

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## OVLÁDACÍ A MĚŘICÍ JEDNOTKA PRO GENERÁTORY PLAZMATU

CONTROL AND MEASUREMENT UNIT FOR PLASMA GENERATORS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Petr Paulovics

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Zemánek, Ph.D.

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Ing. Petr Paulovics

**ID:** 144909

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Ovládací a měřicí jednotka pro generátory plazmatu

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte koncepci měřicí a ovládací jednotky pro generátory plazmatu. Jednotka bude řízena standardním mikrokontrolérem. Navrhněte základní programové vybavení pro komunikaci HMI displeje s obsluhou generátoru, pro ovládání zařízení, pro řízení měření procesních parametrů a uchovávání naměřených dat. Zařízení musí umožňovat řízení proudovou smyčkou 4-20 mA.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 25.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Miroslav Zemánek, Ph.D.

**doc. Ing. Lukáš Fucik, Ph.D.**  
předseda rady studijního  
programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá problematikou generátorů plazmatu. Konkrétně se práce zaměřuje na konstrukci HMI zařízení pro generátory plazmatu včetně konstrukce řídicí části generátoru. Hlavní výhodou při ovládání generátoru plazmatu pomocí HMI zařízení je především možnost rychlé změny důležitých parametrů. HMI zařízení umožňuje pohodlné přepínání výstupní frekvence generátoru bez nutnosti zasahovat do zapojení, což vede k vyšší efektivitě při práci s generátorem plazmatu. Další výhodou HMI zařízení je zobrazení všech důležitých informací na LCD displeji. Práce se zabývá základní teorií plazmatu a jeho použitím, rozdělením mikrokontrolérů a popisem jejich periférií, výběrem použitých součástek a jejich zapojením. Poslední část práce je věnovaná programovému vybavení generátoru plazmatu.

## **Klíčová slova**

Plazma, HMI, Mikrokontrolér, LCD, STM32, HAL

## **Abstract**

The diploma thesis deals with the issue of plasma generators. Specifically, the work focuses on the design of HMI devices for plasma generators, including the design of the control part of the generator. The main advantage of controlling the plasma generator using an HMI device is the ability to quickly change important parameters. The HMI device allows convenient switching of the generator output frequency without the need to interfere with the wiring, which leads to higher efficiency when working with the plasma generator. Another advantage of the HMI device is the display of all important information on the LCD display. The work deals with the basic theory of plasma and its use, the division of microcontrollers and the description of their peripherals, the selection of components used and their wiring. The last part of the work is devoted to the software of the plasma generator.

## **Keywords**

Plasma, HMI, Microcontroller, LCD, STM32, HAL

## **Bibliografická citace**

PAULOVICS, Petr. *Ovládací a měřicí jednotka pro generátory plazmatu*. [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/135194>.  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Miroslav Zemánek.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Petr Paulovics</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>144909</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Diplomová práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2020/21</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Ovládací a měřicí jednotka pro generátory plazmatu</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 25.5.2021

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavu Zemánkovi, Ph.D., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 25.5.2021

