého je čip propojen s platformou Raspberry Pi viz Obr. 3-10.



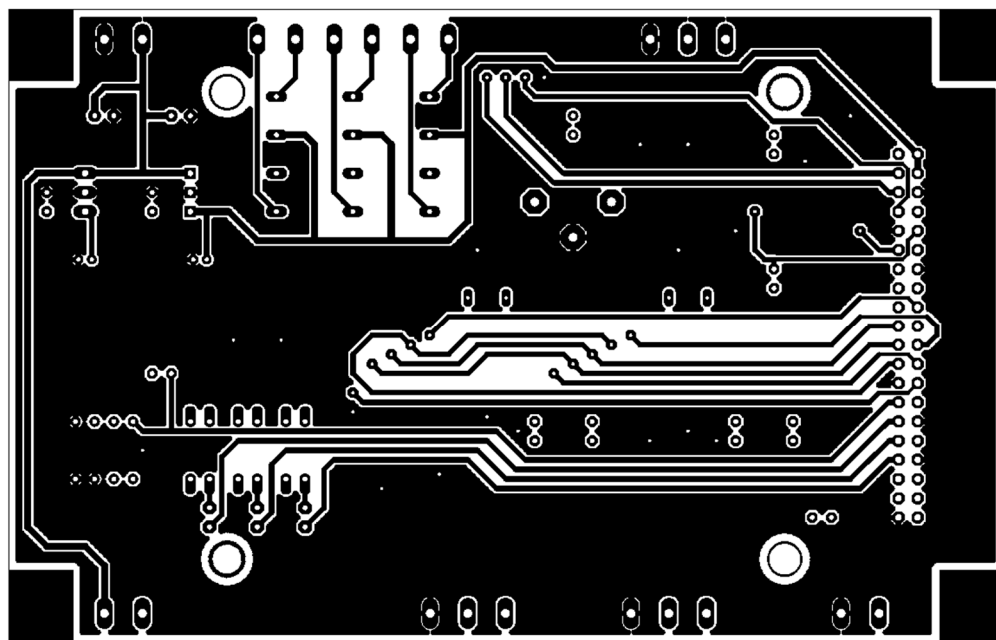
Obr. 3-10 RTC modul na sběrnici I²C

Pro výrobu prototypové DPS řídicí jednotky energetických toků EFCU, byla použita dvouvrstvá technologie a kombinace součástek SMD a THT.

Pro návrh schématu a samotné DPS byl použit software Autodesk Eagle. Měděná vrstva Top s prokvy a pájecími plochami je znázorněna na Obr. 3-11, obdobně vrstva Bottom na Obr. 3-12. Obě vrstvy jsou zobrazeny v poměru 1:1.



Obr. 3-11 TOP vrstva DPS v poměru 1:1



Obr. 3-12 BOTTOM vrstva DPS v poměru 1:1

V tabulce Tab. 3-1 jsou vypsány použité součástky k výrobě desky plošných spojů. Součástky jsou seřazeny podle počtu použitých kusů (levý sloupec). Další sloupce zleva obsahují: název součástky, použité pouzdro a hodnotu součástky.

Tab. 3-1 Seznam použitých součástek

Quantity	Device	Package	Value
21	R-EU R0805	R0805	4k7
13	LED5MM	LED5MM	
10	R-EU R0805	R0805	1k
9	R-EU R0805	R0805	10k
6	AK500/2	AK500/2	
5	C-EUC0805	C0805	
4	R-EU R0805	R0805	100R
4	C-EUC0805	C0805	22p
4	C-EUC0805	C0805	560p
3	AK500/3	AK500/3	
3	BSR12-NPN-SOT23-BEC	SOT23-BEC	
3	R-EU R0805	R0805	120R
3	DIODESOD-123	SOD-123	1n4148
3	35701331	REED	35701331
3	PC817	DIL04	PC817
2	R-EU R0805	R0805	0R
2	R-EU R0805	R0805	10R
2	CPOL-EUE1.8-4	E1,8-4	10u/16V
2	XTAL/S	QS	16MHz
2	MCP2515-E/SO	SO18L	MCP2515-E/SO
2	MCP2551/SN	SO8	SN65HVD231QDG4
1	CRYSTALTC38H	TC38H	
1	MA20-2	MA20-2	
1	MOSFET-NREFLOW	SOT23	
1	C-EUC0805	C0805	100n
1	C-EUC0805	C0805	10p
1	CPOL-EUE2.5-6	E2,5-6	10u/100V
1	R-EU R0805	R0805	1k5
1	ZENER-DIODESOD80C	SOD80C	2.5V
1	C-EUC0805	C0805	200p
1	CPOL-EUE2.5-6	E2,5-6	22u/100V
1	R-EU R0805	R0805	30k
1	C-EUC0805	C0805	8p
1	BAT54	SOT23	BAT54
1	CR2430V	CR2430V	CR2430V
1	MCP79411I/SN	SO8	MCP79411I/SN
1	R-783.3-0.5	SIP3	R-783.3-0.5
1	PESD1CAN	SOT23	SM712-02HTG
1	SN65176D	SO-08	SN65HVD72DR
1	TLC272P	DIL08	TLC272P
1	TSR_1-2450	TSR-1	TSR_1-2450

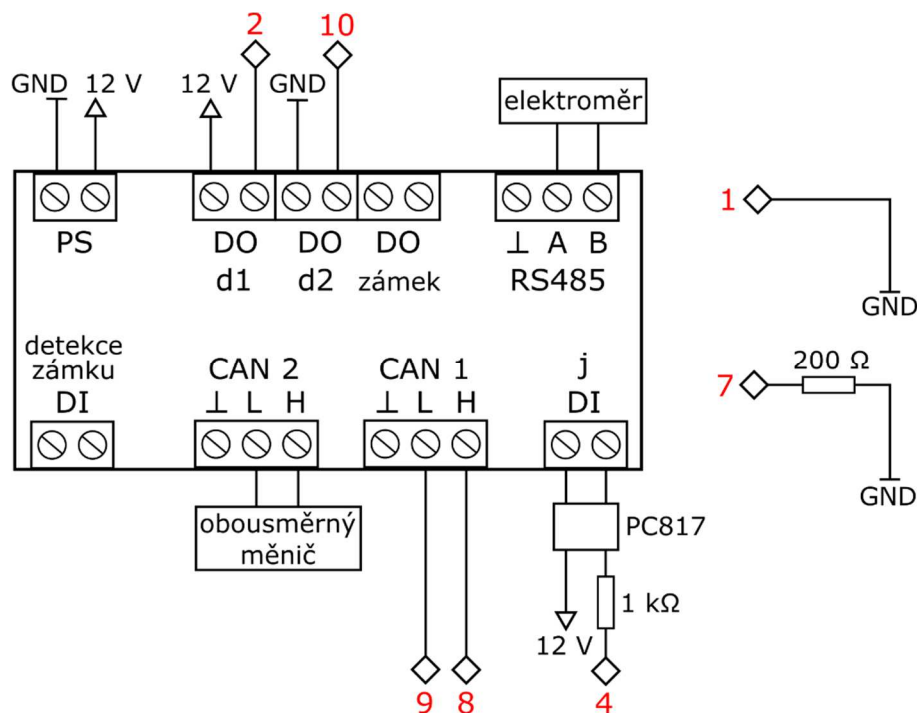
Fotka osazené desky plošných spojů umístěné v krabičce je na Obr. 3-13. DPS je propojena s Raspberry Pi pomocí flexibilního plochého kabelu, který se připojuje na straně Raspberry Pi i na straně DPS pomocí dvojitě, 40 pinové lišty.



Obr. 3-13 Osazená DPS řídicí jednotky EFCU

3.2.2 Zapojení řídicí jednotky EFCU

Schéma na Obr. 3-14 znázorňuje propojení navržené DPS řídicí jednotky EFCU s elektroměrem, obousměrným měničem a CHAdeMO rozhraním, které propojuje BMS s nabíjecí/vybíjecí stanicí. Čísla vodičů a použité součástky, ve schématu propojení DPS, respektují značení vodičů v definovaném rozhraní standardu CHAdeMO viz Obr. 2-3 a jejich zapojení koresponduje s rozložením vodičů v zástrčce CHAdeMO kabelu na Obr. 2-4. [4]



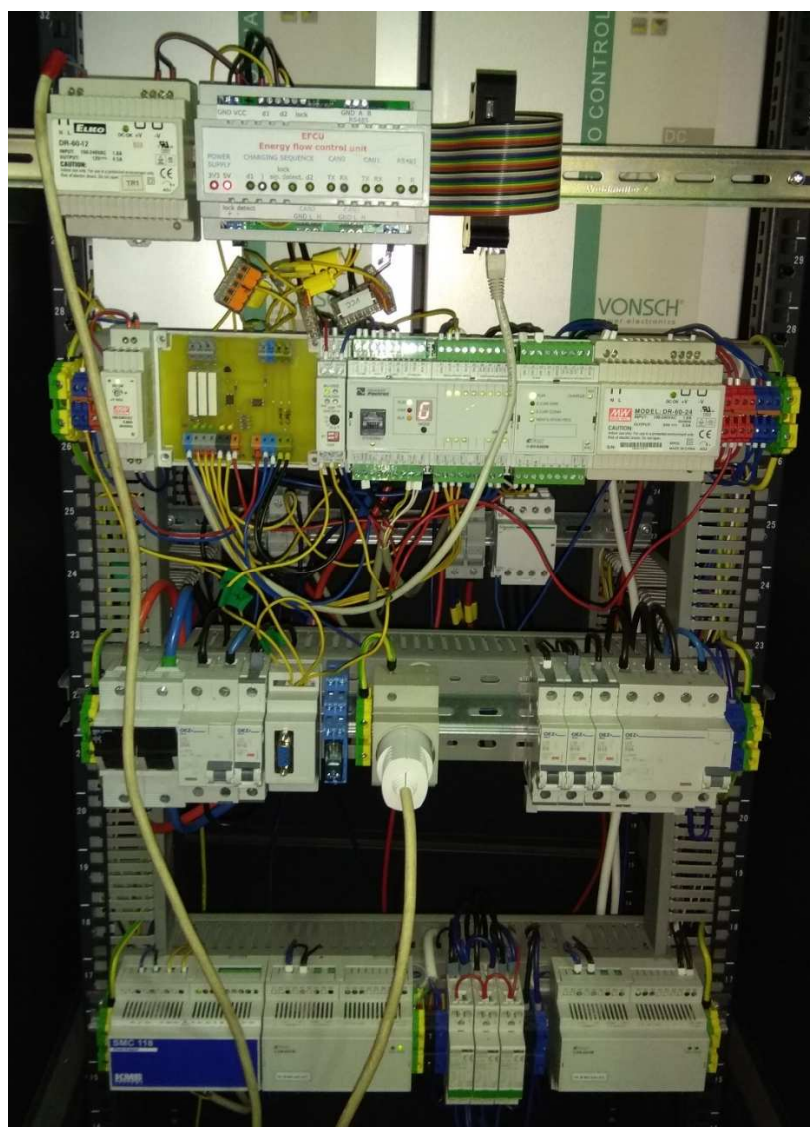
Obr. 3-14 Propojení DPS řídicí jednotky EFCU s CHAdeMO rozhraním [4]

Na Obr. 3-15 je vyfocený detail zapojené řídicí jednotky EFCU, umístěné na DIN liště v rozváděčové skříni. Vlevo je stejnosměrný napěťový zdroj Elko s výstupním napětím 12 V DC a výkonem 54 W. Tento výkon napájecího zdroje je zvolen na základě požadavku normy na výkon 24 W u zdroje napájecího komunikačního rozhraní CHAdeMO, požadovaného výkonu 13 W pro napájení jednodeskového počítače Raspberry Pi a zbylý výkon 17 W slouží pro napájení součástek osazených na navržené DPS. Počítač Raspberry Pi je napájen pomocí vyhrazených vstupních pinů 5 V, na které je přivedeno napětí z DC/DC měniče pomocí flexibilní sběrnice, propojující dvojitě, 40 pinové lišty na DPS a počítači Raspberry Pi. Propojení skrze flexibilní sběrnici je vidět v pravé části Obr. 3-15, zároveň je zde vidět počítač Raspberry Pi, umístěný v krabici vytištěné na 3D tiskárně. Tato krabice, která disponuje uchycením na DPS lištu, byla v rámci diplomové práce upravena pro připojení flexibilní sběrnice. V centrální části Obr. 3-15 se nachází navržená DPS řídicí jednotky EFCU, umístěná v krabici s vyvedenými signalizačními LED, které informují o přítomnosti napájecích napětí, zobrazují stav sekvenčních signálů komunikace CHAdeMO a indikují probíhající komunikaci na sběrnících CAN a RS-485.

