

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Návrh zařízení pro pulsní měření spotřeby elektrické energie
Rostislav Orság

Bakalářská práce
2022

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Rostislav Orság**
Osobní číslo: **I19129**
Studijní program: **B2646 Informační technologie**
Studijní obor: **Informační technologie**
Téma práce: **Návrh zařízení pro pulsní měření spotřeby elektrické energie**
Zadávající katedra: **Katedra informačních technologií**

Zásady pro vypracování

-Cílem práce je návrh zařízení a software s využitím jednodeskového počítače (Arduino) se zaměřením na pulsní měření spotřeby elektrické energie s bezdrátovým přenosem dat -Teoretická část bakalářské práce bude věnována segmentu IoT s využitím jednodeskových počítačů a popisu technologií, které budou využity v rámci praktické části. -Praktická část práce bude zaměřena na vlastní návrh softwaru pro jednodeskový počítač (Arduino) se zaměřením na měření spotřeby elektrické energie s bezdrátovým přenosem dat. Pro bezdrátový přenos dat se předpokládá využití radiového přenosu. -Výsledný systém bude testován v reálném provozu.

Rozsah pracovní zprávy: **min 30**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

SELECKÝ, Matúš. *Arduino: uživatelská příručka*. Přeložil Martin HERODEK. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4840-2.

VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž, 2017. ISBN 978-80-87106-93-8.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Fikejz, Ph.D.**
Katedra softwarových technologií

Datum zadání bakalářské práce: **17. prosince 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2022**

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Jan Panuš, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2022

Prohlašuji:

Práci s názvem Návrh zařízení pro pulsní měření spotřeby elektrické energie jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 20. 5. 2022

Rostislav Orság

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Fikejzovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, ochotu a veškerý věnovaný čas, který mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat rodině a svojí přítelkyni, kteří mi byli po celou dobu studia oporou.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem zařízení a softwaru pro neinvazivní měření spotřeby elektrické energie s využitím jednodeskového počítače Arduino. Práce teoreticky popisuje odvětví internetu věcí a principy měření spotřeby elektrické energie. Pro měření spotřeby je využito proudového transformátoru s děleným feritovým jádrem, který umožňuje neinvazivní instalaci do měřeného elektrického obvodu. Zařízení bezdrátově přenáší informace o spotřebě pomocí rádiových modulů. Data o spotřebě jsou přenášena v podobě pulzů, stejně jako u pulzního výstupu elektronických elektroměrů. Výsledné navržené zařízení umožňuje měřit spotřebu elektrické energie v obvodech střídavého proudu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Arduino, internet věcí, mikrokontrolér, měření spotřeby, elektrická energie, rádiová komunikace

TITLE

Design of equipment for pulse measurement of electric energy consumption

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with design of device and software for non-invasive measurement of electricity consumption using a single board computer Arduino. The thesis is theoretical describing Internet of Things industry and principles of measuring electricity consumption. A current transformer with a split ferrite core is used to measure consumption, which allows non-invasive installation in the measured electrical circuit. The device wirelessly transmits consumption information via radio modules. Consumption data is transmitted in the form of pulses, as well as the pulse output of electronic electricity meters. The resulting designed device allows to measure the power consumption in AC circuits.

KEYWORDS

Arduino, Internet of Things, microcontroller, measuring consumption, electric power, radio communication

OBSAH

Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek	10
Seznam zdrojových kódů	10
Seznam zkratk.....	11
Úvod	12
1 Internet of Things	13
1.1 Historie.....	13
1.2 Typy IoT	14
1.2.1 Consumer Internet of Things	14
1.2.2 Commercial Internet of Things.....	14
1.2.3 Industrial Internet of Things	14
1.3 Architektura IoT	15
1.3.1 Senzory a akční členy	16
1.3.2 Sběr dat pomocí bran	16
1.3.3 Edge a Fog computing	17
1.3.4 Datová centra a cloudové platformy.....	17
1.4 Bezpečnost	17
1.5 Využití jednodeskových počítačů v IoT	18
2 Měření spotřeby elektrické energie.....	19
2.1 Vybrané elektrické veličiny	19
2.2 Měření elektrického proudu.....	22
2.3 Přístroje pro měření elektrické energie	22
2.3.1 Indukční elektroměr	23
2.3.2 Elektronický elektroměr	24
2.4 Pulzní výstup elektroměru	26
3 Použitý hardware	27
3.1 Platforma Arduino	27
3.1.1 Historie.....	28
3.1.2 Typy Arduino desek.....	29
3.1.3 Programování desky Arduino	30
3.2 Proudový transformátor	32
3.2.1 Proudový transformátor s děleným jádrem SCT-013	34
3.3 Rádiová komunikace.....	35
3.3.1 Komunikační moduly STX882 a SRX887	35

4	Návrh zařízení – hardwarová část	37
4.1	Obvod pro měření proudu	37
4.1.1	Proudový transformátor	37
4.1.2	Zátěžový rezistor	39
4.1.3	Popis zapojení	40
4.1.4	Instalace proudového transformátoru	41
4.2	Bezdrátový přenos dat	41
4.2.1	Vysílač STX882	41
4.2.2	Přijímač SRX887	42
5	Návrh zařízení – softwarová část	44
5.1	Měření proudu a výpočet spotřeby	44
5.1.1	Knihovna EmonLib	45
5.2	Bezdrátová rádiová komunikace	47
5.2.1	Knihovna RadioHead	47
6	Měření a testování	49
6.1	Kalibrace knihovny pro měření elektrického proudu	49
6.2	Porovnání měření s elektroměrem pro podružné měření	49
6.2.1	Měření pomocí prvního prototypu	50
6.2.2	Měření s operačním zesilovačem	50
6.2.3	Měření pomocí korekční funkce	52
6.3	Závěr testování	53
6.4	Navrhnuté zařízení	54
	Závěr	55
	Použitá literatura	56

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Bloky architektury IoT	15
Obrázek 2: Schéma indukčního elektroměru pro střídavý proud	24
Obrázek 3: Blokové schéma elektronického elektroměru	25
Obrázek 4: Deska Arduino Nano	27
Obrázek 5: Rozložení desky Arduino Nano	28
Obrázek 6: Prostředí Arduino IDE	31
Obrázek 7: Blokové schéma sériové komunikace	32
Obrázek 8: Konstrukce proudového transformátoru	34
Obrázek 9: Proudový transformátor SCT-013-000	35
Obrázek 10: Set vysílače SRX887 (vlevo) a přijímače SRX887 (vpravo).....	36
Obrázek 11: Blokové schéma navrhnutého zařízení.....	38
Obrázek 12: Průběh napětí na analogovém vstupu desky Arduino	39
Obrázek 13: Schéma zapojení obvodu pro měření proudu.....	40
Obrázek 14: Instalace proudového transformátoru.....	41
Obrázek 15: Schéma zapojení modulu STX882.....	42
Obrázek 16: Schéma zapojení modulu SRX887.....	43
Obrázek 17: Vývojový diagram navrhnutého firmwaru pro modul vysílače	46
Obrázek 18: Vývojový diagram navrhnutého firmwaru pro modul přijímače	47
Obrázek 19: Jednofázový elektroměr DDS-1Y-18M 45 A	50
Obrázek 20: Měření spotřeby pomocí prvního prototypu	51
Obrázek 21: Měření spotřeby s operačním zesilovačem	51
Obrázek 22: Měření spotřeby s korekční funkcí.....	52
Obrázek 23: Grafické znázornění závislosti naměřených hodnot	53

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Technické specifikace desky Arduino Nano	30
---	----

SEZNAM ZDROJOVÝCH KÓDŮ

Zdrojový kód 1: Výpočet spotřeby a odesílání pulzů	45
--	----

Zdrojový kód 2: Přijímání pulzů.....	48
--------------------------------------	----

SEZNAM ZKRATEK

A/D	Analog to Digital Converter
API	Application Programming Interface
ASK	Amplitude shift keying
CLI	Command Line Interface
DC	Direct Current
DDoS	Distributed Denial of Service
GND	Ground
IDE	Integrated Development Enviroment
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPv6	Internet Protocol version 6
JVM	Java Virtual Machine
LED	Light Emitting Diode
M2M	Machine-to-Machine
PWM	Pulse Width Modulation
RDIF	Radio Frequency Identification
SD	Secure Digital
USB	Universal Serial Bus
VCC	Voltage Common Collector

ÚVOD

V posledních letech dochází k masivnímu rozmachu a rozšíření odvětví internetu věcí mezi širokou veřejnost. Téměř každý se již setkal s chytrými zařízeními, která potenciálně v mnoha ohledech zlepšují každodenní život. V souvislosti s rozšířením oblasti internetu věcí se zvyšuje poptávka po systémech chytré domácnosti. Tyto inteligentní domy poskytují komplexní infrastrukturu, která pokrývá širokou škálu potřeb uživatelů. Nejen z důvodu nárůstu cen energií může být velmi vhodné mít k dispozici nástroj, který umožňuje sledovat a analyzovat náklady spojené s výdaji za energie, a to v reálném čase.

Tato bakalářská práce si klade za cíl navrhnout monitorovací zařízení umožňující neinvazivní měření spotřeby elektrické energie a bezdrátový přenos naměřených dat v podobě pulzů (analogie k pulznímu výstupu S0 podružných elektroměrů), které mohou být dále zpracovány. Hlavní myšlenkou je návrh cenově dostupného systému pro doplňkové a informativní měření elektrické energie postavené na platformě Arduino s využitím rádiové komunikace pro přenos dat. Uživateli bude poskytovat snadnou neinvazivní instalaci do měřeného obvodu, tj. bez nutnosti rozpojení obvodu. Většina dostupných zařízení pro podružná a informativní měření s pulzním výstupem (S0) je konstruována pro přímé zapojení do obvodu, což značně komplikuje instalaci. Některé neinvazivní instalace rovněž mohou postrádat možnost měřit elektrické napětí v obvodu. Ze zanedbání hodnot elektrického napětí a použití cenově dostupných komponent pak může pramenit určitá nepřesnost měření, kterou lze však pro informativní měření akceptovat.

Práce se teoreticky zabývá odvětvím internetu věcí. Podrobně popisuje možnosti měření spotřeby elektrické energie a přístroje pro to určené. Dále se zaměřuje na hardware použitý v navrhnutém zařízení, především na platformu Arduino, která je použita jako výpočetní jednotka. Práce popisuje hardwarovou a softwarovou část navrhnutého zařízení. V závěru jsou porovnány výhody a nevýhody vyplývající z testování a výsledky měření jsou porovnány s běžně používanými přístroji.

1 INTERNET OF THINGS

Pod pojmem Internet věcí se rozumí systém vzájemně propojených fyzických zařízení, které mají schopnost přenášet data po síti, bez jakékoliv lidské interakce. Ve skutečnosti jakýkoliv fyzický objekt může být součástí IoT, pokud je připojen k internetu za účelem komunikace, ovládání nebo výměny informací. Pro posílání dat a komunikaci mezi jednotlivými zařízení se používají komunikační protokoly WiFi, Bluetooth, ZigBee, Z-Wave apod. Propojená zařízení umožňují sběr velkého množství dat, se kterými lze dále pracovat.

1.1 Historie

Pojem *the Internet of Things* poprvé charakterizovat britský inženýr Kevin Ashton v roce 1999. Tento vizionářský technolog na prezentaci pro firmu Procter & Gamble, popsals IoT jako technologii pro řízení dodavatelského řetězce, která propojuje několik zařízení pomocí RDIF (Radio Frequency Identification) tagů. Samotný koncept propojení zařízení mezi sebou je mnohem starší a sahá do roku 1832, kdy byl vynalezen první elektromagnetický telegraf. Historie internetu věcí však začala až vynálezem internetu koncem 60. let 20. století.

První systém založený na principu IoT pochází z počátku 80. let 20. století. Jednalo se o automat na Coca-Colu umístěný na Carnegie Mellon University v Pensylvánii. Místní programátoři integrovali do automatu mikrosplínače a pomocí rané formy internetu zjišťovali, zda jsou v automatu dostupné plechovky a jakou mají teplotu. Dalším příkladem může být toustovač, který John Romkey v roce 1990 připojil k internetu pomocí protokolu TCP/IP.

Počátkem 21. století se termín *Internet of Things* začal široce používat v médiích a zájem o tuto technologii neustále rostl. V roce 2011 firma Cisco oznámila, že IoT se zrodilo mezi lety 2008 až 2009, kdy počet zařízení připojených k webu přesáhl počet obyvatel na Zemi. V tom samém roce, díky protokolu IPv6, který zajistil dostatek adres IP pro každé zařízení, se technologie IoT rozšířila a stala se běžnou součástí našich životů. Velcí technologičtí giganti jako Apple, Samsung, Google a Cisco se zaměřili své úsilí na vývoj a výrobu senzorů a zařízení pro IoT segment od chytrých brýlí až po autonomní automobily. [17]

1.2 Typy IoT

Koncept IoT nachází uplatnění v mnoha oblastech našeho života. Zjednodušeně lze rozdělit IoT do segmentů:

- Consumer Internet of Things,
- Commercial Internet of Things,
- Industrial Internet of Things.

1.2.1 Consumer Internet of Things

Consumer IoT se zaměřuje na spotřební elektroniku, která má často označení Smart. Tyto produkty často cílí na jednotlivé uživatele nebo rodiny pomocí nositelných zařízení, chytrých domácností a osobních monitorovacích zařízení. Vhodným příkladem Consumer IoT zařízení jsou hlasoví asistenti (Apple HomeKit, Amazon Alexa, Google Assistant, atd.), chytré termostaty, chytré osvětlení atd. Chytrá zařízení usnadňují každodenní život tím, že vykonávají úkony nebo poskytují potřebné služby uživatelům. Pro tento druh zařízení je typické, že bývají cyklicky nahrazovány nejnovějšími verzemi, které poskytují nové funkce a vylepšení oproti předešlým generacím. V podstatě se jedná o určitou formu běžné údržby. Z důvodu nasazení typicky v omezených prostorech, jako např. domy nebo kanceláře, se běžně k připojení používají technologie poskytující komunikaci na krátkou vzdálenost. Mezi tyto technologie se řadí Bluetooth, WiFi a ZigBee. [18], [20]

1.2.2 Commercial Internet of Things

Oproti Consumer IoT se Commercial IoT zaměřuje na komerční prostory, které často navštěvujeme. Jedná se tedy o naše každodenní prostředí mimo domov, do kterého Consumer IoT přináší nespočet výhod spojených s internetem věcí. Příkladem mohou být supermarkety, kancelářské budovy, obchody, hotely, zdravotnická zařízení nebo zábavní podniky. Použití se liší podle potřeb daného prostředí, může se jednat o správu osvětlení, přístup do objektu, monitorování majetku nebo systém vzduchotechniky. Commercial IoT pomáhá vytvářet lepší zážitek návštěvníků, snižuje náklady spojené s provozem apod. [18], [20]

1.2.3 Industrial Internet of Things

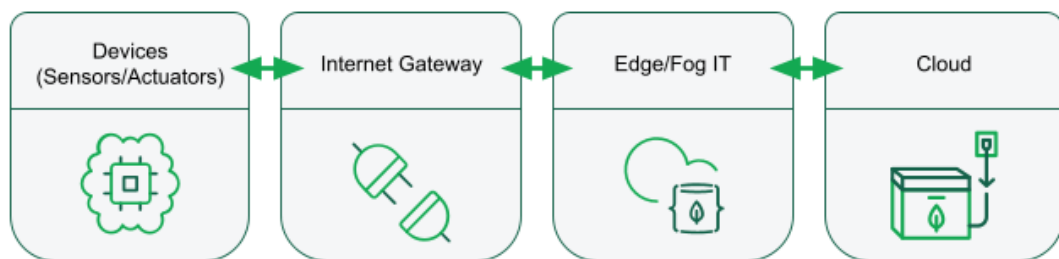
Industrial IoT je ekosystém zařízení, senzorů, aplikací a síťového vybavení, které spolupracují na sběru, monitorování a analýze dat z průmyslových provozů. Analýza těchto dat usnadňuje odstraňování problémů a údržbu. Může také zvýšit efektivitu, snížit náklady a zlepšit bezpečnost a zabezpečení. [62]

Jedná se o jedno z nejdynamičtější a nejznámější odvětví IoT. Zaměřuje se na již existující automatizované průmyslové systémy, které rozšiřuje tak, aby mohly čerpat z výhod IoT. Spojením machine-to-machine (M2M) komunikace, která poskytuje komunikaci mezi stroji bez lidské interakce, s analýzou dat přináší Industrial IoT špičkovou úroveň výkonu, produktivity a efektivitu. Díky těmto vlastnostem se IIoT používá v oblastech výroby elektřiny, těžby ropy a zemního plynu, řízení zásobování, letectví a v mnoha dalších odvětvích.

