



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

Návrh měřicí desky s komunikací po sběrnici MODBUS

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika
Autor práce: **Bc. Václav Jíše**
Vedoucí práce: Ing. Miroslav Holada, Ph.D.





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

Design measuring board with MODBUS

Master thesis

Study programme: N2612 – Electrical Engineering and Informatics
Study branch: 3902T005 – Automatic Control and Applied Computer Science
Author: **Bc. Václav Jíše**
Supervisor: Ing. Miroslav Holada, Ph.D.





Zadání diplomové práce

Návrh měřicí desky s komunikací po sběrnici MODBUS

Jméno a příjmení: **Bc. Václav Jíše**
Osobní číslo: M17000143
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Automatické řízení a inženýrská informatika
Zadávající katedra: Ústav informačních technologií a elektroniky
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou FV elektráren, zaměřte se na monitoring jednotlivých řetězců solárních panelů. Nastudujte komunikační sběrnici RS485 a protokol MODBUS.
2. Seznamte se se stávající měřicí deskou pro monitorinng proudů ze stringů. Zhodnoťte její výhody a nevýhody.
3. Navrhněte alternativní měřicí desku s využitím moderního mikrokontroléru a součástek. V softwarové výbavě pro komunikaci přes MODBUS realizujte pouze základní vybrané funkce.
4. Navrženou desku realizujte a prototyp prakticky otestujte.
5. Provedte zhodnocení dosaženého výsledku včetně srovnání se stávající deskou.

Rozsah grafických prací:

Dle potřeby dokumentace

Rozsah pracovní zprávy:

cca 40-50 stran

Forma zpracování práce:

tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

- [1] BARRY, Richard. Using the FreeRTOS Real Time Kernel. 1. vyd. London: Real Time Engineers Ltd., 2010. ISBN 978-1-4461-7030-4.
- [2] www.st.com
- [3] GOTHARD, Adolf. Implementace RTOS do mikrokontrolérů STM32 s jádrem ARM Cortex-M4F. 2014.
- [4] https://www.st.com/content/st_com/en/support/learning/stm32-education/text-books.html, STM32 Arm Programming for Embedded Systems: Volume 6 Paperback ? 14 May 2018

Vedoucí práce:

Ing. Miroslav Holada, Ph.D.
Ústav informačních technologií a elektroniky

Datum zadání práce:

18. října 2018

Předpokládaný termín odevzdání:

30. dubna 2019

L. S.

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Ondřej Novák, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci 18. října 2018

Prohlášení

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

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

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

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

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

28. 4. 2019

Bc. Václav Jíše

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Miroslavu Holadovi, Ph.D. za jeho věcné poznámky k funkčnosti programu a za vedení při návrhu hardwaru desky.

ABSTRAKT

Tato práce řeší kompletní návrh desky pro měření proudu solárních panelů ve fotovoltaických elektrárnách. Nejprve je popsán princip fungování fotovoltaických panelů, na který navazuje popis trendů obnovitelných zdrojů energie v České republice. Dále se diplomová práce věnuje funkčnosti průmyslové sběrnice Modbus, která je využívána pro komunikaci měřicí desky s nadřazeným prvkem v elektrárně, a proto patří mezi jednu z nejdůležitějších částí desky. Jsou popsány základní rámce protokolu a také některé z funkčních kódů, které deska využívá. Jádrem práce tvoří samotný návrh hardwarové a softwarové části měřicí desky. Hardware je uzpůsoben tak, aby mohla být deska použita místo stávající zastaralé desky firmy Satcon, která již není k prodeji. Jsou také uvedeny důvody použití některých komponentů měřicí desky. Dále je popsán vývoj softwarové části desky a s tím související programová vybava. Na závěr je popsána funkčnost samotného programu, porovnání desek a také otestování základních funkcí nové desky.

Klíčová slova:

STM, ARM, Modbus, Fotovoltaika, Monitoring

ABSTRACT

The main focus of this thesis is to design hardware and software for a measuring board for solar panels. This board is used to monitor and measure current of the photovoltaic panels. This thesis firstly studies the function principle of the solar panels. It also describes the usage of those panels in households and solar power plants. Next part is dedicated to the situation of solar and other renewable, energy in the Czech Republic. Then the steps and problems of the hardware design are explained. The Modbus protocol, which the board uses to communicate, and its technical information are described. Next chapter is focused on software design and also the programs used for development for the chosen ARM processor. Lastly the old and new board is compared and the core function tested.

KEYWORDS:

STM, ARM, Modbus, Photovoltaic, Monitoring

Obsah

1	ÚVOD	9
2	FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY.....	10
2.1	PRINCIP FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN	10
2.2	FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY	11
2.3	SOLÁRNÍ REGULÁTORY	13
2.3.1	<i>Solární regulátor s využitím Pulse Width Modulation.....</i>	<i>13</i>
2.3.2	<i>Regulátory využívající Maximum Power Point Tracking</i>	<i>13</i>
2.4	SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNY V ČESKÉ REPUBLICE.....	14
3	ZÁKLADNÍ STRUKTURA PROTOKOLU MODBUS.....	17
3.1	APLIKAČNÍ VRSTVA	17
3.2	DATOVÉ TYPY MODBUS PROTOKOLU	18
3.3	VYBRANÉ FUNKČNÍ KÓDY	18
3.4	VYSÍLACÍ REŽIMY MODBUS PROTOKOLU	19
3.4.1	<i>Modbus RTU.....</i>	<i>19</i>
3.4.2	<i>Modbus ASCII</i>	<i>20</i>
4	VÝBĚR SOUČÁSTEK A NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	21
4.1	ZDROJOVÁ ČÁST MĚŘÍCÍ DESKY	21
4.2	VÝBĚR MIKROPROCESORU DESKY	22
4.3	KOMUNIKACE PO SBĚRNICI	24
4.3.1	<i>Technické parametry standardu RS-485</i>	<i>24</i>
4.4	ZVOLENÍ SNÍMAČŮ PROUDU	26
4.4.1	<i>Snímače s otevřenou smyčkou</i>	<i>27</i>
4.4.2	<i>Snímače s uzavřenou smyčkou.....</i>	<i>27</i>
4.5	POUŽITÝ SOFTWARE PRO NÁVRH DESKY	29
4.6	SCHÉMA DESKY	30
5	ŘÍDÍCÍ PROGRAM MĚŘÍCÍ DESKY	32
5.1	VÝVOJ PROGRAMU PRO PROCESORY STM32	32
5.2	KOMUNIKACE PO SBĚRNICI MODBUS	34
5.3	ZPRACOVÁNÍ PŘÍCHOZÍCH ZPRÁV.....	35
5.4	SBĚR DAT ZE SNÍMAČŮ	37
5.5	NÁVRH FILTRU PRO MĚŘENÉ HODNOTY PROUDU.....	38
5.5.1	<i>Porovnání filtrů</i>	<i>40</i>
6	POROVNÁNÍ STÁVAJÍCÍ A NOVÉ DESKY	43
7	TESTOVÁNÍ DESKY	45
8	ZÁVĚR	48

9 PŘÍLOHA.....	53
A DOPLŇUJÍCÍ OBRÁZKY	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Princip funkce fotovoltaického panelu [1]	11
Obrázek 2 - Příklad fotovoltaického systému [2].....	12
Obrázek 3 - Funkční princip MPPT regulátoru [3]	14
Obrázek 4 - Voltampérová charakteristika PV článku [4]	14
Obrázek 5 - Vývoj zastoupení zdrojů elektrické energie	15
Obrázek 6 - FVE Ralsko (Ra1a) [7].....	16
Obrázek 7 - Porovnání procesorů výrobce STmicroelectronics [10]	23
Obrázek 8 - Dvou vodičové zapojení RS-485 [13]	25
Obrázek 9 - Čtyřvodičové zapojení RS-485 [13].....	26
Obrázek 10 - Ukázka snímačů proudu [14].....	26
Obrázek 11 - Funkční princip sensoru proudu v otevřené smyčce [16].....	27
Obrázek 12 – Závislost měřeného proudu na výstupním napětí [17].....	28
Obrázek 13 – Vybraný snímač proudu [17]	29
Obrázek 14 – Schéma komunikační části desky	30
Obrázek 15 – Ukázka zapojení snímače proudu	31
Obrázek 16 – Blokové schéma rozmístění prvků na desce	31
Obrázek 17 - Grafické rozhraní STM32CubeMX.....	32
Obrázek 18 - Vývojový diagram programu měřicí desky	34
Obrázek 19 - Nastavení časovače pro sběr dat.....	38
Obrázek 20 - Fázová a magnitudová charakteristika FIR filtru	41
Obrázek 21 - Fázová a magnitudová charakteristika IIR filtru	41
Obrázek 22 - Porovnání chování filtrů	42
Obrázek 23 - Stávající deska Satcon	43
Obrázek 24 - Ukázka komunikace po sběrnici Modbus.....	45
Obrázek 25 - Frekvence spínání tranzistorů snímačů proudu	46
Obrázek 26 - Porovnání filtrů na reálných datech.....	46
Obrázek 27 - Schéma desky plošných spojů	53
Obrázek 28 - Schéma hlavní části desky	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Datové typy protokolu Modbus	18
Tabulka 2 - Funkční kódy protokolu Modbus.....	19
Tabulka 3 - Podoba rámce protokolu Modbus RTC	20
Tabulka 4 - Složení bytu pro RTC režim	20
Tabulka 5 - Podoba rámce protokolu Modbus ASCII.....	20
Tabulka 6 - Složený bytu pro ASCII režim.....	20

SEZNAM ZKRATEK

ADC – Analog Digital Converter

DMA – Direct Memory Access – přímý přístup do paměti

MPPT – Maximum Power Point Tracking – typ regulátoru pro solární panely

USART – Synchronní / asynchronní sériové rozhraní

USB – Universal Serial Bus – univerzální sériová sběrnice

1 Úvod

Během posledních let se stále zvedá zájem o obnovitelné zdroje energie. Jedním z těchto zdrojů je také fotovoltaika. Fotovoltaické elektrárny využívají slunečního svitu k výrobě elektrické energie. Práce v teoretické části seznamuje s podílem obnovitelných zdrojů v České republice, problematikou a funkčními principy fotovoltaických systémů a také uvádí příklady některých významných fotovoltaických elektráren na území České republiky. Množství vyrobené energie je však závislé na několika faktorech jako intenzita záření, ale také na stavu a stáří panelu. Aby bylo možné produkovat maximum energie, je potřeba sledovat stav panelů. Jedním ze způsobů je monitorovat proud, který panely produkují. Tato práce se zabývá návrhem hardwarové i softwarové části desky pro měření a monitoring těchto proudů, které panely produkují. Práce se věnuje modernizaci desky, již neexistující firmy Satcon, která slouží k měření až 12 stringů v solární elektrárně. Termínem string se označuje sériové pospojování několika solárních panelů ve fotovoltaických elektrárnách. Mezi hlavní cíle této práce patří, kromě samotného návrhu, zjednodušení, redukce součástek, ale také snaha o snížení výrobní ceny desky. Tyto cíle by měly být dosaženy osazením desky moderními komponenty. Jako jádro desky byl zvolen mikroprocesor založený na architektuře ARM, konkrétně procesor firmy ST – STM32F411RC. Tento procesor by měl umožnit zjednodušení návrhu desky využitím vestavěného AD převodníku a výrazně zrychlit celý běh desky oproti stávajícímu 8-bitovému procesoru. Procesor by měl být využíván pro sběr dat ze snímačů proudu, jejich případnou úpravu a filtraci, komunikaci desky s nadřazeným prvkem po sběrnici Modbus, ale také by měl využívat své interní paměti pro uchování dat. Dalším neméně důležitým cílem je zachování všech stávajících funkcí, případně i desku rozšířit o další doplňující funkce. Návrh desky nemůže být libovolný, ale musí se dodržet rozmístění některých klíčových prvků na desce tak, aby byla zachována zpětná kompatibilita při zapojování na místo stávající zastaralé desky od firmy Satcon. Stejně tak musejí být dodrženy veškeré parametry pro komunikaci po sběrnici Modbus.

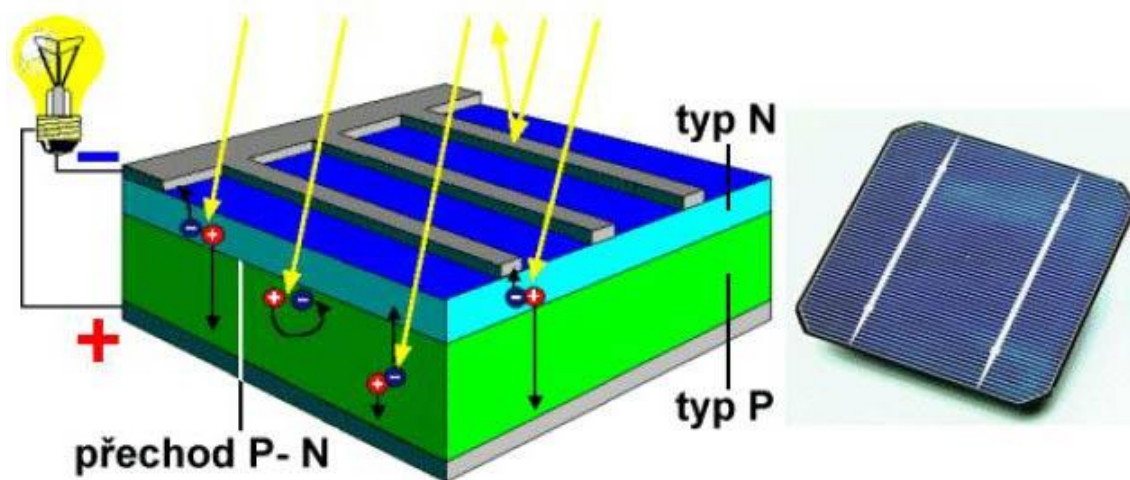
2 Fotovoltaické elektrárny

Obnovitelné zdroje elektrické energie jsou v posledních letech na vzestupu. Jedním způsobem, jak produkovat elektrickou energii, jsou fotovoltaické elektrárny. Tyto elektrárny využívají slunečního svitu k přeměně dopadajících fotonů na energii. Elektrárna je složena z fotovoltaických panelů. Tyto panely jsou pak sdruženy pomocí sériového a paralelního pospojování do tzv. stringů tak, aby výstupní napětí a proud dosahoval požadovaných hodnot.

2.1 Princip fotovoltaických elektráren

Jak z názvu plyne, základní princip tvorby elektrické energie ze slunečního záření je založen na tzv. fotovoltaickém jevu. Pro vznik tohoto jevu je potřeba, aby foton, který na solární panel dopadá, měl dostatečnou energii. Čím kratší je vlnová délka záření, tím větší je energie fotonu. Pro výrobu fotovoltaických panelů se dnes používá zejména křemík z důvodu velkého rozšíření a velké kvality zpracování. Aby se tedy uvolnil elektron z křemíkové mřížky, musí mít foton záření energii větší, než 1,12 eV. Této energii odpovídá vlnová délka 1105 nm. Záření s touto vlnovou délkou spadá do oblasti infračerveného záření. Pro existenci fotovoltaického jevu je tedy potřeba vlnová délka 1105 nm a kratší.

Struktura fotovoltaického panelu je ve svém principu stejná jako polovodičová dioda, konkrétně se jedná o diodu typu PN, na kterou dopadá světelné záření. Plátek křemíku tvoří vrstvu P, která je umístěna na vodivé mřížce a nad touto vrstvou P je umístěna slabá polovodičová vrstva typu N, na které jsou vytvořeny úzké vodivé kontakty. Ve vrstvě N je přebytek elektronů se záporným nábojem a ve vrstvě P je těchto elektronů nedostatek (tzv. díry). Mezi těmito vrstvami tedy vznikne přechod PN, který brání volnému přechodu nadbytečných elektronů do míst, ve kterých je elektronů nedostatek. Další vlastnost PN přechodu je taková, že volné elektrony mohou snadno přecházet z vrstvy P do vrstvy N, ale v opačném směru ne.