Fotka na Obr. 3-16 zachycuje umístění nové řídicí jednotky EFCU v rámci celé rozváděčové skříně. Jednotka EFCU je zde umístěna na horní DIN liště.



Obr. 3-15 Nainstalovaná řídicí jednotka EFCU v rozváděči



Obr. 3-16 Nové řešení zapojení v rozváděči nabíjecí/vybíjecí stanice

3.2.3 Elektroměr s digitální komunikací pomocí protokolu Modbus RTU

V rámci standardu CHAdeMO je požadováno odesílat aktuální hodnoty DC napětí a proudu (měřené na výstupu nabíjecí/vybíjecí stanice) po celou dobu komunikace s elektrickým vozidlem prostřednictvím komunikační sběrnice CAN.

Součástí řídicího systému EFCU je DC/AC elektroměr Carlo Gavazzi CPA300-1LS1X, který umožňuje komunikovat po sériové sběrnici RS-485 s protokolem Modbus RTU. Tento elektroměr umožňuje měřit AC/DC napětí a pomocí Hallovy sondy měří AC/DC proud. Na Obr. 3-17 je fotka zapojeného elektroměru v rozváděčové skříni.

Tento elektroměr se v rámci systému EFCU používá k měření DC napětí a proudu. Vstupními rozsahy a přesností naměřené hodnoty DC napětí elektroměr splňuje požadavky protokolu CHAdeMO. Elektroměr, s maximální chybou měření DC proudu menší než 2 A, nesplňuje požadavek normy viz Tab. 3-2. Pro vyvíjený prototyp je ale tato přesnost dostatečná. [4]

Tab. 3-2 Požadavky na přesnost elektroměru [4]

	Teoretický rozsah použití	Rozsah měření elektroměru	Požadovaná přesnost měření	Chyba měření elektroměru
DC napětí	50–500 V	50–1000 V	$\pm 5 \text{ V}$	$< 5 \text{ V}$
DC proud	0–125 A	0–400 A	$\pm (1,5 \% \text{ akt. hodnoty} + 1 \text{ A})$	$< 2 \text{ A}$



Obr. 3-17 Elektroměr s digitální komunikací pomocí protokolu Modbus RTU

4 Návrh a realizace propojení s vybíjecí stanicí

Při vývoji řídicí jednotky EFCU nebylo placeno členství v asociaci CHAdeMO, které ve verzi „Regular“ umožňuje přístup k CHAdeMO protokolu a stojí 4000 € ročně. Vycházelo se pouze z anglické normy: Technical Specifications of a DC Quick Charger for Use with Electric Vehicles IEEE 2030.1.1-2015 a české normy: Systém nabíjení elektrických vozidel vodivým propojením ČSN EN 61851. Tyto normy popisují obecné požadavky na systém DC rychlonabíjení CHAdeMO, parametry digitální komunikace s EV a sekvenci nabíjecího procesu, ale nezacházejí do požadovaných detailů, nepíší o sekvenci při vybíjení elektromobilu a neuvádějí rozdíly mezi jednotlivými verzemi CHAdeMO protokolu.

Díky absenci CHAdeMO protokolu se za účelem analýzy vybíjecího procesu přistoupilo k odposlechu komunikace po průmyslové sběrnici CAN mezi elektrickým vozidlem a komerční vybíjecí stanicí SETEC Power, jejíž fotka je na Obr. 4-2. Pro odposlech se použil hardware řídicí jednotky EFCU za účelem připojení ke sběrnici CAN a vytvořil se program k logování odposlechnuté komunikace mezi EV a vybíjecí stanicí. Program běží na jednodeskovém počítači Raspberry Pi a data se ukládají do textových logovacích souborů viz Obr. 4-1, na kterém je úryvek z textového souboru, znázorňující ukládané zprávy v CHAdeMO komunikaci. [3][4][19]

25 Nov 2019	10:37:53.491695	ID: 0100	DLC: 8	00	00	00	00	b3	01	d0	00
25 Nov 2019	10:37:53.501653	ID: 0101	DLC: 8	00	ff	3c	00	00	00	00	00
25 Nov 2019	10:37:53.511657	ID: 0102	DLC: 8	02	9a	01	13	00	c1	b2	00
25 Nov 2019	10:37:53.529277	ID: 0108	DLC: 8	00	c2	01	14	b3	01	00	00
25 Nov 2019	10:37:53.529622	ID: 0109	DLC: 8	01	84	01	00	01	05	ff	3c

Obr. 4-1 Data v textovém logovacím souboru CHAdeMO komunikace



Obr. 4-2 Vybíjecí stanice SETEC Power

Vybíjecí stanice SETEC Power zajišťuje komunikaci s elektrickým vozidlem a obsahuje měnič, který převádí DC napětí z baterie EV na standardní AC napětí 230 V s frekvencí 50 Hz, které využívají jednofázové domácí spotřebiče. Pro testovací účely se použil elektromobil Nissan Leaf a jako spotřebič se využila rychlovarná konvice.

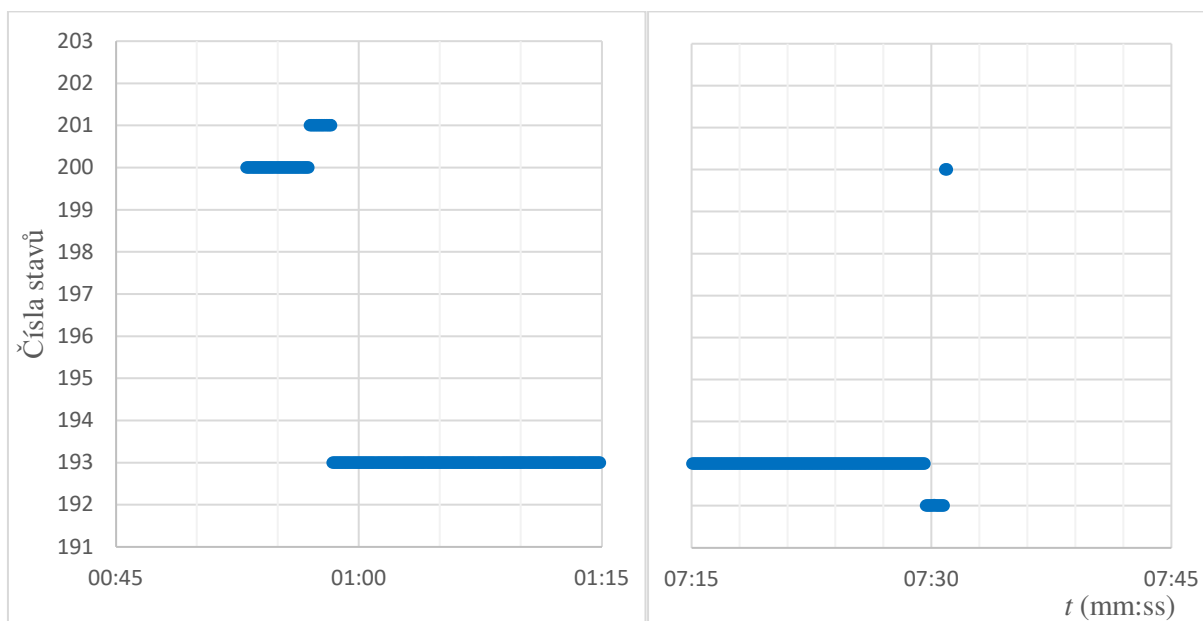
Při vybíjení EV odebírala rychlovarná konvice průměrný proud 8 A po dobu šesti a půl minut. Datové zprávy ze sběrnice CAN se ukládaly na platformě Raspberry Pi do logovacího textového souboru, který se následně vyčetl a zpracoval pomocí tabulkového procesoru.

4.1 Analýza vybíjecího procesu

Graf na Obr. 4-3 vyjadřuje změnu stavů EV při vybíjení. Jednotlivé stavy jsou popsány v Tab. 4-1. Nejprve je elektrickým vozidlem zakázáno nabíjení a stykač je v rozepnutém stavu, poté se povolí stav „nabíjení“ a následně sepne stykač. Při ukončení vybíjecího procesu se stav „nabíjení“ zakáže a poté se stykač rozezne. [4]

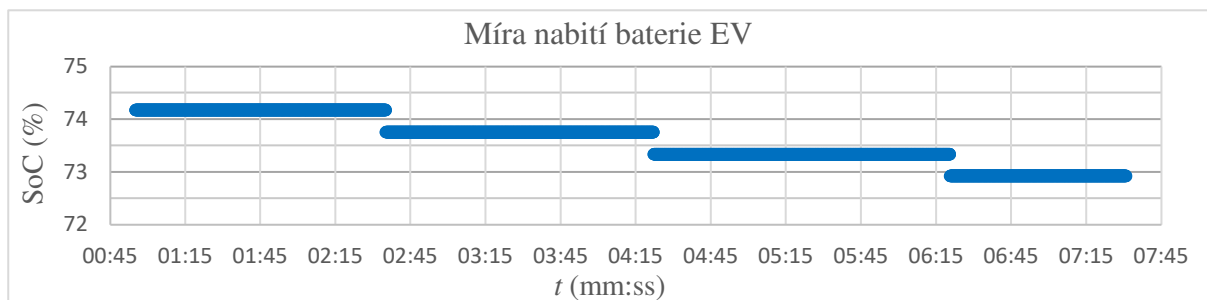
Tab. 4-1 Popis stavů EV při vybíjení [4]

Číslo stavu	Nabíjení	Stykač
201	Povoleno	Rozepnut
200	Zakázáno	Rozepnut
193	Povoleno	Sepnut
192	Zakázáno	Sepnut



Obr. 4-3 Stavů EV při vybíjení

Při testovaném vybíjení se za šest a půl minuty snížila míra nabití baterie EV o 1,25 % viz Obr. 4-4.



Obr. 4-4 Míra nabití baterie EV při vybíjení

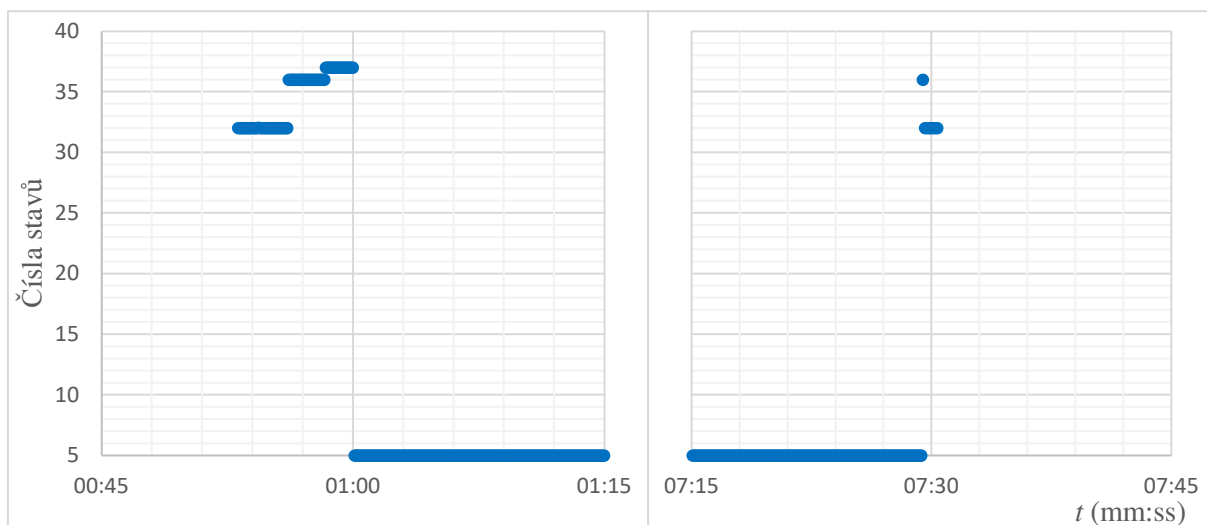
Tabulka Tab. 4-2 popisuje stavy, mezi kterými přechází vybíjecí stanice během vybíjecího procesu. Při testovaném vybíjení nenastal stav, během kterého by došlo k poruše nabíječky, poruše nabíjecího systému nebo byla baterie vyhodnocena jako nekompatibilní. Přechody mezi jednotlivými stavy stanice v závislosti na čase, jsou znázorněny na Obr. 4-5.