Dále je Industrial IoT spjatý s termínem Průmysl 4.0 (čtvrtá průmyslová revoluce), který se oproti IIoT zaměřuje pouze na výrobní prostředí. Tato revoluce popisuje soubor konceptů používaných v chytrých továrnách, kde práci nevykonávají lidé, ale stroje. Průmysl 4.0 sjednocuje fyzické, informační i datové komponenty nejen samotného výrobního prostředí. Propojuje chytré stroje, úložné a logistické systémy a další technologická zařízení do jednoho celku. V něm spolu vzájemně komunikují podél celého hodnototvorného procesu. Plně digitalizovaný automatizovaný systém přináší zásadní zlepšení všech podnikových procesů od návrhu a výroby, přes řízení logistického řetězce až po zákaznickou podporu a údržbu během životního cyklu produktu, včetně návrhu a realizace inovačních aktivit. [23]

1.3 Architektura IoT

Typicky je systém IoT založen na čtyřstupňovém procesu viz Obrázek 1, ve kterém proudí data ze senzoru přes síť do datového centra nebo cloudu, kde dochází k jejich zpracování a ukládání. Data mohou proudit i opačným směrem k akčním členům a ty poté dle instrukce provedou akci k řízení fyzického procesu. Může se jednat o rozsvícení světla, spuštění klimatizace, zastavení montážní linky, apod.



Obrázek 1: Bloky architektury IoT [63]

1.3.1 Senzory a akční členy

V systému IoT vše začíná akcí nebo událostí, kterou monitoruje senzor nebo ovládá akční člen. Podstatou internetu věcí jsou data z reálného světa. Ta jsou sbírána a převedena do digitální podoby pomocí senzorů, které je v surové podobě posílají do další etapy zpracování. Typicky senzory snímají stav fyzického procesu nebo podmínky prostředí. Může se jednat o teplotu a vlhkost vzduchu, rychlost větru, hladinu kapaliny, rychlost otáčení turbíny nebo tlak v pneumatice. Také je nutné nezapomínat na velice oblíbené a rozšířené wearables (nositelná elektronika), které jsou doslova nabitě senzory pro měření teploty, krevního tlaku, EKG apod. [21], [64]

Dalším důležitým prvkem pro IoT jsou na této vrstvě akční členy, které transformují data do fyzické akce. Zjednodušeně akční členy pracují v opačném směru oproti senzorům, přijmou elektrický vstup a převedou jej na fyzickou akci. Připojená zařízení by měly být schopná obousměrně komunikovat s bránami nebo systémy pro sběr dat, ale také se navzájem rozpoznávat a komunikovat, shromažďovat a sdílet informace a spolupracovat v reálném čase za účel zvýšení efektivity. Lze si představit jednoduchý chytrý zavlažovací systém, který na základě vstupů ze senzorů pro měření vlhkosti půdy v reálném čase analyzuje stav a v případě potřeby pomocí akčního členu spustí zavlažování. Tento ekosystém pracuje bez jediného lidského zásahu a dokonale vystihuje podstatu internetu věcí. [21], [64]

1.3.2 Sběr dat pomocí bran

Vrstva pro sběr dat pracuje v těsné blízkosti senzorů a akčních členů. Slouží ke sběru, filtrování, převodu do snadno přenositelného formátu a přenosu dat do *edge* infrastruktury a cloudových platforem. Systémy pro sběr dat shromažďují data v nezpracované podobě ze senzorů a převádějí je do formátu pro snadný přenos přes internetové brány. Objem dat může být obrovský, a proto je nutné data filtrovat, komprimovat a vybírat pouze podstatné. Díky těmto vlastnostem lze minimalizovat objem přenášených dat do cloudu a tím snížit síťový provoz a dobu odezvy. Jelikož jsou brány zodpovědné za obousměrné řízení toku informací, je nutné zajistit bezpečnost pomocí šifrování a tím zabránit úniku dat. Brána je tedy místo, kde dochází k předzpracování dat ze senzorů a tato data jsou připravena k dalšímu zpracování v následující vrstvě architektury. [21], [64]

1.3.3 Edge a Fog computing

Pojmy Edge computing a Fog computing toho mají mnoho společného. Oba umožňují rozložení výpočetní síly do několika uzlů. Rozdíl je v umístění, jelikož Edge computing zpracovává data v těsné blízkosti koncových zařízení a oproti tomu Fog computing funguje jako prostředník mezi edge (okrajovými) zařízeními a cloudem. Jedná se tedy o vrstvy, které díky postupnému zpracovávání a analyzování dat podstatně snižují odezvu systému a množství přenášených dat do cloudu. Tyto vrstvy jsou volitelnou součástí každé architektury internetu věcí, ale přináší značné výhody u velkých projektů. Při masivním sběru dat by přenos přímo do cloudu měl negativní vliv na šířku pásma a latenci. [42]

1.3.4 Datová centra a cloudové platformy

Pokud si představíme, že senzory jsou neurony a brána je páteří IoT, pak je cloud mozkem v těle internetu věcí. Poslední fáze je na rozdíl od ostatních navržena tak, aby pracovala s obrovským množstvím dat. Typicky se pro tyto účely používá podnikové datové centrum nebo cloud. Provádí se zde ukládání, analyzování a zpracování dat pomocí výkonných nástrojů pro datovou analýzu a mechanismů strojového učení. Při vybavení cloudu aplikačními řešeními může poskytovat rozhraní pro řízení, monitorování a vizualizaci dat do grafů a tabulek. [64]

1.4 Bezpečnost

Masivní rozmach internetu věcí s sebou přináší rizika v podobě ohrožení soukromí a bezpečnosti. Jedná se tedy o jeden z největších problémů internetu věcí, na který bychom měli brát zřetel při používání chytrých zařízení. Výrobci často z důvodu snížení nákladů na výrobu nevěnují potřebné prostředky pro implementaci dostatečného zabezpečení a tak často chybí základní bezpečnostní principy jako šifrování dat, autentizace, autorizace apod. Důraz se zde klade na poskytnutí velkého množství funkcionalit za co nejnížší cenu. Pro většinu produktů nejsou vydávány bezpečnostní záplaty a tak fungují s bezpečnostními mezerami, které útočník může snadno zneužít. Další mezerou v zabezpečení mohou být jednoduchá nebo výchozí uživatelská jména a hesla pro přístup k zařízení. [30], [33]

Zneužití chytrých zařízení lze rozdělit do tří skupin:

- přímé poškození uživatele (odcizení citlivých dat či zneužití fyzických zařízení),
- využití přístupového bodu do vnitřní infrastruktury,
- zneužití výpočetního výkonu nebo komunikace (DDoS útoky, těžba kryptoměn apod.).

Příkladem zneužití bezpečnosti IoT může být DDoS (Distributed Denial of Service) útok z roku 2016 na společnost Dyn, který vyřadil z provozu webové služby společností Twitter, Amazon, GitHub či New York Times. Na tento útok pachatelé použili specifický typ malwaru zvaný *Mirai botnet*, který místo počítačů používal zařízení IoT připojené k internetu (routery, webové kamery, chytré lednice apod.). Útočná síla tohoto útoku zahrnovala 50 až 100 tisíc zařízení zneužitých botnetem Mirai a neznámý počet dalších zařízení z jiných botnetů. [59]

1.5 Využití jednodeskových počítačů v IoT

Internet věcí je z velké části založen na jednodeskových počítačích a mikrokontrolérech, které poskytují propojení senzorů a akčních členů se zbytkem ekosystému IoT. Jedná se o plně funkční počítače, které jsou vybaveny procesorem, pamětí a vstupy/výstupy. To vše je obsaženo na jedné desce plošných spojů, která disponuje malými rozměry. Výhodou při použití je jejich nízká cena, flexibilita, nízká spotřeba energie a možnost škálování. Mezi nejpoužívanější jednodeskové počítače v IoT patří:

- Arduino,
- Raspberry Pi,
- Odroid,
- Rock Pi,
- PandaBoard. [19], [46]

Velice rozšířenými jednodeskovými počítači jsou desky Arduino, které nacházejí uplatnění ve světě internetu věcí. Pro použití v IoT je ze strany výrobce platforma velice přívětivá, na trhu jsou dostupné typy desek přímo určené pro použití v IoT (disponují přidanou konektivitou pro WiFi a Bluetooth). Vývojáři platformy Arduino poskytují softwarové prostředky, které umožňují bezpečné získávání, ukládání a zpracování dat. Uživatelé mohou využívat Arduino IoT Cloud pro bezpečné vzdálené připojení senzorů k řídicí aplikaci. Dále Arduino IoT API poskytující rozhraní pro vyvíjení vlastních aplikací. Další software slouží pro práci přímo s deskou Arduino, jedná se o Arduino IDE PRO a Arduino CLI. Platforma Arduino nachází ve světě internetu věcí mnoho uplatnění:

- Sběr dat ze senzorů a odesílání do cloudu,
- Ovládání akčních členů,
- Interakce s hlasovými asistenty,
- Rozhraní mezi internetem a ostatními zařízeními.

2 MĚŘENÍ SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE

V této kapitole jsou popsány základní principy a zařízení pro měření spotřeby elektrické energie. Jsou zde popsány přístroje pro měření spotřeby používané ve střídavých elektrických obvodech. Pro měření spotřeby elektrické energie se používají přístroje zvané elektroměry, které mohou měřit různé druhy práce (činnou, jalovou a zdánlivou). Pro potřeby účtování spotřebované elektrické energie se používají elektroměry měřící činnou práci, které jsou zde charakterizovány.

2.1 Vybrané elektrické veličiny

Ze zaměření tématu práce vyplývá nutnost definovat několik nejdůležitějších základních elektrických veličin: proud, napětí, výkon a práci.

Elektrický proud

Elektrický proud jako jev je uspořádaný pohyb volných částic s elektrickým nábojem. Jako fyzikální veličina je elektrický proud definován množstvím elektrického náboje, který projde soustavou za jednotku času. Jednotkou elektrického proudu je ampér [I]=A, který je základní jednotkou soustavy SI. Ampér je definován jako elektrický proud, který při průchodu dvěma přímými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu umístěnými ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti 1 m vyvolá mezi nimi stálou sílu $2 \cdot 10^{-7}$ N na 1 m délky vodiče. [50]

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1)$$

Kde Q značí celkový prošlý náboj, t je časový interval, po kterou procházel elektrický náboj soustavou.

Elektrické napětí

Elektrické napětí je definováno jako rozdíl potenciálů mezi dvěma body elektrického pole nebo jako práce vykonaná při přemístění kladného jednotkového elektrického náboje mezi dvěma body pole. Jednotkou elektrického napětí je volt [U]=V. [50]

$$U = \Delta\varphi = -\frac{W}{Q} \quad (2)$$

Kde $\Delta\varphi$ je rozdíl dvou potenciálů, W je elektrická práce, Q je elektrický náboj.

Elektrický výkon a práce

Elektrický výkon stejnosměrného elektrického proudu a napětí při souhlasně zvolených kladných směrech elektrického napětí U a elektrického proudu I je daný vztahem (3). Základní jednotkou elektrického stejnosměrného výkonu je watt [P]=W. [11]

$$P = U \cdot I \quad (3)$$

Z důvodu nekonstantních hodnot napětí a proudu nelze určit velikost výkonu střídavého elektrického proudu z okamžitých hodnot napětí a proudu. Uvedené vzorce platí pro jednofázovou soustavu s harmonickým průběhem proudu a napětí. U střídavého proudu je nutné rozlišovat hodnoty maximální, efektivní a okamžité. Nejvyšší okamžitá hodnota, které periodický signál dosahuje se nazývá maximální nebo vrcholová hodnota a značí se velkým písmenem s indexem m nebo max , např. I_m , I_{max} . Efektivní hodnota časově proměnného, periodického signálu je takové hodnoty stejnosměrného signálu, který za stejnou dobu (časový interval) vykoná stejnou práci. Značí se velkým písmenem bez indexu, např. I a jedná se o nejběžněji udávanou hodnotu, kterou měří většina měřících přístrojů. Okamžitá hodnota je vždy vázaná na určitý časový okamžik a značí se malým písmenem, např. i , u . Dále je nutné počítat s fázovým posuvem φ , tj. úhlem, který svírá fázor napětí s fázorem proudu. [39], [44], [55]

Výkon střídavého elektrického proudu rozdělujeme na tři druhy: činný, jalový a zdánlivý. Činný výkon je užitečný výkon zdroje nebo spotřebiče, který koná práci. Vyjadřuje skutečnou spotřebu elektrické energie, která se mění na jiný druh energie. Činný výkon se označuje písmenem P a jeho jednotkou je watt [P]=W. [27]

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (4)$$

Kde U je efektivní hodnota napětí, I je efektivní hodnota proudu, $\cos\varphi$ značí účinník a jde o bezrozměrnou veličinu, která vyjadřuje poměr činného a zdánlivého elektrického výkonu. Účinník závisí na vzájemném fázovém posuvu průběhů proudu a napětí.

Jalový výkon je neúčinný výkon, který nekoná žádnou práci a přelévá se mezi zdrojem a spotřebičem. Jalový výkon se označuje Q a jeho jednotkou je voltampér reaktanční [Q]=var. Využívá se k vytvoření magnetického pole v cívce nebo elektrického pole v kondenzátoru, a proto je nutný pro funkci spotřebičů. [27]

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (5)$$

Kde U je efektivní hodnota napětí, I je efektivní hodnota proudu, φ je fázový posun mezi proudem a napětím.

Zdánlivý výkon je celkový výkon dodávaný zdrojem do střídavých obvodů a je tvořen celkovým dodaným proudem bez ohledu na fázový posuv mezi napětím a proudem. Označujeme ho písmenem S a jeho jednotkou je voltampér [S]=VA. Zdánlivý výkon udává zatížení elektrických zdrojů (např. transformátorů). [39]

$$S = U \cdot I \quad (6)$$

Kde U je efektivní hodnota napětí, I je efektivní hodnota proudu.

Elektrické práce W (energie) je v obecném případě rovna časovému integrálu elektrického výkonu. Její výpočet lze vyjádřit všeobecně platným vztahem (7). [37]

$$W = \int_0^T P dt \quad (7)$$

Pokud se výkon v čase nemění lze práci elektrického proudu určit jako součin výkonu a času (8). [37]

$$W = P \cdot t \quad (8)$$

Elektrická práce se běžně označuje jako spotřebovaná elektrická energie. Základní jednotkou je joule [W]=J neboli watt sekunda Ws, ale častěji se používají její násobky watt hodina Wh nebo kilowatt hodina kWh. [10]

2.2 Měření elektrického proudu

Snímání elektrického proudu je možné rozdělit z hlediska zaměření na dvě skupiny:

- Jistící – zajišťují bezpečnost, typicky se jedná o ochranné prvky. Jejich úkolem je přerušit obvod při poruchovém stavu a tím ochránit zařízení před destrukcí nebo zabránit újmě na lidském zdraví. Důraz je zde kladen na zvolení vhodné technologie, která poskytuje potřebou robustnost a odolnost v extrémních podmínkách.
- Měřící – důraz je zde kladen na přesnost měření. Nejčastěji se za tímto účelem používají přístroje zvané ampérmetry. [66]

Pro měření proudu se používá několik metod, např. pomocí odporového bočnicku, proudového transformátoru, zařízení založené na principu Hallova jevu, Rogowského cívky apod. Každá metoda má své výhody a nevýhody, které mohou být rozhodující pro konečnou spolehlivost aplikace. Měření elektrického proudu lze dále rozdělit na přímé a nepřímé metody. Při použití přímé metody je získán výsledek měření odečtením údaje přímo z přístroje. Oproti tomu nepřímou metodou je výsledek určen z měření jiných veličin (přímou metodou) vázaných s měřenou veličinou na základě vztahu. [66]

K měření elektrického proudu se používají přístroje zvané ampérmetry. Ampérmetr se zapojuje do série se spotřebičem, jehož proud je měřen a neměl by mít na samotný obvod žádný vliv. Při průchodu proudu ampérmetrem by měl vznikat co nejmenší úbytek napětí, a proto mají ampérmetry co nejmenší vnitřní odpor. Pokud je ampérmetr zapojen paralelně do obvodu dojde k jeho zničení (z důvodu měření zkratového proudu zdroje). [36]

Pro měření střídavého proudu jsou vhodné především přístroje feromagnetické. Výhodou těchto přístrojů je, že udávají efektivní hodnotu měřeného proudu. Jejich výhodou je jednoduchá a odolná konstrukce a nízká cena. Běžné feromagnetické ampérmetry se vyrábí s rozsahy od 100 mA až 200 A. Mezi nevýhody feromagnetických ampérmetrů patří poměrně velká vlastní spotřeba a možnost měření pouze v oblastech technických kmitočtů (od 5 Hz do 1 kHz). [38]

2.3 Přístroje pro měření elektrické energie

Pro měření spotřeby elektrické energie se používají přístroje zvané elektroměry, které měří spotřebu v obvodu a zaznamenávají její množství v příslušných jednotkách na stupnici nebo číselníku. Obecně lze konstatovat, že měření elektrické energie je v podstatě stejný proces jako měření výkonu pomocí wattmetru. Oproti wattmetru použitý přístroj nesmí pouze výkon indikovat, ale musí brát v potaz časový interval, po který je výkon dodáván. [24]

Elektroměry lze rozdělit podle proudu, pro který jsou určeny na:

- elektroměry pro stejnosměrný proud,
- elektroměry pro střídavý proud. [37]

Dále střídavé elektroměry lze rozdělit podle počtu měřících ústrojí na jedno a trojfázové a dle typu měřené práce:

