



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

**ZAŘÍZENÍ PRO MONITOROVÁNÍ KVALITY ELEKTRICKÉ
SÍTĚ**

QUALITY MONITORING DEVICE FOR ELECTRICAL POWER NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN BARTOŇ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK VAŠÍČEK, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce



Student: **Bartoň Jan, Bc.**
Program: Informační technologie Obor: Počítačové a vestavěné systémy
Název: **Zařízení pro monitorování kvality elektrické sítě**
Quality Monitoring Device for Electrical Power Networks
Kategorie: Vestavěné systémy

Zadání:

1. Seznamte se s problematikou vzdáleného monitorování kvality elektrické sítě. Zejména se zaměřte na způsob klasifikace a detekce jednotlivých typů anomálií.
2. Zvolte vhodnou výpočetní platformu (např. Nordic nRF9160) podporující některou z nízkopříkonových technologií bezdrátové komunikace (NB-IoT, LTE-M, Sigfox nebo LoRa) a navrhnete zařízení, které bude umožňovat vzdálené monitorování kvality elektrické sítě a reportovat případné anomálie na server včetně zachyceného vzorku dat. V závislosti na zvolené technologii případně doplňte zařízení o GSM modem umožňující objemnější datové přenosy. Snažte se o minimalizaci spotřeby el. energie (např. GSM modem aktivní pouze po detekované anomálii, kdy je nutné přenést vzorek dat). Pro analýzu parametrů elektrické sítě využijte pokud možno řešení v podobě existujícího integrovaného obvodu. Pro jednoduchost se lze omezit na monitorování kvality jednofázového rozvodu.
3. Navržené řešení implementujte formou prototypu.
4. Ověřte korektní činnost navrženého řešení, vyhodnoťte a diskutujte jeho parametry a případná rozšíření.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Splnění bodů 1 a 2 zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Vašíček Zdeněk, doc. Ing., Ph.D.**

Vedoucí ústavu: Sekanina Lukáš, prof. Ing., Ph.D.

Datum zadání: 1. listopadu 2019

Datum odevzdání: 20. května 2020

Datum schválení: 25. října 2019

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá parametry kvality elektrické energie. Cílem práce je navrhnout a implementovat prototyp zařízení, které umožní vzdálené měření kvality elektrické energie. Navržený systém používá k přenosu dat technologii NB-IoT. Systém umožňuje vzdálené měření důležitých parametrů elektrické energie, jako např. velikost napájecího napětí nebo kmitočet sítě. Zařízení umí měřit elektrický proud, průměrné hodnoty napětí a detekovat napěťové události typu dip/swell. Zařízení vyčítá vzorkovaný elektrický signál vhodný pro harmonickou analýzu. Zařízení má nakročeno k splnění požadavků na měřicí zařízení třídy S dle ČSN EN 61000-3-40.

Abstract

The diploma thesis deals with the parameters of electricity quality. The aim of this work is to design and implement a prototype device that will allow remote measurement of power quality. The proposed system uses NB-IoT technology for data transmission. The system enables remote measurement of important parameters of electrical energy, such as the magnitude of the supply voltage or the frequency of the electric network. The device can measure electric current, average voltage values and detect dip / swell voltage events. The device reads a sampled electrical signal suitable for harmonic analysis. The device has started to meet the requirements for measuring device of class S according to EN 61000-3-40.

Klíčová slova

měření kvality elektrické energie, nRF9160, ADE9000, vestavěný systém, NB-IoT, Zephyr, MQTT

Keywords

power quality measurement, nRF9160, ADE9000, embedded system, NB-IoT, Zephyr, MQTT

Citace

BARTOŇ, Jan. *Zařízení pro monitorování kvality elektrické sítě*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Vašíček, Ph.D.

Zařízení pro monitorování kvality elektrické sítě

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Zdeňka Vašíčka, Ph.D. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....
Jan Bartoň
10. června 2020

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu práce doc. Ing. Zdeňkovi Vašíčkovi, Ph.D. za odborné vedení, užitečné rady a velkou ochotu při řešení problémů. Dále děkuji společnosti Vodafone Czech Republic a.s. za možnost přístupu do NB-IoT sítě a panu Ing. Pavlu Maškovi, Ph.D. za ochotné zprostředkování a technickou podporu. Děkuji také panu Ing. Václavu Šimkovi za poskytnutí potřebného vybavení a za pomoc při osazování desky.

Nemohu zapomenout na své rodinné příslušníky, kteří mě v mé práci podporovali. Děkuji především mé ženě Adélce za její trpělivost při mém pracovním nasazení. Také chci poděkovat rodičům, za hmotnou i nehmotnou podporu při studiu. Děkuji také prarodičům Bartoňovým za jejich povzbudivá slova a podporu. Za podporu také děkuji rodině Slováčkové.

Nakonec chci poděkovat všem přátelům, kteří mi dodávali sílu a pomáhali mi po technické i lidské stránce. Jsou to především Viktor Kovařík, Juraj Kubiš, Martina Grzybowskiá, Patrik Vele, Filip Jašek, Miroslav Kažimír, Tomáš Goldmann, Michal Martin, Ivo Juráček, Matěj Halaš, Vendy Tajzlerová, Vojtěch Bařinka a další.

Obsah

1	Úvod	5
2	Problematika kvality elektrické energie	6
2.1	Kmitočet sítě	7
2.2	Velikost napájecího napětí	7
2.3	Odchyšky napájecího napětí	7
2.4	Rychlé změny napětí	8
2.5	Flikr	8
2.6	Krátkodobé poklesy/zvýšení napájecího napětí (dip/swell)	9
2.7	Krátkodobá a dlouhodobá přerušování napájecího napětí	10
2.8	Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí	10
2.9	Přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí	10
2.10	Nesymetrie napájecího napětí	10
2.11	Harmonická napětí	11
2.12	Meziharmonická napětí	11
2.13	Úrovně napětí signálů v napájecím napětí	12
3	Návrh řešení	13
3.1	Měření kvality elektrické energie	13
3.2	Bezdrátový přenos dat	14
3.3	Další použité technologie	16
3.4	Návrh prototypu	18
4	Implementace	21
4.1	Prototyp	21
4.2	Vývojové nástroje	23
4.3	Obsluha ADE9000	26
4.4	Události v systému	29
4.5	SD karta	30
4.6	Parametry kvality	30
4.7	Komunikace	36
5	Praktické ověření navrženého prototypu	43
5.1	Připojení do sítě nízkého napětí	43
5.2	Testování komunikace	44
5.3	Kalibrace	45
5.4	Testování měřících funkcí prototypu	47

6 Závěr	48
Literatura	49
A Schéma a rozložení desky měřicí části prototypu	51
B Blokové schéma systému	54
C Propojení částí prototypu	56
D Seznam součástek	59

Seznam obrázků

2.1	Maximální úrovně napětí na kmitočtech signálů v procentech U_c ve veřejných distribučních sítích vn. Převzato z [13].	12
3.1	Funkčně blokové schéma obvodu ADE9000. Převzato z [3].	14
3.2	Funkčně blokové schéma obvodu nRF9160. Převzato z [11].	15
3.3	Měřicí část prototypu	19
3.4	Vývojová deska PCA10090 v0.8.2 kitu nRF9160 DK	20
4.1	Napěťový průběh měřicí cívky SCT013-030. Převzato z [16]	22
4.2	Měřicí cívka SCT013-030	22
4.3	Čtečka SD karet. Převzato od RobotDyn	22
4.4	Nordic Semiconductor LTE Link Monitor	23
4.5	SEGGER Embedded Studio for ARM	23
4.6	Blokové schéma nRF Connect SDK. Převzato od Nordic Semiconductor . .	24
4.7	Hlavička zprávy SPI. Převzato z [3]	26
4.8	Příklad SPI komunikace. Převzato z [3]	27
5.1	MQTT Explorer	44
5.2	Vizualizace dat z Waveform bufferu - průběh napětí 1. fáze	47
C.1	Propojení komponent prototypu	57
C.2	Připojení prototypu do sítě	58

Seznam tabulek

2.1	Maximální přípustné hodnoty změn napětí. Převzato z [13].	8
2.2	Klasifikace krátkodobých poklesů napětí trojfázové sítě. Převzato z [13]. . .	9
2.3	Klasifikace krátkodobých zvýšení napětí. Převzato z [13].	9
2.4	Třídy přerušení napájecího napětí. Převzato z [13].	10
2.5	Maximální povolené hodnoty pro jednotlivé harmonické napětí vyjádřeny v procentech z U_{jm} . Převzato z [13].	11
4.1	Shrnutí implementace jednotlivých parametrů napětí	35
C.1	Propojení měřicí části ADE9000 s vývojovou deskou PCA10090 při napájení z USB (přepínač na měřicí části v poloze OFF)	56
C.2	Propojení měřicí části ADE9000 s vývojovou deskou PCA10090 při napájení ze sítě (přepínač na měřicí části v poloze ON)	56
C.3	Propojení čtečky SD karet s vývojovou deskou PCA10090	57
D.1	Seznam součástek použitých na měřicí desce	60
D.2	Seznam ostatních součástek a komponent systému	60

Kapitola 1

Úvod

Se zaváděním nových typů elektrospotřebičů (elektroautomobily, elektrokola, elektrokoloběžky, nové typy spotřební elektroniky) zvyšujících poptávku po elektrické energii a trendem decentralizace zdrojů elektrické energie se stává zajištění bezproblémové dodávky a distribuce elektrické energii komplexnější a je na ni kladen čím dál větší důraz. Na významu nabývá problematika měření a online monitorování kvality elektrické sítě.

Cílem práce je návrh a realizace moderního IoT systému pro vzdálené monitorování kvality elektrické sítě, který má potenciál splnit parametry měřicího zařízení třídy S dle normy ČSN EN 61000-4-30 [21]. Zařízení monitorující kvalitu elektrické sítě bude umožňovat vykonávat harmonickou analýzu, měřit výkyvy napětí (označované jako dip/swell) a umožňovat detekci, běžnými technikami těžce odhalitelných, nestandardních událostí jako je např. tzv. flickr, apod. Zařízení také umožní vizualizaci napěťových a proudových průběhů v čase včetně vzniklých anomálií.

Pro komunikaci je využita technologie NB-IoT, která nabízí vysokou propustnost signálu a oboustrannou komunikaci. Měřicí zařízení lze proto bez problému umístit uvnitř rozvodných sítí a v lokalitách, kde je pokrytí signálem GSM nedostatečné.

Práce je vedena směrem k dosažení stavu reálného produktu, který bude schopen obstát na trhu. Bude brán v úvahu standard kvality napětí definovaný v Pravidlech provozování distribučních soustav [13], které schvaluje Energetický regulační úřad, Tyto pravidla vychází z normy ČSN EN 50160 [18].

Kapitola 2 vysvětluje pojem kvality elektrické energie a popisuje jednotlivé parametry kvality. Kapitola 3 popisuje návrh a základní strukturu prototypu měřicího zařízení. Kapitola 4 popisuje vytvořený prototyp, jeho funkcionalitu a komunikační protokol. Kapitola 5 popisuje testování funkcionality a kalibraci prototypu. Přílohy obsahují schéma navržené desky, blokové schéma systému, propojení částí systému a seznam použitých součástek.

Kapitola 2

Problematika kvality elektrické energie

Elektrický výkon je úměrně závislý na napětí a proudu. Dodavatelé elektrické energie mohou ovlivňovat parametry napětí, ale nemohou efektivně ovládat odběrové proudy. Z tohoto důvodu je za kvalitu elektrické energie zvolena kvalita napětí [5].

Kvalita napětí je dle normy ČSN EN 50160 [18] definována charakteristikami napětí v daném bodě elektrické soustavy, porovnávány s mezními, případně informativními velikostmi referenčních technických parametrů. Norma ČSN EN 50160 [18] definuje následující charakteristiky kvality napětí, které jsou všechny níže v podkapitolách rozebrány:

- kmitočet sítě
- velikost napájecího napětí
- odchylky napájecího napětí
- rychlé změny napětí
- flickr
- krátkodobé poklesy napájecího napětí
- krátkodobá a dlouhodobá přerušení napájecího napětí
- dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí
- přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí
- nesymetrie napájecího napětí
- harmonická napětí
- mezipharmonická napětí
- úrovně napětí signálů v napájecím napětí

Měření kvality napětí je doporučeno doplnit měřením proudů a z nich odvozených hodnot (např. harmonické zkreslení proudu, činný výkon, apod.). Tyto hodnoty jsou užitečné pro stanovení příčiny případné snížené kvality napětí [13].

V praxi v České republice definují požadavky na kvalitu napětí v síti nízkého napětí Pravidla provozování distribučních soustav, konkrétně Příloha 3 - Kvalita napětí v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení [13], které vycházejí z normy ČSN EN 50160 [18]. Dále jsou zde definovány metody měření napěťových charakteristik, které vycházejí z normy ČSN EN 61000-4-30 [21].

Následující podkapitoly vychází z výše zmíněných pravidel [13]. Jsou vždy popsány požadavky na jednotlivé parametry a způsoby jejich zjišťování. Jsou uvažovány charakteristiky pro síť nízkého napětí o frekvenci 50 Hz. Měření probíhá na všech fázích, pro vyhodnocení se udávají vždy nejhorsí hodnoty ze tří fází.

2.1 Kmitočet sítě

Norma ČSN EN 50160 [18] definuje kmitočet napájecího napětí jako kmitočet opakování základní vlny napájecího napětí měřený po dobu daného časového intervalu.

Minimální vyhodnocovací perioda měření je 1 týden.

Jmenovitý kmitočet napájecího napětí je 50 Hz. V normálních provozních podmínkách musí být střední hodnota kmitočtu základní harmonické, měřená v intervalu 10 s, v následujících mezích:

- u systémů se synchronním připojením k propojenému systému
 $50\text{ Hz} \pm 1\%$ (tj. 49,5 ...50,5 Hz) během 99,5 % roku
 $50\text{ Hz} + 4\% / - 6\%$ (tj. 47 ...52 Hz) během 100 % času
- u systémů bez synchronního připojení k propojenému systému (ostrovní napájecí systémy)
 $50\text{ Hz} \pm 2\%$ (tj. 49 ...51 Hz) během 95 % týdne
 $50\text{ Hz} \pm 15\%$ (tj. 42,5 ...57,5 Hz) během 100 % času

Pravidla provozování distribučních soustav [13] nepředpokládají dlouhodobé měření frekvence na sítích nízkého napětí.

2.2 Velikost napájecího napětí

Norma ČSN EN 50160 [18] definuje napájecí napětí jako efektivní hodnotu napětí v dané době v předávacím místě, měřená po dobu daného intervalu.

Měří se pravá efektivní hodnota (TRMS) v časovém intervalu 10 period napětí (0,2s) [18].

- Normalizované jmenovité napětí (mezi fázovým a středním vodičem) má efektivní hodnotu 230 V
- Normalizovaná sdružené napětí (mezi fázovými vodiči) má efektivní hodnotu 400 V

Povolené odchylky od napájecího napětí popisuje část 2.3 Odchylky napájecího napětí.

2.3 Odchylky napájecího napětí

Minimální vyhodnocovací perioda měření je 1 týden.

Uvažují se údaje získané mimo přerušení napájecího napětí. Vyhodnocují se 10 minutové intervaly a počítá se s průměrnou pravou efektivní hodnotou napájecího napětí v daném intervalu. Ta se podle normy ČSN EN 50160 [18] spočítá jako průměr ze 3000 hodnot pravé efektivní hodnoty napětí (viz podkapitola Velikost napájecího napětí 2.2) změřených za 10 period napětí (0,2 s). Předpokládejme, že $U_{jm} = 230 V$.

- 95% hodnot musí být v rozsahu $+6\% / - 10\% U_{jm}$ (tj. 207 ...243,8 V)
- 100% hodnot musí být v rozsahu $+10\% / - 15\% U_{jm}$ (tj. 195,5 ...253 V)

2.4 Rychlé změny napětí

Norma ČSN EN 50160 [18] definuje rychlou změnu napětí jako jednotlivou rychlou změnu efektivní hodnoty napětí mezi dvěma nebo více po sobě následujícími úrovněmi napětí, které trvají určitou, avšak nestanovenou dobu.

Efektivní hodnota rychlé změny napětí nesmí překročit v závislosti na četnosti výskytu hodnoty uvedené v tabulce 2.1. Měření se provádí v hodinových intervalech.

Četnost změn n	$\Delta U / U_{jm}$	
	vn	vvn
$n \leq 4$ za den	5 – 6%	3 – 5%
$n \leq 2$ za hodinu a > 4 za den	4%	3%
$2 < n \leq 10$ za hodinu	3%	2,5%

Tabulka 2.1: Maximální přípustné hodnoty změn napětí. Převzato z [13].

Pravidla provozování distribučních soustav [13] nevyžadují měření rychlých změn napětí na sítích nízkého napětí.

2.5 Flickr

Norma ČSN EN 50160 [18] definuje míru vjemu flickru jako vjem nestálosti zrakového vnímání vyvolaný světelným podnětem, jehož jas nebo spektrální rozložení kolísá v čase.

Minimální vyhodnocovací perioda měření je 1 týden.

Flickr je definován jako periodické změny efektivní hodnoty napětí v mezích dovolených odchylek napájecího napětí. Může se projevit blikáním světelných zdrojů [18]. Je charakterizován 2 mírami vjemu flickru:

- krátkodobý flickr (P_{st} short time) měřen v intervalu 10 minut
- dlouhodobý flickr (P_{lt} long time) měřen v intervalu 2 hodin vypočítán z posloupnosti 12 hodnot P_{st} použitím následujícího vztahu

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (2.1)$$

V případě dlouhodobého flikru nesmí při normálních provozních podmínkách 95% naměřených hodnot koeficient P_t přesáhnout hodnotu 1,0. Výpočet koeficientu popisuje norma ČSN EN 61000-4-15 [20].

Pravidla provozování distribučních soustav [13] ani ČSN EN 50160 [18] nedefinují limit pro krátkodobý flikr na sítích nízkého napětí.

2.6 Krátkodobé poklesy/zvýšení napájecího napětí (dip/swell)

Norma ČSN EN 50160 [18] definuje pokles napájecího napětí (dip) jako dočasný pokles napájecího napětí (efektivní hodnota) v napájecím bodě distribuční soustavy pod prahovou danou počáteční hodnotou. Norma ČSN EN 50160 [18] definuje zvýšené napájecího napětí (swell) jako dočasné zvýšené napětí (efektivní hodnota) v bodě soustavy elektrického napájení, nad daným počátečním prahem.

Minimální vyhodnocovací perioda měření je 1 rok.

Za pokles napájecího napětí je považováno snížení napětí pod 90% referenčního napětí. Je obecně způsobeno zkraty a poruchami v síti. Krátkodobé poklesy napětí (podpětí) jsou rozděleny do tříd dle tabulky 2.2.

Za zvýšení napájecího napětí je považováno zvýšení napětí nad 110% referenčního napětí. Je obecně způsobeno provozním spínáním, odpojením zátěže, apod. Krátkodobé zvýšení napětí (přepětí) jsou rozděleny do tříd dle tabulky 2.3.

Pravidla provozování distribučních soustav [13], ani norma ČSN EN 50160 [18] nedefinují limity pro krátkodobé poklesy napájecího napětí. Avšak pravidla provozování distribučních soustav [13] definují klasifikaci jednotlivých incidentů, viz tabulky 2.2 a 2.3.

Zbytkové napětí U v [%] U_{ref}	Doba trvání t							
	$10ms \leq t < 100ms$	$100ms \leq t < 200ms$	$200ms \leq t < 500ms$	$500ms \leq t < 1s$	$1s \leq t < 3s$	$3s \leq t < 5s$	$5s \leq t < 1min$	$1min \leq t < 3min$
$85 \leq U < 90$	A1*	A1**	A2*	A3*	A4*	A4**	A5*	A6*
$80 \leq U < 85$	A1***	A1****	A2**	A3**	A4***	A4****	A5**	A6**
$70 \leq U < 80$	B1*	B1**	B2	B3	B4*	B4**	B5	B6
$40 \leq U < 70$	C1*	C1**	C2	C3	C4*	C4**	C5	C6
$5 \leq U < 40$	D1*	D1**	D2	D3	D4*	D4**	D5	D6
$U < 5$	X1*	X1**	X2	X3	X4*	X4**	X5	X6

Tabulka 2.2: Klasifikace krátkodobých poklesů napětí trojfázové sítě. Převzato z [13].

