

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

Modul nabíjecího stojanu s měřením elektrické energie

Charging station module with energy measurement

2015/2016

Bc. Tomáš Dočekal

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Tomáš Dočekal

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2601T004 Měřicí a řídicí technika

Téma:

**Modul nabíjecího stojanu s měřením elektrické energie
Charging Station Module with Energy Measurement**

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací zařízení pro měření, případně řízení spotřeby elektrické energie, které je cíleno do oblasti elektromobility a realizováno jako součást nabíjecího stojanu či inteligentního domu.

V souhrnu je práce charakterizována následujícími body:

1. Rešerše způsobů měření elektrické energie s ohledem na komunikaci s nadřazeným objektem.
2. Návrh a realizace měřicí jednotky (elektroměru).
3. Návrh a implementace komunikačního protokolu jednotka/auto.
4. Návrh a implementace komunikačního protokolu jednotka/nabíjecí stojan.
5. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] RAJAKARUNA, S., F. SHAHNIA a A. GHOSH. *Plug In Electric Vehicles in Smart Grids: Charging Strategies*. 1st ed. Power Systems, Springer, 2015. ISBN 978-9812873163.
- [2] KEZUNOVIC, M., S. MELIOPOULOS, V. VENKATASUBRAMANIAN a V. VITTAL. *Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks*. 1st ed. Power Electronics and Power Systems, Springer, 2014. ISBN 978-3319062174.
- [3] SLOSS, A., D. SYMES a C. WRIGHT. *ARM System Developer's Guide: Designing and Optimizing System Software*. 1st ed. The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design, 2004. ISBN 978-1558608740.
- [4] HORÁK, B., K. FRIEDRISCHKOVÁ, J. KAZÁRIK, J. NOWAKOVÁ a Z. SLANINA. *Elektromobilita II, učební text*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3532-7. Dostupné z: http://netfei.vsb.cz/downloads/autorske_texty/Elektromobilita%20II.pdf.
- [5] ST MICROELECTRONICS - firemní dokumentace. Dostupné z: <http://www.st.com>.

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: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



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



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

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

V Ostravě 29. dubna 2016

...Doičkal.....

Rád bych na tomto místě poděkoval firmě Atollic za poskytnutí vývojového prostředí TrueSTUDIO bez omezení, což umožnilo pracovat na této diplomové práci. Také bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Zdeňku Slaninovi, Ph.D. za odborné rady a konzultace a své rodině a kamarádům za podporu při tvorbě této diplomové práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a realizací elektroměru zaměřeného primárně na použití v nabíjecím stojanu pro elektromobily. Teoretická část se věnuje nabídce nabíjecích stojanů, způsobům nabíjení elektromobilů a standardům používaným k jejich připojení. K samotné realizaci elektroměru byl použit měřicí obvod ADE7878, jelikož umožňuje měřit velké množství veličin, a řídicí mikrokontrolér STM32F407 kvůli zkušenostem s jeho využitím. Během práce byly nejprve použity vývojové moduly pro testování funkčnosti jednotlivých bloků systému a následně byl navržen a vyroben vlastní plošný spoj realizující hlavní část elektroměru. Firmware mikrokontroléru je založen na použití operačního systému FreeRTOS. Hlavním úkolem řídicího prvku je zajištění vyčítání dat z měřicího obvodu a jejich poskytování dalším zařízením přes rozhraní Ethernet.

Klíčová slova

elektroměr, FreeRTOS, Ethernet, napětí, proud, energie, měření

Abstract

This work deals with the design and the realization of the energy meter focusing on use in the charging station for electric vehicles. The theoretical part is dedicated to description of different types of charging stations, electric vehicle charging methods and connection standards. The electric metering integrated circuit ADE7878, which allows measuring a large amount of parameters, and the microcontroller STM32F407 were used for the realization. The evaluation boards were used for functional testing of individual parts. After that, the custom printed circuit board for energy meter was designed and manufactured. Firmware of microcontroller is based on the operating system FreeRTOS. The main task of the control element is to ensure reading data from the metering integrated circuit and to provide them via Ethernet.

Key words

energy meter, FreeRTOS, Ethernet, voltage, current, energy, measurement

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
Seznam ilustrací	12
Seznam tabulek	14
1 Úvod.....	15
2 Historie elektromobility	16
3 Nabíjení elektromobilů.....	19
3.1 Módy nabíjení	20
3.1.1 Mód 1	20
3.1.2 Mód 2	21
3.1.3 Mód 3	21
3.1.4 Mód 4	22
3.2 Místa pro připojení elektromobilu	23
3.2.1 Nabíjecí stojany	23
3.3 Konektory pro nabíjení elektromobilů.....	30
3.3.1 Střídavé nabíjení.....	30
3.3.2 Stejnoseměrné nabíjení	33
4 Nabídka elektroměrů.....	35
5 Zvolené řešení	38
5.1 Měřicí obvod.....	38
5.1.1 Integrovaný obvod ADE7878.....	39
5.2 Řídicí mikrokontrolér.....	40
5.3 Postup práce.....	42
6 Prototypové testy základních úkolů	43
6.1 Elektroměr	43
6.1.1 Napěťové senzory.....	44
6.1.2 Proudové senzory	45
6.1.3 Komunikace přes zabudovaný mikrokontrolér.....	47
6.1.4 Komunikace pomocí externího mikrokontroléru.....	51
6.1.5 Manuální nastavení měřicího obvodu přes terminál.....	53
6.2 Komunikace přes Ethernet.....	57
6.2.1 Komunikace přes TCP.....	57
6.2.2 Využití FreeRTOS s TCP komunikací	59
6.3 Komunikace s vozidlem.....	61
7 Realizace samostatného elektroměru	65
7.1 Spojení dílčích softwarových částí	65
7.1.1 Konzole pro nastavení	67
7.1.2 Implementace komunikačního protokolu	69
7.2 Návrh a výroba plošného spoje.....	70
8 Testování funkčnosti elektroměru	73
8.1 Měření elektrické energie	73
8.2 Ověření pulzního výstupu	75
9 Závěr	76

Seznam použité literatury.....	78
Seznam příloh.....	82

Seznam použitých zkratek a symbolů

°C	stupeň Celsia, jednotka teploty
3D	Three Dimensional, trojrozměrný
3G	Third Generation, třetí generace mobilních sítí
A	ampér, jednotka elektrického proudu
AC	Alternating Current, střídavý proud
AD	Analogově Digitální, používáno pro označení převodníku
ARM	Advanced RISC Machine, pokročilý RISC zařízení, architektura procesorů
ASCII	American Standard Code for Information Interchange, americký standardní kód pro výměnu informací
CAN	Controller Area Network, průmyslová sběrnice pro sdílení informací
CCS	Combined Charging System, typ konektorů pro stejnosměrné i střídavé nabíjení elektromobilů
CDMA	Code Division Multiple Access, kódový multiplex
CP	Contact Pilot, označení jedné z linek pro komunikaci s elektromobilem
DC	Direct Current, stejnosměrný proud
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol, protokol z rodiny TCP/IP pro automatickou konfiguraci
DIN	Deutsches Institut für Normung, Německý ústav pro průmyslovou normalizaci
DSP	Digital Signal Processor, digitální signálový procesor
E	energie (J)
ESD	ElectroStatic Discharge, elektrostatický výboj
FPU	Floating Point Unit, jednotka pro práci s desetinnými čísly s plovoucí řádovou čárkou
FS	Full Speed, plná rychlost, určení propustnosti u sběrnice USB
FSMC	Flexible Static Memory Controller, rozhraní pro připojení externí paměti různého druhu
f	frekvence (Hz)
GPRS	General Packet Radio Service, služba umožňující GSM přenos dat a připojení k Internetu
GSM	Global System for Mobile communication, standard pro mobilní zařízení
HDO	Hromadné Dálkové Ovládání, způsob dálkové regulace odběru elektrické energie
HS	High Speed, vysoká rychlost, určení propustnosti u sběrnice USB
HSDC	High Speed Data Capture, vysokorychlostní sběr dat, rozhraní pro přenos vzorků snímaných signálů
Hz	hertz, jednotka frekvence
I	elektrický proud (A)
I ² C	Inter Integrated Circuit, sériová komunikační sběrnice
I ² S	Integrated Interchip Sound, sériová komunikační sběrnice pro přenos zvuku
ICCB	In Cable Control Box, jednotka umístěná na kabelu pro nabíjení elektromobilu
IEC	International Electrotechnical Commission, Mezinárodní elektrotechnická komise
IPv4	Internet Protocol version 4, internetový protokol verze 4
IPv6	Internet Protocol version 6, internetový protokol verze 6

IPxx	Ingress Protection, stupeň krytí udávaný kombinací dvou číslic
IR	Infra Red, infra červená, specifická vlnová délka záření
ISO	International Organization for Standardization, Mezinárodní organizace pro normalizaci
J	joule, jednotka energie
kB	kiloByte, kilobajt, jednotka množství dat
kg	kilogram, jednotka hmotnosti
kHz	kilohertz, jednotka frekvence
km	kilometr, jednotka délky
km/h	kilometr za hodinu, jednotka rychlosti
kW	kilowatt, jednotka výkonu
kWh	kilowatthodina, jednotka energie
kΩ	kiloohm, jednotka elektrického odporu
LED	Light Emitting Diode, světlo emitující dioda
LiFePO	Lithium Ferrous Phosphate, lithium železo fosfát, typ akumulátorů
LwIP	Light weight Internet Protocol, odlehčený internetový protokol
Mb/s	megabit za sekundu, jednotka přenosové rychlosti
MHz	megahertz, jednotka frekvence
MID	Measuring Instruments Directive, směrnice pro měřicí zařízení
MII	Medium Independent Interface, rozhraní pro připojení k fyzické vrstvě Ethernetu
MISO	Master In Slave Out, datová linka sběrnice SPI pro odesílání ze zařízení slave
MOSI	Master Out Slave In, datová linka sběrnice SPI pro odesílání ze zařízení master
mm	milimetr, jednotka délky
NFC	Near Field Communication, technologie rádiové bezdrátové komunikace
P	výkon (W)
PGA	Programmable Gain Amplifier, zesilovač s programovatelným zesílením
PIN	Personal Identification Number, osobní identifikační číslo
PP	Proximity Pilot, Plug Present, označení jedné z linek pro komunikaci s elektromobilem
PWM	Pulse Width Modulation, pulzně šířková modulace
R	elektrický odpor (Ω)
RAM	Random Access Memory, paměť s přímým přístupem
RFID	Radio Frequency IDentification, identifikace na rádiové frekvenci
RISC	Reduced Instruction Set Computing, architektura mikroprocesorů
RMII	Reduced Medium Independent Interface, rozhraní pro připojení k fyzické vrstvě Ethernetu
RMS	Root Mean Square, efektivní hodnota
SCLK	Serial CLoCK, linka sběrnice SPI s hodinovým signálem
SDIO	Secure Digital Input Output, rozhraní pro komunikaci s paměťovými kartami
SMD	Surface Mount Device, součástka pro povrchovou montáž
SPI	Serial Peripheral Interface, sériové komunikační rozhraní
SS	Slave Select, datová linka sběrnice SPI pro volbu aktivního slave zařízení
SUV	Sport Utility Vehicle, sportovní užitkové auto
TCP	Transmission Control Protocol, protokol transportní vrstvy z rodiny TCP/IP

TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol, sada protokolů pro komunikaci
t	čas (s)
U	elektrické napětí (V)
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter, univerzální asynchronní sériové komunikační rozhraní
UDP	User Datagram Protocol, protokol transportní vrstvy z rodiny TCP/IP
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter, univerzální synchronní/asynchronní sériové komunikační rozhraní
USB	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice
USB OTG	USB On The Go, specifikace umožňující zařízení vystupovat jako host i device
V	volt, jednotka elektrického napětí
VAh	voltampérhodina, jednotka pro zdánlivou elektrickou energii
varh	varhodina, jednotka pro jalovou elektrickou energii (dříve VAR byl voltampér reaktanční)
W	watt, jednotka výkonu
Wh	watthodina, jednotka energie
Ws	wattsekunda, jednotka energie
XML	eXtensible Markup Language, rozšiřitelný značkovací jazyk
XOR	operátor exkluzivní disjunkce
Ω	ohm, jednotka elektrického odporu

Seznam ilustrací

Obrázek 1 - První malé elektrické vozidlo pocházející z Nizozemska [1].....	16
Obrázek 2 - Vozidlo Torpedo Kid [5].....	17
Obrázek 3 - Elektromobil Františka Křížíka [6]	17
Obrázek 4 - Schéma nabíjecího módu 1 [10].....	20
Obrázek 5 - Schéma nabíjecího módu 2 [10].....	21
Obrázek 6 - Schéma nabíjecího módu 3 [10].....	22
Obrázek 7 - Schéma nabíjecího módu 4 [10].....	22
Obrázek 8 - Terra 53 CJG [16].....	25
Obrázek 9 - Nabíjecí stanice ČEZ pro běžné nabíjení (vlevo) a ultrarychlé nabíjení (vpravo) [17].....	27
Obrázek 10 - Nabíjecí stojan Chago Station (vlevo), Chago Pro (uprostřed) a Chago Power (vpravo) [22][24][25].....	28
Obrázek 11 - Nabíjecí stanice EVlink Parkoviště (vlevo) a EVlink Rychlonabíjecí stanice (vpravo) [26][27]	29
Obrázek 12 - Jednofázová zásuvka na 230 V, 16 A [9].....	30
Obrázek 13 - Třífázová zásuvka na 400 V, 32 A [28]	31
Obrázek 14 - Konektor J1772 [30].....	31
Obrázek 15 - Konektor Mennekes [33].....	32
Obrázek 16 - Zapojení kontaktů u varianty AC (vlevo), DC pomalé (uprostřed) a DC střední (vpravo) [31]	32
Obrázek 17 - Konektor CHAdeMO [35].....	33
Obrázek 18 - Dvě varianty konektoru Combo, americká (vlevo) a evropská (vpravo) [9].....	34
Obrázek 19 - Konektor pro stejnosměrné nabíjení od firmy Tesla Motors [39]	34
Obrázek 20 - Elektroměr WM40 96 od firmy Enika s rozhraním Ethernet [45].....	36
Obrázek 21 - Funkční blokový diagram obvodu ADE7878 [48].....	39
Obrázek 22 - Vývojová deska STM32F4 Discovery a rozšiřující modul	42
Obrázek 23 - Diagram zapojení vývojové desky [52].....	43
Obrázek 24 - Vývojová deska pro realizaci elektroměru [53]	44
Obrázek 25 - Schéma zapojení děliče fázového napětí.....	44
Obrázek 26 - Schéma zapojení obvodové sítě pro proudový transformátor	46
Obrázek 27 - Přípravek s proudovými transformátory.....	47
Obrázek 28 - Základní obrazovka komunikačního programu	47
Obrázek 29 - Panel pro rychlé zprovoznění elektroměru.....	49
Obrázek 30 - Komunikace přes konzoli.....	52
Obrázek 31 - Přenos dat po sběrnici SPI, signály seshora SS, SCLK, MOSI a MISO	53
Obrázek 32 - Výpis z terminálu v roli TCP server.....	58
Obrázek 33 - Výpis z terminálu v roli TCP klient	59
Obrázek 34 - Výpis z terminálu při použití FreeRTOS.....	60
Obrázek 35 - Sekvenční diagram příjmu zprávy.....	61
Obrázek 36 - Stavový diagram nabíjení [55]	62
Obrázek 37 - Schéma zapojení pro realizaci napěťových převodů.....	63
Obrázek 38 - Schéma zapojení přípravku pro simulaci elektromobilu	64
Obrázek 39 - Naměřený průběh z komunikačního vodiče CP	64

Obrázek 40 - Kontextový diagram	65
Obrázek 41 - Diagram datových toků	66
Obrázek 42 - Ukázka komunikace přes servisní konzoli	68
Obrázek 43 - Vyfrézovaný plošný spoj.....	72
Obrázek 44 - Elektroměr umístěný v krabici s vlastním předním panelem.....	72
Obrázek 45 - Graf spotřeby energie v čase	74

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Varianty stojanů podle rozhraní [14][15]	24
Tabulka 2 - Vlastnosti nabíjecích stojanů Terra [14][15]	25
Tabulka 3 - Vlastnosti nabíjecích stojanů E-mobilita pro běžné dobíjení [18].....	26
Tabulka 4 - Vlastnosti nabíjecích stojanů Chago [22][24][25]	28
Tabulka 5 - Vlastnosti nabíjecích stojanů EVlink [26]	29
Tabulka 6 - Parametry variant nabíjení [29]	32
Tabulka 7 - Maximální parametry standardu CCS [37]	34
Tabulka 8 - Popis sérií mikrokontrolérů výrobce STMicroelectronics [49]	40
Tabulka 9 - Porovnání dvou vybraných produktových řad [50][51].....	41
Tabulka 10 - Úbytky napětí na měřicím děliči.....	45
Tabulka 11 - Přehled výhod a nevýhod senzorů proudu [54]	45
Tabulka 12 - Obecný rámec zprávy z počítače pro mikrokontrolér.....	50
Tabulka 13 - Seznam druhů zpráv [52].....	50
Tabulka 14 - Zpráva o potvrzení od mikrokontroléru pro počítač [52]	50
Tabulka 15 - Obecný rámec zprávy z mikrokontroléru pro počítač [52]	51
Tabulka 16 - Parametry zápisu do registru STATUS1.....	53
Tabulka 17 - Parametry zápisu do registru GAIN.....	54
Tabulka 18 - Parametry zápisu do registrů nTHR1 a nTHR0	55
Tabulka 19 - Parametry zápisu do registrů CFxDEN.....	55
Tabulka 20 - Parametry zápisu do registrů CFMODE a COMPMODE	56
Tabulka 21 - Parametry zápisu do registrů VLEVEL a VNOM	57
Tabulka 22 - Parametry zápisu do registrů pro aktivaci ochrany RAM.....	57
Tabulka 23 - Parametry zápisu do registru RUN	57
Tabulka 24 - Specifikace stavů systému [55].....	62
Tabulka 25 - Určení plnění PWM podle proudu [55]	63
Tabulka 26 - Hodnoty napětí PWM signálu.....	64
Tabulka 27 - Datový slovník.....	66
Tabulka 28 - Komunikační rámec	69
Tabulka 29 - Seznam příkazů pro elektroměr	69
Tabulka 30 - Seznam druhů energií pro příkazy	70
Tabulka 31 - Naměřené hodnoty energie v čase	73

1 Úvod

Dnes a denně se setkáváme na ulicích a cestách s velkým množstvím automobilů. Bez jejich použití si řada lidí nedokáže svůj den představit. V drtivé většině jsou tyto vozy vybaveny spalovacím motorem. Nicméně vedle tohoto druhu se od dob vzniku automobilů vyvíjí také varianta s motorem elektrickým. Elektromobily jsou dokonce ještě starší, jelikož první postavený automobil byl poháněn elektřinou. Dlouhá léta však byly vozy s tímto typem pohonu až na pomyslné druhé, ne-li třetí koleji. V posledních letech se ale s myšlenkou elektromobilů setkáváme stále častěji. Mohou za to různé aspekty. Jedním z nich je těžba ropy, jelikož se jedná o neobnovitelný zdroj, jehož zásoby se stále snižují. V důsledku toho by mohlo dojít k prudkému nárůstu cen pohonných hmot. Druhou neoddiskutovatelnou problematikou jsou emise vozidel. V případě elektromobilů nedochází ke spalování látek a tedy ani k emisím plynů do ovzduší. Zdrojem energie je elektřina. Je důležité si uvědomit, že ta se také ve velké míře vyrábí z přírodních surovin, nicméně probíhá alespoň využití jiných zdrojů než ropy. Pokud bychom uvažovali samotnou výrobu elektrické energie do otázky emisí, můžeme mluvit o přesunutí jejich zdrojů do míst elektráren, nicméně výsledná úroveň je diskutovatelná.

S použitím elektromobilů v běžném životě lidí se pojí různé otázky. Tou asi nejpodstatnější, která bude potenciální majitele elektromobilu zajímat, je vzdálenost, kterou je vozidlo schopno ujet na jedno nabití. Ta se dnes v závislosti na druhu elektromobilu a kapacitě jeho baterií pohybuje kolem 80 až 120 km, u některých modelů i několik set km. Běžně je tedy provoz elektromobilu zaměřen na kratší vzdálenosti, pohyb po městě a jeho okolí. S dojezdem se pak ruku v ruce pojí otázka nabíjení. Pro klasické automobily existuje široká síť čerpacích stanic, obdobná síť pro elektromobily se však teprve buduje. Na jejím rozvoji závisí zvyšování podílu elektromobilů na silnicích.

Na katedře Kybernetiky a biomedicínského inženýrství Vysoké školy báňské v rámci projektu Pre-seed aktivity VŠB-TUO – Energetické zdroje vzniklo několik variant nabíjecích stanic. Mezi nimi i sloupcová pro umístění ve venkovních prostorech, například na parkovištích. Aktuální provedení je vybaveno průmyslovými třífázovými zásuvkami na 16 A i 32 A a jednou jednofázovou zásuvkou.

Cílem této diplomové práce je rozšířit stávající řešení. V první řadě se jedná o vlastní realizaci elektroměru, ze kterého bude možné vyčítat velké množství různých údajů týkajících se nejen množství odebrané energie, ale také parametrů sítě. Druhým podstatným bodem je rozšíření nabíjecího stojanu o některé ze zavedených rozhraní pro nabíjení elektromobilů. Zásadním krokem v této části by měla být realizace komunikace s vozidlem, kterou daná rozhraní umožňují. Podstatou pro její zavedení je možnost určení velikosti nabíjecího proudu. Zároveň je možné zvýšit bezpečnost při nabíjení a připojování potřebných kabelů. Modul pro nabíjecí stanici, který by měl zajišťovat zmíněné funkce, by měl být poměrně samostatný a obsahovat vlastní řídicí prvek. K propojení a spolupráci s ostatními komponentami nabíjecího stojanu by mělo sloužit komunikační rozhraní.

2 Historie elektromobility

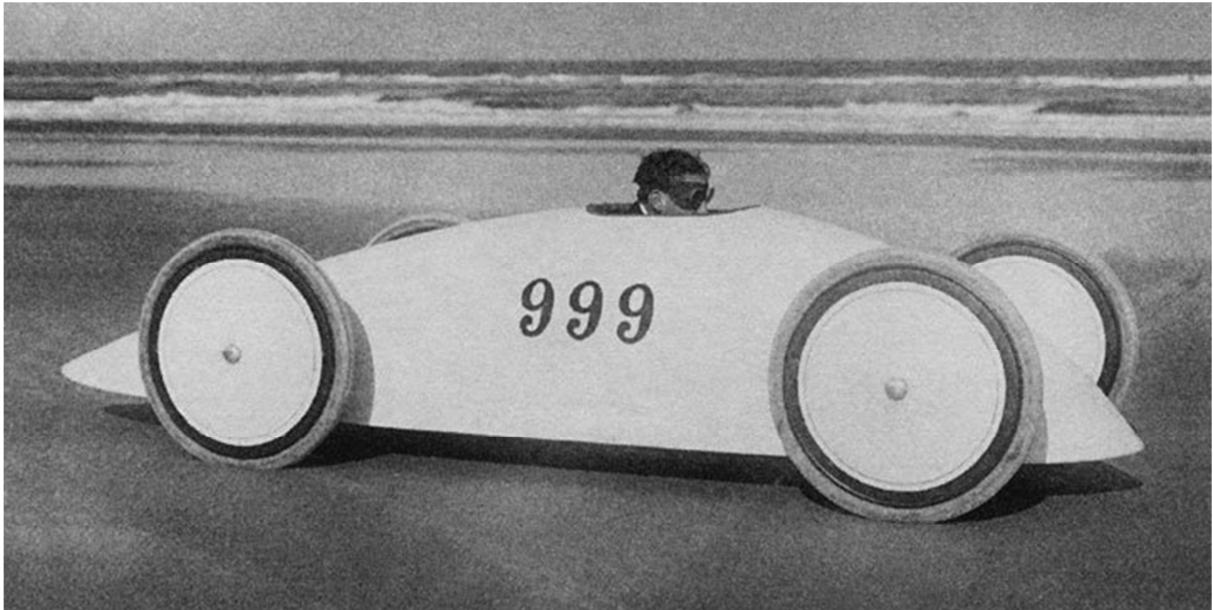
Za první počín na poli elektromobility můžeme považovat malé elektrické vozidlo (viz obrázek 1), které vzniklo v Nizozemsku roku 1835. Jeho tvůrcem byl profesor chemie a techniky Sibrandus Stratingh. O samotné sestavení se měl starat jeho pomocník Christopher Becker. Tento výtvar můžeme považovat za určitého předchůdce elektromobilů. O zdroj energie se staraly ještě nenabíjecí baterie, tedy primární články. V oblasti zájmu těchto mužů byla také vozidla poháněná parou.[1][2][3]



Obrázek 1 - První malé elektrické vozidlo pocházející z Nizozemska [1]

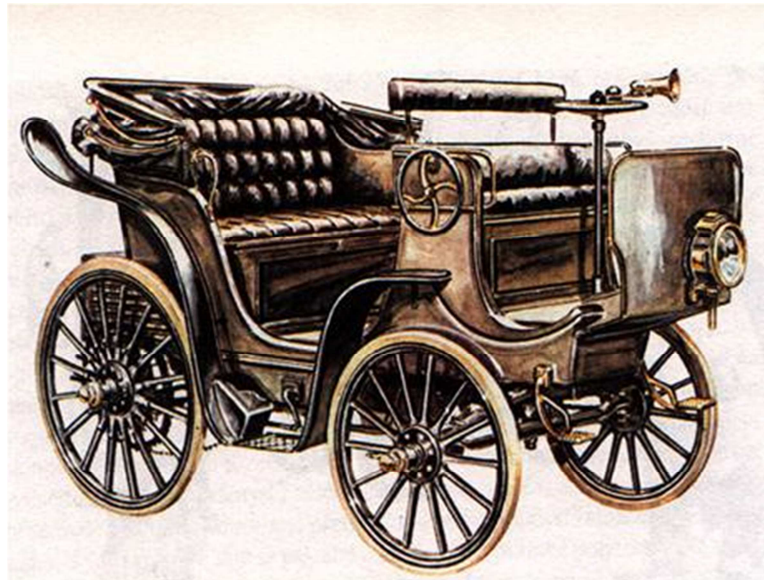
Přibližně od třicátých let devatenáctého století se můžeme setkat se zmínkami o sestrojení elektrických vozíků, vozidel nebo kol. Velký posun byl však zaznamenán roku 1859. Postaral se o něj francouzský fyzik Gaston Planté vytvořením prvních olověných baterií, které se daly nabíjet.[4]

V následujících letech měly elektromobily dominantní postavení na poli automobilů. Nejen že vývoj spalovacích vozů začal později, elektromobily také překonávaly různé významné hranice. Mezi ně patří například překonání rychlosti 100 km/h. To zajistil Belgičan Camille Jenatzy roku 1899. Běžná rychlost elektromobilů se obvykle pohybovala kolem 40 km/h. O pouhé tři roky později byla stanovena maximální dosažená hodnota rychlosti na 170 km/h. Tento rekord byl uskutečněn Němcem Walterem Bakerem ve voze Torpedo Kid (viz obrázek 2), který byl maximálně přizpůsoben pro dosažení co nejvyšší rychlosti – měl kapkovitý aerodynamický tvar, velmi lehkou konstrukci a byl menší než běžná vozidla.[2][3]



Obrázek 2 - Vozidlo Torpedo Kid [5]

Vývoj probíhal nejen ve světě, ale také v Česku. Na počátku se o něj zasloužil významný vědec František Křižík, který roku 1895 představil svůj první elektromobil. Byl poháněn jedním stejnosměrným motorem s výkonem 3,6 kW a zdrojem energie byly olověné akumulátory. Druhý prototyp, který je na obrázku 3, byl vybaven dvěma menšími motory o výkonu 2,2 kW, kdy každý poháněl jedno zadní kolo. Jako poslední bývá uváděn model s označením Landalet, jehož základem byl vůz značky Laurin & Klement. Jednalo se o jeden z prvních hybridních vozů, ve kterém sloužil spalovací motor k nabíjení baterií, ze kterých byly následně poháněny elektromotory. Tento koncept byl zvolen pro zvýšení dojezdu vozidla.[2][3][4]



Obrázek 3 - Elektromobil Františka Křižíka [6]

Na začátku dvacátého století byly elektromobily populární a rozšířenější než automobily se spalovacím motorem. Nejen kvůli větší spolehlivosti nebo tichosti, ale také například z důvodu, že

nevyžadovaly startování pomocí kliky, které bylo namáhavé. Nicméně v dalších letech se situace začala měnit. S rozvojem automobilů souvisel rovněž rozvoj infrastruktury a kvůli tomu se začal u elektromobilů více zmiňovat malý dojezd. Zároveň se začala snižovat cena jak automobilů se spalovacím motorem, tak pohonných hmot. Za zmínění stojí jeden z prvních vozů značky Ford, konkrétně model T, který byl velmi levný a tudíž určený pro širokou veřejnost. Automobily přestaly být výsadou bohatých.[2][4]

Za malé období renesance můžeme paradoxně považovat dobu světových válek. Nafta se stala důležitou surovinou pro armády a nebylo možné jí plýtvat. V této době vznikly v závodech Škoda v Plzni nákladní elektromobily, které sloužily pro účely pivovaru. Podobných vozů, jež byly určeny především pro přepravu nákladů a použití ve firmách, bylo možné najít více a v různých zemích.[2][3][4]

Koncem dvacátého století začalo být kvůli ropě coby strategické surovině i kvůli jejímu ubývání v přírodních zásobách a ve městech také z důvodu kvality ovzduší téma elektromobility opět diskutované. Na elektrických vozech začaly pracovat nejen jednotlivé automobilky, ale také různé vysoké školy v rámci projektů a výzkumu. V dnešní době většina známých značek nabízí některé ze svých vozů v čistě elektrické variantě, případně jako hybridní vůz. Obvykle se jedná o menší modely, které jsou určeny v první řadě pro provoz ve městě. Pravděpodobně nejvýznamnější firmou v této oblasti je Tesla Motors, která se zabývá pouze výrobou elektromobilů. Její model S je přímou konkurencí špičkových luxusních vozů, nejedná se o žádné malé městské auto. V nedávné době navíc představila model X, což je plnohodnotné elektrické SUV (sport utility vehicle).[3][4]

3 Nabíjení elektromobilů

Budeme-li mluvit o důležitých parametrech elektromobilu, o faktech, která nás zajímají, nebo i o problematické oblasti, velmi pravděpodobně nás nebude zajímat výkon motoru a jeho zrychlení. Tím nejpodstatnějším a nejdiskutovanějším bývá otázka dojezdu. Dojezd je samozřejmě odvislý od způsobu jízdy a spotřeby motoru, která je ovlivněna řadou dalších věcí, ale primárně souvisí s bateriemi a jejich kapacitou, jež udává, kolik energie si vozidlo s sebou může vézt. A v případě, že je této energie málo a nevystačí na požadovanou cestu, vyvstane otázka, jak rychle se dá dočerpát, přesněji nabít. Zároveň je potřeba počítat s tím, že tak jako u každé nabíjecí baterie, i zde dochází k postupnému stárnutí a snižování kapacity baterií, což přímo vede ke snižování maximálního dojezdu. U moderních baterií typu LiFePO (Lithium Ferrous Phosphate) se uvádí životnost v nabíjecích cyklech v rozsahu 1000 až 3000. Po této době by kapacita baterií měla klesnout na 80 % původního stavu. Pokud bychom elektromobil s těmito bateriemi nabíjeli každý den, dojde k uvedenému poklesu kapacity baterií za přibližně 3 až 8 let. Po této době je vozidlo stále použitelné, jen je potřeba častěji nabíjet. S kapacitou baterií také souvisí to, jak se s nimi pracuje, tedy jakým způsobem je z nich odebírána energie, jestli například dochází k časté a prudké akceleraci nebo je provoz plynulý. K prodloužení životnosti je zároveň vhodné nevybíjet akumulátory úplně do nulové energie. Pokud k tomu dojde, neměly by v tomto stavu zůstat dlouho. Stejně je tomu i u stavu plného nabití.[7]

Na elektromobily a jejich používání je potřeba nahlížet odlišněji než na klasické automobily. Obecné schéma použití elektromobilu lze zachytit na využití k dopravě do práce a zpátky domů. Na začátku dne je elektromobil plně nabitý a umožňuje dojezd průměrně kolem 100 km. Běžně předpokládaná vzdálenost cesty ve městě nebo příměstských oblastech je do 50 km. Během pracovní doby může být vozidlo nabíjeno. Za uplynulých 8 hodin ve většině případů dojde k jeho plnému nabití. Následně probíhá stejná cesta zpět. Obvykle lze počítat s tím, že na jedno nabití je možné dojet do práce i zpátky. Po denním provozu může být vozidlo nabíjeno přes noc. Obdobně může probíhat cesta za jiným účelem než do práce v závislosti na vzdálenosti s nutností na cílovém místě vozidlo nabíjet či nikoliv. Pokud je potřeba přepravovat se na delší vzdálenosti, je třeba počítat s nutností přestávky na nabíjení. Ve většině případů to znamená i několikahodinovou pauzu v cestě. Délka nabíjení záleží na zdroji, ze kterého nabíjení probíhá, na jeho možnostech a zároveň dispozicích elektromobilu.