- elektroměry pro měření činné práce,
- elektroměry pro měření jalové práce,
- elektroměry pro měření zdánlivé práce. [37]

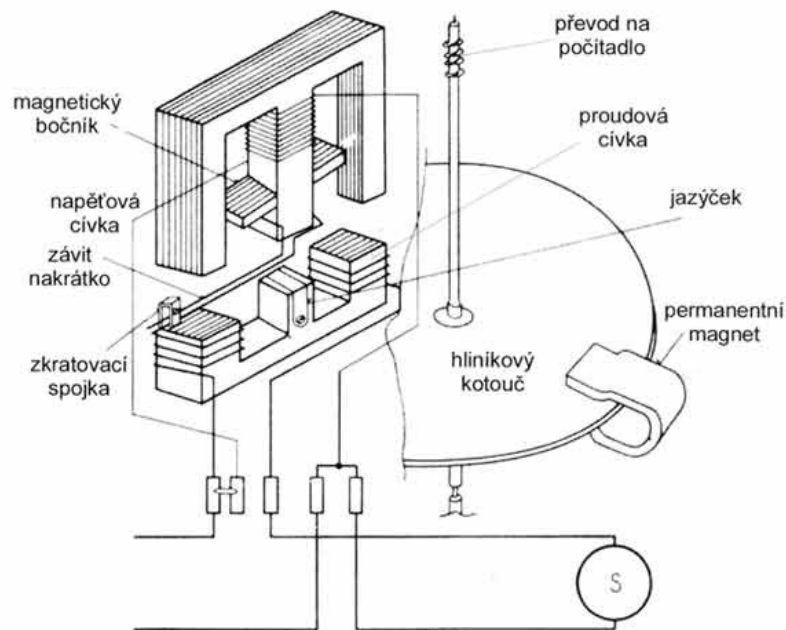
2.3.1 Indukční elektroměr

Elektroměry měřící střídavý proud používané ve 20. století byly založeny na Ferrarisově principu točivého magnetického pole. Elektroměry založené na tomto principu jsou označovány jako tzv. indukční elektroměry a používají se pro měření spotřeby elektrické energie v jednofázových a třífázových střídavých sítích. V průběhu let indukční elektroměry mírně měnily svůj tvar, zvyšovala se přesnost měření a rozšiřovaly se jejich funkce. Indukční elektroměry se zřídka používají dodnes, ale postupně jsou nahrazovány elektroměry elektronickými. Schéma indukčního elektroměru znázorňuje Obrázek 2. [12]

Pohon střídavého indukčního elektroměru je založen na podobném principu jako asynchronní motor s kotvou nakrátko. Hliníkový kotouč se otáčí v mezeře mezi póly dvou magnetických systémů a je poháněn vířivými proudy. Pod kotoučem je umístěná proudová cívka na dvouramenném jádře, kterou protéká měřený proud. Cívka je navinuta z vodiče o velkém průřezu a má pouze několik závitů. Nad kotoučem se nachází trojsloupkové jádro s napěťovou cívkou, která je tvořena tenkým vodičem s mnoha závity. Oproti proudové cívkce má napěťová cívka velkou indukčnost (díky uzavřenému železnému jádru), a proto při činné zátěži sítě je mezi magnetickými toky obou cívek fázový posun téměř 90° . Magnetické toky proudové a napěťové cívky vytvářejí točivé magnetické pole (podobně jak v jednofázovém indukčním motoru), které otáčí kotoučem. Točivý moment kotouče je přímo úměrný proudu, který protéká proudovou cívkou. [12]

Pomocí brzdícího permanentního magnetu vznikají v kotouči vířivé proudy, které kotouč brzdí, aby rychlost otáčení odpovídala odebíranému proudu. Zároveň permanentní magnet zabraňuje setrvačnosti při poklesu měřeného proudu. Následně jsou otáčky kotouče převáděny přes hřídel

se šnekovým převodem na bubínkový mechanické počítadlo, které uvádí spotřebu elektrické energie v kWh. [12]



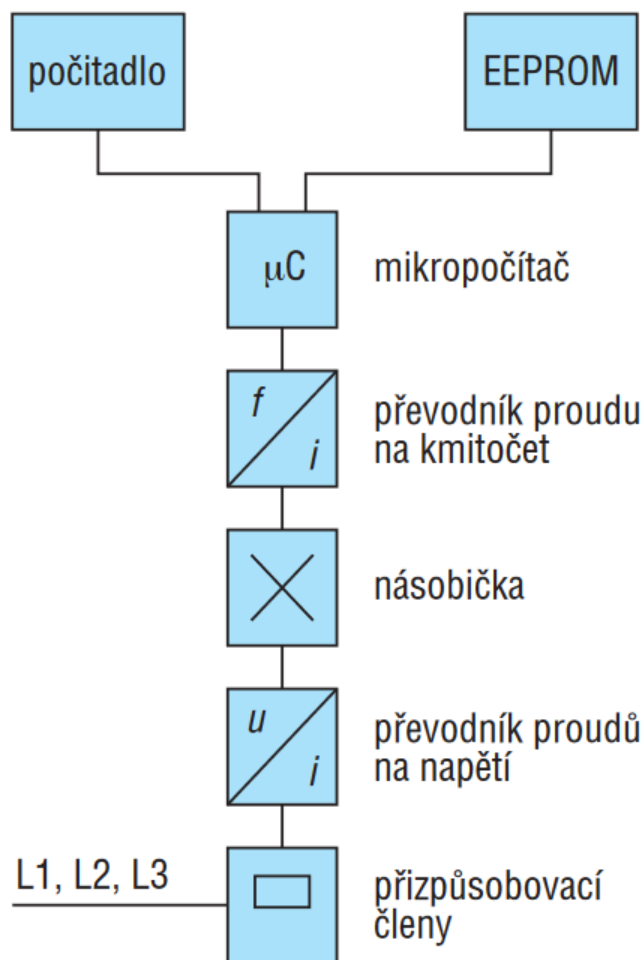
Obrázek 2: Schéma indukčního elektroměru pro střídavý proud [37]

2.3.2 Elektronický elektroměr

Elektronické impulzní elektroměry nemají oproti indukčním žádné pohyblivé součástky a z tohoto důvodu se lze setkat s označením statické elektroměry. Měření elektrické energie nevychází z počtu otáček kotouče, ale z počtu impulzů elektronického wattmetru. Konstanta elektroměru se udává v počtu impulzů na 1 kWh. Tento typ elektroměru poskytuje mnoho funkcí, např. vícesazbové měření či měření maximální spotřeby. [12]

Oproti mechanickým elektroměrům poskytují elektronické elektroměry mnoho výhod:

- množství měřených veličin,
- menší spotřeba samotného elektroměru,
- menší náběhové proudy a větší přesnost při měření velmi malých proudů,
- správné měření elektrické energie při zkreslených průbězích napětí a proudů,
- automatický odečet měřených veličin pomocí optického komunikačního rozhraní,
- softwarové nastavení parametrů měření dle požadavků,
- dálkový odečet měřených veličin. [55]



Obrázek 3: Blokové schéma elektronického elektroměru [12]

Elektronické elektroměry se principiálně skládají z několika částí, které znázorňuje Obrázek 3. Síťové napětí a odebírané proudy jsou pomocí přizpůsobovacích členů transformovány na hodnoty vhodné k elektronickému zpracování. Snímané hodnoty proudu jsou převedeny na napěťový signál přímo úměrný měřenému proudu. Násobička součinem vstupního napětí a činné složky proudu (tj. činný výkon) vytváří proudový signál, který je přetransformován na impulzní signály s kmitočty úměrnými odebíranému činnému a jalovému výkonu pomocí převodníku proudu na kmitočet. Mikropočítač slouží k provádění výpočtu spotřeby a řízení režimů elektroměru a pomocí počítadla (zobrazovací rozhraní) jsou zobrazovány důležité informace o stavu elektroměru a naměřené hodnoty. Naměřená data se také uchovávají v EEPROM paměti pro další zpracování. [55]

2.4 Pulzní výstup elektroměru

Většina moderních elektronický elektroměru disponuje pulzním výstupem, který poskytuje možnost dálkového odečtu naměřené spotřeby. Jeden pulz odpovídá předem definovanému množství spotřebované energie a tato konstanta se udává v počtech pulzu na 1 kWh (např. 1000 imp./kWh). Pulzní výstup může být dvojího typu:

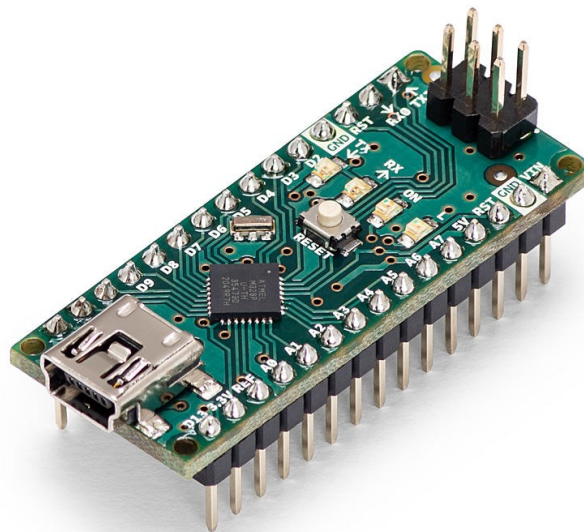
- **Detekce spínaného výstupu** – jedná se o nejčastější způsob dálkového odečtu, často bývá označován jako rozhraní S0. Pro získání dat o spotřeba je nutné tento výstup propojit s externím zařízením, které zaznamenává pulzy.
- **Optické počítání pulsů** – tato varianta poskytuje optický pulzní výstup pomocí blikání LED diody. Sběrný systém lze připojit k elektroměru pomocí optického senzoru, který snímá změnu intenzity světla. Některé elektroměry nedisponují klasickým pulzním výstupem nebo není výstup přístupný z důvodu omezení energetickou společností. Jedná se tedy o alternativní možnost dálkového odečtu spotřeby.

3 POUŽITÝ HARDWARE

V této kapitole je popsán hardware, použitý při realizaci zařízení pro pulsní měření spotřeby elektrické energie. Hlavní komponentou celého systému je deska Arduino, které zpracovává naměřená data z proudového transformátoru a následně je pomocí rádiové komunikace přenáší do druhé Arduino desky.

3.1 Platforma Arduino

Arduino je open source platforma založená na jednoduchém ovládní hardwaru a softwaru. Platforma se skládá z programovatelné desky plošných spojů (mikrokontroléru) a ze softwaru Arduino IDE (Integrated Development Environment), které slouží ke psaní a nahrávání zdrojového kódu do mikrokontroléru. Dále používá svůj vlastní programovací jazyk Arduino, který je založený na jazyku Wiring. Pomocí instrukcí můžou desky Arduino číst vstupy jako např. zachycení světla, stisk tlačítka nebo doručení zprávy na sociální síti Twitter a následně na základě vstupu spustit motor, rozsvítit LED diodu nebo publikovat příspěvek online. [61]



Obrázek 4: Deska Arduino Nano [3]

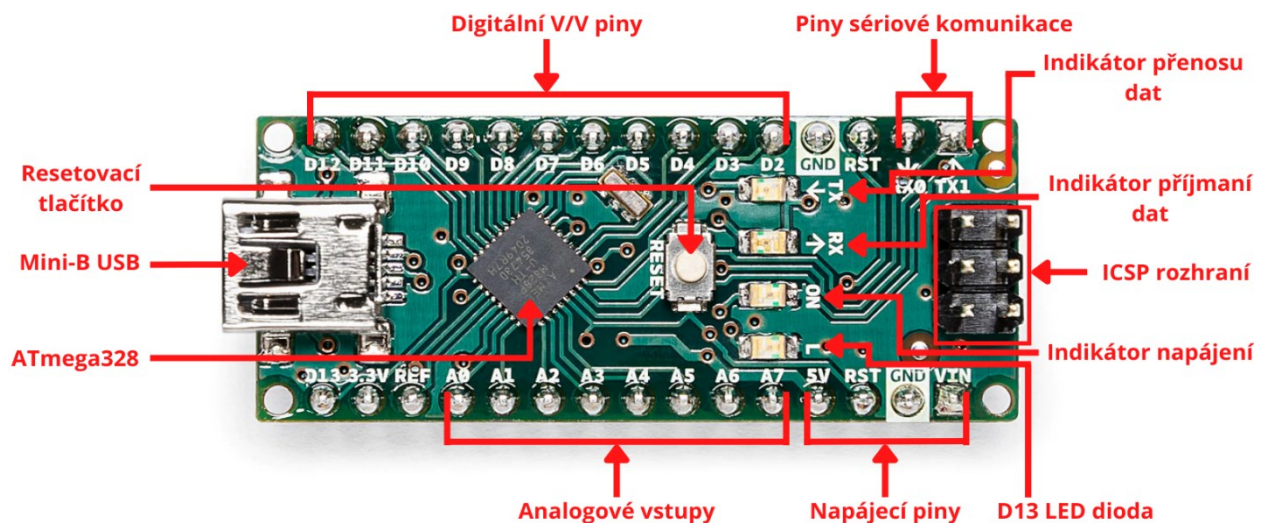
Arduino je založeno na sociální inovaci. Prostřednictvím silného marketingu se podařilo vytvořit komunitu lidí, kteří se mohou prostřednictvím jednoduchého a srozumitelného vývojového prostředí dostat k programování mikroprocesorů bez nutnosti studovat složitou architekturu a logiku programování celého systému. Došlo ke zjednodušení programování

mikrokontrolérů prostřednictvím IDE, které se stará o všechno na pozadí bez nutnosti zásahu uživatele. [49]

3.1.1 Historie

Vše začalo v roce 2003 na škole Interaction Desing Institute Ivrea v Itálii, kdy Hermando Barragán přišel s nápadem zjednodušit BASIC Stamp mikrokontrolér. Cílem bylo snížit cenu zařízení a tím vytvořit platformu pro vzdělávací účely. Produkt tedy cílil především na studenty technických škol, kutily a tvůrce, kteří by si chtěli prakticky vyzkoušet programování a elektroniku. Výstupem diplomové práce, kterou vedli Massimo Banzi a Casey Reas byla vývojová platforma Wiring. Tato platforma se skládala z desky plošných spojů osazené mikrokontrolérem ATmega128 a vývojového prostředí, které bylo založené na programovacím jazyce Processing. [65]

Později v roce 2003 Massimo Banzi, David Mellis a David Cuartielles přidali podporu pro Wiring do své desky pojmenované ATmega8 a přepracovali zdrojový kód Wiring, který pojmenovali Arduino. Dále se k vývoji technologie Arduino přidali Tom Igoe a Guianluca Martino. Tato pětice je uváděna jako hlavní realizátoři projektu. I přes problémy se založením ochranné známky pro Arduino, které vyústily v mnoha leté rozdělení společnosti na dvě větve, je nyní Arduino jednou společností, která se angažuje ve vývoji hardwaru a softwaru pro širokou veřejnost. [47]



Obrázek 5: Rozložení desky Arduino Nano [3] (upraveno)

3.1.2 Typy Arduino desek

Srdcem každého Arduina je procesor od firmy Atmel, který je obklopen dalšími elektronickými komponenty. Pro celou řadu desek je typické jednotné grafické zpracování s převažující modrou barvou. Modelová řada Arduino poskytuje několik druhů desek, lišících se svými rozměry, počty pinů, procesorem, výbavou či cenou. A díky tomu si lze pro dané použití vybrat nejvhodnější desku. [57]

Mezi základní modely patří:

- Arduino Mini,
- Arduino Nano,
- Arduino Micro,
- Arduino Uno,
- Arduino Leonardo,
- Arduino Yún,
- Arduino Mega256,
- Arduino Due. [57]

Dále existují méně známé a specificky zaměřené modely jako **LilyPad Arduino** (přizpůsobený pro nošení na textilu), **Arduino Fio** (poskytující připojení bezdrátových XBee modulů), **Arduino Esplora** (pro vytváření herních setů nebo konzol pro ovládání her), **Arduino Robot** (set pro vytvoření chytrého robota) nebo **Arduino Intel Galileo** (deska osazená 32bitovým procesorem od firmy Intel). [57]

Arduino Nano

Desku Arduino Nano znázorňuje Obrázek 4 a jedná se o jednu z kompaktních desek uzpůsobených pro nepájivá pole a pro osazení do desky plošného spoje. Jedná se tedy o flexibilní desku s malými rozměry pro širokou škálu aplikací. Oproti menšímu modelu Mini disponuje Mini-B USB portem a převodníkem. Jelikož deska nedisponuje DC konektorem, lze jí napájet pouze pomocí Mini-B USB nebo pinů VCC a GND. Deska je osazena mikrokontrolérem ATmega328 a obsahuje 14 digitálních a 8 analogových pinů viz Obrázek 5. Základní technické specifikace desky Arduino Nano jsou uvedeny viz Tabulka 1.