OBRÁZEK 1 - PRINCIP FUNKCE FOTOVOLTAICKÉHO PANELU [1]

Pokud dopadne světelné záření na povrch fotočlánku, předá foton svou energii atomům v mřížce křemíku. Tímto předáním energie dojde k uvolnění elektronu. Elektrony uvolněné v N vrstvě ale nemohou volně přecházet přes PN přechod do vrstvy P, a proto se počet elektronů zvyšuje. Elektrony uvolněné ve vrstvě P mohou přecházet do vrstvy N, a proto se počet volných elektronů v této vrstvě ještě navyšuje. Díky tomuto nahromadění elektronů vzniká mezi horní a spodní vrstvou elektrické napětí. Toto napětí je však velmi malé – velikost kolem 0,6 V, proto je nutné zapojit několik fotočlánků do sériového zapojení. Paralelní zapojení naopak navýší výstupní proud fotočlánku. Proto jsou výsledné solární panely kombinací sériového a paralelního zapojení jednotlivých fotočlánků.

Účinnost těchto fotovoltaických článků je závislá na struktuře materiálu a způsobu výroby článků. Nejvyšší účinnosti dosahují články s monokrystalickým křemíkovým materiálem. U průmyslově vyráběných článků je možné dosáhnout účinnosti až 17 %, zatímco články vyrobené z amorfního křemíkového materiálu dosahují účinnosti pouze 7 %.

2.2 Fotovoltaické systémy

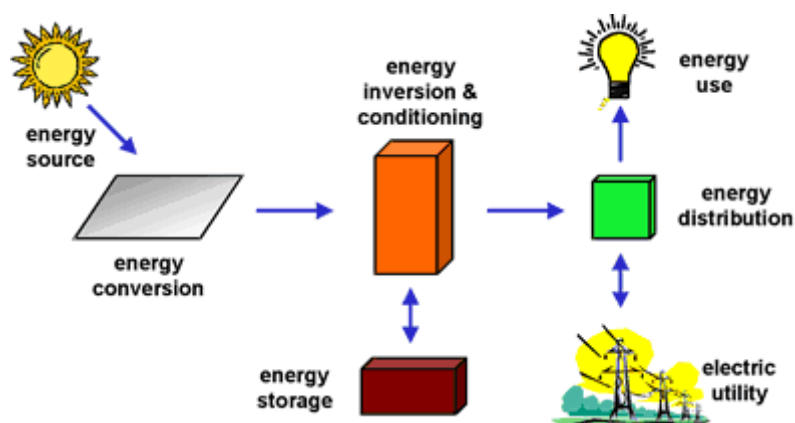
Výkon samotného článku by nebyl dostatečný pro využití v průmyslu, ani v domácnostech. Proto jsou články spojovány kombinací sériového a paralelního zapojení do tzv. modulů neboli panelů. Spojením těchto panelů pak vzniká fotovoltaické

pole. Toto pole se nachází na střechách domů, průmyslových hal, popřípadě se z něj skládají celé elektrárny.

Aby byla zaručena delší životnost a odolnost panelů, umísťují se do hermeticky uzavřených pouzder. Tyto pouzdra mají na vnější straně vysoce průhledné, ale také výdržné tvrzené sklo. Tímto způsobem jsou panely chráněny před povětrnostními vlivy. Udávaná životnost je většinou 20 let s tím, že výkon panelů se časem snižuje.

Existuje několik způsobů, jak solární panely využívat. Mezi nejjednodušší případ patří zapojení panelu přímo na spotřebič. Spotřebič tedy funguje pouze při dostatečném osvětlení panelu. Toto zapojení se nehodí pro náročnější aplikace.

Další možnost je spojit modul s regulátorem, popřípadě také s akumulátorem. Elektrická energie je při dostatečném osvětlení akumulována a regulátor zajišťuje správné nabíjení akumulátoru. Při nedostatečném osvětlení se zdrojem energie stává akumulátor, jehož výstup je regulován na požadované napětí.



OBRÁZEK 2 - PŘÍKLAD FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU [2]

Poslední možností je využívána ve fotovoltaických elektrárnách. Zde jsou panely připojeny na vstup střídače, který se stará o převod stejnosměrného napětí na střídavé napětí. Tyto zařízení musí být odolná vůči zkratu, přetížení a také splňovat požadavky bezpečnosti. Takto konstruované systémy tedy dodávají energii do sítě pouze při dostatečném osvětlení a zároveň mohou při nadbytku energie v síti ukládat energii do akumulátorů.

2.3 Solární regulátory

Solární regulátor je využit prakticky v každém solárním systému. Jeho funkcí je využít maximum energie ze solárních panelů a tím tedy zvýšit zisk elektrické energie. Dále se také stará o správnou funkčnost baterie, která uchovává nadbytečnou energii. Regulátor je zapojen mezi akumulátorem a solárním panelem, kde se stará o správné nabíjení akumulátoru tak, aby nedošlo k nadměrnému nabití, ale také k hlubokému vybití článků baterie. Dále je regulátor vybaven bezpečnostními funkcemi jako ochranou proti přepětí, zkratu a také přepólování. V dnešní době jsou na trhu dva typy solárních regulátorů PWM a MPPT. Dříve byly tyto regulátory řešeny pomocí relé, které vypnuly, nebo zapnuly, přívod energie do akumulátoru podle jeho stavu nabití. Moderní regulátory využívají složitější přístupy a tím zaručí delší životnost akumulátorů a také menší ztráty energie.

2.3.1 Solární regulátor s využitím Pulse Width Modulation

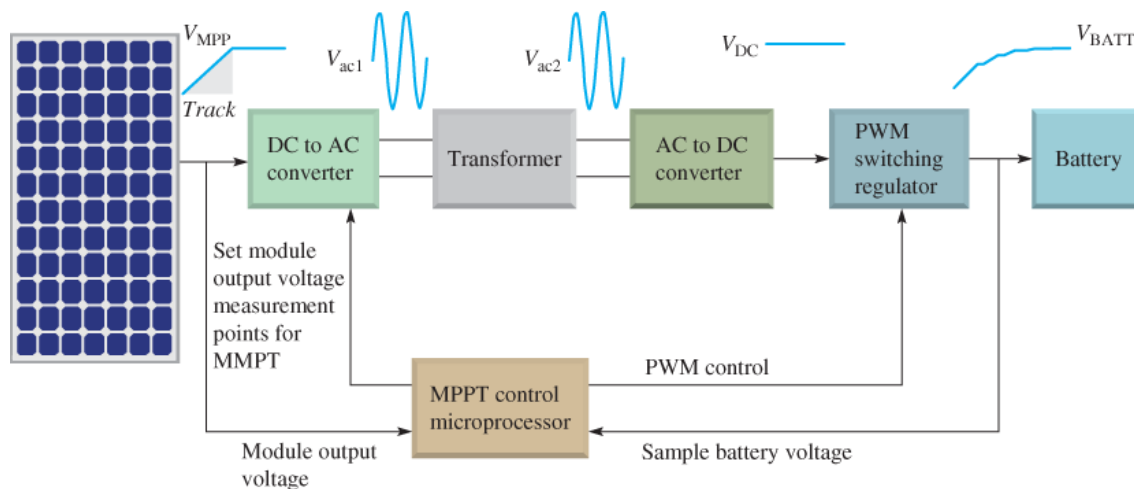
PWM regulátory fungují na principu snižování energie, kterou do akumulátoru dodáváme, v závislosti na míře nabití. Tento regulátor tedy při postupném nabíjení snižuje nabíjecí napětí. Akumulátor se tak méně zahřívá, a proto je méně namáhán. Použitím PWM regulátoru lze prodloužit životnost baterie, ale také zaručit plné nabití. Regulátor dokáže udržet baterii v plně nabitém stavu po dlouhou dobu. Tyto regulátory jsou často levnější, ale při jejich použití vznikají větší ztráty výkonu.

2.3.2 Regulátory využívající Maximum Power Point Tracking

MPPT neboli Maximum Power Point Tracking je algoritmus, který slouží k získání maxima energie z fotočlánků. Napětí, při kterém fotočlánek produkuje maximum energie, se nazývá „maximum power point“. Tento bod je závislý na teplotě, osvětlení a také typu panelu. Lze ho nalézt velmi snadno na voltampérové charakteristice panelu (Obrázek 4).

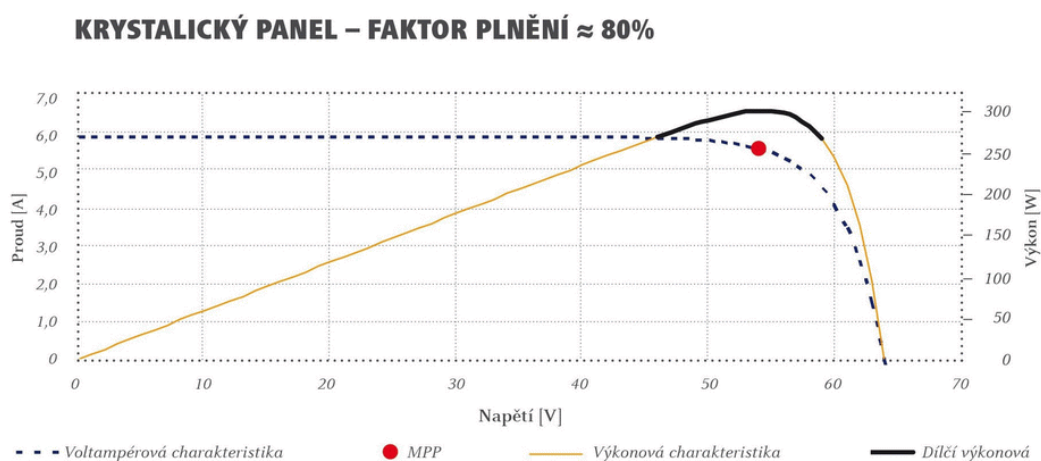
Regulátor využívající tento algoritmus ve své podstatě pracuje jako DC-DC měnič, který dokáže přizpůsobit odebírané napětí z panelu v závislosti na informaci o potřebném proudu pro zátěž. Jako příklad může být systém složený z akumulátoru a solárního panelu. 12V akumulátor ve vybitém stavu má napětí právě okolo 12 V. K dispozici bude panel s nominálním napětím 18 V a proudem 12 A (~ 210 W). Při vybitém stavu akumulátoru by tedy panel produkoval 12 A při 12 V. To je však výrazně méně než jeho výkon. Regulátor tedy upraví napětí tak, aby bylo dosaženo ideálního

napětí pro nabíjení akumulátoru a tím i maximálního výkonu, který je do baterie možno dodat.



OBRÁZEK 3 - FUNKČNÍ PRINCIP MPPT REGULÁTORU [3]

MPPT algoritmus je tedy neefektivnější při nízkých teplotách, nízkém napětí akumulátoru, nebo při oblačném počasí. Při použití regulátoru využívajícího MPPT můžeme dosáhnout až o 40 % vyšší výkon při použití stejných panelů. Největší rozdíl v efektivitě je právě při nízkém osvětlení, nebo při nízkém napětí akumulátoru.

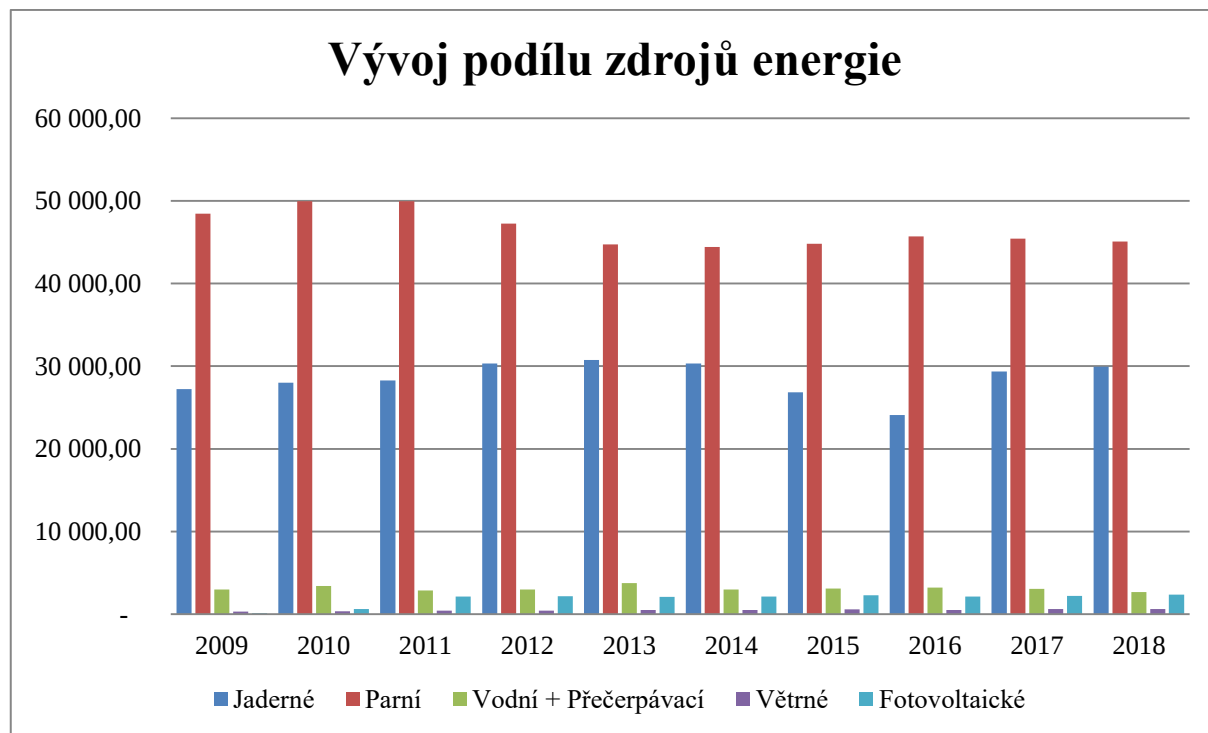


OBRÁZEK 4 - VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA PV ČLÁNKU [4]

2.4 Solární elektrárny v České republice

I přes velký vývoj v oblasti obnovitelných zdrojů elektrické energie v posledních letech, je velká část výroby založena na spalování fosilních paliv. Jak vyplývá z dat Energetického regulačního úřadu, tak v posledních letech se procentuální podíl energie

vyrobené za pomoci obnovitelných zdrojů, zejména pak fotovoltaiky a vodní energie, zvyšuje [5].



OBRÁZEK 5 - VÝVOJ ZASTOUPENÍ ZDROJŮ ELEKTRICKÉ ENERGIE

V roce 2009 nebyla v České republice vyprodukována skoro žádná energie pomocí solárních panelů. V následujících dvou letech se výroba energie prudce zvýšila zejména kvůli výstavbě solárních elektráren skupinou ČEZ. Největší komplex solárních elektráren nese označení FVE Ralsko. Jedná se o elektrárnu, která je složena z 6 různých dílčích elektráren, od sebe vzdálených jednotky kilometrů. Elektrárny byly vystaveny v oblasti bývalého vojenského prostoru, který tedy nemohl být využit pro jiné než průmyslové prostory vlivem kontaminace půdy. V dané lokalitě se také jedná o velmi dobré místo z hlediska ročního úhrnu záření. Celkově se tedy jedná o nejvýkonnější fotovoltaickou elektrárnu na území České republiky. Výkony jednotlivých lokalit jsou následující:

Ra1a - 14,269 MW, Ra2 - 12,869 MW, Ra1b - 6,614 MW, Ra1c - 4,517 MW a Ra3 - 17,494 MW [6]. Energie z jednotlivých lokalit je pak svedena do jedné transformovny umístěné v oblasti Novin pod Ralskem.



OBRÁZEK 6 - FVE RALSKO (RA1A) [7]

Celkový výkon činí 55,763 MW a proto je elektrárna schopna pokrýt zhruba roční spotřebu energie pro 15 000 domácností.

3 Základní struktura protokolu Modbus

Modbus je komunikační protokol, který se využívá zejména v průmyslovém prostředí pro vzájemnou komunikaci a přenos dat mezi zařízeními. Protokol získal svoji popularitu zejména díky jeho flexibilitě a jednoduchosti. Tento protokol umožňuje přenášet data po různých sběrnících jako je RS232, RS485, TCP/IP síť popřípadě i rádiové sítě. Komunikace je založena na principu komunikace mezi klientem a serverem. Na této sběrnici je vždy pouze jeden server (s výjimkou verze TCP/IP, kde jich může být i více) a ostatní zařízení jsou klienti. Server vyšle dotaz o data a příslušný klient mu odpoví. Dotaz je směrován pomocí unikátních ID, které má každý z klientů přiřazeno. V ISO/OSI modelu je Modbus definován na aplikační, spojové a fyzické vrstvě.