Základní dělení způsobu nabíjení elektromobilu je na nabíjení stejnosměrným proudem a střídavým. Varianta se střídavým proudem bývá častější. V tomto případě je pro nabíjení baterií, pro něž je zapotřebí stejnosměrný proud, použitý měnič, který je zabudován přímo ve vozidle. Označuje se jako palubní nabíječ. Rychlost nabíjení je omezena buď maximálním proudem, který lze z daného zdroje čerpat, nebo maximálním výkonem palubního nabíječe. Pokud tedy připojíme vozidlo ke klasické jednofázové zásuvce, bude nabíjení limitováno výkonem přibližně 3,7 kW, jelikož proud je omezen hodnotou 16 A. Ke zrychlení nabíjení může dojít, použije-li se 3fázová zásuvka. U 16A varianty bude nabíjení rychlejší, je-li palubní nabíječ třífázový. Nedochozí-li k limitaci na straně vozidla, umožní 32A varianta znatelně snížit dobu nabíjení, jelikož na jedné fázi umožňuje využít výkon asi 7,4 kW a na všech fázích 22 kW.[8][9]

Při stejnosměrném nabíjení se palubní nabíječ nevyužívá. K realizaci jsou zapotřebí speciální nabíjecí zařízení označovaná jako rychlonabíječky. Přenášený proud může dosahovat vyšších hodnot než u střídavého nabíjení a nabíjecí výkon může být i 50 kW, což zajišťuje více než desetkrát kratší

(tedy rychlejší) nabíjení než klasická jednofázová zásuvka. U stejnosměrného nabíjení je největší problém s dostupností stanic, které by jej podporovaly.[9]

Speciálním způsobem „doplnění“ energie vozidla je výměna celé sady baterií za nabitou. Celý proces může trvat řádově minuty a je svou časovou náročností srovnatelný s tankováním paliva do klasického vozu. Zásadním problémem, který tuto variantu degraduje, je skutečnost, že většina dnes dostupných elektromobilů takovou rychlou výměnu baterií neumožňuje. Navíc ani v tomto případě neexistuje infrastruktura výměnných stanic, které by bylo možné používat.

3.1 Módy nabíjení

Toto dělení se odvíjí nejen od režimu se stejnosměrným či střídavým proudem, ale také od maximálního odebíraného proudu. Určuje rovněž požadavky na některé bezpečnostní prvky. Všechny detaily specifikující tyto čtyři módy jsou sepsány v normě IEC 61851-1.

3.1.1 Mód 1

První definovaný režim nabíjení počítá s použitím standardních domovních zásuvek. Může se jednat jak o jednofázové zásuvky v třívodičovém zapojení, tak o třífázové zásuvky s pěti kontakty. Schématické znázornění zachycuje obrázek 4. Definované omezení nabíjecího proudu je 16 A na fázi, což u jednofázové sítě dává maximální výkon 3,7 kW a u třífázové 11 kW. Zásuvka musí být chráněna jističem i proudovým chráničem.[8][10][11][12]



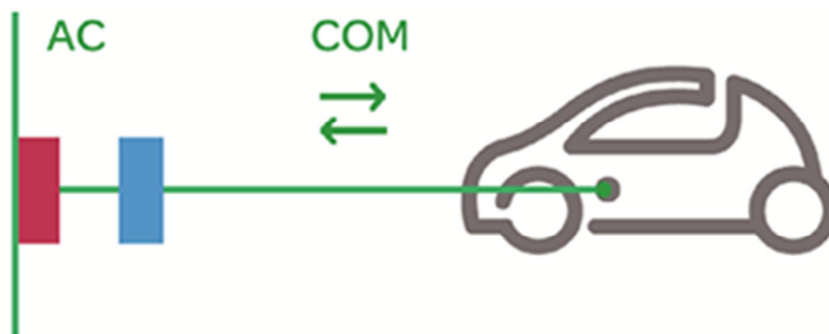
Obrázek 4 - Schéma nabíjecího módu 1 [10]

Na první pohled je tento režim velmi výhodný, nevyžaduje žádné speciální prvky a umožňuje tak nabíjet elektromobil prakticky kdekoliv. Omezující je ale rychlost nabíjení, která je výrazně limitována proudem. Při využití jednofázové zásuvky může běžně nabíjení trvat kolem 8 hodin. Jedná se tedy o pomalé nabíjení, vhodné například pro nabití přes noc. Problém může nastat, jestliže použitá zásuvka spadá do okruhu, ve kterém jsou připojeny další spotřebiče. Při jejich používání v době nabíjení může často a téměř pravidelně docházet k vybavení jističe, jelikož dojde k překračování povoleného proudu. Starší elektroinstalace mohou navíc být v horším stavu a jednotlivé spoje mohou vykazovat větší přechodový odpor, v jehož důsledku při nabíjení dochází k výraznému ohřevu daného místa. To může mít v horších případech za následek vznik požáru. Výhodné je využívat třífázové zásuvky, které bývají dimenzovány na vyšší trvalý proud a mívají samostatné jištění. Nabíjení obvykle ale probíhá stejně rychle jako u jednofázové zásuvky, jelikož většina elektromobilů není vybavena

třífázovým palubním nabíječem. Běžně používané jednofázové zásuvky v domácnostech navíc nejsou dimenzovány na maximální zatížení po dobu několika hodin.[8][10][11][12]

3.1.2 Mód 2

Druhý režim je opět spojen se standardními zásuvkami pro jednofázovou i třífázovou síť. Proudové omezení je dvojnásobné, tedy 32 A na fázi. Tato hodnota se vztahuje především k třífázové zásuvce na 32 A, jelikož běžné jednofázové zásuvky neumožňují průchod tak vysokého proudu bez následného poškození.[8][11][12]



Obrázek 5 - Schéma nabíjecího módu 2 [10]

Podstatným rozdílem oproti předchozímu módu je nutnost využít pro připojení speciální kabel, který může být mnohdy dost nákladný. Na kabelu se totiž musí nacházet jednotka ICCB (In Cable Control Box), která řídí nabíjení a zároveň v sobě zahrnuje bezpečnostní prvky, jež kontrolují například špatné připojení země nebo chyby vzniklé na straně vozidla při nabíjení. Schématické znázornění je na obrázku 5. K elektromobilu se speciální kabel obvykle připojuje pomocí některého ze standardizovaných nabíjecích konektorů, pomocí kterých jednotka ICCB komunikuje s vozem. V podstatě můžeme říct, že režim nabíjení 2 je jakési propojení režimů 1 a 3.[8][11][12]

3.1.3 Mód 3

Na rozdíl od předchozích dvou režimů tento zavádí speciální zařízení, které je zapojeno k elektrické síti a slouží pro připojení elektromobilu. Může být vybaveno buď konektorem pro připojení nabíjecího kabelu, nebo může být tento kabel jeho součástí a zapojuje se pouze k vozidlu. Pro lepší představu je konkrétně tímto zařízením nabíjecí stojan nebo nástěnný nabíječ. Samotné zařízení definuje požadavky na přívod elektrické energie. Připojení k elektromobilu se provádí pouze přes speciální konektory určené pro nabíjení vozů, které specifikuje norma IEC 62196-2. Výstup z nabíjecího zařízení je střídavý a maximální velikost proudu je závislá na použitém konektoru. Možné jsou jednofázové i třífázové varianty. Například u konektoru Mennekes je povolen maximální proud 63 A na fázi, což v třífázové síti dává nabíjecí výkon 43,5 kW. Pravděpodobně žádný z dnes vyráběných elektromobilů neumožňuje využít veškerou nabíjecí kapacitu. Pro tak velké nabíjecí proudy by také musely být dostatečně dimenzovány přívody ze sítě a ta by danou zátěž musela být schopna pokrýt.[8][11][12]

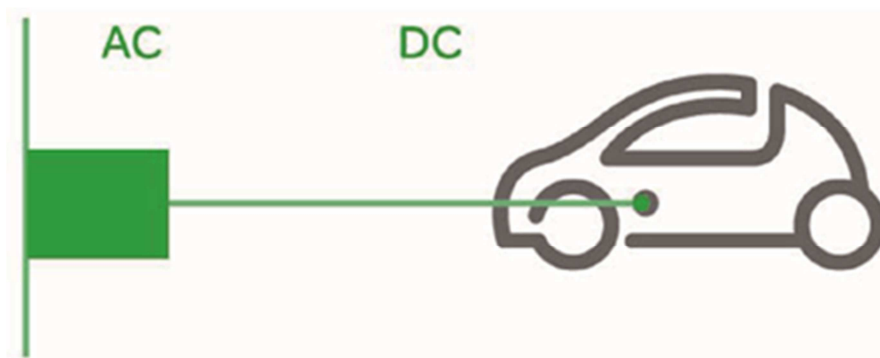


Obrázek 6 - Schéma nabíjecího módu 3 [10]

V tomto módu probíhá komunikace mezi elektromobilem a nabíjecím zařízením (viz obrázek 6), která určuje velikost nabíjecího proudu, ukončení nabíjení a monitorování různých chyb. Také zajišťuje bezpečné připojení a odpojení nabíjecích kabelů. Totožnou komunikaci zajišťovala v předchozím módu jednotka ICCB. Zajímavostí tohoto režimu je umožnění oboustranného toku energie, tedy je počítáno s možným nasazením ve smart gridech.[8][11][12]

3.1.4 Mód 4

Jak je patrné ze schématického znázornění na obrázku 7, poslední režim se od ostatních výrazně odlišuje. Na rozdíl od nich probíhá nabíjení elektromobilu stejnosměrným proudem. Pouze v tomto režimu je z procesu nabíjení vyřazen palubní nabíječ a zařízení pro změnu střídavého proudu na stejnosměrný je na straně externí nabíječky. U ní nejsou nijak kritické její rozměry nebo hmotnost, tudíž může být nabíječ dimenzován na vyšší výkon. Proto také u tohoto módu mluvíme o takzvaném rychlonabíjení. Pro připojení k vozu se používají speciální konektory, které jsou ve většině případů odlišné od těch, jež jsou určeny pro mód 3.[8][11]



Obrázek 7 - Schéma nabíjecího módu 4 [10]

Co se maximálního nabíjecího proudu týče, stanovuje norma hranici 400 A při napětí 1000 V. Těchto hodnot se dnes nedosahuje, typicky může stejnosměrné nabíjení probíhat výkonem 63 kW, 90 kW nebo 120 kW v závislosti na použitém rozhraní a nabíjecí stanici. Obecně lze říci, že první část nabíjení, přibližně do 80 %, proběhne v desítkách minut. Další fáze je pomalejší kvůli balancování článků. To samozřejmě probíhá u každého režimu nabíjení, nicméně v předchozích režimech má vůz po celou dobu nabíjení k dispozici menší výkon.[8][9][11]

Během nabíjení probíhá komunikace s vozem, který poskytuje informace o stavu jednotlivých baterií co do napětí nebo také teploty. Určuje se zároveň hodnota maximálního proudu a napětí, které se pro nabíjení použijí.[8][11]

3.2 Místa pro připojení elektromobilu

V předchozí části byly v souvislosti s módy nabíjení zmíněny různé varianty, k čemu může být vozidlo připojeno. Tou nejzákladnější možností jsou klasické domácí zásuvky, ať už v jednofázové nebo třífázové variantě. Nabíjení tímto způsobem připojení k síti je velmi pomalé a trvá dlouho. Jeho využití je na místě, pokud žádná jiná možnost není k dispozici anebo není-li potřeba vozidlo nabít rychle. Byly zmíněny také problémy při nabíjení z klasické zásuvky, které souvisí s ochranou a přetížením elektrického okruhu. Výhodou tohoto řešení je levná realizace nové přípojky, neposkytuje však další možnosti týkající se nabíjení.

Druhou možností pro připojování jsou takzvané wallboxy. Jedná se o nabíjecí stanice, které jsou umístěny na stěně. Vlastnosti jsou dané výrobcem. Obvykle umožňují nabíjení ve třetím režimu. Ojedinele je možné narazit i na takový, který umožňuje stejnosměrné nabíjení. Použití těchto nabíjecích stanic je zaměřeno na instalaci do vnitřních prostor, například do garáží, ať už soukromých nebo veřejných v podobě parkovišť. Wallboxy mohou obsahovat řídicí systém, který umožňuje zavést autorizaci uživatelů. Zároveň tak může být na některých místech nabíjení zpoplatněno. K dispozici může být i nastavení, jak dlouho se má nabíjet, jak velké množství energie a jiné. Jelikož se jedná o hotový produkt, který je možné zakoupit na trhu, je u něj vyřešena otázka bezpečnosti nabíjení.

Zatímco wallboxy byly určeny do vnitřních prostor, ve venkovním prostředí se můžeme setkat s nabíjecími stanicemi ve sloupovém provedení. Nejčastěji bývají umístěny na parkovištích. Stejně jako u předchozí varianty, i zde se jedná o produkty firem, tudíž bezpečnost nabíjení je zajištěna. Provedení těchto stojanů musí být dostatečně odolné z hlediska vandalismu, ale také proti vlivům počasí. Identifikace uživatelů nejčastěji probíhá pomocí RFID (Radio Frequency IDentification) karet. Většina umožňuje současné nabíjení více vozidel. K dispozici jsou varianty pro režim nabíjení 3 i 4. Některé stanice jsou navíc vybaveny i klasickou jednofázovou zásuvkou, aby se předešlo případným problémům s kompatibilitou různých konektorů nebo například aby mohla být nabíjena i elektrocola, u kterých se s velkými standardními konektory pro nabíjení elektromobilů nedá počítat.

3.2.1 Nabíjecí stojany

V dnešní době nabízejí svá řešení různé firmy. Často mívají v nabídce široké spektrum variant, které se mohou lišit použitými konektory nebo nabíjecími parametry a je možné vybrat nabíjecí stanici na míru. Mnohdy se jedná o firmy, které se zároveň zabývají distribucí elektrické energie. V následujícím textu budou uvedeny některé varianty nabíjecích stanic s jejich parametry od různých společností a také informace o případných odlišnostech v nabízeném sortimentu.

ABB Terra

Firma ABB nabízí řadu nabíjecích stojanů nesoucích jednotné označení Terra. Základním rysem je, že každá varianta umožňuje stejnosměrné nabíjení, zatímco střídavé pouze některé. V nabídce je také jedna stanice na stěnu.[13]

Základní dělení nabíjecích stojanů spočívá v číselném označení, které může být buď 23, nebo 53. Toto číslo udává maximální výkon, kterým lze elektromobil nabíjet přes stejnosměrné rozhraní.

Varianta označená nižším číslem poskytuje výkon 20 kW, stanice s číselným označením 53 umožňují nabíjet maximálním výkonem 50 kW. Číselné označení je doplněno písmeny, která udávají dostupná rozhraní pro nabíjení. Tabulka 1 zachycuje jednotlivé varianty včetně parametrů týkajících se výkonů a maximálních hodnot napětí a proudů. V případě, že jsou uvedeny dva parametry, jedná se o rozdíl mezi variantami s číselným označením 23 a 53. Existuje také speciální typ Z, který je vybaven rozhraním GB. To se využívá výhradně v Číně.[14][15]

Tabulka 1 - Varianty stojanů podle rozhraní [14][15]

Označení stojanu	C	J	G	T
Rozhraní	CCS (Combo)	CHAdeMO	typ 2 kabel (Mennekes)	typ 2 zásuvka (Mennekes)
Maximální výstupní výkon	20 kW, 50 kW	20 kW, 50 kW	22 kW, 43 kW	22 kW
Rozsah výstupního napětí	50–500 V (DC)	50–500 V (DC)	400 V	400 V
Maximální výstupní proud	60 A, 125 A (DC)	60 A, 125 A (DC)	32 A, 63 A	32 A
Délka kabelu	3,9 m	3,9 m	3,9 m	-
Kompatibilní značky vozů	BMW, Volkswagen, GM, Porsche, Audi	Nissan, Mitsubishi, Peugeot, Citroen, Kia	Renault, Daimler, Tesla, Smart, Mercedes	Renault, Daimler, Tesla, Smart, Mercedes

Defaultní je rozhraní CCS (Combined Charging System), které může být doplněno dalšími. Možné varianty jsou C, CJ, CT a CJG (viz obrázek 8). Každý stojan je vybaven dotykovým displejem, který umožňuje interakci s uživatelem. Do té se řadí například možnost vyžadovat zadání PINu (Personal Identification Number). Autorizace také může probíhat pomocí RFID karet. Do dalších vlastností, které stojany poskytují, můžeme zahrnout možnost softwarově omezit potřebný vstupní proud (a tím i maximální výstupní). To znamená, že stojany je možné umístit i v místech s energetickou sítí, která nemá parametry potřebné pro připojení nejvýkonnější varianty, aniž by musela být tato infrastruktura měněna.[14][15]



Obrázek 8 - Terra 53 CJG [16]

Zajímavá je také možnost vzdálené komunikace přes různá rozhraní. Lze tak zjišťovat údaje o nabíjení, ale také aktualizovat firmware stojanu. Základní vlastnosti stojanů Terra jsou uvedeny v tabulce 2.[14][15]

Tabulka 2 - Vlastnosti nabíjecích stojanů Terra [14][15]

Prostředí	vnitřní/vnější
Provozní teplota	-10 °C až 50 °C, volitelně -35 °C až 50 °C
Skladovací teplota	-40 °C až 70 °C
Stupeň krytí	IP54
Rozměry	760 × 525 × 1900 mm
Hmotnost	400 kg
Vstupní připojení ke střídavé síti	3L + N + PE
Rozsah vstupního napětí	400 V (AC) ±10 %, 50 nebo 60 Hz

Maximální jmenovitý vstupní proud a výkon	C, CJ: 32 A, 23 kW CT, CJG: 63 A, 45 kW možnost limitování výkonu
Účinnost při plné zátěži	> 0,96
Účinnost	94 % při nominálním výstupním výkonu
RFID systém	ISO/IEC14443A/B, ISO/IEC15693, FeliCa 1, NFC režim, LEGIC Prime & Advant
Připojení k síti	GSM/CDMA/3G modem, 10/100 Mb/s Ethernet

ČEZ E-mobilita

Skupina ČEZ vytvořila projekt s označením E-mobilita, v rámci kterého zhotovila dva druhy nabíjecích stojanů. Nemají žádné specifické označení, pouze se na nich vyskytuje název projektu E-mobilita. Kromě nich ČEZ nabízí i řešení pro domácnosti v podobě wallboxů, avšak v tomto případě se jedná o výrobky jiných firem.[17]

První varianta je určena pro běžné a rychlé dobíjení (viz obrázek 9 vlevo). Její základní vlastnosti jsou v tabulce 3. Stojan je vybaven dvěma zásuvkami. Jednou z nich je Mennekes, tedy typ 2, druhá je klasická jednofázová zásuvka. V úvahu tak přichází nabíjecí výkon 22 kW nebo 3,7 kW. Obě zásuvky jsou chráněny kryty, které mohou být uzamčeny. Navíc je nabíjení z každé z nich měřeno vlastním elektroměrem. K identifikaci uživatelů slouží RFID karty a pro základní obsluhu je určen displej s tlačítky.[17][18]

Tabulka 3 - Vlastnosti nabíjecích stojanů E-mobilita pro běžné dobíjení [18]

Prostředí	vnitřní/vnější
Stupeň krytí	IP44
Rozměry	480 × 290 × 1500 mm
Hmotnost	nezjištěno
Maximální jmenovitý výkon	26 kW
RFID systém	ano
Připojení k síti	GSM/GPRS
Ochrana	jištění, proudový chránič



Obrázek 9 - Nabíjecí stanice ČEZ pro běžné nabíjení (vlevo) a ultrarychlé nabíjení (vpravo) [17]

Druhý typ nabíjecího stojanu, který je na obrázku 9 vpravo, je určen pro ultrarychlé dobíjení. Jedná se tedy o stanici pro nabíjení stejnosměrným proudem. K tomu je vybavena konektory CHAdeMO a CCS. Oba umožňují nabíjení výkonem až 50 kW. Doplněna je navíc standardním konektorem Mennekes (typ 2) pro nabíjení střídavým proudem s výkonem do 22 kW.[17]

Ensto Chago

Tato firma finského původu vyrábí nabíjecí stojany, které využívá například distributor elektrické energie PRE pod označením PREpoint. V nabídce jsou dvě varianty wallboxů. Jedna z nich je určena čistě pro použití v budovách a může být vybavena některým ze standardních konektorů pro nabíjení elektromobilů střídavým proudem. Druhý typ wallboxu může být umístěn i ve venkovním prostředí a je opět možné vybírat ze standardních konektorů, které jsou doplněny klasickou jednofázovou zásuvkou. Volitelné rozšíření nabízí zabudování čtečky RFID karet.[19][20][21]

V nabídce stojanových nabíjecích stanic se nacházejí tři základní typy, u kterých je následně možné vybírat podle konkrétních parametrů a nabízených rozhraní. První druh nese označení Chago Station (viz obrázek 10 vlevo). Jedná se o základní variantu nabízející dva konektory – jeden pro mód nabíjení 3 a druhý v podobě klasické jednofázové zásuvky.[19][22]

Druhý typ nabíjecího stojanu, který je na obrázku 10 uprostřed, je označován jako Chago Pro. Jedná se o vylepšenou a rozšířenou verzi předchozího stojanu, která má 4 nabíjecí konektory (dvě klasické zásuvky a dva standardní nabíjecí konektory). K dispozici jsou varianty s měřením odebíraného proudu přes proudové transformátory nebo také využívající certifikované MID (Measuring Instruments Directive) elektroměry. Autorizace uživatelů je možná pomocí RFID tagů nebo mobilními telefony.[23][24]

Třetí varianta, Chago Power (viz obrázek 10 vpravo), je určena ke stejnosměrnému nabíjení. K dispozici je varianta s konektorem CHAdeMO, CCS anebo oběma. Jakýkoliv konektor pro střídavé nabíjení na stojanu chybí, není vybaven ani klasickou zásuvkou. Základní vlastnosti všech tří variant jsou uvedeny v tabulce 4.[25]

Tabulka 4 - Vlastnosti nabíjecích stojanů Chago [22][24][25]

Typ stojanu	Chago Station	Chago Pro	Chago Power
Provozní teplota	-30 °C až 50 °C	-30 °C až 50 °C	-30 °C až 50 °C
Stupeň krytí	IP44	IP54	IP55
Rozměr	306 × 183 × 1388 mm	576 × 176 × 1375 mm	600 × 900 × 1700 mm
Hmotnost	30 kg	30 kg	645 kg



Obrázek 10 - Nabíjecí stojan Chago Station (vlevo), Chago Pro (uprostřed) a Chago Power (vpravo) [22][24][25]

Schneider EVlink

Firma Schneider, která se zabývá automatizací a širokým polem elektronických výrobků, nabízí tři druhy nabíjecích stanic, které nesou společné označení EVlink. Jednou z nich je opět wallbox, který je určený pro použití ve vnitřních prostorech. K dispozici jsou varianty se zásuvkou nebo integrovaným kabelem s konektorem typu 1 i typu 2 (Mennekes). Výkony jsou odstupňovány podle proudu a počtu fází mezi 3,7 kW až 22 kW.[26]

Nabíjecí stojan s označením EV Parkoviště (viz obrázek 11 vlevo) je určen pro nabíjecí režim 3. Kontrola uživatelů může být provedena pomocí RFID tagů. K dispozici je jeden nebo dva konektory Mennekes typ 2. Stojan může být používán v jednofázových i třífázových sítích a dle toho umožňuje nabíjet výkonem 7 kW nebo 22 kW.[26]



Obrázek 11 - Nabíjecí stanice EVlink Parkoviště (vlevo) a EVlink Rychlonabíjecí stanice (vpravo) [26][27]

Posledním typem je stojan pro stejnosměrné nabíjení, který je označován jako EVlink Rychlonabíjecí stanice (viz obrázek 11 vpravo). K tomuto účelu se používá rozhraní CHAdeMO s nabíjecím proudem až 120 A. Volitelně může stanice obsahovat také variantu pro střídavé nabíjení pomocí integrovaného kabelu s konektorem Mennekes typ 2. Jako v předchozích případech slouží k autorizaci RFID karty. Zobrazování informací a zadávání základních parametrů nabíjení probíhá pomocí dotykového displeje. Předchozí varianty stanic EVlink obsahují pouze signalizační kontrolky a tlačítka. Při instalaci této stanice musí být nejprve posouzeno, zda je síť v daném místě schopna dodávat potřebnou energii. Soupis základních vlastností nabíjecích stojanů je uveden v tabulce 5.[26]

Tabulka 5 - Vlastnosti nabíjecích stojanů EVlink [26]

Typ stojanu	EVlink Parkoviště	EVlink Rychlonabíjecí stanice
Provozní teplota	-25 °C až 50 °C	-30 °C až 50 °C
Stupeň krytí	IP54	IP54
Rozměr	330 × 200 × 1425 mm	1070 × 662 × 2080 mm
Hmotnost	43,5 kg	700 kg
Maximální výstupní výkon	7 kW (1 fáze), 22 kW (3 fáze)	60 kW (DC), 43 kW (AC)
Maximální výstupní proud	32 A	120 A (DC), 63 A (AC)

3.3 Konektory pro nabíjení elektromobilů

V předchozích částech byly zmiňovány různé druhy konektorů, které mohou být použity k nabíjení elektromobilu. Liší se svými parametry i možnostmi. Následující část bude věnována právě jim, aby proběhlo upřesnění v označování, parametrech i zaměření různých variant. Definicí jednotlivých konektorů se zabývá norma IEC 62196.

3.3.1 Střídavé nabíjení

Během nabíjení ze střídavé sítě se využívá palubní nabíječ. Napětí bývá stejné, tedy 230 V fázové napětí (v evropských zemích). Liší se může počet použitých fází a maximální proud, který může každou fází protékat.

Klasická zásuvka

Jedná se o úplně základní možnost, z čeho elektromobil nabíjet. Spadá do režimu nabíjení 1 a 2. V České republice se používá varianta zachycená na obrázku 12. Jde o jednofázové provedení s omezením proudu 16 A, což ve výsledku dává nabíjecí výkon 3,7 kW. Omezení spočívá v potřebě adekvátního jištění přívodů a nutnosti kvalitní elektroinstalace. K problémům může dojít z důvodu nadměrného zatížení po dlouhou dobu, což vede k zahřívání zásuvky.[8][9]



Obrázek 12 - Jednofázová zásuvka na 230 V, 16 A [9]

Z pohledu bezpečnosti je vhodnější třífázová zásuvka, která bývá obvykle zapojena na samostatném okruhu elektroinstalace a je dimenzována na větší zatížení. Obsahuje pět kontaktů, přičemž tři jsou určeny pro fáze, jeden pro nulový vodič a poslední pro ochranný. Vyskytuje se ve dvojím provedení. Menší varianta je 16A, tedy každou fází může protékat tento proud. Ve výsledku je možné nabíjet výkonem 11 kW. Záleží však na variantě palubního nabíječe. Jestliže je pouze jednofázový, probíhá nabíjení stejně rychle jako u předchozí zásuvky.[9]



Obrázek 13 - Třífázová zásuvka na 400 V, 32 A [28]

Větší varianta (viz obrázek 13) umožňuje průtok proudu o velikosti 32 A každou fází. Výsledný výkon je dvojnásobný, tedy 22 kW. Zrychlení nabíjení můžeme očekávat v případě třífázového palubního nabíječe i v případě, že je nabíječ uzpůsoben na výkon vyšší než 3,7 kW.[9]

SAE J1772

Tento konektor je také označován jako typ 1. Jeho podoba je znázorněna na obrázku 14. Vyvinula jej organizace SAE a používá se v Americe. Je definován v normě IEC 62196 a je určen pro nabíjení v režimu 3. To znamená, že kromě silových vodičů obsahuje také kontakty pro zajištění komunikace. Konektor je uzpůsoben pouze pro využití jedné fáze, nicméně podporuje napěťové úrovně 120 V i 240 V.[29]



Obrázek 14 - Konektor J1772 [30]

Jak je z obrázku 14 patrné, jedná se o kulatý konektor se zámkem, který určuje správnou orientaci. Pro nabíjení jsou určeny dva silnější kontakty. Ke komunikaci slouží kontakty označované jako CP (Communication Pilot), PP (Proximity Pilot nebo také Plug Present) a jeden pro zem. Díky tomu je možné určovat velikost nabíjecího proudu, detekovat propojení mezi vozidlem a nabíjecí stanicí nebo také odhalit různé chyby.[29]

Pro tento konektor jsou uváděny dvě varianty střídavého nabíjení. Jejich parametry zachycuje tabulka 6.