Přebytečné napětí U v [%] U_{ref}	Doba trvání t							
	$10ms \leq t < 100ms$	$100ms \leq t < 200ms$	$200ms \leq t < 500ms$	$500ms \leq t < 1s$	$1s \leq t < 3s$	$3s \leq t < 5s$	$5s \leq t < 1min$	$1min \leq t < 3min$
$110 < U \leq 115$	N_{11}	N_{21}	N_{31}	N_{41}	N_{51}	N_{61}	N_{71}	N_{81}
$115 < U \leq 120$	N_{12}	N_{22}	N_{32}	N_{42}	N_{52}	N_{62}	N_{72}	N_{82}
$120 < U$	N_{13}	N_{23}	N_{33}	N_{43}	N_{53}	N_{63}	N_{73}	N_{83}

Tabulka 2.3: Klasifikace krátkodobých zvýšení napětí. Převzato z [13].

2.7 Krátkodobá a dlouhodobá přerušení napájecího napětí

Norma ČSN EN 50160 [18] definuje přerušení napájecího napětí, jako stav, při kterém je napětí v předávacím místě menší než 5% dohodnutého napětí U_{jm} na všech fázích. Jinak je považováno za pokles napájecího napětí.

Přerušení napájecího napětí jsou tříděna dle normy ČSN EN 50160 [18] na:

- plánovaná - předem dohodnutá, uživatelé jsou informováni
- náhodná - způsobená trvalými nebo přechodnými poruchami

Náhodná přerušení se třídí na:

- krátkodobé přerušení - trvání kratší, než 3 minuty
- dlouhodobé přerušení - trvání 3 minuty a déle

Pravidla provozování distribučních soustav [13] dále třídí přerušení dle tabulky 2.4.

Trvání přerušení	trvání < 1s	1s ≤ trvání < 3min	3 min ≤ trvání
Třída přerušení	N_1	N_2	N_3

Tabulka 2.4: Třídy přerušení napájecího napětí. Převzato z [13].

Pravidla provozování distribučních soustav [13], ani norma ČSN EN 50160 [18] nedefinují limitní hodnoty pro přerušení napájecího napětí.

2.8 Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí

Viz podkapitola 2.6. Pravidla provozování distribučních soustav [13], ani norma ČSN EN 50160 [18] nedefinují limitní hodnoty pro dočasná přepětí.

2.9 Přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí

Norma ČSN EN 50160 [18] definuje přechodné napětí jako oscilační nebo neoscilační krátkodobé přepětí, obvykle silně tlumené a s trváním několika milisekund nebo kratším.

Pravidla provozování distribučních soustav [13], ani norma ČSN EN 50160 [18] nedefinují limitní hodnoty pro přechodná přepětí.

2.10 Nesymetrie napájecího napětí

Norma ČSN EN 50160 [18] definuje nesymetrii napájecího napětí jako stav trojfázové sítě, při kterém efektivní hodnoty sdružených napětí nebo fázové úhly mezi po sobě jdoucími sdruženými napětími nejsou stejné.

Minimální vyhodnocovací perioda měření je 1 týden.

V normálních provozních podmínkách musí být 95% středních hodnot zpětné složky napájecího napětí, měřených v 10 minutových intervalech, v rozsahu 0 – 2% sousledné složky. Tato hodnota lze spočítat pomocí vzorce 2.2 převzatého z [21].

$$U_u = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad \beta = \frac{U_{ab}^4 + U_{bc}^4 + U_{ac}^4}{(U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ac}^2)^2} \quad (2.2)$$

2.11 Harmonická napětí

Norma ČSN EN 50160 [18] definuje harmonická napětí jako sinusové napětí s kmitočtem rovným celistvému násobku základního kmitočtu napájecího napětí.

Minimální vyhodnocovací perioda měření je 1 týden.

V normálních provozních podmínkách musí být 95% desetiminutových středních efektivních hodnot každého jednotlivého harmonického napětí menší nebo rovno hodnotám v tabulce 2.5. Pro nízké napětí se uvažují harmonické napětí do řádu 25.

Liché harmonické				Sudé harmonické	
Nenásobky 3		Násobky 3			
Řád harmonické n	Harmonické napětí (U_n)	Řád harmonické n	Harmonické napětí (U_n)	Řád harmonické n	Harmonické napětí (U_n)
5	6,0%	3	5,0%	2	2,0%
7	5,0%	9	1,5%	4	1,0%
11	3,5%	15	0,5%	6 ...24	0,5%
13	3,0%	21	0,5%		
17	2,0%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

Tabulka 2.5: Maximální povolené hodnoty pro jednotlivé harmonické napětí vyjádřeny v procentech z U_{jm} . Převzato z [13].

Mimoto celkový činitel harmonického zkreslení THD (Total Harmonic Distortion) složek do řádu 40 musí být menší nebo rovný 8%. Tento činitel se spočítá dle vzorce 2.3 převzatého z [18].

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \quad (2.3)$$

U_n = efektivní hodnota napětí n -té harmonické složky (100, 150, 200Hz, ...)

U_1 = efektivní hodnota napětí první harmonické složky (50 Hz)

2.12 Meziharmonická napětí

Norma ČSN EN 50160 [18] definuje meziharmonická napětí jako sinusové napětí s kmitočtem nerovnajícím se celistvým násobkem základního kmitočtu síťového napětí.

Minimální vyhodnocovací perioda měření je 1 týden pro 10-minutové intervaly, nebo denní vyhodnocení pro 3-vteřinové intervaly po dobu 1 týdne.

Pravidla provozování distribučních soustav [13] ani ČSN EN 50160 [18] zatím nedefinují mezní hodnoty pro meziharmonická napětí na sítích nízkého napětí.

2.13 Úrovně napětí signálů v napájecím napětí

Norma ČSN EN 50160 [18] definuje signál v napájecím napětí jako signál superponovaný na napájecí napětí za účelem přenosu informací po veřejné distribuční síti a do objektů uživatelů domovní sítě.

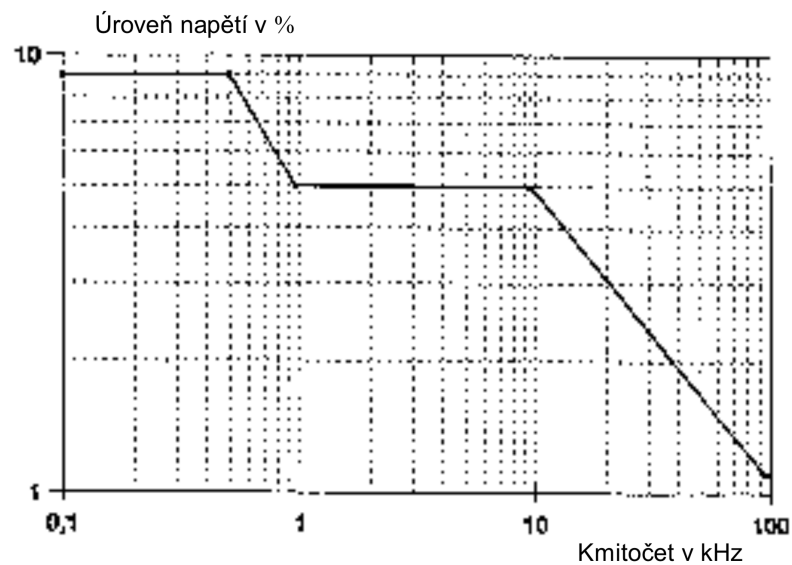
Veřejné sítě mohou být používány k přenosu informací, např. systémem hromadného dálkového ovládání (HDO). Tyto systémy standartně pracují v pásmu do 3 kHz [18].

Dle normy ČSN EN 50160 [18] lze ve veřejné distribuční síti lze rozlišovat tyto typy signálů:

- signály hromadného dálkového ovládání (HDO) - od 110 do 3000 Hz
- nosné signály po vedeních - od 3 kHz do 148,5 kHz
- signály síťových značek - krátkodobé napětové změny

Minimální vyhodnocovací perioda měření je 1 den.

V normálních provozních podmínkách nesmí 99% středních hodnot napětí signálů, měřených v intervalech 3 s, přesáhnout hodnoty dané obrázkem 2.1.



Obrázek 2.1: Maximální úrovně napětí na kmitočtech signálů v procentech U_c ve veřejných distribučních sítích vn. Převzato z [13].

Kapitola 3

Návrh řešení

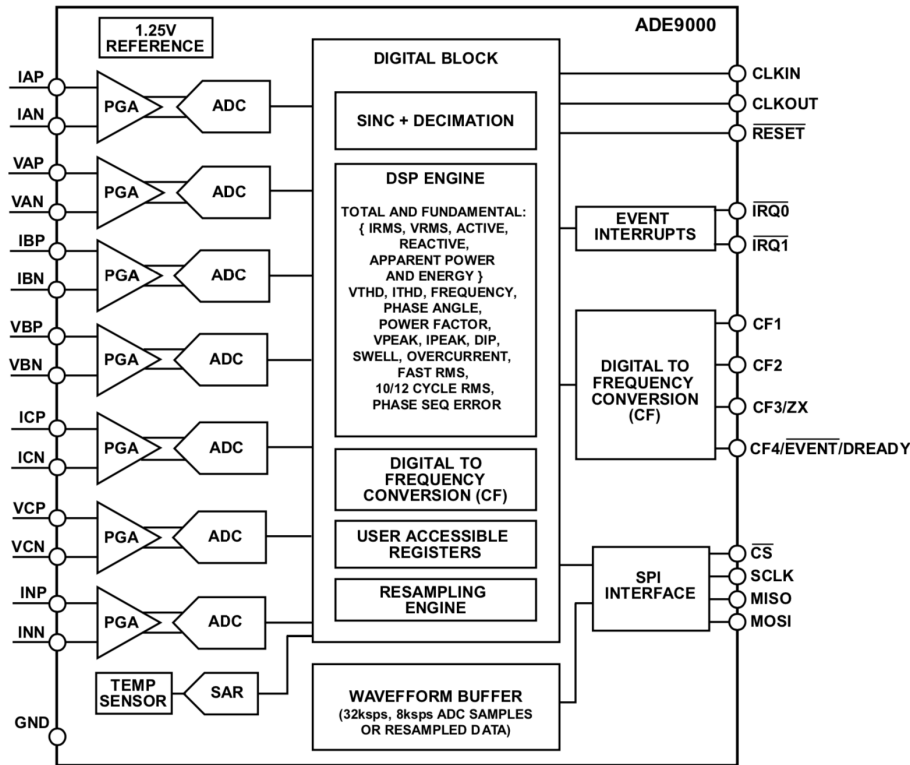
Tato kapitola popisuje návrh prototypu zařízení pro měření kvality elektrické energie. V první podkapitole je popsána technologie pro měření kvality elektrické energie. V druhé podkapitole jsou popsány technologie pro přenos dat. Třetí podkapitola popisuje ostatní technologie vhodné pro návrh. Čtvrtá podkapitola popisuje integraci těchto technologií do výsledného prototypu.

3.1 Měření kvality elektrické energie

Pro měření kvality elektrické energie je potřeba získat vzorkovaný elektrický signál. K tomu účelu slouží AD převodníky. Běžné mikrokontrolery disponují těmito převodníky. Jejich využití je třeba doplnit příslušnou logikou pro spočítání všech parametrů napětí (proudů). Alternativou se nabízí použití hotového řešení, které usnadní proces implementace. Takové řešení nabízí integrovaný obvod **ADE9000** od Analog Devices.

ADE9000

Tato sekce je přeložena a odvozena z [2]. ADE9000 umožňuje splnění požadavků na třídu S měřicího zařízení definovanou normou ČSN-EN-61000-4-30 [21]. Umožňuje měření napětí na 3 fázích a proudy na 3 fázích a středním vodiči. Díky tomu může zařízení měřit také spotřebu elektrické energie. Blokové schéma obvodu je zobrazeno na obrázku 3.1. Pro měření využívá 7 výkonných 24-bitových diferenciálních ADC převodníků umožňující, v případě měření proudu, používání běžných, nebo Rogowskiho měřicích cívek. Z naměřených hodnot vyhodnocuje vestavěný DSP modul data jako RMS, dip, swell, apod. Pro vyčítání naměřených dat slouží sběrnice SPI o maximální frekvenci 20 MHz, viz sekce **SPI**. ADE9000 pracuje pouze v režimu SPI slave, veškeré vyčítání měřených hodnot probíhá vyčítáním registrů. Pro indikaci událostí slouží 2 konfigurovatelné výstupy přerušování. Dále disponuje 4 konfigurovatelné CF výstupy umožňující generovat pulzy vycházející např. ze spotřeby elektrické energie. Pro změnu módu měření slouží 2 PM vstupy. Pro restart čipu slouží vstup RESET. Pro ukládání napěťových či proudových incidentů slouží waveform buffer. Po převzorkování pojme 80ms signálu z každého kanálu při vzorkování 128 vzorků za periodu. Události jako dip nebo swell mohou aktivovat záznam daného incidentu do bufferu. Tyto data pak mohou posloužit např. pro Fourierovy transformace k zjištění harmonických složek signálu nebo pro vizualizaci signálu v čase.



Obrázek 3.1: Funkčně blokové schéma obvodu ADE9000. Převzato z [3].

3.2 Bezdrátový přenos dat

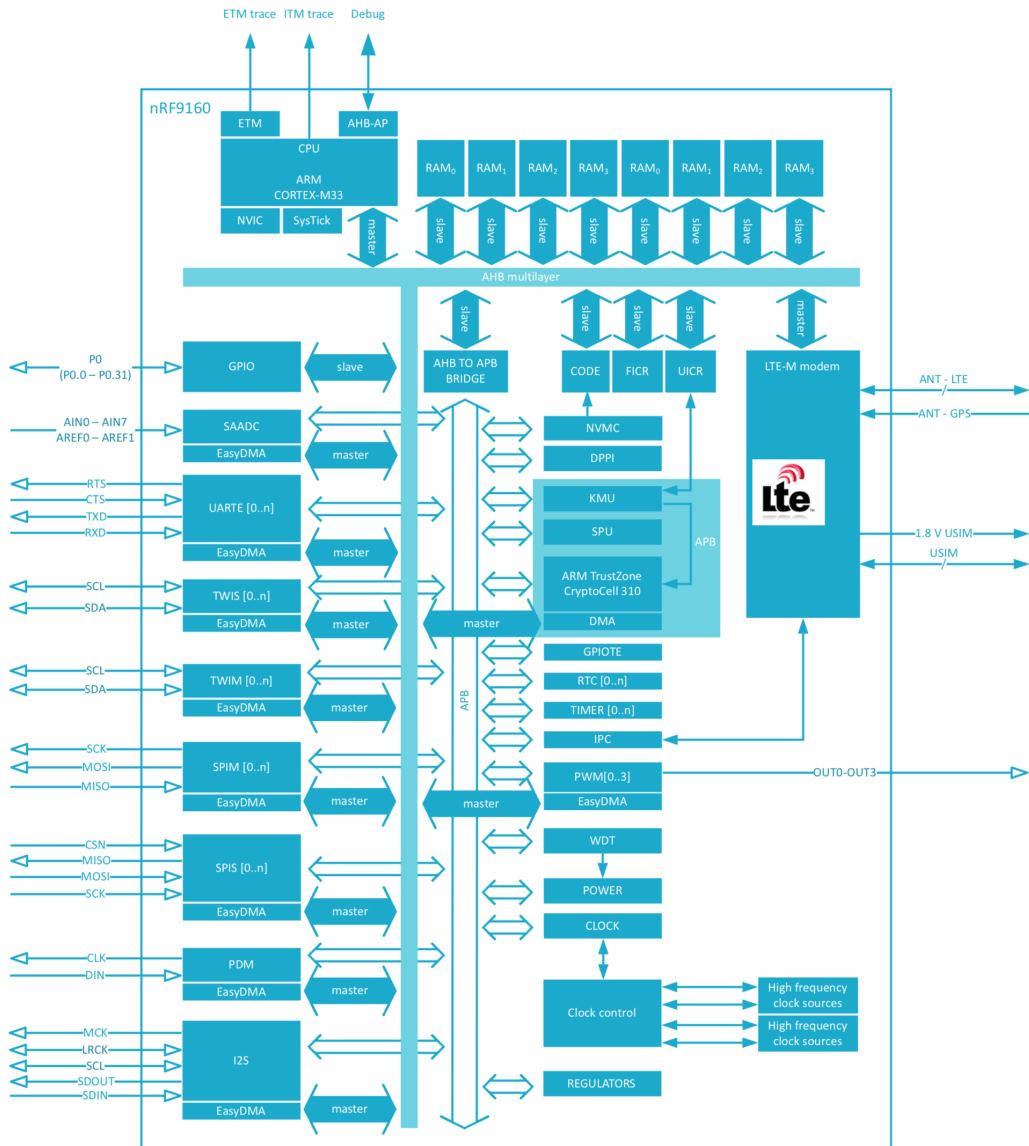
Pro bezdrátový přenos dat je nutné zvolit technologii, která umožňuje přenos většího množství dat, nabízí rozsáhlé pokrytí a vyžaduje nízkou spotřebu energie. V České republice tyto požadavky splňuje síť **NB-IoT**. Dále je potřeba vybrat vhodnou platformu, která podporuje technologii NB-IoT a umožňuje rychlé zpracování a odeslání dat při zachování nízké spotřeby. Byla vybrána platforma **Nordic nRF9160**, která splňuje všechny požadavky a disponuje dostatečnou dokumentací a podporou od výrobce.

NB-IoT

Tato sekce je přeložena a přeformulována z [14]. NB-IoT (Narrowband Internet of Things) je LPWA (Low Power Wide Area) síť standardizovaná 3GPP v *Release 13*, která přebírá principy a vrstvy LTE. Tato síť byla standardizována za účelem nižší spotřeby koncových zařízení a dosažení vyššího dosahu signálu, než standardní GSM síť. NB-IoT může být nasazeno na 2G/3G/4G frekvencích ($450\text{MHz} - 3,5\text{GHz}$). Pro větší dosah je doporučeno používat pásma nižší, než 2GHz . NB-IoT využívá šířku pásma 180kHz . K dosažení nízké potřeby přispívá *Power Saving Mode*, který umožňuje koncové zařízení přepnout do *Deep Sleep Mode*. V tomto módu zařízení nekomunikuje, ale je stále registrováno v síti. Při dalším zahájení komunikace tak není potřeba podstupovat opětovné ustanovení spojení. NB-IoT podporuje bezpečnostní mechanismy, jako např. autentizaci uživatele, zajištění datové integrity a šifrované komunikační kanály. V České republice tuto síť provozuje společnost *Vodafone Czech Republic a.s.* s pokrytím celé republiky [15].

Nordic nRF9160

Tato sekce je přeložena a přeformulována z [11]. nRF9160 je SiP (System in Package) obsahující mikrokontroler ARM Cortex-M33 pracující na frekvenci 64 MHz, 256kB RAM, 1MB Flash, GPS přijímač, LTE modem a další podpůrné komponenty, vše integrované na jednom čipu. Obrázek 3.2 znázorňuje propojení komponent. LTE modem podporuje síť *NB-IoT* a *LTE-M Cat-M1*¹ a pásma 700 až 2200 MHz. Komunikace mezi mikrokontrolerem a LTE modemem probíhá pomocí AT příkazů. Pro snadný vývoj aplikací výrobce poskytuje nRF Connect SDK [9].



Obrázek 3.2: Funkčně blokové schéma obvodu nRF9160. Převzato z [11].

¹3GPP LTE release 13 Cat-M1, šířka pásma 1.4MHz [14]

3.3 Další použité technologie

Tato podkapitola popisuje další technologie nezbytné pro implementaci prototypu. Jsou to: SPI, přerušování a protokol MQTT.

SPI

Tato sekce je přeložena a přeformulována z [7]. SPI (Serial Peripheral Interface) je synchronní duplexní sériové rozhraní. Komunikující uzly mají dvě role: Master (jeden uzel) a Slave (ostatní uzly). Pro komunikaci využívá 4 vodiče:

- SCK - Clock
Master uzel tímto vodičem vysílá synchronní hodinový signál Slave uzlům.
- MOSI - Master Out, Slave In
Tímto vodičem Master uzel vysílá data a Slave uzly přijímají data.
- MISO - Master In, Slave Out
Tímto vodičem Master uzel přijímá data a Slave uzly vysílají data.
- SS - Slave Select
Slave uzly komunikují pouze, pokud je signál SS v logické nule.