3.1 Aplikační vrstva

Protokol Modbus má definovanou jednotku datového protokolu nazývanou PDU. Ta se skládá z funkčního kódu a dat, které se posílají. Funkční kód určuje jakou akci má slave prvek vykonat. Data potom závisí na požadované funkci. Tato PDU tvoří rámec komunikace protokolu Modbus.

PDU je při komunikaci rozšířena o další doplňující informace jako adresa a kontrolní součet. Tato rozšířená verze rámce tvoří zprávu na aplikační úrovni a nazývá se ADU – aplikační datová jednotka.

Funkce tedy udává, jaká operace se provede. Rozsah hodnot je 1-255, kde hodnoty 128-255 jsou rezervovány pro chybové hlášení. Obsah dat pak slouží pro vykonání dané funkce. Data mohou například obsahovat délku čtených, nebo zapisovaných dat. Pokud nejsou data k provedení funkce potřebná, pak může být pole dat prázdné. Při standardní bezchybné komunikaci Master vyšle požadavek o vykonání určité funkce a Slave odpoví zprávou, ve které je funkční kód identický. Pokud dojde na straně Slavu k chybě, odpoví zprávou, která bude mít funkční kód rovný součtu původního kódu a hodnoty 80h. V datové části pak bude chybový kód.

Maximální velikost PDU na sériové lince je dána jako 256 bytů - adresa serveru - CRC = 253 bytů. Maximální velikost ADU při použití sériové linky je 256 bytů.

3.2 Datové typy Modbus protokolu

Modbus protokol pracuje pouze s několika typy dat. Ty jsou dány pomocí pevně daných tabulek.

TABULKA 1 - DATOVÉ TYPY PROTOKOLU MODBUS

Název	Velikost	Přístup	Informace	Adresový prostor
Diskrétní vstupy	1 bit	Čtení	Data z I/O	10000 – 19999
Cívky	1 bit	Čtení/zápis	Data modifikována aplikací	0 – 9999
Vstupní registry	16 bitů	Čtení	Data z I/O	30000 – 39999
Uchovávací registry	16 bitů	Čtení/zápis	Data modifikována aplikací	40000 – 49999

Rozdělení adresového prostoru může být libovolné. Hodnoty uvedené v tabulce jsou používány z důvodu zpětné kompatibility zařízení. Různé funkční kódy pak využívají různé datové typy.

3.3 Vybrané funkční kódy

Funkční kódy lze rozdělit do skupiny, které přistupuje k binárním datovým typům a na skupinu, která přistupuje k 16-bitovým datovým typům.

01 – Čtení cívky - Funkce slouží pro čtení jednobitových cívek. Je možné číst několik cívek najednou. Požadavek se tedy skládá z adresy první cívky a dále počtu cívek, které mají být přečteny. Odpověď pak bude obsahovat 8 stavů cívek v jednom bytu.

02 – Čtení diskretních vstupů - Stejně jako u funkce 01 slouží tato funkce pro čtení jednobitových vstupů. Požadavek a odpověď mají stejný tvar jako pro funkci 01

04 - Čtení vstupních registrů - Touto funkcí je možné přečíst až 125 vstupních registrů. Zpráva se skládá z adresy prvního registru a počtu registrů ke čtení. Odpověď obsahuje počet a jejich hodnoty.

16 – Zápis více registrů - Touto funkcí je možné zapsat až 120 registrů v jednom požadavku. Opět je dána adresa prvního registru, počet a hodnoty. Odpověď pak obsahuje počáteční adresu a počet zapsaných registrů.

V praxi existuje mnoho dalších funkčních kódů, které se v této práci nevyskytují. Seznam základních funkčních kódů je uveden v následující tabulce [8]

TABULKA 2 - FUNKČNÍ KÓDY PROTOKOLU MODBUS

Kód (hex)	Popis
01	Čtení jedné nebo více cívek
02	Čtení jednoho nebo více vstupů
03	Čtení jednoho nebo více uchovacích 16bitových registrů
04	Čtení jednoho nebo více vstupních 16bitových registrů
05	Zápis jedné cívky
06	Zápis jednoho registru
15	Zápis více cívek
16	Zápis více registrů

3.4 Vysílací režimy MODBUS protokolu

Modbus na sériové lince je možné provozovat ve dvou různých režimech. Tyto režimy určují, jaký formát bude mít rámec pro vysílaná data a jak je bude přijímač dekódovat. Standardní režim je RTU, který musí podporovat každé zařízení, které chce komunikovat po protokolu Modbus. Režim ASCII je potom nepovinný. Všechny zařízení na sběrnici musí pracovat ve stejném režimu.

3.4.1 Modbus RTU

Jedná se o binární režim, ve kterém každý byte obsahuje dva 4 bitové hexadecimální znaky. Mezi daty nesmí být mezera větší než 1,5 znaku a začátek,

popřípadě konec, přenosu je určen pomocí mezery ve vysílání po dobu 3,5 znaku. Rámec přenosu má tedy následující podobu

TABULKA 3 - PODOBA RÁMCE PROTOKOLU MODBUS RTC

Začátek	Adresa slave	Funkční kód	Data	CRC	Konec
>=3,5 znaku klid	1 byte	1 byte	0 – 252 bytů	2 byty	>=3,5 znaku klid

Maximální velikost zprávy tohoto režimu je tedy 256 bytů. CRC kontrolní součet slouží pro ověření správného příjmu dat. Tento součet je generován pomocí polynomu $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$.

TABULKA 4 - SLOŽENÍ BYTU PRO RTC REŽIM

1 start bit	8 datových bitů	1 bit parita	1 stop bit
-------------	-----------------	--------------	------------

Byte má tedy 11 bitů. Každé zařízení musí podporovat sudou paritu. Pokud není parita použita, paritní bit je nahrazen dalším stop bitem.

3.4.2 Modbus ASCII

Každý 8-bitový byte je poslán jako dvojice znaků zakódovaných v ASCII. Je tedy pomalejší než RTU režim. Výhodou je možnost vysílat znaky s mezerami až 1s. Začátek a konec zprávy je určen pomocí speciálních znaků. Začátek zprávy pomocí „:“ a konec pomocí znaků CR, LF.

TABULKA 5 - PODOBA RÁMCE PROTOKOLU MODBUS ASCII

Začátek	Adresa	Funkce	Data	LRC	Konec
:	2 znaky	2 znaky	0 – 2*252 znaků	2 znaky	2 znaky CR, LF

Kontrola zprávy je tedy pomocí LRC, které je 8 bitové.

TABULKA 6 - SLOŽENÍ BYTU PRO ASCII REŽIM

1 start bit	7 datových bitů	1 bit parita	1 stop bit
-------------	-----------------	--------------	------------

Byte je 10 bitový, kde každé zařízení opět musí podporovat sudou paritu a pokud není parita použita, je bit nahrazen dalším stop bitem.

4 Výběr součástek a návrh desky plošných spojů

Návrh měřicí desky byl inspirován několika stávajícími deskami na pracovišti vedoucího práce. Byla snaha o modernizaci a zjednodušení těchto desek. Zároveň byl však požadavek, aby bylo možné desku použít jako náhradu dnes již částečně zastaralé desky od firmy Satcon. V dnešní době firma již neexistuje, a proto vznikl nápad desku modernizovat, ale zachovat možnost zapojení na stávající místo. Měřicí deska je nasazena v reálném provozu právě ve fotovoltaické elektrárně FVE Ralsko. Deska je navržena tak, aby jí bylo možné napájet přímo z fotovoltaických panelů, které jsou měřené. Základním prvkem této měřicí desky je procesor architektury ARM. Tento procesor se stará jak o komunikaci, tak o sběr dat z fotovoltaických panelů. Deska umožní měření až 12 stringů s rozlišením převodníku 12 bitů. Jelikož z principu fungování vybraných snímačů elektrického proudu, které jsou založeny na Hallově efektu, dochází k offsetu měřených hodnot proudu s časem, ale také vlivem magnetických polí v okolí snímačů, proto je deska vybavena funkcí tyto offsety kalibrovat a to online přes sběrnici, na které je deska připojená. Získávání dat o aktuálním množství vyrobeného napětí a proudu je důležité zejména pro monitoring množství energie, kterou elektrárna vyrábí, ale také z hlediska údržby. Pokud by nějaký panel ve stringu vykazoval defekt, pak se celý výkon stringu a tím i elektrárny sníží. Proto je snaha dnes již monitorovat nejen stav stringů, ale i samotných jednotlivých panelů. Toto by umožnilo lépe využít například MTTP regulátorů a tím zvýšit účinnost solárních elektráren. [9].

4.1 Zdrojová část měřicí desky

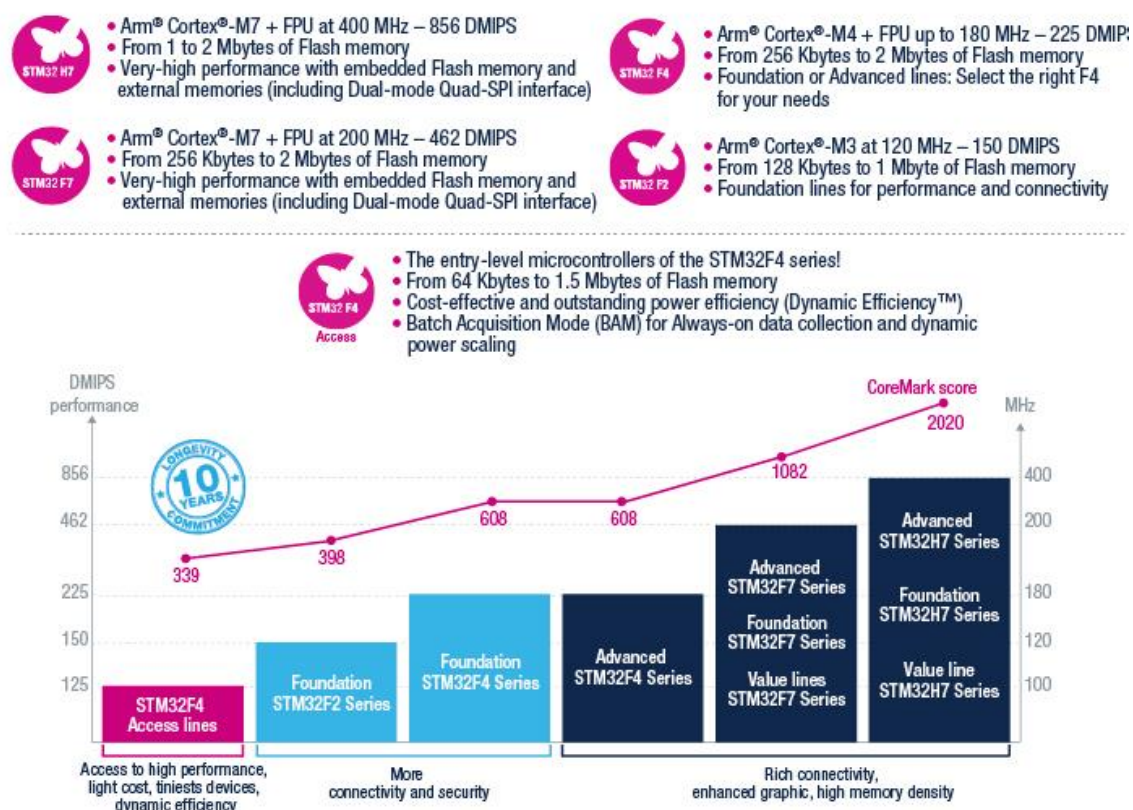
Napájení měřicí desky je realizováno přímo z měřených solárních panelů. Napětí solárních panelů při přímém slunečním svitu může v elektrárnách dosahovat až ke stovkám voltů. Typicky se napětí při běžném provozu pohybuje mezi 400-800 V. Komponenty na desce však vyžadují napětí 5 V, nebo 3.3 V. Proto deska obsahuje měnič napětí, který transformuje proměnlivé napětí ze solárních panelů na konstantní napětí 5 V. Stávající řešení je pomocí dvou výkonových tranzistorů, které napětí sníží na hodnotu přibližně 230-240 V. Toto napětí je pak pomocí dalšího měniče převedeno

na 5 V, které jsou dále lineárním regulátorem sníženy na 3.3 V pro napájení procesoru. Přívod napětí je chráněn pojistkou, aby nedošlo k přepětí.

V rámci modernizace byl celý tento zdroj nahrazen jednou součástkou. Vybrán byl DC-DC měnič určený přímo pro fotovoltaické aplikace. Jedná se o měnič od firmy AIMTEC s označením AM5W-60005S-NZ. Jedná se tedy o měnič, který je schopen z napětí 100 – 1000 V na vstupu vytvořit napětí 5 V na výstupu. Výkon tohoto měniče je 5 W. Tato hodnota je pro desku dostačující.

4.2 Výběr mikroprocesoru desky

Za jádro této desky byl zvolen procesor od firmy STMicroelectronics. Konkrétně se jedná o model s označením STMF411RCT. Jedná se o procesor střední třídy s jádrem Cortex®-M4, jehož maximální taktovací frekvence je 100 MHz. Procesor disponuje několika dostupnými rozhraními. Mezi ně patří například UART, I2C, SPI. Dále procesor nabízí AD převodník o přesnosti 12 bitů pro 16 kanálů. Dále nabídne několik časovačů, USB rozhraní a mnoho dalšího. Pro tuto práci byl zvolen procesor v balení LQFP64. Jedná se tedy o procesor s 64 piny, z kterých je 50 pinů uživatelsky programovatelných. Pro tuto desku byla snaha pro co nejvíce funkcí využít procesor a tím snížit počet potřebných součástek a desku zjednodušit. Procesor se stará o komunikaci s nadřazeným prvkem na sběrnici a o sběr dat ze snímačů proud. Aby bylo v budoucnu možné desku rozšířit o další snímače, popřípadě display či externí paměť, je na desce vyvedena sběrnice I2C a SPI.



OBRÁZEK 7 - POROVNÁNÍ PROCESORŮ VÝROBCE STMICROELECTRONICS [10]

Zvolení procesoru založeného na jádře typu ARM přináší několik výhod oproti velmi oblíbeným 8-bitovým mikroprocesorům například z řady megaAVR od firmy Atmel. Hlavní rozdíl je 32-bitové RISC jádro, které je tedy schopno dosahovat mnohem většího výkonu a přesnosti výpočtu, ale i přes větší výpočetní výkon jsou procesory velmi úsporné. Další výhodou je také více integrovaných obvodů, jako jsou časovače, AD převodníky a komunikační protokoly. Zpravidla je pro uživatele k dispozici více paměti jak pro program, tak pro data. Toto vše spojené s faktem, že jsou v dnešní době tyto procesory velmi populární a jsou dostupné od většiny předních výrobců elektroniky, dělá z procesorů postavených na jádře ARM velmi dobrou volbu pro zabudované (tzv. embedded) aplikace. Také díky velkému rozšíření a popularitě ARM procesorů v oblasti mobilních zařízení došlo k optimalizaci výroby a tím pádem i ceny procesorů. V dnešní době je cena 32-bitových a 8-bitových procesorů prakticky srovnatelná, a proto pro náročnější použití je žádoucí o volbě těchto mikroprocesorů uvažovat.

Vzhledem k velké oblibě těchto procesorů uvolňuje firma a její partneři vývojové prostředky, které umožní zjednodušeně implementovat funkce do procesoru. Může se

jednat o komunikační protokoly jako USB, TCP/IP, Profinet, CANopen a další. Dále jsou k dispozici vývojové prostředky, které umožní vývoj v různých jazycích, ale také i operační systémy.