Tabulka 6 - Parametry variant nabíjení [29]

Varianta	Napětí (V)	Proud (A)	Výkon (kW)
AC 1	120	16	1,92
AC 2	240	80	19,2

Mennekes

Správné označení tohoto konektoru je typ 2, nicméně běžně se používá název Mennekes podle firmy, která tento konektor vyrábí. V Evropě se jedná o zavedený standard pro nabíjení v režimu 3. Stejně jako konektor J1772 umožňuje komunikaci mezi vozidlem a nabíjecí stanicí. Rozdílem je však skutečnost, že podporuje třífázové nabíjení.[31][32]



Obrázek 15 - Konektor Mennekes [33]

Správná orientace zapojení je u tohoto konektoru zajištěna zploštělou vrchní částí, není tedy celý kulatý. Jak ukazuje obrázek 15, obsahuje celkem 7 kontaktů. Tři z nich jsou určeny pro jednotlivé fáze, další dva pro nulový vodič a vodič ochranný. Poslední dva zajišťují komunikaci. Jedná se opět o kontakty CP a PP.[31][32]

Běžná varianta používaná pro střídavé nabíjení dovoluje nabíjet proudem až 63 A, což při započtení tří fází dává nabíjecí výkon až 43,5 kW. Nutné ale je, aby na takovýto výkon byl dimenzován také palubní nabíječ.[31][32]



Obrázek 16 - Zapojení kontaktů u varianty AC (vlevo), DC pomalé (uprostřed) a DC střední (vpravo) [31]

Tento konektor umožňuje také použití pro stejnosměrné nabíjení, nicméně není k tomuto účelu preferován. V pomalém režimu umožňuje nabíjet proudem až 80 A při maximálním napětí 500 V,

u středního je proud zvýšen na hranici 140 A. Zapojení kontaktů v těchto variantách je na obrázku 16. Varianta rychlého stejnosměrného nabíjení využívá přidané kontakty. Jedná se již o konektor CCS. Klasickou podobu konektoru používá rovněž firma Tesla Motors pro stejnosměrné nabíjení na svých rychlonabíjecích stanicích v Evropě, nicméně pro tyto účely byl konektor mechanicky předělán, aby zvládal nabíjet výkonem až 135 kW.[9][31][32]

3.3.2 Stejnoseměrné nabíjení

Základem pro tuto variantu je umístění výkonného nabíječe mimo vozidlo. V něm by zabíral mnoho místa a rovněž výrazně zvyšoval hmotnost vozu. Nutností pro toto nabíjení je elektrická síť, která zvládne dodávat požadovaný výkon.

CHAdEMO

Tento konektor, nebo možná přesněji celý standard pro nabíjení, pochází z Japonska. Jedná se o poměrně dost rozšířený způsob stejnosměrného nabíjení. Vyznačuje se velkou rychlostí. Vznik označení CHAdEMO není úplně jasný, nicméně několik existujících variant se shoduje v tom, že význam názvu poukazuje právě na rychlost nabíjení.[34]



Obrázek 17 - Konektor CHAdEMO [35]

Konektor je opět kulatý, s průměrem 70 mm, a je vybaven výstupky pro zajištění správné orientace (viz obrázek 17). Dominantními prvky jsou velké silové kontakty pro přenos stejnosměrného proudu. Dále se na něm nacházejí komunikační linky. Základ tvoří rozhraní pro CAN (Controller Area Network), který se přenáší diferencially. Jedná se o velmi odolnou sběrnici a výrobce rovněž dodává, že tento způsob komunikace se obvykle používá i uvnitř elektromobilu pro přenos informací mezi bateriemi a nabíječem. Mezi ně se řadí stav napětí na jednotlivých člancích, jejich teplota a maximální hodnoty napětí a proudu, kterými se může vozidlo nabíjet. Co se těchto hodnot týče, může být napětí v rozsahu 300 V až 600 V a proudy ve stovkách ampér. Časté nastavení bývá 500 V a 125 A, což znamená nabíjecí výkon 62,5 kW.[9][36][37]

Při takto vysokých hodnotách je podstatná bezpečnost celého procesu. Proto je u tohoto rozhraní zajištěno, že nabíjení nezačne dřív, než jsou všechny konektory připojeny a uzamčeny. Tím je zabráněno jejich rozpojení během nabíjení. K bezpečnosti přispívá také dalších pět komunikačních linek, které slouží pro redundantní přenos informace o zahájení nabíjení nebo připojení nabíjecího kabelu.[36]

CCS

Toto rozhraní v sobě kombinuje možnost rychlého stejnosměrného nabíjení spolu s klasickým střídavým nabíjením. Z tohoto důvodu se často označuje jako Combo. Tento standard vznikl na základě domluvy výrobců elektromobilů v Evropě i Americe. Aby bylo možné rozumně vyřešit stejnosměrné i střídavé nabíjení a zajistit kompatibilitu s existující infrastrukturou střídavých nabíjecích stanic v Americe i Evropě, vznikly dvě varianty konektoru.[38]



Obrázek 18 - Dvě varianty konektoru Combo, americká (vlevo) a evropská (vpravo) [9]

Ve své podstatě se jedná o rozšíření stávajících konektorů s označením typ 1 a typ 2 o dva kontakty pro přenos velkého stejnosměrného proudu (viz obrázek 18). Komunikace je stejná jako v předchozích případech, jelikož umožňuje volbu hodnot, které odpovídají stejnosměrnému nabíjení. Běžně bývají k dispozici stanice s výkonem 50 kW, nicméně standard jako takový specifikuje maximální hodnoty pro jednotlivé varianty dle tabulky 7.

Tabulka 7 - Maximální parametry standardu CCS [37]

Varianta	Napětí (V)	Proud (A)	Výkon (kW)
americká	600	200	120
evropská	850	200	170

Tesla

V případě výrobce Tesla Motors a jeho vozidel je situace trochu komplikovanější. V Americe zavedla firma pro stejnosměrné rychlonabíjení svůj vlastní konektor, který je na obrázku 19. Označuje se jednoduše názvem Supercharger.



Obrázek 19 - Konektor pro stejnosměrné nabíjení od firmy Tesla Motors [39]

Původně byl tento konektor určen k nabíjení výkonem 90 kW, ale později došlo k navýšení na 120 kW. Nicméně v Evropě jsou vozy Tesla vybaveny jiným konektorem – upravenou variantou Mennekes, která je určena ke stejnosměrnému nabíjení a dokáže přenášet výkon až 135 kW.[9][37]

4 Nabídka elektroměrů

Na trhu se nachází široká řada rozdílných elektroměrů, které mají mnoho různých funkcí a vlastností. Ať už se budeme zajímat o průmyslová řešení nebo výrobky pro domácnost, najdeme několik společných rysů. Tím prvním je u drtivé většiny z nich možnost poskytovat informaci o odebírané energii v podobě pulzů. Každý pulz odpovídá stanovenému kvantu odebrané (změřené) elektrické energie. Měřená informace je tedy diskretizována a probíhá převod z množství energie na frekvenci. U kvalitnějších elektroměrů je možné tento výstup nastavit podle aktuálních požadavků – volitelné bývá kvantum energie i délka pulzu. Základní zařízení mívají tyto parametry pevně stanoveny z výroby. U domácích elektroměrů se můžeme setkat se signalizací v podobě LED (Light Emitting Diode), která podle těchto pulzů bliká. Obvykle je signalizace doplněna o displej, který zobrazuje množství odebrané energie, případně další údaje. Průmyslové elektroměry jej mohou mít také, nicméně podstatnější je použití komunikačních rozhraní, přes která je možné informace vyčítat a tudíž zapojit elektroměr do automatizačního procesu.[40]

Oficiálně se pulzní výstup označuje jako S0 rozhraní, které je definované normou DIN 43864. Můžeme se s ním setkat nejen u elektroměrů, ale i u dalších zařízení, např. vodoměrů nebo plynoměrů. Kvantum elektrické energie je dáno konstantou, která se uvádí v počtu impulzů odpovídajícím jedné kWh energie. Tento výstup může být řešen pomocí reléového kontaktu nebo polovodičovými spínacími prvky. Druhý z těchto způsobů je dnes používanější a je potřeba u něj dodržovat při připojování správnou polaritu.[41]

Zařízení obsahující S0 rozhraní je možné spojit s dalšími prvky, které jsou určeny pro čítání impulzů. Mezi ně můžeme zařadit například moduly SDS-MICRO nebo SDS-MACRO (liší se počtem vstupů). Naměřené údaje jsou poskytovány přes rozhraní Ethernet v podobě webové stránky. Přes ni je možné také určit, zda je k modulu připojen elektroměr nebo jiné zařízení a nastavit správné převodní konstanty. Data jsou dostupná také v podobě XML (eXtensible Markup Language) souboru a mohou být zobrazena na libovolném zařízení.[41]

Dalším rozšířeným rozhraním, především u elektroměrů určených do domácnosti, je optická komunikace. Elektroměr je vybaven IR (Infra Red) vysílací LED a fototranzistorem citlivým na danou vlnovou délku záření. Odečet přes toto rozhraní je dán normou ČSN EN 62056-21. Přenos dat probíhá sériově asynchronně s maximální rychlostí 19200 baudů. Komunikace bývá iniciována odečtovým zařízením, kterému elektroměr odpovídá. Na trhu jsou dostupné převodníky pro připojení k počítači, které umožňují komunikovat s elektroměrem. V závislosti na jeho typu je možné zjišťovat informace o spotřebované energii, aktuálních hodnotách napětí, proudů nebo také účinníku či frekvenci. S těmito parametry se však setkáme až u dražších výrobků.[42]

Jedním z používaných komunikačních rozhraní pro připojení pomocí vodičů je M-bus. Fyzická vrstva je poměrně specifická a využívá různých napěťových úrovní. Maximální rychlost se odvíjí od délky linky, ta nejvyšší udávaná je 9600 baudů na přibližně 350 metrech. Přenos dat probíhá stejně jako u IR komunikace asynchronně sériově.[43]

Za poněkud známější protokol můžeme považovat ModBus. Obvykle se pro realizaci fyzické vrstvy používá rozhraní RS485, které využívá pro přenos dat diferenční pár vodičů. Jelikož je ModBus protokol používaný běžně v průmyslové automatizaci, mohou být elektroměry jím vybavené snadno zapojeny do celého procesu. Množství informací dostupných přes toto rozhraní je specifické u každého elektroměru a záleží vždy na konkrétním výrobcu.[44]

Převážná většina dostupných elektroměrů nebývá vybavena rozhraním Ethernet, pouze pár výrobků tvoří výjimku. Ty ale spadají mezi ty nejdražší varianty, které bývají vybaveny i velkými displeji a zobrazují řadu údajů (viz obrázek 20). Hodí se především do speciálních automatizačních úloh, kde mají zároveň sloužit k zobrazování velkého množství měřených parametrů. Jestliže potřebujeme do Ethernetové sítě připojit jednodušší elektroměr, je k dispozici několik řešení. Pokud je vybaven rozhraním M-bus, existují na trhu převodníky na Ethernet. Komunikace následně probíhá protokolem, který je zaveden výrobcem. U ModBusu stačí využít zařízení pro změnu fyzické vrstvy, jelikož v jedné ze svých variant tento protokol Ethernet používá.[45]



Obrázek 20 - Elektroměr WM40 96 od firmy Enika s rozhraním Ethernet [45]

V posledních letech se mluví o takzvaných smart gridech. Výchozí myšlenkou takového rozvodu elektrické energie je komunikace mezi výrobcem a dodavatelem, na základě které se má v reálném čase upravovat množství vyráběné elektrické energie a také řídit její odběr. Za předchůdce v České republice můžeme považovat HDO (Hromadné Dálkové Ovládání), které umožňuje v určitých částech dne, kdy je elektrické energie v síti přebytek, spouštět některé spotřebiče, nejčastěji zařízení na ohřev vody a vytápění. Smart gridy by měly tuto myšlenku posouvat ještě dál. K jejich realizaci je ovšem potřeba speciálních elektroměrů, které bývají označovány rovněž slovem smart. Umožňují bezdrátově odesílat informace o aktuálním odběru distributorovi. Tyto přenosy bývají v testovacím provozu realizovány každých 15 minut. Uživatel má možnost všechny údaje sledovat prostřednictvím mobilního telefonu, tabletu, počítače nebo v některých případech dokonce televize. Záleží pouze na tom, zda je elektroměr připojen do domácí sítě a která další zařízení k ní mají přístup. Kromě možnosti reagovat na aktuální odběr energie a upravovat podle něj její výrobu je za výhodu smart elektroměrů považováno to, že umožňují odběratelům platit v každém období pouze za přesně odebrané množství energie, nikoliv za paušálně stanovené kvantum. Zároveň by smart gridy měly obsahovat také možnost řízení spouštění určitých zařízení podobně jako HDO. Celý systém rovněž může spolupracovat s elektromobily, na které je možné nahlížet jako na mobilní úložiště energie. V případě nutnosti by mohla být tato energie poskytována do sítě a v době, kdy by bylo v síti energie dostatek, by docházelo k nabíjení vozu. Jeho baterie by rovněž mohly sloužit k pokrytí krátkodobých odběrů v rámci domácnosti, a tudíž by nedocházelo k rychlým změnám v odběru z distribuční sítě. Na druhou stranu se ale řeší otázka bezpečnosti přenosu dat, možnost napadení smart elektroměrů a omezení svobody lidí kvůli přesnému monitorování, kdy podle aktuální spotřeby lze zjistit, jaké zařízení je v provozu a tedy co daný člověk dělá.[40][46][47]

V rámci této diplomové práce je požadována integrace elektroměru do nabíjecího stojanu, byť nejprve pouze v podobě prototypu, který nemusí splňovat všechny podmínky pro nasazení v provozu. Nicméně se to později předpokládá a vyplývají z toho určité požadavky a omezení. Pomineme-li schopnost zařízení měřit parametry elektrické sítě a množství odebírané energie, s čímž se explicitně počítá, je tím nejdůležitějším schopnost elektroměru tyto informace předávat dalším zařízením přes některé vybrané rozhraní. Není potřeba, aby byly všechny údaje zobrazovány na displeji, elektroměr bude většinu času uzavřen v nabíjecím stojanu. Vhodné rozhraní pro tyto účely je například Ethernet. Je jím vybavena řada dalších zařízení a umožňuje vytvářet i složité sítě, spojovat velké množství prvků a zajistit požadovaný přenos dat. V rámci nabíjecího stojanu se pro komunikaci využívá zavedená podoba datového rámce, který se přenáší přes rozhraní RS485, nicméně je možné jej snadno nasadit i do komunikačního protokolu TCP (Transmission Control Protocol) nebo UDP (User Datagram Protocol).

Mezi dostupnými variantami elektroměrů na trhu většina zařízení požadavkům nasazení v nabíjecím stojanu plně nevyhovovala. U levnějších variant je hlavním důvodem poskytování malého množství informací, obvykle pouze o množství odebírané energie realizovaného pulzním výstupem. K takovému elektroměru by navíc muselo být přidáno další zařízení pro zajištění poskytování získaných informací přes Ethernetovou síť. U komerčně dostupných modulů zase narážíme na nutnost přizpůsobovat komunikační protokol konkrétnímu zařízení, takže by způsob přenosu dat v nabíjecím stojanu nebyl jednotný. Stejný problém je také u dražších variant, které jsou schopny měřit rozličné veličiny. Většina z elektroměrů, které jsou vybaveny Ethernetovým rozhraním, má navíc i displej, který v nabíjecím stojanu není zapotřebí.

Na základě těchto skutečností bylo zvoleno realizovat v diplomové práci celý elektroměr, u kterého bude možné přesně přizpůsobit způsob komunikace. Výhodou tohoto zařízení nebude pouze přizpůsobení na míru potřebám nabíjecího stojanu a zajištění jednotné podoby zpráv přenášených mezi různými prvky, ale také možnost s minimem zásahů a úprav do firmwaru zařízení upravit jeho funkce tak, aby mohl být použit i v rámci dalších projektů pro různé účely, například v síti inteligentního domu. V něm by nemusel vystupovat pouze v roli smart elektroměru, ale namísto zasílání informací distributorovi by je mohl předávat centrální řídicí jednotce nebo prvkům distribuované sítě, které by tyto údaje požadovaly.

5 Zvolené řešení

Na základě požadavků, které vyplývají z dříve uvedených věcí, byla navržena prvotní podoba celého elektroměru. Budeme-li na něj nahlížet jako na jednotný celek, mělo by se jednat o modul, který bude moci být umístěn do nabíjecího stojanu, tedy bude moci být připevněn na DIN lištu. V otázce funkčnosti je podstatné měření odběru elektrické energie i různých parametrů třífázové sítě a zajištění poskytování těchto údajů v příslušných jednotkách přes zvolené rozhraní Ethernet.

U elektronických elektroměrů probíhá nejprve měření napětí a proudů v každé fázi pomocí příslušných čidel. Tyto údaje jsou dále převáděny do digitální podoby AD (Analogově Digitální) převodníky. Následně proběhne vynásobení proudu a napětí pro jednu fázi, přičemž tyto údaje musejí být měřeny ve stejném čase. Výsledná hodnota odpovídá aktuálnímu výkonu odebíranému z dané fáze. Jeho integrací v čase (resp. sumací) se získává požadovaný údaj o spotřebě elektrické energie. Celý tento proces lze řešit pomocí mikrokontroléru, který může obsahovat více AD převodníků umožňujících současné provádění měření. Nicméně tento postup by byl poměrně náročný, přidáme-li nutnost realizovat na mikrokontroléru další funkce. V dnešní době se na trhu vyskytuje řada specializovaných obvodů určených právě pro realizaci elektroměrů. Jejich struktura je tomuto účelu přesně přizpůsobena, a proto je jejich využití daleko vhodnější. Komunikace s řídicím mikrokontrolérem probíhá obvykle přes některé základní komunikační rozhraní, například SPI (Serial Peripheral Interface) nebo I²C (Inter Integrated Circuit).

S použitím samotného integrovaného obvodu pro realizaci měření a druhého mikrokontroléru pro zajištění všech ostatních požadovaných funkcí se celá problematika návrhu rozděluje na dva z velké části samostatné a oddělitelné bloky. Tím prvním je tedy návrh elektroměru jako takového. Druhý zahrnuje komunikaci s ním, správu různých parametrů a poskytování údajů dalším zařízením přes rozhraní Ethernet. Mikrokontrolér by měl rovněž být schopen komunikovat s vozem a určovat tak velikost nabíjecího proudu a získávat informaci o průběhu samotného nabíjení. Díky tomu bude možné nabíjecí stojan posunout z technického hlediska dále a realizovat nabíjení v režimu 3.

5.1 Měřicí obvod

Mnoho výrobců v dnešní době nabízí svá řešení a obvody pro realizaci elektroměrů. Obvykle v jejich nabídce najdeme celou sérii měřicích čipů, které se liší počtem měřených fází nebo množstvím snímaných údajů.

Výrobce STMicroelectronics nabízí většinu svých měřicích obvodů v provedení, kdy čip obsahuje AD převodníky i DSP (Digital Signal Processor) pro zpracování snímaných signálů. Informace jsou poskytovány přes rozhraní SPI nebo UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter). Jednotlivé varianty jsou schopny měřit buď dva signály, tedy proud a napětí jedné fáze, tři signály, kdy je snímán navíc proud v nulovém vodiči, anebo čtveřici signálů, tedy napětí a proud ve dvou fázích. Kombinací těchto obvodů lze zajistit měření různých sítí, od jednofázové po třífázovou.

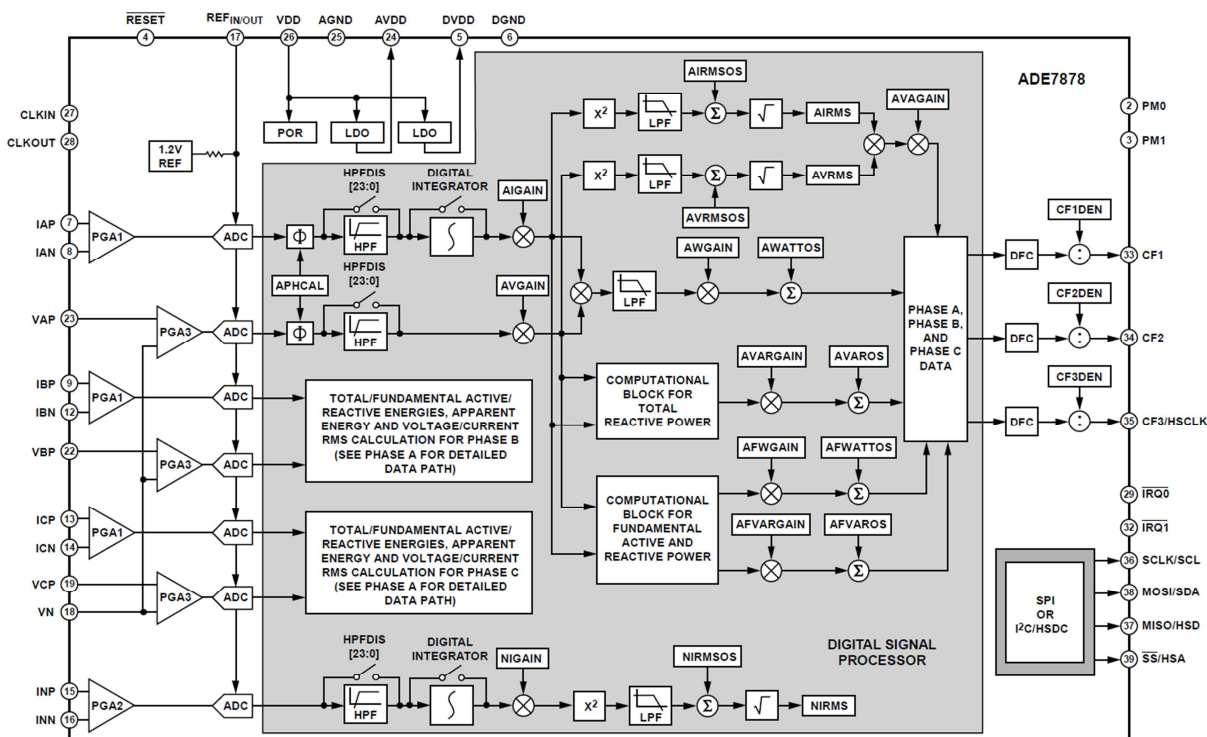
Obvody od firmy Maxim Integrated jsou navrženy buď k měření na jedné fázi, nebo k měření na třech fázích včetně snímání proudu procházejícího nulovým vodičem. Prakticky všechny nabízené čipy v sobě obsahují také programovatelnou procesorovou jednotku od tohoto výrobce, nicméně ve většině případů pouze 8bitovou. Některé varianty obsahují pouze jeden AD převodník a měření jednotlivých vstupů je multiplexováno.

Asi nejširší nabídku obvodů pro realizaci elektroměrů můžeme najít u výrobce Analog Devices. Základem každého obvodu jsou AD převodníky doplněné o DSP s pevně nastavenou

funkčností. Na výstupu tak mohou poskytovat různé parametry. V nabídce jsou obvody pro měření v jednofázové síti i pro třífázové zapojení využívající tři nebo čtyř vodičů. V některých čípech je zahrnuto oddělení měřicí části od digitálního rozhraní, jiné nabízejí i pravidelný záznam velkého množství vzorků signálů pro následné sestavení průběhů měřených veličin.

5.1.1 Integrovaný obvod ADE7878

Z velké nabídky různých řešení byl nakonec vybrán obvod od firmy Analog Devices s označením ADE7878. Jedná se o čip určený k měření v třífázové síti, která může být realizována třemi nebo čtyřmi vodiči. Probíhá tedy měření napětí a proudu v každé fázi a proudu protékajícího nulovým vodičem. Ze série obvodů ADE78xx se jedná o nejpokročilejší čip. Pro každý měřený vstup je vybaven samostatným sigma-delta AD převodníkem doplněným o PGA (Programmable Gain Amplifier). Vzorkovací frekvence je 1,024 MHz. Obvod tedy pro zvýšení přesnosti používá kromě jiného také výrazného převzorkování signálů. Pro přenos informací slouží komunikační rozhraní SPI nebo I²C, které může být doplněno o vysokorychlostní HSDC (High Speed Data Capture) port určený pro přenos vzorků k sestavení průběhů jednotlivých signálů. Kromě toho je poskytována možnost generovat pulzní signál na třech samostatných výstupech. Uživatel může zvolit konstantu určující počet pulzů odpovídajících 1 kWh energie a také to, jaký druh energie se má na daný výstup započítávat. Při nutnosti realizovat složitější funkcionalitu je možné využít dva výstupy indikující vznik zvoleného přerušení. U aplikací náročných na vlastní spotřebu energie jsou k dispozici tři speciální režimy se sníženou spotřebou. Obrázek 21 zobrazuje funkční blokový diagram celého obvodu. Podrobně znázorněna je pouze část pro realizaci všech funkcí na jedné fázi, jelikož prvky pro ostatní fáze jsou shodné.[48]



Obrázek 21 - Funkční blokový diagram obvodu ADE7878 [48]

Při práci nabízí obvod ADE7878 široké množství veličin, které buď přímo měří, nebo následně dopočítává. Nalezneme mezi nimi tyto hodnoty:

- efektivní hodnota napětí v každé fázi,
- efektivní hodnota proudu v každé fázi a nulovém vodiči,
- aktuální hodnota napětí v každé fázi,
- aktuální hodnota proudu v nulovém vodiči, v každé fázi a jejich součet,
- aktuální hodnota činného, jalového a zdánlivého výkonu pro každou fázi,
- akumulované množství činné, jalové a zdánlivé energie pro každou fázi,
- akumulované množství činné a jalové energie pro každou fázi pouze pro základní harmonickou,
- velikost proudové a napěťové špičky včetně určení fáze výskytu,
- frekvence sítě,
- fázový posun mezi napětím a proudem v každé fázi,
- fázový posun mezi fázemi.[48]

5.2 Řídicí mikrokontrolér

Při výběru řídicího členu bylo vybíráno ze sortimentu firmy STMicroelectronics. Primárním důvodem byly bohaté zkušenosti s programováním těchto mikrokontrolérů, široká nabídka různých rodin lišících se svými vlastnostmi a také velká podpora a množství různých příkladů plynoucí ze značného rozšíření mezi různými uživateli.

V úvahu přicházely 32bitové mikrokontroléry s procesorovým jádrem ARM (Advanced RISC Machine). Oproti 8bitovým variantám nejsou v kusovém množství natolik dražší a nabízejí daleko více funkcí a možností. Jsou mnohem bohatěji vybaveny periferiemi pro komunikaci i řadou čítačů a časovačů, které mohou pracovat ve více módech. Nabídka tohoto výrobce v dnešní době obsahuje v kategorii 32bitových mikrokontrolérů devět základních sérií. Tři z nich jsou určeny pro zařízení s nízkou spotřebou, ostatní jsou odstupňovány podle výkonu, případně také na základě určitého zaměření. Volba výkonného řídicího prvku by měla pokrýt také další požadavek – přímou podporu komunikace přes Ethernet, aby nemusely být k mikrokontroléru přidávány další složité obvody. Tímto byl výběr zúžen na čtyři produktové série. Jejich základní vlastnosti zachycuje tabulka 8.[49]

Tabulka 8 - Popis sérií mikrokontrolérů výrobce STMicroelectronics [49]

Série	Jádro ARM	Popis
F1	Cortex M3	základní řada bez speciálního zaměření pro použití v různorodých aplikacích
F2	Cortex M3	vylepšená varianta základní řady s rozšířenou pamětí a výkonem
F4	Cortex M4	výkonná série pro řadu aplikací, vybavená velkou pamětí flash i RAM, mnoha periferiemi i FPU a DSP
F7	Cortex M7	nejvýkonnější série pro velmi náročné aplikace, práci s velkým objemem dat nebo například s obrazem

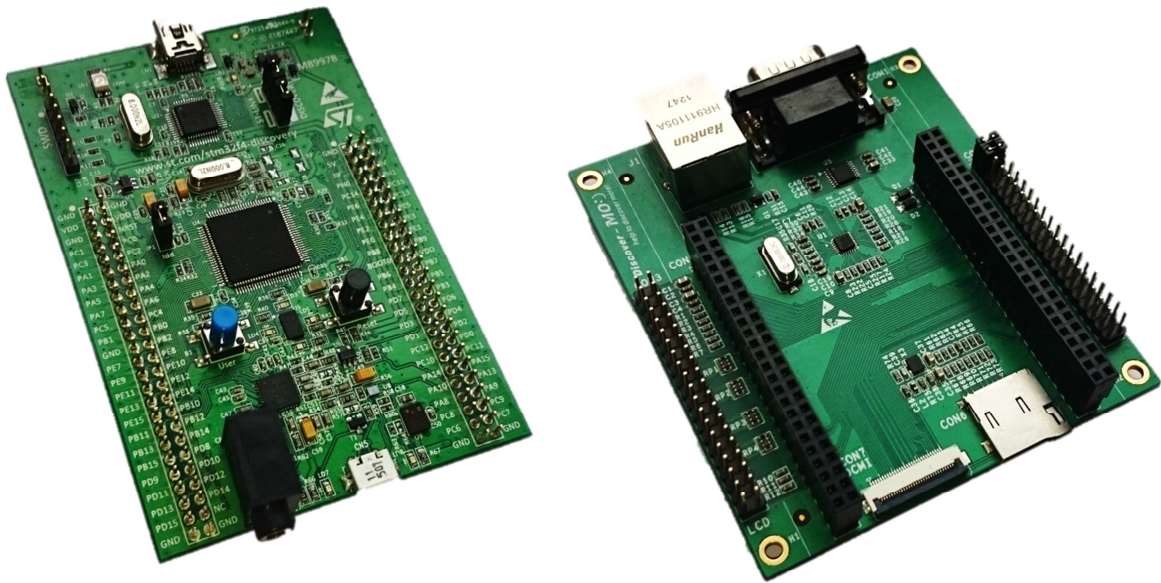
Na základě uvedené charakteristiky byla vyřazena série F7, která obsahuje pro požadovanou aplikaci zbytečně výkonné prvky. Také bylo upuštěno od volby mikrokontroléru ze série F2, jelikož se

jedná o mezistupeň mezi sériemi F1 a F4. V případě volby levnějšího a méně výkonného prvku by byl vhodnější výběr ze série F1, která by pro elektroměr měla dostačovat. Při výběru výkonnějšího řídicího členu je zase rozdíl v ceně mezi sérií F2 a F4 poměrně malý, zatímco rozdíl ve výbavě je markantnější. Ze zbývajících sérií byly vybrány produktové řady, které obsahovaly periférii pro komunikaci přes rozhraní Ethernet. V tabulce 9 je porovnání konkrétních parametrů.