Tabulka 1: Technické specifikace desky Arduino Nano [3]

Čip	Atmega328
Architektura	AVR
Pracovní napětí	5 V
Flash paměť	32 kB
SRAM	2 kB
Frekvence	16 MHz
Počet analogových vstupů	6
EEPROM	1 kB
Max. proud pro I/O pin	40 mA
Vstupní napětí	7 – 12 V
Počet V/V digitálních pinů	14 (6 z nich podporuje PWM)
Spotřeba energie	19 mA
Rozměry	18 × 45 mm
Hmotnost	7 g

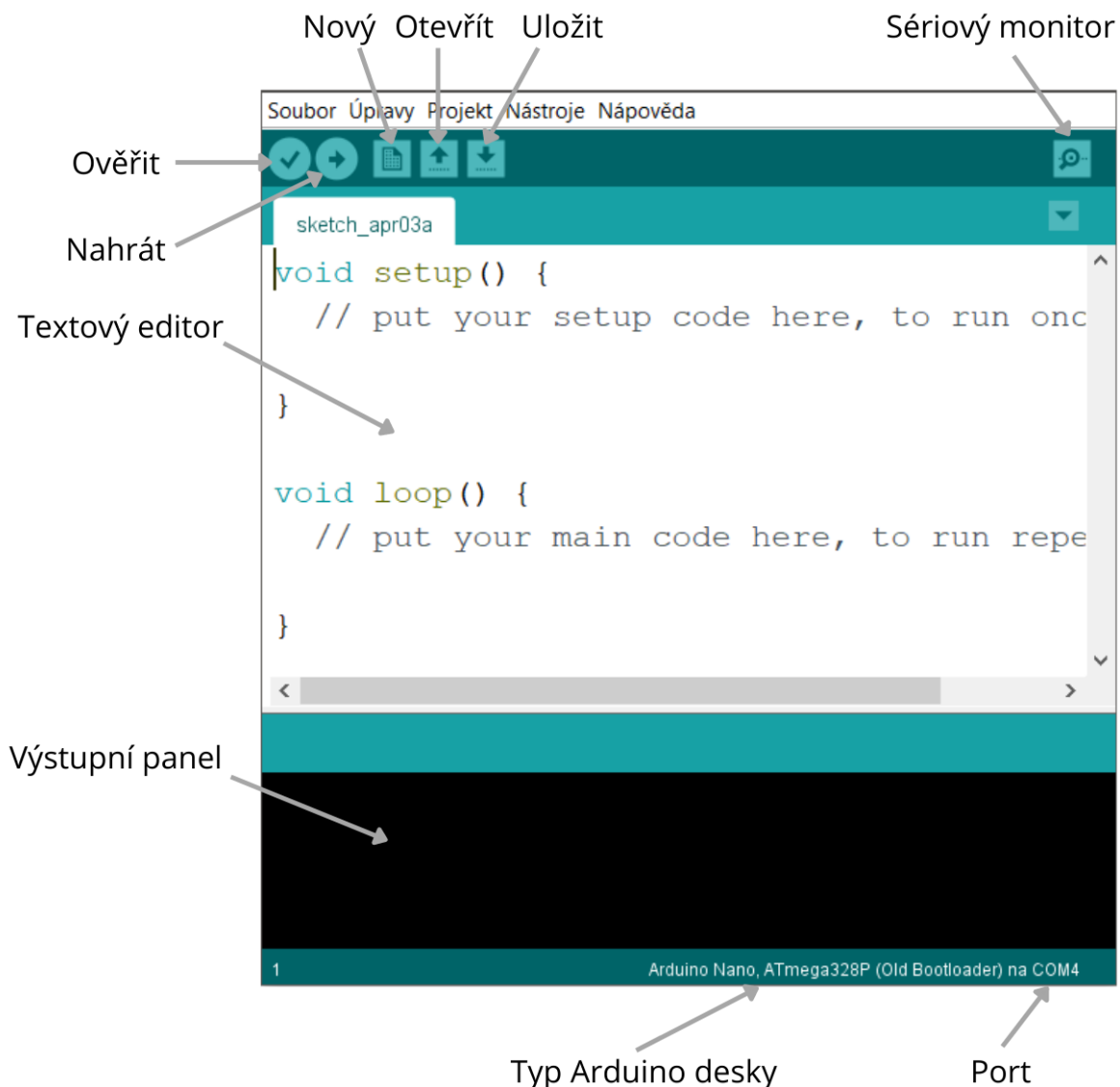
3.1.3 Programování desky Arduino

Desky Arduino nemají prostředky pro zkompilování programu a tak vytváření a kompilace kódu probíhá na jiném zařízení. Pro psaní a kompilaci lze využít vývojové prostředí.

Arduino IDE

Arduino IDE (Integrated Development Environment – integrované vývojové prostředí) je oficiální open-source software navržený společností Arduino.cc. Dostupný je ke stažení z oficiálních stránek Arduina. Jedná se o software napsaný v jazyce Java, který je spustitelný na operačním systému podporující JVM (Java Virtual Machine). Konceptem vychází z výukového prostředí Processing, které bylo mírně upraveno a hlavně byla přidána podpora

frameworku Wiring, který je založen na programovacím jazyce C++. Arduino IDE se používá hlavně pro psaní, kompilaci a nahrávání zdrojového kódu do jakékoliv Arduino desky. Vývojové prostředí je velice jednoduché a obsahuje lištu s menu, panel nástrojů, textový editor a výstupní panel viz Obrázek 6.



Obrázek 6: Prostředí Arduino IDE

Programovací jazyk

Arduino je možné programovat v jazyce C nebo C++. Nejjednodušší je však používat knihovnu Wiring. Ta je v současné době pro programování Arduina velmi rozšířená. Kvůli její komplexnosti se o ní občas mluví jako o samostatném programovacím jazyku. Zdrojový kód obsahuje vždy dva základní bloky *setup* a *loop*. Blok *setup* se provede pouze jednou na začátku programu (připojení napájení, restartování nebo nahrání zdrojového kódu do desky). Typicky

slouží pro inicializaci proměnných, nastavení režimů pinů a zahájení používání knihoven. Po provedení bloku *setup* je vykonáván blok *loop* v nekonečné smyčce. Běh programu je zajištěn vykonáváním instrukcí, které jsou umístěny v tomto bloku. Tyto dvě části musí být vždy obsaženy v programu, neboť při jejich absenci by program skončil chybou. [57]

Sériová komunikace

Pomocí sériové komunikace lze nahrávat zkompileované programy do jednotky Arduino. Pro komunikaci je nutné propojit počítač s deskou pomocí USB kabelu. Dále je nutné, aby deska disponovala převodníkem (na pevně připájený k základní desce, obsažený přímo v čipu Arduina nebo externí) viz Obrázek 7. Sériová komunikace se dá využít k více věcem, než jen k programování. Lze pomocí ní obousměrně komunikovat s Arduinem a můžeme např. číst hodnoty ze senzorů a posílat je do počítače nebo ovládat Arduino jednoduchými textovými příkazy. [57]



Obrázek 7: Blokové schéma sériové komunikace, zpracováno dle [57]

Arduino knihovny

Knihovny jsou soubory napsané v programovacím jazyce C nebo C++, poskytující rozšiřující funkce (např. ovládání krokových motorů, čtení a zápis na SD karty, připojení k internetu přes Ethernet apod.). Arduino IDE obsahuje řadu předinstalovaných knihoven, ale knihovny lze také stáhnout nebo vytvořit vlastní. [29] Při použití existující knihovny je zapotřebí ji načíst do zdrojového kódu pomocí příkazu *#include* a následně uvést název hlavičkového souboru obsahující předpisy tříd a funkcí.

3.2 Proudový transformátor

Transformátor proudu produkuje na sekundárním vinutí střídavý proud, který je přímo úměrný střídavému proudu protékajícímu primárním vinutím. Proudové transformátory tedy snižují vysoké proudy protékající primárním vinutím na značně nižší hodnoty a tím poskytují bezpečný a jednoduchý způsob měření hodnot střídavého proudu. Transformace nebo velikost změny je závislá na počtu závitů primárního a sekundárního vinutí. Proudový transformátor se skládá ze

tří hlavních součástí: primární vinutí, jádro a sekundární vinutí viz Obrázek 8. Proudové transformátory mají dvě základní funkce:

- Snížení proudu pro měřicí a ochranné zařízení,
- Oddělení silových obvodu od měřicího nebo ochranného obvodu.

Princip činnosti základního transformátoru proudu se mírně liší od principu běžného transformátoru napětí. Oproti napěťovému transformátoru je primární vinutí proudového transformátoru tvořeno pouze velmi malým počtem závitů nebo vodičem, který je umístěn do středu jádra. Z tohoto důvodu je proudový transformátor často označován jako sériový transformátor, protože primární vinutí nikdy nemá více než několik málo závitů a je v sérii s vodičem, kterým protéká proud do zátěže. Sekundární vinutí má typicky vysoký počet závitů, které jsou navinuty na jádru z magnetického materiálu. Primární proud proudového transformátoru není závislý na sekundárním zátěžovém proudu, ale na zátěži připojené k primárnímu vinutí. Sekundární proud transformátoru je obvykle dimenzován na 1 A nebo 5 A dle jmenovité hodnoty primárního proudu. [56]

Počet závitů na primární a sekundární cívice, respektive jejich poměr, udává převod transformátoru (transformační poměr). Lze jej vyjádřit jako poměr primárního a sekundárního napětí. Napětí je transformováno v poměru stejném, proud v opačném. [32]

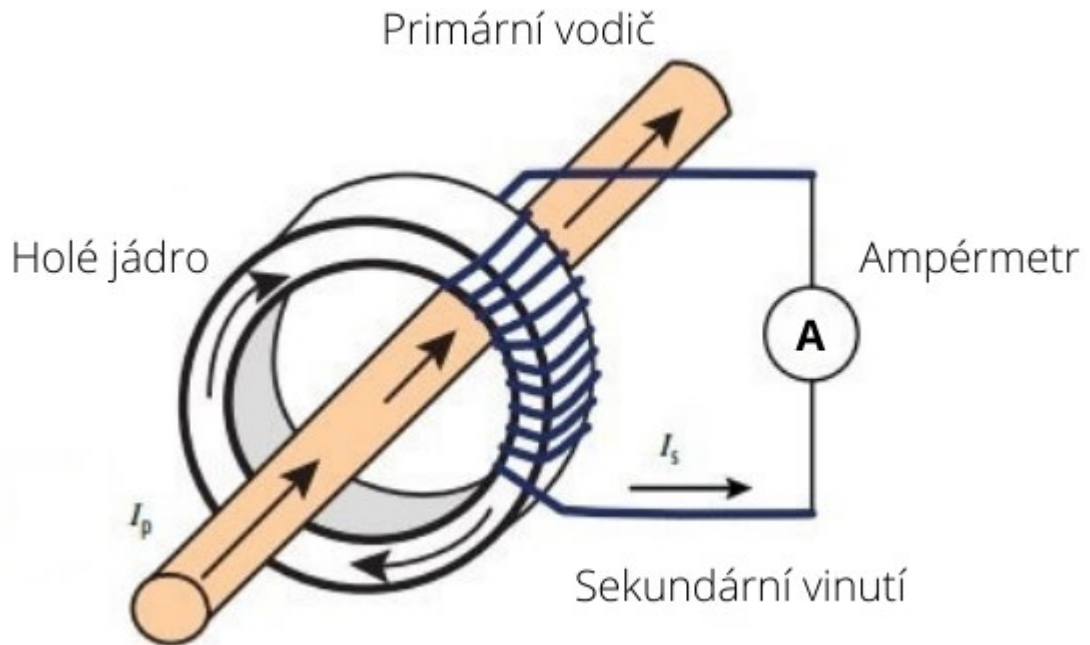
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (9)$$

Kde N_1 a N_2 udává počet závitů na primárním a sekundárním vinutí, U_1 a U_2 napětí primárního a sekundárního vedení, I_1 a I_2 proud primárního a sekundárního vedení.

Základní rozdělení proudových transformátorů:

- **Vinutý proudový transformátor** – primární vinutí transformátoru je zapojeno do série s vodičem, kterým protéká měřený proud. Velikost proudu na sekundárním vinutí závisí na poměru závitů transformátoru. [56]
- **Toroidní transformátor proudu** – primární vedení představuje vodič, který je provlečen otvorem v toroidním transformátoru. Vodičem protéká měřený proud. Existují i transformátory s rozděleným jádrem, které umožňují neinvazivní instalaci (bez nutnosti zásahu do obvodu). [56]

- **Tyčové transformátory proudu** – využívají kabel nebo sběrnici jako primární vinutí. Jsou plně izolovány od vysokého napětí na primárním vedení a obvykle jsou naistalovány k zařízení pro přenos proudu. [56]



Obrázek 8: Konstrukce proudového transformátoru [8] (upraveno)

Poměr proudového transformátoru

Poměr proudového transformátoru je poměr primárního vstupního proudu k sekundárnímu výstupnímu proudu při plné zátěži. Například proudový transformátor s poměrem 100 : 0.5 je dimenzován na proud 100 A protékající primárním vinutím. Při maximální zátěži bude transformátor produkovat proud 0.5 A v sekundárním vedení. Pokud se změní hodnota primárního proudu dojde proporcionálně ke změně proudu v sekundárním vinutí, tedy při primárním proudu 50 A bude sekundární proudový výstup 0.25 A. [8]

3.2.1 Proudový transformátor s děleným jádrem SCT-013

V obvodu pro měření střídavého proudu je použit model proudového transformátoru SCT-013-000 od čínského výrobce YHDC, který slouží pro měření průchozího střídavého proudu vodičem v rozsahu 0–100 A viz Obrázek 9. Jedná se o neinvazivní proudovou sondu s děleným feritovým jádrem, které poskytuje možnost měřit proud v obvodu bez nutnosti zásahu do obvodu (rozpojení). Přebádá proud protékající primárním vedením v poměru

100 A : 50 mA (počet závitů sekundárního vinutí je 2000). Pracuje v provozní teplotě $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $\pm 3\%$. Proudová sonda disponuje otvorem s rozměry $13\text{ mm} \times 13\text{ mm}$.



Obrázek 9: Proudový transformátor SCT-013-000

3.3 Rádiová komunikace

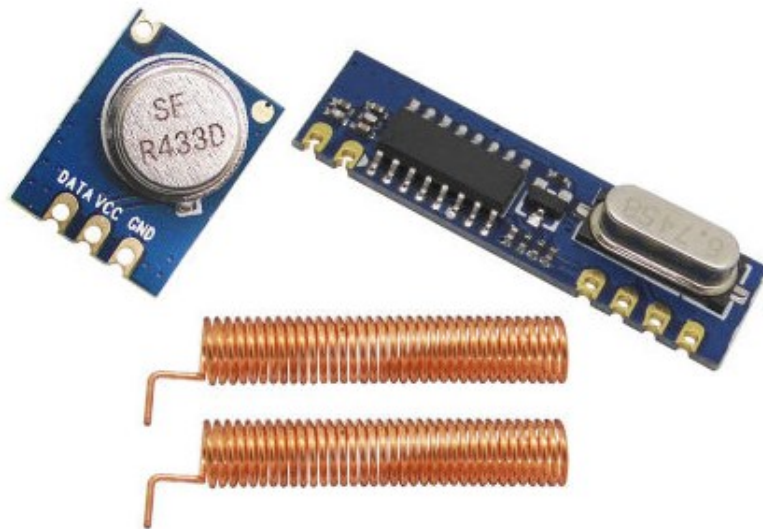
Princip rádiové komunikace je založena na bezdrátovém přenosu elektromagnetického vlnění, tj. rádiových vlnách. Rádiová komunikace slouží k přenosu dat pomocí rádiových vln. Rádiové vlny mají stejnou fyzikální podstatu jako světlo nebo rentgenové záření, ale na podstatně nižších frekvencích, které lidské ucho nemůže zachytit. Rádiové vlny jsou druhem elektromagnetického záření s vlnovou délkou od 1 mm až do 100 km a s frekvencí od 3000 kHz až po 300 GHz. Elektromagnetické záření se přenáší jako vlny nebo částice o různých vlnových délkách a frekvencích. Podle frekvence lze spektrum rozdělit na sedm hlavních oblastí. [9], [15]

3.3.1 Komunikační moduly STX882 a SRX887

V práci jsou pro přenos naměřených dat použity komunikační moduly STX882 (vysílač) a SRX887 (přijímač) od společnosti NiceRF viz Obrázek 10, které pracují na frekvenci 443 MHz. Oba tyto moduly jsou vybaveny externí anténou, používají modulaci typu ASK (forma amplitudové modulace) a lze je přímo připojit k mikrokontroléru. Komunikační moduly disponují certifikací ROHS, FCC, ETSI a CE. Rozsah provozní teploty je v rozmezí od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

do 70 °C a jsou vhodné pro aplikace jako např. bezdrátový zvonek, bezdrátový bezpečnostní alarm, bezdrátový přenos dat apod. Moduly umožňují přenos dat v rozmezí od 0,1 Kbps až do 9,6 Kbps. Mezi výhody těchto zařízení patří:

- malá velikost,
- vysoký výkon,
- vysoká stabilita v různém prostředí,
- nízká cena,
- široký rozsah napětí,
- snadné použití.