Základní částí SPI je 8-bitový posuvný registr. 8-bitový registr v Master uzlu je propojený do kruhu s 8-bitovým registrem v Slave uzlu pomocí vodičů MOSI a MISO. Tímto vzniká 16-bitový posuvný registr. Při přenášení dat se synchronně data v registrech prohodí. Komunikaci začíná Master uzel nastavením příslušného SS do logické nuly, následně generuje hodinový signál do SCK a odesílá data do MOSI a přijímá data z MISO.

Přerušování

Tato sekce je přeložena a přeformulována z [6]. Mikrokontrolery jsou často vestavovány do systémů, kde je potřeba reagovat na asynchronní události v systému. Jedna z možností je cyklické kontrolování vstupů, což vede k větší spotřebě času CPU, tedy i energie. V některých případech může být potřeba toto čtení vstupu provádět častěji, tudíž několikrát v hlavním programu. To vede k zneprůhlednění kódu a ke zvýšení pravděpodobnosti chyby při implementaci.

Pro lepší řešení tohoto problému mikrokontrolery disponují funkcí přerušování (interrupt). Pokud nastane událost, která změní stav vstupu mikrokontroleru (vzestupná, sestupná hrana, změna logické hodnoty napětí, apod.), mikrokontroler pozastaví vykonávání hlavního programu a skočí na programovou část obsluhy přerušování (interrupt service routine - ISR), která vykoná požadavky spojené s externí událostí. Tato rutina je standardní blok příkazů v programové paměti. Po vykonání příkazů z rutiny se pokračuje ve vykonávání hlavního programu. Pokud nastane v jednu chvíli více přerušování, rutiny se vykonávají dle dané priority.

Standardně mikrokontroler využívá na svých vstupech podporující funkci přerušování následující bity.

- Interrupt enable (IE)
- Interrupt flag (IF)

Interrupt enable (IE) bit je nastavený programátorem, který definuje, zda se má volat rutina ISR při zaznamenání události. *Interrupt flag (IF)* je nastavený mikrokontrollerem, pokud zaznamená očekávanou událost. Tento bit je pak nulován buď automaticky při vstupu do ISR rutiny, nebo manuálně programátorem. Někdy jsou IE bity redukovány do jednoho IE bitu pro celý port (více vstupů), z důvodu ušetření zdrojů. Mikrokontrolery také často disponují dalšími bity, které určují typ události, např. sestupná hrana, vzestupná hrana apod. Pro vykonávání atomických operací hlavního programu často existuje možnost deaktivovat nebo aktivovat všechny IE bity najednou.

Pro mapování operací na přerušení slouží tabulka *Interrupt Vector Table*. Vektor přerušení (řádek tabulky) standartně obsahuje číselný identifikátor, programovou adresu rutiny ISR a zdroj přerušení. Číselný identifikátor může sloužit také k definování priority dané rutiny, pokud nastane více přerušení najednou.

MQTT

Tato sekce je přeložena a odvozena z [12]. MQTT je protokol typu klient - server umožňující zasílání zpráv typu *PUBLISH*, nebo *SUBSCRIBE*. Je ideální pro IoT zařízení, protože umožňuje snadnou implementaci a nízkou režii komunikace. Protokol běží na TCP/IP, či jiném síťovém protokolu, který zajišťuje obousměrnou bezztrátovou komunikaci, kde je zajištěno zachování pořadí paketů. MQTT rozlišuje následující role účastníků.

- Server - MQTT Broker - centrální bod komunikace
- Client - MQTT Publisher - zasílá data na server
- Client - MQTT Subscriber - čte data ze serveru

Jeden klient může plnit jak roli MQTT Publisher (odchozí komunikace) tak roli MQTT Subscriber (příchozí komunikace) zároveň. Pro třídění zpráv MQTT používá kanály MQTT TOPIC - řetězec (např. system1/room2/sensor2), na který Publisher zasílá zprávy a každý Subscriber, přihlášený k tomuto kanálu, je následně obdrží.

MQTT rozlišuje následující druhy zajištění QoS (quality of service).

- QoS 0 At most once - zpráva se může ztratit
- QoS 1 At least once - zpráva může dorazit vícekrát, vždy dorazí alespoň jednou
- QoS 2 Exactly once - zpráva dorazí vždy jednou

Formát nesené zprávy protokolu není nijak omezen. Lze tedy přenášet např. JSON, XML, RAW data, či vlastní protokol. Obsah textových polí v *Control packetu*, např. TOPIC, je ve formátu UTF-8.

3.4 Návrh prototypu

Pro potřeby vývoje je měřicí zařízení rozděleno na dva vzájemně propojené celky:

- **Měřicí část** - je připojena k síti nízkého napětí, obsahuje měřicí obvod s ADC,
- **Agregační a komunikační část** - data vyčítá, zpracovává, odesílá a archivuje.

Obě části jsou spolu propojeny sběrnicí SPI, viz sekce **SPI**. Dále jsou připojeny výstupy přerušování, viz sekce **Přerušování**, výstupy CF a vstupy reset a PM. Propojeno je také napájení 5V a GND. Měřicí část zajišťuje samotné měření kvality elektrické energie. Agregací a komunikační část zajišťuje vyčtení dat z měřicí části, jejich zpracování a následné odeslání pomocí protokolu MQTT, viz sekce **MQTT**. Blokové schéma celého systému je vyobrazeno v příloze **B**.

Měřicí část

Měřicí část zajišťuje měření kvality elektrického napětí a proudu. Jedná se o desku plošných spojů osazenou nezbytnými komponentami pro měření. Samotné měření zajišťuje osazený čip ADE9000 doplněný o napěťové děliče a další nezbytné součástky dle dokumentace [3].

Design měřicí desky vychází z [4] a z doporučeného zapojení dle dokumentace [2]. Design z [4] byl upraven následovně. Konektor pro připojení fází byl nahrazen bezpečnějšími banánkovými konektory. Byl také zvětšen rozestup mezi napěťovými děliči jednotlivých fází. Byly přidány tlumivky na vstupu napěťových děličů. Byly přidány testovací kontakty pro GND a u vstupů čipu pro jednotlivé fáze (TP1, TP2 a TP3). Regulátor 3.3V byl přesunut z živé do izolované části. Konektor na izolované části, původně určen pro Raspberry Pi, byl nahrazen kompaktnějším 10-pinovým. Byl přidán Micro-USB konektor pro napájení desky. Byla přidána možnost odpojit napájecí zdroj pomocí vypínače. Byl přidán spínač na RESET signál čipu. Komponenty byly na desce popřesunovány, aby splnily požadavky na prostor desky.

Zařízení se připojuje přímo k síti nízkého napětí, z čehož plynou rizika úrazu elektrickým proudem. Pro zvýšení bezpečnosti je vhodné desku pro potřeby vývoje galvanicky rozdělit na živou a izolovanou část. Na živé části je umístěn měřicí obvod ADE9000, nezbytné komponenty pro jeho běh (oscilátor, apod.) a konektory pro připojení fází a měřicích cívek. Fáze jsou připojeny přes napěťový dělič 800:1. Z čipu ADE9000 byly pro potřeby komunikace vyvedeny 2 výstupy přerušování, 2 CF výstupy, SPI, PM1 vstup a RESET vstup. Pro zajištění komunikace a napájení mezi živou a izolovanou částí jsou použity izolátory Analog Devices ADUM 6404 a ADUM 4151. Oba izolátory jsou napájeny výstupem 3.3V DC ze stabilizátoru ADP122 z izolované části. ADUM6404 obsahuje DC/DC měnič, který zajišťuje napájení 3.3V DC v živé části. Deska je doplněna spínaným napájecím zdrojem s výstupem 5V DC pro napájení celé soustavy z izolované strany. Alternativně lze desku napájet pomocí Micro-USB nebo 5V header konektoru rovněž z izolované strany.

Při napájení z počítače je potřeba, aby byl přepínač nastaven do polohy OFF. Pokud je zařízení odpojeno od počítače, je možné využít napájení ze zdroje - přepínač v poloze ON.

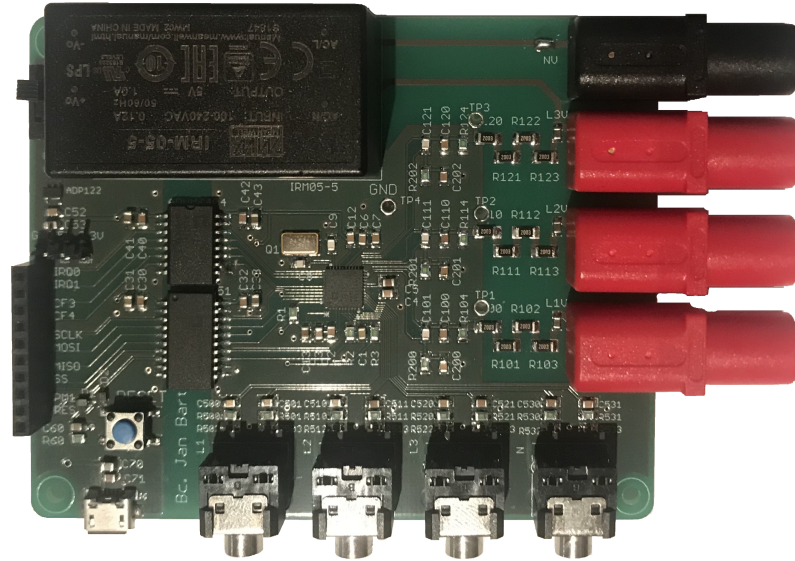
K izolované části je možné bezpečně připojit mikrokontroler připojený k počítači. Ve finálním produktu bude veškerá komunikace probíhat bezdrátově a tudíž nebude potřeba toto izolování. Pro prvotní oživení komunikace SPI s měřicí částí lze použít vývojový kit ESP-32, pro který jsou k dispozici hotové knihovny pro komunikaci s ADE9000.

Výstupy přerušování IRQ0 a IRQ1 jsou v normálním stavu ve stavu logické jedničky, při události přerušování jsou přepnuty do stavu logické nuly. Výstupy CF4 a CF3 mohou

sloužit jako indikátory aktuální spotřeby energie (spotřeba -> frekvence). Výstup CF4 může sloužit také jako výstup přerušení.

Při přivedení logické jedničky na signál PM1 na měřicí desce po dobu alespoň $1 \mu s$ dojde k přepnutí čipu ADE9000 z módu PSM0 Normal do PSM03 Idle módu. Tím lze dosáhnout snížení spotřeby čipu ADE9000 na přibližně $2 \mu A$. Při přivedení logické nuly na signál RES na měřicí desce po dobu alespoň $1 \mu s$ dojde k softwarovému resetu čipu ADE9000 [3].

Schéma zapojení a rozložení desky měřicí části obsahuje příloha A. Výsledná měřicí deska je vyobrazena na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Měřicí část prototypu

Agregační a komunikační část

Pro tuto úlohu byl zvolen vývojový kit nRF9160DK, obsahující desku PCA10090, viz obrázek 3.4 a iBasis SIM kartu. Deska disponuje čipem nRF9160, slotem na nano-SIM kartu, LTE anténou, GPS anténou, Bluetooth anténou, pomocným čipem nRF52840 podporujícím Bluetooth a ladícím mikrokontrolerem disponujícím SEGGER J-Link-OB [8].

Příložená iBasis SIM karta aktuálně (leden 2020) nepodporuje české NB-IoT sítě, proto byla zvolena SIM karta od společnosti *Vodafone Czech Republic a.s.*, která pokrývá síť NB-IoT území celé České republiky [15].

Tato část je s měřicí částí pro účely vývoje propojena následovně. GND měřicí části je propojena s GND kitu. 5V měřicí části je připojeno na pin 5V kitu. Zbýlých 10 komunikačních vodičů je možné připojit na libovolné P0 piny kitu. Je nutné je poté správně přiřadit v mapování pinů.

V této části je vhodné přidat záložní napájení pro měření přerušení napájecího napětí. Záložní napájení je možné implementovat později. Takové záložní napájení je řešeno Li-Ion akumulátorem 18650 doplněným o regulátor TP4056. Dle potřeby lze přidat paralelně další akumulátory pro zvýšení kapacity a prodloužení doby běhu při výpadku či odpojení.

Zapojení záložního napětí vyžaduje změnu zapojení v izolované části měřicí desky. Je potřeba přerušit cestu mezi napájecím zdrojem a 5V rozvodem po izolované části měřicí

desky (lze použít přepínač - poloha OFF). Výstup napájecího zdroje je následně připojen na vstup záložního napájení (vstup TP4056) a výstup záložního napájení (akumulátor) je zapojen do napájecího vstupu vývojového kitu (P28), který umožňuje napájení napětím 3.3V – 5.5V.

Hlavní řídicí komponentou celého systému je čip nRF9160. Tento čip vyčítá data z ADE9000. Z vyčtených dat vypočte veškeré požadované parametry kvality elektrické energie. Pro ušetření energie je vhodné data průběžně ukládat do paměti a posílat je v dávkách. Vzhledem k relativně malému množství dostupné paměti a pro zredukování datového toku je vhodné data komprimovat a vyřazovat redundantní data. Takto zpracovaná data jsou odeslána pomocí LTE modemu.

Měření kvality elektrické energie vyžaduje přesný čas. Norma ČSN EN 61000-4-30 [21] požaduje synchronizaci vyčítání tiknutím UTC (koordinovaného světového času). Takto přesný čas lze zajistit a synchronizovat dvěma způsoby:

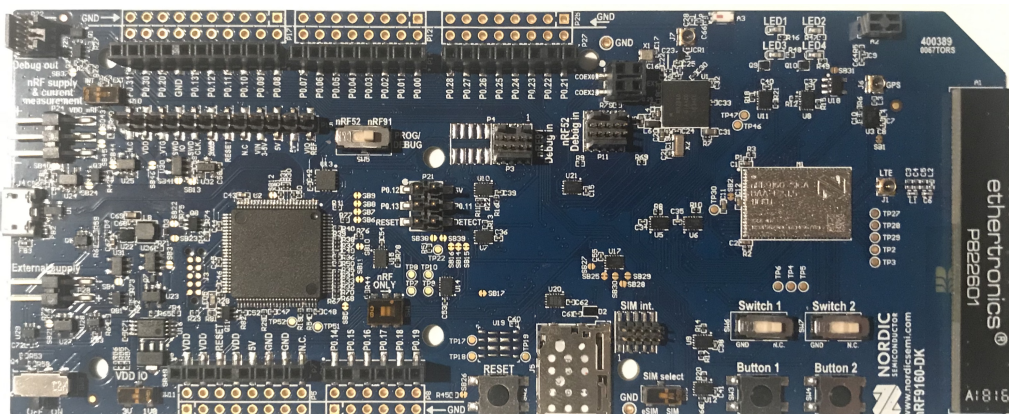
- GPS a
- NTP (pomocí NB-IoT).

Pro účely měření se jeví jako lepší řešení použití NTP, protože GPS signál nemusí být dostupný v prostorách budov.

Pro zasílání zpráv je vhodné použít protokol MQTT, který umožňuje snadné zasílání zpráv mezi klienty pomocí MQTT BROKER (online server), ke kterému jsou klienti připojeni. MQTT umožňuje implementaci šifrování zpráv, které je vhodné použít vzhledem k citlivé povaze dat. MQTT umožňuje vytvoření vlastního protokolu obsahu zpráv. Zprávy lze třídit dle různých kanálů - MQTT TOPIC. Toho je možné využít pro rozlišení jednotlivých zařízení, měřicích parametrů, případně směrů komunikace [12].

Vývojová deska PCA10090 je vybavena integrovaným obvodem nRF52840, který je vybaven technologií Bluetooth 5 [10]. Toho lze využít pro lokální komunikaci se zařízením. Tato funkce vyžaduje vytvoření vlastního komunikačního protokolu a eventuelně vytvoření mobilní aplikace přijímající a zobrazující data.

Systém bude doplněn o možnost připojení SD / MicroSD paměťové karty, která umožní offline logování výrazně většího objemu dat. Data z SD karty lze číst fyzickým čtením karty nebo online vyčítáním. SD karta je připojena k systému pomocí sběrnice **SPI**.



Obrázek 3.4: Vývojová deska PCA10090 v0.8.2 kitu nRF9160 DK

Kapitola 4

Implementace

Tato kapitola popisuje výsledný prototyp, jeho firmware, funkcionalitu, síťovou komunikaci a možnosti rozšíření. První podkapitola popisuje fyzický prototyp, jeho části a zapojení, druhá popisuje použité vývojové nástroje pro firmware čipu nRF9160, třetí popisuje komunikaci s čipem ADE9000, čtvrtá popisuje implementaci přerušení a RTC, pátá popisuje implementaci SD karty, šestá popisuje implementaci měření jednotlivých parametrů napětí a sedmá popisuje implementaci přenosu dat a navržený protokol.

4.1 Prototyp

Dle návrhu byl sestaven prototyp sloužící k vývoji firmwaru a testování. Tento prototyp je složený z následujících vzájemně propojených částí.

- DPS měřicí část s ADE9000
- měřicí cívka SCT013-030
- PCA10090 (nRF9160DK)
- čtečka SD paměťových karet

Celý prototyp je vyobrazen na obrázku [C.1](#). Měřicí deska je položena do izolované vany pro zvýšení bezpečnosti. Prototyp je připojen do sítě nízkého napětí pomocí přímého vodiče a měřicí cívky. Toto zapojení je vyobrazeno na obrázku [C.2](#). Je zde navíc připojen multimetr a improvizovaná zátěž - fén. Více o připojení prototypu k síti nízkého napětí lze nalézt v podkapitole [5.1](#).

V budoucnu bude k prototypu připojen záložní lithiový akumulátor 18650 s regulátorem TP4056. Bude sloužit k stabilizaci procesu monitorování sítě při anomáliích napájecího napětí, které by mohly ohrozit běh systému. Umožní také monitorování přerušení napájecího napětí. Pro účel vývoje a testování např. přerušení napájecího napětí funkci akumulátoru vynahrazuje externí napájení z USB.

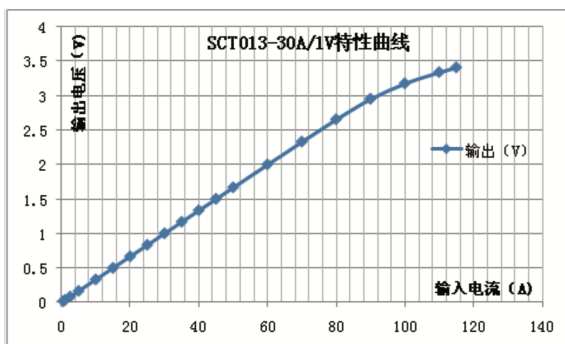
Části jsou propojeny následovně. K DPS měřicí části je připojena dle potřeby pomocí 3.5mm JACK konektoru měřicí cívka SCT013-030 do jednoho ze 4 konektorů (1. až 3. fáze a N vodič) na DPS měřicí části.

DPS měřicí část je propojena s vývojovou deskou PCA10090 10 vodiči. Jsou to 2 napájecí vodiče (5V a GND), 4 vodiče sběrnice SPI a 4 vodiče přerušení. Existují dva způsoby zapojení - napájení pomocí USB a napájení vlastním zdrojem ze sítě. Propojení popisuje tabulka [C.1](#) a tabulka [C.2](#). Signály RES a PM1 nejsou prozatím využity.

Čtečka SD paměťových karet je propojena s deskou nrf9160 7 vodiči. Jsou to 2 napájecí vodiče (3.3V a GND), 4 vodiče SPI a vodič C_DET sloužící k detekci vložení paměťové karty do čtečky. Propojení popisuje tabulka C.3.

Měřicí cívka

Pro účely vývoje byla zvolena měřicí cívka SCT013-030, viz obrázek 4.2. Jedná se o proudový transformátor s poměrem 1860:1, vnitřním zátěžovým odporem 62Ω a hodinovým úhlem 3° . Průběh výstupního napětí v závislosti na vstupním proudu je vyobrazen na obrázku 4.1. Je vybavena kabelem s 3,5mm jack konektorem. Její zásadní výhoda je možnost rozpojení. Lze tedy připojit na pevně vedený vodič. Cívka je dimenzovaná na maximální proud $60A$ a napětí $660V$. Její nepřesnost je $\pm 1\%$ [16].