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD .....	11
<b>1. PLAZMA .....</b>	<b>12</b>
1.1 VZNIK .....	12
1.2 VLASTNOSTI.....	13
1.3 POUŽITÍ .....	14
<b>2. MIKROKONTROLÉRY.....</b>	<b>17</b>
2.1 VNITŘNÍ BLOKY MIKROKONTROLÉRŮ.....	18
2.1.1 Jádro a paměti .....	18
2.1.2 Zdroje hodinového signálu.....	20
2.1.3 Porty GPIO.....	21
2.1.4 A/D a D/A převodníky.....	22
2.1.5 Čítače a časovače .....	24
2.2 PROGRAMOVACÍ VRSTVA HAL .....	24
2.3 SROVNÁNÍ MIKROKONTROLÉRŮ ARM CORTEX-M .....	25
<b>3. NÁVRH PROTOTYPU .....</b>	<b>27</b>
3.1 MASTER JEDNOTKA.....	27
3.1.1 Mikrokontrolér.....	28
3.1.2 Displej a dotyková plocha.....	29
3.1.3 Vstupy a výstupy.....	30
3.1.4 Ostatní obvody a součástky.....	34
3.2 SLAVE JEDNOTKA.....	37
3.2.1 Mikrokontrolér.....	38
3.2.2 Budicí a výkonové součástky.....	38
3.2.3 Obvody pro měření napětí a výkonu do zátěže.....	42
<b>4. PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ.....</b>	<b>45</b>
4.1 MASTER JEDNOTKA.....	45
4.1.1 Inicializace.....	46
4.1.2 Komunikace .....	48
4.1.3 Grafické rozhraní.....	50
4.2 SLAVE JEDNOTKA.....	51
4.2.1 Inicializace.....	51
4.2.2 Hlavní smyčka programu.....	52
<b>5. VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>55</b>
5.1 FUNKCE A OVLÁDÁNÍ .....	55
5.2 NAMĚŘENÉ PRŮBĚHY A HODNOTY .....	59
<b>6. ZÁVĚR.....</b>	<b>63</b>
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	68

**SEZNAM PŘÍLOH..... 69**

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Druhy plazmatu v závislosti na koncentraci a teplotě elektronů [3].....	13
Obrázek 2: Kaufmanův zdroj iontů [7].....	14
Obrázek 3: Uspořádání DCSBD výbojky [8].....	15
Obrázek 4: Fotografie DCSBD výbojky [9].....	15
Obrázek 5: Změny kontaktních úhlů vody pro různé materiály před a po ošetření plazmatem [10].....	16
Obrázek 6: Blokové schéma jádra mikrokontroléru ARM Cortex M3 [11].....	18
Obrázek 7: Multi-AHB sběrnice STM32F411 [15].....	20
Obrázek 8: Smyčka fázového závěsu [16].....	21
Obrázek 9: Blokové schéma GPIO (STM32F411) [15].....	22
Obrázek 10: Blokové schéma aproximačního A/D převodníku [18].....	23
Obrázek 11: Základní princip D/A převodníků [18].....	24
Obrázek 12: Struktura HAL [19].....	25
Obrázek 13: Blokové uspořádání řídicí (master) jednotky.....	28
Obrázek 14: Blokové schéma LCD řadiče SSD1963 [20].....	30
Obrázek 15: Blokové schéma portového expandéru MCP23S17 [22].....	31
Obrázek 16: I2C Oddělovač [23].....	32
Obrázek 17: Zapojení měření proudové smyčky 4-20 mA.....	32
Obrázek 18: Zapojení snižujícího měniče [24].....	35
Obrázek 19: Blokové uspořádání výkonové (slave) jednotky.....	38
Obrázek 20: Blokové schéma obvodu Si8273 [27].....	39
Obrázek 21: Zapojení měřicí části generátoru.....	42
Obrázek 22: Zapojení detekce síťového napětí.....	43
Obrázek 23: Vývojový diagram inicializační části programu.....	45
Obrázek 24: Vývojový diagram "nekonečné" smyčky programu master jednotky.....	46
Obrázek 25: Diagram kontroly příjmu paketu po UART sběrnici.....	49
Obrázek 26: Diagram funkce nakreslení prvku na displej.....	50
Obrázek 27: Vývojový diagram programu slave jednotky.....	52
Obrázek 28: Blokový diagram vyhodnocování příkazů od master jednotky.....	53
Obrázek 29: Výchozí obrazovka HMI.....	55
Obrázek 30: Obrazovka nastavovacího režimu.....	57
Obrázek 31: Pohled vrchní stranu osazené ovládací DPS (master jednotka).....	58
Obrázek 32: Oživování výkonové části generátoru (slave jednotka).....	58
Obrázek 33: Průběh řídicího signálu z mikrokontroléru ( $f=22\text{ kHz}$ , $10\text{ }\mu\text{s/d}$ , $1\text{ V/d}$ ).....	59
Obrázek 34: Detail dead time mezi kanály A a B ( $f=22\text{ kHz}$ , $10\text{ }\mu\text{s/d}$ , $1\text{ V/d}$ ).....	59
Obrázek 35: Průběh napětí na zátěži při výkonu 400 W ( $50\text{ }\mu\text{s/d}$ , $50\text{ V/d}$ ).....	60
Obrázek 36: Průběh napětí na zátěži při výkonu 100 W ( $50\text{ }\mu\text{s/d}$ , $50\text{ V/d}$ ).....	60
Obrázek 37: Průběh proudu při výkonu 100 W ( $20\text{ }\mu\text{s/d}$ , $2,5\text{ A/d}$ ).....	61
Obrázek 38: Průběh proudu při výkonu 400 W ( $10\text{ }\mu\text{s/d}$ , $2,5\text{ A/d}$ ).....	61
Obrázek 39: DCSBD výbojka při příkonu 400 W a pracovním kmitočtu 15 kHz.....	62