Obrázek 10: Set vysílače SRX887 (vlevo) a přijímače SRX887 (vpravo) [53]

4 NÁVRH ZAŘÍZENÍ – HARDWAROVÁ ČÁST

Při návrhu hardwarové části byl důraz kladen na vytvoření zařízení umožňující neinvazivní způsob měření spotřeby elektrické energie a následný bezdrátový přenos naměřených dat s použitím komoditního hardwaru. Neinvazivní měření spotřeby zajišťuje proudový transformátor SCT-013-000 s děleným feritovým jádrem. O bezdrátový přenos dat se starají rádiové moduly STX882 a SRX887. Data o spotřebě jsou přenášena v podobě pulzů, stejně jako u pulzního výstupu elektronický elektroměrů. Zařízení je tedy plně kompatibilní se stávajícími systémy pro snímání pulzního výstupu, ale odpadá nutnost fyzicky propojit elektroměr se systémem pro sběr pulzů. Navrhnuté zařízení se skládá ze dvou hlavních částí viz Obrázek 11. Jednotlivé části navrhnuté systému budou blíže popsány v této kapitole.

4.1 Obvod pro měření proudu

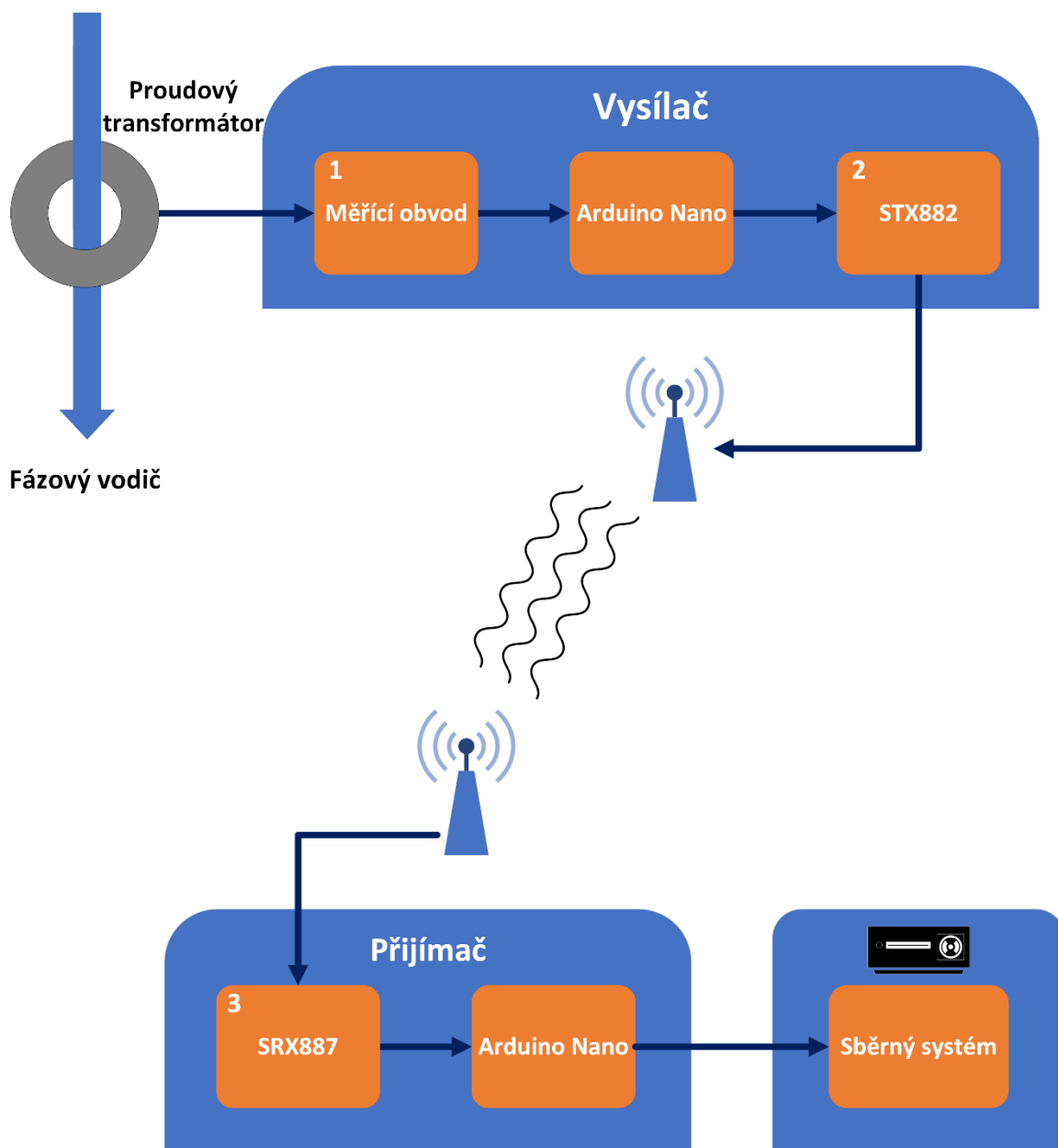
Proudová sonda transformuje proud protékající měřeným obvodem na hodnoty vhodné pro měření mikrokontrolérem. Výhodou použití proudového transformátoru je neinvazivní zapojení do měřeného obvodu a galvanické oddělení od měřeného obvodu. Při galvanickém oddělení nejsou dva elektrické obvody propojeny ani v jednom bodě. Výstup proudového transformátoru je pomocí obvodu popsaného v kapitole 4.1.3 propojen se vstupním analogovým pinem desky Arduino. K měření proudu slouží integrovaný A/D převodník s rozlišením 10 bitů, který převádí vstupní napětí (hodnota napětí je přímo úměrné měřenému proudu) na číselné hodnoty v rozsahu 0 až 1023. Tyto hodnoty jsou dále softwarově zpracovány mikrokontrolérem Arduino. Měřicí obvod je založen na projektu OpenEnergyMonitor [41].

4.1.1 Proudový transformátor

Zvolený proudový transformátor, popsaný v kapitole 3.2.1, slouží k transformaci proudu, který protéká měřeným obvodem. Proud je transformován na hodnoty vhodné ke zpracování mikrokontrolérem. Střídavý proud protékající primárním vinutím transformátoru vytváří v jádře magnetické pole, které v sekundárním vinutí indukuje proud. Proud v sekundárním vinutí je úměrný proudu tekoucímu primárním vinutím dle vzorce (10).

$$I_s = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_p \quad (10)$$

Kde I_s je proud sekundárního vinutí transformátoru, N_1 a N_2 udává převodový poměr transformátoru, I_p je proud primárního vinutí transformátoru.

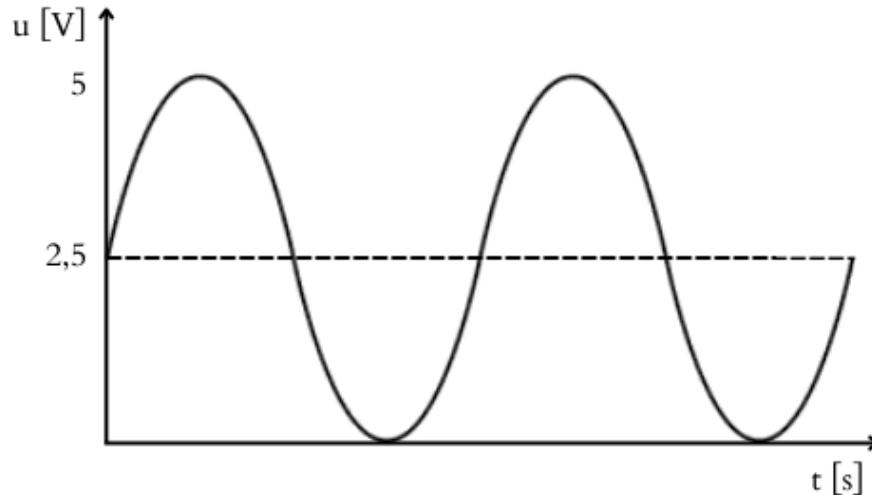


Obrázek 11: Blokové schéma navrhnutého zařízení

Proudový transformátor s označením SCT-013-000 je dimenzován na jmenovitý proud o hodnotě 100 A. Z důvodu zaměření systému na použití v domovních instalacích a zvýšení přesnosti měření není plně využit rozsah proudového transformátoru. System je dimenzován na vyšší hodnotu jmenovitého proudu hlavního jističe rodinného domu, tj. 32 A. Při maximálním efektivním proudu 32 A bude dle vzorce (11) maximální okamžitá hodnota proudu procházejícího primárním vinutím transformátoru 45,25 A.

$$I_{\max} = \sqrt{2} \cdot I = \sqrt{2} \cdot 32 = 45,25 \quad (11)$$

Kde I_{\max} je maximální okamžitá hodnota proudu, I je efektivní hodnota proudu.



Obrázek 12: Průběh napětí na analogovém vstupu desky Arduino

4.1.2 Zátěžový rezistor

Zvolený proudový transformátor indikuje na svém výstupu střídavý proud, který deska Arduino není schopná zpracovat. Arduino umožňuje na analogovém vstupu zpracovávat pouze napětí a to v rozsahu od 0 V do velikosti analogového referenčního napětí (defaultně 5 V nebo 3,3 V dle napájení). Z tohoto důvodu je k výstupu proudového transformátoru zapojen zátěžový rezistor, na kterém vzniká úbytek napětí úměrný proudovému výstupu transformátoru. Pro určení hodnoty rezistoru je nutné znát maximální okamžitou hodnotu proudového výstupu transformátoru (12) a následně dle rovnice (13) vypočítat hodnotu odporu zátěžového rezistoru.

$$I_s = \frac{I_{\max}}{N_2} = \frac{45,25}{2000} = 0,022625 \text{ A} \quad (12)$$

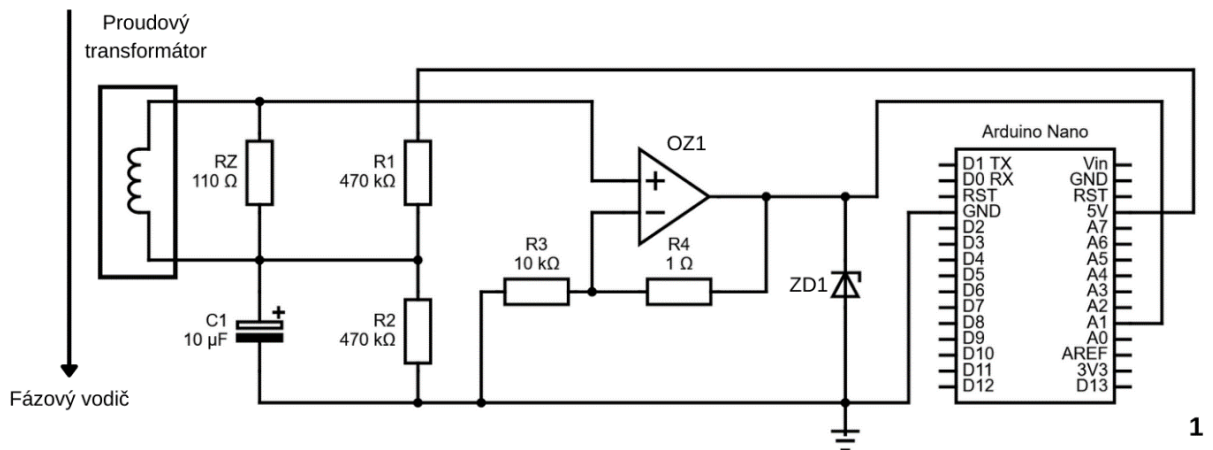
Kde I_s je výstupní proud transformátoru, I_{\max} je maximální hodnota proudu primárního vinutí, N_2 je počet závitů sekundárního vinutí.

$$R_z = \frac{\frac{V_{ref}}{2}}{I_s} = \frac{\frac{5}{2}}{0,022625} \equiv 110,49 \Omega \quad (13)$$

Kde R_z je paralelně zapojený odpor k výstupu proudového transformátoru, V_{ref} je analogová reference Arduino desky, I_s je maximální výstupní proud transformátoru.

4.1.3 Popis zapojení

Jak již bylo zmíněno desky Arduino neumožňují na analogovém vstupu zpracovat záporné napětí. Z tohoto důvodu je obvodu obsažen dělič napětí (tvořený rezistory R_1 a R_2 s hodnotami $470 \text{ k}\Omega$), který poskytuje stejnosměrný offset střídavému průběhu napětí na odporu R_z . Namísto spojení jedné výstupní svorky proudového transformátoru se zemí je tato svorka připojena k polovině analogového referenčního napětí ($2,5 \text{ V}$) viz Obrázek 13. Střídavý průběh napětí na analogovém vstupu je v plném rozsahu zabudovaného A/D převodníku desky Arduino viz Obrázek 12. Z důvodu zpřesnění měření je v obvodu zapojen filtrační kondenzátor C_1 , který snižuje šum proudového transformátoru. Ze stejného důvodu je před analogovým vstupem Arduina zapojen neinvertující operační zesilovač OZ_1 . Zenerova dioda ZD_1 chrání analogový vstup desky Arduino před přepětím, které může vzniknout při zapojení proudového transformátoru do obvodu s protékajícím proudem vyšším než 32 A . Pro desky s analogovým referenčním napětím o hodnotě 5 V je vhodné použít diodu se zenerovým napětím $5,1 \text{ V}$.



Obrázek 13: Schéma zapojení obvodu pro měření proudu

4.1.4 Instalace proudového transformátoru

Proudový transformátor musí být nainstalován na fázový vodič. Při zapojení transformátoru přes vícežilový kabel dojde k měření součtu protékajících proudů jednotlivými vodiči. Korektní instalace proudového transformátoru je znázorněna viz Obrázek 14.



Obrázek 14: Instalace proudového transformátoru

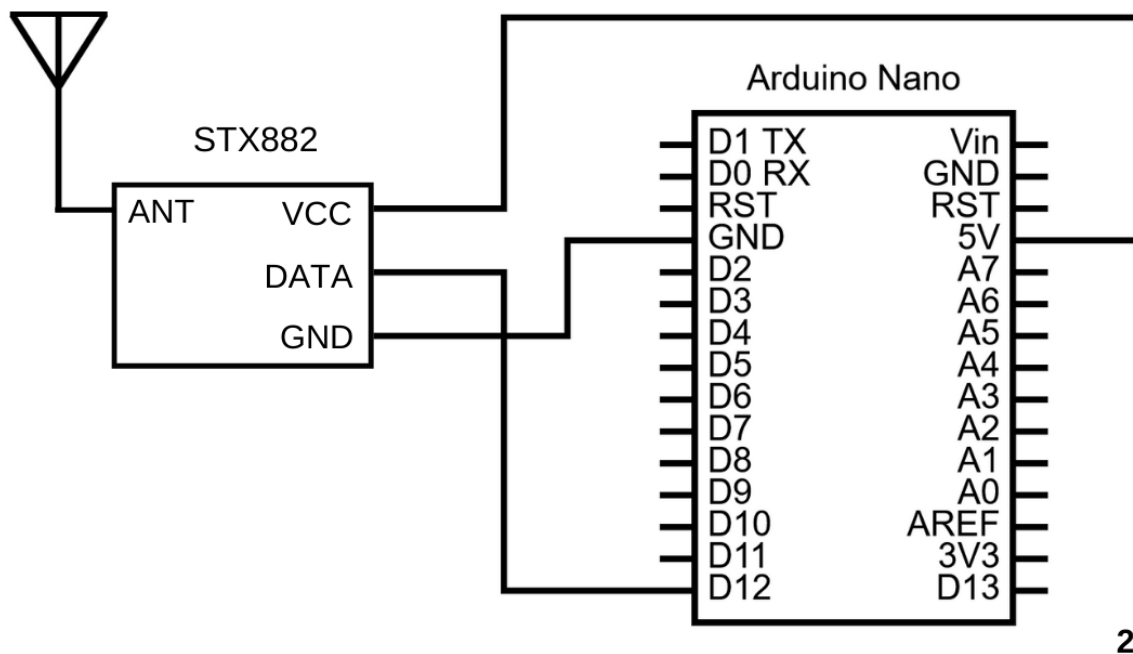
4.2 Bezdrátový přenos dat

Pro přenášení naměřených dat jsou využity bezdrátové komunikační moduly STX882 a SRX887, které jsou blíže popsány v kapitole 3.3.1. Moduly zajišťují jednosměrný rádiový přenos naměřených dat (spotřeby elektrické energie) v podobě pulzů. Data jsou přenášena bez adresování, opakování a potvrzení doručení pomocí ASK modulace. Díky použití bezdrátové rádiové komunikace odpadá nutnost fyzicky propojit měřící část s modulem pro snímání a zpracování pulzů.