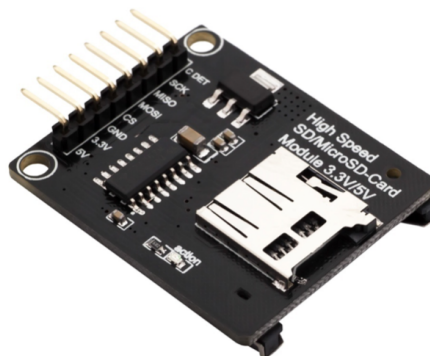
Obrázek 4.1: Napěťový průběh měřicí cívky SCT013-030. Převzato z [16]

Čtečka SD karet

Pro snadné připojení SD karty byl vybrán *SD+MicroSD-card high speed module* od výrobce RobotDyn, viz obrázek 4.3. Tento modul umožňuje připojení jak SD, tak Micro-SD paměťové karty. Modul umožňuje komunikaci SPI na logických úrovních 5V (Arduino) nebo 3.3V. Byla využita druhá možnost - 3,3V, zařízení je tedy napájeno příslušným napětím a vstup 5V je odpojen. Modul disponuje výstupem detekce vložení paměťové karty (C DET), který nebyl využit.



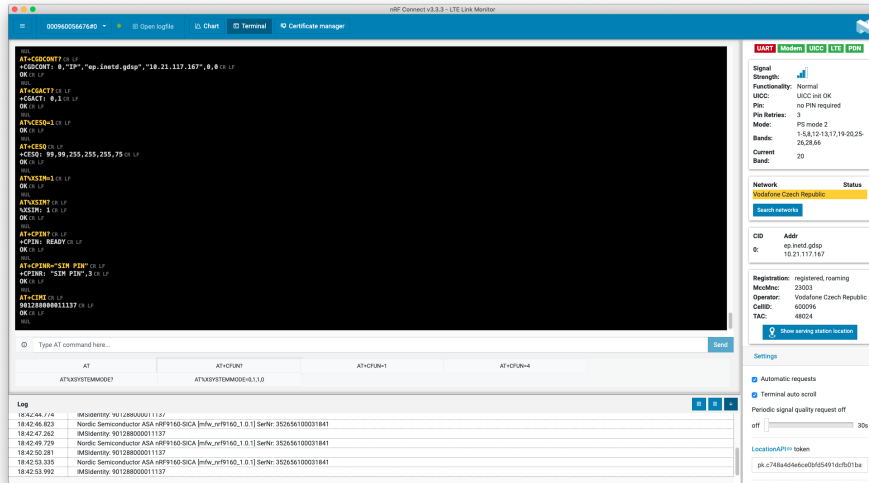
Obrázek 4.2: Měřicí cívka SCT013-030



Obrázek 4.3: Čtečka SD karet. Převzato od RobotDyn

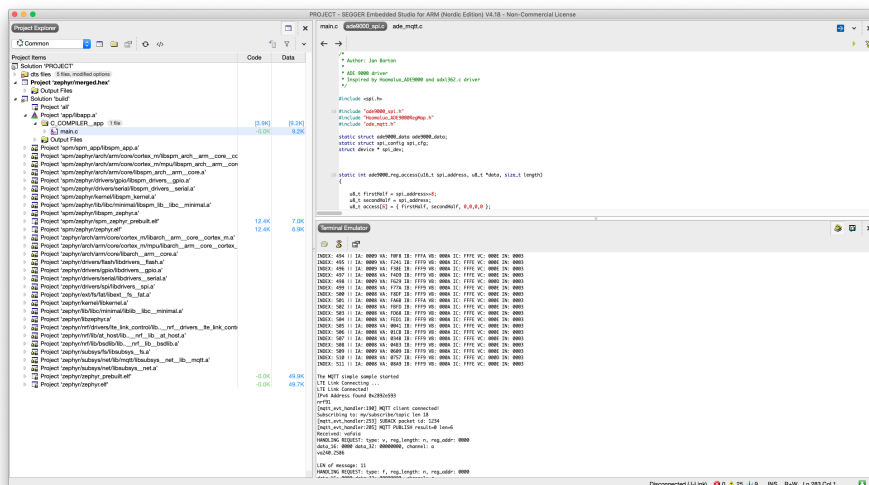
4.2 Vývojové nástroje

Pro usnadnění instalace SDK a pro podporu vývoje Nordic Semiconductor dodává software **nRF Connect**. Instalaci SDK, toolchainu, a dalšího potřebného softwaru popisuje modul Getting Started Assistant. Pro ladění NB-IoT komunikace a pro komunikaci s LTE modemem pomocí AT příkazů slouží modul LTE Link Monitor, viz obrázek 4.4.



Obrázek 4.4: Nordic Semiconductor LTE Link Monitor

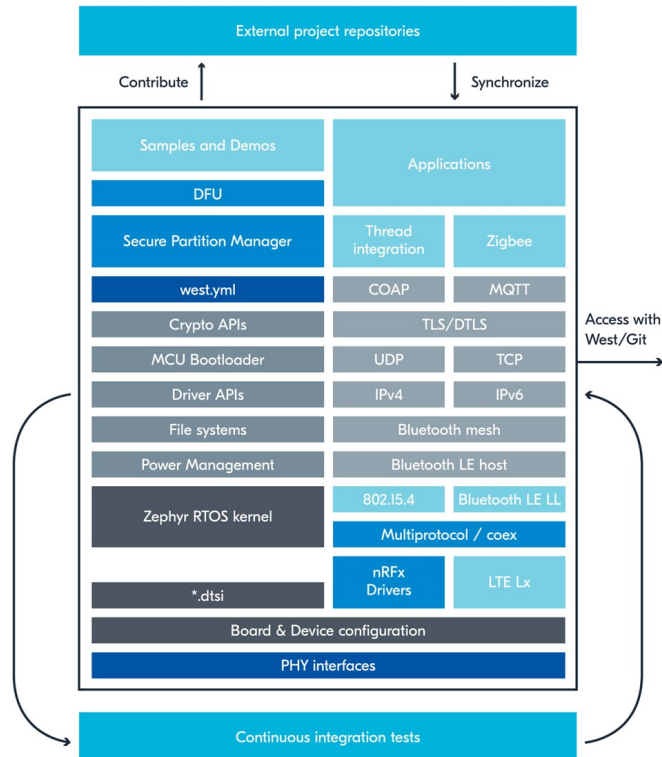
Pro snadnější práci s projektem lze využít IDE SEGGER Embedded Studio for ARM, viz obrázek 4.5. Toto IDE je přizpůsobeno pro projekty typu nRF. SEGGER Embedded Studio for ARM umožňuje snadný překlad projektu, změnu konfigurací, nahrání do zařízení, ladění, či komunikaci přes seriový port.



Obrázek 4.5: SEGGER Embedded Studio for ARM

nRF Connect SDK

Nordic Semiconductor k platformě nRF9160 poskytuje nRF Connect SDK (software development kit) pro usnadnění vývoje firmwaru. SDK v sobě integruje Zephyr RTOS, viz sekce **Zephyr**, příklady implementací, implementace protokolů, knihovny a hardwarové ovladače. Jsou zde implementované části potřebné pro účel práce, jako např. SPI, NB-IoT, TCP, MQTT, GPS, přerušení, FS, power management apod., viz obrázek 4.6. nRF Connect SDK je volně dostupný na githubu [9].



Obrázek 4.6: Blokové schéma nRF Connect SDK. Převzato od Nordic Semiconductor

Aplikace nRF Connect SDK je v paměti rozdělena do dvou částí:

- secure - bezpečná část - při startu
- non-secure - uživatelská část

Díky tomuto rozdělení lze provádět aktualizaci firmwaru na dálku (FOTA - Firmware over the air). Dále je tímto zajištěn bezpečný chod aplikace bez provádění neautorizovaného kódu. V secure části je implementován **Secure Partition Manager**, který předává výpočetní prostředky uživatelské aplikaci v non-secure části.

Zephyr

Tato sekce je přeložena a přeformulována z [17]. Zephyr je RTOS (real-time operating system) založený na kompaktním kernel jádru, určený pro systémy s omezenými zdroji, zejména embedded hardware. Zephyr podporuje následující platformy: ARM Cortex-M, Intel x86, ARC, NIOS II, Tensilica Xtensa, a RISC-V. Zephyr se vyznačuje následujícími funkcemi.

- Jeden sdílený adresový prostor
- Modulární architektura systému
- Podpora napříč různými architekturami
- Ochrana paměti
- Implementace síťových protokolů
- Podpora vícevláknových aplikací
- Dynamická alokace paměti
- Power Management
- Podpora File systémů

Zephyr implementuje vlastní API pro standartní komponenty vestavěných systémů, které je pak možné použít jednotně se všemi podporovanými platformami. V tomto systému byly využity následující komponenty API.

- SPI
- UART
- File System
- MQTT
- LTE LC
- Reboot
- RTC
- Přerušování

Tyto komponenty jsou realizovány knihovnamí, které deklarují všechny funkce potřebné pro obsluhu daných periférií. Popis funkcionality a návod k použití jednotlivých funkcí lze nalézt v technické dokumentaci Zephyr [17].

4.3 Obsluha ADE9000

Tato podkapitola popisuje implementaci SPI komunikace s čipem ADE9000, vyčítání obsahu registrů a waveform bufferu.

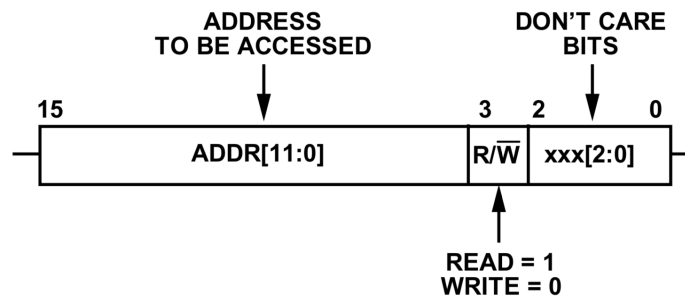
Implementace SPI komunikace

Pro komunikaci s ADE9000 a vyčítání dat z SD karty je využita sběrnice SPI. nRF9160 disponuje čtyřmi samostatnými SPI moduly, z nichž jsou dva využity pro ADE9000 a SD.

Komunikace s ADE9000 je implementována v *ade9000_spi.c* a *ade9000_spi.h*. Při inicializaci systému je volána funkce *ade9000_spi_init()*, která zvolí modul **SPI_3** a jako CS pin zvolí **pin 13** z modulu **GPIO_0**. Dále nastaví následující parametry modulu SPI. ADE9000 umožňuje komunikaci až na frekvenci 20MHz, byla zvolena maximální frekvence čipu nRF9160, tedy 4MHz a *SPI Mode 3* (CPOL=1 a CPHA=1).

Vyčítání registrů ADE9000

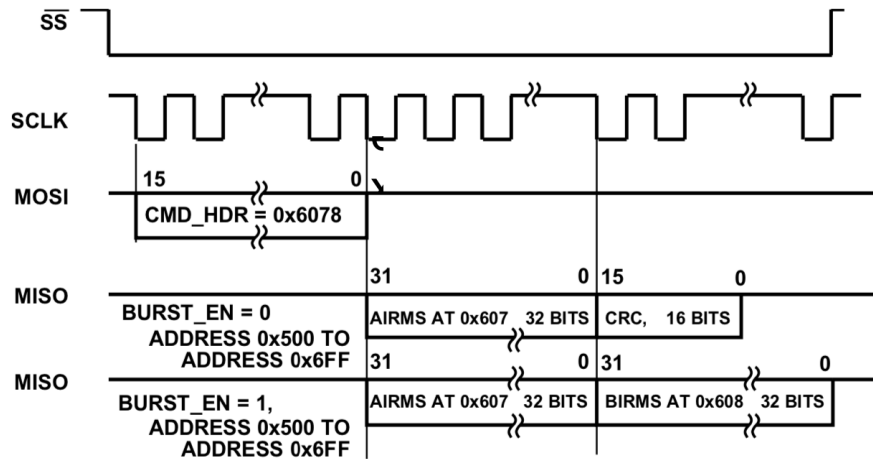
ADE9000 (SPI slave) definuje vlastní SPI protokol následovně. Master nastaví CS na logickou 0. Master odešle 16 bitů dlouhou hlavičku, která obsahuje adresu registru a READ/WRITE bit, viz obrázek 4.7. Následně slave odesílá data z příslušného registru - 32 nebo 16 bitů. Pokud je aktivována funkce burst, následují data z registru s inkrementovanou adresou. ADE9000 umožňuje přidání 16-bitového kontrolního součtu CRC za data. CRC není v tomto systému využíváno, je upřednostněna funkce burst. Komunikaci ukončí master nastavením CS na logickou 1. Příklad komunikace s ADE9000, kde je vyobrazena komunikace burst i CRC je na obrázku 4.8 [3].



Obrázek 4.7: Hlavička zprávy SPI. Převzato z [3]

Protokol je implementován následujícím způsobem. Byla vytvořena univerzální funkce *int ade9000_reg_access(u16_t spi_address, u8_t *data, size_t length)* pro zápis a čtení registrů různé délky. Funkce dostane hlavičku s *R/W* bitem (viz obrázek 4.7) jako vstupní parametr *spi_address*, dle které pak vykonává čtení nebo zápis. Dále dostane ukazatel na data, která má odeslat, nebo přijmout a délku *length* těchto dat. Funkce pro uskutečnění SPI komunikace využívá Zephyr API knihovnu *spi.h*. Tato knihovna implementuje ovládání hodinového signálu (SCLK) i signálu CS. Před uskutečněním samotné komunikace je potřeba vytvořit struktury pro vstupní a výstupní data. Knihovna *spi.h* je definuje jako strukturu *spi_buf_set* obsahující ukazatel na strukturu (případně pole) *spi_buf* (.buffers) a počet prvků (.count). Struktura *spi_buf* se skládá s ukazatele na datový buffer (.buf) a jeho délku (.len). Pro účel vyčítání registrů bylo vytvořeno pole typu *spi_buf* obsahující dvě struktury.

- `.buf = access` (hlavička - adresa + *R/W* bit), `.len = 2` (16-bitová hlavička)
- `.buf = data` (vstupní/výstupní data), `.len = 2 | 4` (16 nebo 32-bitový registr)



Obrázek 4.8: Příklad SPI komunikace. Převzato z [3]

Jsou vytvořeny dvě struktury typu `spi_buf_set tx` a `rx`. Obě obsahují ukazatel na výše zmíněné pole.

Pokud je voláno čtení z registru, struktura `rx` má nastaven `.count = 2` a struktura `tx` má nastaven `.count = 1`. Volá se funkce `spi_transceive()` a odešle se tedy první část (hlavička zprávy) a přijmou se obě části, tedy data vyměněná při odesílání hlavičky - žádné a samotná data z registru uložená přímo na adresu `*data`. Protože platforma nRF9160 používá řazení bytů little endian [11] a ADE9000 big endian, je provedeno přerazení pořadí bytů (pomocné pole `endian_data[4]`). Funkce nakonec vrací výsledek operace `spi_transceive()`.

Pokud je voláno zapisování do registru, není potřeba struktura `rx` a struktura `tx` má nastaven `.count = 2`. Před samotným odesláním je potřeba obdobně jako u čtení změnit pořadí dat na big endian. Následně se volá funkce `spi_write()` a odešlou se obě části - hlavička a následně data. Přijaté data jsou ignorovány. Funkce nakonec vrací výsledek operace `spi_write()`.

Nad touto funkcí byly vytvořeny následující čtyři funkce kombinující zápis/čtení 16/32-bitových registrů.

- `u16_t ade9000_get_reg_16(u16_t register_address);`
- `int ade9000_set_reg_16(u16_t register_address, u16_t data);`
- `u32_t ade9000_get_reg_32(u16_t register_address);`
- `int ade9000_set_reg_32(u16_t register_address, u32_t data);`

Tyto funkce přijímají adresu registru a před volání funkce `ade9000_reg_access()` ji posunou o 4 bity vlevo a nastaví *R/W* bit, čímž vytvoří validní hlavičku ADE9000 SPI komunikace. Tyto funkce zaobalují problém čtení/zápisu registrů ADE9000 a jsou následně volány v dalších částech programu.

Waveform buffer

Pro usnadnění harmonické analýzy disponuje čip ADE9000 waveform bufferem. Buffer má velikost 2048 32-bitových záznamů na adresách $0x800 - 0xFFF$. Data tvoří jeden z následujících zdrojů samplů.

- Fixed Data Samples (256 samplů) - 24-bitové záznamy z různých částí řetězce zpracování dat
- Resampled Waveforms (512 samplů) - 16-bitové záznamy, 128 záznamů na periodu (80ms)

Buffer obsahuje záznamy pro všech 7 vstupů (VA, IA, VB, IN, atd.) v daném časovém okamžiku. Buffer umožňuje průběžné plnění. Pro účely harmonické analýzy je určena a použita varianta **resampled waveforms** [3].

Pro vyčítání dat typu **resampled waveforms** z Waveform bufferu byla v souboru *ade9000_spi.c* implementována funkce *ade9000_waveform_buffer_access_resampled(u16_t waveform_address, u16_t length, struct ResampledWfbData *ResampledData)*. Funkce dostane adresu do waveform bufferu *waveform_address* ($0x800 - 0xFFFF$), počet čtených prvků *length* (doporučeno max. 128) a ukazatel na výstupní pole **ResampledData* typu **struct ResampledWfbData**. Tato struktura obsahuje následující prvky, které reprezentují hodnoty jednotlivých napětí a proudů v jednom časovém okamžiku.

- u16_t IA_Resampled;
- u16_t VA_Resampled;
- u16_t IB_Resampled;
- u16_t VB_Resampled;
- u16_t IC_Resampled;
- u16_t VC_Resampled;
- u16_t IN_Resampled;

Funkce vytvoří z adresy bufferu *waveform_address* SPI hlavičku, viz obrázek 4.7, posunutím adresy o 4 bity vlevo a nastavením **R/W** bitu na 1 (čtení). Následně jsou vytvořeny struktury **tx** a **rx** typu *spi_buf_set*. Obě obsahují ukazatele na struktury typu *spi_buf*. První struktura obsahuje ukazatel na adresu hlavičky **.buf = access** a délku **.len = 2** (16-bitová hlavička). Druhá struktura obsahuje ukazatel na výstupní pole **ResampledData* a délku **.len = length · sizeof(struct ResampledWfbData)** (velikost struktury · počet čtených prvků). Následně je provedeno čtení voláním funkce *spi_transceive()*. Po dokončení čtení funkce přeskládá vyčtená data z big endian na little endian. Funkce nakonec vrátí výsledek operace *spi_transceive()* [3].

Čtení celého bufferu je prováděno funkcí *ade9000_waveform_buffer_access_resampled_512(struct ResampledWfbData *R_WfbData)*, která volá čtyřikrát čtení po 128 záznamech vždy od adres $0x800$, $0xA00$, $0xC00$ a $0xE00$.

4.4 Události v systému

Tato podkapitola popisuje implementaci reakce systému na externí události (přerušeni) nebo události vyvolané časem (RTC).

Implementace přerušeni

Tato sekce čerpá z dokumentace [3]. ADE9000 disponuje 3 následujícími výstupy přerušeni s registry STATUS (vyčítání) a MASK (nastavení).

- $\overline{IRQ0}$ (STATUS0, MASK0)
- $\overline{IRQ1}$ (STATUS1, MASK1)
- $CF4/\overline{EVENT}/DREADY$ (EVENT_STATUS, EVENT_MASK)

STATUS registry indikují stavy jednotlivých událostí, MASK registry určují, které události vyvolají externí přerušeni. Při události přerušeni klesne logická hodnota pinu přerušeni na 0. Následně probíhá čtení příslušného STATUS registru. Pro potvrzení zpracování události je potřeba zapsat na příslušný bit hodnotu 1. Logická hodnota pinu přerušeni se opět vrátí na 1.

ADE9000 disponuje celou řadou událostí pro vyvolání přerušeni. Níže jsou uvedené příklady některých událostí.

- RMS1012RDY - přečteno 10/12 period
- DREADY - WaveForm Buffer připraven k čtení
- DIPx - dip na x. fázi
- SWELLx - swell na x. fázi
- RSTDONE - dokončená power-up sekvence
- ZXVx - průchod napětí nulou na x. fázi

K obsluze přerušeni slouží funkce *IRQx_handler*. Jsou přiřazeny jako callback na příslušné piny přerušeni. Přerušeni jsou inicializována funkcí *IRQ_LED_init()* s nastavením na sestupnou hranu - *GPIO_INT_ACTIVE_LOW* a *GPIO_INT_EDGE*. Pomocí přerušeni lze například vyčítat pravidelně hodnoty napětí (RMS1012RDY) nebo hodnoty z waveform bufferu po jeho naplnění (DREADY).