Tabulka 9 - Porovnání dvou vybraných produktových řad [50][51]

Produktová řada	STM32F107	STM32F407
Počet pinů	64, 100	100, 144, 176
Paměť flash	128 kB, 256 kB	512 kB, 1024 kB
Paměť RAM	64 kB	192 kB
Maximální frekvence	72 MHz	168 MHz
Počet časovačů	7×16bit	12×16bit + 2×32bit
Počet AD vstupů	16	16, 24
Komunikační rozhraní	1×I ² C 3×SPI 2×I ² S 2×CAN 1×USB OTG FS 3×USART 2×UART 1×Ethernet	3×I ² C 3×SPI 2×I ² S 2×CAN 1×USB OTG FS + FS/HS 4×USART 2×UART 1×Ethernet 1×FSMC 1×SDIO

I když by mikrokontrolér z řady STM32F107 pro potřeby elektroměru stačil, byla nakonec zvolena řada STM32F407. Důvodů bylo několik. Prvním z nich je větší paměť, a to jak flash, tak rovněž RAM (Random Access Memory). Zároveň je mikrokontrolér ze série F4 výrazně výkonnější a zahrnuje jednotku pro práci s desetinnými čísly FPU (Floating Point Unit) i DSP. Díky těmto rozdílům by neměl být problém v budoucnu uplatnit elektroměr v různých dalších aplikacích, které mohou být v otázce nároků na mikrokontrolér daleko náročnější. Velkou výhodou je i skutečnost, že výrobce STMicroelectronics nabízí pro řadu F407 vývojové desky prakticky pouze za cenu samotného čipu a rovněž přídatný modul realizující potřebnou fyzickou vrstvu pro komunikaci přes rozhraní Ethernet (viz obrázek 22). Tyto prostředky jsou ideálním řešením pro první fázi vývoje, kdy probíhá testování jednotlivých částí a rozhraní a následně příprava vlastního hardware na míru konkrétním potřebám.[50][51]



Obrázek 22 - Vývojová deska STM32F4 Discovery a rozšiřující modul

5.3 Postup práce

Při volbě základních stavebních prvků elektroměru bylo uvedeno rozdělení celé problematiky na dva poměrně samostatné celky – měření na silovém vedení a komunikace s ostatními systémy. Průnik těchto dvou oblastí vzniká v softwaru mikrokontroléru a spočívá v předávání základních údajů a požadavků oběma směry. Třetím odděleným celkem je zajištění komunikace s vozidlem. Ve své základní podobě nevyžaduje tato problematika žádné další složité prvky, jejím základem bude část periférií řídicího mikrokontroléru a program, který je bude obsluhovat. Rozdělení návrhu zařízení na menší části v prvních fázích vývoje je výhodné, jelikož je možné se zaměřit vždy pouze na určitý problém.

V první fázi celé práce by měly být otestovány samostatně všechny uvedené celky. Jako výhodné se jeví použití různých vývojových desek a přípravků. Po zprovoznění jednotlivých úkolů a jejich vyzkoušení by mělo dojít k jejich vzájemnému propojení.

Cílem druhé fáze je tedy vytvoření prvního funkčního prototypu založeného na vývojových přípravcích, který bude mít za úkol být schopen prezentovat funkčnost zařízení a bude sloužit k ověření programu pro mikrokontrolér jakožto celku. Tyto první dvě fáze se běžně dohromady označují jako rapid prototyping. Hlavním cílem je s minimem nákladů a s využitím dostupných prvků vytvořit první ukázkou zařízení a simulovat jeho funkčnost.

Po jejím ověření je nutné ve třetím kroku vývoje navrhnout a vyrobit funkční zařízení elektroměru jako celek realizovaný na vlastním plošném spoji, který by již měl být uzpůsobený pro montáž do krabičky a následné umístění do testovacího nabíjecího stojanu.

V posledním kroku by na vzniklém zařízení měla být otestována jeho celková funkčnost se zaměřením na tři základní úkoly – funkčnost elektroměru, komunikace s jiným zařízením a komunikace s vozidlem.

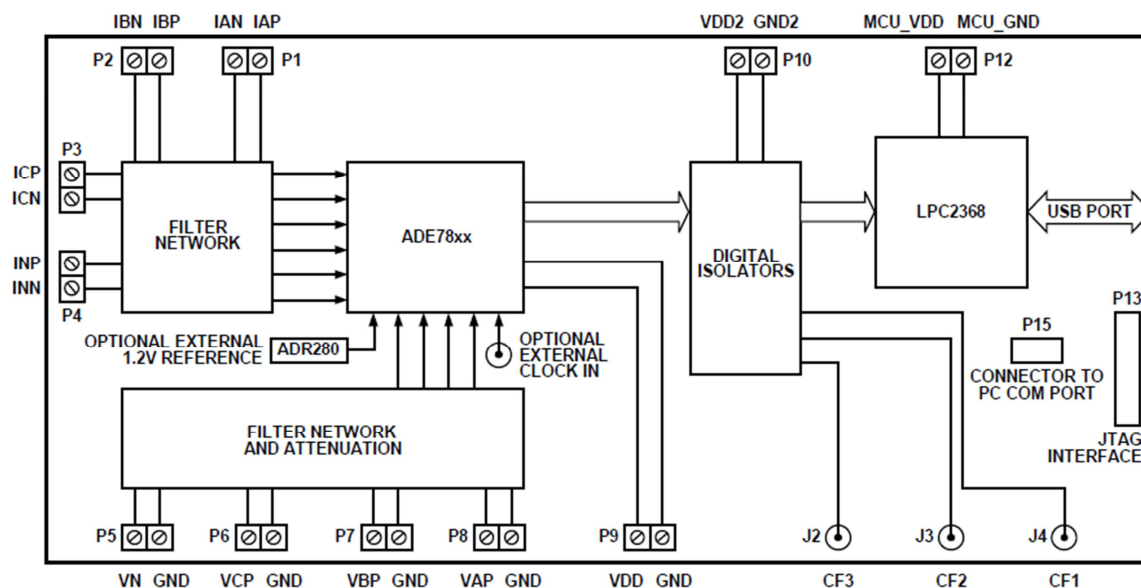
6 Prototypové testy základních úkolů

Nejprve je zapotřebí zaměřit se na každý ze tří uvedených úkolů samostatně a odděleně. Tím dojde k zamezení prolínání se jednotlivých problémů dohromady. Také bude snazší nejen odhalovat problémy v konkrétních místech programu nebo hardwaru, ale především vůbec zprovoznit potřebné funkce a odhalit jejich různá omezení a specifikovat různé postupy.

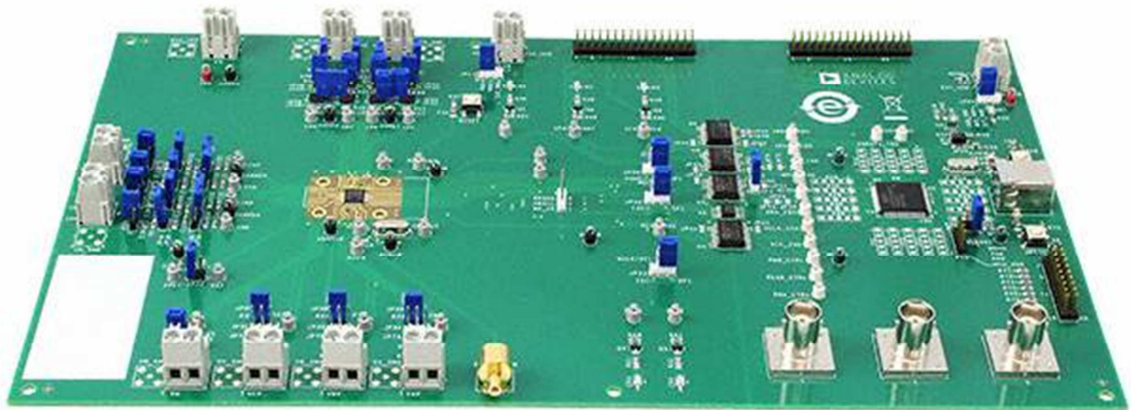
6.1 Elektroměr

Výběr obvodu ADE7878 jakožto základu pro elektroměr přinesl ještě jednu velkou výhodu v podobě dostupné vývojové desky osazené tímto čipem. Díky tomu je možné seznámit se s funkcí měřicího obvodu a otestovat ho, aniž by bylo zapotřebí vyvíjet a vyrábět vlastní přípravek.

Vývojová deska je uzpůsobena pro měření na třífázové síti. Její diagram zapojení je na obrázku 23 a reálná podoba na obrázku 24. Kromě obvodu ADE7878 je vybavena také samostatným mikrokontrolérem pro zajištění vzájemné komunikace a práci se získanými daty. Jedná se o 32bitový čip s jádrem ARM Cortex M3 od výrobce NXP s označením LPC2368. Pro přenos mezi těmito dvěma prvky je možné využít sběrnice SPI i I²C, je pouze zapotřebí správně změnit nastavení na desce pomocí zkratovacích propojek. V obou případech je komunikace oddělená přes digitální izolátory a každá část vyžaduje samostatné nezávislé napájení s napětíovou úrovní 3,3 V.[52]



Obrázek 23 - Diagram zapojení vývojové desky [52]

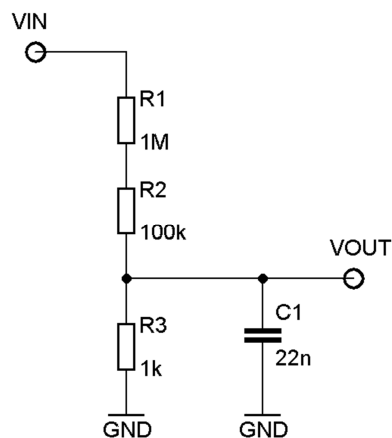


Obrázek 24 - Vývojová deska pro realizaci elektroměru [53]

K propojení s dalším zařízením slouží USB (Universal Serial Bus) konektor typu B, pomocí kterého je realizována virtuální sériová linka. Na straně obvodu i mikrokontroléru jsou všechny potřebné datové linky vyvedeny na pinové lišty a je možné k nim připojit vlastní zařízení. Přípravek tedy umožňuje jednoduše odpojit zabudovaný mikrokontrolér a využít vlastní externí zařízení, které může být připojeno přímo k elektroměru nebo lépe na oddělené bezpečné straně. Užitečná je také přítomnost indikačních LED na straně elektroměru, které jsou napojeny na výstupy CF1, CF2 a CF3, jež slouží pro generování pulzů odpovídajícím určitému množství určitého druhu energie, a také na výstupy IRQ0 a IRQ1, kterým může být přiřazena indikace různých přerušení.[52]

6.1.1 Napěťové senzory

Snímání napětí jednotlivých fází je řešeno jednoduše pomocí odporových děličů. Kvůli poměrně velkým hodnotám připojeného fázového napětí je dělič složen ze tří rezistorů. První dva tvoří horní část děliče, na kterou připadá téměř celá část děleného napětí. Z tohoto důvodu jsou také použity součástky v drátovém provedení, které mají vyšší přípustné napětí než SMD (surface mount device) varianty. Dolní část děliče je tvořena jedním rezistorem v provedení pro povrchovou montáž. Maximální úbytek na tomto rezistoru může být 0,5 V v obou polaritách. Jedná se o omezení dané AD převodníkem v obvodu ADE7878.[48]



Obrázek 25 - Schéma zapojení děliče fázového napětí

Aby se zabránilo aliasingu, je dělič doplněný o kondenzátor, se kterým tvoří filtr typu dolní propust s frekvencí zlomu určenou vztahem (6.1).

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^{-9}} = 7234,316 \text{ Hz} \quad (6.1)$$

Je vhodné dodat, že v aktuálním uspořádání s hodnotami rezistorů podle schématu na obrázku 25 budou při špičkovém napětí základní harmonické 325 V (což odpovídá efektivní hodnotě 230 V) na rezistorech úbytky napětí podle tabulky 10.

Tabulka 10 - Úbytky napětí na měřicím děliči

Rezistor	Hodnota (kΩ)	Úbytek napětí (V)
R ₁	1000	295,2
R ₂	100	29,5
R ₃	1	0,3

Toto zapojení je realizováno pro každou fázi. Nulový vodič je spojen se zemí obvodu ADE7878.

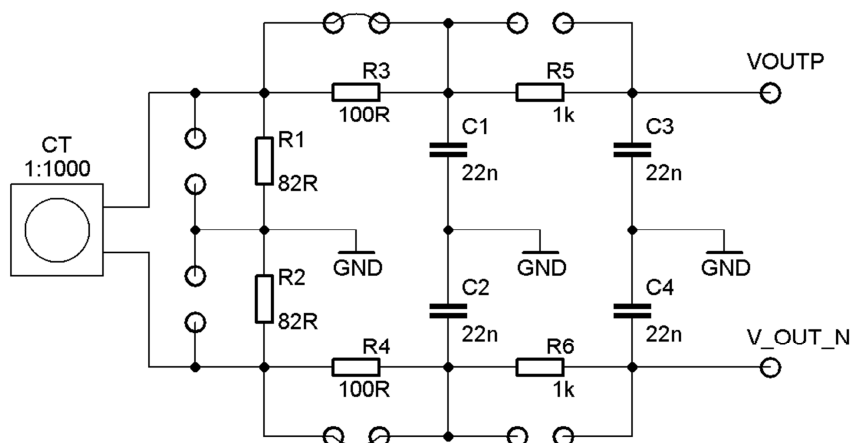
6.1.2 Proudové senzory

Chceme-li měřit velikost proudu protékajícího jednotlivými fázemi, musíme zajistit převod této veličiny na napěťovou hodnotu, která může být dále zpracována AD převodníkem. Je možné použít více druhů snímačů, které zajišťují potřebný převod. Přehled čtyř základních je zachycen v tabulce 11.

Tabulka 11 - Přehled výhod a nevýhod senzorů proudu [54]

Senzor	Výhody	Nevýhody
bočník s nízkým odporem	<ul style="list-style-type: none"> • nízká cena • linearita 	<ul style="list-style-type: none"> • omezené možnosti velkých proudů • stejnosměrná složka • parazitní indukčnost
proudový transformátor	<ul style="list-style-type: none"> • dobré vlastnosti při vysokých proudech • nízká spotřeba energie 	<ul style="list-style-type: none"> • hystereze/saturace kvůli stejnosměrné složce • posun fáze • citlivé na vnější magnetické pole
senzor využívající Hallův efekt	<ul style="list-style-type: none"> • dobré vlastnosti při vysokých proudech • velký dynamický rozsah 	<ul style="list-style-type: none"> • hystereze/saturace • vysoká cena • teplotní drift
Rogowského cívka	<ul style="list-style-type: none"> • nízká cena • bez saturačního limitu • nízká spotřeba energie • odolnost proti stejnosměrné složce • velký dynamický rozsah 	<ul style="list-style-type: none"> • výstup derivací napěťového signálu • vyžaduje zařazení integračního členu • citlivé na elektromagnetické rušení

Po zvážení parametrů jednotlivých senzorů byly pro první použití vybrány proudové transformátory. Hlavním důvodem byla jejich snadná dostupnost, možnost okamžitého použití a skutečnost, že není potřeba přímo do cesty proudu vkládat snímací element, jako je tomu u bočnicku. Navíc skutečnost, že může docházet k posunu fáze, je u obvodu ADE7878 řešitelná. Je možné provádět kompenzaci fázového posunu mezi napětím a proudem každé fáze v rozsahu $-6,732^\circ$ až $1,107^\circ$ s rozlišením $0,0176^\circ$ při frekvenci sítě 50 Hz.[48]



Obrázek 26 - Schéma zapojení obvodové sítě pro proudový transformátor

Při použití proudového transformátoru je potřeba k němu připojit rezistory, na kterých bude docházet k převodu transformovaného proudu na napětí (odpory R_1 a R_2 ve schématu na obrázku 26). Na vývojové desce jsou dále zařazeny dva filtry v každé větvi. První z nich tvořený prvky R_3 a C_1 , resp. R_4 a C_2 , se používá při měření proudu pomocí Rogowského cívek. U proudových transformátorů se pouze přemostí propojkou, jak je znázorněno na schématu. Druhý filtr tvořený prvky R_5 a C_3 , resp. R_6 a C_4 , slouží k zamezení vzniku aliasingu. Hodnoty součástek, které jej tvoří, jsou voleny stejně jako u zapojení pro měření napětí, aby nedocházelo ke vzniku chyb v měření.[52]

Velikost rezistorů R_1 a R_2 a transformační poměr proudového transformátoru spolu udávají maximální možnou velikost proudu, která může být měřena. Omezení přímo vyplývá z nutnosti nepřekročit maximální hodnotu na vstupu AD převodníku U_{ADC} 0,5 V a z Ohmova zákona.

$$U_{ADC} = R \cdot I_{TR} = (R_1 + R_2) \cdot \frac{I_F}{N} = (R_1 + R_2) \cdot \frac{I_{RMS} \cdot \sqrt{2}}{N} \quad (V) \quad (6.2)$$

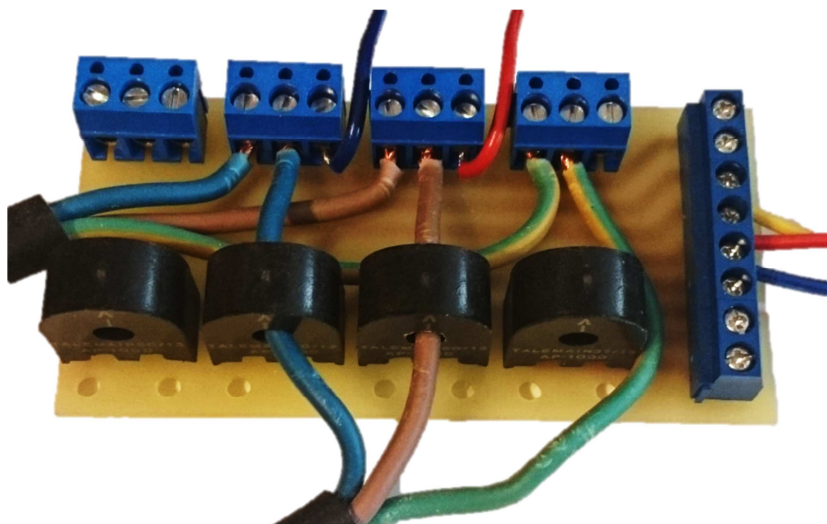
Pro správné měření se předpokládá, že velikost rezistorů R_1 a R_2 je shodná. Potom na základě vztahu (6.2) lze odvodit rovnici pro určení jejich velikosti při známém transformačním poměru N a požadované maximální efektivní hodnotě měřeného proudu I_{RMS} .

$$R_1 = R_2 = \frac{U_{ADC} \cdot N}{2\sqrt{2} \cdot I_{RMS}} \quad (\Omega) \quad (6.3)$$

Během testování budou měřena pouze zařízení s nízkým příkonem, odhadem do 400 W (světla s žárovkami, rotační zařízení, malé ohřívače atd.). Tomuto příkonu odpovídá efektivní hodnota proudu protékajícího fází 1,74 A. Pro zajištění určité rezervy bude pro výpočty tento proud zaokrouhlen na 2 A. Po dosazení do rovnice (6.3) získáme hodnotu odporu 88,49 Ω . Nejbližší nižší hodnota z řady

odporů E24 je 82 Ω. Nižší hodnotu vybíráme proto, že na rezistoru s menším odporem při stejném proudu vznikne menší úbytek napětí a tudíž je možné měřit i vyšší hodnoty proudu.

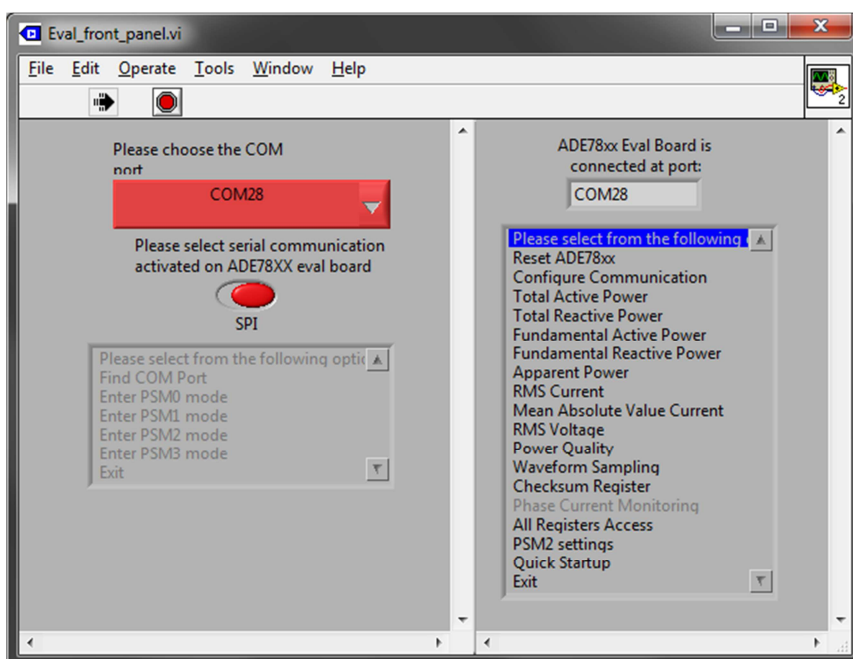
Vývojová deska na sobě obsahuje pouze obvodovou síť a konektor pro připojení výstupu z libovolného senzoru proudu pro každou fázi. Proto byl navržen jednoduchý přípravek obsahující proudové transformátory, který je možné s deskou propojit (viz obrázek 27).



Obrázek 27 - Přípravek s proudovými transformátory

6.1.3 Komunikace přes zabudovaný mikrokontrolér

Výrobce dodává k vývojové desce také základní program pro testování její funkčnosti vytvořený v prostředí LabVIEW. Propojení s počítačem je realizováno pomocí virtuálního sériového portu, přes nějž probíhá komunikace s mikrokontrolérem na desce. Ten následně zajišťuje propojení se samotným měřicím obvodem. Zabezpečuje tedy přemostění komunikace přes různá rozhraní.

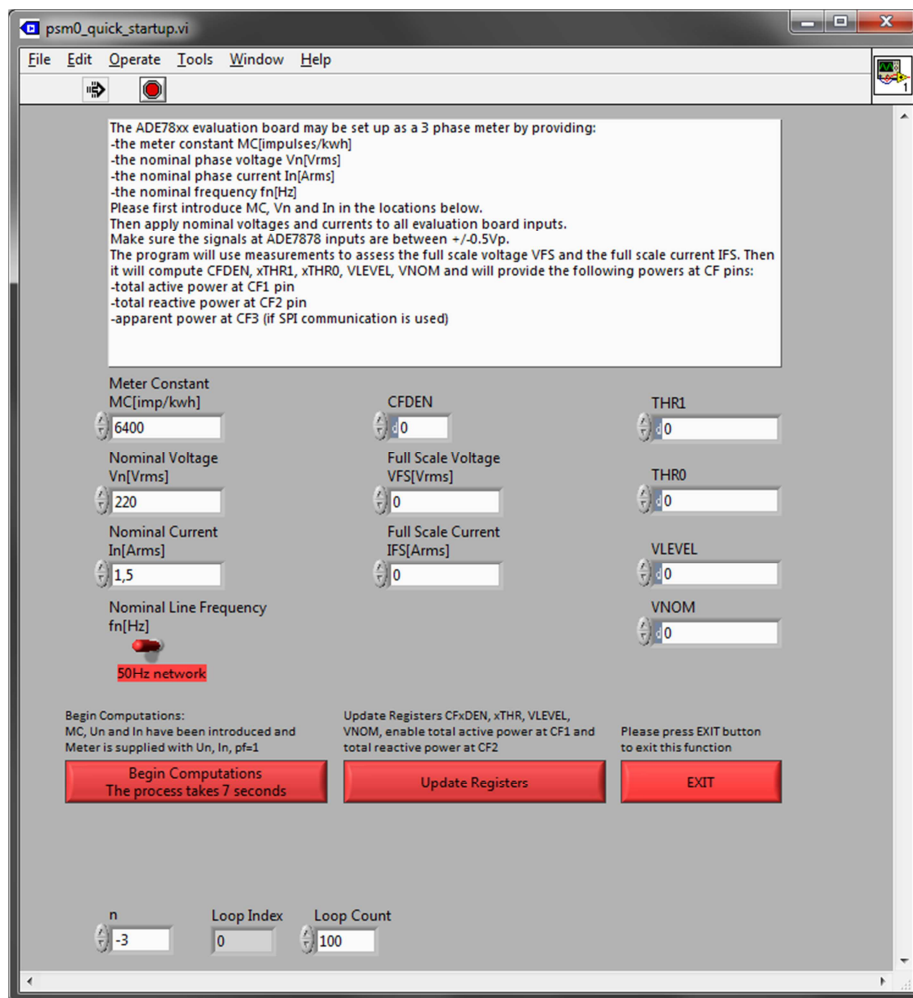


Obrázek 28 - Základní obrazovka komunikačního programu

Uvedený software podporuje stejně jako vývojová deska pro spojení s obvodem ADE7878 využít rozhraní SPI i I²C. V programu musí být zvolena stejná varianta, která je použita fyzicky na desce. Následně je možné přistupovat ke všem dostupným registrům v měřicím obvodu, měnit jeho nastavení a vyčítat potřebné údaje. Obrázek 28 ukazuje podobu základní obrazovky s nabídkou dostupných samostatných panelů. S jejich pomocí se dají zobrazovat konkrétní veličiny, například jednotlivé hodnoty efektivních napětí a proudů nebo různé hodnoty naměřené energie. Většina panelů obsahuje blokově znázorněno, co vše se s naměřenými údaji provádí za výpočetní operace a které registry jsou k tomu využívány. To je vhodné pro vytvoření si představy o práci měřicího obvodu.

Během testů byla zkoušena obě komunikační rozhraní. Pokud se používá rozhraní I²C, je možné rovněž zaznamenávat přes doplňující rozhraní HSDC vzorky pro sestavení průběhů měřených signálů. Obecně je u rozhraní SPI vyšší přenosová rychlost, nicméně pro konkrétní aplikaci není až tak důležitá a až na možnost přenosu průběhů můžeme brát obě dostupná rozhraní za rovnocenná.

Pokud jsou po zapnutí vývojové desky a navázání komunikace s počítačem vyčítány hodnoty, jde určit, zda je celý komunikační řetězec funkční, nicméně získané hodnoty, pokud se jedná o měřené nebo vypočtené veličiny, nemají žádný význam. V prvním kroku před jakýmkoliv měřením je potřeba obvod ADE7878 inicializovat a nastavit například parametry určující přepočty mezi jednotlivými měřenými signály a jejich reálnými jednotkami. K tomuto účelu je v programu panel „Quick Startup“ (rychlé spuštění), viz obrázek 29. Tento proces je také možné provádět ručně podle návodu uvedeného v dokumentaci k obvodu ADE7878 (viz podkapitola 6.1.5).



Obrázek 29 - Panel pro rychlé zprovoznění elektroměru

Postup nastavení je na příslušném panelu bodově popsán. Nejprve je zapotřebí určit nominální hodnoty efektivního napětí fází a proudů, které jimi budou protékat. Zároveň je potřeba znát frekvenci sítě, která je v České republice 50 Hz. Poslední požadovanou veličinou je konstanta elektroměru udávající, kolik impulzů bude generováno pro množství energie 1 kWh. Po nastavení příslušných hodnot v panelu je zapotřebí elektroměr připojit k definované síti. Největší problémy mohou vznikat při nutnosti zajistit průtok určitého proudu. Jako zátěž se v tomto případě nejlépe hodí spotřebič s odporovým charakterem určený pro ohřev. Velmi dobře poslouží také klasická žárovka. Jedná se o to, aby zařízení nebylo vybaveno měniči, které by způsobovaly velmi výrazný výskyt vyšších harmonických v daných průbězích.

Po spuštění výpočetního procesu dojde ke změření zadaného počtu hodnot proudů a napětí, na jejichž základě se v programu vypočtou hodnoty pro maximální možnou velikost měřeného proudu a napětí. Ze znalosti těchto hodnot se ještě určují další parametry, mezi nimi například registry pro přepočítání výkonu na reálné jednotky. Hodnoty všech registrů, které program na základě měření vypočte, je na závěr potřeba zapsat do měřicího obvodu. Po provedení těchto úkonů je možné vývojovou desku začít používat jako elektroměr.

Při pozdějších manuálních výpočtech základního nastavení potřebných registrů (viz 6.1.5) byly objeveny neshody mezi získanými výsledky a hodnotami určenými pomocí programu. V obou

případech se vycházelo ze stejných hodnot napětí a proudu pro fázi. Po podrobnějším posouzení údajů bylo zjištěno, že program započítává do hodnoty pro maximální napětí i proud měření ze všech fází a průměruje je. Když byly tedy tyto parametry fyzicky přivedeny pouze na jednu fázi a ze zbylých dvou byly naměřeny nulové hodnoty, po zprůměrování došlo k chybnému určení potřebných údajů.

Jelikož je propojení s počítačem realizováno pouze virtuální sériovou linkou, probíhá celá komunikace pouze pomocí definovaných zpráv, které jsou uvedeny v dokumentaci k vývojové desce. Základní struktura zpráv je v tabulkách 12, 14 a 15. Pro obsluhu je tedy možné využít i libovolný terminál a práci v textovém režimu. Ten sice není tak přehledný kvůli jednoduchosti zpráv a jejich číselné podobě, na druhou stranu ale umožňuje přímou komunikaci bez ukryvání odesílání jakékoliv zprávy za grafickou nastavbu.

Tabulka 12 - Obecný rámec zprávy z počítače pro mikrokontrolér

Bajt	0	1	N + 1
Význam	typ zprávy	délka dat N	data

Typ zprávy může nabývat hodnot od čísla 65 do 72 a několika dalších. V ASCII (American Standard Code for Information Interchange) tabulce tomu odpovídají znaky od písmene „A“ po „H“. Seznam druhů zpráv a významů dat je uveden v tabulce 13.