Nejprve se změnil příznak zamčení zástrčky nabíjecího kabelu na „zamknut“, poté přešla nabíječka z pohotovostního do nabíjecího režimu a nakonec se změnil příznak kontroly zastavení nabíjení z „nabíjení zastaveno“ na „nabíjení probíhá“.

Při ukončení nabíjení se zároveň změnil režim stanice na pohotovostní a příznak kontroly zastavení nabíjení na „nabíjení zastaveno“. Nakonec se po odemčení zámku zástrčky změnil příznak jeho zamčení na „odemknut“. [4]

Tab. 4-2 Popis stavů vybíjecí stanice [4]

Číslo stavu	Režim stanice	Porucha nabíječky	Zámek zástrčky	Kompatibilita baterie	Porucha nab. systému	Kontrola zastavení nabíjení
37	Nabíjení	Ne	Zamknut	Kompatibilní	Ne	Nab. zastaveno
36	Pohotovostní	Ne	Zamknut	Kompatibilní	Ne	Nab. zastaveno
32	Pohotovostní	Ne	Odemknut	Kompatibilní	Ne	Nab. zastaveno
5	Nabíjení	Ne	Zamknut	Kompatibilní	Ne	Nab. probíhá



Obr. 4-5 Stavů vybíjecí stanice při vybíjení

5 Analýzy, návrh a implementace řídicích algoritmů pro provoz v chytré domácnosti

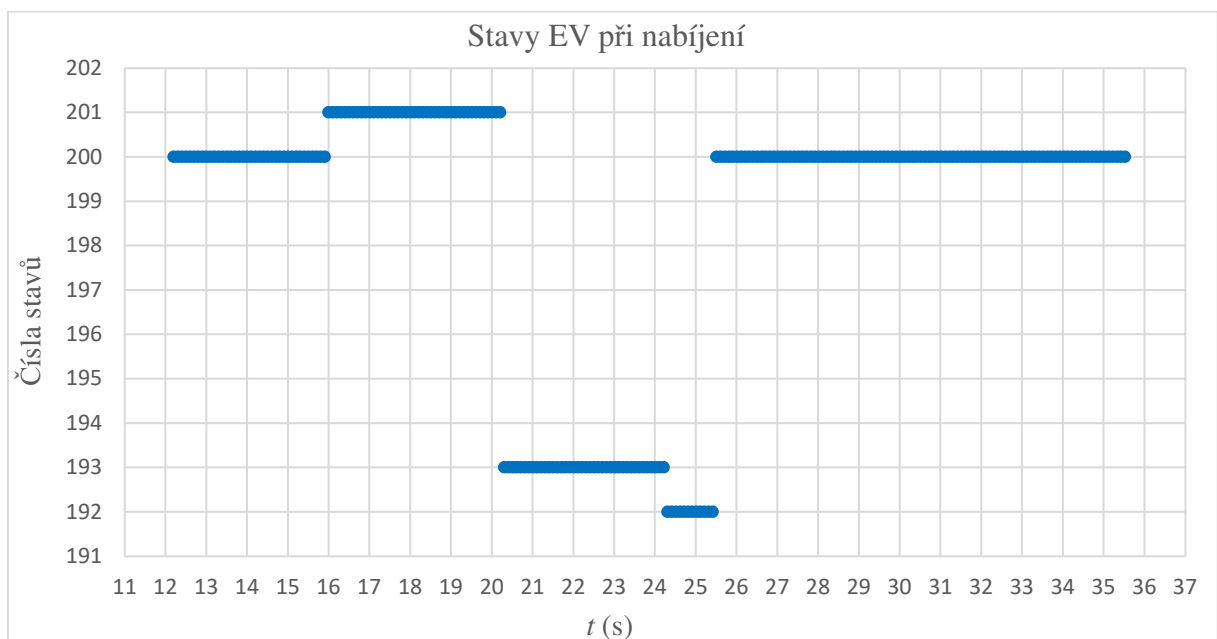
Pro realizaci systému Vehicle To Home je potřeba implementovat jak algoritmy pro vybíjecí proces, tak algoritmy k procesu nabíjení. Řídicí jednotka EFCU musí umět mezi těmito procesy přepínat na základě plánu energetické optimalizace, poskytnutého z nadřazeného systému chytrého domu.

5.1 Analýza nabíjecího procesu

Elektromobil přepíná své stavy při jeho nabíjení ve stejném sledu, jako u vybíjecího procesu. Popis stavů a jejich sled je vyobrazen v tabulce Tab. 5-1 a na obrázku Obr. 5-1. [4]

Tab. 5-1 Popis stavů EV při nabíjení [4]

Číslo stavu	Nabíjení	Stykač
201	Povoleno	Rozepnut
200	Zakázáno	Rozepnut
193	Povoleno	Sepnut
192	Zakázáno	Sepnut



Obr. 5-1 Stavy EV při nabíjení

5.2 Sekvence CHAdeMO komunikace

Sekvence nabíjení/vybíjení se zahájí, jakmile uživatel zmáčkne tlačítko „start“. Tím řídicí systém EFCU přejde ze stavu „standby“ do stavu „start communication“ a odešle signál „začátek nabíjení“ (d1). BMS ihned po obdržení signálu odešle údaje o baterii EV. Podle těchto údajů zkontroluje nabíjecí/vybíjecí stanice svou kompatibilitu s EV (zda je její maximální napětí vyšší než cílové napětí baterie) a odešle vlastní data. Pokud kompatibilitu potvrdí i vozidlo, tak odešle signál „nabíjení vozidla povoleno“ (k), čímž se aktivuje optočlen (j) na straně řídicího systému energetických toků a systém přejde do stavu „setup“.

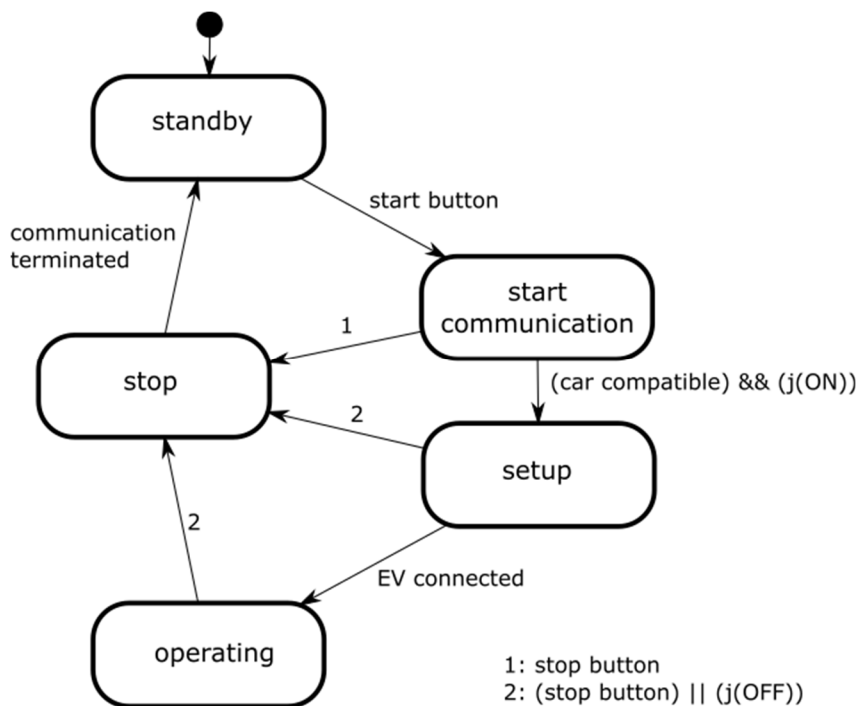
Ve stavu „setup“ systém EFCU aktivuje zámek zástrčky CHAdeMO kabelu a zkontroluje jeho uzamčení. Pokud je kontrola spečení kontaktů povolena a nabíjecí/vybíjecí stanice tuto kontrolu umožňuje, tak se vykoná kontrola spečení kontaktů a po úspěšném dokončení kontroly se odešle signál „zahájit nabíjení“ (d2) a systém EFCU přejde do stavu „charging“.

EV sepne stykač baterie a BMS počítá (podle stavu nabití baterie) požadovaný proud k nabíjení a odesílá jeho hodnotu každých 100 ms po sběrnici CAN. Nabíjecí/vybíjecí stanice má za úkol regulovat výstupní proud podle této požadované hodnoty. Toho dosáhne tím, že řídicí systém EFCU předá požadovanou hodnotu proudu jako příkaz do měniče, který reguluje výstupní stejnosměrný proud na tuto hodnotu. V případě vybíjení počítá BMS nabíjecí proud také, ale od EFCU dostává odpověď s nulovým aktuálním proudem a ve skutečnosti se baterie vybíjí vybíjecím proudem.

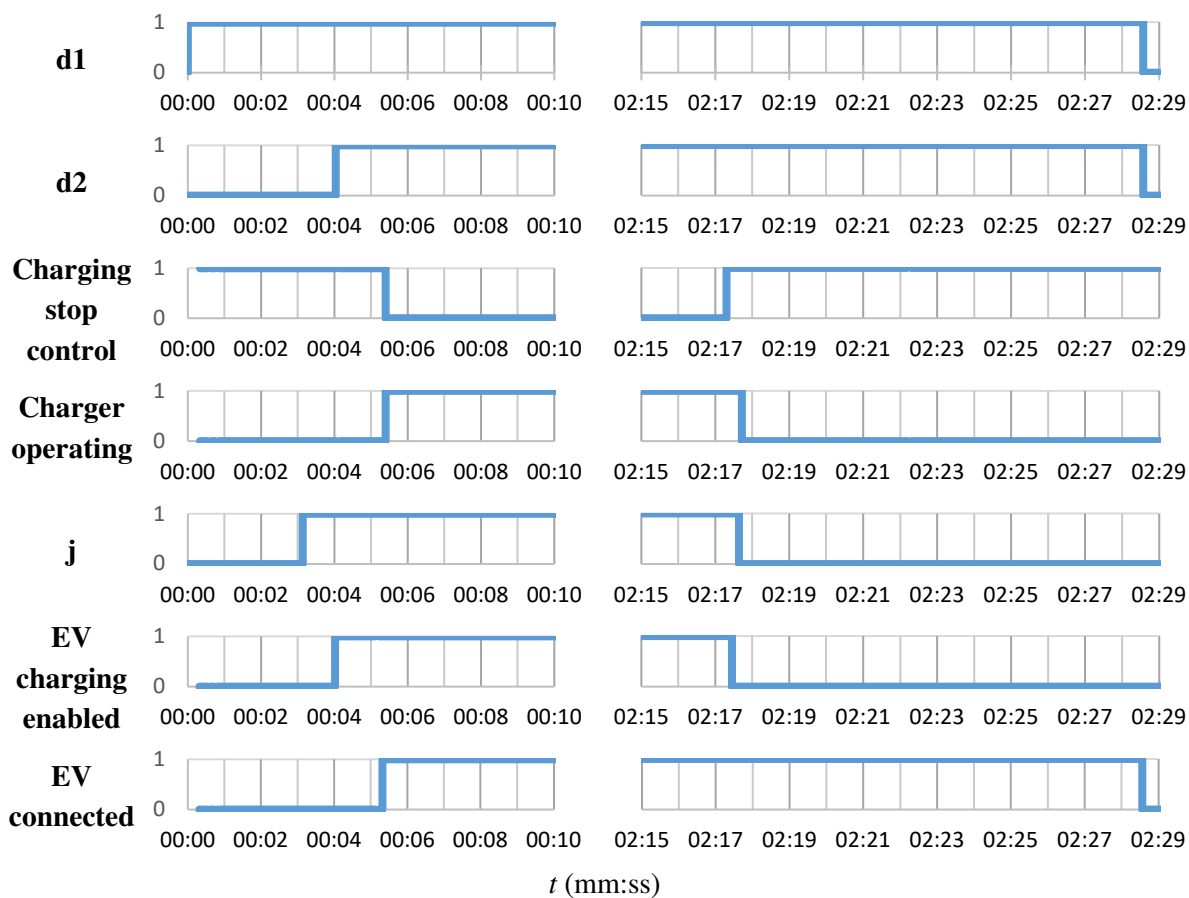
Pokud se v této fázi naměří v EV nebo v nabíjecí/vybíjecí stanici abnormální hodnoty, tak se okamžitě přechází do stavu „stop“. Při bezporuchovém provozu BMS zakáže nabíjení po dosažení cílového napětí baterie a stav stanice se po deaktivaci optočlenu (j) změní na „stop“. Ukončení v bezporuchovém provozu může přijít také ze strany řídicího systému EFCU po uživatelském požadavku nebo při automatickém provozu podle energetických plánů optimalizace.