Implementace RTC

nRF9160 disponuje dvěma moduly **RTC** (real-time counter). Modul RTC1 využívá Zephyr RTOS, modul **RTC0** je volný pro uživatele. Pro jeho použití je potřeba k němu přesunout přístup do non-secure domény - upravení souboru *spm.c* a příslušného souboru *Kconfig*.

V **main.c** je implementována callback funkce *rte_handler()*, která je volána pravidelně pomocí přerušeni vyvolané RTC. Tuto funkci lze využít pro pravidelné vyčítání hodnot, např. 10 minutové intervaly agregace dat.

RTC v nRF9160 disponuje vstupním signálem o frekvenci $32,768kHz$. K dispozici je 24-bitový COUNTER a 12-bitový PRESCALER. Výstupní frekvence $f_{RTC}[kHz] = 32.768/(PRESCALER + 1)$. Byla zvolena nejvyšší možná hodnota registru PRESCALER: 4095 vedoucí k výstupní frekvenci 8 Hz (perioda 125 ms). K vyvolání přerušení lze využít COMPARE registr. Přerušení nastane, pokud hodnota counteru v RTC dosáhne hodnoty COMPARE registru. Pro 10-minutové intervaly byla hodnota COMPARE registru nastavena na 4800. Při přerušení vyvolaném dovršením hodnoty COMPARE registru, je COUNTER vynulován a znovu nastavena hodnota COMPARE na 4800 [11].

4.5 SD karta

Pro účely ukládání historických dat je k systému připojena SDHC karta pomocí sběrnice SPI. Tato karta používá souborový systém FAT32, který lze v případě potřeby číst i pomocí ostatních zařízení. nRF Connect SDK podporuje jak SDHC, tak FAT32 v rámci Zephyr API. Souborový systém FAT32 je implementován v *fs.h*. Jsou zde implementovány všechny funkce potřebné pro obsluhu souborového systému, jako např. *mount*, *open*, *read*, *write*, *mkdir*, apod. V systému je v souboru **main.c** implementováno připojení a mount souborového systému. Připojení disku je inicializováno pomocí funkce *disk_access_init()*, mount souborového systému následně pomocí *fs_mount()*.

Systém je připraven na implementaci systému ukládání vyčítaných dat. Pro toto ukládání je potřeba zohlednit velikost sektoru karty, kdy je vhodné vytvořit strukturu v paměti stejně velkou jako sektor. K zápisu dojde až po naplnění struktury. Tímto je redukován počet zápisů pro dosažení co možná největší životnosti karty. Data v paměťovém prostoru karty lze organizovat např. pomocí souborů, kdy název bude odpovídat časovému razítku události. Je vhodné uvažovat přidání kontrolních součtů CRC k zapisovaným datům. Pro detekci vložení/vyjmutí karty lze implementovat přerušení ze signálu C DET.

4.6 Parametry kvality

Tato podkapitola popisuje způsoby vyčítání a zpracování jednotlivých charakteristik kvality napětí. Pro správné čtení většiny parametrů je potřeba provést proces kalibrace, viz podkapitola 5.3. Na konci této podkapitoly je tabulka 4.1, která shrnuje stav implementace všech parametrů.

Kmitočet sítě

Kmitočet sítě je vyčítán čtením registrů čipu ADE9000. Jsou to registry *APERIOD*, *BPERIOD* a *CPERIOD* dle příslušné fáze. Délka periody se pak spočítá dle vzorce 4.1. Kmitočet se spočítá dle vzorce 4.2. Oba vzorce jsou převzaté z [1]. Délka periody je měřena mezi průchody napětí nulou [3].

$$T_x = \frac{xPERIOD + 1}{8000 \cdot 2^{16}} [sec] \quad (4.1)$$

$$f_x = \frac{8000 \cdot 2^{16}}{xPERIOD + 1} [Hz] \quad (4.2)$$

Vyčítání tohoto parametru je implementováno funkcí `ade9000_spi_get_actual_frequency()`. Funkci lze vzdáleně volat pomocí **příkazu f**, který vrací **odpověď f** s hodnotou v Hz naměřenou v čase volání funkce (doručení příkazu).

Velikost napájecího napětí

Hodnoty TRMS napětí měřené v intervalu 10 period lze vyčíst v registrech `AVRMS1012`, `BVRMS1012` a `CVRMS1012` dle příslušné fáze. Hodnota je zde uložena ve formátu 32-bit a vyjadřuje poměr k maximální hodnotě napětí ADC převodníku. Hodnota napětí je spočítána dle vzorce 4.3. Mezifázové napětí lze zpočítat z hodnot napětí jednotlivých fází a jejich vzájemného posunutí viz sekce **Nesymetrie napájecího napětí** [3].

$$U_x = \frac{566,307 \cdot xVRMS1021}{52.702.092} [V] \quad (4.3)$$

Hodnota $566,307V$ je odvozená od maximálního napětí ADC převodníku ($0,707V$) a poměru vstupního napěťového děliče $800 : 1$. Viz vzorec 4.4. Hodnota $52.702.092$ je maximální hodnota registru `xVRMS1021` při maximálním napětí ADC [3].

$$0,707 \cdot \frac{801}{1} = 566,307[V] \quad (4.4)$$

Vyčítání tohoto parametru je implementováno funkcí `ade9000_spi_get_actual_voltage()`. Funkci lze vzdáleně volat pomocí **příkazu v**, který vrací **odpověď v** s hodnotou ve Voltech naměřenou v čase volání funkce (doručení příkazu).

Velikost proudu

Hodnoty TRMS proudu měřené v intervalu 10 period lze vyčíst v registrech `AIRMS1012`, `BIRMS1012`, `CIRMS1012` a `NIRMS1012` dle příslušné fáze. Hodnota je zde uložena ve formátu 32-bit a vyjadřuje poměr k maximální hodnotě napětí ADC převodníku. Hodnota napětí je spočítána dle vzorce 4.5 odvozeného z [3].

$$I_x = \frac{150,134 \cdot xIRMS1021}{52.702.092} [A] \quad (4.5)$$

Hodnota $150,134A$ je odvozená od maximálního napětí ADC převodníku ($0,707V$) a poměrem transformátoru $1860 : 1$ společně s hodnotou vstupního odporu ($8,76\Omega$) = odpor 62Ω interní odpor v měřicí cívce zapojen paralelně s odporem $10,2\Omega$ osazených na DPS. Viz vzorec 4.6. Hodnota $52.702.092$ je maximální hodnota registru `xIRMS1021` při maximálním napětí ADC [3].

$$1860 \cdot \frac{0,707}{8,76} = 150,134[A] \quad (4.6)$$

Vyčítání velikosti proudu je implementováno funkcí `ade9000_spi_get_actual_current()`. Funkci lze vzdáleně volat pomocí **příkazu i**, který vrací **odpověď i** s hodnotou v Amperech naměřenou v čase volání funkce (doručení příkazu).

Odchylky napájecího napětí

Pro vyčítání tohoto parametru je potřeba kontinuální vyčítání hodnot TRMS měřených za 10 period napětí. Tuto hodnotu lze pravidelně vyčítat pomocí události přerušení RMS1012RDY v registru STATUS čipu ADE9000. Toto vyčítání je implementováno ve funkci *IRQ0_handler()* v souboru **main.c**. Po naměření 10 period elektrického napětí je vyvoláno přerušení. Funkce *IREQ_handler()* vyčte aktuální hodnotu napětí $xVRMS1021$. V tomto případě je pro zjednodušení prováděno vyčítání pouze jedné fáze (AVRMS1021). Hodnota je převedena na napětí, viz vzorec 4.3, přičtena do akumulátoru *float voltage_accum* a je inkrementováno počítadlo *int tenmin_counter*. Jakmile počítadlo dosáhne hodnoty 3000 odpovídající 10 minutám měření, je hodnota akumulátoru vydělena počítadlem (aritmetický průměr). Výsledná průměrná hodnota je vytisknuta v terminálu. Pro účely ladění je přidáno bliknutí diody LED1 ke každému vyčítání.

Po dokončení implementace komunikace se souborovým systémem na SD kartě je vhodné tyto hodnoty ukládat do souboru společně s časovou identifikací. Vyhodnocení splnění požadavků normy ČSN EN 50160 [18] lze provést na základě těchto naměřených 10-minových hodnot.

Rychlé změny napětí

Rychlé změny napětí nebyly implementovány vzhledem k tomu, že je zařízení určeno pouze pro síť nízkého napětí, kde pro tento parametr pravidla provozování distribučních soustav [13] nevyžadují měření. Způsob měření popisuje norma ČSN EN 61000-3-40 [21]. Čip ADE9000 umožňuje monitorovat hodnoty rychlých změn napětí.

Flikr

Samotný čip ADE9000 nepodporuje monitorování flikru. Měření flikru lze realizovat vlastní implementací dle normy ČSN EN 61000-4-15 [20]. Pro zařízení třídy S dle normy ČSN EN 61000-4-30 [21] je potřeba splnění parametrů flikrmetru třídy F3 dle normy ČSN EN 61000-4-15 [20]. Pro měření flikru je možné použít data z waveform bufferu čipu ADE9000. Toto měření nebylo implementováno.

Krátkodobé poklesy/zvýšení napájecího napětí

Dle normy ČSN EN 61000-4-30 [21] se krátkodobé poklesy a zvýšení napětí vyhodnocují měřením hodnot $U_{rms(1/2)}$. Tato hodnota je porovnávána s hodnotou referenčního napětí U_{jm} . Pro klasifikaci popsané v podkapitole 2.6 je také potřeba znát dobu trvání poklesu/zvýšení napětí. Pokles končí, pokud se měřená hodnota $U_{rms(1/2)}$ vrátí na mezní hodnotu + hystereze (typicky $2\%U_{jm}$).

Čip ADE9000 umožňuje při detekci začátku a konce události dip/swell vyvolat externí přerušení. Pro aktivování správného chování přerušení je potřeba definovat prahovou hodnotu napětí $U_{rms(1/2)}$ pro vyvolání události dip nebo swell nastavením registrů DIP_LVL a SWELL_LVL dle 4.7 a 4.8.

$$DIP_LVL = xVRMSONE \cdot 2^{-5} \quad (4.7)$$

$$SWELL_LVL = xVRMSONE \cdot 2^{-5} \quad (4.8)$$

Tyto hodnoty byly nastaveny na 90% a 110% U_{jm} , tedy 207V a 253V. Pokud uvažujeme hodnotu registru $xVRMSONE = 21.404.435$ jako odpovídající hodnotu k $U_{jm} = 230V$, tak LVL pro 90% a 110% odpovídá hodnotám 603.000 a 735.777. Tyto hodnoty byly zapsány do registrů DIP_LVL a SWELL_LVL.

Minimální počet cyklů zvýšeného/sníženého napětí potřebných k vyvolání přerušení je nastaven v registrech DIP_CYC a SWELL_CYC. Tyto hodnoty byly nastaveny na 1. Minimální/maximální dosažená hodnota při události dip/swell lze číst v registrech DIPx a SWELLx.

Pro přerušení byl použit výstup $CF4/\overline{EVENT}/DREADY$. V registru CONFIG1 je potřeba jej přepnout do módu \overline{EVENT} . Dále jsou v registru EVENT_MASK vybrány události, na které má výstup přerušení reagovat. Byly zvoleny události DIPA a SWELLA vzhledem k jednofázové povaze systému. Výstup \overline{EVENT} je v logické nule, pokud je aktivní alespoň jedna ze zvolených událostí, jinak je v logické jedničce.

Vyčítání přerušení implementuje funkce $IRQe_handler()$, která je přiřazena jako callback funkce přerušení na pin 9. Přerušení nastane při vzestupné i sestupné náběžné hraně. Prozatím funkce pouze vypíše do terminálu nejnižší hodnotu napětí během události DIP vyčtením hodnoty z registru DIPA. Pro účely ladění je přidáno bliknutí diody LED2 při začátku a konci události DIP/SWELL.

Pro splnění normy ČSN EN 61000-4-30 [21] pro třídu S je potřeba dokončit klasifikaci jednotlivých událostí podle doby jejich trvání a minimální dosažené hodnoty, jak popisují tabulky 2.2 a 2.3. Dále je potřeba zaznamenávat časy těchto událostí. Pro archivaci může posloužit SD karta. Záznamy lze ukládat jako samostatné soubory s časovým razítkem a identifikací v názvu souboru. Obsah souboru může obsahovat dobu trvání, minimální/maximální naměřené hodnoty, popřípadě vzorkovaný průběh napětí během události, zejména začátek a konec události. Je také vhodné odeslat zprávu pomocí ADE_MQTT oznamující incident.

Krátkodobá a dlouhodobá přerušení napájecího napětí

Při reálném nasazení je nutné pro měření tohoto parametru mít systém vybavený záložním napájením. Měření tohoto parametru vychází z **Krátkodobé poklesy/zvýšení napájecího napětí**. Jedná se vlastně o dip na všech fázích s minimální hodnotou TRMS napětí pod 5% U_{jm} . Pro zjednodušení práce uvažuje pouze jednu fázi. Obdobně jako při obsluze dip/swell události vyčítá funkce $IRQe_handler()$ hodnotu DIPA. Pokud je tedy hodnota zobrazená menší než 5% $U_{jm} = 11,5V$, jedná se o přerušení napájecího napětí. Událost končí po přesažení hodnoty 5% $U_{jm} + hystereze$. Hystereze je stanovena jako 2% U_{jm} [21].

Pro splnění normy ČSN EN 61000-4-30 [21] pro třídu S je potřeba dokončit klasifikaci jednotlivých událostí podle doby jejich trvání, jak popisuje tabulka 2.4. Dále je potřeba zaznamenávat časy těchto událostí. Pro archivaci může posloužit SD karta. Záznamy lze ukládat jako samostatné soubory s časovým razítkem a identifikací v názvu souboru. Obsah souboru může obsahovat dobu trvání, minimální/maximální naměřené hodnoty, popřípadě vzorkovaný průběh napětí během události, zejména začátek a konec události. Je také vhodné odeslat zprávu pomocí ADE_MQTT oznamující incident.

Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí

Vzhledem k nedefinování zvláštních limitních hodnot tohoto parametru normami je na tento parametr nahlíženo stejně, jak popisuje sekce **Krátkodobé poklesy/zvýšení napájecího napětí**.

Přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí

Měření přechodných napětí může být dle normy ČSN EN 61000-4-30 užitečné, není však povinné. Vzhledem k těmto okolnostem byla implementace parametru přeskočena.

Nesymetrie napájecího napětí

Toto měření bylo přeskočeno z důvodu přesahu rozsahu zadání diplomové práce. Zařízení tuto funkcionalitu však umožňuje. Pro toto měření je potřeba je potřeba připojení zařízení k třífázové soustavě. Lze k tomu použít následující registry čipu ADE9000: *ANGL_VA_VB*, *ANGL_VA_VC* a *ANGL_VA_VC*. Tyto registry obsahují úhly posunutí průběhu napětí mezi fázemi. ADE9000 měří rozdíly časů mezi fázovými průchody nulou [3].

Harmonická napětí

Norma ČSN EN 61000-4-7 [19] vyžaduje pro měření harmonických následující komponenty přístroje.

- vstupní obvody s anti-aliasing filtrem
- A/D převodník včetně vzorkovací a paměťové jednotky
- jednotka synchronizace a tvarování okna je-li požadována
- DFT procesor vytvářející Fourierovy koeficienty a_m a b_m

První tři komponenty jsou implementované v čipu ADE9000, tedy filtrovaný vstup, A/D převod a tvarování okna pomocí waveform bufferu (128 16-bitových hodnot pro každou periodu signálu). Jsou zde tedy uloženy 4 periody signálu Norma dále vyžaduje šířku okna 10/12 period signálu. Tu lze získat vícenásobným čtením waveform bufferu.

DFT procesor lze implementovat buď externě - data z WF bufferu přenášet přes MQTT, nebo lépe interně - v měřicím zařízení. Je potřeba zjistit, zda nRF9160 disponuje dostatečným výpočetním výkonem na vykonávání potřebných fourierových transformací. Při nedostatku výkonu se nabízí řešení v podobě přidání dalšího čipu do systému doplňující výpočetní výkon potřebný pro transformace. Třída S má povolené mezery mezi měřeními intervaly, což snižuje nároky na výpočetní výkon. DFT (Diskrétní Fourierova Transformace) musí být provedena alespoň do řádu 40. DFT procesor není v této práci implementován [21].

Pro účely externí harmonické analýzy lze vzorkované data vyčítat pomocí **příkazu b** protokolu ADE_MQTT. **Odpověď b** obsahuje celý obsah resampled waveform bufferu, tedy 512 vzorků ze všech sedmi vstupních kanálů (4 periody elektrického napětí). Tyto vzorky jsou interpretovány jako 16-bitové sign int a jsou zarovnány do pravého úhlu. Nad těmito vzorky pak lze snadno provést DFT pro harmonickou i meziharmonickou analýzu do maximální frekvence $3,2kHz$ dle Nyquistova kritéria (vzorkovací frekvence $6,4kHz$). Pro splnění požadavků na třídu S dle normy ČSN EN 61000-4-30 [21] je potřeba implementovat vyčítání 10 period signálu.

Hodnota THD (Total Harmonic Distortion) lze odvodit z harmonické analýzy, nebo vyčíst z registru čipu ADE9000, kde jsou tyto hodnoty pro jednotlivé kanály počítány z intervalů trvajících 2 sekundy. ADE vyhodnocuje THD pro tři kanály napětí a tři kanály proudu. Hodnoty pro napětí jsou uloženy v registrech AVTHD, BVTHD a CVTHD. Hodnoty pro proudy jsou v registrech AITHD, BITHD a CITHD [3].

Hodnota je aktualizována každou sekundu a je vyjádřena v decibelech, vyjádření v procentech popisuje vzorec 4.9 pro proud a vzorec 4.10 pro napětí. Oba jsou převzaté z [3].

$$\%THD \text{ on Current Channel } X = xITHD \cdot 2^{-27} \cdot 100\% \quad (4.9)$$

$$\%THD \text{ on Voltage Channel } X = xVTHD \cdot 2^{-27} \cdot 100\% \quad (4.10)$$

Aktualizaci nové hodnoty THD lze rozpoznat pomocí přerušení z ADE9000. Bit THD_PF_RDY v registru STATUS0 (signál IRQ0) je nastaven na 1, pokud dojde k aktualizaci THD. Lze tedy nastavit bit THD_PF_RDY v registru MASK0 na 1. Tím bude vyvoláváno přerušení po každé aktualizaci hodnot THD [3].

Meziharmonická napětí

Obdobně jako **Harmonická napětí** lze analyzovat meziharmonická napětí (frekvence, které nejsou celočíselným násobkem základní frekvence). Měří se frekvence do výše 9kHz [19]. Vzhledem k vzorkovací frekvenci resampled waveform bufferu 6,4kHz (128 · 50Hz) lze uvažovat maximální analyzovatelnou frekvenci 3,2kHz dle Nyquistova kritéria.

Úrovně napětí signálů v napájecím napětí

Tyto signály jsou měřeny v rámci analýzy meziharmonických napětí, viz **Meziharmonická napětí**. Třída S umožňuje specifikovat vlastní metodu a nejistotu měření [21].

Název parametru	Popis stavu
Kmitočet sítě	Implementováno, možnost vyčítání aktuálního stavu vzdáleně.
Velikost napětí	Implementováno, možnost vyčítání aktuálního stavu vzdáleně.
Velikost proudu	Implementováno, možnost vyčítání aktuálního stavu vzdáleně.
Odchyšky napětí	Implementováno, hodnoty jsou vypisovány do terminálu.
Rychlé změny napětí	Nebylo implementováno vzhledem k použití v nn.
Flikr	Připravená data k analýze.
Poklesy napětí	Implementováno, výpis události do terminálu.
Přerušení napětí	Implementováno v rámci poklesů napětí.
Dočasná přepětí	Implementováno v rámci poklesů napětí.
Přechodná přepětí	Nebylo implementováno, není povinné dle normy.
Nesymetrie napětí	Přesah zadání, potřeba 3 fázového systému.
Harmonická napětí	Připravená data k analýze.
Meziharmonická napětí	Připravená data k analýze.
Úrovně signálů	Připravená data k analýze.