4.2.1 Vysílač STX882

Vysílací část se skládá z desky Arduino Nano a komunikačního modulu STX882, který pomocí rádiové komunikace odesílá pulzy odpovídající měřené spotřebě elektrické energie. K ovládání modulu a odesílání dat je využit ovladač RH_ASK z knihovny RadioHead. Pro funkčnost

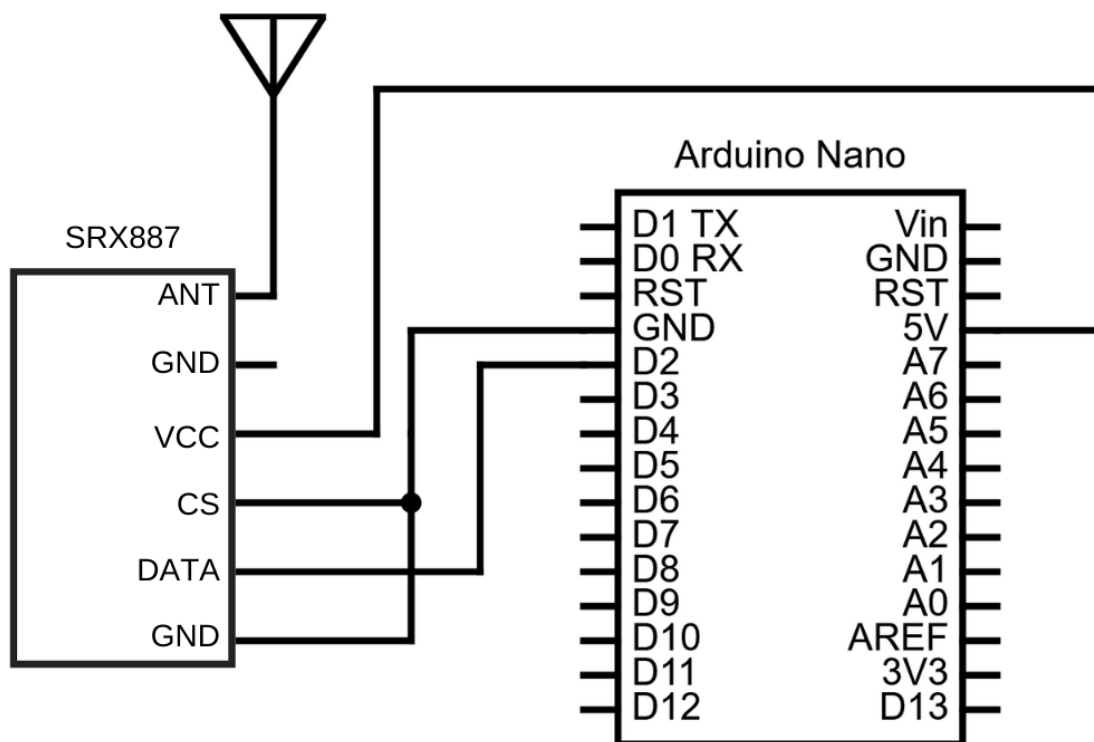
komunikačního modulu STX882 je nutné propojit pin DATA s libovolným datovým pinem na desce Arduino. Na pin VCC je potřeba připojit kladné napájecí napětí (použito 5 V z desky Arduino) a pin GND propojit se stejnojmenným pinem na desce Arduino. Připojení modulu STX882 k desce Arduino Nano je znázorněno viz Obrázek 15.



Obrázek 15: Schéma zapojení modulu STX882

4.2.2 Přijímač SRX887

Deska Arduino pomocí bezdrátového komunikačního modulu SRX887 přijímá naměřená data, které jsou dále zpracovány. K ovládní je použit stejný ovladač jako u modulu STX882. Pro správnou funkčnost komunikačního modulu s deskou Arduino je nutné připojit na pin VCC napájecí napětí v rozsahu 3–5.5 V. Dále ovládací pin CS spolu s pinem GND připojit na uzemnění. Pin CS slouží ke změně stavu modulu. Při připojení tohoto pinu k uzemnění dojde k aktivaci a při připojení napájecího napětí přejde modul do režimu spánku. Pomocí tohoto pinu lze ovládat činnost modulu a tím snížit spotřebu elektrického proudu. Datový pin DATA je nutné připojit na jeden z digitálních pinů podporující funkci přerušování (u desky Arduino Nano to jsou piny D2 a D3) viz Obrázek 16.



3

Obrázek 16: Schéma zapojení modulu SRX887

5 NÁVRH ZAŘÍZENÍ – SOFTWAREOVÁ ČÁST

V této kapitole jsou detailně popsány použité softwarové prostředky pro měření elektrického proudu a přenášení dat pomocí rádiové komunikace. Firmware pro platformu Arduino byl vyvinut v programovacím jazyce Wiring pomocí vývojového prostředí Arduino IDE. Platforma Arduino je vhodná pro vytváření prototypů díky její jednoduchosti a cenové dostupnosti. Při návrhu softwarové části byl využit potenciál platformy Arduino, který spočívá v dostupnosti velkého množství knihoven připravených k okamžitému použití. Knihovny vyvíjí široká celosvětová komunita Arduino nadšenců a typicky jsou zdarma dostupné ke stažení.

5.1 Měření proudu a výpočet spotřeby

Proud je měřen pomocí 10bitového A/D převodníku zabudovaného na desce Arduino a následně je diskretní výstup zpracován funkcemi z knihovny EmonLib. Pro účely navrhnutého zařízení byla použita funkce pro měření proudu, ze kterého se následně vypočítává spotřeba.

Nejprve je nutné vytvořit instanci, které poskytuje interakci s funkcemi knihovny. Následně nastavit kalibraci a pin pro měření proudu pomocí funkce *current()*. Tato funkce nastaví číslo pinu, na kterém bude snímán průběh napětí a kalibrační konstantu pro výpočet proudu. Samotný výpočet efektivní hodnoty proudu zajišťuje funkce *calcIrms()*. Knihovna EmonLib poskytuje možnost měřit elektrické napětí a následně z hodnot proudu a napětí určit činný a zdánlivý výkon. Navrhnuté zařízení neposkytuje možnost měřit elektrické napětí a pro určení spotřeby se počítá s konstantní hodnotou napětí 230 V.

```
#include <RH_ASK.h>           // import ovladače RH_ASK
#include "EmonLib.h"         // import knihovny EmonLib

#define L1_PIN 1             // číslo pinu pro měření proudu

#define CALIBRATION 16.46396 // kalibrační konstanta pro měření proudu
#define ONE_K_WATT_H 3600000 // 1 kwh = 3600000 ws
#define ONE_SEC 1000.0      // 1 s = 1000 ms
#define PULSES_PER_KWH 1000 // počet pulzu na odebranou 1 kwh
#define VOLTAGE 234         // napětí v síti

EnergyMonitor emon;        // vytvoření instance pro měření proudu
RH_ASK radio(2000, 11, 12, 10); // vytvoření instance ovladač pro komunikaci
                                // rychlost = 2000
                                // pin pro přijímání dat = 11
                                // pin pro odesílání dat = 12

float consumption = 0;     // spotřeba ve ws
```

```

float prevMillis = 0;
double onePulse = 0;           // Hodnota jednoho pulzu ve ws
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  if (!radio.init())          // inicializace ovladače pro
    Serial.println("init failed"); // rádiovou komunikaci

  emon.current(L1_PIN, CALIBRATION); // nastavení pinu a kalibrace
                                     // pro měření proudu

  onePulse = ONE_K_WATT_H / PULSES_PER_KWH; // výpočet hodnoty
                                               // jednoho pulzu ve ws

  prevMillis = millis() / ONE_SEC;          // čas startu měření
}

void loop() {
  double irms = emon.calcIrms(1480);        // výpočet proudu
  consumption += irms * VOLTAGE * ((millis() / ONE_SEC) - prevMillis); // výpočet spotřeby
  prevMillis = millis() / ONE_SEC;          // časový interval
                                               // pro výpočet spotřeby

  while((consumption - onePulse) >= 0){
    consumption -= onePulse;
    const char * str = "1";

    radio.send((uint8_t *)str, strlen(str)); // odeslání zprávy
                                               // reprezentující pulz

    radio.waitPacketSent();                  // čekání na dokončení přenosu
  }
}

```

Zdrojový kód 1: Výpočet spotřeby a odesílání pulzů

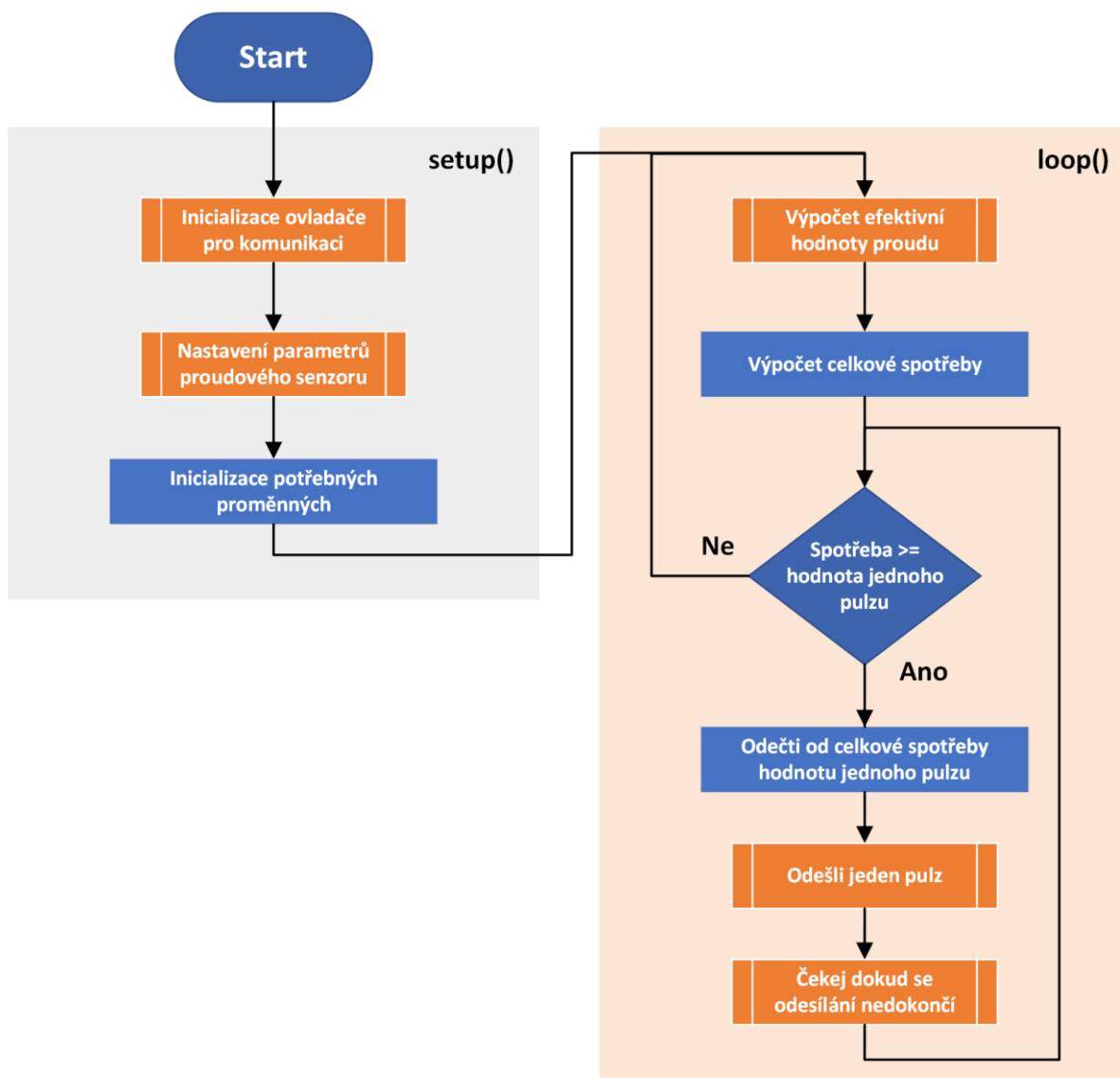
5.1.1 Knihovna EmonLib

Knihovna EmonLib slouží k měření střídavého napětí a proudu pomocí platformy Arduino a poskytuje funkcionality pro výpočet činného a zdánlivého výkonu střídavého proudu. V práci jsou použity funkce pro měření střídavého proudu, pomocí kterého je vypočítávána spotřeba elektrické energie.

Při nastavení vstupního pinu pro měření proudu je nutné zadat správnou kalibrační konstantu odvozenou z aktuálních vstupních hardwarových parametrů. Kalibrační konstantu lze přibližně určit podle vzorce (14). Pro ověření správnosti kalibrace je nutné měřit proud v obvodu pomocí ampérmetrů a následně hodnoty z ampérmetru porovnat s hodnotami vypočítané knihovnou.

$$Kalibrace = \frac{N_2}{N_1} = \frac{2000}{110} = 18,18 \quad (14)$$

Kde N_2 a N_1 je počet závitů sekundárního a primárního vinutí proudového transformátoru, R_z je hodnota zátěžového rezistoru.

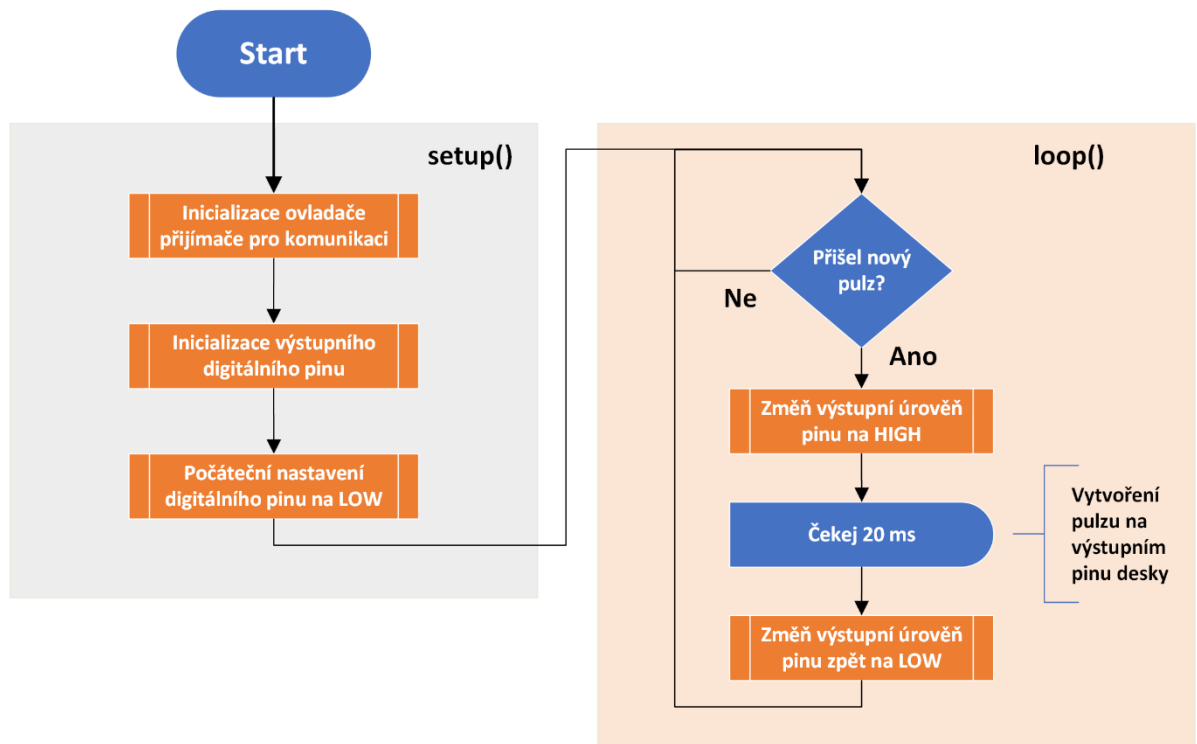


Obrázek 17: Vývojový diagram navrhnutého firmwaru pro modul vysílače

5.2 Bezdrátová rádiová komunikace

Pro komunikační moduly byl zvolen ovladač RH_ASK z knihovny RadioHead, která je založena na objektově orientovaném přístupu. Z tohoto důvodu je nutné před používáním ovladače vytvořit instanci, pomocí které jsou volány jednotlivé funkce pro ovládání modulů. Pro správnou funkčnost komunikace je nutné nejprve inicializovat softwarové ovladače obou rádiových modulů pomocí funkce *init()*.

Rádiový modul vysílače odesílá pulzy pomocí funkce *send()* viz Obrázek 17, která čeká na dokončení předchozího vysílání a poté nahraje zprávu do vysílače a spustí vysílání. Do parametrů funkce je nutné předat ukazatel na pole s daty a počet odesílaných bajtů. Následně program čeká na dokončení vysílání pomocí funkce *waitPacketSend()*. Zprávy jsou v druhém modulu přijímány funkcí *recv()* viz Obrázek 18, která nejprve probudí přijímač z režimu spánku a následně ověří dostupnost nové zprávy. Pokud je k dispozici platná zpráva vrací funkce *true*. Funkci pro přijímání zpráv je nutné volat dostatečně často, aby nedocházelo ke ztrátě zpráv.