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Porovnání vlastností jednotlivých řad mikrokontrolérů STM32F [13].....	26
Tabulka 2: Parametry STM32F411 [15].....	29
Tabulka 3: Parametry tranzistoru IXFH26N50 [28].....	40
Tabulka 4: Parametry usměrňovacího můstku KBU1506 [29].....	41
Tabulka 5: Použité registry pro nastavení řadiče SSD1963 [20].....	47
Tabulka 6: Nastavení registrů portového expandéru MCP23S017 [22].....	48
Tabulka 7: Registr nastavení obvodu XPT2046 [21].....	49
Tabulka 8: Funkce vstupů.....	56
Tabulka 9: Funkce výstupů.....	56

# ÚVOD

HMI zařízení jsou dnes běžně využívaným prvkem v průmyslových aplikacích. Usnadňují komunikaci se strojem či zařízením za pomoci multimédií. Použitím vhodného HMI zařízení lze zpřehlednit a zefektivnit obsluhu téměř všech zařízení. Další výhodou je práce s daty. HMI zařízení se používají nejen pro ovládání, ale i pro uchovávání naměřených dat případně i jejich zpracování. Typickým zařízením pro vizualizaci a obsluhu procesních parametrů je displej. Vhodná volba parametrů displeje je klíčová pro pohodlné čtení informací. Další důležitou součástí jsou ovládací prvky, jako dotykový panel a externí tlačítka.

Jádrům celého zařízení je mikrokontrolér. Mikrokontroléry jsou dnes integrovány téměř do každé elektroniky. Nalezneme je nejen ve složitějších zařízeních, jako jsou pračka, myčka nebo sušička, ale i v naprosto jednoduchých zařízeních, jako žehlička nebo vysavač. Nutnost použít v zařízení mikrokontrolér je způsobena vysokými požadavky kladenými na zařízení. Dnes je běžné, že žehlička zobrazuje teplotu na LCD displeji nebo je pračka ovládaná přes internet. Mikrokontroléry s ARM architekturou jsou oblíbené napříč celým spektrem elektronických zařízení. Mají vysoký výpočetní výkon, malou spotřebu energie, bohatou možnost konektivity a nízkou cenu.

Tato diplomová práce se zabývá v první části úvodem do teorie plazmatu, následně je rozebrána problematika mikrokontrolerů. Teoretická část je zaměřena na mikrokontroléry s ARM architekturou od společnosti ST Microelectronics, jejich rozdělení, shrnutí vlastností, popis architektury a vybraných periférií.

Druhá část diplomové práce se zabývá návrhem prototypu zařízení. Zařízení bylo rozděleno na řídicí část pro obsluhu displeje a výkonovou část generátoru plazmatu. Byla stanovena bloková zapojení obou zařízení. Pro obě části zařízení byly zvoleny potřebné součástky. Dále jsou v práci popsána kritéria výběru použitých součástek, včetně výpočtů důležitých hodnot.

Třetí část se zabývá softwarovým vybavením řídicí a výkonové části generátoru. Jsou popsány vnitřní programové bloky včetně stanovení blokového chodu programu. Funkce vybraných bloků jsou rozepsány detailněji.