Při ukončovacím procesu klesá proud stanice s definovanou strmostí. Vozidlo kontroluje, zda proud poklesl pod 5 A, jakmile je proud pod touto hranicí, tak EV rozezne stykač baterie. EFCU kontroluje pokles napětí pod 10 V a rozeznutí stykače vozidla, při splnění těchto podmínek se rozeznou reléové výstupy řídicích sekvenčních signálů d1 a d2, odemkne se zámek CHAdeMO zástrčky, odešle příznak odemčení zástrčky a řídicí systém EFCU ukončí komunikaci po sběrnici CAN. Stejně tak EV ukončí komunikaci po obdržení signálu o odemčení zástrčky. Po ukončení komunikace přechází stanice do stavu „standby“.

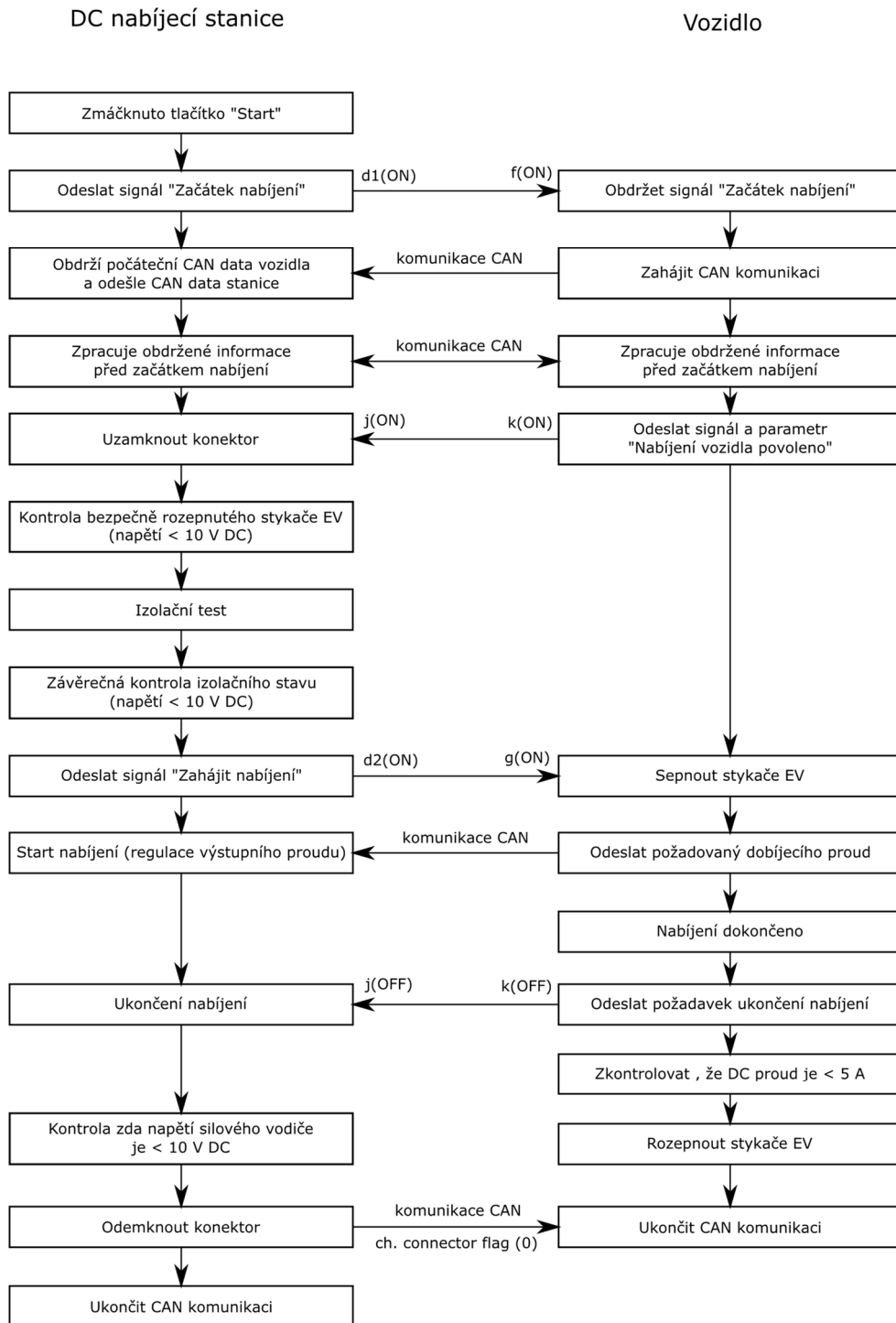
Stavový diagram popsané CHAdeMO komunikace je vyobrazen na Obr. 5-2 a průběh popisovaných sekvenčních signálů je znázorněn na Obr. 5-3. Tyto sekvenční signály byly naměřeny při testování nabíjecího procesu. Jednotlivé akce při CHAdeMO komunikaci vyjadřuje také sekvenční diagram na Obr. 5-4. [3][4]



Obr. 5-2 Stavový diagram CHAdeMO komunikace [4]



Obr. 5-3 Sekvence digitálních signálů CHAdeMO komunikace [4]



Obr. 5-4 Sekvenční diagram nabíjecího procesu [3][4]

5.3 Datové komunikační rozhraní s chytrým domem

Řídicí jednotka EFCU je s nadřazeným systémem chytrého domu propojena pomocí technologie Ethernet. Jako datové komunikační rozhraní, pro předávání informací z EFCU do nadřazeného systému, je použit strukturovaný textový soubor ve formátu XML. Nadřazený řídicí systém generuje optimalizační energetické plány a zajišťuje vizualizaci chytrého domu. Soubor ve formátu JSON představuje rozhraní pro předání optimalizačního plánu z nadřazeného systému do řídicí jednotky EFCU.

5.3.1 Data určená nadřazenému systému

V XML souboru se předává jméno uživatele, identifikace elektrického vozidla, aktuální stav EV, bezpečná fyzická minimální míra nabití baterie vozidla, uživatelem požadovaná míra nabití baterie při plánovaném odjezdu, čas plánovaného příjezdu a odjezdu a maximální výkon nabíjecí stanice.

Aktuální stav EV zahrnuje: stav připojení vozidla, mód připojení EV (generátor/spotřebič), maximální kapacitu baterie, aktuální úroveň nabití baterie a odhadovaný nabíjecí čas. Podoba souboru je vyobrazena na Obr. 5-5.

```
▼<Info>
  ▼<UserInfo>
    <UserID>Jan Novak</UserID>
  </UserInfo>
  ▼<CarInfo>
    <CarBrand>Nissan Leaf</CarBrand>
    <CarID>1T5 8900</CarID>
  </CarInfo>
  ▼<CarSettings>
    <CarConnection>disconnected</CarConnection>
    <CarMode>0</CarMode>
    <MaxBattery>0</MaxBattery>
    <MaxBatteryUnit>kWh</MaxBatteryUnit>
    <CurrentBattery>0</CurrentBattery>
    <CurrentBatteryUnit>kWh</CurrentBatteryUnit>
    <EstimChargTime>0</EstimChargTime>
    <EstimChargTimeUnit>min</EstimChargTimeUnit>
    <PhysicalMinimum>20</PhysicalMinimum>
    <PhysicalMinimumUnit>%</PhysicalMinimumUnit>
    <DesiredMinimum>60</DesiredMinimum>
    <DesiredMinimumUnit>%</DesiredMinimumUnit>
    <ArrivalTime>20:00:00</ArrivalTime>
    <ArrivalTimeUnit>hh:mm:ss</ArrivalTimeUnit>
    <DepartureTime>06:00:00</DepartureTime>
    <DepartureTimeUnit>hh:mm:ss</DepartureTimeUnit>
    <ChargerMaxPower>5</ChargerMaxPower>
    <ChargerMaxPowerUnit>kW</ChargerMaxPowerUnit>
  </CarSettings>
</Info>
```

Obr. 5-5 XML soubor pro předání dat do nadřazeného systému

5.3.2 Data určená řídicí jednotce EFCU

Skrze soubor ve formátu JSON, vygenerovaný nadřazeným systémem pro řídicí jednotku EFCU, se přenáší informace o času zahájení optimalizačního plánu (prvek „sim_from“) a pole výkonových vektorů „load“, kde vektory vyjadřují požadovaný směr a velikost výkonového toku. Soubor je znázorněn na Obr. 5-6.

Pokud je řídicí jednotka EFCU v automatickém režimu, tak od času zahájení optimalizace pracuje podle výkonových vektorů. Hodnoty vektorů jsou uvedeny ve wattech, platnost každého vektoru je 5 minut a znaménko vektoru představuje směr toku elektrické energie, kde kladný vektor vyjadřuje výkon nabíjení elektromobilu a záporný vektor výkon, kterým se elektromobil vybíjí do energetické infrastruktury domu. Řídicí jednotka podle tohoto výkonu vypočítá požadovaný proud pro nabíjení/vybíjení EV.

```
{"load": [0.0, 0.0, 0.0, -206.66666666666788, -147.66666666666788, -196.66666666666788, -139.66666666666788, -211.66666666666788, -154.66666666666788, -202.66666666666788, -144.66666666666788, -216.66666666666788, -158.66666666666788, -205.66666666666788, -147.66666666666788, -218.66666666666788, -160.66666666666788, -207.66666666666788, -148.66666666666788, -220.66666666666788, -161.66666666666424, -208.66666666666424, -149.66666666666606, -220.66666666666606, -161.66666666666606, -208.66666666666606, -149.66666666666606, -211.66666666666606, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0], "sim_from": "2020-06-26 0:00"}
```

Obr. 5-6 JSON soubor přijímaný z nadřazeného řídicího systému chytrého domu

5.4 Kritické požadavky na nabíjecí/vybíjecí stanici dle normy CHAdeMO

Nabíjecí/vybíjecí stanice musí splňovat kritické požadavky standardu CHAdeMO, provádět kontrolu ve specifických fázích sekvence nabíjení/vybíjení (viz Tab. 5-2) a kontrolovat plnění kritických požadavků elektromobilem. Při nesplnění časově kritických podmínek musí systém stanice přejít během 2 s do ukončovacího režimu. [3][4]

Tab. 5-2 Kontroly v jednotlivých fázích nabíjení/vybíjení [3][4]

Před kontrolou spečení kontaktů	$U \leq 10 \text{ V}$
Po kontrole spečení kontaktů	$U \leq 20 \text{ V}$
Před spuštěním nabíjecího proudu	Stykač musí být sepnut a na kontaktech se musí objevit napětí baterie auta
Před odemknutím zámku zástrčky CHAdeMO kabelu na nabíjecí/vybíjecí stanici	$U \leq 10 \text{ V}$

Stanice musí v režimu nabíjení splnit požadavky na přesnost a rychlost odezvy výstupního DC proudu v závislosti na žádaném proudu EV. Při ukončení jsou definovány požadované strmosti poklesu proudu, rozdělené na „normální“ a „nouzové“ ukončení viz Tab. 5-3. Kontakty relé sekvenčních signálů „d1“ a „d2“ se mohou rozepnout až DC proud klesne pod 5 A, i když se jedná o havarijní ukončení. [4]