Obrázek 18: Vývojový diagram navrhnutého firmwaru pro modul přijímače

5.2.1 Knihovna RadioHead

Knihovna RadioHead poskytuje objektově orientovaný přístup pro odesílání a přijímání paketových zpráv pomocí běžně používaných rádiových technologií. RadioHead knihovna byla

vytvořena v dubnu roku 2014 na základě předešlých knihoven tvůrců. Knihovna je navržena pro běh na malých procesorech s velmi omezenými zdroji a podporuje řadu procesorů a platforem (ESP32, Raspberry Pi, Particle Photon, Arduino apod.). RadioHead se skládá ze dvou hlavních sad tříd:

- Ovladače poskytující nízko úroňový přístup k řadě různých zařízení pro přenos dat pomocí rádiové komunikace a jiných paketových přenosů zpráv.
- Manažeri slouží pro odesílání a přijímání zpráv na vyšší úrovni s ohledem na požadavky pro přenos.

Každý program používající RadioHead disponuje instancí manažera a ovladače, který poskytuje přístup k samotnému zařízení pro bezdrátový přenos. Manažer používá ovladač k odesílání a přijímání zpráv pro aplikaci. Ovladač lze použít i samostatně, ale pouze pro neadresovanou a nespolehlivou komunikaci.

V práci je použit ovladač RH_ASK poskytující funkce pro odesílání a přijímání krátkých zpráv bez adresování, opakovaného přenosu nebo potvrzení. Zprávy jsou odesílány pomocí ASK (Amplitude-shift keying) modulace.

```
#include <RH_ASK.h> // import ovladače RH_ASK
#define PULSE_OUTPUT_PIN 5 // číslo digitálního pinu pro pulsní výstup
RH_ASK receiver(2000, 2, 10, 0); // vytvoření instance ovladače pro komunikaci
// rychlost = 2000
// pin pro přijímání dat = 2
// pin pro odeslání dat = 10
// pin pro ovládání módu rádiového modulu

void setup() {
  if (!receiver.init()) // inicializace ovladače pro
    Serial.println("Init err!"); // pro rádiovou komunikaci

  pinMode(PULSE_OUTPUT_PIN, OUTPUT); // nastavení digitálního pinu
  digitalWrite(PULSE_OUTPUT_PIN, LOW); // jako výstup
  // napětí nastaveno na 0 V
}

void loop() {
  uint8_t buf[RH_ASK_MAX_MESSAGE_LEN];
  uint8_t buflen = sizeof(buf);
  if (receiver.recv(buf, &buflen) // pokud je k dispozici platná zpráva
    { // je zkopírována do buf a
      // vrací true, jinak false
      digitalWrite(PULSE_OUTPUT_PIN, HIGH); // vytvoření pulzu
      delay(20); // na dig. pinu
      digitalWrite(PULSE_OUTPUT_PIN, LOW);
    }
}
```

Zdrojový kód 2: Přijímání pulzů

6 MĚŘENÍ A TESTOVÁNÍ

V této kapitole je popsán vývoj návrhu měřicí části zařízení a jednotlivé fáze testování. Navrhnuté zařízení bylo v průběhu vývoje podrobena několika testům, které se zaměřovali na přesnost měření spotřeby elektrické energie. Výsledky testovacích měření byly podmětem k úpravám měřicího obvodu, které měli za cíl postupné zvyšování přesnosti měření.

6.1 Kalibrace knihovny pro měření elektrického proudu

Problematika kalibrace měření proudu pomocí knihovny EmonLib již byla částečně popsána v kapitole 5.1.1. Pro výpočet spotřeby je nutné měřit co nejpřesněji proud odebíraný spotřebiči. Softwarovou část měření je nutné zkalibrovat s použitým hardwarem. K nespolehlivosti naměřené hodnoty elektrického proudu přispívají tři fyzikální faktory:

- převodový poměr proudového transformátoru,
- odpor zátěžového rezistoru,
- přesnost měření napětí na analogovém vstupu. [7]

Přesnost měření vstupního napětí závisí na linearitě A/D převodníku a hodnotě referenčního napětí desky Arduino. Při výpočtu kalibrační konstanty dle vzorce (14) je předpokládána hodnota referenčního napětí 5 V.

Spolehlivost měření proudu lze ověřit pomocí ampérmetru, který je zapojen do stejného obvodu, jako proudová sonda. Při kalibraci je nutné počítat s odchylkou samotné ampérmetru a není ji vhodné provádět se zátěží, která odebírá malý proud (např. žárovka nebo nabíječka). Pokud naměřené hodnoty nejsou stejné, je třeba upravit hodnotu kalibrační konstanty a měření provést znovu.

6.2 Porovnání měření s elektroměrem pro podružné měření

Pro porovnání přesnosti měření byl zvolen jednofázový elektroměr DDS-1Y-18M 45 A viz Obrázek 19, který je určen k podružnému měření činné spotřeby elektrické energie. Elektroměr spadá do třídy přesnosti 1 dle ČSN EN 61036 a oproti navrhnutému zařízení je nutné ho zapojit přímo do obvodu. Tento elektroměr neslouží k fakturačnímu odečtu spotřeby, a proto je navrhnuté zařízení vhodnou alternativou.

Pro ověření přesnosti navrhnutého zařízení bylo provedeno několik testovacích měření. Výsledky měření vedly k postupným úpravám zařízení za účelem zvýšení přesnosti měření spotřeby.



Obrázek 19: Jednofázový elektroměr DDS-1Y-18M 45 A [13]

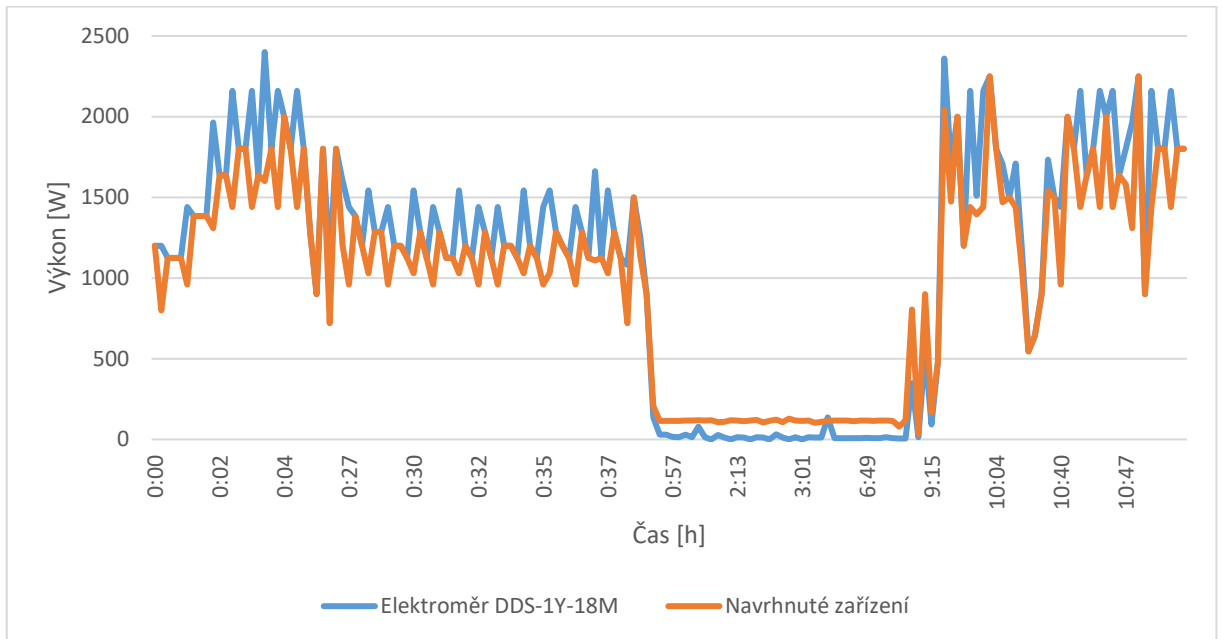
6.2.1 Měření pomocí prvního prototypu

První prototyp měřicího obvodu se skládal pouze z nezbytných součástek, tj. ze zátěžového rezistoru a napěťového děliče viz. Obrázek 13. Obrázek 20 znázorňuje porovnání měření spotřeby elektrické energie pomocí prvního prototypu měřicího obvodu a elektroměru. Naměřená spotřeba tímto obvodem vykazovala nepřesnost oproti spotřebě naměřené elektroměrem. Z naměřených dat vyplývá značná odchylka dosahující až 44 %. Nepřesnosti se projevovaly při měření výkonu pod 100 W, kdy docházelo k výpočtu vyšších hodnot spotřeby oproti hodnotám z elektroměru. Důvodem této odchylky byla chybně nastavená kalibrační konstanta v softwarové části zařízení a šum na vstupu A/D převodníku při měření nízkých hodnot proudu. Další chybovost měření vznikala při měření výkonu nad 1000 W, kdy naopak docházelo navrhnutým zařízením k měření nižší spotřeby. Výsledky prvních měření byly podmětem pro úpravy měřící části zařízení.

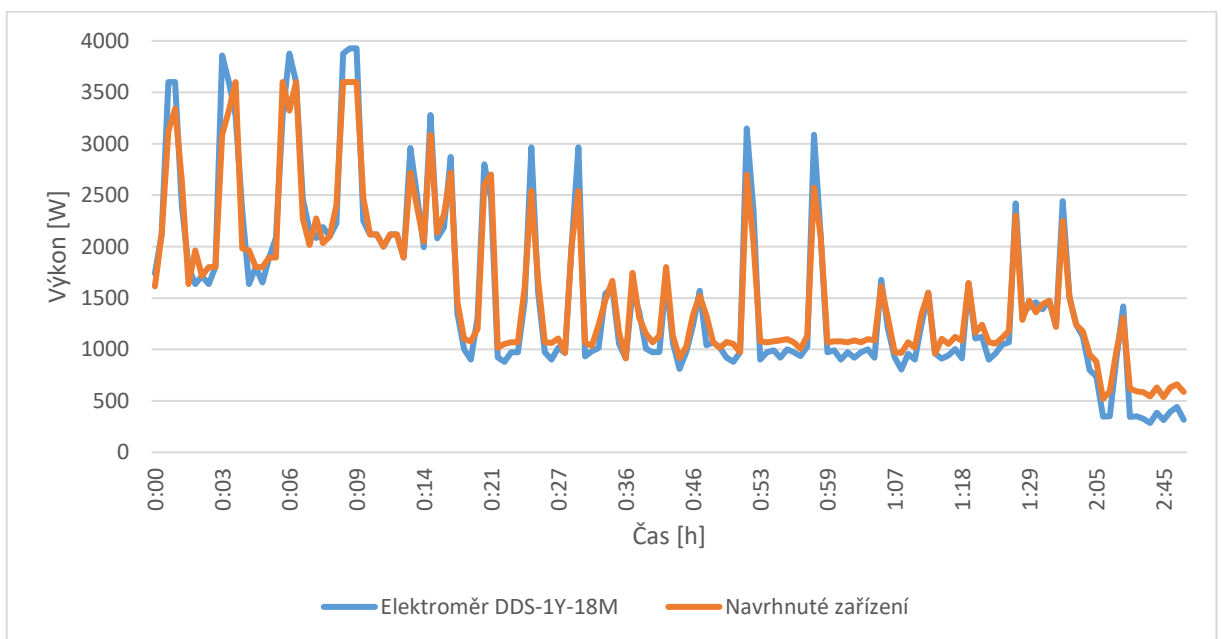
6.2.2 Měření s operačním zesilovačem

Za účelem zvýšení přesnosti byl měřicí obvod doplněn o operační zesilovač v neinvertujícím zapojení a o elektrolytický kondenzátor. Tyto součástky mají za cíl snížit šum na vstupu A/D převodníku a tím zvýšit přesnost měření proudu. Měření spotřeby druhým prototypem vykazovalo snížení nepřesnosti viz Obrázek 21, ale i přesto odchylka dosahovala až 10 %.

Druhý prototyp mírně snížil nepřesnost při měření nižší spotřeby pomocí použitého operačního zesilovače a elektrolytického kondenzátoru.



Obrázek 20: Měření spotřeby pomocí prvního prototypu



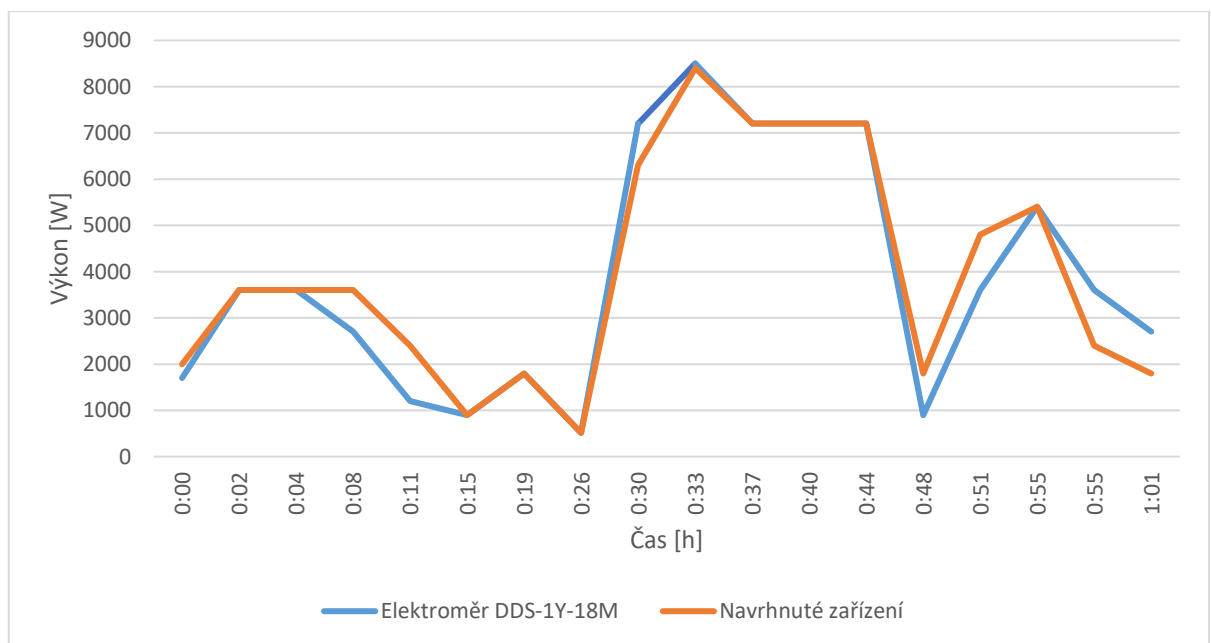
Obrázek 21: Měření spotřeby s operačním zesilovačem

6.2.3 Měření pomocí korekční funkce

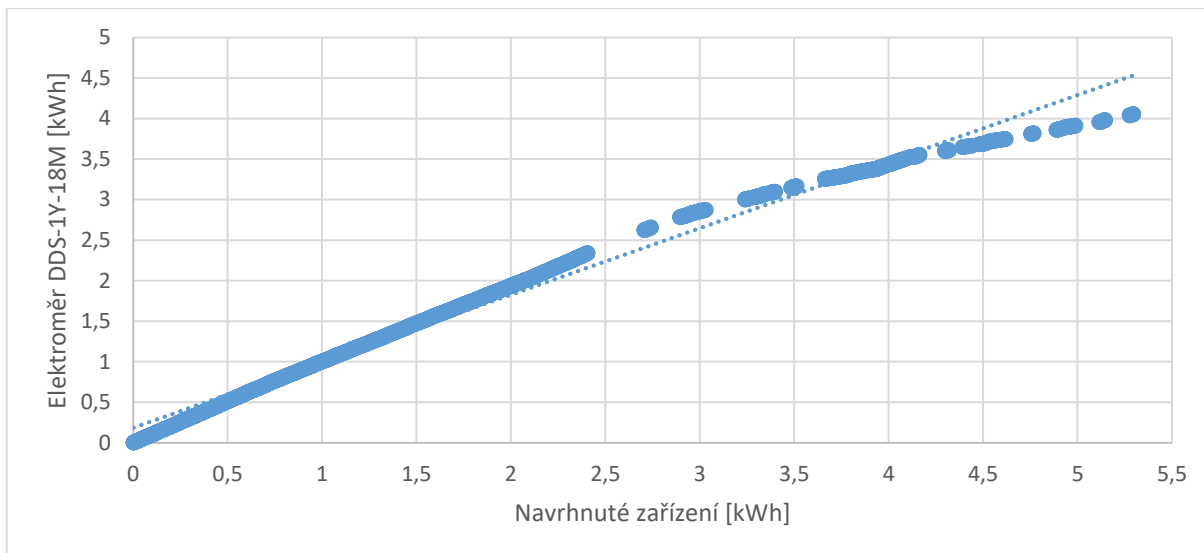
Výsledky testovacích měření naznačovaly lineární závislost mezi hodnotami naměřenými navrhnutým zařízením a elektroměre viz Obrázek 23. Předchozí měření poskytla potřebná data pro sestavení korekční funkce (15) se spolehlivostí 98,74 %.

$$y = 0,8208x + 185,48 \quad (15)$$

S cílem dalšího zpřesnění byla do softwarové části výpočtu spotřeby zapracována lineární rovnice. Z následného měření s použitím korekční funkce vyplývá zlepšení měření při vyšší hladině odebíraného výkonu viz Obrázek 22. Zařízení bez korekční funkce měřilo nižší hodnoty oproti reálné spotřebě při výkonu nad cca 2500 W. Tato nepřesnost byla použitím korekční funkce snížena.