Tabulka 13 - Seznam druhů zpráv [52]

Znak	Typ zprávy	Délka dat	Význam dat
A	echo	N	libovolný řetězec N znaků
B	volba napájecího režimu	1	zvolený režim 0–4
C	reset	1	libovolná hodnota
D	volba komunikačního rozhraní	1	hodnota 0 odpovídá I ² C, 1 znamená SPI
E	zápis dat	3, 4, 6, 8	dva znaky s adresou registru a data o délce 1, 2, 3 nebo 4 bajty
F	vyčtení dat	3	dva znaky s adresou registru a počet bajtů k vyčtení
H	vyčtení stavu přerušení	1	libovolná hodnota
J	nastavení přerušení	8	dvě trojice bajtů s nastavením přerušení pro dva výstupy a časové prodlevy
G	požadavek na čtení průběhu	32	určení signálů, které se mají číst
N	zapnutí DSP	1	libovolná hodnota
O	vypnutí DSP	1	libovolná hodnota

Na každou odeslanou zprávu mikrokontrolér odpovídá. Pokud nejsou vyžadována žádná data, zasílá se pouze potvrzení přijetí zprávy (viz tabulka 14). V opačném případě se odesílá zpráva podle rámce z tabulky 15. Tato odpověď obsahuje znak určující její typ, množství odesílaných bajtů a následně samotná data. Žádná adresa ani jiné údaje se zpět neposílají.

Tabulka 14 - Zpráva o potvrzení od mikrokontroléru pro počítač [52]

Bajt	0	1
Znak	R	~
Kód podle ASCII	0x52	0x7E

Tabulka 15 - Obecný rámec zprávy z mikrokontroléru pro počítač [52]

Bajt	0	1	2	N + 2
Význam	znak „R“, odpověď	typ zprávy	délka dat N	data

Je tedy možné komunikovat s elektroměrem pouze přes terminál, nicméně jak je vidět z uvedených tvarů zpráv, není tento způsob úplně jednoduchý a uživatelsky přívětivý. Také záleží na použitém terminálu, nicméně většina umožňuje pracovat v textovém režimu, kdy jsou znaky reprezentovány podle ASCII tabulky, nebo v hexadecimálním, v němž jsou všechny bajty zapisovány v šestnáctkové soustavě. Ani jeden způsob není ideální, jelikož v prvním sice vidíme jednoduše typ zprávy a zda se jedná o odpověď, ale vše ostatní je téměř nečitelné, a ve druhém jsou všechny znaky reprezentovány pouze čísly, která jsou navíc v hexadecimální soustavě.

6.1.4 Komunikace pomocí externího mikrokontroléru

Ve finálním zařízení bude použit mikrokontrolér od firmy STMicroelectronics, který bude komunikovat s obvodem zajišťujícím měření. Proto v další části práce byl použit tento řídicí obvod na samostatné vývojové desce a realizována komunikace mezi ním a čipem ADE7878. Pro realizaci bylo zvoleno rozhraní SPI, které se skládá ze signálů SS (Slave Select), SCLK (Serial CLoCK), MOSI (Master Out Slave In) a MISO (Master In Slave Out). Jelikož bylo určeno, že není zapotřebí využívat rozhraní HSDC k přenosu vzorků pro sestavování průběhů signálů, mohlo být vybráno kterékoliv ze dvou dostupných rozhraní. U I²C může být výhodou menší počet potřebných vodičů (pouze dva oproti čtyřem u SPI), výhodou rozhraní SPI je zase možnost dosahovat vyšších rychlostí.

Podle dokumentace k obvodu ADE7878 je povolená frekvence hodin pro rozhraní SPI 250 Hz až 2,5 MHz. V nečinném stavu je vyžadována na hodinovém signále logická hodnota 1 a vzorkování datových linek probíhá při náběžné hraně na hodinovém vstupu. Tyto tři základní parametry je zapotřebí dodržet při inicializaci komunikačního rozhraní v mikrokontroléru. Je také vyžadováno použití signálu SS, kterým se aktivuje konkrétní zařízení v roli slave připojené ke sběrnici SPI.[48]

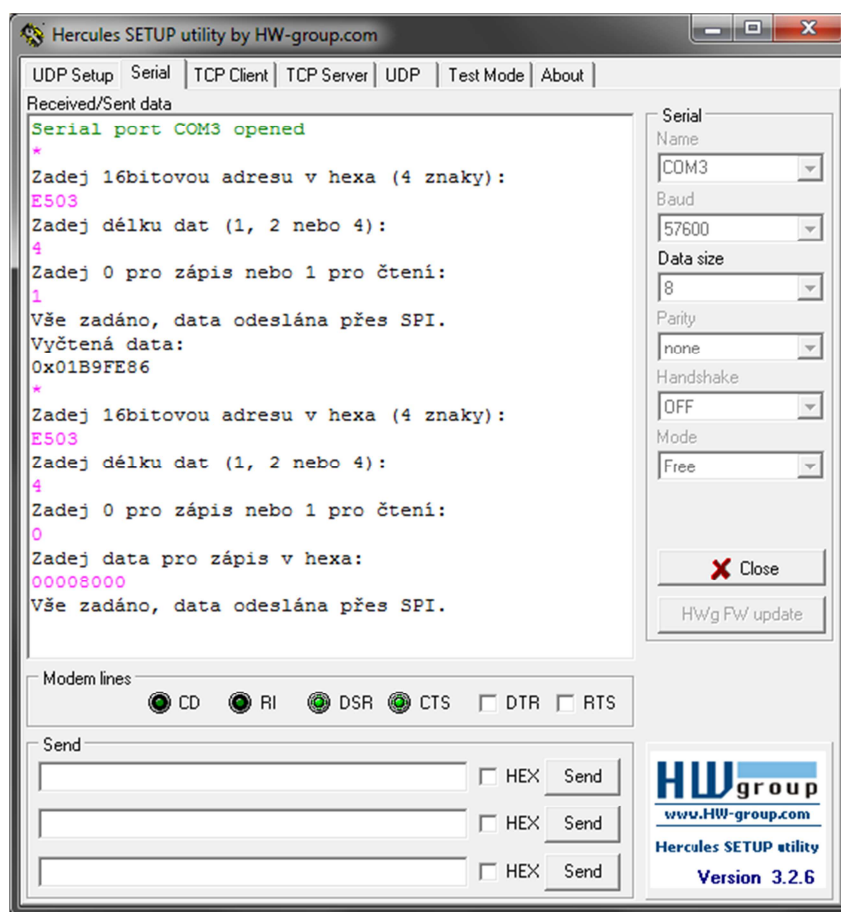
Maximální taktovací frekvence zvoleného mikrokontroléru STM32F407 je 168 MHz. Jednotlivé hodinové sběrnice, které jsou v něm rozvedeny k perifériím, se od této taktovací frekvence odvíjejí. Každá má svoji maximální povolenou frekvenci, na kterou se vnitřní takt upravuje pomocí děliček. Hodinový signál přiváděný ke konkrétně použitému rozhraní SPI je nastaven na svoji maximální hodnotu 42 MHz. V samotné periférii poté dochází k dalšímu zpomalení hodin podle konkrétního požadavku na rychlost komunikační sběrnice. Aby byly dodrženy zvolené požadavky, byla použita předdělička o hodnotě 128, což znamená, že frekvence výstupních hodin je 328,125 kHz. Z dostupných nastavení datových linek byla zvolena obousměrná komunikace využívající dva samostatné signály a orientace přenášeného bajtu s nejvýznamnějším bitem na začátku.[51]

Po deaktivaci nebo přímo odpojení mikrokontroléru, který se nachází na samotné vývojové desce elektroměru, je zapotřebí zajistit správné logické úrovně na vstupech PM0 a PM1 obvodu ADE7878. Pomocí nich se nastavuje aktivní napájecí režim a pouze v základním, kdy není snížena spotřeba obvodu, lze provádět všechna nastavení. Pokud by tyto vstupy nebyly nijak nastaveny, obsahuje obvod vnitřní pull-up rezistory, díky kterým by byl aktivován režim s nejnižší spotřebou, v němž by byl obvod uspaný.

Bezprostředně po svém zapnutí má obvod ADE7878 aktivní komunikační rozhraní I²C. Chceme-li používat SPI, musíme v prvé řadě provést přepnutí. To se provádí vysláním tří pulzů na SS

vstup obvodu. Tuto činnost můžeme provádět přímo ovládáním konkrétního výstupu od mikrokontroléru, anebo odesláním tří zpráv na adresu, která již není v měřicím obvodu využívána. Během procesu odesílání vzniknou na signále SS požadované tři pulzy. Nastavení používaného rozhraní je možné zamknout libovolným zápisem do registru CONFIG2. Poté bude zvolené rozhraní používáno i při přepínání napájecích režimů. Ke změně může dojít až po resetu zařízení.[48]

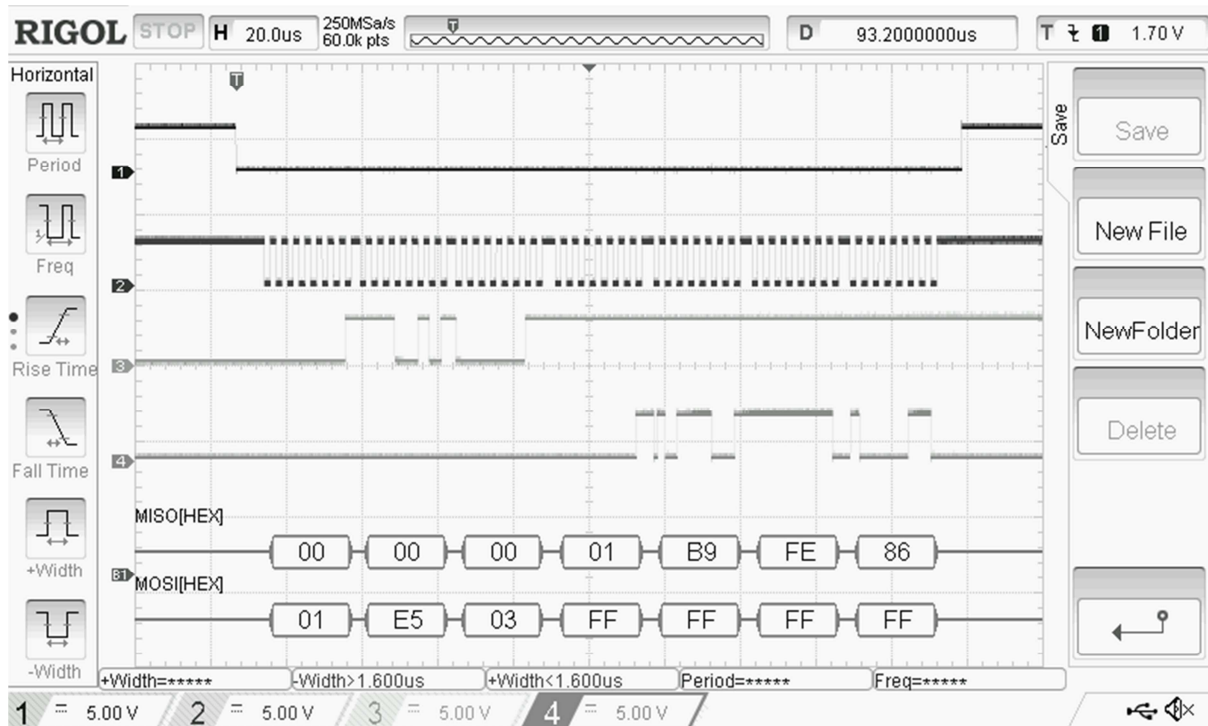
Pro otestování správného nastavení komunikačního rozhraní a jeho celkové funkčnosti byl vytvořen program pro mikrokontrolér, který umožňuje přes sériovou linku odesílat požadavky na zapsání hodnot do registrů měřicího obvodu nebo je naopak vyčítat. Jedná se tedy o jakousi obdobu programu, který se nachází v mikrokontroléru na vývojové desce elektroměru. Program je ale zaměřen na použití s terminálem a je tomu přizpůsoben tak, aby i práce v textovém režimu byla přehlednější.



Obrázek 30 - Komunikace přes konzoli

Při jeho použití je nejprve zapotřebí zahájit dialog s mikrokontrolérem odesláním zvoleného znaku „*“. Poté probíhá zadání adresy registru, se kterým se má operovat. Jelikož v dokumentaci k obvodu jsou vždy uváděny v hexadecimálním tvaru, probíhá jejich zadávání v konzoli také v této podobě. Dalším parametrem, který je potřeba zvolit, je velikost daného registru určena počtem bajtů. Nejkratší varianta má jeden bajt, nejdelší čtyři. V případě, že je některá hodnota delší, je rozdělena na dva registry. Po zadání těchto hodnot probíhá volba, zda se má do registru nějaká hodnota zapisovat nebo jestli má proběhnout jeho vyčtení. V prvním případě ještě proběhne výzva na zadání hodnoty k zápisu. Kvůli jednoduchosti celé konzole se zadává také v hexadecimálním formátu. Ukázka čtení

i zápisu v konzoli je na obrázku 30. Pro ověření byl také zaznamenán pomocí osciloskopu s možností dekódování sběrníc průběh komunikace mezi oběma obvody, viz obrázek 31.



Obrázek 31 - Přenos dat po sběrnici SPI, signály seshora SS, SCLK, MOSI a MISO

Jak lze ze zaznamenaného přenosu vidět, skládá se přenášená zpráva z několika částí. První bajt určuje, zda má probíhat operace čtení (hodnota 1) nebo zápisu (hodnota 0). Poté je přenášena adresa registru, se kterým se bude následně operovat. V případě zápisu dat obsahují následující bajty hodnotu, která má být do registru uložena. Pokud je požadováno čtení, jsou po zadání adresy odesílána na lince MISO data ze zvoleného registru, mikrokontrolér v roli master může vysílat libovolné hodnoty (na obrázku 31 je to číslo 255).

6.1.5 Manuální nastavení měřicího obvodu přes terminál

Pomocí vytvořeného programu pro řídicí mikrokontrolér a terminálu na počítači byl proveden celý proces základního nastavení čipu ADE7878. Po zapnutí všech komponent je potřeba provést správné nastavení napájecího režimu přes vstupy PM0 a PM1, pokud tak již nebylo učiněno. Aktivace základního režimu je signalizována aktivací výstupu IRQ0. Pro otestování funkčnosti spojení je vhodné nejprve vyčíst hodnotu z registru STATUS1. Druhým krokem je zápis do tohoto registru, po kterém by mělo dojít k deaktivaci signalizujícího výstupu a v případě vývojové desky ke zhasnutí LED. Specifikace odeslaného příkazu je v tabulce 16. Konkrétní podoba vyčtení i zápisu do tohoto registru v konzoli je znázorněna na obrázku 30 a naměřený průběh při čtení na sběrnici SPI je na obrázku 31.[48]

Tabulka 16 - Parametry zápisu do registru STATUS1

Název	Adresa	Počet bajtů	Data
STATUS1	0xE503	4	0x00008000

Pokud signalizační LED zhasla, máme ověřeno, že zápis i čtení funguje a můžeme přistoupit k vlastním krokům nastavení. Nejprve se nastavuje hodnota jednotlivých PGA na vstupech AD převodníků (viz vnitřní blokový diagram obvodu ADE7878 na obrázku 21). Protože rozsahy měřených signálů jsou na vstupu do obvodu ADE7878 přizpůsobeny maximálnímu rozsahu AD převodníků, budou hodnoty všech zesílení 1, čemuž odpovídá zápis čísla 0 na jednotlivé pozice v registru GAIN. Podobu příkazu zachycuje tabulka 17.[48]

Tabulka 17 - Parametry zápisu do registru GAIN

Název	Adresa	Počet bajtů	Data
GAIN	0xE60F	2	0x0000

Dále je zapotřebí nastavit hodnoty WTHR, VATHR a VARTHR, které určují pro jednotlivé druhy energií množství, jež je přiřazeno jednomu bitu v registrech akumulujících informaci o množství energie. Souhrnně můžeme tyto hodnoty označit jako nTHR. Jelikož se jedná o 48bitová čísla, jsou rozdělena do dvou registrů nTHR0 a nTHR1. I když tomu tak ve speciálních případech nemusí být, je obvyklé nastavit přiřazené množství energie pro její všechny druhy stejně. K výpočtu hodnoty, která má být zapsána, se používá vztah (6.4).[48]

$$nTHR = \frac{P_{MAX} \cdot f_s \cdot 3600 \cdot 10^n}{V_{FS} \cdot I_{FS}} \quad (-) \quad (6.4)$$

Parametr P_{MAX} je hodnota aktuálního výkonu vypočítaného, pokud jsou všechny vstupy AD převodníků na maximálních hodnotách. Jeho hodnota je 33516139. Údaj f_s je frekvence, se kterou DSP provádí výpočet výkonů a je rovna 8000 Hz. Hodnota 10ⁿ udává velikost kvanta energie, o které se může měnit hodnota v registrech. Pokud je n = -3, znamená to, že nejmenší množství započítané energie je 10⁻³ Wh, 10⁻³ varh nebo 10⁻³ VAh.[48]

Hodnota V_{FS} udává efektivní hodnotu napětí, které způsobí na vstupu AD převodníku signál v maximálním dovoleném rozsahu, který je 0,5 V. Pro výpočet se používá zapojení ze schématu na obrázku 25.[48]

$$V_{FS} = \frac{0,5 \cdot (R_1 + R_2 + R_3)}{R_3 \cdot \sqrt{2}} = \frac{0,5 \cdot (10^6 + 10^5 + 10^3)}{10^3 \cdot \sqrt{2}} = 389,262283 \text{ V} \quad (6.5)$$

Obdobně hodnota I_{FS} znamená efektivní hodnotu proudu, který po převodu přes senzor vytváří signál s maximálním rozsahem povoleným na vstupu AD převodníku. Výpočet vychází se schématu zapojení senzoru, které je na obrázku 26.[48]

$$I_{FS} = \frac{0,5 \cdot CT_{RATIO}}{(R_1 + R_2) \cdot \sqrt{2}} = \frac{0,5 \cdot 1000}{(82 + 82) \cdot \sqrt{2}} = 2,1558 \text{ A} \quad (6.6)$$

Hodnoty uvedených parametrů a výsledky rovnic (6.5) a (6.6) dosadíme do vztahu (6.4) a vypočteme údaj nTHR,

$$nTHR = \frac{33516139 \cdot 8000 \cdot 3600 \cdot 10^{-3}}{389,262283 \cdot 2,1558} = 1150259099,625 \quad (6.7)$$

Hodnotu získanou v rovnici (6.7) musíme zaokrouhlit na celé číslo. Výsledný údaj je následně potřeba rozdělit na dvě části, každou o délce 24 bitů.

$$nTHR = 0b1000100100011111000111110011100$$

$$nTHR1 = 0b1000100 = 68 = 0x44 \quad (6.8)$$

$$nTHR0 = 0b100011111000111110011100 = 9408412 = 0x8F8F9C \quad (6.9)$$

Hodnoty pro registry nTHR1 a nTHR0 určené v rovnicích (6.8) a (6.9) již můžeme zapsat přímo do obvodu ADE7878. Série příslušných příkazů je v tabulce 18.

Tabulka 18 - Parametry zápisu do registrů nTHR1 a nTHR0

Název	Adresa	Počet bajtů	Data
VATHR1	0x43A9	4	0x00000044
VATHR0	0x43AA	4	0x008F8F9C
WTHR1	0x43AB	4	0x00000044
WTHR0	0x43AC	4	0x008F8F9C
VARTHR1	0x43AD	4	0x00000044
VARTHR0	0x43AE	4	0x008F8F9C

Dále se nastavují registry, podle jejichž hodnoty se generují impulzy na výstupech CF1, CF2 a CF3. Vztah (6.10) slouží k výpočtu zapisované hodnoty.[48]

$$CFxDEN = \frac{10^3}{MC \left(\frac{\text{imp}}{\text{kWh}} \right) \cdot 10^n} (-) \quad (6.10)$$

Stejně jako v rovnici (6.4) i zde určuje číslo 10^n kvantum energie a proto je n zvoleno shodně. Parametr MC je takzvaná konstanta elektroměru a počet vygenerovaných impulzů připadajících na množství energie 1 kWh. Hodnotu volíme shodně jako u automatické konfigurace, tedy 6400. Po dosažení a zaokrouhlení výsledku obdržíme hodnotu 156, kterou zapíšeme do všech tří registrů, které jsou propojeny se samostatnými výstupy. Příkazy jsou zachyceny v tabulce 19.

Tabulka 19 - Parametry zápisu do registrů CFxDEN

Název	Adresa	Počet bajtů	Data
CF1DEN	0xE611	2	0x009C
CF2DEN	0xE612	2	0x009C
CF3DEN	0xE613	2	0x009C

Aby byly impulzy opravdu generovány, je také zapotřebí je povolit a určit, který druh energie bude spjat se kterým výstupem. U každého výstupu může být voleno z pěti variant podle druhu energie, který má být reprezentován:

- celková aktivní energie,
- celková reaktivní energie,
- celková zdánlivá energie,
- aktivní energie pro první harmonickou,
- reaktivní energie pro první harmonickou.[48]

Pro každý výstup jsou vyhrazeny tři bity v registru CFMODE, jejichž nastavením se volí druh energie z výše uvedeného seznamu. Dále jsou v registru tři bity sloužící k povolení či zakázání generování impulzů na příslušném výstupu. To, která fáze má být započtena pro konkrétní výstup, je možné ovlivnit nastavením v registru COMPMODE. Konkrétně k tomuto účelu slouží tři trojice bitů, v každé vždy jeden odpovídá jedné fázi.[48]

Při nastavování bylo zvoleno, že první výstup CF1 bude odpovídat celkové aktivní energii, CF2 celkové reaktivní energii a CF3 celkové zdánlivé energii. Na všech výstupech se přitom budou podílet hodnoty ze všech fází. Příkazy zajišťující toto nastavení jsou v tabulce 20.

Tabulka 20 - Parametry zápisu do registrů CFMODE a COMPMODE

Název	Adresa	Počet bajtů	Data
CFMODE	0xE610	2	0x0088
COMPmode	0xE60E	2	0x01FF

Aby mohl obvod správně měřit energii pouze pro základní harmonickou složku signálu, vyžaduje zadání hodnoty do registru VLEVEL. Její určení probíhá pomocí vztahu (6.11).[48]

$$VLEVEL = \frac{V_{FS}}{V_n} \cdot 491520 (-) \quad (6.11)$$

Stejně jako v předchozích případech je parametr V_{FS} roven efektivní hodnotě napětí, které se na vstupu AD převodníku projeví jako signál v plném rozsahu. Hodnota byla vypočtena v rovnici (6.5). V_n udává efektivní hodnotu nominálního napětí, které bude v jednotlivých fázích, tedy 230 V. Po dosazení do vztahu (6.11) a zaokrouhlení výsledku na celá čísla získáme hodnotu 831870.[48]

Pro výpočet zdánlivé energie může být namísto měřeného napětí používána zadaná hodnota. Ukládá se do registru VNOM a k jejímu určení slouží rovnice (6.12).[48]

$$VNOM = \frac{V}{V_{FS}} \cdot 4191910 (-) \quad (6.12)$$

Parametr V_{FS} je opět shodný s předchozími případy. Hodnota V určuje efektivní hodnotu napětí, které je očekáváno ve fázích. V tomto případě počítáme s nominálním napětím fáze, tedy s hodnotou 230 V. Dosazením hodnot do rovnice (6.12) získáme číslo 2476837,192. Po zaokrouhlení na celá čísla můžeme tuto hodnotu zapsat do příslušného registru. Konkrétní parametry příkazů pro zápis do obou uvedených registrů jsou v tabulce 21.[48]

Tabulka 21 - Parametry zápisu do registrů VLEVEL a VNOM

Název	Adresa	Počet bajtů	Data
VLEVEL	0x43B3	4	0x000CB17E
VNOM	0xE520	4	0x0025CB25

V dokumentaci k obvodu ADE7878 je doporučené aktivovat ochranu dat v paměti RAM. Toho se dosáhne zápisem do dvou 8bitových registrů. Podrobnosti zachycuje tabulka 22.[48]

Tabulka 22 - Parametry zápisu do registrů pro aktivaci ochrany RAM

Název	Adresa	Počet bajtů	Data
bez názvu	0xE7EF	1	0xAD
bez názvu	0xE7E3	1	0x80

Posledním krokem nastavení měřicího obvodu je aktivace DSP. Toho lze dosáhnout jednoduchým zápisem do registru RUN, který je zachycen v tabulce 23.[48]

Tabulka 23 - Parametry zápisu do registru RUN

Název	Adresa	Počet bajtů	Data
RUN	0xE228	2	0x0001

Po provedení všech uvedených kroků je obvod plně připraven k měření. Hodnoty energií jsou ukládány do patnácti 32bitových registrů s adresami 0xE400 až 0xE40E. Údaj z každé fáze je zaznamenáván zvlášť a pro každou fázi je dostupných pět druhů energií – aktivní, reaktivní a zdánlivá celková a aktivní a reaktivní energie pro základní harmonickou. Při čtení hodnot z těchto registrů dochází k jejich nulování, takže chceme-li uchovávat údaj o odebrané energii a zároveň jej průběžně číst (například pro zobrazování), je potřeba zajistit tuto činnost na vlastním řídicím mikrokontroléru.

6.2 Komunikace přes Ethernet

Podle zamýšlené koncepce je dalším úkolem zajištění komunikace mezi elektroměrem, resp. řídicím mikrokontrolérem, a dalšími komponentami přes rozhraní Ethernet. Vybraný čip STM32F407 obsahuje periférii pro realizaci tohoto spojení s podporovanou datovou propustností 10/100 Mbps. Je pouze vyžadováno zajištění externí fyzické vrstvy. Pro komunikaci s takovým obvodem je možné použít rozhraní MII (Medium Independent Interface), které používá 17 signálů, nebo RMII (Reduced Medium Independent Interface) využívající jen 9 signálů. Vybrané vývojové moduly jsou uzpůsobeny pro použití RMII, proto bylo zvoleno a nadále používáno toto rozhraní.[51]

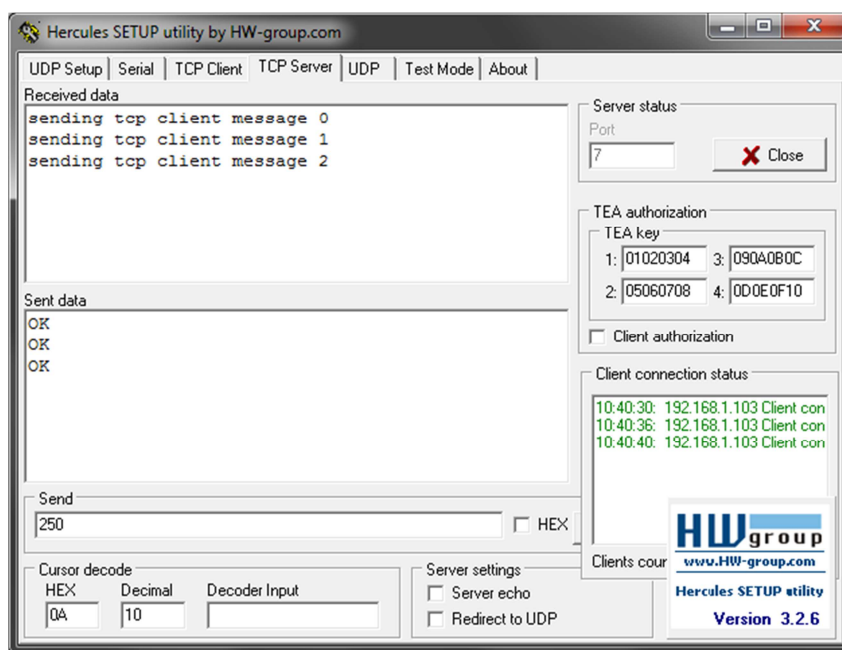
6.2.1 Komunikace přes TCP

Komunikace v rámci Ethernetu může probíhat pomocí protokolu TCP nebo UDP. Druhý jmenovaný, tedy protokol UDP, je obecně považován za jednodušší. Odesílatel nedostává informaci, zda byla zpráva doručena nebo ne, nicméně vyžaduje nižší režii. Naopak u protokolu TCP probíhá navázání spojení mezi komunikujícími členy a je tedy potvrzováno přijetí dat. Pokud dochází k chybě nebo ztrátě, jsou data odesílána znovu. Také je zajištěno zachování správného pořadí zpráv. Z těchto důvodů bylo zvoleno za preferované využít komunikaci prostřednictvím protokolu TCP.

Pro vybranou platformu a obecně pro mikrokontroléry je dostupný volně šiřitelný LwIP stack (Lightweight Internet Protocol), který zajišťuje implementaci protokolů TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) s minimálními nároky na paměť RAM. Výrobce STMicroelectronics nabízí ukázkové programy, které jsou postaveny na LwIP. Pro základní vyzkoušení komunikace přes Ethernet a především její zprovoznění byly tyto příklady použity.

Mezi ukázkovými programy jsou i projekty pro některá vývojová prostředí, nicméně pro použité Atollic TrueSTUDIO ne. Proto bylo zapotřebí vytvořit projekt samostatně a postupně do něj přidat všechny potřebné části a knihovny. Základními prvky byly knihovny pro obsluhu samotné periferie na mikrokontroléru a potřebný LwIP stack. U něj bylo zapotřebí odlišit, zda je vyvíjena aplikace s operačním systémem nebo bez něj a použít pouze potřebné soubory. Jelikož bylo zvoleno využití IPv4 (Internet Protocol version 4), musely být správně upraveny konfigurační soubory LwIP stacku a odebrány nepotřebné části pro IPv6 (Internet Protocol version 6), které by jinak vytvářely duplicitní funkce.