Mezi nejpopulárnější patří systémy pracující v reálném čase. Klíčovou vlastností těchto systémů je zaručení vykonání operací v určitém časovém okně. Vykonání každé úlohy trvá vždy předem známou dobu. Tyto vlastnosti umožní využít procesor především k řízení časově kritických aplikací. Jedním z dostupných operačních systémů je velmi populární FreeRTOS, který patří mezi nejrozšířenější systémy pracující v reálném čase. Nabízí tak podporu velkého množství procesorů, ale také stabilitu a neustálý vývoj. Implementace a použití rozvrhování pomocí FreeRTOS je relativně jednoduché. Existuje mnoho návodů [11] na implementaci FreeRTOS do všech procesorů, dokonce i přímo od výrobce STMicroelectronics [12].

V této práci nebyl použit nakonec žádný operační systém, protože se program vykonává sekvenčně a není zapotřebí řešit více problémů najednou. Úlohy, které procesor vykonává, nejsou časově kritické, a proto není potřeba rozvrhování. Veškeré úlohy, které by mohly být časově náročnější a využít většího množství procesorového času, byly navrženy tak, aby se vykonávaly v režimu DMA a tedy za pouze minimální potřeby procesoru.

4.3 Komunikace po sběrnici

Komunikace probíhá po sériové lince, konkrétně RS-485. Tento standard sériové komunikace je využíván v průmyslu pro jeho univerzálnost, jednoduchost a relativně velké vzdálenosti, na které je komunikace mezi zařízeními možná. Jelikož procesor přímo tento protokol nepodporuje, bylo nutné použít převaděč ze sériové linky UART na právě používanou RS-485. Pro tuto úlohu byl zvolen čip ADM2587E. Jedná se o transceiver, který má galvanicky oddělené signály i napájení. Dále je také odolný vůči elektrostatickému výboji až do 15 kV. Maximální přenosová rychlost je 500 kbps.

4.3.1 Technické parametry standardu RS-485

Sběrnice vychází ze staršího typu RS-232. Standard RS-485 přináší značné výhody jak v rychlosti, počtu zařízení, ale i v maximální délce, na kterou je možné komunikovat mezi zařízeními. Starší protokol RS-232 je možné provozovat pouze mezi dvěma zařízeními a to na vzdálenost maximálně v desítkách metrů. Oproti tomu protokol RS-485 pracuje jako sběrnice. Je tedy možné připojit maximálně 32 zařízení na

stejnou sběrnici. Propojení zařízení je většinou pomocí kroucené dvoulinky, ale je možné využít i čtyřvodičového zapojení. Obě tato zapojení jsou navzájem kompatibilní a je možné je používat na jedné sběrnici.

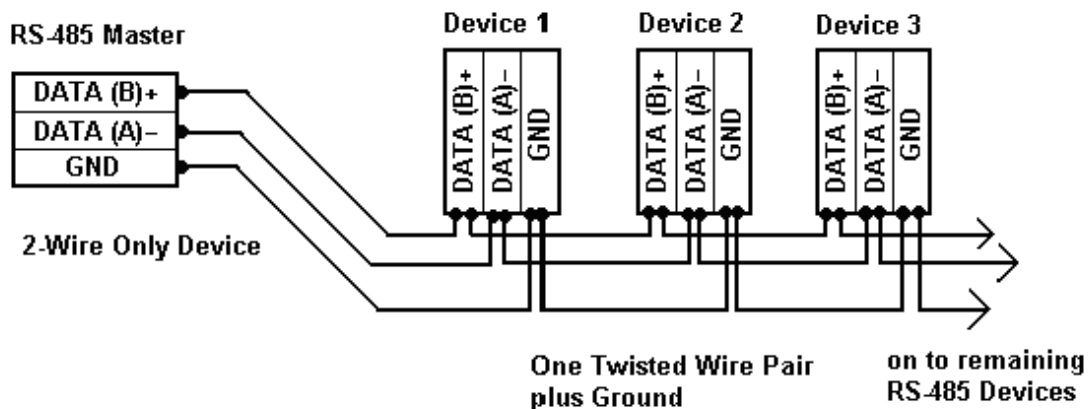
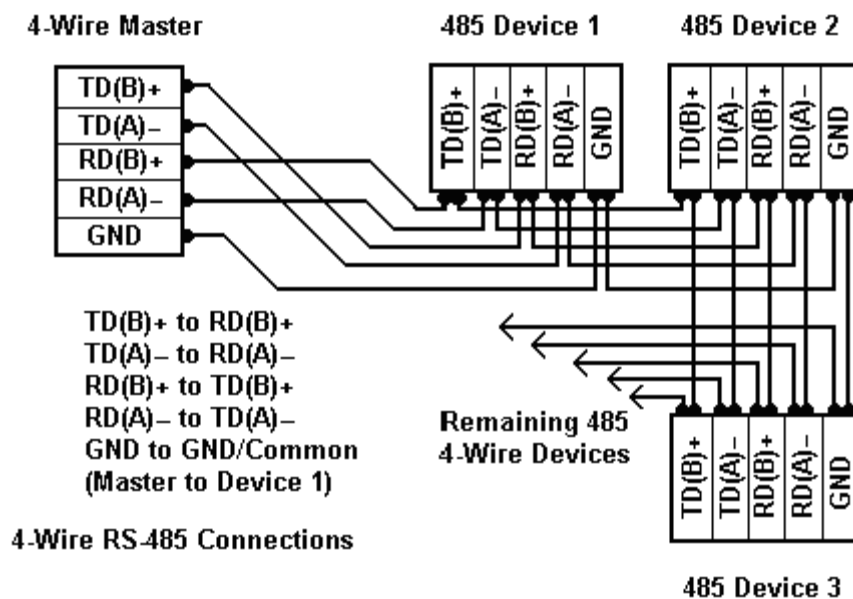


Fig. 1
2-Wire RS-485 Connections

OBRÁZEK 8 - DVOUVODIČOVÉ ZAPOJENÍ RS-485 [13]

Vodiče se často označují jako A, B (Y, Z pro čtyřvodičové zapojení). U tohoto značení často dochází k nejasnostem, a proto je výrobci často použito značení také + a -. Maximální délka sběrnice je 1200 m. Je nutné dodržet určité pravidlo pro zvolení rychlosti přenosu. Z praxe byla rychlost doporučena tak, že rychlost přenosu dat v bitech za sekundu vynásobená délkou vedení v metrech by neměla přesáhnout hodnotu 10^8 . Logické úrovně přijímače jsou definovány jako rozdíl napětí mezi vodiči. Pokud je rozdíl napětí mezi vodiči A a B menší než -200 mV, pak přijímač vyhodnotí tento stav jako logickou 1. Pro logickou 0 platí, že $A-B > +200$ mV. Vysílač by měl generovat na vodičích A a B signál o velikosti -2V a +2V pro logickou 1. Pro logickou 0 pak signál odpovídá opačným hodnotám +2 V pro signál A a -2 V pro signál B. V praxi se při použití sběrnice RS-485 často mezi jednotlivými uzly vede další vodič, který slouží pro propojení nulového potenciálu jednotlivých uzlů. Na větší vzdálenosti mohou být nulové potenciály odlišné.



OBRÁZEK 9 - ČTYŘVODIČOVÉ ZAPOJENÍ RS-485 [13]

4.4 Zvolení snímačů proudu

Pro měření proudu byl zvolen snímač na principu Hallova efektu. Pomocí těchto snímačů lze měřit střídavý i stejnosměrný proud do frekvence v řádu desítek kHz. Výhodou těchto snímačů je skutečnost, že prakticky neovlivní měřený obvod. Pro snímání proudu se využívá Biot-Savartova zákona, který vyjadřuje tvorbu magnetického pole okolo vodiče, kterým protéká proud. Snímače se dají rozdělit do dvou základních skupin podle vnitřního uspořádání. Jedná se o zapojení v otevřené, nebo uzavřené smyčce.



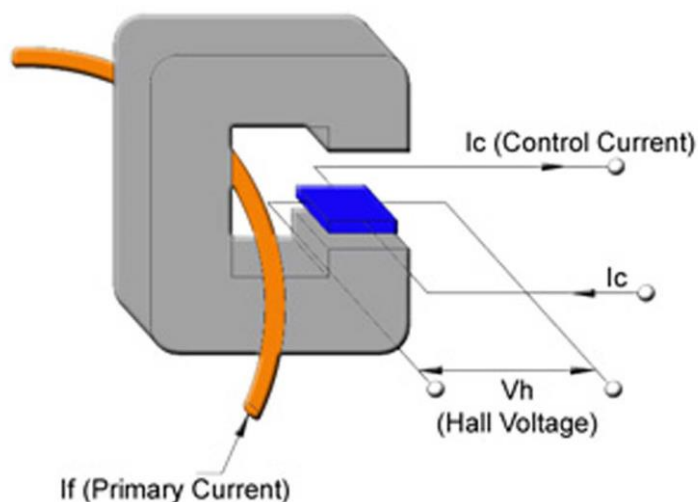
OBRÁZEK 10 - UKÁZKA SNÍMAČŮ PROUDU [14]

4.4.1 Snímače s otevřenou smyčkou

Tyto snímače se využívají, pokud není potřeba velká přesnost a dynamika měření. Magnetický tok, vytvořený proudem na primárním vinutí, je koncentrován v magnetickém obvodu snímače. Velikost tohoto magnetického toku je pak snímána pomocí Hallovy sondy, která je umístěna ve vzduchové mezeře. Na sondě tak vzniká Hallovo napětí. Toto napětí je nutné ještě zesílit, aby ho bylo možné měřit mikroprocesorem. Napětí je přímo úměrné proudu procházejícímu primárním vinutím cívky snímače. Snímače jsou používány zejména pro nízkou spotřebu, malou velikost a také velký rozsah možných proudů.

4.4.2 Snímače s uzavřenou smyčkou

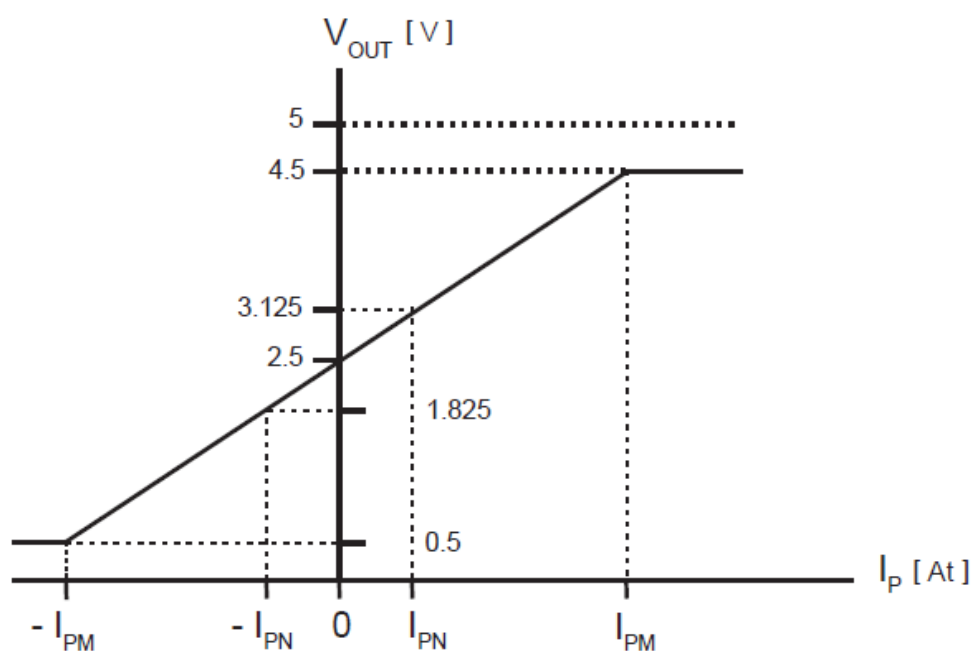
Tyto snímače jsou doplněny o kompenzační vinutí. Hallova sonda je připojena na vstup proudového zesilovače, který napájí vinutí kompenzační cívky. Proud procházející touto cívkou vytváří magnetické pole, které má opačný směr než měřený proud. Magnetický tok Hallovou sondou se tak udržuje stále na nule. Z toho plyne, že proud potřebný pro udržení nulového magnetického toku je úměrný měřenému proudu násobenému počtem závitů na cívce. Na napětí je pak tento proud převeden pomocí rezistoru. Tyto snímače se využívají pro svoji velkou přesnost a linearitu. Mají také rychlou dobu odezvy a jsou odolné vůči změně teploty. [15]



OBRÁZEK 11 - FUNKČNÍ PRINCIP SENSORU PROUDU V OTEVŘENÉ SMYČCE [16]

Vybraný snímač je napájen pomocí 5V a pracuje jako snímač v uzavřené smyčce. Proto také nabízí velkou přesnost a to 0.2% pro nominální proud 6A. Rozsah, ve kterém je schopný senzor fungovat je -19.2A až +19.2A. Pro tyto proudy má senzor na výstupu

napětí od 0,5 V do 4,5 V. Toto způsobí problém, protože rozsah AD převodníku procesoru je od 0 V – 3,3 V. Standardně by tedy bez úpravy nebylo možné měřit celý rozsah proudu. Pro tuto aplikaci se využilo toho, že při nulovém proudu protékajícím snímačem, je na výstupu napětí 2,5 V. Z důvodů popsaných výše tedy není vhodné využít kladné pásmo měřeného proudu, ale pásmo pro proud protékajícím opačným směrem. Toto pásmo pak odpovídá hodnotám 0,5 V – 2,5 V. V tomto pásmu je tedy možné měřit proud od 0 A – 19,2 A. Hodnotu napětí lze bez problémů převést pomocí interního AD převodníku procesoru. Proudů nacházející se v kladném pásmu je možné měřit jen do určitých hodnot. Nominální proud 6 A odpovídá hodnotě 3,125 V, takže je možné měřit proudy i větší než nominální. Maximální měřitelný proud v kladném pásmu je okolo 8 A. To znamená, že deska je schopna změřit proud od -8 A do +19,2 A, pokud je snímač správně orientován.



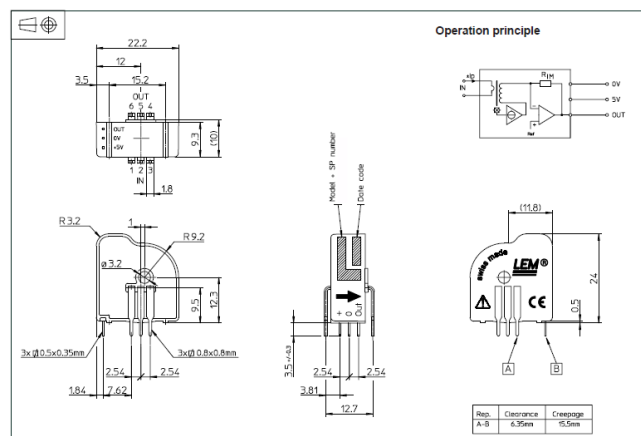
OBRÁZEK 12 – ZÁVISLOST MĚŘENÉHO PROUDU NA VÝSTUPNÍM NAPĚTÍ [17]

Při snímání hodnot proudu pomocí 12-bitového převodníku procesoru se dostáváme do problému, kdy hodnoty proudu nejsou ustálené, ale výrazně kmitají. Při 12-bitovém rozlišení převodníku a maximální teoretické hodnotě 3,3 V, kterou je schopen procesor převést, je hodnota AD převodníku pro nulový proud 3103. V reálném měření tato hodnota není stabilní, ale pohybuje se v rozsahu až ± 10 . To už znamená relativně velký rozdíl v měřeném proudu až v řádu mA. Z tohoto důvodu bylo uvažováno použití filtrů pro získané hodnoty. Návrhu a testování se věnuje kapitola 5.5

4.5 Použitý software pro návrh desky

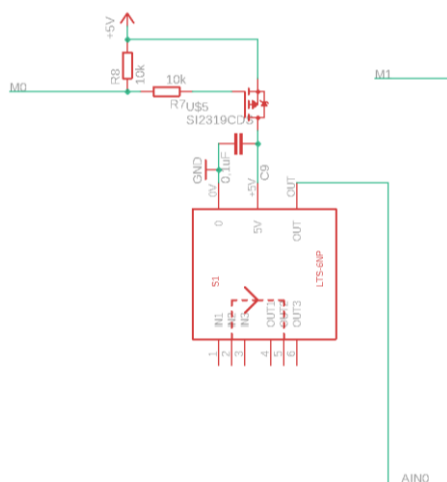
Pro návrh desky byl použit program Eagle od společnosti Autodesk. Jedná se o program, který umožní vytvářet schéma desek plošných spojů, které je později možné převést na reálné desky. Eagle také obsahuje pokročilé funkce návrhu desek jako je automatické vytváření cest pro signály a kontrolu návrhu desky. Při kontrole uživatel zadá veškeré tolerance, minimální šířky cest a děr desky. Program pak upozorní na všechny chyby v návrhu.