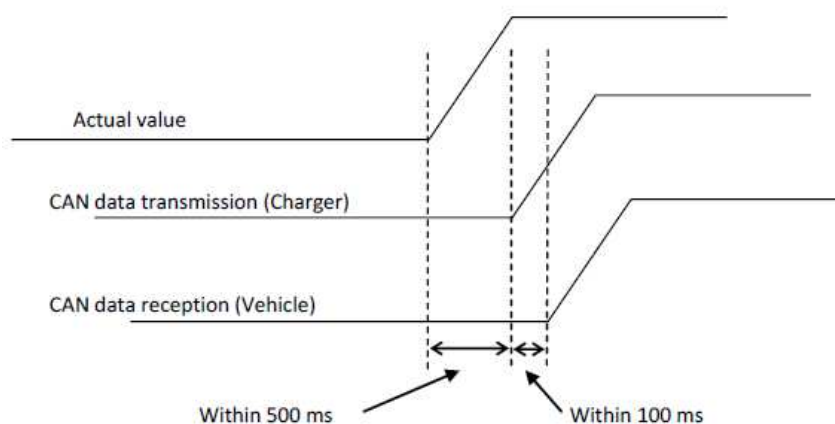
Tab. 5-3 Požadavky na odezvu proudového výstupu nabíjecí/vybíjecí stanice [4]

Přesnost výstupního proudu	0 až 50 A	$\pm 2,5 \text{ A}$
	50 až 125 A	95 až 105 %
Zpoždění výstupního proudu		1 s
Rychlost proudové odezvy	Nástupná i sestupná hrana	20 A/s
Pokles proudového výstupu	Normální ukončení	100 až 200 A/s
	Nouzové ukončení	200 A/s
	Nouzové ukončení	Pokles na 5 A do 30 ms

Měření DC napětí a proudu je nutné po celou dobu komunikace po sběrnici CAN (vždy když se stanice nenachází v režimu „standby“). Požadavky na přesnost měření veličin jsou uvedeny v Tab. 5-4 spolu s maximálním zpožděním mezi změnou veličiny a přijetím hodnoty změněné veličiny vozidlem, které je graficky vyjádřeno na Obr. 5-7. [4]

Tab. 5-4 Požadavky na měření veličin a jejich odeslání po sběrnici CAN [4]

Proud	$\pm (1,5 \% \text{ aktuální hodnoty} + 1 \text{ A})$
Napětí	$\pm 5 \text{ V}$
Zpoždění dat po sběrnici CAN	500 ms zpoždění měření + 100 ms zpoždění přenosu dat



Obr. 5-7 Prodleva mezi změnou hodnoty veličiny a přijetím změněné hodnoty vozidlem [4]

V Tab. 5-5 jsou uvedena chybová kritéria, která kontroluje EV. Pokud nastane některé chybové kritérium, tak EV odešle nabíjecí/vybíjecí stanici požadavek na ukončení a vozidlo přechází k ukončovacím procedurám, ve které bezpečně rozpojí stykače baterie. [4]

Tab. 5-5 Důležitá chybová kritéria (detekovaná vozidlem) [4]

Důvod chyby	Doplňující informace	Kritérium chyby
Výstupní proud nesleduje proudový požadavek z vozidla	CHAdeMO protokol ve verzi 0x00	12 A nad maximálním proudovým požadavkem během poslední sekundy
	CHAdeMO protokol ve verzi 0x01	12 A nad maximálním proudovým požadavkem nebo 12 A pod minimálním proudovým požadavkem během poslední sekundy
Hodnota napětí poslaná z nabíječky se liší od napětí baterie naměřené vozidlem		Napětí naměřené nabíječkou se liší od napětí naměřeného vozidlem o ± 10 V po dobu 5 s
Nejsou přijata data po sběrnici CAN		Prodleva mezi přijatými daty z nabíječky přesáhla 1 s
Přepětí baterie		Napětí na baterii přesáhlo horní limit „maximum battery voltage“
Podpětí baterie		Napětí na baterii se dostalo pod dolní limit specifikovaný vozidlem
Vysoká teplota baterie		Teplota baterie přesáhla horní limit
„Time-out“ hodnota je přesažena		Procedury v nabíječce přesáhly limitní „time-out“ hodnotu
Vozidlo se stalo mobilním během nabíjecího procesu		Pozice řadicí páky není v pozici „parking“

Kritéria uvedená v Tab. 5-6 kontroluje nabíjecí/vybíjecí stanice ve stavu „operating“ (viz Obr. 5-2) nebo v konkrétních okamžicích při zahajování/ukončování procesu nabíjení/vybíjení. Při splnění některého chybového kritéria, odešle stanice požadavek na ukončení do EV, bezpečně odpojí zdroj napětí nebo spotřebič s poklesem proudu splňujícím požadavky z Tab. 5-3 a přejde do stavu „standby“.

[4]

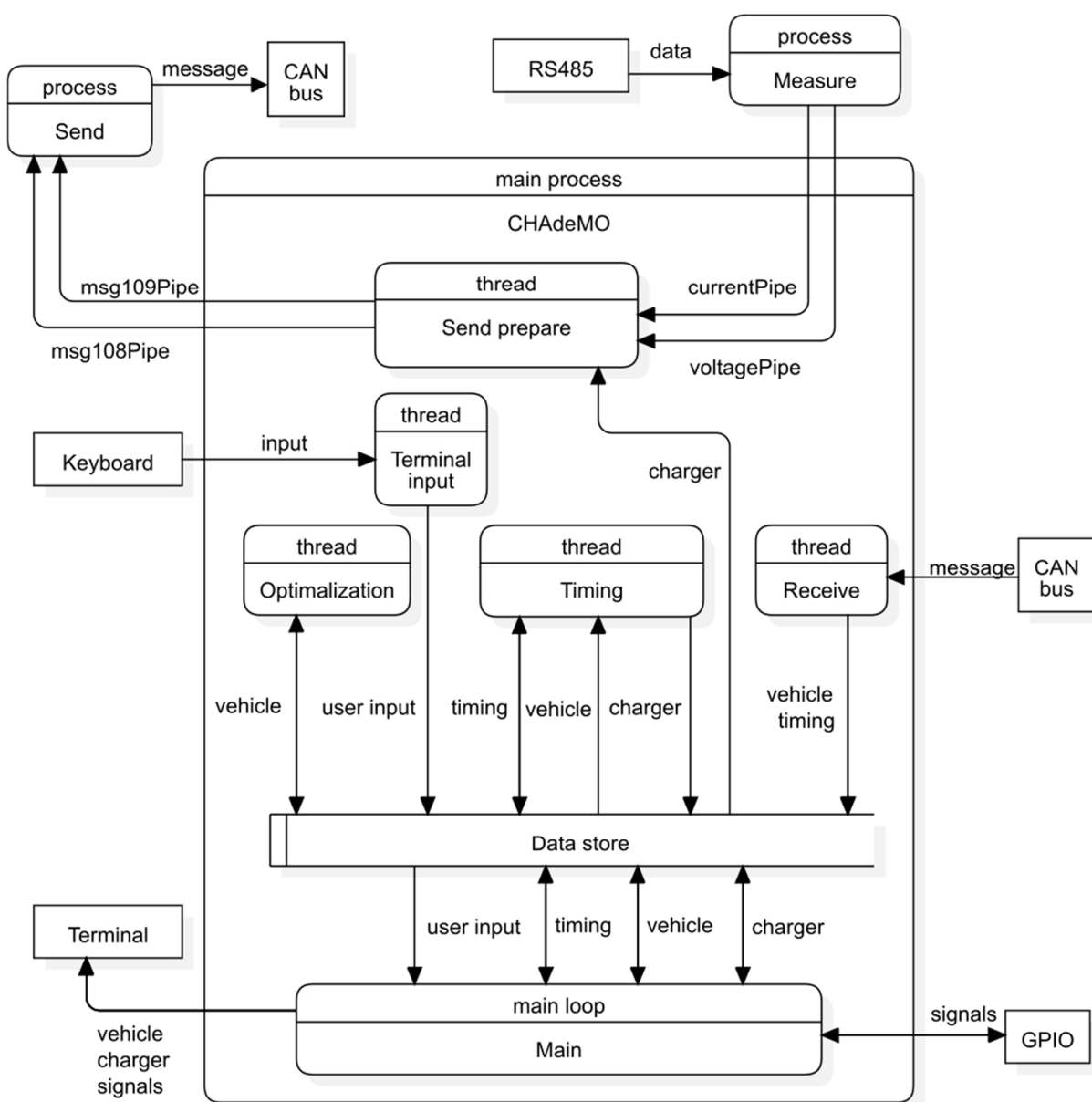
Tab. 5-6 Důležitá chybová kritéria (detekovaná nabíjecí/vybíjecí stanicí) [4]

Důvod chyby	Doplňující informace	Kritérium chyby
Vysoký cílový napěťový požadavek		Cílové napětí vozidla je vyšší než maximální výstupní napětí nabíjecí stanice
„Time-out“ hodnota je přesažena		Procedury ve vozidle přesáhly limitní „time-out“ hodnotu
Nejsou přijata data po sběrnici CAN		Prodleva mezi přijatými daty z vozidla přesáhla 1 s
Napětí baterie se před zahájením nabíjení neobjevilo v hlavním obvodu		Naměřené napětí je menší než 50 V, poté co relé d2 sepnulo
Vysoký proudový požadavek vozidla		Proudový požadavek vozidla je větší než maximální výstupní proud nabíjecí stanice
V hlavním obvodu je napětí baterie po ukončení nabíjení		Napětí naměřené nabíjecí stanicí je vyšší než 10 V
Napětí přesáhlo prahové napětí		Napětí přesáhlo hodnotu „threshold voltage“
Nesoulad mezi parametrem zprávy na sběrnici CAN a sekvenčním signálem	Při stisknutí tlačítka Start	„Vehicle charge permission“ je ve stavu ON před odesláním prvních dat po sběrnici CAN z nabíječky
	Před nabíjením	Příznak zprávy na sběrnici CAN „vehicle charging enabled“ je ve stavu ON, dříve než je ve stavu ON sekvenční signál „vehicle charge permission“
	Při zahájení nabíjení	Sekvenční signál „vehicle charge permission“ nebo příznak zprávy na sběrnici CAN „vehicle charging enabled“ nejsou ve stavu ON

5.5 UML popis řídicích algoritmů EFCU

Předávání dat mezi jednotlivými částmi programu řídicí jednotky EFCU je graficky znázorněno v diagramu datových toků na Obr. 5-8. Program se skládá z hlavního procesu, procesu zajišťujícího měření aktuálního napětí a proudu na baterii a procesu odesílajícího data v pravidelných 100 ms intervalech po sběrnici CAN do vozidla. Pro předávání dat mezi jednotlivými procesy se v programu používá nástroj „Pipe“, což je nástroj pro meziprocesní komunikaci, který poskytuje dva koncové body, mezi kterými je umožněna duplexní komunikace.