Poslední část práce popisuje uživatelské zapojení a ovládání zařízení. Také jsou zde shrnuty dosažené výsledky a naměřené hodnoty.

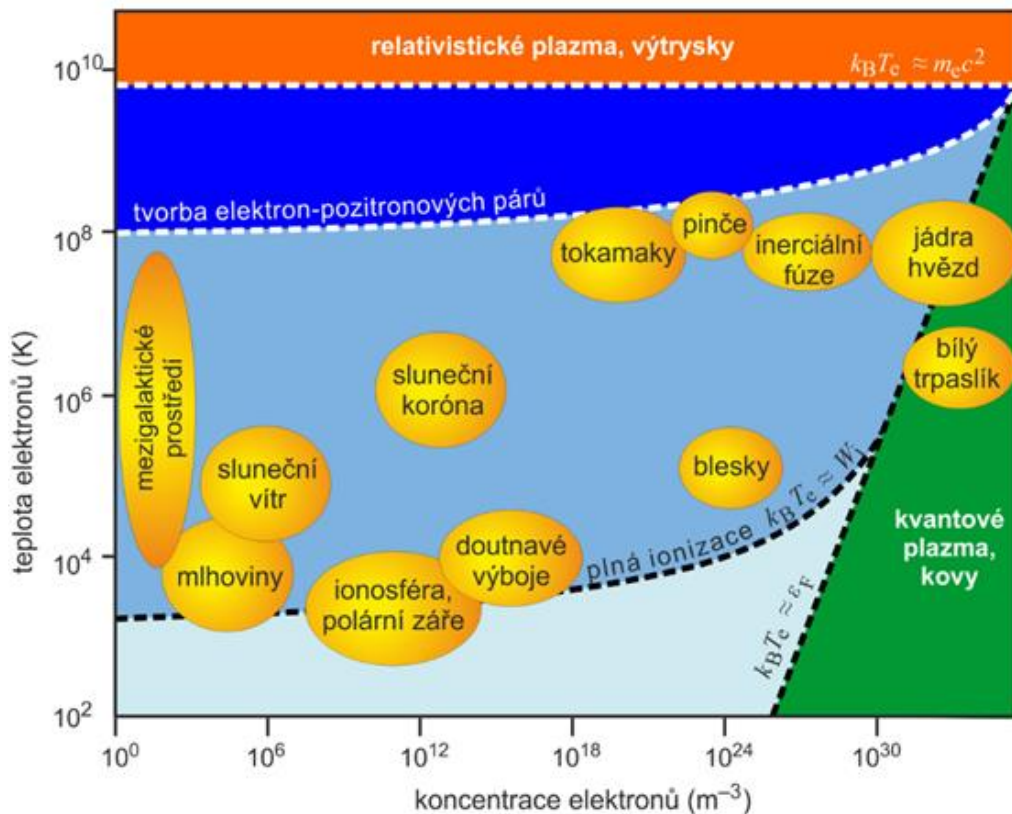
# 1. PLAZMA

Látky můžeme dělit dle jejich tepelné energie do čtyř skupenství, a to do pevného, kapalného, plynného a plazmatického. Plazmatický stav látky má největší obsah tepelné energie. Plazmatický stav látky je takový stav, při kterém se volně nabitě částice vyskytují v látce v takovém množství, že znatelně ovlivňují její fyzikální vlastnosti. Látka v plazmatickém stavu má stejný počet kladných a záporných částic, mezi kterými vzniká vzájemné elektromagnetické působení. [1]

## 1.1 Vznik

Plazmatický stav látky může mít několik mechanismů.