Pro snadnější vytváření schémat je pro program Eagle dostupných mnoho knihoven jak od výrobců součástek, velkých prodejců, ale také základní často využívané součástky přímo od společnosti Autodesk. Pokud však vybraná součástka v projektu není dostupná, může uživatel vytvořit vlastní knihovnu součástek. Vytváření součástek je intuitivní a jednoduché. Každá součástka se skládá ze tří základních částí. Nejprve je nutné vytvořit pouzdro součástky. Pouzdro určí, jaké rozměry a rozmístění jednotlivých pinů má reálná součástka. Tyto informace jsou k dispozici v technické dokumentaci k dané součástce. Po vytvoření pouzdra se musí navrhnout schématická značka, která se bude zobrazovat při tvorbě schématu. Většinou má velmi zjednodušenou podobu (obdélník), kde jsou vyvedeny všechny potřebné piny. Po vytvoření obou částí je schématická značka a pouzdro spojeno do tzv. device. Device propojí piny značky s reálným pouzdrem součástky. Dále je v nových verzích možné vytvářet 3D pouzdra součástek. Je tedy možné finální desku zobrazit ve 3D a zkontrolovat například finální rozměry desky, nebo ověřit rozmístění jednotlivých komponentů. Pro potřeby této práce byla vytvořena knihovna, která obsahuje veškeré prvky použité pro tuto desku.



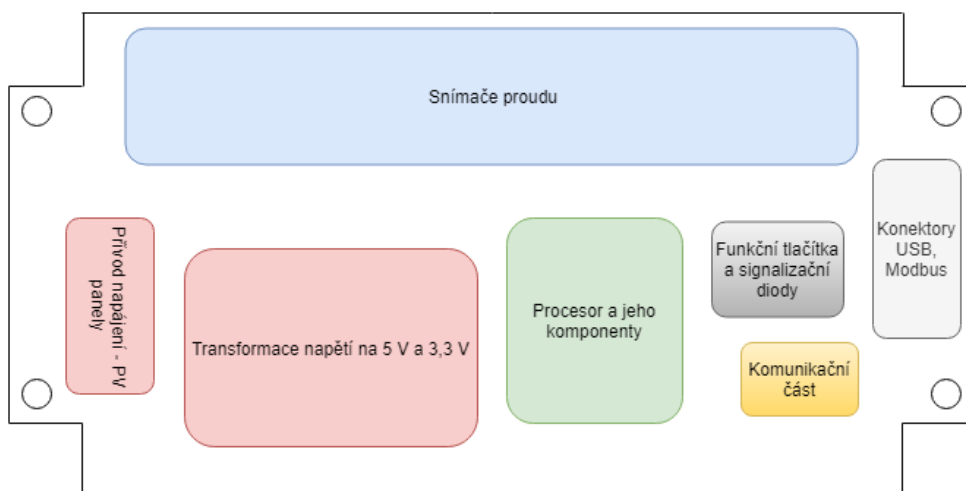
OBRAZEK 13 – VYBRANÝ SNÍMAČ PROUDU [17]

jevů, ale také spínáním výkonových prvků nebo elektrostatickými výboji. Deska také umožní připnout či odepnout terminátor linky RS485. Terminátor se využívá při komunikaci na delší vzdálenosti. Je realizován pomocí odporu – typicky $110\ \Omega$ a jeho úkolem je eliminovat odraz signálu na koncích vedení. Dále také pomáhá zlepšit odolnost proti rušení ostatními signály. Ideální impedance linky při připojených terminátorech je tedy $55\ \Omega$.



OBRÁZEK 15 – UKÁZKA ZAPOJENÍ SNÍMAČE PROUDU

Finální deska má následující podobu. V levé dolní části se nachází zdrojová část, horní část desky pak zaujmají snímače proudu s tranzistory a v centrální části se nachází samotný procesor a zbylé komponenty.

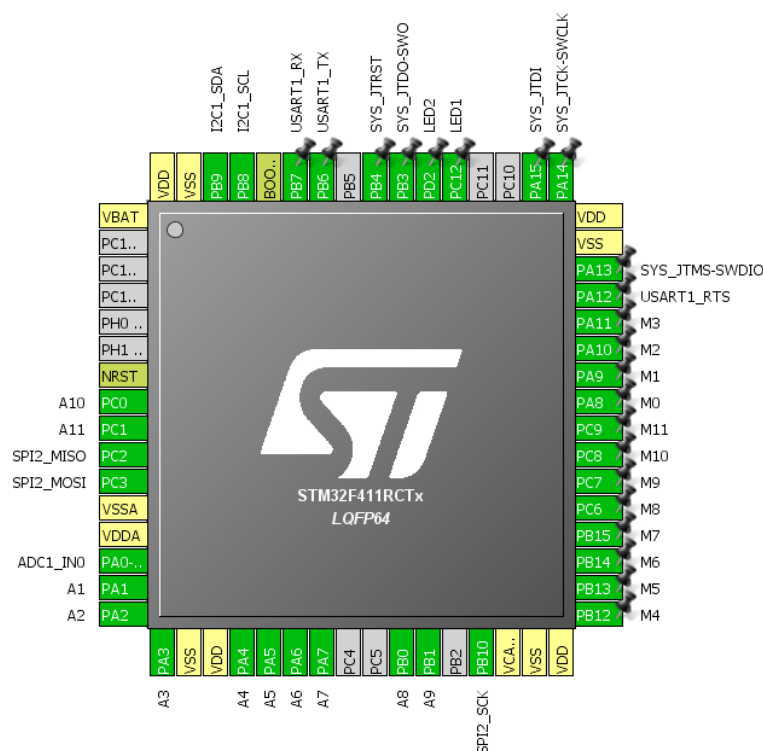


OBRÁZEK 16 – BLOKOVÉ SCHÉMA ROZMÍSTĚNÍ PRVKŮ NA DESCE

5 Řídící program měřicí desky

5.1 Vývoj programu pro procesory STM32

Pro vývoj aplikací pro procesor je k dispozici nástroj STM32CubeMX. Tento nástroj od výrobce procesoru umožní počáteční konfiguraci procesoru. Umožní nastavit vlastnosti jednotlivých pinů, povolení funkcí procesoru jako ADC, komunikačních rozhraní a dalších funkcí. Jednotlivým pinům lze také přiřazovat symbolická jména pro větší přehlednost programu. STM32CubeMX pak umožní vygenerovat základní nastavení procesoru do zvoleného vývojového prostředí. V programu jsou pak vyznačené části kódu, které je možné upravovat a kód přidávat. Vyznačená jsou také místa, která byla vygenerována programem STM32CubeMX.



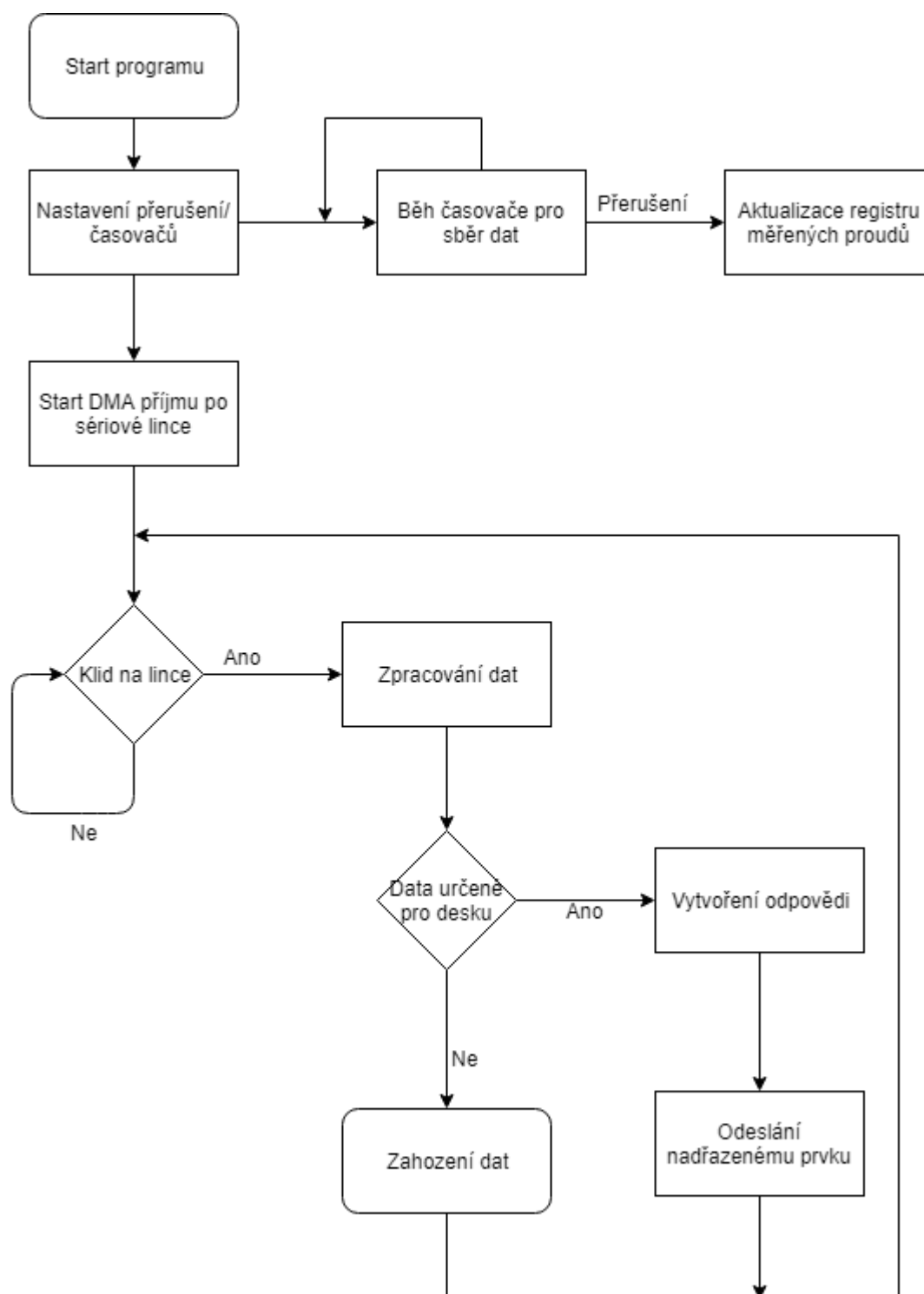
OBRÁZEK 17 - GRAFICKÉ ROZHRANÍ STM32CUBEMX

Tyto části kódu se automaticky aktualizují při změně. Tato kombinace nástrojů umožní nastavit procesor pomocí grafického rozhraní a ušetří tak výrazně čas při počátečním nastavení procesoru. Jako vývojové prostředí bylo zvoleno Keil μ Vision. Vývoj programu tedy probíhal v jazyce C++. Toto prostředí také obsahuje nástroje pro

ladění programu. Je tedy možné krokovat program na reálném procesoru, popřípadě sledovat obsahy proměnných a paměti.

Program řídící desky běží v nekonečné smyčce. Řízení celého programu je pomocí přerušení, které vyvolává sériová linka, časovač, popřípadě tlačítko. Časovač vyvolává cyklicky přerušení, které se stará o sběr dat ze snímačů proudu. V každém cyklu je převeden jeden z kanálů. Toto řešení bylo zvoleno hlavně kvůli skutečnosti, že převod analogového napětí ze snímače proudu na digitální hodnotu je s určitou časovou náročností. Při využití všech 12 kanálů by tak obsluha této funkce trvala nezanedbatelný čas.

Přerušení od sériové linky se zavolá ve chvíli, kdy nastane klid na lince. Po vyvolání přerušení se data začínají zpracovávat a následně se rozhodne, zda jsou data pro desku relevantní, nebo byla určena pro jiné zařízení.



OBRÁZEK 18 - VÝVOJOVÝ DIAGRAM PROGRAMU MĚŘÍCÍ DESKY

5.2 Komunikace po sběrnici Modbus

Měřicí deska je navrhnutá jako uzel typu Slave. Standardně je této desce přiřazena adresa 150. Tuto adresu lze ale změnit pomocí zápisu do jednoho z registrů přes Modbus sběrnici. Pro příjem zprávy byla využita funkce rozpoznání klidu na lince.

Procesor vyvolá přerušení, pokud je na lince klid po určitou dobu. V tomto případě je tato doba 1,5 znaku. Po vyvolání přerušení jsou data ukládána do kruhového zásobníku o velikosti 256 bytu. Tato velikost není náhodná, ale byla zvolena právě 256 bytů, protože zpráva na sběrnici Modbus nemůže být větší. Využila se maximální velikost, aby nemusel být obsah tohoto zásobníku v průběhu přenosu překopírován do pomocného zásobníku. Bylo také vyzkoušeno, že i s takto navrženým programem s využitím pouze jednoho zásobníku je procesor dostatečně rychlý na to, aby se zpráva přijala a zpracovala do doby, než dorazí další.

Pro příjem i odesílání dat se využívá DMA. DMA je funkce procesoru, která umožní přímý přenos dat mezi rozhraním sériové linky a pamětí procesoru. Bez využití DMA by byl procesor při operacích se vstupně-výstupními periferiemi plně zatížen, a tedy by nemohl vykonávat jinou práci. Využitím DMA pro přenos dat je procesor využíván pouze k inicializaci přenosu dat, a pak už může vykonávat další části programu. To znamená, že použitím tohoto způsobu komunikace není procesor při přijímání a vysílání dat vůbec používán a může se starat například o sběr dat ze snímačů. Dokončení příjmu či vysílání je signalizováno pomocí přerušení. Aby bylo možné vysílat i přijímat data po sériové lince RS-485, je nutné přepínat směr toku dat. K tomu se využívají právě tato přerušení od sériové linky procesoru, která signalizují dokončení přenosu.

Ve shrnutí zpracování dat probíhá způsobem, že program čeká a poslouchá sběrnici, dokud nenastane klid na lince. Pokud je na lince klid, je vyvoláno přerušení, které signalizuje, že jsou data připravená v zásobníku k dalšímu zpracování. Až při samotném zpracování dat dojde k vyhodnocení, jestli je zpráva určená této desce, nebo je pro jiné zařízení na sběrnici. Program tedy poslouchá veškerou komunikaci probíhající po sběrnici a reaguje pouze na zprávy, které jsou pro desku určeny.

5.3 Zpracování příchozích zpráv

Zpracování dat probíhá pokaždé, když je vyvoláno přerušení vlivem klidu na lince. Ještě před začátkem zpracování je však zkontrolována přijatá zpráva, jestli se ID příjemce shoduje s ID desky. Pokud se ID neshodují, pak se na zprávu nereaguje. Při shodě se začne zpráva zpracovávat a následně tvořit odpověď. Při zpracování je nutné provést několik dalších kontrol jako je kontrola CRC kódu, ale i požadované funkce protokolu.

Deska umožňuje pouze několik málo funkcí protokolu Modbus. Jako první umožní funkci 4. Jedná se tedy o čtení jednoho, nebo několika 16-bitových registrů. Při větším počtu registrů je požadavek definován tím způsobem, že je uvedena adresa prvního registru a následně počet. Registry jsou tedy v návaznosti na sebe. Díky pevně stavovanému rámci zpráv Modbus protokolu je možné ze zprávy snadno zjistit adresu prvního registru i požadovaný počet registrů. Adresový prostor pro 16-bitové registry v protokolu Modbus odpovídá rozsahu 30001 - 39999. Adresy jednotlivých registrů jsou ale ve zprávě číslovány od 1 – 9999. To tedy znamená, že při požadavku na čtení registru 30020 je v přijaté zprávě číslo registru 20. Proto je potřeba s tímto relativním číslováním v programu počítat a příchozí zprávu před tvorbou odpovědi upravit. Po zjištění počtu čtených registrů je stanovena délka odpovědi a začíná se plnit buffer pro odpověď. Funkce i příjemce jsou převzati z příchozí zprávy, data jsou čtena z pole dat, které se automaticky aktualizuje. Následně musí být vygenerován nový CRC kód a zpráva je připravena k odeslání.