Tabulka 4.1: Shrnutí implementace jednotlivých parametrů napětí

4.7 Komunikace

Přenos dat je realizován pomocí NB-IoT. nRF Connect SDK implementuje inicializaci LTE komunikace funkcí `lte_lc_init_and_connect()`. Veškerý síťový stack je implementován v SDK. Je tedy zavolána funkce `mqtt_connect()`, která inicializuje komunikaci přes modem. Před kompilací je potřeba správně nakonfigurovat typ komunikace z výchozího LTE-M na NB-IoT v `proj.conf` - `CONFIG_LTE_NETWORK_MODE_NBIOT=y`.

Zařízení při inicializaci dostane přidělenou lokální IP adresu ze sítě. Tato LAN je oddělena od internetu pomocí firewall. VUT FEKT má pro testovací účely na whitelistu této firewall veřejnou IP adresu svého serveru, na který je povolena komunikace. Tento server je tedy dostupný jak ze sítě NB-IoT, tak z internetu. Na tomto serveru běží služba Mosquitto - MQTT Broker, ke kterému se připojuje měřicí zařízení jako Subscriber i Publisher (příchozí a odchozí komunikace). K tomuto serveru lze připojit jakýkoliv standartní MQTT klient k ovládaní měřicího zařízení. Přístup je omezen jménem a heslem.

Pro vzdálené ovládaní byl navržen textový protokol ADE_MQTT. K zajištění přenosu zpráv protokolu je využitý protokol MQTT. Měřicí zařízení je připojeno k několika přiřazeným kanálům MQTT TOPIC, kdy v každém kanálu probíhá jednosměrná komunikace. Tzn. zařízení je připojeno k příchozím kanálům jako MQTT SUBSCRIBER a k odchozím jako MQTT PUBLISHER. Tyto kanály lze zvolit libovolně dle možnosti MQTT brokeru, v implementaci je pro příchozí zprávy do zařízení využitý TOPIC `my/subscribe/topic` a TOPIC `my/publish/topic` pro odchozí zprávy ze zařízení.

Parser

Parser slouží pro zpracování externích příkazů přenesených pomocí protokolu MQTT. Tento parser zpracovává zprávy protokolu ADE_MQTT, viz sekce **Protokol ADE_MQTT**, vykonává příkazy a vytváří odpovědi. Parser je vytvořený jako samostatná vrstva, která lze nahradit při případné změně protokolu. Je implementovaný v souborech `ade_mqtt.h` a `ade_mqtt.c`. Parser je spuštěn zavoláním funkce `int ade_mqtt_parse(char * command, size_t len, struct ade_mqtt_request * req)`, která očekává ukazatel na pole se zprávou s obsahem ADE_MQTT REQUEST (`command`) a jeho maximální délku (`len`). Následně vrací počet zpracovaných znaků (sumu všech tokenů) a ve struktuře `ade_mqtt_request` vyplněný přijatý požadavek nebo případnou chybu. Tato funkce pak nejprve volá řetěz funkcí, kdy každá zpracovává jednotlivý token, tedy znak, nebo sekvenci znaků. Každý typ tokenu má svou vlastní funkci, která jej zpracuje, vyplní příslušné položky ve výstupní struktuře `ade_mqtt_request`, volá následující funkci s ukazatelem na následující token a vrátí sumu zpracovaných znaků.

Struktura `ade_mqtt_request` obsahuje následující položky.

char	type	typ příkazu, chyby
char	reg_length	délka registru - 16-bit nebo 32-bit
u16_t	reg_address	adresa registru
u16_t	data_16	data 16-bitů
u32_t	data_32	data 32-bitů
char	channel	identifikace fáze či N vodiče

Pro vykonání příkazu ve struktuře `ade_mqtt_request` je volána funkce `size_t ade_mqtt_handle_request(struct ade_mqtt_request * req, char * answer)`, která dostane ukazatel na strukturu s příkazem `req` a ukazatel na pole pro odpověď `answer`. Funkce vykoná

daný požadavek, sestaví odpověď a zapíše ji do pole *answer* a vrátí počet bytů zapsaných do odpovědi.

Po vykonání příkazu se funkce *ade_mqtt_parse()* bude volat znovu s ukazatelem posunutým o počet zpracovaných znaků. Stejně tak funkce *ade_mqtt_handle_request()* je volána s posunutým ukazatelem na pole odpovědi. Tímto je vyřešena konkatenace více příkazů v jedné zprávě.

Pro kódování v hexadecimálních znacích byly implementovány pomocné funkce *u16_t strhex_to_hex_16(char * str)* a *u32_t strhex_to_hex_32(char * str)* určené pro převod hexadecimálních řetězců na data a *void hex_to_strhex_16(u16_t hex, char * str)* a *void hex_to_strhex_32(u32_t hex, char * str)* určené pro převod dat na hexadecimální řetězce.

Protokol ADE_MQTT

Tento protokol byl navržen za účelem dobré čitelnosti zpráv, jednoduchého vytváření zpráv a snadné rozšiřitelnosti o další funkce a typy zpráv. Je tedy vhodný pro vývoj, testování, ladění, nebo zasílání krátkých obslužných zpráv (např. kalibrace, okamžité vyčtení hodnot napětí, apod.). Kódování jednotlivých bytů je provedeno pomocí hexadecimálních znaků, což ale vede ke zdvojnásobení objemu dat. Např. byte 0xA2 (binárně 10100010) je interpretován jako dva ACII znaky (byty) 'A' (binárně 01000001) a '2' (binárně 00110010). Pro testování, vývoj, nebo posílání menších objemů dat lze toto kódování do ASCII použít. Pro přenos většího objemu dat, jako např. data z waveform bufferu je vhodné využít jiné kódování zpráv. Pro reálné nasazení bude systém rozšířen o další protokol, který bude splňovat potřebu datové (tím pádem i energetické) úspornosti na úkor čitelnosti dat, která nebude potřeba. S touto možností návrh počítá, viz sekce **Parser**.

Zprávy jsou rozdělené do dvou základních typů dle směru komunikace, z nichž má každý vyhrazený svůj MQTT TOPIC.

- REQUEST - zprávy od klienta k měřicímu zařízení
- RESPONSE - zprávy od měřicího zařízení ke klientovi

Každá REQUEST zpráva se skládá z minimálně jednoho příkazu, např. požadavek na čtení napětí, na který je pak v příslušné RESPONSE zprávě doručena odpověď, např. 230V. Protokol umožňuje řetězit jednotlivé příkazy do jedné zprávy pomocí konkatenace. V příslušné RESPONSE zprávě jsou potom odpovědi také zkonkaténovány při zachování pořadí. Je zajištěno, aby na všechny příkazy z jedné REQUEST zprávy přišel stejný počet odpovědí (ve stejném pořadí) ve zprávě RESPONSE.

ADE_MQTT REQUEST

Zprávy typu REQUEST mohou obsahovat následující typy příkazů:

- a - přístup do registru ADE
- v - čtení aktuálního napětí
- f - čtení aktuálního kmitočtu
- i - čtení aktuálního proudu
- b - čtení Resampled WaveForm Bufferu

Příkaz a slouží k vyčítání a zapisování registrů ADE9000. Využívá k tomu 16-bitové adresy registrů a 16-bitové nebo 32-bitové data. Očekávaná odpověď je **odpověď a**. Příkaz se skládá z následujících částí poskládaných za sebou.

TYPE	'a'	- typ zprávy
READ/WRITE	'r' nebo 'w'	- čtení nebo zápis do registru
LENGTH	's' nebo 'l'	- 16-bitový nebo 32-bitový registr
ADDRESS	16-bitová adresa registru	- 4 HEX znaky, např. 12AB
TYPE_DATA	'd'	- DATA oddělovač
DATA	16-bitová nebo 32-bitová data	- 4 nebo 8 HEX znaků, např. 12AB nebo 1234ABCD

Poslední dvě položky (TYPE_DATA a DATA) se týkají pouze příkazu zápisu dat. Zpráva typu READ tyto položky neobsahuje. Délka položky DATA se odvíjí od položky LENGTH. Příklad příkazu: *aws0001d0000* - zápis 0x0000 do 16-bitového registru s adresou 0x0001.

Příkaz v slouží k vyčtení aktuální hodnoty RMS napětí na konkrétní fázi. Očekávaná odpověď je **odpověď v**. Příkaz se skládá z následujících částí poskládaných za sebou.

TYPE	'v'	- typ zprávy
CHANNEL	'a' nebo 'b' nebo 'c'	- volba fáze

Položka CHANNEL určuje 1., 2., nebo 3. fázi. Příklad příkazu: *vb* - čtení RMS napětí na 2. fázi.

Příkaz f slouží k vyčtení aktuální hodnoty kmitočtu na konkrétní fázi. Očekávaná odpověď je **odpověď f**. Příkaz se skládá z následujících částí poskládaných za sebou.

TYPE	'f'	- typ zprávy
CHANNEL	'a' nebo 'b' nebo 'c'	- volba fáze

Položka CHANNEL určuje 1., 2., nebo 3. fázi. Příklad příkazu: *fa* - čtení kmitočtu na 2. fázi.

Příkaz i slouží k vyčtení aktuální hodnoty RMS proudu na konkrétní fázi. Očekávaná odpověď je **odpověď i**. Příkaz se skládá z následujících částí poskládaných za sebou. Položka CHANNEL určuje 1., 2., nebo 3. fázi, případně N vodič. Příklad příkazu: *in* - čtení RMS proudu na N vodiči.

TYPE 'i' - typ zprávy
 CHANNEL 'a' nebo 'b' nebo 'c' nebo 'n' - volba fáze, případně N vodiče

Příkaz b slouží k vyčtení dat z waveform bufferu. Očekávaná odpověď je **odpověď b**. Příkaz se skládá z následující části.

TYPE 'b' - typ zprávy

Příklad příkazu: *b* - čtení WF bufferu.

ADE_MQTT RESPONSE

Zprávy typu RESPONSE mohou obsahovat následující typy příkazů:

- a - přístup do registru ADE
- v - čtení aktuálního napětí
- f - čtení aktuálního kmitočtu
- i - čtení aktuálního proudu
- b - čtení Resampled WaveForm Bufferu
- e - chyba

Odpověď a je odpovědí na **příkaz a** potvrzující zápis do registru nebo obsahující data vyčtená z registru. Odpověď se skládá z následujících částí poskládaných za sebou.

TYPE 'a' - typ zprávy
 ADDRESS 16-bitová adresa registru - 4 HEX znaky, např. 12AB
 TYPE_DATA 'd' - DATA oddělovač
 DATA 16-bitová nebo 32-bitová data - 4 nebo 8 HEX znaků,
 např. 12AB nebo 1234ABCD

Poslední dvě položky (TYPE_DATA a DATA) se týkají pouze příkazu čtení dat. Odpovědi na příkazy zápisu obsahují pouze položky TYPE a ADDRESS. Délka položky DATA se odvíjí od položky LENGTH v odpovídajícím příkazu. Příklad odpovědi: *a0001d0000* - přečteno 0x0000 z 16-bitového registru s adresou 0x0001.

Odpověď v je odpovědí na **příkaz v** obsahující vyčtené RMS napětí. Odpověď se skládá z následujících částí poskládaných za sebou.

TYPE 'a' - typ zprávy
 CHANNEL 'a' nebo 'b' nebo 'c' - vyčtená fáze
 VOLTAGE hodnota napětí - desetiné číslo, např. 241.1450

Protokol nedefinuje počet číslic před a po desetiné tečce. Příklad odpovědi: *va241.1450* - vyčteno 241.145 V RMS na 1. fázi.

Odpověď f je odpovědí na **příkaz f** obsahující vyčtený kmitočet. Odpověď se skládá z následujících částí poskládaných za sebou.

TYPE	'a'	- typ zprávy
CHANNEL	'a' nebo 'b' nebo 'c'	- vyčtená fáze
FREQUENCY	hodnota kmitočtu	- desetiné číslo, např. 50.0000

Protokol nedefinuje počet číslic před a po desetiné tečce. Příklad odpovědi: *fc49.8500* - vyčteno 49.85 Hz na 3. fázi.

Odpověď i je odpovědí na **příkaz i** obsahující vyčtený RMS proud. Odpověď se skládá z následujících částí poskládaných za sebou.

TYPE	'a'	- typ zprávy
CHANNEL	'a' nebo 'b' nebo 'c' nebo 'n'	- vyčtená fáze, nebo N vodič
CURRENT	hodnota proudu	- desetiné číslo, např. 10.0000

Protokol nedefinuje počet číslic před a po desetiné tečce. Příklad odpovědi: *in11.2000* - vyčteno 11.2 A RMS na nulovém vodiči.

Odpověď b je odpovědí na **příkaz b** obsahující vyčtená data z waveform bufferu. Odpověď se skládá z následujících částí poskládaných za sebou.

TYPE	'b'	- typ zprávy
DATA	RAW DATA	- data, typicky 512 samplů

Data jsou složena ze sekvence struktury typu **struct ResampledWfbData**, tedy 14 bytů · 512 samplů. Viz sekce 4.3. Příklad odpovědi: *bXXXXXXXXXXXXX....XXXXX* - vyčtena data z WF bufferu.

Odpověď e je chybová odpověď na jakýkoliv příkaz, který obsahoval chybu syntaxe nebo který nebylo možno provést. Odpověď se skládá z části TYPE následovanou částí specifikující typ chyby.

TYPE	'e'	- typ zprávy
UNKNOWN_TOKEN	't'	- neznámý znak příkazu
INCOMPLETE_TOKEN	'u'	- chyba synataxe - chybí část příkazu
INTERNAL	'i'	- interní chyba
EMPTY_MESSAGE	'm'	- zpráva neobsahuje žádné příkazy
WRONG_CHANNEL	'c'	- neexistující typ fáze
WRONG_REG_LENGTH	'l'	- neexistující délka registru
OTHER	'n'	- nedefinovaná chyba

Příklad odpovědi: *eu* - chyba v syntaxi z příkazu.

Protokol zprávy REQUEST a RESPONSE jsou popsány následujícími gramatikami v BNF formě.

Gramatika REQUEST zprávy

```
<REQ_MESSAGE> ::= <REQ> | <REQ> <REQ_MESSAGE>
<REQ> ::= <ACCESS_REG> | <READ_VOLTAGE> |
          | <READ_CURRENT> | <READ_FREQUENCY> | b
<READ_VOLTAGE> ::= 'v' <CHANNEL>
<READ_CURRENT> ::= 'i' <CURRENT_CHANNEL>
<READ_FREQUENCY> ::= 'f' <CHANNEL>
<CHANNEL> ::= 'a' | 'b' | 'c'
<CURRENT_CHANNEL> ::= <CHANNEL> | 'n'
<ACCESS_REG> ::= 'a' <READ_REG> | 'a' <WRITE_REG>
<READ_REG> ::= 'r' <REG_LENGTH> <REG_ADDR>
<REG_LENGTH> ::= 's' | 'l'
<WRITE_REG> ::= 'ws' <REG_ADDR> 'd' <DATA_16> |
              | 'wl' <REG_ADDR> 'd' <DATA_32>
<REG_ADDR> ::= <HEX> <HEX> <HEX> <HEX>
<DATA_16> ::= <HEX> <HEX> <HEX> <HEX>
<DATA_32> ::= <HEX> <HEX> <HEX> <HEX> <HEX> <HEX> <HEX> <HEX>
<HEX> ::= <NUM> | 'A' | 'B' | 'C' | 'D' | 'E' | 'F'
<NUM> ::= '0' | '1' | '2' | '3' | '4' | '5' | '6' | '7' | '8' | '9'
```

Gramatika RESPONSE zprávy

```
<RES_MESSAGE> ::= <RES> | <RES> <RES_MESSAGE>
<RES> ::= <REG_DATA> | <REG_WRITE_SUCCESS> |
          | <VOLTAGE> | <CURRENT> | <FREQUENCY> |
          | <WF_BUFFER> | <ERROR>
<REG_DATA> ::= 'a' <REG_ADDR> 'd' <DATA>
<DATA> ::= <DATA_16> | <DATA_32>
<REG_WRITE_SUCCESS> ::= 'a' <REG_ADDR>
<VOLTAGE> ::= 'v' <CHANNEL> <VALUE>
<CURRENT> ::= 'i' <CURRENT_CHANNEL> <VALUE>
<FREQUENCY> ::= 'f' <CHANNEL> <VALUE>
<CHANNEL> ::= 'a' | 'b' | 'c'
<CURRENT_CHANNEL> ::= <CHANNEL> | 'n'
<VALUE> ::= <NUMS> '?' <NUMS>
<NUMS> ::= <NUM> | <NUM> <NUMS>
<WF_BUFFER> ::= 'b' [any bytes]
<ERROR> ::= 'e' <ERR_TYPE>
<ERR_TYPE> ::= 't' | 'i'
<DATA_16> ::= <HEX> <HEX> <HEX> <HEX>
<DATA_32> ::= <HEX> <HEX> <HEX> <HEX> <HEX> <HEX> <HEX> <HEX>
<HEX> ::= <NUM> | 'A' | 'B' | 'C' | 'D' | 'E' | 'F'
<NUM> ::= '0' | '1' | '2' | '3' | '4' | '5' | '6' | '7' | '8' | '9'
```

Příklady komunikace protokolu ADE_MQTT

REQUEST: ib

- požadavek na čtení proudu na kanálu B (2. fázi)

RESPONSE: ib10.2500

- na kanálu B (2. fázi) bylo naměřeno 10.25 A

REQUEST: inar1234arl0001

- požadavek na čtení proudu na kanálu N (N vodiči)
- chybný požadavek na čtení registru - nekompletní adresa
- požadavek na čtení 32-bitového registru s adresou 0x0001

RESPONSE: in5.0000eta0001d00000000

- na kanálu N (N vodiči) bylo naměřeno 5.0 A
- chyba dotazu
- registr s adresou 0x0001 má hodnotu 0x00000000

REQUEST: ars04FEvaawl0000d00000001aws04FEd0000

- požadavek na čtení 16-bitového registru s adresou 0x04FE
- požadavek na čtení napětí na kanálu A (1. fázi)
- požadavek na zapsání 32-bitové hodnoty 0x00000001 do registru s adresou 0x0000
- požadavek na zapsání 16-bitové hodnoty 0x0000 do registru s adresou 0x04FE

RESPONSE: a04FEd00FEva238.0000a0000a04FE

- registr s adresou 0x04FE má hodnotu 0x00FE
- na kanálu A (1. fázi) bylo naměřeno 238.0 V
- úspěšně bylo zapsáno do registru s adresou 0x0000
- úspěšně bylo zapsáno do registru s adresou 0x0000

Kapitola 5

Praktické ověření navrženého prototypu

Tato kapitola popisuje průběh zprovoznění a testování zkonstruovaného prototypu. První podkapitola popisuje postup připojení zařízení do sítě nízkého napětí, druhá popisuje připojení zařízení do NB-IoT sítě a testování komunikace a protokolu ADE_MQTT, třetí popisuje proces kalibrace nutný pro dosažení přesných výsledků měření a čtvrtá popisuje testování samotného měření parametrů napětí a proudu.