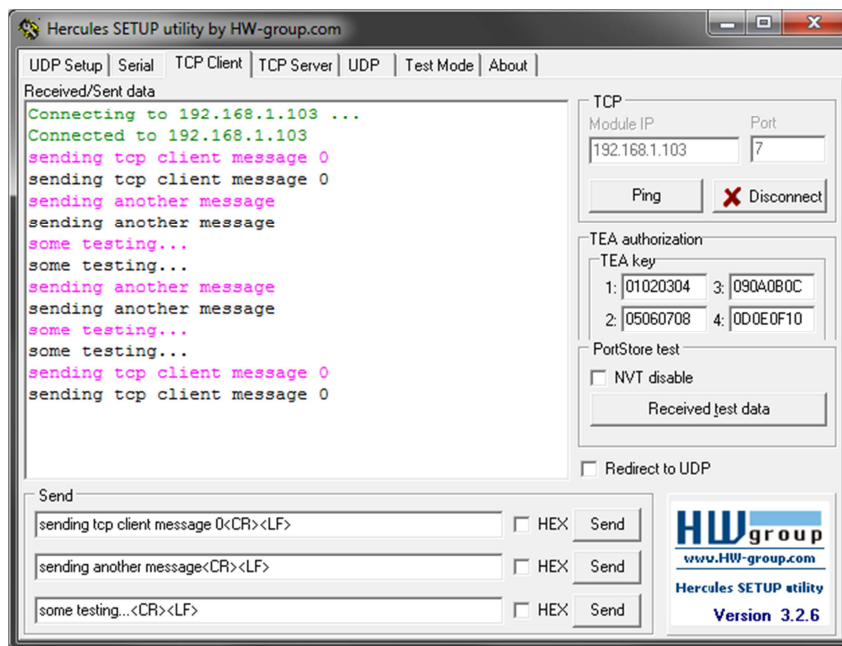
Takto připravený projekt byl doplněn o ukázkový kód zajišťující komunikaci prostřednictvím TCP v pozici klientu. V takovém případě se mikrokontrolér připojuje k TCP serveru, odešle mu zprávu a čeká na příjem odpovědi. Poté je spojení uzavřeno ze strany klientu. Ukázkový program tedy zahrnoval funkce potřebné k realizaci uvedených operací.



Obrázek 32 - Výpis z terminálu v roli TCP server

Do programu musela být uvedena správná IP adresa zařízení, ke kterému se má následně připojovat, a zvolený port. Po stisknutí uživatelského tlačítka na vývojové desce proběhne pokus o navázání spojení. Pokud je úspěšný, odešle se zpráva a její pořadové číslo a následně je vyžadována odpověď ze serveru. Po jejím přijetí je komunikační kanál uzavřen a při opětovném stisku tlačítka se celý proces opakuje. Ukázka z terminálu na počítači, ke kterému se mikrokontrolér připojoval, je na obrázku 32.

Po úspěšném otestování této komunikace byl program upraven tak, aby mikrokontrolér vystupoval v roli serveru a probíhalo připojování se k němu z jiného zařízení.



Obrázek 33 - Výpis z terminálu v roli TCP klient

V této variantě se po spuštění programu vytváří TCP server, který poslouchá zprávy na předem definovaném portu. Pokud nějakou přijme, odesílá ji zpět stejnému klientu. K mikrokontroléru se může připojovat ve stejnou dobu více klientů. Výpis z terminálu z jednoho klientu je na obrázku 33. Pro správnou funkci je zapotřebí znát IP adresu nastavenou v mikrokontroléru a port, na kterém komunikace probíhá.

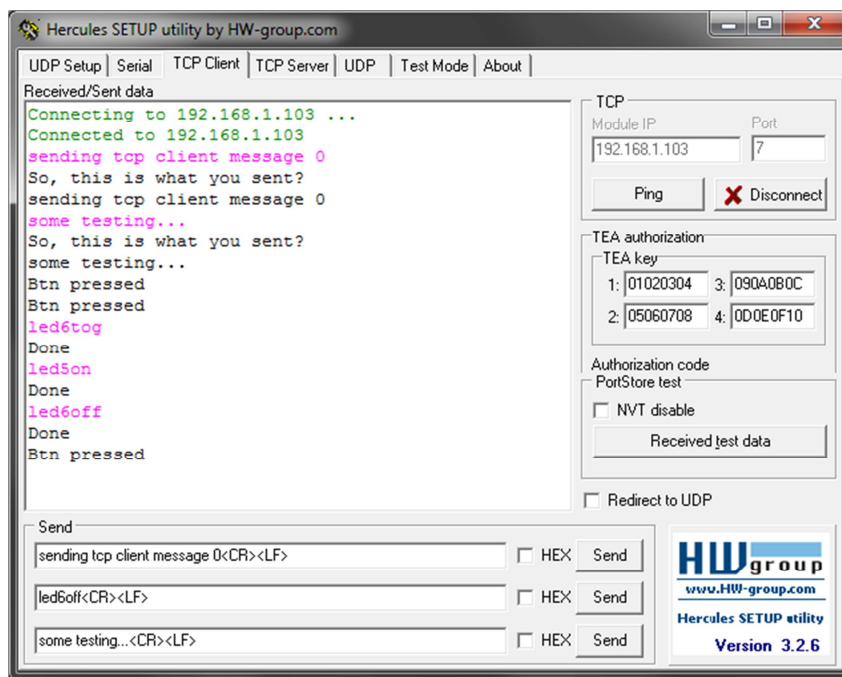
6.2.2 Využití FreeRTOS s TCP komunikací

Jednou z možností realizace celého programu pro řídicí mikrokontrolér je využití operačního systému, konkrétně FreeRTOS. Jedná se o systém, který může být nastaven jako kooperativní i preemptivní. Umožňuje využívat vlákna (v samotném operačním systému označováno jako task, tedy úlohy) a takzvaný pseudoparalelismus, kdy je na jednom procesorovém jádře spouštěno postupně více vláken a chování systému vytváří zdání, že běží současně. Navíc nasazení vláken by umožnilo oddělit jednotlivé ucelené úkoly a pouze mezi nimi předávat informace přes dostupné prostředky. Vzhledem k tomu, že byl vybrán výkonný mikrokontrolér s dostatečně velkou pamětí flash i RAM, nepředstavuje nasazení operačního systému z hlediska hardwaru žádný problém.

Kvůli rozhodnutí použít pro celou aplikaci FreeRTOS byla dále testována také komunikace přes Ethernet v rámci tohoto systému, konkrétně varianta s mikrokontrolérem v roli serveru. Tím bude zajištěno, že data z výsledného elektroměru budou moci vyčítat různá zařízení nezávisle na sobě a především pouze v situaci, kdy je budou potřebovat. Nebude tak zbytečně docházet k zatěžování sítě pravidelným odesíláním hodnot, případně pokusy o navázání spojení.

Vývojové prostředí Atollic TrueSTUDIO umožňuje pro řadu mikrokontrolérů založit projekt, který již systém FreeRTOS obsahuje. To celou situaci usnadňuje, není zapotřebí soubory operačního systému vkládat manuálně. Jakékoliv jeho další nastavování se provádí pomocí maker obsažených v souboru FreeRTOSConfig.h. Změny se projeví vždy po kompilaci projektu. Do takto připraveného projektu je opět zapotřebí naimportovat zdrojové kódy s LwIP. Tentokrát je nutné volit variantu pracující s operačním systémem FreeRTOS a podporující IPv4. Základní funkčnost je obsažena

v ukázkovém kódu. Ten zajišťuje vytvoření samostatného vlákna pro realizaci TCP serveru. V něm se čeká na vytvoření spojení s jiným zařízením. Tato funkce je realizována blokadí vlákna, takže není mařen procesorový čas a v době, kdy komunikace neprobíhá, není toto vlákno vůbec spouštěno. Po navázání spojení dojde k přechodu do další části, kde je vlákno opět blokováno, dokud nejsou přijata data odeslaná z klientu. Až poté probíhá práce ve vláknu, pokud nějakou obsahuje. Také odeslání informací zpět je podmíněno nejprve jejich přijetím. Po dokončení činnosti, která by měla zpracovávat přijatá data a reagovat na ně, přechází vlákno opět do stavu, kdy je blokováno a čeká se na přijetí další zprávy nebo odpojení klientu.



Obrázek 34 - Výpis z terminálu při použití FreeRTOS

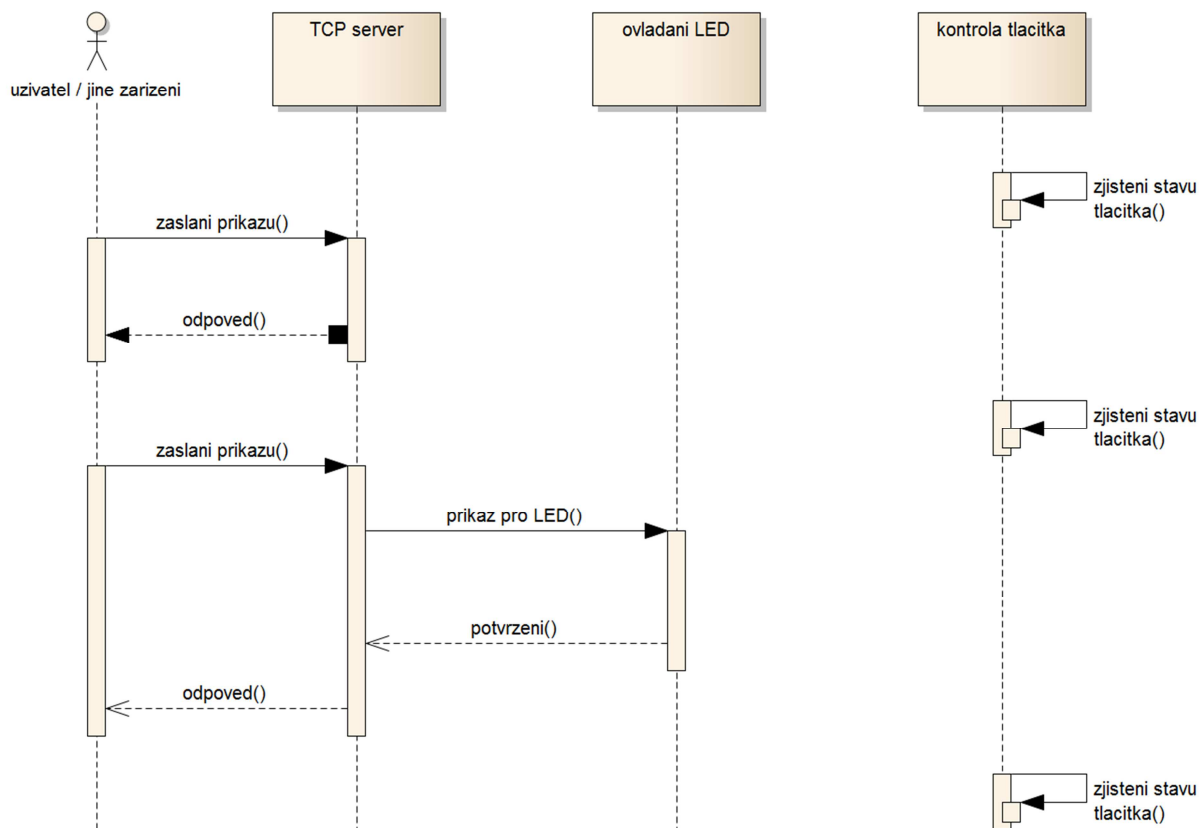
Ukázkový program zvládal pouze přeposílat přijaté zprávy zpět klientu. Jeho funkcionalita byla doplněna o další činnosti. Ukázka z komunikace mezi mikrokontrolérem a počítačem je zachycena na obrázku 34.

První z nich je signalizace pomocí LED, zda je k serveru (tedy mikrokontroléru) připojen nějaký klient. Druhá začne trvale blikat po získání IP adresy z DHCP serveru (Dynamic Host Configuration Protocol). Pokud k tomu z nějakého důvodu nedojde, po čtyřech pokusech o získání dojde k použití statické IP adresy zadané v programu a daná LED rovněž začne blikat. Tato činnost je realizována v samostatném vlákně.

Další doplňkovou činností je sledování, zda bylo zmáčknuto uživatelské tlačítko. Je rovněž počítáno, kolikrát k tomu dojde. I tato činnost je realizována v samostatném vlákně. Snímání stavu tlačítka je takzvaně podvzorkováno, aby se zabránilo snímání zákmitů vznikajících při stisku nebo uvolnění tlačítka. Po přijetí libovolné zprávy od klientu proběhne odeslání informace o tom, že bylo tlačítko stisknuto. Počet odeslání této zprávy odpovídá tomu, kolikrát bylo tlačítko stisknuto.

Poslední činnost se věnuje zpracování přijaté zprávy a reakcí na ni. Její sekvenční diagram je na obrázku 35. Vše je simulováno ovládáním dalších signalizačních LED. Ty mohou být rozsvěcovány, zhasínány nebo přepínány do opačného stavu. Zpráva se skládá z klíčového slova „led“, číselného označení konkrétní LED a požadované činnosti – „on“ pro zapnutí, „off“ pro vypnutí a „tog“

pro změnu. Parsování zprávy v podobě řetězce znaků probíhá ve vlákne serveru, získané údaje jsou odesílány pomocí fronty do obslužného vlákna. Před potvrzením vykonání příkazu klientu se čeká na dokončení činnosti obslužného vlákna. Do něj je uměle přidána prodleva simulující časově náročnou činnost.



Obrázek 35 - Sekvenční diagram příjmu zprávy

6.3 Komunikace s vozidlem

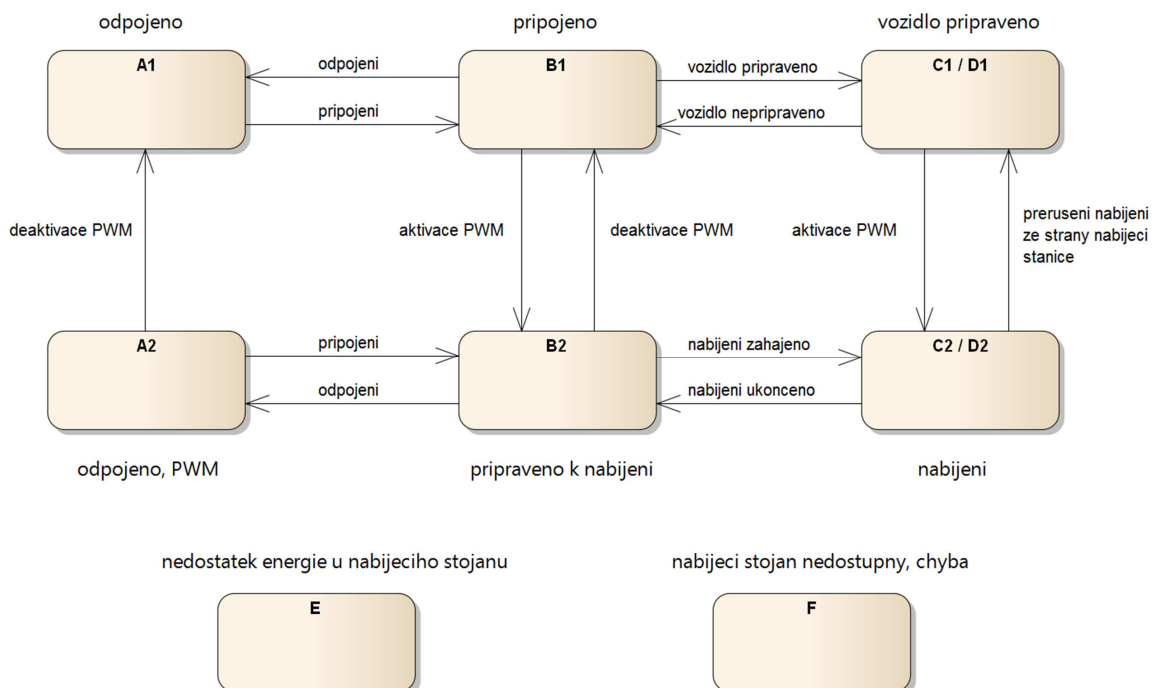
V podkapitole 3.1 byly popsány jednotlivé módy nabíjení. U třetího z nich byla zmíněna komunikace s vozem. Pomocí ní nabíjecí stojan zjišťuje, zda je vozidlo připojeno a jestli je připraveno na nabíjení. Pokud tomu tak je, dojde k sepnutí silových vodičů. Nemůže se tedy stát, aby byl nepřipojený konektor nebo zásuvka nabíjecího stojanu pod napětím. Využitím komunikace se tím pádem zvyšuje bezpečnost celého procesu nabíjení. Nabíjecí stojan je zároveň schopen vozidlu sdělit, jaký maximální proud může použít pro nabíjení. Reaguje tím na stav rozvodné sítě a její dispozice. Pokud automobil při nabíjení překročí toto omezení o více než 10 % po dobu delší než 5 vteřin, proběhne jeho odpojení.[55]

U rozhraní označovaného Mennekes, které se používá v Evropě, i u amerického J1772 se využívá stejného způsobu komunikace. Fyzicky je realizována dvěma vodiči s označením PP a CP. Jejich napěťové úrovně jsou vztahovány k ochrannému vodiči PE. Vodič PP slouží především na straně vozu i nabíjecí stanice k určení, zda je kabel připojený. K určení slouží rezistory obsažené v jednotlivých komponentách. Na základě této detekce může být také konkrétní zásuvka uzamykána. Vodič CP je určený k samotné komunikaci mezi nabíjecí stanicí a vozidlem. Na straně nabíjecího stojanu probíhá generování PWM (Pulse Width Modulation) signálu v rozsahu ± 12 V. Plnění signálu

určuje maximální povolený nabíjecí proud. Vozidlo mezi vodič CP a zem PE připojuje definované rezistory, jejichž velikost určuje, zda je vozidlo připojeno a jestli je připraveno na nabíjení. Změnou odporu dochází ke snižování horní úrovně signálu z 12 V na 9 V, 6 V nebo 3 V. Tato hodnota je zpětně měřena v nabíjecím stojanu, aby na situaci mohl reagovat. Pokud není připraven k nabíjení, neprobíhá generování PWM, ale na vodiči CP je udržována hodnota 12 V, případně nižší v závislosti na rezistoru připojeném na straně vozu. Přehled jednotlivých stavů, ve kterých se nabíjecí stojan s připojeným vozidlem mohou nacházet, je v tabulce 24. Stavový diagram, který zachycuje možné přechody, je na obrázku 36.[55]

Tabulka 24 - Specifikace stavů systému [55]

Stav	Vozidlo připojeno k nabíjecí stanici	Vozidlo připraveno na nabíjení	Nabíjecí stanice připravena na nabíjení	Nabíjení	Vysoká úroveň signálu (V)	Nízká úroveň signálu (V)
A1	ne	ne	ne	neprobíhá	12	-
A2	ne	ne	ano	neprobíhá	12	-12
B1	ano	ne	ne	neprobíhá	9	-
B2	ano	ne	ano	neprobíhá	9	-12
C1	ano	ano	ne	neprobíhá	6	-
C2	ano	ano	ano	probíhá	6	-12
D1	ano	ano	ne	neprobíhá	3	-
D2	ano	ano	ano	probíhá	3	-12
E	ano	ano	ne	neprobíhá	0	-
F	ano	ano	ne	neprobíhá	-	-12



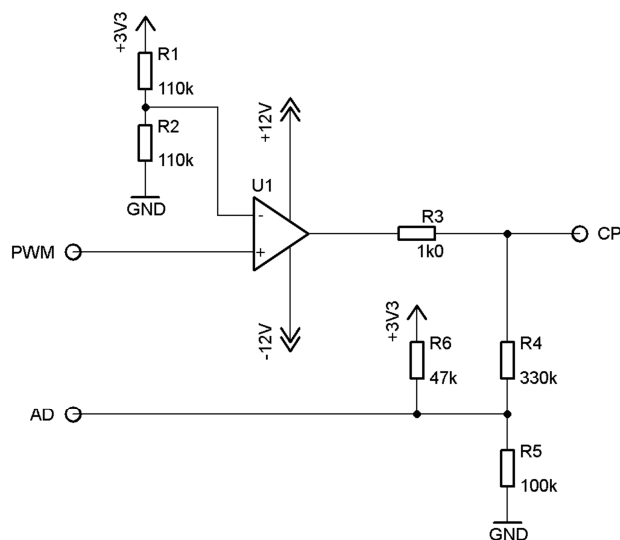
Obrázek 36 - Stavový diagram nabíjení [55]

Pro řídicí mikrokontrolér, který bude komunikaci přes vodič CP obstarávat, tento proces v první řadě znamená generování PWM signálu s frekvencí 1 kHz. Střída bude nastavitelná podle informací z nadřazeného systému v nabíjecím stojanu. Tabulka 25 zachycuje její nastavení v závislosti na povoleném nabíjecím proudu.

Tabulka 25 - Určení plnění PWM podle proudu [55]

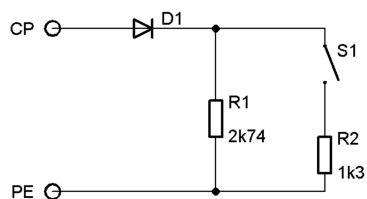
Rozsah proudu (A)	Plnění PWM (%)
6 až 51	$PWM_{DUTY} = \frac{I}{0,6}$
51 až 80	$PWM_{DUTY} = \frac{I}{2,5} + 64$

Generovaný signál je zapotřebí převést z rozsahu 0–3,3 V (napájení mikrokontroléru) na ± 12 V. Tento průběh musí být zpětně měřen přes AD převodník mikrokontroléru, aby mohl být zjišťován stav vozidla. Vstupní rozsah AD převodníku je shodný s napájecím napětím mikrokontroléru, tedy 0–3,3 V. Proto musí opět dojít k převodu výstupního signálu. Schéma zapojení pro tyto úpravy je na obrázku 37. Díky zapojení rezistorů R_4 , R_5 a R_6 je rozsah ± 12 V převeden na napětí 0,8 V až 3,2 V. Je tedy možné měřit i záporné hodnoty, kterými bývají signalizovány chyby vzniklé během komunikace.



Obrázek 37 - Schéma zapojení pro realizaci napěťových převodů

Funkce pro generování PWM signálu, nastavení jeho střídání podle požadovaného proudu a zpětné měření hodnoty byly přidány přímo do projektu s operačním systémem FreeRTOS a komunikací přes Ethernet. Aby mohla být funkčnost ověřena, byl vyroben testovací přípravek zajišťující převody napětí a druhý simulující připojené vozidlo. U něj se jedná pouze o jednoduché zapojení s rezistory, diodou a spínačem, které je na obrázku 38.

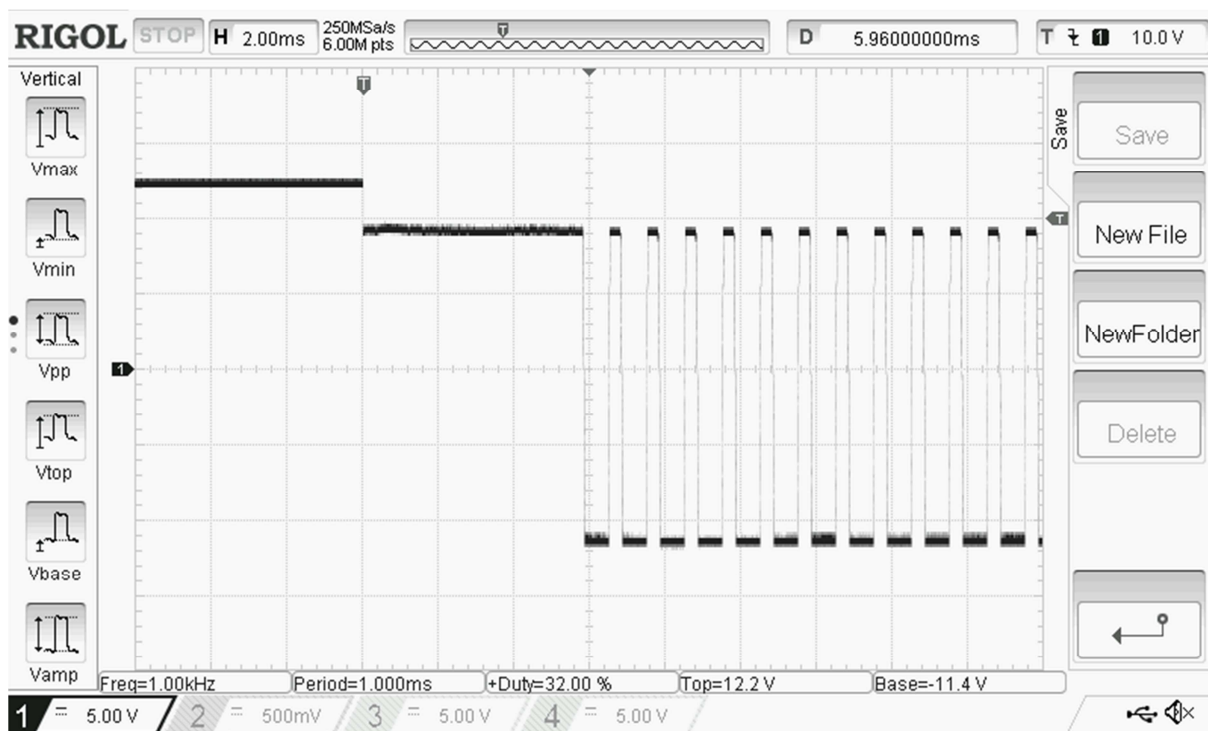


Obrázek 38 - Schéma zapojení přípravku pro simulaci elektromobilu

Během testování byla mikrokontrolérem s 12bitovým AD převodníkem měřena napěťová hodnota PWM signálu, vrchní i spodní úroveň. Údaje pro jednotlivé stavy napěťových hodnot jsou zaznamenány v tabulce 26. Ukázka průběhu signálu na vodiči CP je na obrázku 39. Nejprve je na vodiči CP 12 V, což znamená, že není připojeno vozidlo, resp. testovací přípravek pro jeho simulaci. V tomto stavu se jedná o stejnosměrné napětí, není potřeba signalizovat, že je nabíjecí stanice připravena k nabíjení. Poté dojde ke snížení napětí na 9 V v důsledku připojení vozidla. V testovacím programu je definováno, že jakmile dojde ke zjištění této skutečnosti, začne se generovat PWM průběh, tedy probíhá signalizace, že může být zahájeno nabíjení.

Tabulka 26 - Hodnoty napětí PWM signálu

Předepsaná hodnota (V)	Změřená hodnota (V)	Hodnota na vstupu AD převodníku (V)	Digitální hodnota v mikrokontroléru (-)
12	12,00	3,13	3903
9	9,02	2,86	3572
6	5,99	2,56	3206
-12	-11,70	0,85	1060



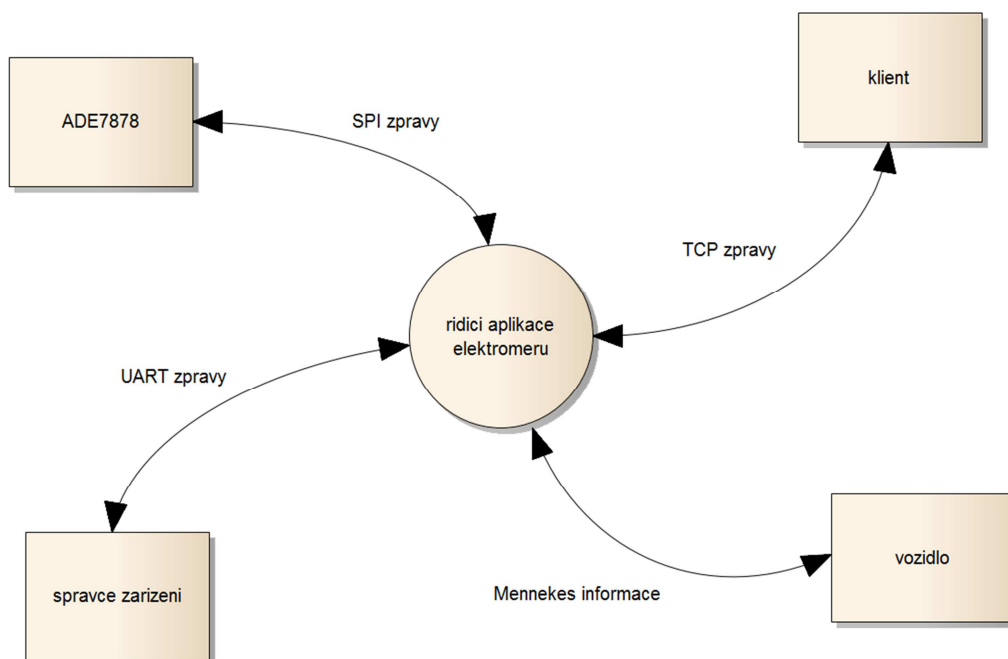
Obrázek 39 - Naměřený průběh z komunikačního vodiče CP

7 Realizace samostatného elektroměru

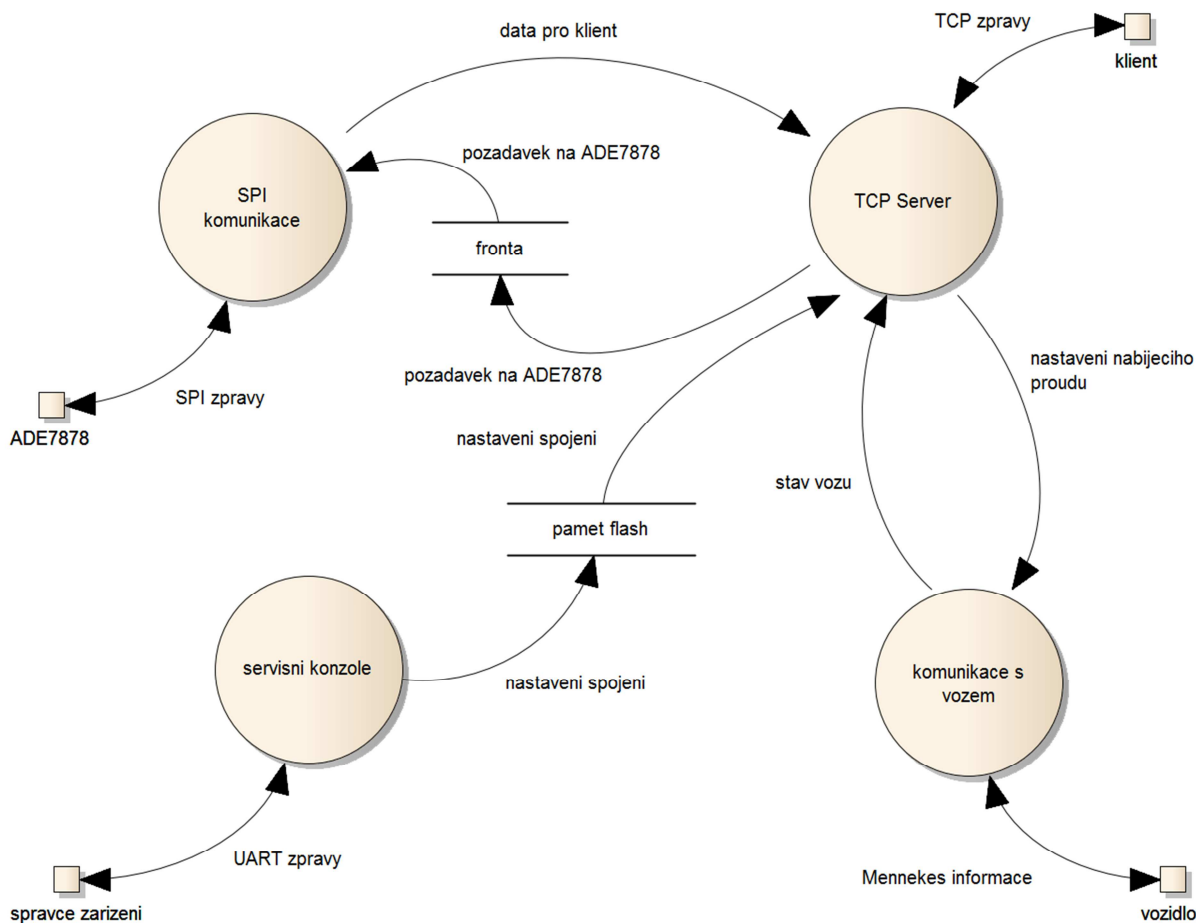
V předchozích částech práce byly popsány jednotlivé části, ze kterých se elektroměr skládá. Jednalo se o hardwarové prvky i části softwaru. Na základě jejich zprovoznění a ověření funkce může být následně vytvořen vlastní elektroměr. Nejprve proběhne vytvoření programu pro mikrokontrolér, který bude obsahovat všechny požadované funkce. K jeho otestování a ladění budou ještě použity vývojové desky a moduly, které budou navzájem propojeny. Poté bude navržen vlastní plošný spoj zahrnující všechny části elektroměru. Po jeho vyrobení a osazení bude přizpůsoben vytvořený program konkrétnímu zapojení.