Další možnou příchozí funkcí je funkce 16. Jedná se tedy o zápis jednoho, nebo více registrů. Zde probíhá zpracování velmi podobně jako u funkce 4 s tím rozdílem, že je nutné ještě kontrolovat, jestli je možné do registru data zapisovat. Některé registry v měřicí desce jsou pouze pro čtení. V programu je tedy statická tabulka, ve které je pro každý registr daná logická hodnota, jestli je možné do tohoto registru data zapisovat, nebo slouží pouze ke čtení. Tvorba odpovědi probíhá úplně stejně jako u předchozí funkce s tím rozdílem, že u funkce zápisu je pevně stanovena délka odpovědi a její struktura.

V obou případech je tedy nejprve kontrolována správnost přijatých dat porovnáním CRC kódu a následně je vygenerován nový CRC kód pro odpověď. Procesory STM32F411 nabízí možnost výpočtu CRC pomocí hardwarové jednotky. Využitím této jednotky je možné provádět výpočet velmi rychle na pozadí a tedy bez vytěžování procesoru. Procesor je schopen počítat pouze 32 bitové CRC s pevně stanoveným polynomem, a proto nelze použít pro výpočet CRC pro protokol Modbus. Modbus využívá pouze 16 bitové CRC, které je rozděleno na vyšší a nižší byte. Výpočet je proto nutné provádět programově. Výpočet lze provést dvěma způsoby. První je pomocí cyklu procházet buffer se zprávou a postupně provádět logický XOR a posouvat bity registru CRC. Tento způsob je náročný na procesorový čas, protože pro každý byte se musí provést 8 krát bitový posun. Proto byl využit lepší přístup pomocí

výpočtu z předem stanovené tabulky. Předem se definují tabulky pro vyšší a nižší byte CRC kódu a následně se výpočet provádí pouze výběrem prvku z tabulky. Dojde tedy k výrazné úspoře času.

5.4 Sběr dat ze snímačů

Sběr dat je realizován pomocí vnitřního AD převodníku procesoru. Aby nedocházelo k zablokování procesoru při převodu hodnot proudu, byl využit, stejně jako u přenosu dat, režim DMA. Převádí se tak všechny zapojené snímače, ale protože je zapnutý v každém okamžiku pouze jeden snímač (z důvodu úspory energie), je využita hodnota pouze tohoto zapnutého snímače. Perioda získání vzorku z jednoho snímače je nastavena na 25 Hz. Při použití všech 12 snímačů je tedy potřeba začít převod jednoho kanálu s periodou 300 Hz. Ke spuštění převodu byl využit jeden z časovačů procesoru. Pro nastavení časovače tak, aby vyvolal přerušení s žádanou periodou, je nutné správně nastavit dělič periody, tzv. prescaler (PSC), a také hodnotu stropu (AutoReload registr, zkráceně ARR), do které čítač počítá [18]. Oba tyto registry jsou 16-bitové a jsou omezeny na hodnoty 0 – 65 535. Pro správné nastavení těchto hodnot můžeme využít následujícího vztahu

$$(PSC + 1) * (ARR + 1) = \frac{TimerClk}{Period} \quad (1)$$

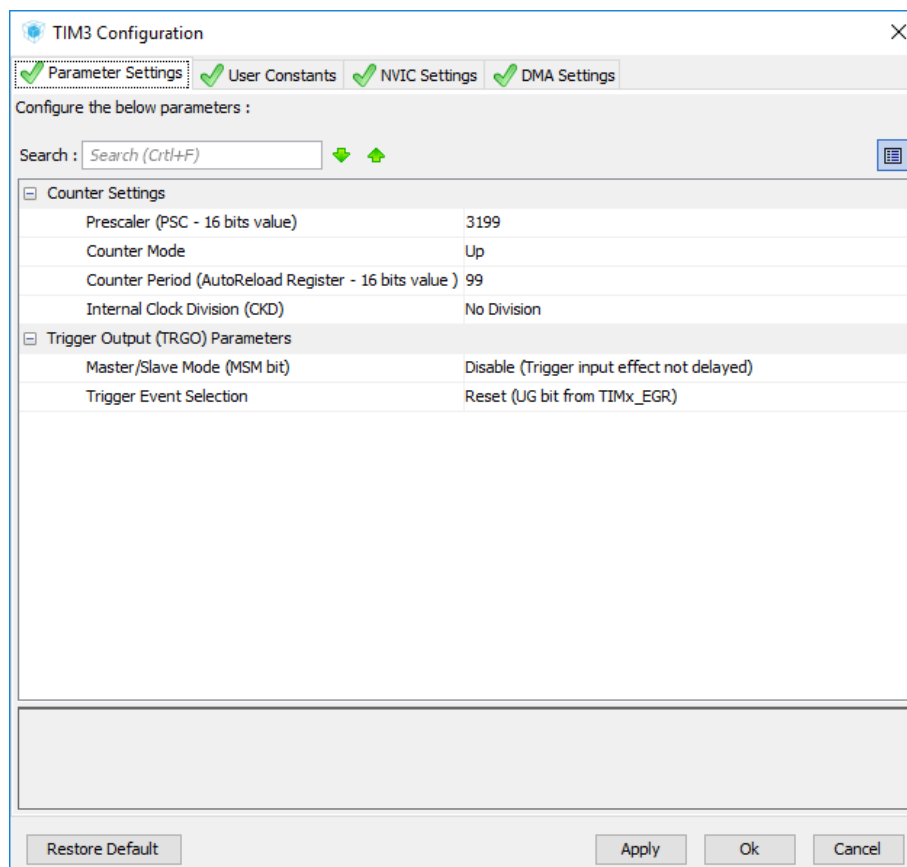
Z této rovnice tedy známe všechny proměnné na pravé straně. Jedná se o taktovací frekvenci hodin pro časovač a o požadovanou periodu vyvolání přerušení. V tomto případě má rovnice následující podobu

$$(PSC + 1) * (ARR + 1) = \frac{96\,000\,000}{12 * 25} = 320\,000 \quad (2)$$

Následně se tedy musí zvolit jedna z hodnot registrů. Precaler byl zvolen na hodnotu 3199. Z toho tedy vyplývá, že rovnice pro registru ARR bude

$$(ARR + 1) = \frac{320\,000}{3199 + 1} = 100 \quad \rightarrow \quad ARR = 99 \quad (3)$$

Vzhledem ke skutečnosti, že při takto zvolených hodnotách vycházejí při výpočtu celé čísla, dostaneme periodu vzorkování přesně 25 Hz pro každý kanál. Tato hodnota byla ověřena v kapitole 7.



OBRÁZEK 19 - NASTAVENÍ ČASOVAČE PRO SBĚR DAT

Řídící program desky však provádí sběr každou sekundu. To tedy znamená, že pro každou odeslanou hodnotu deska nasbírá 25 hodnot. Aby odeslaná hodnota dostatečně reprezentovala změny proudu v panelu, nelze odesílat aktuální hodnotu, ale hodnotu průměrnou.

5.5 Návrh filtru pro měřené hodnoty proudu

Mezi uvažované filtry byly zařazeny FIR, IIR a Moving Average jako speciální případ FIR filtru. Aby došlo k odstranění šumu, musí filtr fungovat jako dolní propust. Vysoké frekvence tedy filtr potlačí, a tím se signál vyhladí od náhlých změn. Nejprve je však nutné alespoň přibližně odhadnout jak rychlé změny považovat za šum a co zařadit do užitečných hodnot. Vybraný snímač má dobu odezvy na změnu proudu v řádech GHz, takže je schopen zareagovat i na velmi rychlé změny proudu, které mohou nastat. Fotovoltaický panel je schopen zareagovat na změnu osvětlení také velmi rychle, proto lze vycházet z předpokladu, že nejrychlejší změna produkovaného proudu bude záviset právě na rychlosti změny osvětlení. V případě panelů se osvětlení může změnit rychle pouze změnou oblačnosti. Pro odhad, jak rychle by mohla změna nastat, byl vzat

v úvahu panel o šířce 1,6m a výšce 1m. Rychlost oblačnosti byla zvolena jako průměrná hodnota v České republice, která je 3,2 m/s. Tato hodnota byla měřena ve výšce 10m nad povrchem [19]. Z těchto údajů vyplývá, že mrak je schopen celý panel zakrýt zhruba v čase 0.5 s. Filtr by tedy měl být navržen tak, aby odfiltroval složky s periodou kratší než 2 Hz. Zároveň ale je potřeba udržet určitou shodu filtrovaných dat s realitou. Vzhledem k tomu, že oblačnost dokáže výrazně ovlivnit množství produkované energie, nemělo by dojít k přehnanému filtrování dat, aby nedocházelo k přílišnému zkreslení dat. [20]

Finite Impulse Response Filtr

FIR filtr je takový filtr, který má konečnou impulsní odezvu pro konečný vstupní signál. To znamená, že v časové oblasti je reakce filtru konečná. Doba odezvy filtru N -tého řádu je přesně dána a to $N+1$ vzorků, než se impulsní odezva ustálí na nulové hodnotě. Každá hodnota v čase je dána váženým součtem předchozích vzorků. Pro vstupní signál $x[n]$ je pak výstup $y[n]$, FIR filtru N -tého řádu, definován pomocí rovnice

$$y[n] = b_0x[n] + b_1x[n-1] + b_2x[n-2] + \dots + b_Nx[n-N] \quad (4)$$

Mezi výhody tohoto filtru patří především záruka stability. FIR filtr je možné navrhnout tak, aby pro všechny frekvence měl lineární posun fáze signálu. To znamená, že všechny frekvence v signálu jsou posunuty v časové oblasti (většinou zpožděny) o stejnou dobu. Nevýhodou může být malá strmost přechodu od propustného do závěrného pásma. Aby byl přechod ostrý, je potřeba filtr vysokého řádu. Čím vyšší je řád filtru, tím náročnější je výpočet a také se do signálu zanáší zpoždění. Hlavně snížení řádu filtru při zachování strmosti přechodu lze řešit pomocí IIR filtru.

Infinite Impulse Resonse filtr

Impulsní odezva IIR filtru se na rozdíl od FIR filtru neustálí na nulové hodnotě, ale vlivem zpětné vazby je nekonečně dlouho nenulová. V praxi se však filtry většinou nule přibližují, a proto je možné od určitého okamžiku impulsní odezvu považovat za nulovou. Výstup IIR filtru je v jakémkoli časovém okamžiku dán součtem vážených hodnot vzorků na vstupu, ale také předchozích vstupů. Pro vstupní signál $x[n]$ má filtr výstup $y[n]$ rovný

$$y[n] = \frac{1}{a_0} \left(\sum_{i=1}^N a_i y[n-i] + \sum_{k=0}^M a_k x[n-k] \right) \quad (5)$$

IIR filtr tedy ztrácí vlastnost konečné odezvy, lineární fáze, ale zato je vlivem menšího řádu při zachování strmosti méně náročný na výpočet.

Průměrovací filtry

Jako průměrovací filtry byly v testování použity dva typy. Jednalo se o klouzavý průměr. Funkce tohoto filtru je velmi jednoduchá na implementaci. Jedná se vlastně o speciální případ FIR filtru, pro který jsou koeficienty zvoleny jako $1/N$, kde N je řád filtru. Každý vzorek se tedy podílí stejnou vahou na výsledném signálu.

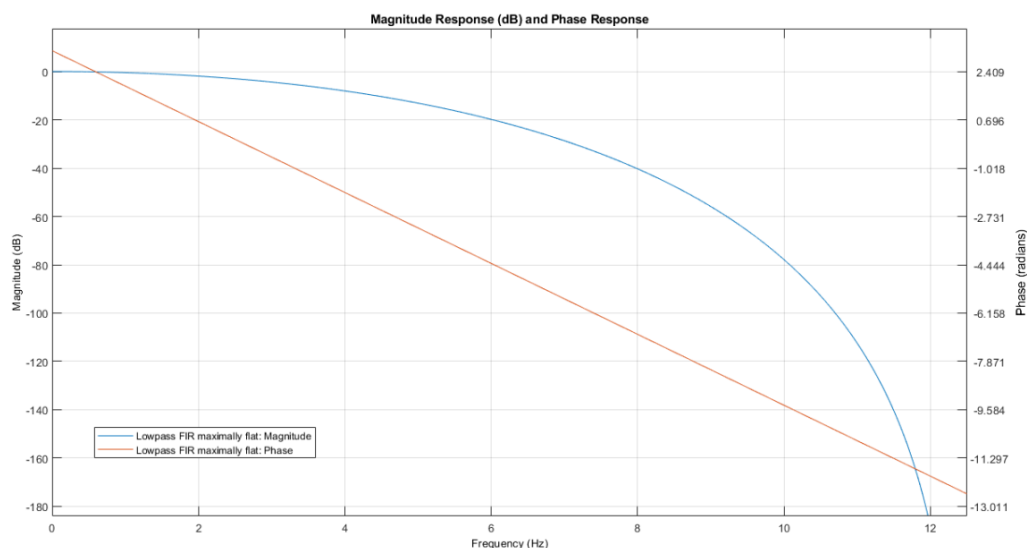
Další typ byl zvolen Exponenciální klouzavý průměr. Tento filtr přiřadí aktuálnímu prvku maximální prioritu a priorita ostatních prvků se exponenciálně snižuje. Výhodou tohoto filtru je jednoduchost implementace. Pro výpočet filtrované hodnoty je potřeba udržovat v paměti pouze předchozí hodnota průměru filtrovaného signálu. Exponenciální klouzavý průměr dává velmi podobné výsledky jako klasický klouzavý průměr. Exponenciální filtr však dává větší váhu aktuálním vzorkům a proto rychleji reaguje na změnu signálu. Do porovnání byl zvolen právě tento typ filtru pro svou jednoduchost a rychlost ve výpočtu. Exponenciální průměr se počítá pomocí následujícího vztahu.

$$expAvg[n] = \alpha * x[n] + (1 - \alpha) * expAvg[n - 1] \quad (6)$$

5.5.1 Porovnání filtrů

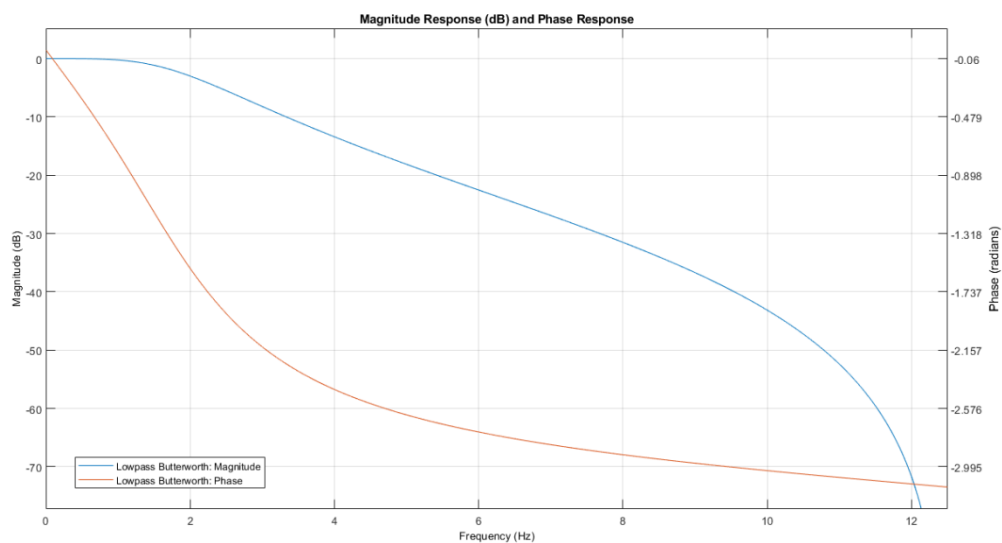
Návrh a porovnání jednotlivých filtrů bylo realizováno v programu Matlab. Ten umožní pomocí aplikace filterDesigner navrhnout v grafickém rozhraní filtr zadáním požadovaných vlastností a typu filtru. Pro testování byl zvolen 10. řád FIR filtru a filtru pomocí klouzavého průměru. IIR filtr je možné navrhnout s menším řádem při dosažení stejných, nebo lepších výsledků. Po počátečním testování byl zvolen 2. řád, při kterém se filtr chová lépe než FIR filtr 10. řádu. Vzorkovací frekvence byla zvolena jako 25 Hz, z důvodu popsaných v kapitole 5.4. Tato frekvence odpovídá frekvenci sběru dat pro jeden kanál.