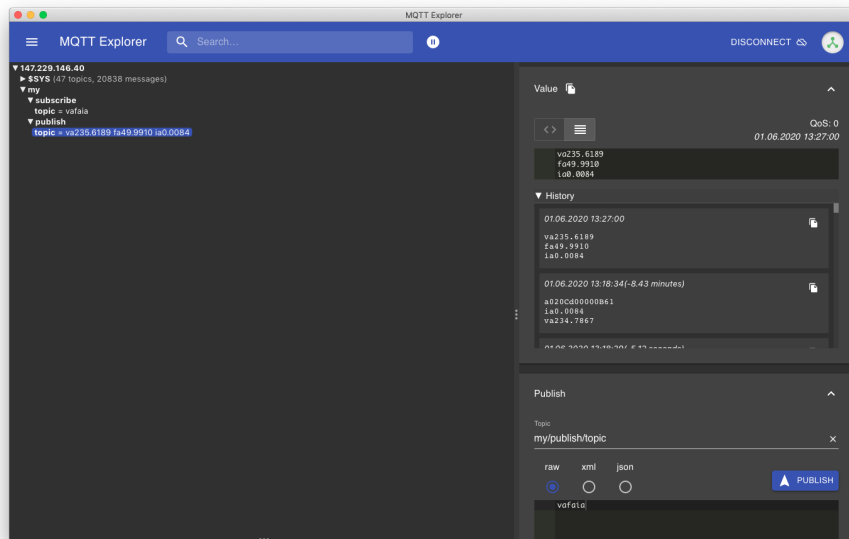
5.1 Připojení do sítě nízkého napětí

Pro co možná nejbezpečnější připojení měřicí desky k síti byl vyroben kabel se standardní tříkolíkovou zástrčkou 230V. Kabel je osazen dvěma (fáze, nulový vodič) bezpečnostními banánkovými konektory, které lze připojit k měřicí desce. Nulový vodič - černý konektor kabelu je připojen do černého konektoru na měřicí desce. Fázový vodič - červený konektor je připojen do jednoho ze tří červených konektorů na měřicí desce. Ochranný vodič je odpojen. Při napájení soustavy ze sítě, je třeba mít připojené napětí na 3. fázový konektor (L3), je k němu připojen napájecí zdroj. Před zapojením zařízení do sítě je nutno zkontrolovat správnost zapojení vodičů v zásuvce. Fázový vodič musí být vlevo a nulový vpravo. Při přehození zapojení v zásuvce dochází k přivedení fázového napětí na GND část desky, tedy i na zemnicí částí jack konektorů pro měřicí cívky. Hrozí zvýšené nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Při správném zapojení je i tak potřeba dbát zvýšené opatrnosti, při přicházení do styku s deskou, zejména vedle banánkových konektorů (step down odpory) a spodní částí desky pod banánkovými konektory a pod zdrojem kde jsou odhalené spoje. Doporučuje se, před jakoukoliv manipulací s deskou, kabel odpojit z elektrické sítě.

Pro měření proudů je použita měřicí cívka typu SCT013 a prodlužovací kabel 230V s odizolovanou částí. Je odstraněna pouze sekundární (vnější) izolace prodlužovacího kabelu. I tak je potřeba dbát zvýšené opatrnosti při manipulaci s prodlužovacím kabelem, může snadněji dojít k poškození primární izolace a odkrytí živé části vodiče. V této části je připojena měřicí cívka dle potřeby na fázový nebo nulový vodič. Cívka by měla být zapojena správnou orientací ve směru proudu (šipka na cívce) a uvnitř musí být pouze jeden vodič, jinak může dojít k vyrušení indukovaného proudu. 3,5mm jack konektor je připojen dle potřeby do jednoho ze čtyř jack konektorů na měřicí desce. Konektor se doporučuje připojovat/odpojovat při odpojení zátěže z prodlužovacího kabelu. Připojení zařízení do sítě nízkého napětí je vyobrazeno na obrázku [C.2](#).

5.2 Testování komunikace

Pro testování komunikace byl použit software MQTT Explorer. Tento software funguje jako MQTT klient, který umožňuje připojení k MQTT brokeru definovaného IP adresou nebo doménovým jménem a portem. Některé brokery vyžadují autentizaci jménem a heslem. Po úspěšném připojení lze MQTT Explorer přihlásit k odběru kanálů MQTT TOPIC. V tomto případě to jsou *my/subscribe/topic* pro odchozí komunikaci a *my/publish/topic* pro příchozí komunikaci. Pokud dorazí zpráva do konkrétního MQTT TOPIC, kanál je zvýrazněn a je u něj vyobrazen text zprávy. K odesílání zpráv slouží sekce **Publish** umožňující odesílání zpráv ve formátu xml, json, nebo raw, který je používán v tomto případě. QoS je nastavena na 0.



Obrázek 5.1: MQTT Explorer

Při připojení zařízení k napájení dojde k načtení RTOS systému, spuštění hlavního programu a aktivování NB-IoT modemu. Po úspěšné autorizaci v síti a získání IP adresy je zařízení připojeno k MQTT brokeru. Je přihlášeno k odběru příchozího kanálu *my/subscribe/topic* a je připraveno přijímat/odesílat zprávy.

Bylo provedeno manuální testování komunikace se zařízením. Zařízení byly posílány zprávy dle protokolu **ADE_MQTT**. Byly zasílány jednotlivé zprávy, např. "va", "fa", "arl0001", apod., vždy od každého typu zprávy. Zařízení validně odpovídá. Obdobně byly zasílány složené zprávy, např. "vafa", "arl0001iavc", apod. Zařízení opět odpovídá validně. Byly testovány také záměrné chyby v sintaxi zpráv jak jednotlivých, tak složených, např. "vaaaa", "ar0021", "ars001ia", apod. Zařízení odpovídalo vždy validně příslušnou chybovou zprávou, což potvrzuje správnost implementace bezdrátové komunikace i parseru. Byla zaznamenána občasná prodleva v řádu sekund mezi odesláním zprávy z MQTT Explorer a přijetím zprávy zařízením. Tato prodleva byla vyhodnocena jako vlastnost technologie NB-IoT, resp. se pravděpodobně jedná o zpoždění při probouzení zařízení zprávou ze sítě. V dalším vývoji je vhodné tento problém zanalyzovat.

5.3 Kalibrace

Pro správné vyčítání parametrů napětí a proudu je potřeba provést proces kalibrace zařízení. Následující sekce popisují proces kalibrace RMS napětí a proudu.

Kalibrace napětí

Pro provedení procesu kalibrace napětí byly stanoveny následující hodnoty.

- U_{NOM} je stanoveno na $230V_{rms}$
- F_{NOM} (kmitočet) je stanoven na $50Hz$
- Napěťový dělič $R1 = 800k\Omega$
- $R2 = 1k\Omega$
- Funkce převodu napětí je $1/(800 + 1) = 0,0012484 V_{rms}/V_{rms}$.
- Nominální napětí ADC je $0.0012484 \cdot 230 = 0,2871 V_{rms}$.
- Maximální napětí ADC při $gain = 1$ je $0,707 V_{rms}$.
- Nominální napětí vyjádřené procentem max. napětí ADC je $U_p = 0,2871/0,707 = 40,6\%$.
- Maximální hodnota z ADC (AVRMS) je $52.702.092$
- Očekávaná hodnota z ADC (AVRMS) pro U_{NOM} je $40,6\% z 52.702.092 = 21.404.435$

Ve vývojových podmínkách byl pro kalibraci použit zdroj napětí z elektrické sítě a jako referenční měřicí zařízení multimetr *Pro'sKit MT-1232*, který však nedisponuje funkcí True RMS. Pro dosažení přesnější kalibrace je potřeba laboratorních podmínek, ideálně s generátorem sinusového signálu a přesným True RMS měřicím zařízením.

Při kalibraci byly naměřeny následující hodnoty: $U_1 = 233,5V$ a $AVRMS = 0x014950F1 = 21.582.065$. Očekávaná hodnota registru AVRMS při vstupním napětí $233,5V$ je $21.730.154$. Po dosazení do vzorce 5.1 převzatého z [3] dostaneme následující odchylku.

$$GAIN = \frac{AVRMS_{EXPECTED}}{AVRMS_{MEASURED}} = \frac{21.730.154}{21.582.065} = 1,006862 \quad (5.1)$$

Hodnota kalibračního registru AVGAIN je určena dle vzorce 5.2 převzatého z [3].

$$AVGAIN = (GAIN - 1) \cdot 2^{27} = 920.958 = 0x000E0D7E \quad (5.2)$$

Tato hodnota je zapsána do registru AVGAIN. Bylo provedeno opětovné kontrolní měření a naměřeny následující hodnoty: $U_2 = 235,1V$ a $AVRMS = 0x014DEA3D$ odpovídající hodnotě $235,1525V$.

Proces je pak stejně zopakován pro ostatní fáze (BVRMS, BVGAIN a CVRMS, CVGAIN).

Kalibrace proudu

Pro provedení procesu kalibrace proudu byly stanoveny následující hodnoty.

- U_{NOM} je stanoveno na $230V_{rms}$
- I_{NOM} je stanoveno na $6A_{rms}$ (zátěž $1400W$)
- Poměr měřicí cívky: $1860 : 1$
- Zátěžový odpor 62Ω v cívce paralelně s $10,2\Omega$ na desce = $8,759\Omega$
- Funkce převodu proudu je $8,759/1860 = 0,004709 V_{rms}/A_{rms}$.
- Nominální napětí ADC je $0,004709 \cdot 6 = 0,02825 V_{rms}$.
- Maximální napětí ADC při $gain = 1$ je $0,707 V_{rms}$.
- Nominální proud vyjádřený procentem max. napětí ADC je $I_p = 0,02825/0,707 = 3,996\%$.
- Maximální hodnota z ADC (AIRMS) je $52.702.092$
- Očekávaná hodnota z ADC (AIRMS) pro U_{NOM} je $3,996\% \cdot 52.702.092 = 2.106.208$

Ve vývojových podmínkách byl pro kalibraci použit spotřebič o příkonu $1400W$. Pro dosažení přesnějších výsledků je potřeba do série připojit přesný ampérmetr.

Při kalibraci byly naměřeny následující hodnoty: $AIRMS = 0x001D3754 = 1.914.708$. Očekávaná hodnota registru AIRMS při vstupním napětí $230V$ a proudu $6A$ je $2.106.208$. Po dosazení do vzorce 5.3 převzatého z [3] dostaneme následující odchylku.

$$GAIN = \frac{AIRMS_{EXPECTED}}{AIRMS_{MEASURED}} = \frac{2.106.208}{1.914.708} = 1.1 \quad (5.3)$$

Hodnota kalibračního registru AIGAIN je určena dle vzorce 5.4 převzatého z [3].

$$AIGAIN = (GAIN - 1) \cdot 2^{27} = 13.423.820 = 0x00CCD4CC \quad (5.4)$$

Tato hodnota je zapsána do registru AIGAIN. Bylo provedeno opětovné kontrolní měření a naměřeny následující hodnoty: $I_2 = 6A$ a $AIRMS = 0x002056DA$ odpovídající hodnotě $6,0375A$.

Proces je pak stejně zopakován pro ostatní fáze a nulový vodič (BIRMS, BIGAIN a CIRMS, CIGAIN a NIRMS, NIGAIN).

5.4 Testování měřicích funkcí prototypu

Bylo testováno měření napětí v reálném čase. Byly k tomu použity zprávy protokolu ADE_MQTT. Zdroj napětí byl střídavě připojován k třem fázovým vstupům. U každého byly naměřeny hodnoty v souladu s naměřenými hodnoty pomocí multimetru Pro'sKit MT-1232 pohybujících se okolo $230V \pm 4\%$

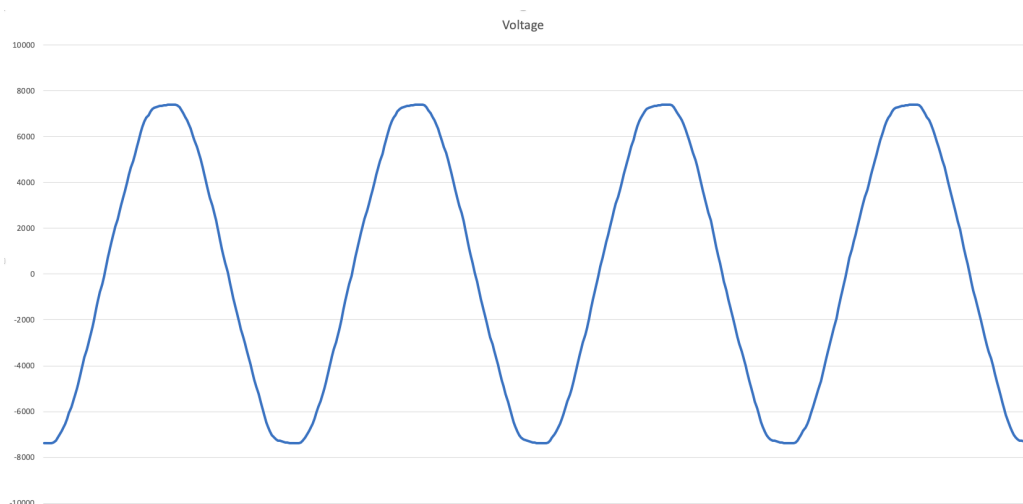
Bylo testováno měření proudu v reálném čase. Byly k tomu použity zprávy protokolu ADE_MQTT. Měřicí cívka byla střídavě připojována k čtyřem proudovým vstupům. U každého byly naměřeny hodnoty v souladu s připojovanou zátěží (1400W) pohybujících se okolo $6,1A \pm 2\%$.

Byla testováno měření kmitočtu sítě v reálném čase. Byly k tomu použity zprávy protokolu ADE_MQTT. Zdroj napětí byl střídavě připojován k třem fázovým vstupům. U každého byly naměřeny hodnoty v souladu s naměřenými hodnoty pomocí multimetru Pro'sKit MT-1232 pohybujících se okolo $50Hz \pm 0,2\%$.

Byly testovány krátkodobé změny napětí. Byla testována pouze událost DIP (podpětí) pomocí vypnutí proudu. Událost SWELL nebylo možno vzhledem k dostupným prostředkům simulovat. Odpojení napětí způsobilo bliknutí LED2, v terminálu je vypsána minimální dosažená hodnota - 0V. Při opětovném připojení napětí opět blikne dioda LED2. Zařízení zjevně reaguje správně na tento typ událostí.

Bylo prováděno průběžné měření napětí. Hodnoty byly vyčítány z terminálu připojeném k sériovém výstupu nRF9160. Zařízení vypisuje desetiminutové průměry napětí, které odpovídají průběžně měřenému napětí pomocí multimetru Pro'sKit MT-1232. Blikání diody LED1 označuje funkční vyčítání 10 periodových hodnot napětí.

Bylo provedeno vyčítání dat z waverform buffer. Úspěšně byly vyčteny data pro 3 napěťové a 4 proudové kanály. Z dat byl vyčleněna řada vzorků napětí první fáze. Tyto vzorky byly pro kontrolu vizualizovány, viz obrázek 5.2. Vizualizace byla provedena pomocí aplikace Excel. 16-bitové hodnoty byly interpretovány jako 16-bitový znaménkový int. Lze jasně pozorovat průběh 4 period signálu napětí.



Obrázek 5.2: Vizualizace dat z Waveform bufferu - průběh napětí 1. fáze

Dioda LED3 mění svůj stav po 10 minutách dle očekávání. Signalizuje tím správnou implementaci RTC a vhodnost pro použití funkce `rtc_handler()` k obsluze pravidelných událostí v čase.

Kapitola 6

Závěr

Byly rozebrány parametry kvality elektrické energie. Bylo navrženo řešení bezdrátového měření kvality elektrické energie, které bylo realizováno. Byl navržen komunikační protokol nad protokolem MQTT. Byl zhotovený prototyp přenosného měřicího zařízení a byly otestovány jeho vlastnosti a funkce. Zařízení bylo úspěšně zkalibrováno pro účely vývoje.

Komunikace s prototypem je zajištěna pomocí technologie NB-IoT, díky které je zařízení schopné posílat velké objemy dat z oblastí s obecně nízkou dostupností mobilní sítě. Zařízení komunikuje pomocí vlastního protokolu ADE_MQTT navrženým v této práci.

Prototyp umožňuje měření aktuálního napětí TRMS na třech vstupních fázích v reálném čase. Dále umožňuje měření okamžité hodnoty TRMS proudu na čtyřech proudových vstupech. Lze také monitorovat okamžitý kmitočet sítě na všech vstupních fázích. Zařízení průměruje napětí z 10 periodových TRMS hodnot do desetiminutových intervalů. Tímto splňuje požadavky na měření paramateru krátkodobých změn napětí dle normy ČSN EN 61000-3-40 [21]. Zařízení umožňuje monitorování incidentů dip/swell s určením minimální/maximální hodnoty napětí během incidentu a jeho doby. Zařízení je schopno odesílat vzorkovaný průběh napětí / proudu ze všech vstupů. Tím umožňuje harmonickou analýzu a vizualizaci napěťových a proudových průběhů. Tato vizualizace byla provedena v podkapitole 5.4.

Zhotovené zařízení má nakročeno k splnění norem pro měřicí zařízení třídy S dle ČSN EN 61000-3-40 [21]. K splnění je potřeba dokončit implementaci všech parametrů kvality elektrické energie dle příslušných norem. Úplné splnění těchto norem je však mimo rozsah zadání této práce.

Prototyp může sloužit jako základ finálního produktu. Využití takového přístroje je vhodné pro provozovatele distribuční sítě k měření kvality výstupního napětí stanic vn/nn nebo kvality napětí v odběrných místech sítě nn [13]. Dále může najít využití pro odběratele z distribuční sítě, nebo provozovatele ostrovního systému, kteří mají potřebu zajistit monitorování kvality elektrické energie. Odběratelé elektrické energie mohou zařízení použít také k orientačnímu měření aktuálních proudů a spotřeby elektrické energie.

Literatura

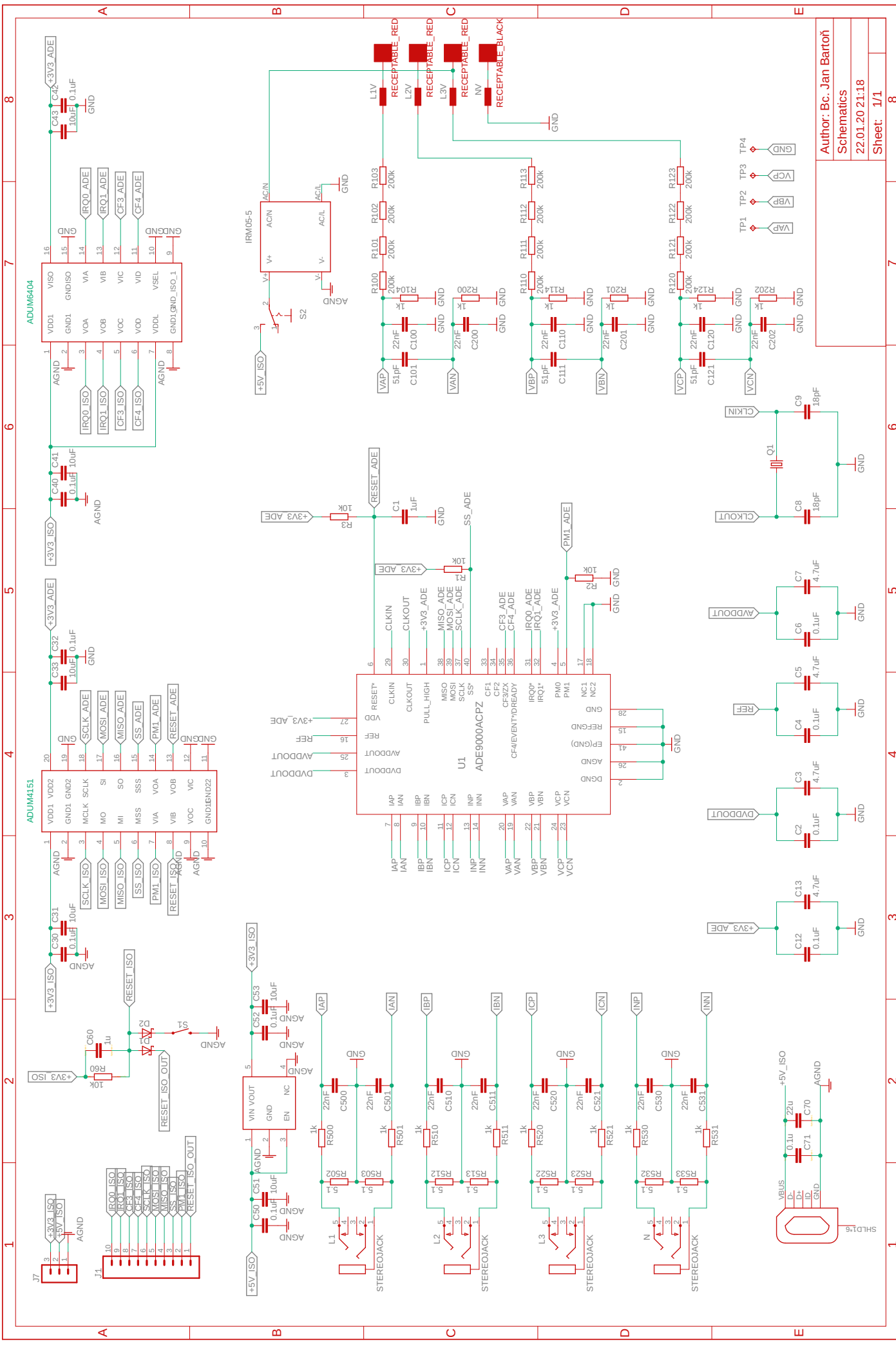
- [1] ANALOG DEVICES INC.. *ADE9000 Preliminary Technical Data*. Rev. PrC. říjen 2016.
- [2] ANALOG DEVICES INC.. *ADE9000 Data Sheet*. Rev. A. červen 2017.
- [3] ANALOG DEVICES INC.. *ADE9000 Technical Reference Manual*. Rev. 0. březen 2017.
- [4] DIGITALDEX, A. *PiMeter - hardware*. [Online; navštíveno 21.01.2020]. Dostupné z: https://github.com/digitaldex/piMeter_hardware.
- [5] DUGAN, R., MCGRANAGHAN, M., SANTOSO, S. a BEATY, H. *Electrical Power Systems Quality, Third Edition*. McGraw-Hill Education, 2012.
- [6] GRIDLING, G. a WEISS, B. *Introduction to Microcontrollers*. 2007. [Online; navštíveno 25.05.2020]. Dostupné z: <http://www.physics.csbsju.edu/~awhitten/phys358/Microcontroller.pdf>.
- [7] MOTOROLA INC.. *SPI Block Guide*. V03.06. duben 2003. [Online; navštíveno 21.01.2020]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20150413003534/http://www.ee.nmt.edu/~teare/ee3081/datasheets/S12SPIV3.pdf>.
- [8] NORDIC SEMICONDUCTOR INC.. *NRF9160 DK User Guide*. v0.7. prosinec 2018. [Online; navštíveno 22.01.2020]. Dostupné z: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF91_DK_User_Guide_v0.7.pdf.
- [9] NORDIC SEMICONDUCTOR INC.. *NRF Connect SDK*. 1.1.0. listopad 2019. [Online; navštíveno 22.01.2020]. Dostupné z: https://developer.nordicsemi.com/nRF_Connect_SDK/doc/1.1.0/nrf/index.html.
- [10] NORDIC SEMICONDUCTOR INC.. *NRF52840 Product Specification*. v1.1. únor 2019. [Online; navštíveno 22.01.2020]. Dostupné z: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PS_v1.1.pdf.
- [11] NORDIC SEMICONDUCTOR INC.. *NRF9160 Product Specification*. v1.1. říjen 2019. [Online; navštíveno 22.01.2020]. Dostupné z: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF9160_PS_v1.1.pdf.
- [12] OASIS. *MQTT Version 3.1.1 Plus Errata 01*. Prosinec 2015. [Online; navštíveno 22.01.2020]. Dostupné z: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html>.