Obrázek 22: Měření spotřeby s korekční funkcí



Obrázek 23: Grafické znázornění závislosti naměřených hodnot

6.3 Závěr testování

Navrhnuté zařízení vykazuje předpokládanou nepřesnost měření spotřeby elektrické energie. V průběhu testování docházelo k úpravám, které vedly ke výraznému snížení počáteční odchylky měření. I přesto není zařízení vhodné k přesnému odečtu spotřebované energie, spíše se jedná o doplňkové měření, které má informativní charakter. Nepřesnost měření je pak kombinací několika faktorů. Jde především o:

- **Nepřesnost proudového transformátoru** – zvolená proudová sonda má udávanou nepřesnost při transformování proudu $\pm 3\%$.
- **Rozlišení A/D převodníku** – použitá deska Arduino Nano disponuje integrovaným A/D převodníkem s rozlišením 10 bitů, který není vhodný pro přesné měření veličin.
- **Zanedbání účinníku** – navrhnuté zařízení snímá pouze průběh proudu a proto je při výpočtu spotřeby zanedbán účinník.
- **Zanedbání hodnoty elektrického napětí** – zařízení neposkytuje možnost snímat průběh napětí. Výpočet spotřeby počítá s konstantním napětím 230 V.

Nepřesnost měření je tedy částečně způsobena neinvazivním zapojením do měřeného obvodu a je nutné brát v úvahu také nepřesnosti použitých pasivních součástek.

6.4 Navrhnuté zařízení

Navrhnuté zařízení je vhodnou alternativou k běžně používaným podružným elektroměrům. Nejedná se tedy o zařízení určené k přesným odečtům spotřebované elektrické energie. Výpočet spotřeby je založen na měření střídavého elektrického proudu pomocí proudového transformátoru s děleným jádrem. Konstrukce proudového transformátoru umožňuje neinvazivní zapojení zařízení do měřeného obvodu. Bezdrátové rádiové komunikační moduly STX882 a SRX887 umožňují naměřená data přetransformovaná do pulzů bezdrátově přenášet k sběrnému systému. Jelikož jsou data o spotřebě přenášena ve stejném formátu jako u pulsního výstupu běžně dostupných elektroměru, je navrhované zařízení plně kompatibilní s existujícími systémy pro sběr dat. Výhodou je bezdrátový přenos pulzů, který umožňuje libovolné umístění sběrného systému od měřicího modulu do vzdálenosti cca 150 m. Mezi hlavní vlastnosti navrhnutého zařízení patří:

- neinvazivní měření pomocí proudového transformátoru,
- maximální proudové zatížení 32 A,
- maximální měřený výkon 7360 W,
- bezdrátový přenos spotřeby pomocí rádiových modulů,
- kompatibilita se systémy pro sběr pulzů,
- konstanta elektroměru 1000 imp./kWh (lze upravit),
- možnost použít pro třífázové měření (po úpravě).

ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout hardwarové měřicí zařízení založené na platformě Arduino a vlastní software umožňující pulsní měření spotřeby elektrické energie a bezdrátový přenos dat. Tento cíl byl splněn návrhem zařízení umožňující měření střídavého elektrického proudu s přenosem dat pomocí rádiové komunikace. Samotné zařízení se skládá ze dvou hlavních částí. Středobodem každé z těchto částí je deska Arduino Nano. První část zajišťuje měření střídavého proudu a jednosměrný přenos naměřených dat. Měření proudu je realizováno pomocí proudového transformátoru a data jsou přenášena pomocí rádiového modulu vysílače. Druhý modul přijímá naměřené pulzy a umožňuje připojení na další sběrný systém.

Část pro měření proudu poskytuje neinvazivní zapojení do měřeného obvodu pomocí proudového transformátoru s děleným feritovým jádrem. Použitá sonda umožňuje měřit proud až do 100 A, ale maximální měřený proud byl omezen na 32 A. Tato hodnota je naprosto dostačující pro použití zařízení v domovních elektroinstalacích. Měřicí část zařízení vykazuje předpokládanou nepřesnost měření, která byla v průběhu vývoje snížena pomocí omezení rozsahu měřeného proudu a dále pak zapojením neinvertujícího zesilovače a elektrolytického kondenzátoru do obvodu. Další korekce měření spotřeby byla provedena pomocí lineární funkce sestavené z naměřených dat. I přesto není zařízení určené k přesným odečtům, ale je spíše vhodné pro doplňkové a informativní měření spotřeby elektrické energie, což byl i původní předpoklad této práce.

Jednosměrný rádiový přenos dat zajišťují moduly vysílače a přijímače od firmy NiceRF, které jsou přímo propojeny s deskami Arduino. Data o naměřené spotřebě jsou přenášena v podobě pulzů. Tento způsob přenášení dat o spotřebě reflektuje logiku pulzního výstupu S0 elektronických elektroměrů, ale s tím rozdílem, že není nutné fyzicky propojit měřicí zařízení se sběrným systémem. Navrhnuté zařízení lze díky tomu připojit k existujícímu systému pro sběr naměřených dat.

Zařízení lze použít i pro třífázové měření a to přidáním dalších obvodů pro měření proudu a úpravou zdrojového kódu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *100mW High Power ASK Transmitter Module STX882* [online]. NiceRF Wireless Technology, c2020 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.nicerf.com/products/detail/100mw-high-power-ask-transmitter-module-stx882.html>
- [2] *Arduino - IoT* [online]. ArduinoGetStarted.com, c2021 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://arduinogetstarted.com/tutorials/arduino-iot>
- [3] *Arduino Nano* [online]. Arduino, c2021 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>
- [4] *Arduino Nano Board* [online]. Elprocus, c2013-2022 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/an-overview-of-arduino-nano-board/>
- [5] *Arduino Nano Tutorial: Pinout & Schematics* [online]. CircuitsToday, 2020 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.circuitstoday.com/arduino-nano-tutorial-pinout-schematics>
- [6] *Arduino Pro – nekonvenční a snadná cesta k úspěchu aplikace IoT* [online]. TME, 2021 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/42846/42947/arduino-pro-nekonvencni-a-snadna-cesta-k-uspechu-aplikace-iot/#arduino-dlaczego-sprawdzi-sie-nie-tylko-u-amatorow>
- [7] *Calibration Procedure* [online]. OpenEnergyMonitor [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ctac/calibration>
- [8] *Current transformer: Working principle, Types, Selection* [online]. Electrical terminology, 2021 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <http://www.electricalterminology.com/what-is-a-current-transformer/>
- [9] DUFKOVÁ, Marie. *Radiové vlny mapují mořské proudy* [online]. Třípól - časopis pro studenty, 2017 [cit. 2022-04-25]. ISSN 2464-7888. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/fyzika-a-klasicka-energetika/1959-radiove-vlny-mapuji-morske-proudy>

- [10] *Elektrická práce* [online]. ELUC [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/427>
- [11] *Elektrický výkon* [online]. ČEZ, c2022 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/el_vykon.html
- [12] *Elektroměry: Historie a současnost* [online]. Praha: Pražská energetik, 2009 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.premereni.cz/Files/dulezite-informace/ke-stazeni/tiskoviny-ke-stazeni/elektromery-historie-a-soucasnost/>
- [13] *ELEMAN Elektroměr DDS-1Y-18M 45 A 1fázový 1 s* [online]. LEDvěci.cz, c2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.ledveci.cz/eleman-elektromer-dds-1y-18m-45a-1-fazovy-1s/>
- [14] FOOTE, Keith D. *A Brief History of the Internet of Things* [online]. Dataversity Digital, 2022 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.dataversity.net/brief-history-internet-things/>
- [15] FRANĚK, Ondřej. *Základy radiokomunikace: telefonní a datové komunikace a satelitní navigace* [online]. Zdravotnická záchranná služba hl. m. Prahy, 2013 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://adoc.pub/zaklady-radiokomunikace.html>
- [16] GILLIS, Alexander S. *What is IoT (Internet of Things) and how does it work?* [online]. TechTarget, 2022 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Internet-of-Things-IoT>
- [17] HAMZA, Megi. *A Beginner's Guide to The Internet of Things (IoT) 2022* [online]. Disruptive Technologies, 2022 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.disruptive-technologies.com/blog/a-beginners-guide-to-the-internet-of-things-iot-2022>
- [18] HERNÁNDEZ, María. *IoT: Consumer & Commercial vs. Industrial - Main overview* [online]. Ubidots, 2019 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://ubidots.com/blog/iot-consumer-vs-commercial-vs-industrial-main-overview/>

- [19] *Internet of Things (IoT) Everything will be connected* [online]. Aress Software & Education Technologies, c2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.aress.com/iot-development.php>
- [20] *Internet of Things: The Five Types of IoT* [online]. Pareteum, 2021 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.pareteum.com/internet-of-things-the-five-types-of-iot/>
- [21] *IoT Architecture: Key layers and components* [online]. AltexSoft, 2020 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.altexsoft.com/blog/iot-architecture-layers-components/>
- [22] JAHNKE, Alec. *The 4 Stages of IoT Architecture* [online]. Digi International, 2020 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.digi.com/blog/post/the-4-stages-of-iot-architecture>
- [23] *Jak rozumět konceptu Průmysl 4.0* [online]. Svaz průmyslu a dopravy České republiky, 2019 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.spcr.cz/aktivity/z-hospodarske-politiky/12973-jak-rozumet-konceptu-prumysl-4-0>
- [24] KAMAKSHAI, S., Pannala Krishna MURTHY a J. AMARNATH. *Electrical Measurements and Measuring Instruments*. New Delhi: I. K. International, 2010. ISBN 978-93-80578-76-7.
- [25] KHVOYNITSKAYA, Sandra. *The IoT history and future* [online]. Itransition, 2019 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.itransition.com/blog/iot-history>
- [26] KOŘOUSKOVÁ, Barbora. *Internet věcí (IoT): definice, příklady využití, produkty* [online]. Rascasone, 2021 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.rascasone.com/cs/blog/iot-internet-veci-definice-produkty-historie>
- [27] KREJZA, Karel. *Elektrický výkon* [online]. ElektriKa.info, 2010 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://elektriKa.cz/terminolog/eterminolog2definition.2010-06-16.8744765021>
- [28] LEA, Perry. *Internet of Things for Architects: Architecting IoT solutions by implementing sensors, communication infrastructure, edge computing, analytics, and security*. Birmingham: Packt Publishing, 2018. ISBN 1788475747.

- [29] *Libraries* [online]. Arduino, c2022 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z:
<https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/>
- [30] LOM, Michal a Ondřej PŘIBYL. *Rizika chytrých zařízení a jejich zabezpečení* [online]. Topinfo, 2017 [cit. 2022-04-24]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/inteligentni-budovy/15569-rizika-chytrych-zarizeni-a-jejich-zabezpeceni>
- [31] LUETH, Knud Lasse. *Why the Internet of Things is called Internet of Things: Definition, history, disambiguation* [online]. IoT Analytics, 2014 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z:
<https://iot-analytics.com/internet-of-things-definition/>
- [32] MAJLING, Eduard. *Transformátor - základní vlastnosti a dělení* [online]. oEnergetice.cz, 2015 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z:
<https://oenergetice.cz/elektroenergetika/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni>
- [33] MATTHEWS, Alice. *What is the problem with IoT security?* [online]. Electronic Specifier, 2016 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z:
<https://www.electronicspecifier.com/news/blog/what-is-the-problem-with-iot-security>
- [34] MCCAULEY, Mike. *RadioHead: RadioHead Packet Radio library for embedded microprocessors* [online]. AirSpayce, c2017 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z:
<https://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/index.html>
- [35] MCCAULEY, Mike. *RadioHead: RH_ASK Class Reference* [online]. AirSpayce, c2017 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z:
https://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/classRH__ASK.html
- [36] *Měření elektrického proudu* [online]. ElektriKa.info, 2006 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z:
<https://elektriKa.cz/data/clanky/clanek.2006-01-24.0538652499/view>
- [37] *Měření práce elektrického proudu* [online]. ElektriKa.info, 2009 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://elektriKa.cz/data/clanky/ben-mereni-prace-elektrickeho-proudu>
- [38] *Měření střídavého proudu* [online]. ElektriKa.info, 2006 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z:
<https://elektriKa.cz/data/clanky/clanek.2006-01-29.1299522972>

- [39] MLČÁK, Tomáš a Václav KOLÁŘ. *Elektrické obvody střídavého proudu* [online]. VŠB - TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2007 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: https://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/3_stob_sylab_bc_07.pdf
- [40] *Monitoring energy via utility meter pulse output* [online]. OpenEnergyMonitor [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/pulse-counting/introduction-to-pulse-counting>
- [41] *OpenEnergyMonitor* [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://openenergymonitor.org/>
- [42] OVERHEID, Andrew. *Understanding Edge Computing vs. Fog Computing* [online]. OnLogic, 2021 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.onlogic.com/company/io-hub/edge-computing-vs-fog-computing/>
- [43] PARRIS, Colin. *What is the Industrial Internet of Things (IIoT)?* [online]. GE Digital, c2022 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.ge.com/digital/blog/what-industrial-internet-things-iiot>
- [44] POSPÍŠIL, Jaroslav. *Popis základních průběhů využívaných v elektrotechnice* [online]. Praha: ČVUT FEL, 2020 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.vovcr.cz/odz/tech/381/page11.html>
- [45] RANGER, Steve. *What is the IoT? Everything you need to know about the Internet of Things right now* [online]. ZDNet, 2020 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.zdnet.com/article/what-is-the-internet-of-things-everything-you-need-to-know-about-the-iot-right-now/>
- [46] ROBERTS, Brandon. *Why Your Business Should Be Using Raspberry Pi Single-Board Computers* [online]. BairesDev, 2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.bairesdev.com/blog/raspberry-pi-single-board-computers/>
- [47] RYAN, Turner. *Arduino Programming: 3 books in 1 - The Ultimate Beginners, Intermediate and Expert Guide to Master Arduino Programming*. London: N.B.L. International Consulting, 2020. ISBN 9781647710774.

- [48] *SCT013: Split core current transformer* [online]. YHDC [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/Datasheet_SCT013.pdf
- [49] SELECKÝ, Matúš. *Arduino: uživatelská příručka*. Přeložil Martin HERODEK. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4840-2
- [50] SKOPALOVÁ, J., M. KOTOUČEK a P. ADAMOVSKÝ. *ZÁKLADNÍ ELEKTRICKÉ VELIČINY A JEJICH JEDNOTKY* [online]. Univerzita Palackého v Olomouci, Katedra analytické chemie [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://ach.upol.cz/ucebnice2/jednotky.htm>
- [51] STOLTZFUS, Justin. *What is the Internet of Things (IoT)?* [online]. Techopedia, 2020 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.techopedia.com/definition/28247/internet-of-things-iot>
- [52] *STX882* [online]. NiceRF Wireless Technology, 2014 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.772-294.1.pdf>
- [53] *Superheterodyne ASK Receiver module SRX887* [online]. NiceRF Wireless Technology, c2020 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.nicrf.com/products/detail/ask-receiver-module-srx887.html>
- [54] *Superheterodyne ASK Receiver module SRX887* [online]. NiceRF Wireless Technology, c2020 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.nicrf.com/products/detail/ask-receiver-module-srx887.html>
- [55] ŠŤASTNÝ, Jiří. *Měření spotřeby energie při provozu elektrických zařízení* [online]. ČVUT Fakulta strojní, 2011 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: http://www.stpcr.cz/?download=articles/vvi-2011-05_s236.pdf
- [56] *The Current Transformer* [online]. AspenCore, c2022 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/current-transformer.html>
- [57] VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž, 2017. ISBN 978-80-87106-93-8

- [58] VOJÁČEK, Antonín. *Základní úvod do oblasti internetu věcí (IoT)* [online]. Automatizace.HW.cz, 2016 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/zakladni-uvod-do-oblasti-internetu-veci-iot.html>
- [59] WANG, Claire. *The 2016 Dyn Attack and its Lessons for IoT Security* [online]. Stanford University, 2018 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://mse238blog.stanford.edu/2018/07/clairemw/the-2016-dyn-attack-and-its-lessons-for-iot-security/>
- [60] *What is a pulse output energy meter and how can you use it to analyze your bill?* [online]. ThingsLog, 2021 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://thingslog.com/blog/2021/08/11/what-is-pulse-output-energy-meter/>
- [61] *What is Arduino?* [online]. Arduino, 2018 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [62] *What Is Industrial IoT (IIoT)?* [online]. Cisco Systems, c2022 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/internet-of-things/what-is-industrial-iiot.html>
- [63] *What is IoT Architecture?* [online]. MongoDB, c2022 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.mongodb.com/cloud-explained/iiot-architecture>
- [64] *What is IoT architecture?: Explanation with example of IoT architecture* [online]. AVSystem, 2019 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.avsystem.com/blog/what-is-iiot-architecture/>
- [65] WIECZOREK, Anna. *The real history behind the Arduino cross-platform* [online]. Botland, 2021 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://botland.store/blog/the-real-history-behind-the-arduino-cross-platform/>
- [66] YARBOROUGH, Bryan. *Components and Methods for Current Measurement* [online]. 2012 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/technologies/power-electronics-systems/article/21194130/components-and-methods-for-current-measurement>