FIR filtr byl navržen jako maximálně plochý. Jeho fázová a magnitudová charakteristika má následující podobu.



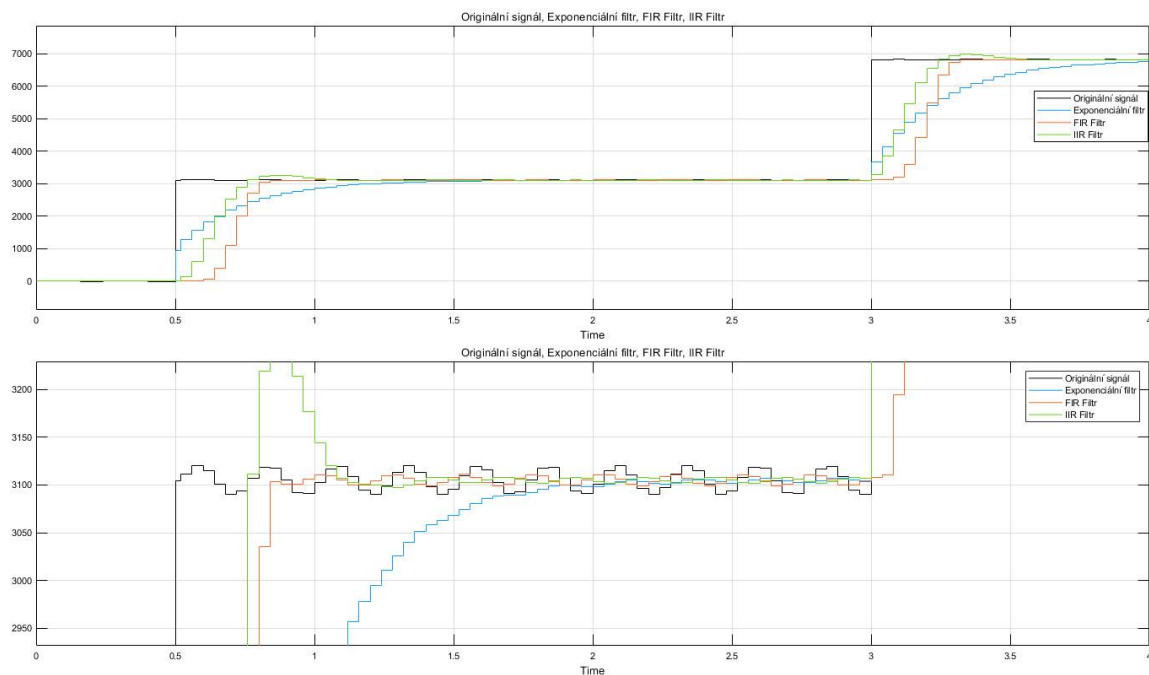
OBRÁZEK 20 - FÁZOVÁ A MAGNITUDOVÁ CHARAKTERISTIKA FIR FILTRU

IIR filtr byl navržen podle Butterworth. Zlomová frekvence byla zvolena na základě předchozích úvah jako 2 Hz. Výsledné odezvy jsou následující



OBRÁZEK 21 - FÁZOVÁ A MAGNITUDOVÁ CHARAKTERISTIKA IIR FILTRU

Pro otestování byla vytvořena sada dat tak, aby odpovídala co nejblíže reálným naměřeným datům, která poskytl vedoucí práce. Byla tedy vytvořena sada dat obsahující 200 vzorků, ve které byla nejprve střední hodnota odpovídající 2.5 V – tedy 0A, a následně skok na 3.0V, který odpovídá proudu 4.8A. Následně byla data doplněna o šum s amplitudou +8mV. Tento šum odpovídá přibližně 76mA. Toto už je dost velká změna a proto je potřeba signál filtrovat. Na následujícím obrázku je vidět porovnání jednotlivých filtrů.



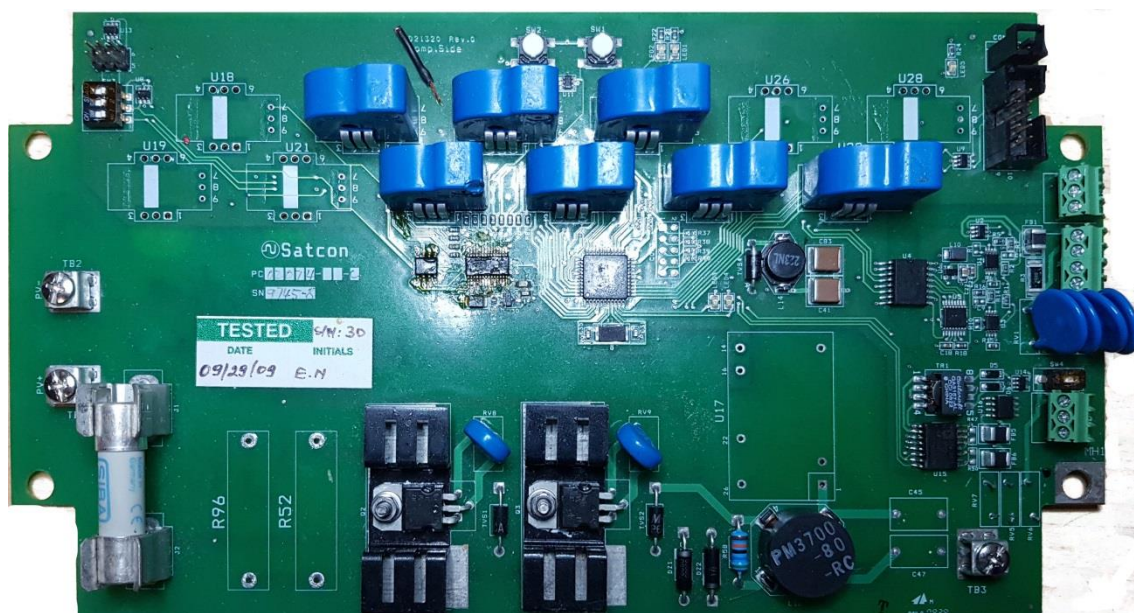
OBRÁZEK 22 - POROVNÁNÍ CHOVÁNÍ FILTRŮ

Z grafu je vidět, že FIR a IIR filtr dosahují podobných výsledků. IIR filtr je ale mnohem menšího řádu a reaguje rychleji na změny signálu. Nejpomaleji zareaguje průměrovací filtr, který však nepotřebuje k určení relativně dobrého výsledku velký počet vzorků. FIR a IIR filtry potřebují po spuštění několik vzorků, aby dosáhly správného výsledku. Rychlost reakce průměrovacího filtru lze ovlivnit pomocí koeficientu zapomínání α . Při změně koeficientu se změní rychlost, ale zákonitě také síla vyhlazování signálu. Pro tento případ byl zvolen koeficient na hodnotu 0,2.

Z porovnání bylo zjištěno, že i obyčejný exponenciální filtr dává dostatečně dobré výsledky. Vzhledem k jeho jednoduché implementaci a malému časovému nároku na výpočet byl zvolen právě tento filtr. Dalším důvodem pro volbu jednoduchého filtru může být skutečnost popsaná v kapitole 5.4 a to, že deska snímá hodnotu proudu s periodou 25 Hz, ale data se odesílají pouze s frekvencí 1 Hz. Před odesláním se tedy průměruje 25 vzorků proudu, a proto částečně ztrácí smysl použít složitějších filtrů, i přes o něco lepší výsledky.

6 Porovnání stávající a nové desky

Při návrhu desky byla snaha o kombinaci veškerých výhod stávající desky a některé funkce z desek konkurenčních. Ze stávající desky byly zachovány snímače proudu. Tyto snímače pracují v uzavřené smyčce, takže by částečně měli potlačovat drift výstupního napětí v čase, eliminovat teplotní závislost čidla a také dosahovat větší přesnosti měření. Dále byla přidána funkce možnosti odpojení nepoužívaných snímačů od napětí. Pro toto spínání byly použity tranzistory, které sepnou napájení pouze pro právě ten snímač, které má být měřeno. Toto postupné zapínání společně s využitím modernějších součástek sníží spotřebu celé desky.



OBRÁZEK 23 - STÁVAJÍCÍ DESKA SATCON

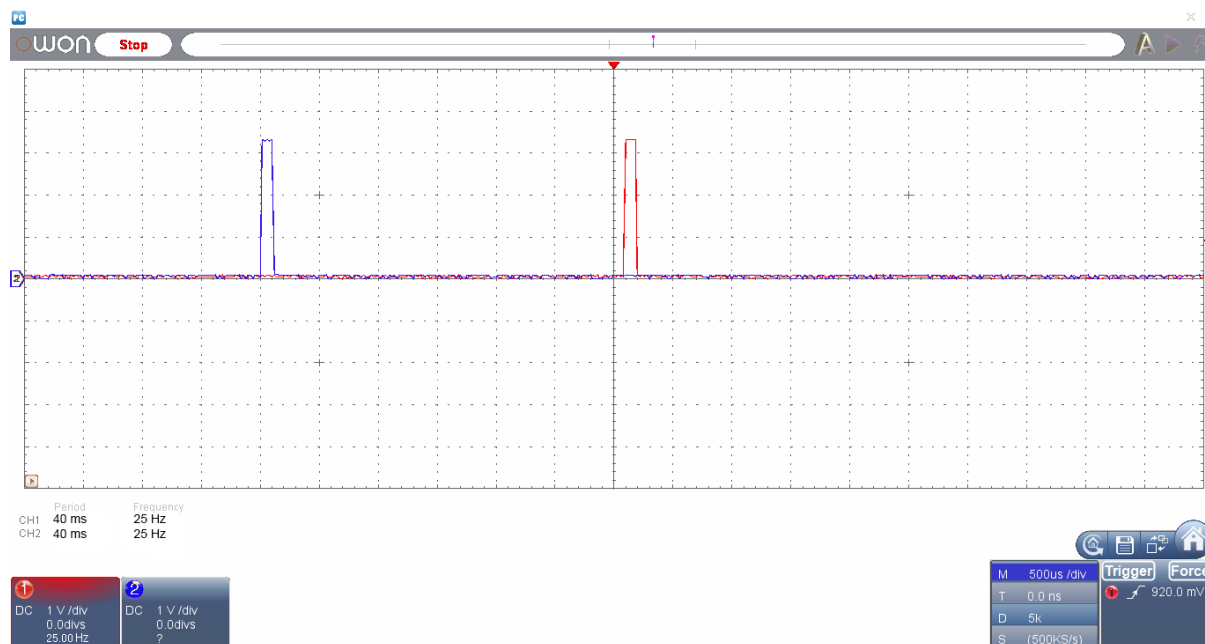
Zdrojová část desky byla výrazně zjednodušena. Použití DC-DC měniče oproti kombinaci výkonových tranzistorů s DC-DC měničem přináší výhodu jak v integraci, tak v bezpečnosti. Vybraný zdroj má zabudované ochrany proti rychlému nárůstu napětí, opačnou polaritou, přetížení a zkratu. Dále je také izolován 5 V výstup od vstupu až do napětí 4000V DC.

Pro komunikační část byl zvolen obvod pro převod sériové linky USART na RS-485. Tento protokol je využíván pro přenos dat po sběrnici Modbus. Zlepšení oproti stávajícímu řešení bylo zejména v použití převodníku, který má zabudovaný zdroj napájení. Tento čip má izolovaný zdroj napětí, ale také i signálové piny. Izolací tedy eliminujeme možnost zničení desky při výskytu nebezpečného napětí na některém

z vodičů sběrnice. Větší integrací těchto prvků se také snížil počet potřebných komponentů a tím tedy i zjednodušil návrh desky.

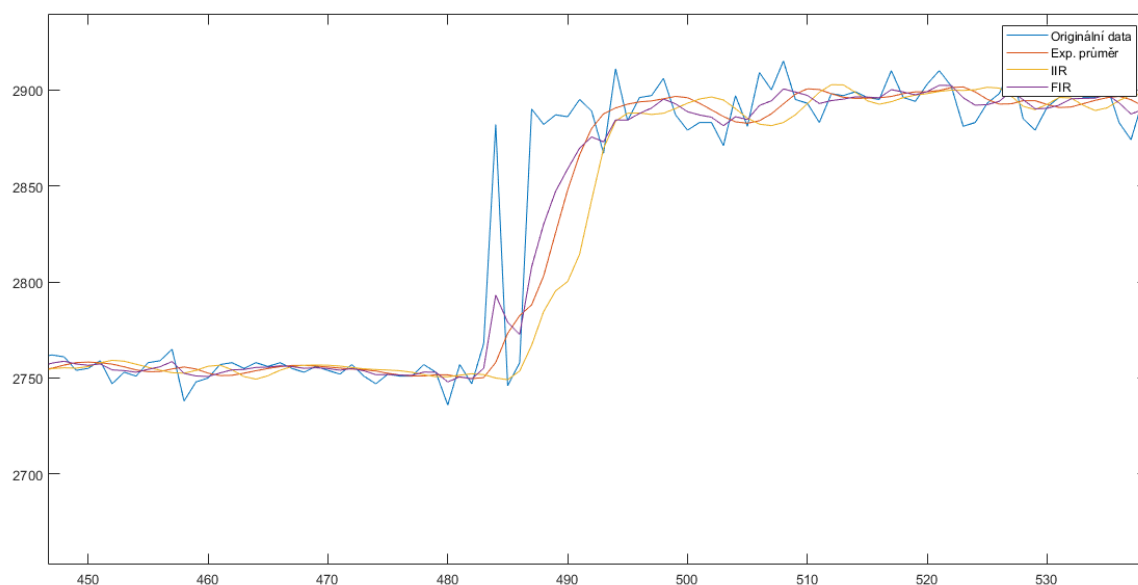
I přesto, že v této aplikaci není větší rychlost zapotřebí, deska umožňuje pracovat výrazně rychleji než deska stávající. Stávající deska využívá 8-bitový AVR procesor s maximálním taktem hodin 20MHz. Nový procesor má šířku sběrnice 32 bitů a dokáže pracovat na frekvenci až 100MHz. Také disponuje větší pamětí jak pro program procesoru, tak pro ostatní, například konfigurační, data. Stávající deska tedy spoléhala na použití externí EEPROM paměti o velikosti 512Kb. Tato paměť v novém návrhu není potřeba, protože procesor obsahuje uživatelsky přístupnou FLASH paměť o velikosti 256Kb až 512Kb. Použití procesoru také umožní využít funkce USB, která byla na desku doplněna. Desku je přes tento port možné napájet, ale je možná také implementace virtuálního sériového portu, který by se staral o přenos dat po USB.

Celkově tedy deska zaznamenala zmenšení počtu komponentů. Proběhla modernizace většiny součástek, ale stále při zachování zpětné kompatibility tak, aby bylo možné desku použít bez změny okolních prvků.



OBRÁZEK 25 - FREKVENCE SPÍNÁNÍ TRANZISTORŮ SNÍMAČŮ PROUDU

Pomocí osciloskopu byla ověřena vzorkovací frekvence spínání a čtení snímače. Na obrázku je možné vidět sepnutí dvou po sobě jdoucích snímačů. Jak bylo uvedeno při nastavování časovače, perioda vzorkování opravdu vychází přesně 25 Hz.



OBRÁZEK 26 - POROVNÁNÍ FILTRŮ NA REÁLNÝCH DATECH

Funkce filtru byla také otestována. Ve výsledném programu je využíván průměrovací filtr s exponenciálním zapomínáním, ale pro kontrolu byly testovány opět všechny tři filtry popsané v kapitole 5.5. Výsledky jsou prakticky identické s výsledky

ze simulace. Použití průměrovacího filtru je dostačující. Jeho rychlost je srovnatelná s ostatními a vzhledem k potřebě průměrovat všechny kanály zvlášť, je tento filtr také výhodný. Pro výpočet FIR filtru je 14 násobení a 10 sčítání. Výpočet IIR filtru je méně náročný vzhledem k jeho nižšímu rádu. Stále však potřebuje 4 operace násobení a 4 operace sčítání. Průměrovací filtr je nejméně náročný a pro získání vzorku potřebuje pouze 2 operace násobení a jednu operaci sčítání, pokud je zapsán v podobě rovnice (6)

8 Závěr

Tato diplomová práce se věnovala návrhu hardwarové i softwarové části měřicí desky proudu solárních panelů, konkrétně modernizací desky v solární elektrárně FVE Ralsko. Cílem tedy bylo modernizovat již stávající desku nasazenou v reálném prostředí.