- Ionizace kosmickým zářením  
Příčinou tohoto druhu vzniku plazmatu je kosmické záření, jehož hlavním zdrojem je Slunce. S rostoucí vzdáleností od Země roste elektronová hustota. Ionizace lze dosáhnout i absorbováním fotonu, pokud kvantum záření bude mít větší energii, než je ionizační energie. [2]
- Ionizace v elektrickém poli  
Vlivem silného elektrického pole dochází v plynech k nárazové ionizaci. Tento mechanismus vzniku plazmatu nastává pouze pokud získá elektron takovou energii, aby byl svojí srážkou s atomem schopen uvolnit z něj elektron. Postupné zvyšování koncentrace elektronů v plynu vede k nárazové ionizaci a k elektrickému výboji. [2]
- Ionizace zahřátím  
Látku lze ionizovat i pomocí vysoké teploty. Při dosažení teploty řádově  $10^4$  K je tepelná energie elektronů dostatečně vysoká a dochází ke srážkové ionizaci. [2]
- Ionizace tlaková  
Pokud je látka stlačena do takové míry, že poloměr orbitů valenčních elektronů je větší než vzdálenost atomů, tak může dojít k ionizaci i za pokojové teploty. [2]



Obrázek 1: Druhy plazmatu v závislosti na koncentraci a teplotě elektronů [3]

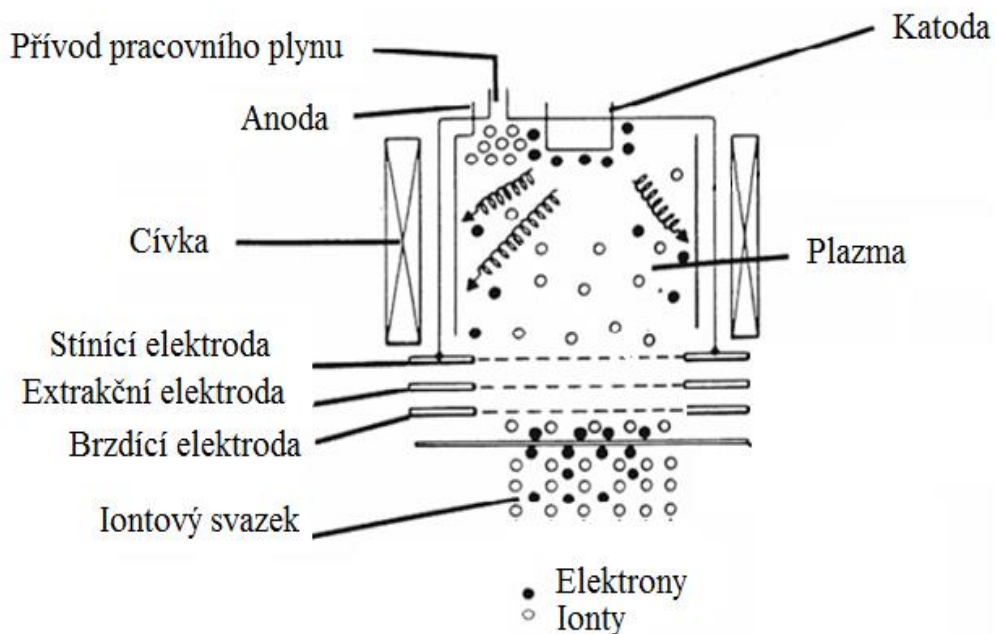
## 1.2 Vlastnosti

Plazma je skupenství, ve kterém dochází ke kolektivnímu chování částic. To znamená, že pohyb částic vyvolá i změna stavu plazmatu ve vzdálených oblastech. Tyto vlastnosti platí pouze pokud má plazma dostatečně velkou hustotu. Při nízkém tlaku plynu na sebe působí částice pouze při vzájemných srážkách. Plazma má v každém místě přibližně stejný počet kladných i záporných nábojů, tento jev se nazývá kvazi-neutralita. Plazma obsahuje volné elektrony, z toho vyplývá, že je elektricky vodivé a je ovlivnitelné magnetickým polem. Mezi další důležitou vlastnost plazmatu (nízkoteplotního) patří nízká teplota iontů a neutrálních částic při vysoké teplotě elektronů. Tato vlastnost umožňuje pomocí elektronů opracovávat materiály při malé spotřebě energie. [4]