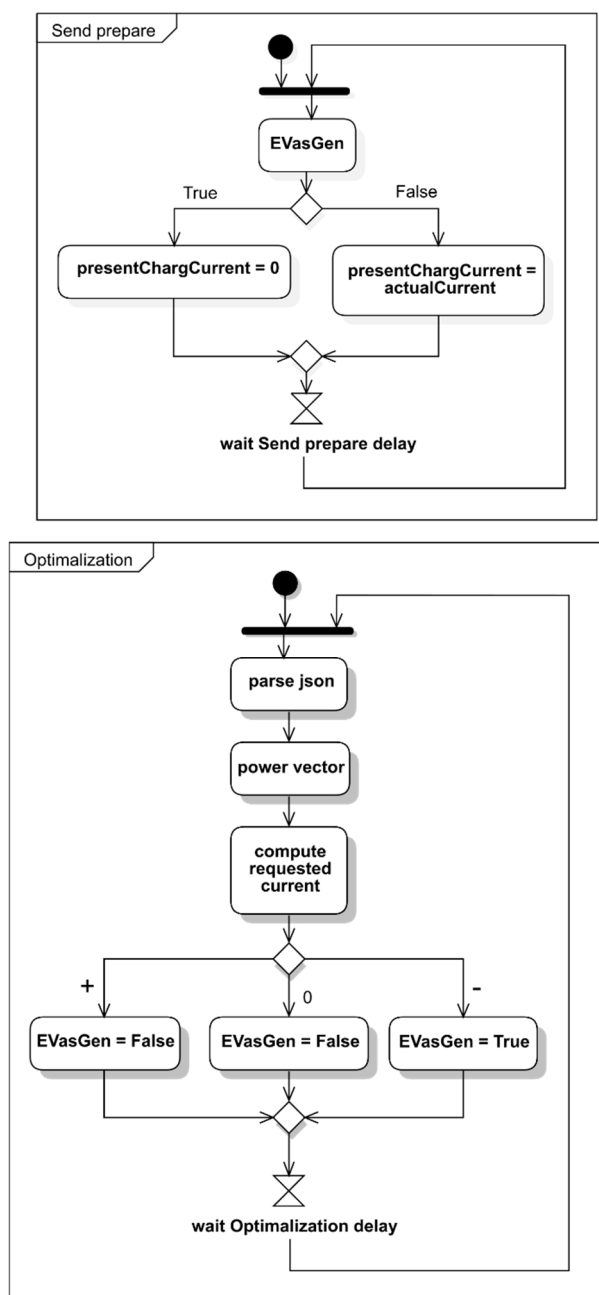
Hlavní proces obsahuje hlavní smyčku programu, která funguje na principu stavového automatu, pravidelně volá funkci zajišťující tisk do terminálu, stará se o zápis a čtení pinů GPIO a přistupuje ke společným datům hlavního procesu. Také obsahuje pět vláken, která přistupují ke společným datům.



Obr. 5-8 Data flow diagram EFCU

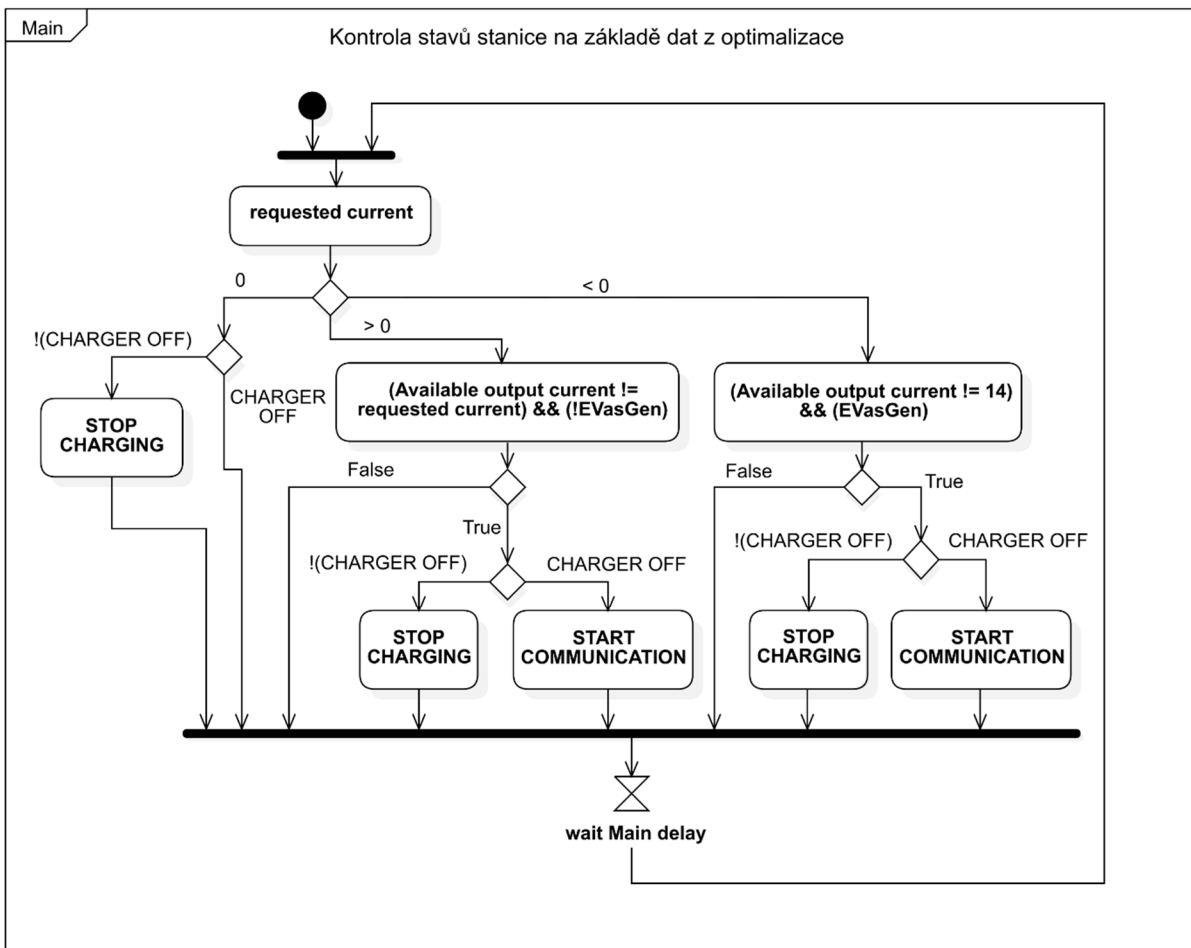
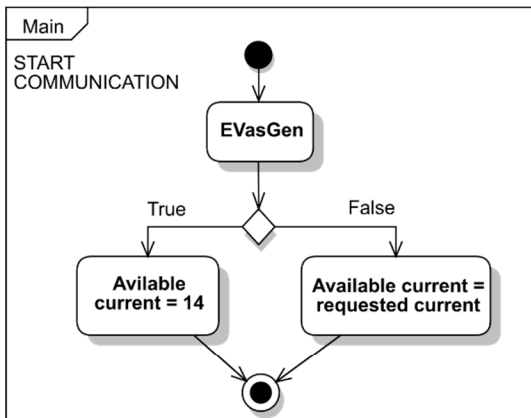
Vlákno „Optimalization“ čte a zároveň odesílá data do nadřazeného systému, týkající se optimalizace energetických toků. Vlákem „Terminal input“ se čte uživatelský vstup z klávesnice, skrze který se ovládá chod programu. Pomocí vlákna „Timing“ se kontroluje časově kritická prodleva mezi přijatými daty po sběrnici CAN (jejíž překročení vede k ukončení komunikace) a počítá se zbývající čas nabíjení/vybíjení. „Send prepare“ je název vlákna, které zajišťuje sestavení zpráv, ty se pak posílají do vozidla po sběrnici CAN v pravidelných intervalech a neztrácí se čas jejich sestavením. Vlákem „Receive“ se přijímají data ze sběrnice CAN a po rozboru dat se aktualizují jednotlivé proměnné ve společném datovém úložišti procesu.

Zpracování dat optimalizačního plánu energetických toků je vyjádřeno pomocí diagramů aktivit. Diagram na Obr. 5-9 zachycuje rozhodovací algoritmy ve vláknech „Optimalization“ a „Send prepare“.



Obr. 5-9 Activity diagram optimalizačního plánu 1/2

Diagram aktivít na Obr. 5-10 vyjadřuje algoritmus rozhodování (na základě optimalizačních dat) v hlavní smyčce při stavu automatu CHAdEMO komunikace „start communication“ a algoritmus, který podle optimalizačních dat mění stavy v tomto stavovém automatu.



Obr. 5-10 Activity diagram optimalizačního plánu 2/2

5.6 Implementace řídicích algoritmů

Na jednodeskový počítač Raspberry Pi 3B+ se nainstaloval oficiální operační systém Raspbian od společnosti Raspberry Pi Foundation. Jedná se o linuxovou distribuci, která je odvozená z distribuce Debian a je optimalizovaná pro použití s počítačem Raspberry Pi. Zároveň za touto distribucí stojí široká uživatelská komunita a díky ní je dostupných mnoho materiálů pro konkrétní použití. Zvolená verze „Raspbian Buster Lite“ je odlehčená varianta systému, která neobsahuje grafické prostředí a disponuje výrazně nižším počtem předinstalovaných balíčků, tudíž je vhodná pro použití v prototypových řídicích systémech. Verze „desktop“ jsou díky grafickému prostředí a velkému počtu předinstalovaných balíčků vhodnější pro výukové účely. [17]

Algoritmy řídicího systému EFCU jsou implementovány v programovacím jazyku Python. Tento objektově orientovaný programovací jazyk byl zvolen díky jeho veliké popularitě (nejen na platformě Raspberry Pi), a tím pádem dostupnosti velkého počtu modulů s dobře zpracovanou dokumentací. („Modul“ je v programovacím jazyce Python název pro knihovnu.) Programovací jazyk Python zároveň umožňuje rychlý vývoj prototypových programů, díky jeho benevolentnímu přístupu. Rychlý vývoj je ale vykoupen zodpovědným přístupem programátora a kladením většího úsilí do testování programu, nejen z důvodu benevolence, ale zejména díky tomu, že se jedná o interpretovaný jazyk (nedochází ke kompilaci před spuštěním). Díky tomu je nutné provést testování, při kterém se projdou všechny části kódu. [8][9][14][18]

5.7 Uživatelské rozhraní řídicí jednotky EFCU

Řídicí jednotka EFCU je obsluhována pomocí textového uživatelského rozhraní v terminálu. Zde je uživateli umožněno manuálně spustit, či zastavit nabíjecí/vybíjecí proces pomocí kláves „s“ a „t“. Pokud je v parametru programu povolen chod podle optimalizačního plánu, tak je automaticky řízeno přepínání mezi nabíjecím, vybíjecím nebo vypnutým stavem. Uživatel může ukončit běh programu stisknutím kláves „Ctrl + c“. Návoděta použitých kláves pro ovládání programu je vypsána v posledním řádku výpisu do terminálu. Demonstrační výpis terminálu se zobrazením všech výstupních textů je zobrazen na Obr. 5-11.

V terminálu jsou operátorovi vypsány seshora tyto informace: Cílové napětí baterie vozidla, žádaný nabíjecí proud a míra nabití baterie. Poté jsou vyčísleny aktuální hodnoty napětí a proudu na rozhraní s vozidlem. Následují informace o vozidle: Číslo řídicího CHAdeMO protokolu, maximální napětí baterie (přes tuto hodnotu se nesmí dostat napětí baterie EV), jmenovitá kapacita baterie a maximální doba nabíjení povolená vozidlem. Z této maximální doby vychází níže zobrazený „zbývající čas“, který se začne odpočítávat po zahájení nabíjení/vybíjení.

Dále jsou červeným písmem vypsány chybové stavy vozidla, mezi které patří: Přepětí a podpětí baterie, nesoulad mezi naměřenou hodnotou proudu stanicí a vozidlem, vysoká teplota baterie a nesoulad naměřených hodnot napětí.

Dalšími vypsányými položkami jsou příznaky aktuálního stavu EV, texty jednotlivých příznaků jsou zobrazeny zelenou nebo červenou barvou. Jakmile je alespoň jeden příznak „červený“ a stanice není vypnutá, tak se zahájí proces vypínání. Jednotlivými příznaky jsou: Povolení nabíjení/vybíjení vozidlem, pozice řadicí páky, chyba na nabíjecím/vybíjecím systému, stav stykače EV a požadavek na ukončení nabíjení/vybíjení.

Pod příznaky stavu EV je zobrazen aktuální stav stavového automatu CHAdeMO komunikace EFCU s elektrickým vozidlem, viz Obr. 5-2. Následující položkou je hodnota stavového bytu stanice, která je následována chybovými zprávami programu, které mohou vzniknout v části příjmu zpráv na sběrnici CAN, dostáním se do nedefinovaného stavu automatu CHAdeMO komunikace nebo neúspěšným generováním XML souboru pro předání dat nadřazenému systému, vytvářejícímu optimalizační plány.