Nejprve se práce věnovala problematice okolo fotovoltaických panelů. Bylo popsáno zastoupení jednotlivých zdrojů výroby elektrické energie v průběhu let na území České republiky. Z tohoto průzkumu vyplynulo, že solární energie je stále téma, které je na vzestupu. Tyto předpoklady podporují i stavby komplexů solárních elektráren v České republice.

Následně práce přiblížila funkčnost průmyslové komunikační sběrnice Modbus, po které deska komunikuje s ostatními prvky. Byly uvedeny základní rámce této sběrnice, její zapojení a také některé z vybraných funkcí, které deska využívá.

Další částí práce byl výběr komponent měřicí desky a také její návrh. Návrh byl omezen podmínkami, které stanovili rozměry a polohu některých prvků na desce. Tyto omezení vznikli z důvodu nasazení nové desky na místo stávající zastaralé desky, která se již neprodává. Ze staré desky byly zachovány veškeré funkce a následně byla deska ještě rozšířena o spínání jednotlivých snímačů proudu. Zdrojová část desky byla výrazně zjednodušena použitím moderního DC-DC převodníku napětí. Mezi nejdůležitější komponentu desky patří zvolený mikroprocesor. V tomto případě se zvolil procesor architektury ARM, konkrétně od společnosti STMicroelectronics. Jedná se o model vyšší střední třídy STM32F411. Použitím tohoto procesoru došlo k výraznému zjednodušení, protože v sobě kombinuje paměť, převodník a také se stará o spínání tranzistorů pro snímače. V neposlední řadě se také stará o komunikaci po sběrnici.

Po návrhu hardwarové části bylo nutné vytvořit program pro tuto desku. Program řeší funkční část celé desky. Stará se o příjem dat ze sběrnice Modbus, sběr dat ze snímačů proudu, jejich následnou úpravu do tvaru vhodný pro nadřazený prvek, ale také kalibraci čidel a ukládání těchto kalibračních hodnot do paměti. V průběhu práce bylo zjištěno, že data ze snímačů proudu nejsou konstantní, ale výrazně se mění. Tyto změny mohou znamenat rozdíly v řádech mA, a proto jsou data filtrovány již při prvotním čtení. Pro komunikaci po sběrnici využívá procesor funkce, která vyvolá přerušování

programu při klidu na lince. Procesor tedy poslouchá veškeré data, které probíhají po sběrnici, a reaguje pouze na zprávy, které jsou pro desku určeny. Zároveň bylo co nejvíce funkcí procesoru implementováno v režimu přímého přístupu do paměti (DMA), aby nedocházelo k uvíznutí procesoru při řešení některé z periodických částí programu a tím i zpomalení reakce například na příchozí zprávu.

Nakonec byla nová deska porovnána se stávající a proběhlo zhodnocení výhod a nevýhod jednotlivých desek. Následně byly základní funkce této desky otestovány. Cílem modernizace bylo hlavně zachování základní funkčnosti desky s možností pozdějších úprav a doplnění o nové funkce. Deska je tedy schopna pouze změnou několika konstant v programu přijímat jiné typy zpráv, využívat jiné registry pro uchování dat, ale také na desce osadit a následně využívat i jiný počet snímačů proudu. Dále je možné desku rozšířit o další periferie pomocí některé ze sběrnic I2C, nebo SPI. Bylo by tedy možné desku rozšířit o další snímače (například teploty), displej a mnoho dalších.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Princip fotovoltaického článku. *Elektrika.cz*. [Online] [Citace: 2. 2. 2019.] <https://elektrika.cz/data/clanky/princip-fotovoltackeho-clanku>.
- [2] How a PV System Works. *Florida solar energy center*. [Online] [Citace: 20. 12. 2018.] http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_electricity/basics/how_pv_system_works.htm.
- [3] Maximum Power Point Tracking (MPPT) Charge Controller Working Principle - Electrical Academia. *Electrical Academia*. [Online] [Citace: 3. 3. 2019.] <http://electricalacademia.com/renewable-energy/maximum-power-point-tracking-mppt-charge-controller-working-principle/>.
- [4] Fotovoltaické systémy s východo-západní orientací a pouze jedním střídačem. *tzbinfo*. [Online] [Citace: 27. 2. 2019.] <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaike/9667-fotovoltacke-systemy-s-vychodo-zapadni-orientaci-a-pouze-jednim-stridacem>.
- [5] Zprávy o provozu elektrizační soustavy. *Energetický regulační úřad*. [Online] [Citace: 23. 2. 2019.] <http://www.eru.cz/cs/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy#2018>.
- [6] Fotovoltaická elektrárna Ralsko | Obnovitelné zdroje | Skupina ČEZ. *ČEZ*. [Online] [Citace: 13. 3. 2019.] <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/slunce/provozovane-fotovoltacke-elektrarny/fotovoltacka-elektrarna-ralsko.html>.
- [7] FVE Ralsko - detail elektrárny - seznam FVE v ČR. *Elektrárny*. [Online] [Citace: 2. 3. 2019.] <http://www.elektrarny.pro/detail.php?id=21>.
- [8] Protocol Description. *modbus tools*. [Online] [Citace: 2. 1. 2019.] <https://www.modbustools.com/modbus.html#function16>.
- [9] Wang, Z. a kol. *Prospect of Photovoltaic System Safety Monitoring and Fault Diagnosis Technology Based on PV Cloud Data Platform*. Zhengzhou : 2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2018. doi: 10.1109/ICISCE.2018.00089.

- [10] STM32 32-bit Arm Cortex MCUs. [Online] [Citace: 2019. 1. 27.] <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>.
- [11] Barry, Richard. *Using the FreeRTOS Real Time Kernel*. Londýn : Real Time Engineers Ltd., 2019. 978-1-4461-7030-4.
- [12] Gothard, Adolf. Implementace RTOS do mikrokontrolérů STM32 s jádrem ARM Cortex-M4F. [Online] 2014. <http://hdl.handle.net/11012/31311>.
- [13] RS-485 CONNECTIONS FAQ. *B&B Electronics*. [Online] [Citace: 7. 2. 2019.] <http://www.bb-elec.com/Learning-Center/All-White-Papers/Serial/RS-485-Connections-FAQ.aspx>.
- [14] PCIM: LEM introduces three current transducers. *Electronics Weekly*. [Online] [Citace: 7. 2. 2019.] <https://www.electronicsworld.com/news/products/sensors-products/pcim-three-current-transducers-from-lem-2016-05/>.
- [15] ATECOM. *Snímače elektrického proudu*. [Online] [Citace: 30. 1. 2019.] Snímače elektrického proudu. ATECOM [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <http://www.atecom.cz/produkty/spinace-a-snimace-honeywell/senzory/snimace-elektrickeho-proudu.html>.
- [16] Current Sensor Products. *Tamura Corporation of America*. [Online] [Citace: 7. 2. 2019.] <http://www.tamuracorp.com/products/current-sensor-products/>.
- [17] LTS 6-NP. *LEM*. [Online] [Citace: 2.. 1. 2019.] <https://www.lem.com/en/lts-6np>.
- [18] Mazidi, Muhammad Ali, Shujen, Chen a Eshragh, Ghaemi. *STM32 Arm Programming for Embedded Systems: Volume 6*. místo neznámé : Microdigitaled, 2018. 9780997925944.
- [19] Větrné podmínky v České republice ve výšce 10m nad povrchem. *TZB-info*. [Online] [Citace: 26. 3. 2019.] <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9770-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-i>.
- [20] Lobera, D. T. a Valkealahti, S. *Mismatch losses in PV power generators caused by partial shading due to clouds*. Rogers, AR : 2013 4th IEEE International

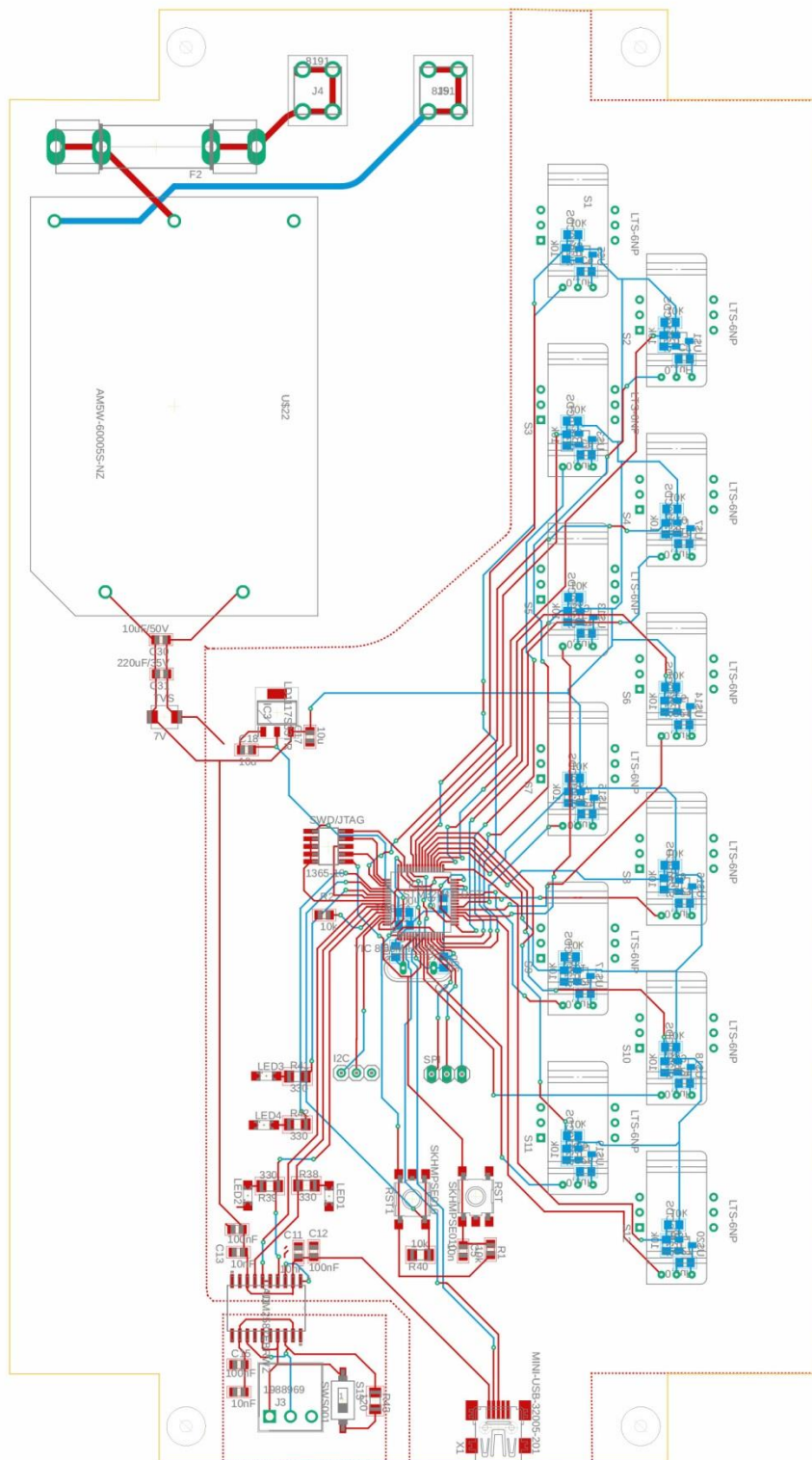
Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2013.
10.1109/PEDG.2013.6785587.

[21] QModMaster. *SourceForge*. [Online] [Citace: 17. 10. 2018.]
<https://sourceforge.net/projects/qmodmaster/>.

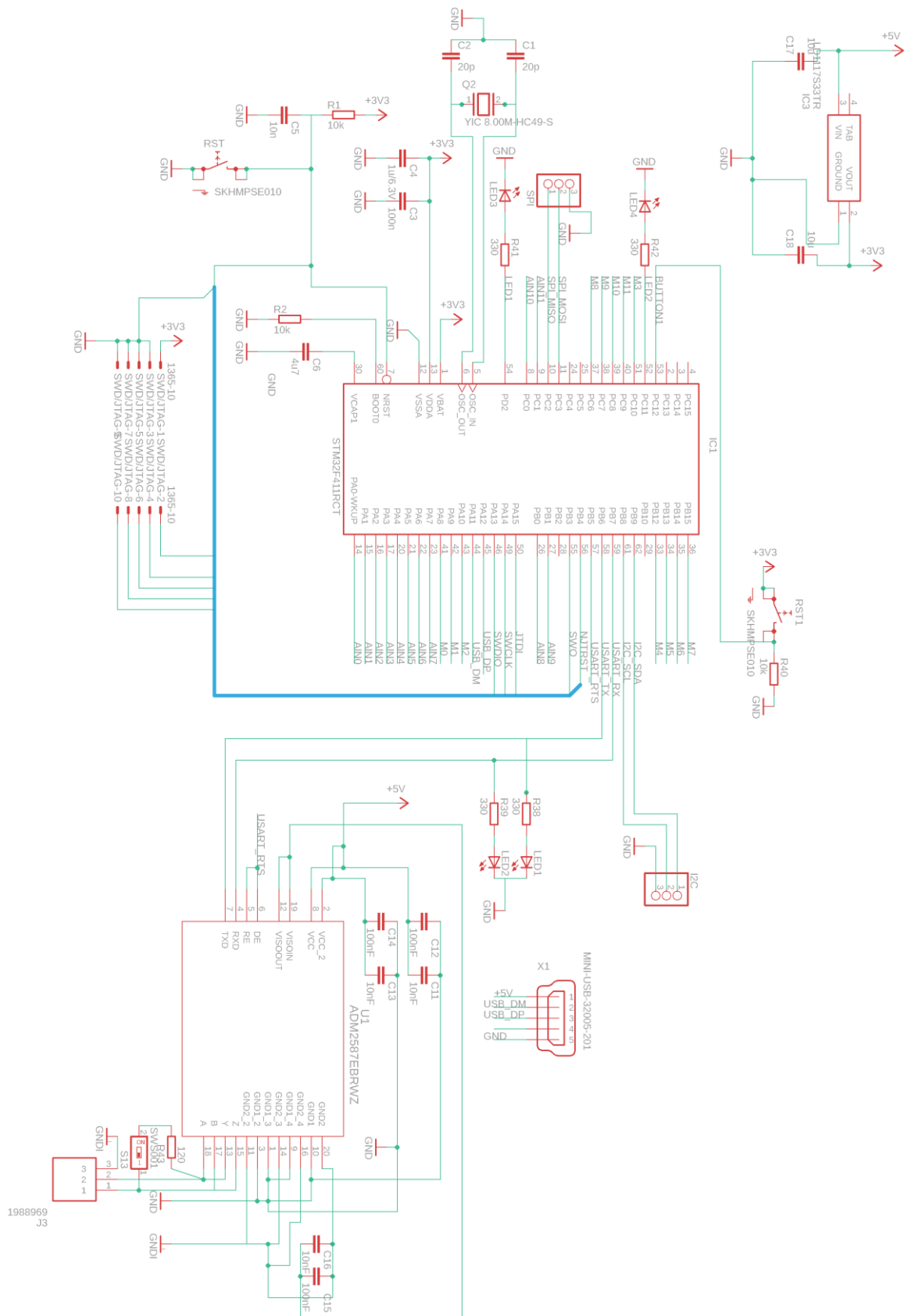
[22] STM32 High Performance MCUs. *ST*. [Online] [Citace: 21. 12. 2018.]
<https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32-high-performance-mcus.html?querycriteria=productId=SC2154>.

9 Příloha

A Doplňující obrázky



OBRÁZEK 27 - SCHÉMA DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ



OBRÁZEK 28 - SCHÉMA HLAVNÍ ČÁSTI DESKY