Dalším důležitým pojmem je Debyeova délka. Tato délka udává vzdálenost, do které jsou náboje vnořené do plazmatu vnímány jako nestíněné. Jelikož je plazma elektricky neutrální a obsahuje kladné a záporné částice, po vložení kladně nabitěho tělesa dojde k částečnému odstínění jeho náboje. Elektrony jsou přitahovány ke kladně nabitěmu tělesu, a naopak kladné ionty odpuzovány. Elektrony s menší energií jsou zachyceny elektrickým polem tělesa a vytvoří vrstvu elektronů, která odstíní pole. Vzdálenost, kde pole zesláblo na  $1/e$  své maximální hodnoty, nazýváme Debyeova délka. [5]

### 1.3 Použití

Plazma má v oblasti materiálového inženýrství velmi široké uplatnění. Využívá se především pro nanášení tenkých vrstev, iontovou implantaci, iontové leptání a obrábění. Většinou je plazmatu využito pro ionizaci pracovního plynu. Základní součásti zdroje iontů jsou pracovní elektrody anoda a katoda, mezi kterými vlivem vysokého elektrického pole vzniká plazma. Do vakuované komory s tímto plazmatem je přiváděn pracovní plyn. Po ionizaci plynu jsou kladné ionty urychleny pomocí extrakčních elektrod ven ze zařízení. Mezi základní zdroje iontů patří Sideniův a Freemanův zdroj. Dalším zdrojem je Kaufmanův zdroj. Ten navíc používá magnety pro prodloužení dráhy elektronu, a tím dochází ke zvýšení pravděpodobnosti ionizace pracovního plynu. [6]

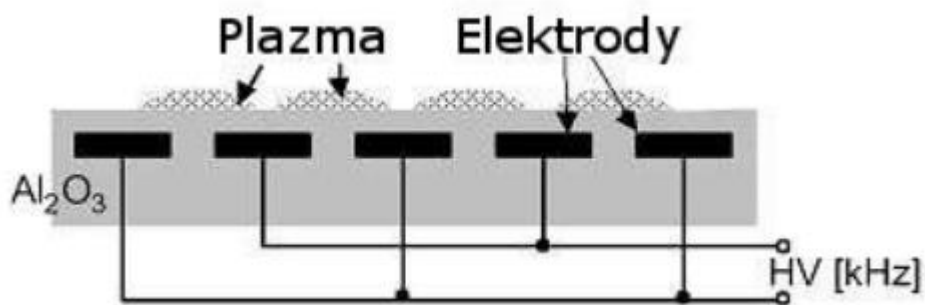


Obrázek 2: Kaufmanův zdroj iontů [7]

Iontovým naprašováním lze vytvářet velice tenké vrstvy. Principem je urychlování iontů z iontového zdroje směrem k terči. Terč je tvořen materiálem, který bude odprašován. Odprašené atomy materiálu dopadají na naprašovaný povrch. Tato technologie je označována jako sekundární naprašování. Primární způsob spočívá přímo v nanášení vrstev ionizovaného materiálu. Pokud bude iont urychlen velkou rychlostí, pak lze dosáhnout takzvané iontové implantace. Při iontové implantaci jsou ionty vlivem vysoké energie zabudovány do struktury látky. Mezi další uplatnění plazmy patří plazmochemické zpracování povrchů, jako je leptání, modifikace a depozice. [6]

Plazmový generátor, který bude navržen, je určen k buzení dielektrického bariérového výboje s koplanárním uspořádáním elektrod (dále značeno anglickou zkratkou DCSBD odvozenou z názvu Diffuse Coplanar Surface Barrier Discharge).

Koplanární uspořádání elektrod se vyznačuje elektrodami zapařenými do materiálu s dielektrickými vlastnostmi. Vzhledem k tomu, že elektrody nejsou vystaveny přímému kontaktu s plazmatem, je zaručena dlouhá životnost elektrod. Životnost elektrod při povrchovém výboji dosahuje pouze cca 100 hodin, což je mnohonásobně méně než u koplanárního uspořádání. Další výhodou je, že nedochází ke kontaminaci upravovaného materiálu odprášeným materiálem elektrod.