7.1 Spojení dílčích softwarových částí

Během testování komunikace přes Ethernet bylo přistoupeno k použití operačního systému FreeRTOS, který poběží na řídicím mikrokontroléru. Umožní především oddělení jednotlivých činností do samostatných vláken a jejich pseudoparalelní chod. Pro vzájemnou interakci jednotlivých částí programu, která bude spočívat v předávání dat, mohou být využity nástroje pro komunikaci mezi vlákny. Do ní spadají fronty, semaforey nebo také mutexy.



Obrázek 40 - Kontextový diagram



Obrázek 41 - Diagram datových toků

Tabulka 27 - Datový slovník

Název	Datový typ	Popis
TCP zpravy	textový řetězec	zpráva podle protokolu popsaného v části 7.1.2
požadavek na ADE7878	struktura	struktura obsahující specifikaci operace čtení/zápis, adresu registru, délku dat a případně zapisovanou hodnotu
SPI zpravy	pole bajtů	posloupnost hodnot pro komunikaci s obvodem ADE7878 v pořadí operace, adresa registru, data
data pro klient	pole bajtů	hodnota vyčtená z obvodu ADE7878
nastaveni nabijeciho proudu	celé číslo	celočíslná hodnota proudu v A
Mennekes informace	PWM signál	signál se střídou určující velikost nabíjecího proudu a napěťovými úrovněmi pro informaci o stavu vozu
stav vozu	celé číslo	číslo udávající aktuální stav vozu, k reprezentaci může být využit výčetový datový typ

UART zpravy	znaky	zprávy od uživatele z konzole a reakce na ně, komunikace probíhá po jednotlivých znacích
nastavení spojení	pole celých čísel	skupina čísel se statickou IP adresou a nastavením využití DHCP

Diagramy na obrázcích 40 a 41 a příslušný datový slovník v tabulce 27 zachycují strukturu, kterou by měl mít program řídicího mikrokontroléru. Skládá se ze základních čtyř částí, které jsou reprezentovány buď samostatnými vlákny, nebo obsluhou určitého přerušení. Dále je také znázorněna komunikace mezi těmito částmi.

Komunikaci s dalšími zařízeními přes Ethernet zajišťuje vlákno pro realizaci TCP serveru. Jak již bylo zmíněno dříve, je toto vlákno ve stavu blokace při čekání na připojení klientu a poté při čekání na přijetí zprávy. Priorita vlákna je 3, nicméně ve stavu blokace umožňuje spouštění ostatních vláken s nižší prioritou. Po přijetí zprávy v definovaném protokolu, který bude popsán dále, nejprve proběhne ověření kontrolního součtu. Pokud souhlasí, zpráva se zpracuje a na základě typu se provádí další činnost, primárně zaslání zprávy do vlákna pro SPI komunikaci nebo nastavení maximálního nabíjecího proudu.

Vlákno pro zajištění komunikace přes sběrnici SPI má prioritu 4, nicméně pokud od něj není vyžadována činnost, tedy je prázdná fronta, do které se zasílají jednotlivé požadavky, je blokováno. Prvky ve frontě mají podobu struktury, která obsahuje adresu registru, počet bajtů, s nimiž se má operovat, požadavek na čtení nebo zápis a data k zápisu. Po provedení příkazu čtení je vyčtená hodnota uložena do sdílené proměnné. Dokončení práce je signalizováno nastavením potvrzení, na které čeká vlákno TCP serveru. Až po jeho přečtení je odesílána informace zpátky klientu. V případě čtení energie se získá údaj o změně od posledního čtení a tato hodnota se přičte k akumulovanému údaji, který je poté odesílán klientu. Jestliže přijde požadavek na vynulování energie, dojde k vynulování akumulované hodnoty a také k vynulování hodnoty v měřicím obvodu.

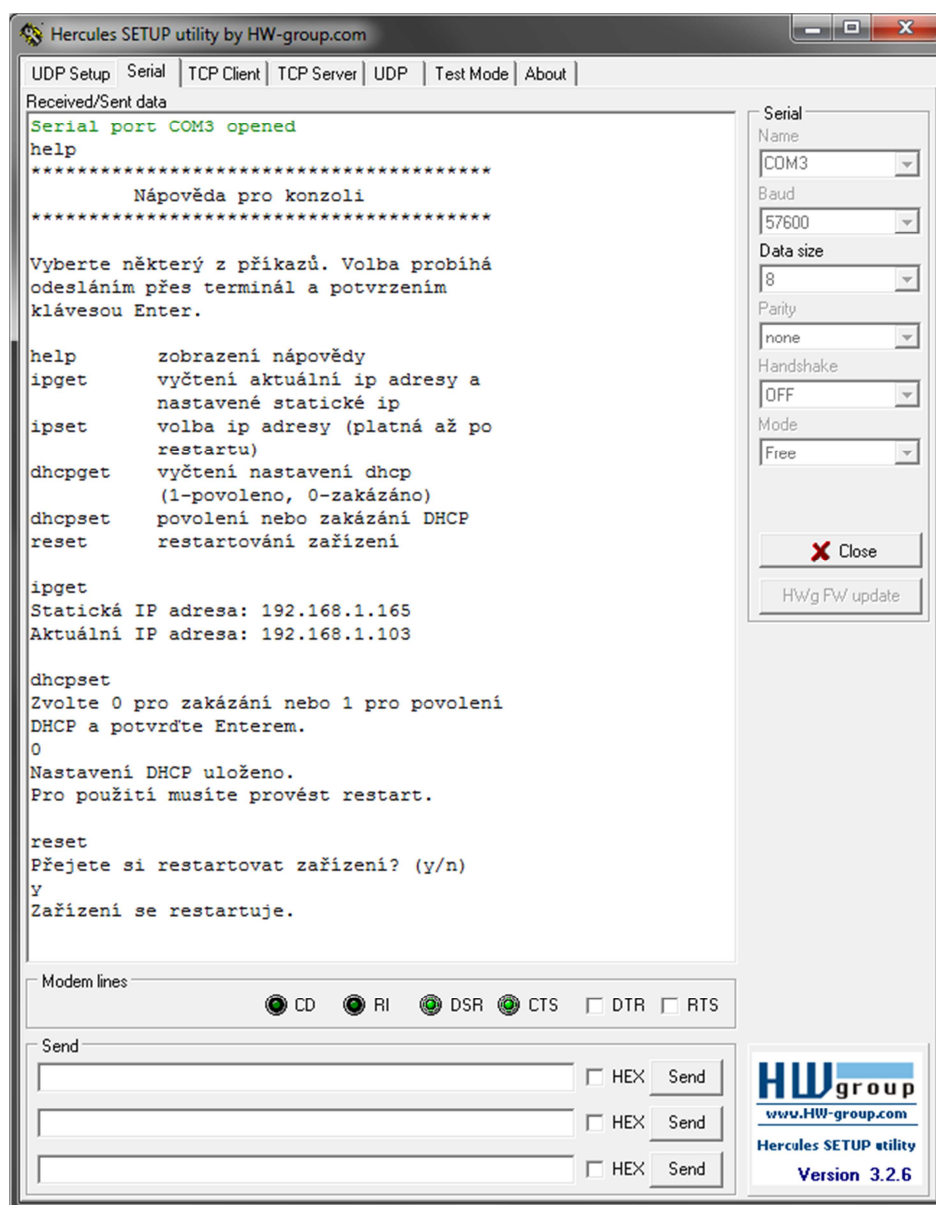
Část pro zajištění komunikace s vozidlem je realizována v rámci přerušení od časovače, který se stará o generování signálu PWM. Přerušování nastává ve chvíli, kdy má dojít k sestupné hraně. Než se tak stane, je měřena napěťová hodnota určující informaci od vozidla. Ukládá se do globální proměnné s využitím mutexu pro zajištění vylučného přístupu. Pokud je tato hodnota požadována klientem, probíhá její vyčtení ve vlákne TCP serveru opět přes mutex. Změna maximálního proudu a připravenosti nabíjecího stojanu se provádí přímo funkcemi, které tyto požadavky mění na plnění PWM signálu. K jeho změně se používá pomocný registr, aby nedošlo ke změně nastavení časovače v nevhodnou chvíli. Situace, kdy nemá být PWM signál generován, se řeší nastavením maximálního plnění.

Poslední část slouží pro obsluhu servisní komunikace přes rozhraní UART. Využívá se opět přerušování, které zpracovává jednotlivé přijaté znaky a neblokuje další činnost. Navíc lze předpokládat, že k nastavování nebude docházet přímo za provozu, ale spíše před jeho zahájením nebo v době údržby zařízení.

7.1.1 Konzole pro nastavení

Již na obrázku 41 lze vidět, že základní činnost programu skládající se ze tří částí popisovaných dříve byla doplněna o servisní konzoli. Pomocí ní může uživatel, resp. správce zařízení, provést jeho konfiguraci. V nabídce nastavení je možnost zadat elektroměru jeho statickou IP adresu

a povolit nebo zakázat získávání IP adresy z DHCP serveru. Tyto údaje se ukládají do paměti flash a jsou načteny po spuštění zařízení. Aby byly změny použity, je zapotřebí zařízení restartovat, což lze rovněž provést příkazem v této konzoli. Mezi další dostupné funkce patří vyčtení aktuálně použité IP adresy a nastavené statické IP (nemusí se shodovat) a zjištění, zda je povoleno využití DHCP. Ukázka výpisu z konzole při jejím použití je na obrázku 42. Při zadávání znaků probíhá rovněž jejich zpětné vypisování do konzole, takže obsluhující člověk přesně vidí, co zadal. V případě chyby je možné klávesou backspace znak i smazat. K potvrzování příkazů se používá Enter. Celá konzole byla tvořena tak, aby její použití působilo intuitivně. Proto je také dostupná nápověda, k jejímuž vyvolání slouží příkaz „help“, a vyžaduje-li zvolený příkaz zadávání dalších hodnot, je vypsána podrobná instruktaž. U zadávání IP adresy je také znemožněno zapisovat jiné znaky než číslice a oddělovací tečky.



Obrázek 42 - Ukázka komunikace přes servisní konzoli

7.1.2 Implementace komunikačního protokolu

Pro komunikaci přes Ethernet byl použit protokol, který je využíván v rámci nabíjecího stojanu. Umožňuje zasílat různorodé zprávy s variabilní délkou. Zároveň také poskytuje možnost kontroly správnosti doručené zprávy. Podoba rámce je v tabulce 28.

Tabulka 28 - Komunikační rámec

Počet bajtů	1	1	1	1	1	N-6	1
Význam	počáteční znak, 0x55	ID odesílatele	ID příjemce	délka zprávy N	příkaz	parametry (data)	kontrolní součet

Každá zpráva je uvedena stejným znakem s hodnotou 0x55. Následuje určení odesílatele a příjemce zprávy. Tyto údaje jsou zachovány z předchozího nasazení rámce a umožňují jeho použití i na sběrnicích. Zároveň slouží jako ověření chyby, zda zprávu nedostalo jiné zařízení, než mělo. Podle odesílatele může být také upravována reakce na příkaz. Následuje bajt udávající délku celého rámce v bajtech. Jednobajtový příkaz je následován dalšími parametry, které ale nemusí být uváděny. Posledním znakem je kontrolní součet zprávy. Je vypočten jako bitová operace XOR mezi všemi znaky rámce, tedy od počátečního znaku po poslední parametr.

Pro elektroměr bylo mezi volnými hodnotami vybráno ID 0x90. Zprávy, které s ním souvisí, budou začínat od příkazu 0x90. Seznam prvních zavedených zpráv je uveden v tabulce 29.

Tabulka 29 - Seznam příkazů pro elektroměr

Číslo příkazu	Význam	Parametry	Odpověď
0x90	zápis do obvodu ADE7878	2 bajty adresa registru, 1 až 4 bajty hodnota	1 bajt informace o provedení
0x91	vyčtení z obvodu ADE7878	2 bajty adresa registru, 1 bajt délka dat ke čtení	1 až 4 bajty vyčtená hodnota
0x92	vyčtení energie	1 bajt určující druh, viz tabulka 30	1 bajt určující druh, 4 bajty hodnota energie
0x93	vynulování energie	1 bajt určující druh, viz tabulka 30	1 bajt určující druh, 1 bajt informace o provedení
0x94	nastavení nabíjecího proudu	1 bajt hodnota proudu v A	1 bajt informace o provedení
0x95	aktivace/deaktivace PWM	1 bajt, číslo 0 odpovídá deaktivaci, 1 aktivaci	1 bajt informace o provedení
0x96	vyčtení stavu vozidla	žádné	1 bajt stav vozidla

Na každou zprávu zaslou z klientu se odpovídá. V odpovědi se používá stejné číslo příkazu, na který se reaguje, ale dochází k záměně ID odesílatele a příjemce. Při požadavku na čtení určité hodnoty je v parametrech právě tento údaj. Pokud je původní zpráva určena k nastavení nebo zadání nějaké veličiny, v parametrech odpovědi je informace o úspěšnosti provedení požadované činnosti nebo o druhu chyby, která nastala.

Tabulka 30 - Seznam druhů energií pro příkazy

Číslo	Název registru	Druh energie
0	AWATTHR	celková činná energie fáze A
1	BWATTHR	celková činná energie fáze B
2	CWATTHR	celková činná energie fáze C
3	AFWATTHR	činná energie fáze A základní harmonické
4	BFWATTHR	činná energie fáze B základní harmonické
5	CFWATTHR	činná energie fáze C základní harmonické
6	AVARHR	celková jalová energie fáze A
7	BVARHR	celková jalová energie fáze B
8	CVARHR	celková jalová energie fáze C
9	AFVARHR	jalová energie fáze A základní harmonické
10	BFVARHR	jalová energie fáze B základní harmonické
11	CFVARHR	jalová energie fáze C základní harmonické
12	AVAHR	celková zdánlivá energie fáze A
13	BVAHR	celková zdánlivá energie fáze B
14	CVAHR	celková zdánlivá energie fáze C

7.2 Návrh a výroba plošného spoje

Na samotný elektroměr jakožto fyzické zařízení je kladen nárok, aby se jednalo o modul, který může být upevněn na DIN lištu. K tomu se bude nejlépe hodit využít některý z dostupných konstrukčních boxů. Jeho rozměry budou udávat omezení na velikost plošného spoje, na kterém bude elektroměr realizován.

Před návrhem schématu bylo zapotřebí rozhodnout, které části zařízení by se měly nacházet v samostatných modulech a které ne. Aby byla zachována jistá univerzálnost elektroměru a bylo možné jej použít na testování v jiných systémech nebo jej přímo nasadit v určité aplikaci, bylo zvoleno, že na straně měření elektrické energie nebude elektroměr obsahovat konkrétní senzory proudu. Ty se k němu budou připojovat přes svorky, za kterými bude umístěna potřebná obvodová síť konfigurovatelná pro použití různých typů senzorů. Z hlediska měření napětí bude elektroměr obsahovat kompletní děliče a na jeho svorky se budou připojovat přímo fázové vodiče a vodič nulový. Na druhé straně nebude v rámci elektroměru zahrnut blok sloužící u komunikace s vozidlem k převodu PWM signálu na jiný napěťový rozsah ani část pro zpětnou úpravu signálu k měření. Tyto prvky budou tvořit samostatnou část umístěnou ve vlastní krabici. Spojení s řídicím mikrokontrolérem bude probíhat přes svorky, tudíž v případech, kdy nebude komunikace s vozem vyžadována, nebude elektroměr v sobě zahrnovat nepotřebné prvky, které by vedly k jeho větším rozměrům.

Elektroměr v sobě bude spojovat dvě části – první sloužící k měření požadovaných veličin a druhou starající se o distribuci dat a požadované řízení zařízení. Z bezpečnostních důvodů budou tyto dva bloky od sebe galvanicky odděleny přes digitální izolační prvky. Jejich napájení budou zajišťovat galvanicky oddělené DC/DC měniče. Jejich vstupní napětí je uzpůsobeno na 12 V, což je hodnota napětí používaná v nabíjecím stojanu.

Část pro zajištění měření obsahuje obvod ADE7878. Ten je zapojen podle dokumentace. Obvodové síť pro senzory proudu i senzory napětí jsou rovněž zapojeny dle doporučení výrobce.

Schéma zapojení bylo již dříve uvedeno na obrázcích 25 a 26. U děličů napětí je pro vrchní část použito sériové zapojení dvou rezistorů pro rozdělení napětí, které na nich může být. V návrhu byly pro tuto část zvoleny drátové varianty, které mají výrazně vyšší dovolené napětí než SMD rezistory.

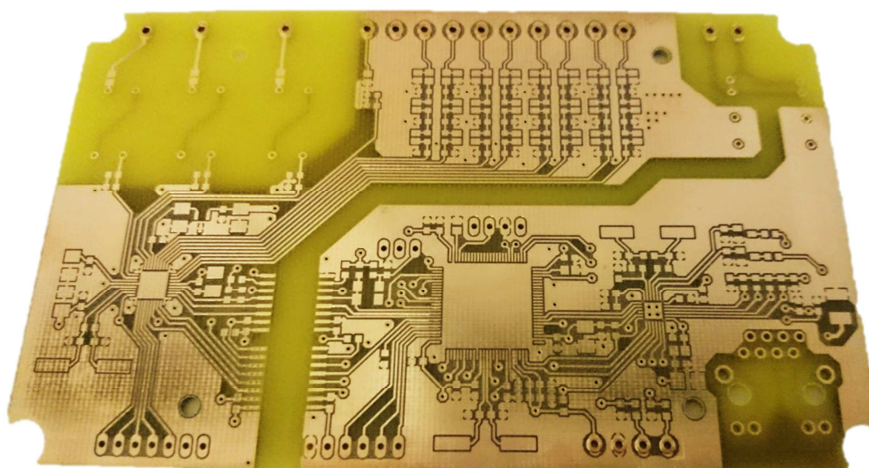
V případě mikrokontroléru se také jedná o zapojení podle dokumentace. To zahrnuje především sérii blokovacích kondenzátorů. Zapojení je doplněno o obvod pro realizaci fyzické vrstvy pro Ethernet a samotným konektorem, který obsahuje transformátory pro datové linky. Vnitřně je navržený konektor oddělený a k internímu společnému vodiči, který je vyveden přes sériově zapojený kondenzátor s vysokou izolační pevností, předepisuje dokumentace připojit další kondenzátor s izolační pevností 2 kV. Jelikož jsou na svorky pro připojení modulu pro komunikaci s vozem přivedeny přímo kontakty mikrokontroléru, jsou do zapojení přidány ESD (ElectroStatic Discharge) ochrany doplněné o sériově připojené rezistory s hodnotou 22 Ω , které zajišťují omezení případného proudu.

Po vytvoření schématu byly zběžně rozmístěny součástky na plochu plošného spoje. Z tohoto rozložení byly určeny přibližné potřebné rozměry, podle kterých byla vybrána krabička, do níž má být celý elektroměr umístěn. Výsledný prostor pro plošný spoj v krabičce činí 130×80 mm a zahrnuje osm konstrukčních otvorů. Krabička samotná je poměrně standardním používaným modelem umístovaným na DIN lištu. Je celkem vyšší, a proto bylo zvoleno osamostatnění předního panelu se signalizací na vlastní plošný spoj. Jeho součástí bude také vyvedené komunikační rozhraní UART, které bude pro zajištění bezpečnosti odděleno digitálním izolátorem. Od obvodu ADE7878 je na panel přivedeno pět signálů, na které jsou napojeny signalizační LED. K mikrokontroléru je touto cestou napojeno uživatelské tlačítko, tři signalizační LED a tlačítko pro restartování zařízení.

Modul pro umožnění komunikace s vozidlem byl posléze navržen tak, aby byl rovněž galvanicky oddělený od všech ostatních částí, jelikož u komunikace dochází k propojení země s ochranným vodičem PE. Směr přenosu od mikrokontroléru nepředstavoval problém, jelikož se jedná pouze o digitální signál. Zpětné měření ale využívá signálu analogového. Jelikož jsou izolátory analogových signálů poměrně drahé, byl ve výsledku zvolen přístup, kdy je měřený průběh modulován do podoby PWM signálu s výrazně vyšší frekvencí než 1 kHz. Jeho oddělení je následně snadné. Na mikrokontroléru bylo potřeba upravit vyčítání stavu vozidla z měření analogového signálu na měření frekvence signálu a jeho plnění pomocí časovače. Samotný proces modulace využívá čip určený pro tuto činnost, jelikož vlastní zapojení s operačními zesilovači nebylo ve vyšších frekvencích dostatečně kvalitní.

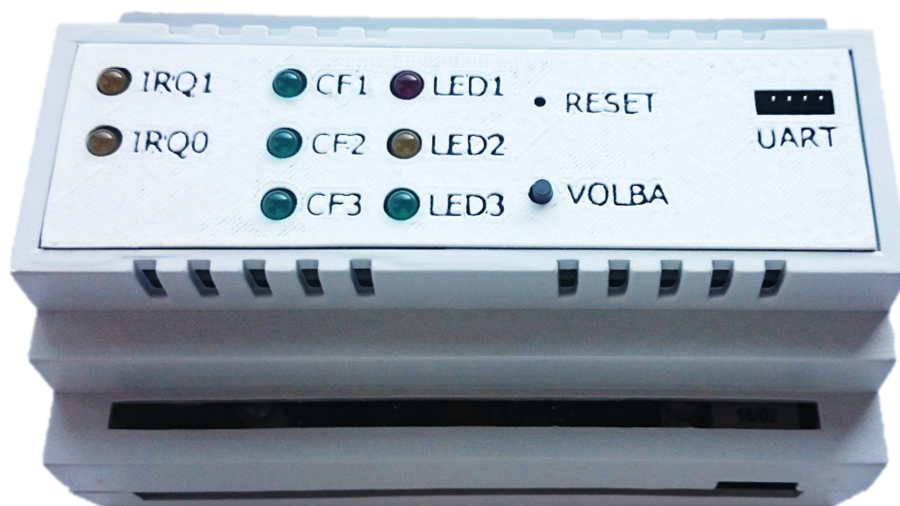
Navržený plošný spoj je dvouvrstvý a obsahuje součástky pouze na jedné straně. V maximální možné míře byly využívány SMD komponenty. Děliče pro snímání napětí byly umístovány dostatečně daleko od sebe, aby byla zajištěna požadovaná izolační pevnost mezi fázemi. Pro připojení fázových vodičů byly vybrány svorkovnice s dostatečně vysokým dovoleným napětím a roztečí 5 mm. Jelikož je reálná vzdálenost mezi ploškami pro jejich připájení na plošném spoji menší, nejsou pro připojení fázových napětí používány sousedící svorky, ale vždy až ty další. Díky tomu je nejmenší mezera mezi fázemi na plošném spoji větší než 8 mm.

U oddělení zmiňovaných dvou celků na plošném spoji byly použity izolační mezery přibližně 8 mm odpovídající rozteči kontaktů izolačních prvků. Obdobné mezery jsou použity také na předním panelu mezi jednotlivými částmi. Mezi samotnými cestami byly voleny nejmenší izolační mezery 0,3 mm a šířky datových spojů mají shodnou šířku. Pouze u bezvývodového pouzdra pro fyzickou vrstvu Ethernetu s jemnější roztečí byly použity na připojení v bezprostřední blízkosti tenčí spoje.



Obrázek 43 - Vyfrézovaný plošný spoj

Pro výrobu plošného spoje byla využita metoda frézování, která umožňuje i při prototypové výrobě dosahovat velmi kvalitních a přesných výsledků. Výsledný plošný spoj je na obrázku 43. K propojení vrstev byly využity speciální měděné nýty, které byly následně pro zajištění trvalého spojení pocínovány (viz příloha). Tato metoda spojování vrstev v nekomerční výrobě je výhodná kvůli téměř nulové výsledné výšce prokovu, což umožnilo také potřebné připojení středového kontaktu u obvodu pro Ethernet, který nebylo možné napojit jiným způsobem. Osazování probíhalo ručně s použitím mikropájky a horkovzdušné pájecí stanice. Výsledný plošný spoj byl zalakován kvůli zamezení korodování a izolaci. Krabice byla doplněna o přední kryt odpovídající signalizačnímu panelu, který byl vyroben pomocí 3D tiskárny s dvěma barvami filamentu, což umožnilo tvorbu popisků jako jeho součásti. Finální podoba elektroměru je na obrázku 44.



Obrázek 44 - Elektroměr umístěný v krabici s vlastním předním panelem

8 Testování funkčnosti elektroměru

U vyrobeného elektroměru byly při ožívování zkoušeny jednotlivé funkce. Pro celkové ověření základní funkčnosti byla zvolena dvě měření.

8.1 Měření elektrické energie

Jelikož je tato funkce naprostým základem, co má elektroměr umět, je samozřejmé, že musí být tato funkce ověřena. Pro tyto účely byl použit přípravek s proudovými transformátory vyrobený během testování měřicího obvodu na vývojové desce. Elektroměr byl při výrobě uzpůsoben tak, aby umožňoval měřit proudy s efektivní hodnotou do velikosti přibližně 2,6 A. Nejedná se tedy o žádnou finální úpravu pro zabudování do nabíjecího stojanu, ale variantu připravenou právě na testovací měření.

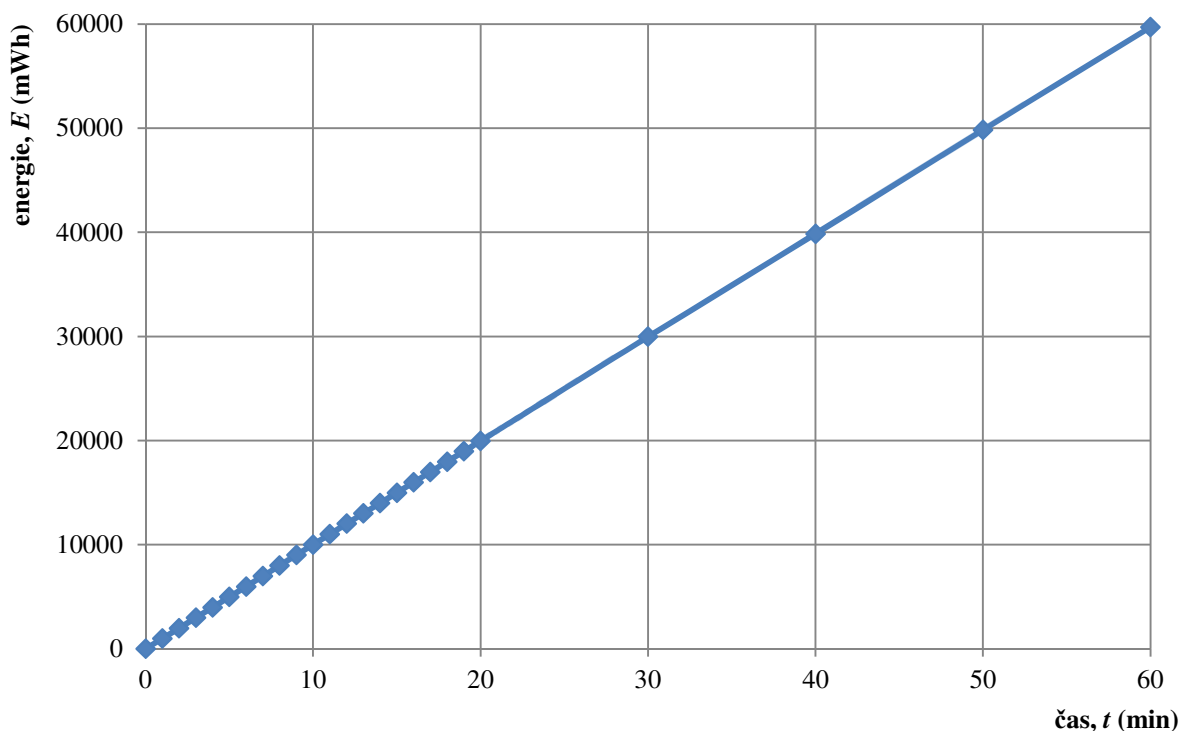
Testovací měření bude probíhat v běžné pracovní místnosti, tedy pouze na jedné fázi. Ideálním spotřebičem, který může představovat zátěž, je klasická žárovka. Jelikož má odporový charakter, bude vyčítán pouze údaj o celkové činné energii na příslušné fázi.

Před zahájením měření byla vynulována informace uložená v mikrokontroléru i v registrech obvodu ADE7878. Poté došlo k zapnutí lampy s 60W žárovkou a zahájení měření časového intervalu. Celé měření probíhalo po dobu jedné hodiny. V první části byla hodnota proudu vyčítána každou minutu, později v intervalu deseti minut. Přenos hodnot probíhal v hexadecimálním formátu. Údaje o energiích v registrech měřicího obvodu a tedy i mikrokontroléru jsou uchovávány v tisícinách Wh. Naměřená data jsou v tabulce 31.