Mezi čárkovaným ohraničením je prostor pro doplňující zprávu operátorovi, která ho informuje například o poslední příčině nečekaného ukončení nabíjení/vybíjení. V dalším ohraničeném prostoru jsou zobrazeny informace, týkající se aktuálního optimalizačního plánu: Zbývající čas do konce plánu, uplynulý čas od jeho počátku a aktuální žádaný vektor výkonu.

```
Cilove napeti baterie: 410 V
Pozadovany dobijeci proud: 5 A
Mira nabití baterie: 60.0 %

Aktualni vystupni napeti: 370 V
Aktualni vystupni proud: 4.3 A

Cislo ridiciho CHAdeMO protokolu EV: 2
Maximalni napeti baterie: 435 V
Jmenovita kapacita baterie: 45.0 kWh
Maximalni doba nabijeni (povolena EV): 60 min
Zbyvajici cas dobijeni: 32 min

Chyba: Prepeti baterie!
Chyba: Podpeti baterie!
Chyba: Odchylka proudu baterie!
Chyba: Vysoka teplota baterie!
Chyba: Odchylka napeti baterie!

Nabijeni vozidla povoleno
Radici paka je v pozici Parking
Dobijeci system je bez poruchy
Stykac EV sepnut nebo behem Detekce speceni kontaktu
Bezny pozadavek na konec nabijeni: Bez pozadavku

Aktualni stav: States.CHARGING
Charger status flag: 5

Chybna zprava!
Chyba zpracovani zpravy!
Chybny stav stavoveho automatu!
Zapsani do XML se nezdarilo!

-----
Probiha nabijeni
-----
Zbyvajici cas optimalizace: 15 hodin
Uplynuly cas od pocatku planu optimalizace: 10 hodin
Vektor vykonu: 1600 W

-----
t - stop, s - start, CTRL+C - ukončení programu
```

Obr. 5-11 Uživatelské rozhraní EFCU v terminálu

6 Testování řídicí jednotky EFCU

K ověření funkčnosti navržené řídicí jednotky EFCU, zejména komunikace s EV pomocí digitální sběrnice CAN a správného sledu sekvenčních signálů mezi EFCU a EV, se přistoupilo k testování nabíjení elektromobilu se zapůjčeným napájecím zdrojem a testování vybíjení elektromobilu do odporové zátěže.

6.1 Nabíjení elektromobilu

K otestování nabíjení EV se zapůjčil DC zdroj značky RS, konkrétně model EA-PSI 91000-30 3U, který disponuje rozsahem výstupního napětí 0–1000 V DC, maximálním výstupním proudem 30 A a maximálním výkonem 10 kW. Tento napájecí zdroj svým výkonem a napěťovým rozsahem splňuje požadavky normy CHAdeMO, která požaduje použití napájecího zdroje stanice s rozsahem 50–500 V DC. Fotografie čelního panelu zdroje je na Obr. 6-1. [4]

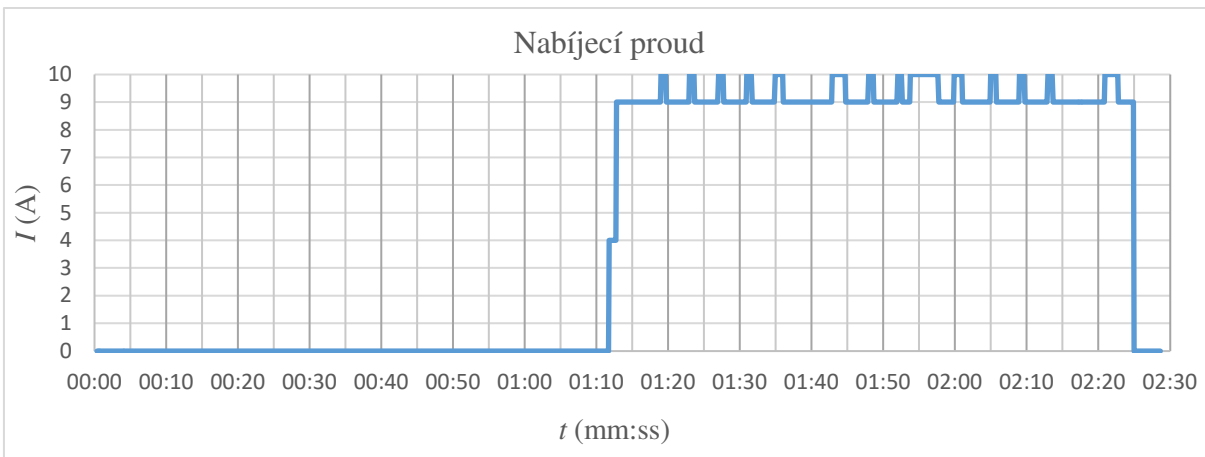


Obr. 6-1 Nabíjení: napěťový zdroj

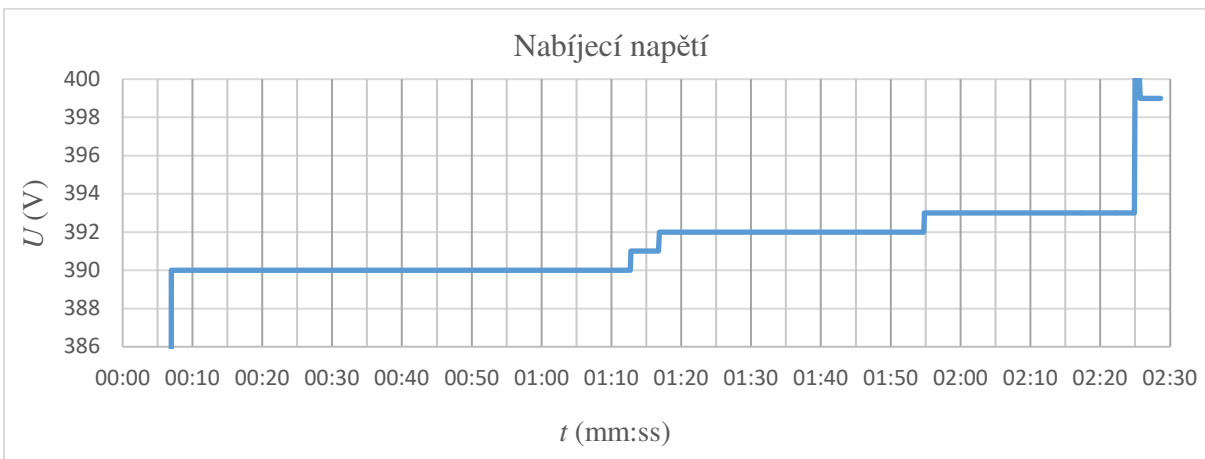
Protokol CHAdeMO požaduje použití říditelného napájecího zdroje, zatímco tento zdroj byl při testování ovládán pouze manuálně. Napájecí zdroj byl nastaven na výstupní napětí 400 V DC a výkonové omezení 4 kW (maximální výstupní proud 10 A). Grafy průběhu nabíjecího proudu, nabíjecího napětí a míry nabití baterie EV jsou zobrazeny na Obr. 6-2, Obr. 6-3 a Obr. 6-4.

Zapnutí napájecího zdroje nastalo v čase: 1 minuta a 10 sekund testování, viz průběh nabíjecího proudu a napětí. Do tohoto času se na výstupních svorkách nabíjecí/vybíjecí stanice nacházelo napětí baterie EV. Poté se napětí začalo postupně zvyšovat a elektromobil se nabíjel proudem až 10 A. V čase: 2 minuty a 25 sekund, nastává ukončení nabíjení vyvolané uživatelským požadavkem. Nabíjecí/vybíjecí stanice přechází do stavu „standby“, ale napájecí zdroj zůstává zapnut, tím se v EV vyvolá chyba nabíjecího systému a EV se odpojuje, což je nesprávný postup, způsobený použitím manuálně ovládaného zdroje.

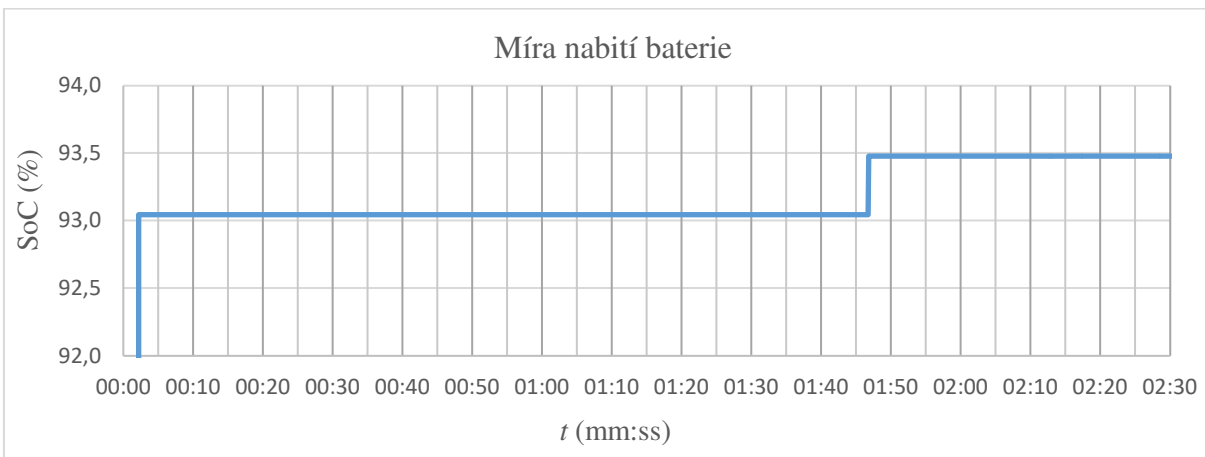
Během 1 minuty a 15 sekund nabíjení se míra nabití baterie EV zvýšila přibližně o 0,5 %. Sekvence digitálních signálů CHAdeMO komunikace proběhla ve správném pořadí (viz Obr. 5-3) při zahájení i ukončení komunikace.