- [13] PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. *Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 3 - Kvalita napětí v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení*. Listopad 2011.
- [14] SVETLANA GRANT (GSMA). *3GPP Low Area Wide Area Technologies*. Září 2016. [Online; navštíveno 21.01.2020]. Dostupné z: <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2016/10/3GPP-Low-Power-Wide-Area-Technologies-GSMA-White-Paper.pdf>.
- [15] VODAFONE CZECH REPUBLIC A.S.. *Mapa pokrytí signálem*. [Online; navštíveno 21.01.2020]. Dostupné z: <https://www.vodafone.cz/mapa-pokryti/>.
- [16] YHDC. *SCT013-030 product sheet*.
- [17] ZEPHYR PROJECT. *Zephyr Project Documentation*. 2020. [Online; navštíveno 1.06.2020]. Dostupné z: <https://docs.zephyrproject.org/latest/>.
- [18] ÚSTAV JADERNÉHO VÝZKUMU ŘEŽ A.S.. *ČSN EN 50160: Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. ed. 3. únor 2011.
- [19] ŠMÍD, J. *ČSN EN 61000-4-7: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-7: Zkušební a měřicí technika – Všeobecná směrnice o měření a měřicích přístrojích harmonických a mezharmónických pro rozvodné sítě a zařízení připojovaná do nich*. ed. 2. červenec 2003.
- [20] ŠMÍD, J. *ČSN EN 61000-4-15: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-15: Zkušební a měřicí technika – Flickmetr – Specifikace funkce a dimenzování*. ed. 2. říjen 2011.
- [21] ŠMÍD, J. *ČSN EN 61000-4-30: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-30: Zkušební a měřicí technika - Metody měření kvality energie*. ed. 3. srpen 2017.

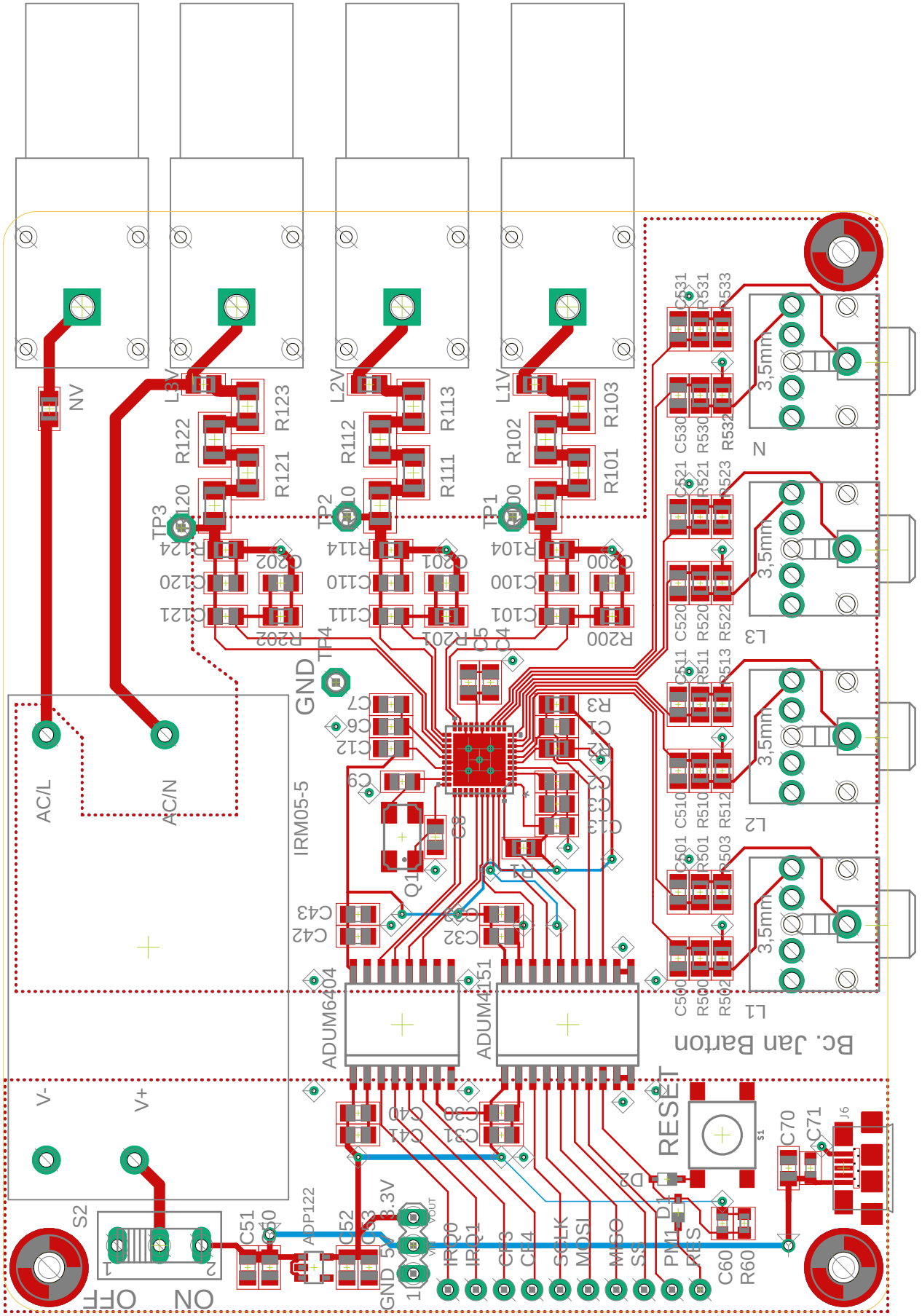
Příloha A

Schéma a rozložení desky měřící části prototypu

Design desky vychází z [4].

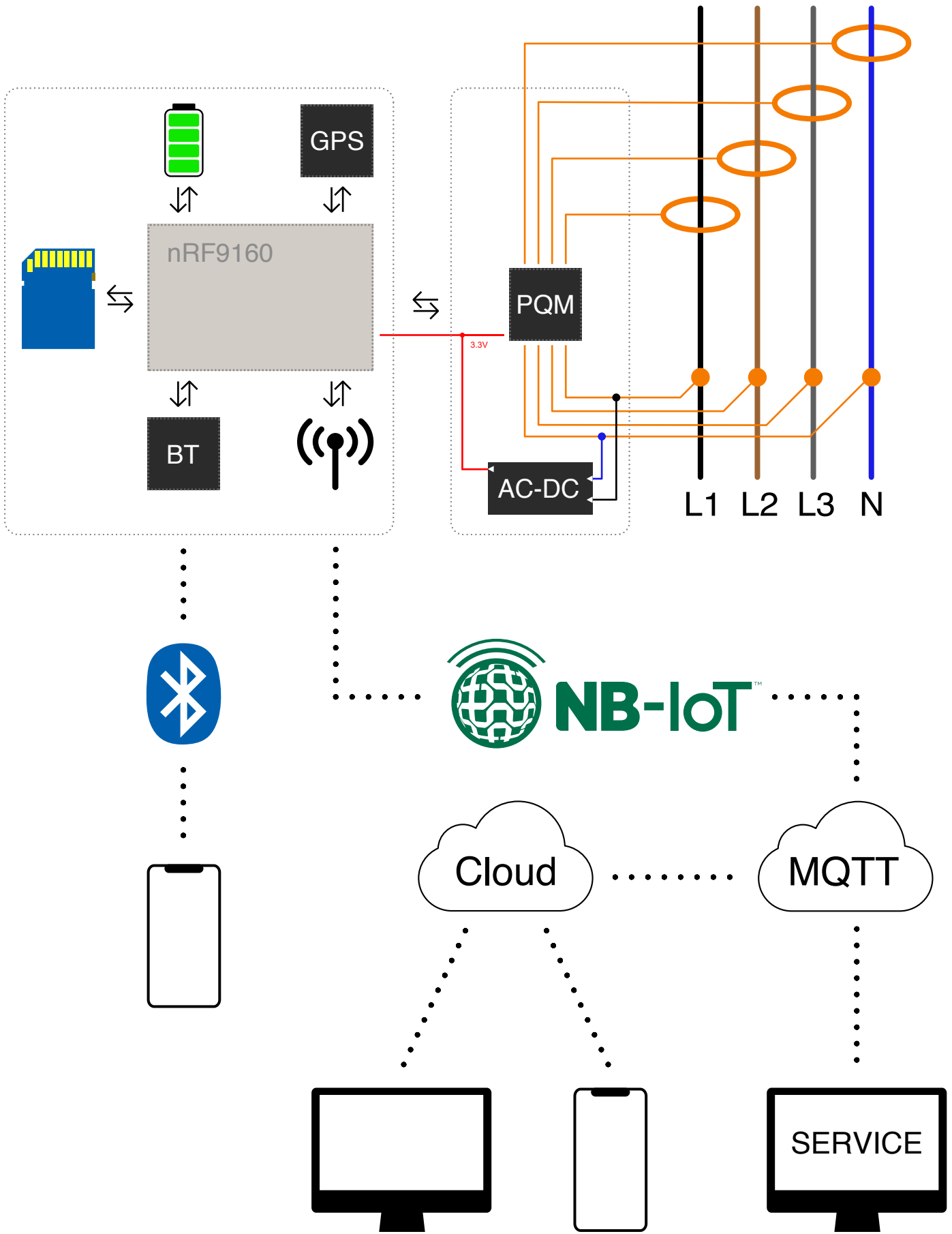


Author: Bc. Jan Bartoň
 Schematics
 22.01.20 21:18
 Sheet: 1/1



Příloha B

Blokové schéma systému



Příloha C

Propojení částí prototypu

ADE9000	nRF9160DK
5V	5V (P7)
GND	GND (P7)
IRQ0	P0.06 (P14)
IRQ1	P0.07 (P14)
CF3	P0.08 (P19)
CF4	P0.09 (P19)
SCLK	P0.10 (P19)
MOSI	P0.11 (P19)
MISO	P0.12 (P19)
SS	P0.13 (P19)

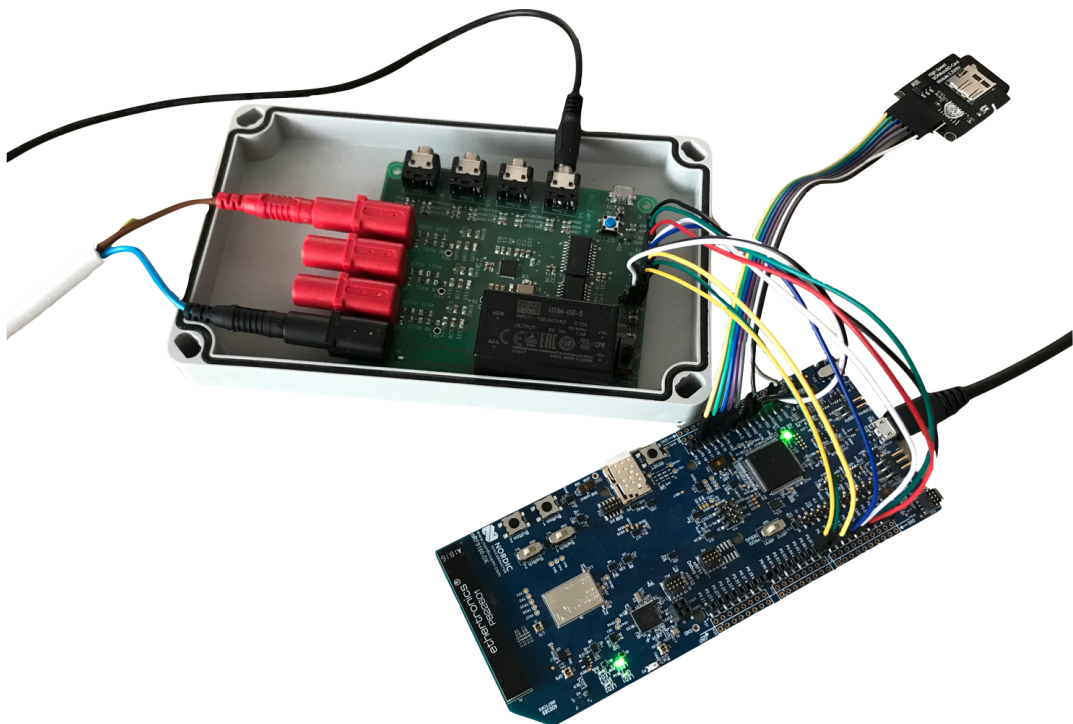
Tabulka C.1: Propojení měřicí části ADE9000 s vývojovou deskou PCA10090 při napájení z USB (přepínač na měřicí části v poloze OFF)

ADE9000	nRF9160DK
5V	External supply + (P28)
GND	External supply - (P28)
IRQ0	P0.06 (P14)
IRQ1	P0.07 (P14)
CF3	P0.08 (P19)
CF4	P0.09 (P19)
SCLK	P0.10 (P19)
MOSI	P0.11 (P19)
MISO	P0.12 (P19)
SS	P0.13 (P19)

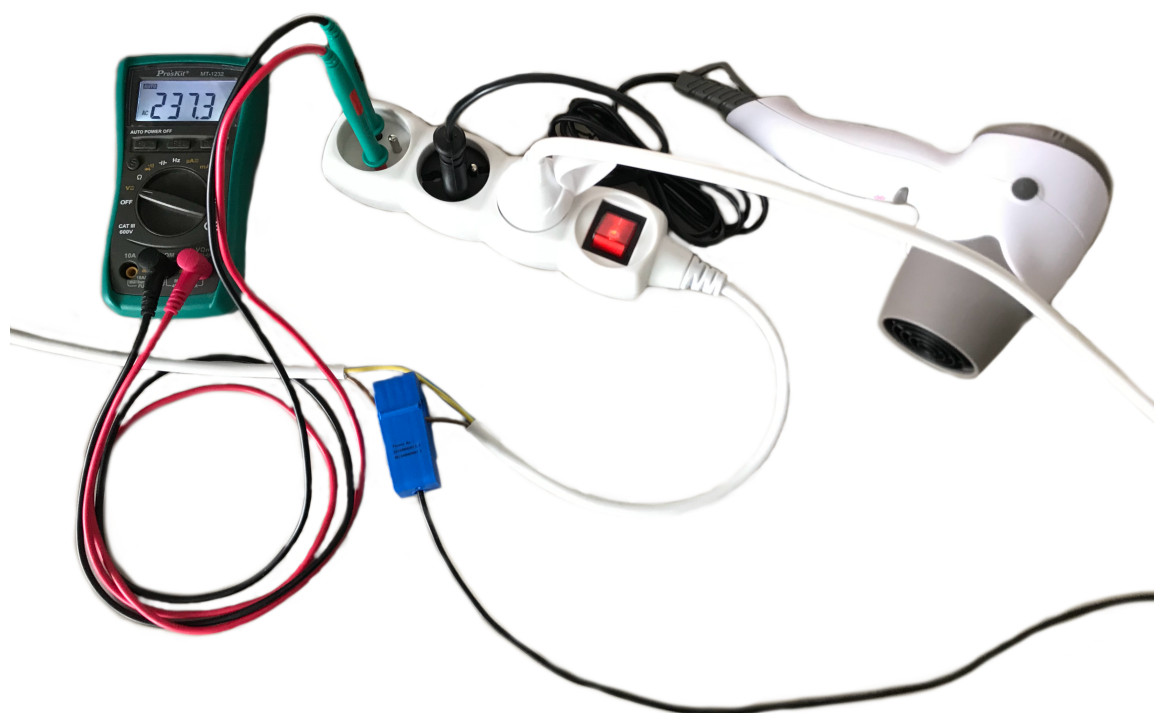
Tabulka C.2: Propojení měřicí části ADE9000 s vývojovou deskou PCA10090 při napájení ze sítě (přepínač na měřicí části v poloze ON)

SD	nRF9160DK
3.3V	VDD (P7)
GND	GND (P7)
CS	P0.14 (P10)
MOSI	P0.15 (P10)
MISO	P0.16 (P10)
SCK	P0.17 (P10)
C_DET	P0.18 (P10)

Tabulka C.3: Propojení čtečky SD karet s vývojovou deskou PCA10090



Obrázek C.1: Propojení komponent prototypu



Obrázek C.2: Připojení prototypu do sítě

Příloha D

Seznam součástí

Produktové číslo	Součástka
ADE9000ACPZ	ADE9000
PTS645SM43SMTR92LFS	reset switch
BAT54WS-7-F	dioda
BLM21BD152SN1D	tlumivka
ADP122AUJZ-3.3-R7	3.3V regulator
406I22A24M57600	Crystal 24.576MHz, 10pF, 20PPM
ZX62-AB-5PA(31)	microusb
STX-3100-5N	3.5mm jack
C0805C226M8PACTU	C 22uF 10V
C0805C106K8PACTU	29,1 C 10uF 10V
CC0805ZRY5V6BB475	C 4.7uF 10V
CC0805MKX7R7BB105	6,34 C 1uF 16V
C0805C104M5RACTU	C 0.1uF 50V
C0805C223K5RACTU	C 22nF 50V
C0805C510J4HACTU	C 51pF 16V
C0805C180J5HACTU	C 18pF 50V
RN732BTDD2003B25	R 200kOhms 150V 125mW
RN732ATTD1002F50	R 10kOhms 100V 100mW
RN732ATTDK1001F25	R 1kOhms 100V 100mW
CRL0603-FW-5R10ELF	R 5.1Ohms 100mW
M20-7821042	10pin header
IRM-05-5	5V zdroj 1A 5W

Tabulka D.1: Seznam součástek použitých na měřicí desce

Produktové číslo	Součástka
YHDC SCT013-030	Měřicí cívka
nRF9160-DK	Vývojový kit nRF9160
6970622931836	SD+MicroSD-card high speed module

Tabulka D.2: Seznam ostatních součástek a komponent systému