Tabulka 31 - Naměřené hodnoty energie v čase

Čas (min)	Energie (-)	Energie (mWh)
1	0x03D8	984
2	0x07BC	1980
3	0x0BA3	2979
4	0x0F89	3977
5	0x136D	4973
6	0x1758	5976
7	0x1B45	6981
8	0x1F34	7988
9	0x2327	8999
10	0x2715	10005
11	0x2AFE	11006
12	0x2EE6	12006
13	0x32C6	12998
14	0x36A7	13991
15	0x3A89	14985
16	0x3E6C	15980
17	0x424A	16970
18	0x462D	17965
19	0x4A0E	18958

20	0x4DF3	19955
30	0x7509	29961
40	0x9BAD	39853
50	0xC2AF	49839
60	0xE93A	59706



Obrázek 45 - Graf spotřeby energie v čase

Graf na obrázku 45 zachycuje časový průběh spotřeby energie. Jak je vidět, je tato závislost lineární, což lze u obyčejné žárovky předpokládat. Je tedy zřejmé, že z tohoto hlediska probíhá měření správně.

Na základě příkonu uvedeného na žárovce je možné stanovit teoretickou hodnotu energie odebrané za jednu hodinu.

$$E = P \cdot t = 60 \cdot 3600 = 216000 \text{ J} = 216000 \text{ Ws} = 60 \text{ Wh} \quad (8.1)$$

Údaj z rovnice (8.1) je rovněž možné získat pouhou úvahou plynoucí z používané jednotky pro energii Wh. Při porovnání s naměřenou hodnotou z tabulky 31 jde vidět, že rozdíl je velmi malý, konkrétně 0,294 Wh. Odchylka může být způsobena řadou faktorů. V první řadě je měření elektroměru prozatím pouze informativní, jelikož neproběhla jeho kalibrace. Ta by se měla uskutečnit až s konkrétními proudovými senzory, které budou používány, a použitou obvodovou sítí. Zároveň by měla pokrývat i nepřesnosti způsobené rozptylem hodnot parametrů jednotlivých součástí. Dále je rovněž možné, že samotná žárovka nemá přesný příkon 60 W. Na základě naměřených hodnot je možné zpětně tuto hodnotu určit. Jak je vidět, vypočtená hodnota z rovnice (8.2) je velmi blízká udávanému údaji 60 W.

$$P = \frac{E}{t} = \frac{59706 \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{3600} = 59,706 \text{ W} \quad (8.2)$$

Během celého měření probíhalo vyčítání údajů přes Ethernet pomocí terminálu na počítači. Měření tedy rovněž ukazuje správnou funkci mikrokontroléru nejen z pohledu na komunikaci přes jednotlivá rozhraní, ale také z hlediska uchovávání informace o energii, která se vyčtením z obvodu ADE7878 v jeho registrech maže.

8.2 Ověření pulzního výstupu

Úkolem druhého testu bylo ověřit správnou funkčnost impulzních výstupů a jejich nastavení. K tomu byla opět využita lampa s 60W žárovkou. Jednotlivé impulzní výstupy byly inicializovány podle popisu v podkapitole 6.1.5, tedy s konstantou 6400 impulzů odpovídajícím jedné kWh a propojením výstupu CF1 s činnou energií.

Během testování byla měřena doba, za jakou bude na výstupu vygenerováno 10 impulzů. V prvním případě proběhlo vynulování registrů obsahujících informace o energii. Poté došlo k zapnutí lampy a současně zahájení měření času. Při desátém impulzu byl zaznamenán údaj o uplynulém čase, který byl 91 s. Na základě konstanty elektroměru bylo určeno v rovnici (8.3) množství energie odpovídající deseti impulzům. Zároveň bylo určeno teoretické množství odebrané energie podle příkonu žárovky a změřeného času. Výpočet je uveden v rovnici (8.4).

$$E_{10\text{imp}} = \frac{10}{MC} = \frac{10}{6400} = 1,5625 \cdot 10^{-3} \text{ kWh} = 1,5625 \text{ Wh} = 5625 \text{ Ws} \quad (8.3)$$

$$E_{\text{TEOR1}} = P \cdot t = 60 \cdot 91 = 5460 \text{ Ws} \quad (8.4)$$

Údaje se částečně liší, vezmeme-li jako vztažnou teoretickou hodnotu, je to o 3 %. Hlavním důvodem může být pravděpodobně způsob měření, kdy počáteční zapnutí a žhavení vlákna žárovky může způsobit zkreslení. Proto bylo provedeno druhé měření. Při něm byla lampa zapnuta před zahájením. Měření bylo aktivováno z počítače přes Ethernet a spolu s ním bylo zahájeno měření času. Po vygenerování deseti impulzů byla zaznamenána doba měření a zároveň vyčtena přes terminál hodnota energie. V tomto případě byl naměřen čas 95 s, kterému odpovídá teoretické množství energie určené v rovnici (8.5).

$$E_{\text{TEOR2}} = P \cdot t = 60 \cdot 95 = 5700 \text{ Ws} \quad (8.5)$$

Vezmeme-li opět teoretickou hodnotu jako vztažnou, je chyba údaje ze vztahu (8.3) pouze 1,3 %. Pro porovnání je také k dispozici údaj vyčtený přímo z elektroměru, podle nějž byla spotřebována energie 5616 Ws. Tato hodnota je téměř shodná s údajem, který odpovídá energii určené z počtu impulzů a nastavení elektroměru. Drobné odlišnosti mohly být způsobeny nepřesnou dobou zastavení měření, jelikož nebylo zautomatizováno a napojeno na generované impulzy, nýbrž prováděno manuálně. Pokud bychom ještě uvažovali příkon žárovky určený v prvním testu, tedy 59,7 W, výsledná energie 5671,5 Ws se ještě více blíží naměřeným hodnotám.

9 Závěr

Náplní této diplomové práce byl návrh a realizace elektroměru zaměřeného na použití v nabíjecím stojanu. Celé zařízení by ale nemělo být pouze jednostranně zaměřeno na tuto úlohu, mělo by umožňovat určitou možnost přizpůsobení a použití také v jiných aplikacích, například inteligentních domech pro získání potřebných informací o elektrické síti a toku energií.

Celá praktická část tohoto procesu byla rozdělena na čtyři části, které na sebe postupně navazovaly.

První z nich spočívala ve využití prototypových zařízení k otestování jednotlivých funkcí. Tou základní bylo samotné měření elektrické energie a případně dalších parametrů. K tomu byl vybrán obvod ADE7878 sloužící k měření na třífázové elektrické síti a získání informací o různých typech elektrické energie ve všech čtyřech kvadrantech i dalších veličinách, podle nichž je možné posuzovat stav sítě a její zatížení. Dále byla požadována komunikace s ostatními zařízeními přes rozhraní Ethernet. Za řídicí prvek pro zajištění předávání jednotlivých informací i dalších úkolů byl vybrán výkonný mikrokontrolér s jádrem ARM Cortex M4 s označením STM32F407. Z dostupných variant zajištění komunikace bylo zvoleno využití TCP zpráv. Pro elektroměr byla určena role serveru, ke kterému se přes IP adresu a port mohou připojit další zařízení a vyžádat si konkrétní údaje v době, kdy je potřebují. K zasílání požadavků a odpovědí byl implementován datový rámec, který byl již dříve nasazen v nabíjecím stojanu, aby do něj mohl být elektroměr posláno snadno zabudován. Pro možnost dalšího vývoje a zlepšování nabíjecího stojanu vznikl požadavek na zajištění komunikace s vozidlem. Tato funkce byla rovněž implementována do použitého mikrokontroléru a otestována na simulačním zařízení.

Ve druhé části byl vytvořen návrh softwarového řešení k propojení těchto funkcí do jednoho celku. Po zvážení možnosti přímé implementace nebo využití operačního systému byl jako základ programu pro mikrokontrolér použit systém FreeRTOS. Jeho nasazení přineslo dvě zásadní výhody. Tou první byla možnost rozdělit jednotlivé úlohy na samostatné bloky, pro jejichž vykonávání se dají použít vlákna. Druhá spočívá v pseudoparalelismu, který umožňuje na jednom procesorovém jádře efektivně přepínat mezi několika úlohami, což vytváří dojem souběžného vykonávání. Navíc bylo pro předávání dat mezi samostatnými částmi použito dostupných nástrojů, jako jsou fronty nebo mutexy v kombinaci se sdílenou pamětí. K otestování vytvořeného programu byly opět použity vývojové moduly propojené do jednoho celku.

Třetí část se týkala návrhu vlastního hardwaru elektroměru v podobě oboustranného plošného spoje s měřicí i řídicí oblastí. Během návrhu bylo dbáno na galvanické oddělení jednotlivých celků pro zajištění bezpečnosti. Plošný spoj byl vyroben pomocí prototypových prostředků, osazen všemi součástkami a zabudován do krabičky umožňující upevnění na DIN lištu. Ta byla ještě doplněna o kryt předního panelu se signalizačními prvky vytvořeného pomocí 3D tiskárny.

Poslední část spočívala v oživení elektroměru. Program vytvořený v druhé fázi vývoje byl přizpůsoben aktuálnímu zapojení elektroměru. Během toho byla postupně zkoušena funkčnost jednotlivých fyzických bloků a celků i částí programu. Finální testování se týkalo prověření funkčnosti elektroměru jako celku. Spočívalo v nastavení potřebných parametrů, které je prováděno samostatně po spuštění řídicího mikrokontroléru, a měření informace o odběru elektrické energie ze vzdáleného počítače, se kterým probíhala komunikace v rámci sítě Ethernet.

Mezi hlavní výhody realizovaného elektroměru bezesporu patří schopnost měřit širokou škálu různých údajů o elektrické síti, a to navíc na třech fázích. Tyto údaje poskytuje dalším zařízením přes

dnes stále více rozšířené rozhraní Ethernet. Protokol využitý pro přenos informací nabízí možnosti pro ověření správnosti dat, nicméně v případě potřeby použít elektroměr do jiné aplikace využívající již vlastní podobu datového rámce je možné provést v programu mikrokontroléru jeho úpravu. Bez zásahu do programu a nutnosti jej znovu nahrávat umožňuje elektroměr změnit svoji IP adresu i možnost využívat DHCP server k jejímu získání. Toto nastavení se v mikrokontroléru uchovává i při ztrátě napájení a snadno může být doplněno o další parametry.

Velkým přínosem pro nabíjecí stojan je zavedení komunikace s vozidlem podle používaných standardů. Díky tomu dochází k posunu nabíjení do módu 3, který kromě zvýšení bezpečnosti a možného zjednodušení obsluhy nabíjení umožňuje především reagovat na aktuální stav elektrické sítě a měnit dostupný nabíjecí proud. Informace o jeho velikosti je přenášena do připojeného vozidla přes komunikační linky. Tato funkce byla během vývoje elektroměru úspěšně vyzkoušena na simulačním zařízení. V aktuální podobě elektroměr nabízí hlavnímu řídicímu prvku nabíjecího stojanu všechny potřebné informace, na základě kterých má docházet podle definovaných pravidel například k přerušení nabíjení. Podle potřeby mohou být tyto rozhodovací procesy přidány do programu v elektroměru.

Při testech zařízení byly zkušebně vyčítány i jiné údaje. Informace o frekvenci sítě by mohla být označena za přesnou, jelikož její určování se odvíjí pouze od přesnosti použitých prvků, především krystalu. K jejímu ověření by mohl být použit jiný měřicí přístroj s dostatečnou přesností. Ta se u elektroměru v 50Hz síti pohybuje řádově v setinách Hz. Přesnost údaje o odběru elektrické energie byla celkem úspěšně ověřována pomocí jednoduchého měření, nicméně elektroměr v aktuální podobě neposkytuje informace o napětích a prouděch v požadovaných jednotkách. K tomuto účelu vyžaduje kalibraci s využitím přesného měřicího zařízení nebo přesného zdroje. Na základě naměřených hodnot a údajů z jiného zařízení se nastavuje přepočít v procesu stanovování proudů, napětí i výkonů tak, aby výsledné hodnoty používané pro určení energie opět odpovídaly. Tuto kalibraci je ale zapotřebí provést až s konkrétně vybranými a připojenými senzory, aby mohly být postihnuty i jejich vlastnosti týkající se například posunu fáze nebo aditivních i multiplikativních chyb.

Do budoucna by měl být elektroměr nasazen v testovacím nabíjecím stojanu, měla by proběhnout zmíněná kalibrace a ověřování jeho funkce. Po doplnění potřebné řídicí logiky v některém z prvků nabíjecího stojanu týkající se komunikace s vozidlem a opětovném měření na simulačních modulech by bylo vhodné vyzkoušet tuto činnost při připojení reálného elektromobilu, aby mohl být nabíjecí mód 3 dále běžně používán. Nicméně toto uplatnění elektroměru není jediné, své místo by mohl najít v již několikrát zmiňovaných inteligentních domech. Jedním z možných pohledů na věc je jeho nasazení pro vlastní potřebu inteligentního domu získávat informace o toku elektrické energie a dalších parametrech, případně provádění některých základních úkonů v podobě odpojení určitých prvků, ke kterým by byl přidružen. Druhým zajímavým směrem je použití pro budování takzvaných smart gridů. Informace z elektroměru by nebyly dostupné pouze interně, ale byly by poskytovány směrem k distributorovi a zároveň by elektroměr mohl získávat údaje o aktuálním dovoleném odběru energie. Celá tato myšlenka nicméně vyžaduje zavedení řady dalších zařízení jak pro předávání informací mezi distributorem a jednotlivými odběrateli energie, tak v rámci samotné budovy pro možnost řízení provozu spotřebičů nebo případně samostatných zdrojů. Důležitou součástí je rovněž skutečnost, nakolik by jednotliví odběratelé uzpůsobili své zvyklosti skutečnosti, že některé úkony závislé na elektrické energii, které nevyžadují bezprostřední provedení, by se vykonávaly v závislosti na podmínkách globálnějšího charakteru.

Seznam použité literatury

- [1] Prominent Professors: Sibrandus Stratingh (1785-1841). *University of Groningen* [online]. Nizozemsko, 2015 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.rug.nl/society-business/university-museum/prominent-professors/stratingh>
- [2] Historie elektromobility. *Elektromobilita: Skupina ČEZ* [online]. 2014 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.elektromobilita.cz/cs/o-nas/historie-elektromobility.html>
- [3] HORÁK, Bohumil, Kristýna FRIEDRISCHKOVÁ, Jiří KAZÁRIK, Jana NOWAKOVÁ a Zdeněk SLANINA. *Elektromobilita II: učební text*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3532-7. Dostupné také z: http://netfei.vsb.cz/downloads/autorske_texty/Elektromobilita%20II.pdf
- [4] Elektromobilita. *CNE Czech Nature Energy* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/energeticke-sluzby-1/elektromobilita/uvod-do-elektromobility/>
- [5] History. *Torpedo Kid* [online]. 2015 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: http://www.torpedokid.com/?page_id=41
- [6] První hybridní vůz postavil Čech. Buď Křižík nebo Porsche. *IDNES.cz* [online]. 2009 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/prvni-hybridni-vuz-postavil-cech-bud-krizik-nebo-porsche-pey-/automoto.aspx?c=A091023_002851_automoto_vok
- [7] ANSEAN, David, Manuela GONZALEZ, Juan Carlos VIERA, Juan Carlos ALVAREZ, Cecilio BLANCO a Victor Manuel GARCIA. Evaluation of LiFePO₄ batteries for Electric Vehicle applications. *2013 International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE)* [online]. IEEE, 2013, , 1-8 [cit. 2016-01-04]. DOI: 10.1109/SmartMILE.2013.6708211. ISBN 978-1-4799-2911-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6708211>
- [8] Připojení systému k nabíjecí stanici – klíčový prvek pro elektromobily. *Schneider Electric* [online]. Praha, 2011 [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.schneider-electric.cz/documents/product-services/en/product-launch/electric-vehicle/s1045.pdf>
- [9] Nabíjecí stanice pro elektromobily, druhy a použití. Jak nenaletět. *Hybrid.cz* [online]. 2014 [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/nabijeci-stance-pro-elektromobily-druhy-pouziti-jak-nealetet>
- [10] How to charge your Electric Vehicle safely and simply. *Schneider Electric* [online]. 2013 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://blog.schneider-electric.com/electric-vehicle/2013/04/24/how-to-charge-your-electric-vehicle-safely-and-simply/>
- [11] Infrastruktura pro nabíjení elektromobilů. *SolarTechnika.sk* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: http://www.solartechnika.sk/solarne_prislusenstvo/infrastruktura-pro-nabijeni-elektromobilu.html
- [12] Infrastructure components for electric mobility. *Incomet* [online]. 2012 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://fispriz.com/pdf/Mennekes/Mennekes%20EV%20Solutions%281%29.pdf>
- [13] Global product offering. *ABB* [online]. 2016 [cit. 2016-01-09]. Dostupné z: <http://new.abb.com/ev-charging/full-global-portfolio>
- [14] Electric Vehicle Charging Infrastructure: Terra multi-standard DC charging station 23. *ABB* [online]. Rijswijk, 2014 [cit. 2016-01-09]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/398adbadd2273436c1257d69003965cd/4EVC301505-LFEN_Terra23C-CT-CJ-CJG.pdf

- [15] Electric Vehicle Charging Infrastructure: Terra multi-standard DC charging station 53. *ABB* [online]. Rijswijk, 2014 [cit. 2016-01-09]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/67fec26aa8fea552c1257d690039af2d/4EVC204305-LFEN_Terra53C-CT-CJ-CJG.pdf
- [16] Terra 53 CJG. *ABB* [online]. 2016 [cit. 2016-01-09]. Dostupné z: <http://new.abb.com/ev-charging/multi-standard/terra-53-cjg>
- [17] Dobíjení na cestách. *Elektromobilita: Skupina ČEZ* [online]. 2015 [cit. 2016-01-09]. Dostupné z: <http://www.elektromobilita.cz/cs/dobijeni-na-cestach.html>
- [18] Dobíjecí stanice. *Elektromobilita: Skupina ČEZ* [online]. 2015 [cit. 2016-01-09]. Dostupné z: http://www.elektromobilita.cz/edee/content/file-other/elektromobilita/partneri/tk_dobijeci_stanice.pdf
- [19] Nabíjecí stanice pro elektromobily. *Ensto* [online]. 2014 [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: http://products.ensto.com/catalog/17898/Nab%C3%ADjec%C3%AD%20stanice%3Cbr%3Epro%20elektromobily_CZE1.html
- [20] Ensto Chago Point. *Ensto* [online]. 2014 [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: http://products.ensto.com/catalog/19425/Ensto%20Chago%20Point_CZE1.html
- [21] Ensto Chago eFill. *Ensto* [online]. 2014 [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: http://products.ensto.com/catalog/21652/Ensto%20Chago%20eFill_CZE1.html
- [22] Ensto Chago Station: Produktový list. *Ensto* [online]. 2014 [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: http://products.ensto.com/catalog/18154/product/30555/EVC100.xx_CZE1.html
- [23] Ensto Chago Pro. *Ensto* [online]. 2014 [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: http://products.ensto.com/catalog/26612/_CZE1.html
- [24] Ensto Chago Pro: Produktový list. *Ensto* [online]. 2014 [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: http://products.ensto.com/catalog/26612/product/47164/EVF200G-B_CZE1.html
- [25] Ensto Chago Power: Produktový list. *Ensto* [online]. 2014 [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: http://products.ensto.com/catalog/22866/product/41751/EVDC50.12.40_CZE1.html
- [26] EVlink: Řešení pro nabíjení elektromobilů. *Schneider Electric* [online]. 2014 [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: http://download.schneider-electric.com/files?p_Reference=S1362&p_EnDocType=Catalog&p_File_Id=435665570&p_File_Name=S1362.pdf
- [27] Recharging an electric vehicle can be done in less than 15 minutes!. *Schneider Electric* [online]. 2010 [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: http://www.schneider-electric.cz/documents/interactive-publications/evlink/en/9983997_ve12_gb_x1aquick/index.htm#/2
- [28] ZÁSUVKA 5P 32A/400V IP44 TWIST 125-6 *A6203. *ElPe CZ* [online]. 2015 [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <http://www.elektro-svitidla.com/zasuvka-5p-32a-400v-ip44-twist-125-6-a6203-ean001477-skup20505.php>
- [29] SAE standard on EV charging connector approved. *SAE International* [online]. 2010 [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <http://articles.sae.org/7479/>
- [30] How the J1772 charging standard for plug-in vehicles works. *EDN* [online]. 2013 [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <http://www.edn.com/electronics-blogs/automotive-currents/4421241/How-the-J1772-charging-standard-for-plug-in-vehicles-works>

- [31] Media information: Charging couplers Type 2 for AC and DC charging. *MENNEKES* [online]. Kirchhundem, 2011 [cit. 2016-01-13]. Dostupné z: http://www.mennekes.de/uploads/media/MENNEKES_Media_information_-_Charging_couplers_Type_2_for_AC_and_DC_charging.pdf
- [32] Type2 with Shutter. *MENNEKES* [online]. Kirchhundem, 2012 [cit. 2016-01-13]. Dostupné z: http://www.mennekes.de/uploads/media/Type2_with_Shutter_01.pdf
- [33] Type 2 charging plug proposed as the common standard for Europe. *MENNEKES* [online]. Kirchhundem, 2013 [cit. 2016-01-13]. Dostupné z: [http://www.mennekes.de/index.php?id=latest0&L=1&tx_ttnews\[tt_news\]=929&cHash=1fd716bc2fa538f0f516aac1b4d8d8ba](http://www.mennekes.de/index.php?id=latest0&L=1&tx_ttnews[tt_news]=929&cHash=1fd716bc2fa538f0f516aac1b4d8d8ba)
- [34] General Outline of "CHAdEMO Association". *TEPCO* [online]. 2010 [cit. 2016-01-14]. Dostupné z: http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu10_e/images/100315e1.pdf
- [35] Electric Vehicle Quick Charger Connector "KW1 Series" Has Received UL Certification. *JAE* [online]. 2013 [cit. 2016-01-14]. Dostupné z: <https://www.jae.com/en/releasesE/news-201304KW1-en.html>
- [36] Technology. *CHAdEMO* [online]. 2015 [cit. 2016-01-14]. Dostupné z: <http://www.chademo.com/wp/technology/strengths/>
- [37] What Are The Actual Power Limits of Available DC Quick Charging Standards? *InsideEVs* [online]. 2014 [cit. 2016-01-14]. Dostupné z: <http://insideevs.com/what-are-the-power-limits-of-available-dc-quick-charging-standards/>
- [38] Výrobci elektromobilů se dohodli na zástrčce. Nabíjet bude možné všude. *IDNES.cz* [online]. 2012 [cit. 2016-01-14]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/velke-automobilky-se-dohodly-na-spolecnem-dobijecim-standardu-elektromobilu-1ww-/automoto.aspx?c=A120520_164246_automoto_vok
- [39] Charging stations. *Silverstone* [online]. 2015 [cit. 2016-01-14]. Dostupné z: <https://www.silverstonegreenenergy.co.uk/services/electric-vehicle-charging/charging-station/>
- [40] Elektroměry: Historie a současnost. *PREměření* [online]. 2009 [cit. 2016-01-17]. Dostupné z: <https://www.premereni.cz/Files/dulezite-informace/ke-stazeni/tiskoviny-ke-stazeni/elektromery-historie-a-soucasnost/>
- [41] S0 měření. *Měření Energie SDS moduly* [online]. 2013 [cit. 2016-01-17]. Dostupné z: http://wiki.merenienergie.cz/index.php/S0_mereni
- [42] Komunikace s elektroměry dle normy ČSN EN 62056-21. *AMiT* [online]. 2010 [cit. 2016-01-17]. Dostupné z: http://www.amit.cz/support/cz/aplikacni_poznamky/ap0039_cz_01.pdf
- [43] M-BUS (Meter-Bus) - základní popis komunikačního protokolu. *Automatizace.HW.cz* [online]. 2010 [cit. 2016-01-17]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/mbus-meterbus-zakladni-popis-komunikacniho-modelu>
- [44] MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION V1.1b. *The Modbus Organization* [online]. 2006 [cit. 2016-01-17]. Dostupné z: http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b.pdf
- [45] WM40 96 (5A, panel). *Enika* [online]. 2015 [cit. 2016-01-17]. Dostupné z: <http://www.enika.cz/cz/komponenty-pro-automatizaci/mereni-elektricke-energie/elektromery-a-analyzatory/elektromery-stridave/trifazove-panel/wm40-96-%285a,-panel%29.html>
- [46] Jsou chytré elektroměry bezpečné? *Nazeleno.cz* [online]. 2013 [cit. 2016-01-25]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/jsou-chytre-elektromery-bezpecne.aspx>

- [47] RAJAKARUNA, Sumedha, Farhad SHAHNIA a Arindam GHOSH. *Plug in electric vehicles in smart grids: Charging Strategies*. 1. vyd. Springer Singapore, 2015. ISBN 978-981-2873-163.
- [48] ADE7854/ADE7858/ADE7868/ADE7878: Data Sheet. *Analog Devices* [online]. Norwood, 2014 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7854_7858_7868_7878.pdf
- [49] STM32 32-bit ARM Cortex MCUs. *STMicroelectronics* [online]. 2016 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: http://www2.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html?querycriteria=productId=SC1169
- [50] STM32F105xx STM32F107xx: Datasheet. *STMicroelectronics* [online]. 2015 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www2.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/e4/f3/1a/89/5a/02/46/ae/CD00220364.pdf/files/CD00220364.pdf/jcr:content/translations/en.CD00220364.pdf>
- [51] STM32F405xx STM32F407xx: Datasheet. *STMicroelectronics* [online]. 2016 [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www2.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/ef/92/76/6d/bb/c2/4f/f7/DM00037051.pdf/files/DM00037051.pdf/jcr:content/translations/en.DM00037051.pdf>
- [52] Evaluation Board User Guide: Evaluating the ADE7878 Energy Metering IC. *Analog Devices* [online]. Norwood, 2010 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/UG-146.pdf>
- [53] EVAL-ADE7878AEBZ. *DigiKey Electronics* [online]. 2015 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/product-detail/en/analog-devices-inc/EVAL-ADE7878AEBZ/EVAL-ADE7878AEBZ-ND/5011120>
- [54] Application Note: Analog Devices Energy (ADE) Products: Frequently Asked Questions (FAQs). *Analog Devices* [online]. Norwood, 2013 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-639.pdf>
- [55] ČSN EN 61851-1. Systém nabíjení elektrických vozidel vodivým propojením - Část 1: Všeobecné požadavky. 2. ed. Český normalizační institut, 2011.

Seznam příloh

Příloha č. 1	Schéma elektroměru	2 strany (I, II)
Příloha č. 2	Plošný spoj elektroměru	příloha na CD/DVD
Příloha č. 3	Osazovací list elektroměru	příloha na CD/DVD
Příloha č. 4	Seznam součástek pro elektroměr	příloha na CD/DVD
Příloha č. 5	Fotodokumentace elektroměru	příloha na CD/DVD
Příloha č. 6	Zdrojový kód programu pro mikrokontrolér	příloha na CD/DVD

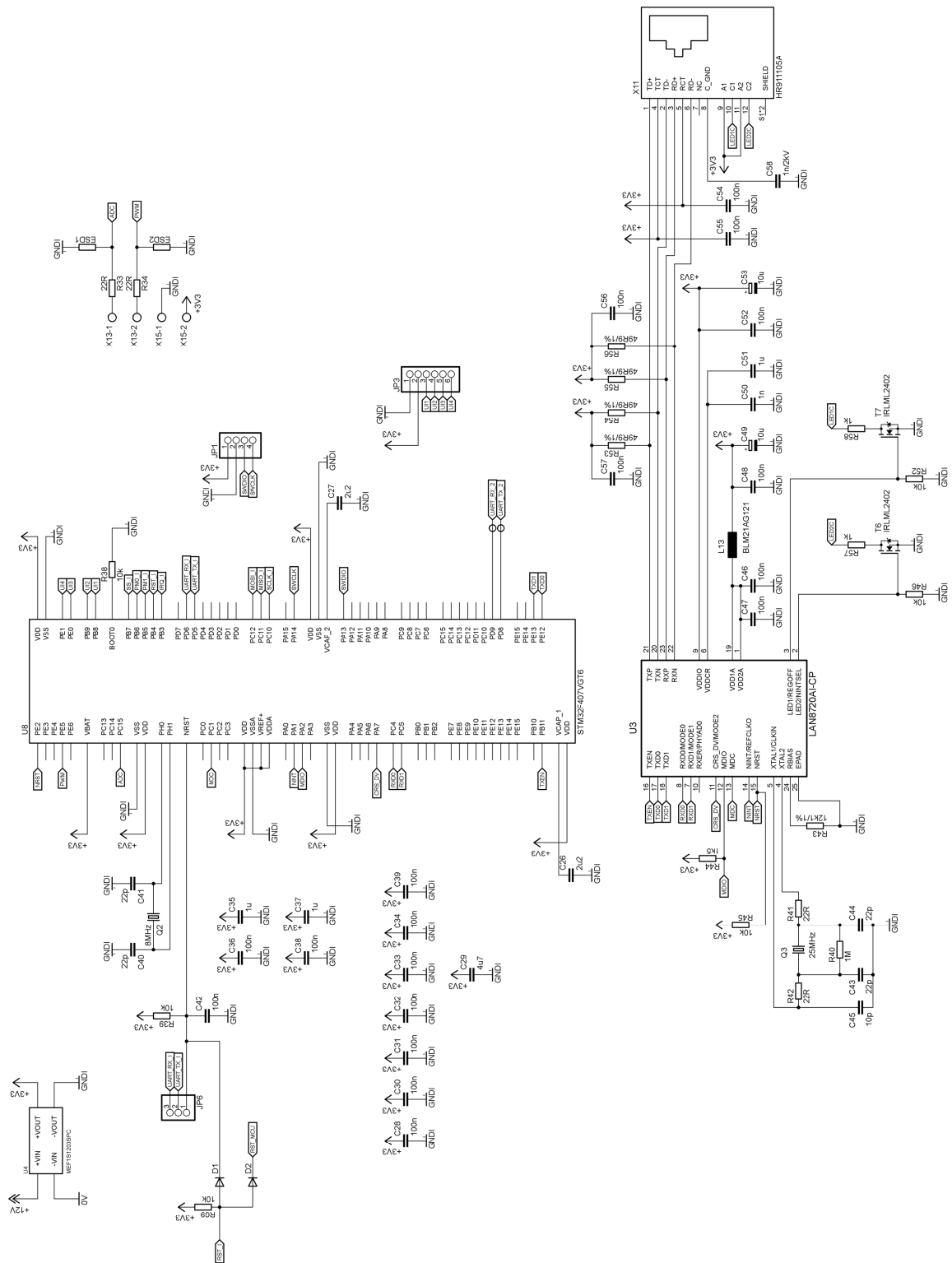


Schéma elektroměru, řídicí část