Obr. 6-2 Nabíjení: nabíjecí proud



Obr. 6-3 Nabíjení: nabíjecí napětí

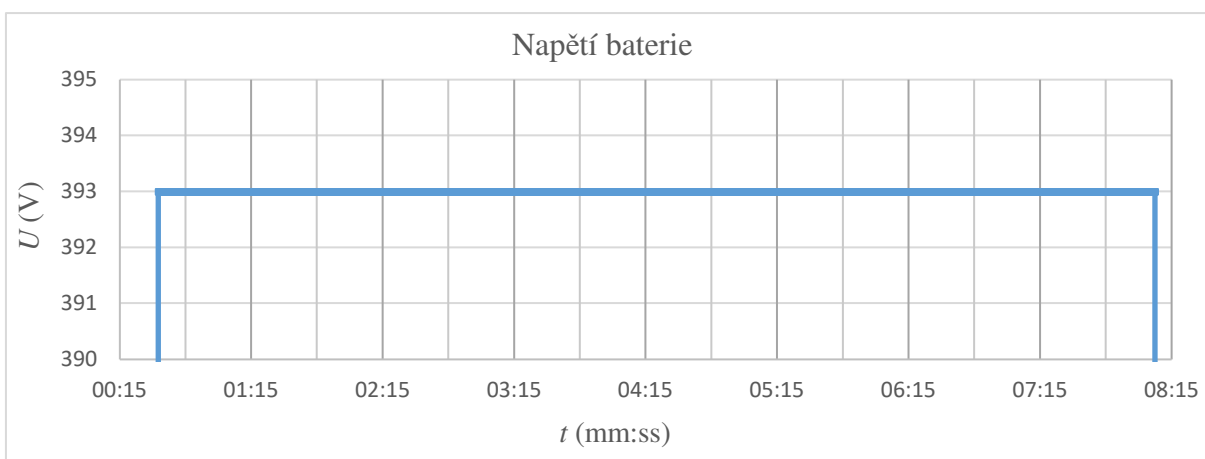


Obr. 6-4 Nabíjení: míra nabití baterie

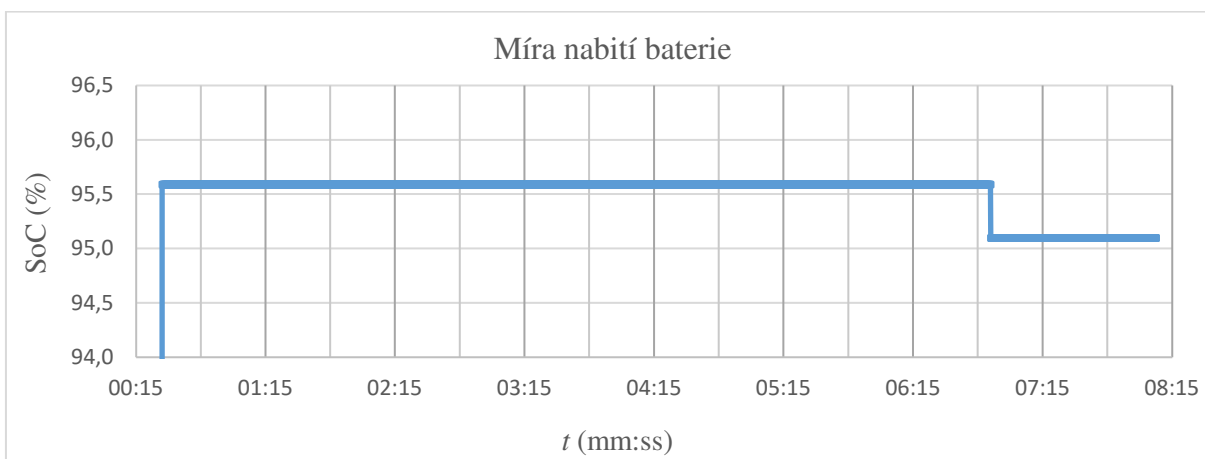
6.2 Vybíjení elektromobilu

Pro otestování řízení vybíjecího procesu řídicí jednotkou EFCU se použily dvě odporové zátěže, každá s jmenovitým odporem 570Ω . Při testování vybíjení byla hodnota napětí baterie EV 393 V DC (při míře nabití baterie 95,5 %) viz Obr. 6-5. Baterie byla vybíjena proudem o velikosti 345 mA, což činí vybíjení výkonem 136 W, tato energie byla mařena v teplo na odporových zátěžích.

Vybíjení baterie EV bylo aktivní po dobu 7 minut a 35 sekund, poté se vybíjení ukončilo uživatelským požadavkem z řídicí jednotky EFCU. Během této doby se baterie EV vybila zhruba o 0,5 % viz Obr. 6-6.



Obr. 6-5 Vybíjení: napětí baterie



Obr. 6-6 Vybíjení: míra nabití baterie

7 Závěr

V rámci diplomové práce jsem navrhl a zrealizoval řídicí jednotku EFCU pro systémy V2H, skládající se z jednodeskového počítače Raspberry Pi 3B+, navržené DPS a elektroměru s komunikací na protokolu Modbus. Řídicí jednotka EFCU je navržena k propojení s elektrickým vozidlem v rámci standardu CHAdeMO, který definuje komunikaci s BMS pomocí digitální komunikační sběrnice CAN. Původní řešení, které bylo implementováno na PLC značky TECOMAT, se v rámci komunikace pomocí standardu CHAdeMO dostalo do stavu před zahájením nabíjení/vybíjení. V tomto stavu zůstalo PLC pouze po omezenou dobu. Původní zapojení bylo rozpojeno a nahrazeno z důvodu použitých solárních měničů DC, které nejde pro tuto aplikaci použít, protože proudové rázy jsou tak velké, že zničí pojistky. Nově navrženou řídicí jednotku EFCU jsem zapojil do rozváděče nabíjecí/vybíjecí stanice a propojil se zásuvkou CHAdeMO kabelu (dle schématu zapojení definovaného ve standardu CHAdeMO) místo původního řešení.

Při návrhu DPS řídicí jednotky EFCU jsem vycházel z doporučených zapojení v dokumentech datasheet od jednotlivých součástek. Navrhl jsem dvouvrstvou DPS s využitím součástek technologie SMT i THT. V návrhu DPS jsem udělal chybu ve schématu zapojení modulu RTC, kde jsem opomenul zapojit diodu v závěrném směru k napájecímu napětí 3,3 V. V takto chybném zapojení se knoflíková baterie CR2032 vybíjí napájením ostatních modulů zapojených na napájecí napětí 3,3 V. Tuto chybu jsem opravil v nové verzi návrhu DPS. Zároveň jsem v nové verzi návrhu přepočítal hodnoty rezistorů omezujících velikost proudu pro LED, abych zvýšil jejich svítivost.

Do budoucna je v plánu, že řídicí jednotku EFCU vybavím 7 “ dotykovým displejem, určeným pro počítač Raspberry Pi. Zároveň bych vytvořil grafické uživatelské rozhraní pro jednoduchou obsluhu.

Řídicí jednotka je připravena k propojení s obousměrným měničem po digitální komunikační sběrnici CAN s domluvenou komunikační rychlostí 250 kb/s. Zároveň je zprovozněno obousměrné komunikační propojení pomocí technologie Ethernet s nadřazeným systémem chytrého domu, pro aplikaci energetické optimalizace a poskytnutí dat z EFCU do vizualizace chytrého domu.

Díky absenci placeného členství v asociaci CHAdeMO, které umožňuje přístup k podrobnému protokolu standardu CHAdeMO, jsem přistoupil k odposlechu komunikace po sběrnici CAN mezi komerční vybíjecí stanicí SETEC Power a elektromobilem Nissan Leaf, který jsem měl k dispozici ke všem provedeným testováním. K odposlechu jsem vytvořil program pro logování zpráv na sběrnici CAN. Z odposlechnuté komunikace jsem vytvořil algoritmy pro vybíjení elektromobilu.

Funkčnost navrženého programu a hardwaru řídicí jednotky EFCU jsem prvně otestoval připojením stanice k EV bez napájecího zdroje v módu nabíjení a bez připojené zátěže v módu vybíjení. Došlo k občasnému odpojení při zahájení komunikace po protokolu CHAdeMO, v takovém případě bylo potřeba připojení zopakovat, případně vysunout a zasunout zástrčku CHAdeMO do EV. Tento problém se vyskytoval i u komerční vybíjecí stanice. Při zdárném připojení jednotky EFCU k EV fungovala komunikace bez přerušení, tím jsem ověřil funkčnost komunikace v rámci standardu CHAdeMO.

Nabíjení jsem otestoval se zapůjčeným DC zdrojem značky RS s nastaveným výstupním napětím 400 V DC a omezením výkonu na 4 kW. Baterii EV se podařilo během 1 minuty a 15 sekund úspěšně nabít o 0,5 % SoC, ale jelikož norma CHAdeMO vyžaduje použití říditelného zdroje, který nebyl v požadovaném DC napěťovém rozsahu k dispozici, tak se výstupní napětí zdroje zapínalo/vypínalo manuálně. Došlo k pozdnímu vypnutí zdroje, EV to vyhodnotilo jako chybu nabíjecího systému a elektromobil se stal imobilním. Po provedení resetu logů v autorizovaném servisu se elektromobil dostal do původního stavu. Do tohoto stavu bychom se neměli dostat při budoucím použití obousměrného měniče, který je plně říditelný.

Vybíjení jsem otestoval s připojením odporových zátěží s celkovým jmenovitým odporem 1140 Ω . Při správně nastavených parametrech programu řídicí jednotky EFCU, nedochází k odpojování od EV. V testovaném vybíjení se elektromobil vybíjel výkonem 136 W po dobu 7 minut a 35 sekund.

Pomocí testování jsem ověřil, že řídicí jednotka EFCU je připravena nejen pro komunikaci s elektromobilem, který splňuje CHAdeMO normu, ale je připravena pro řízení cíle projektu TAČR Epsilon TH02020191 Modulární měniče elektrické energie s vysokou výkonovou hustotou pro automobilové a letecké systémy, což je oboustranná nabíjecí/vybíjecí jednotka.

Technická dokumentace byla zpracována elektronicky a byla uložena na datovém úložišti, na kterém je veškerá dokumentace diplomové práce, která je součástí projektu.

Literatura

- [1] ČSN EN 61851-1. *Systém nabíjení elektrických vozidel vodivým propojením: Část 1: Všeobecné požadavky*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2011.
- [2] ČSN EN 61851-23. *Systém nabíjení elektrických vozidel vodivým propojením: Část 23: DC nabíjecí stanice*. Opr.1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2017.
- [3] ČSN EN 61851-24. *Systém nabíjení elektrických vozidel vodivým propojením: Část 24: Digitální komunikace mezi DC nabíjecí stanicí a elektrickým vozidlem, která řídí stejnosměrné nabíjení*. Opr.1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2017.
- [4] IEEE Standard Technical Specifications of a DC Quick Charger for Use with Electric Vehicles," in *IEEE Std 2030.1.1-2015*, vol., no., pp.1-97, 5 Feb. 2016, doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7400449, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7400449&isnumber=7400448>
- [5] M. Barnola-Sampera, D. Heredero-Peris, R. Villafafila-Robles, D. Montesinos-Miracle, J. Bergas-Jane and N. Vidal-Tejedor, "Charging/discharging process for electric vehicles: Proposal and emulation," *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, Florence, 2014, pp. 1-8. doi: 10.1109/IEVC.2014.7056170, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7056170&isnumber=7056073>
- [6] G. R. C. Mouli, J. Kaptein, P. Bauer and M. Zeman, "Implementation of dynamic charging and V2G using Chademo and CCS/Combo DC charging standard," *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/ITEC.2016.7520271, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7520271&isnumber=7520173>
- [7] MIKOLAJEK, Martin, David VALA, Kristyna FREIEDRISCHKOVA, Jiri KOZIOREK a Bohumil HORAK. Proposal discharging station compatible with CHAdeMO automotive standard. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2018, 51(6), 277-282 [cit. 2019-12-22]. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.07.166. ISSN 24058963. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896318309121>
- [8] MOLLOY, Derek. *Exploring Raspberry Pi: Interfacing to the real world with embedded Linux*. Indianapolis, IN: Wiley, 2016. ISBN 978-1119188681.
- [9] MONK, Simon. *Programming the Raspberry Pi: Getting started with Python*. 2nd edition. New York: McGraw Hill Education TAB, 2015. ISBN 978-1259587405.

- [10] HAYES, John G. a Gordon A. GOODARZI. *Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles*. Hoboken, NJ: John Wiley, 2018. ISBN 978-1-119-06364-3.
- [11] HOROWITZ, Paul a Winfield HILL. *The art of electronics*. Third edition. New York, NY: Cambridge University Press, 2015. ISBN 978-0521809269.
- [12] PUŽMANOVÁ, Rita. *Moderní komunikační sítě od A do Z*. 2. aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2006. ISBN 978-8025112786.
- [13] *Bosch Controller Area Network (CAN) Version 2.0: Protocol Standard*. Rev. 3. Denver: Freescale Semiconductor, 1998.
- [14] PECINOVSKÝ, Rudolf. *Python: kompletní příručka jazyka pro verzi 3.8*. Praha: Grada Publishing, 2020. Knihovna programátora. ISBN 978-80-271-2891-4.
- [15] CHAdeMO 3.0 released: the first publication of ChaoJi, the new plug harmonised with China's GB/T. *CHAdeMO* [online]. Tokyo: CHAdeMO Association, c2013-2020, 24. 4. 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.chademo.com/chademo-3-0-released/>
- [16] Technology Overview. *CHAdeMO* [online]. Tokyo: CHAdeMO Association, c2013-2020 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.chademo.com/technology/technology-overview/>
- [17] Raspbian. *Raspberry Pi* [online]. Cambridge: Raspberry Pi Foundation [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>
- [18] About. *Python* [online]. Wilmington (Delaware): Python Software Foundation, c2001-2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.python.org/about/>
- [19] Join Us: CHAdeMO MEMBERSHIP. *CHAdeMO* [online]. Tokyo: CHAdeMO Association, c2013-2020 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.chademo.com/membership/join-us/>
- [20] Introducing V3 Supercharging. *Tesla* [online]. Palo Alto: Tesla, c2020, 6. 3. 2019 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: https://www.tesla.com/cs_CZ/blog/introducing-v3-supercharging
- [21] *Standard J1772: Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler*. Warrendale: SAE International, 2010. https://doi.org/10.4271/J1772_201001. Dostupné také z: https://saemobilus.sae.org/content/j1772_201001