Obrázek 3: Uspořádání DCSBD výbojky [8]

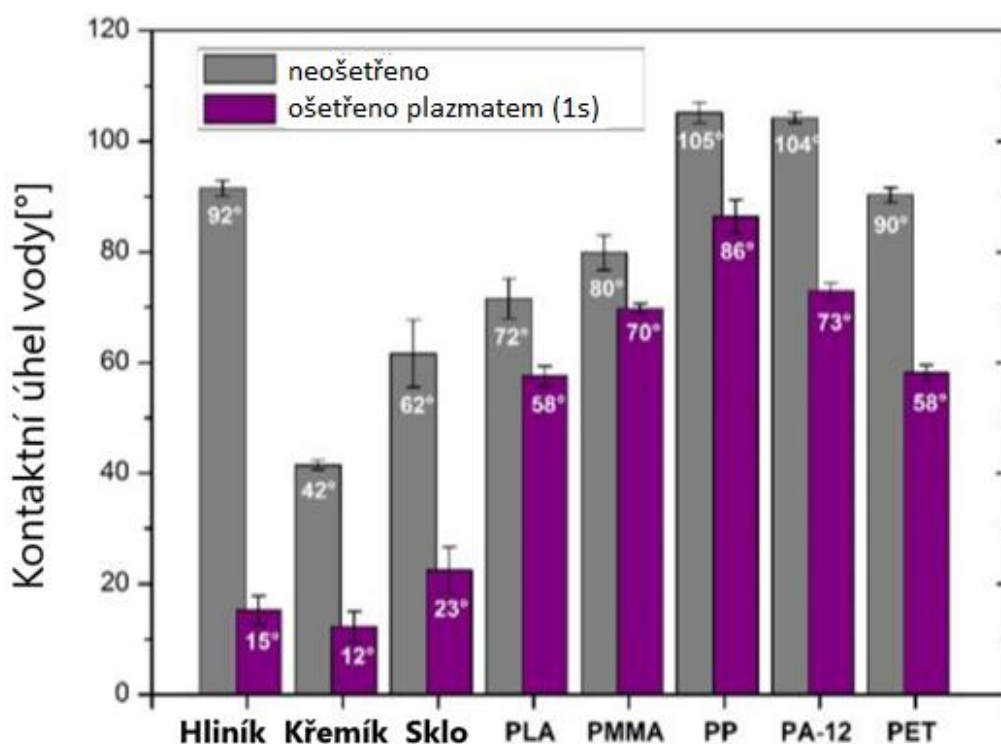


Obrázek 4: Fotografie DCSBD výbojky [9]

Teplota plazmatu při difuzně koplanárním bariérovém výboji je méně než 100 °C v závislosti na příkonu. Takto vzniklé plazma disponuje vysokou výkonovou hustotou, která je až 100 W/cm<sup>3</sup>. Díky těmto vlastnostem lze úpravy plazmatem použít i na teplocitlivé materiály. Již při krátké expozici (1 sec) dochází k výrazné změně smáčivosti exponovaného materiálu. Změny smáčivosti ošetřených i neošetřených materiálů jsou znázorněny na obrázku 5. [10]

Pro měření změny vlastností plazmatem opracovaných látek se využívá několik měřících metod. Jednou skupinou měřících metod jsou metody založené na rastrovacím elektronovém mikroskopu (SEM) a s ním spojená energiově disperzní spektroskopie (EDX) a rentgenová fotoelektronová spektroskopie (XPS). Dále se využívá infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR), Washburnova metoda nebo

luminiscenční metoda. Nejrychlejší a nejlevnější metodou je ovšem měření kontaktního úhlu, která stačí pro základní analýzu fyzikálně chemických změn vlastností opracovaného materiálu. Metoda kontaktního úhlu je také vhodná pro stanovení maximální doby mezi ošetřením materiálu plazmatem a dalším technologickým krokem při zpracování materiálu. Úpravy materiálů pomocí DCSBD jsou v současné době velice populární a mají nesporné výhody oproti chemickým procesům, při kterých je nutné manipulovat, skladovat a ekologicky likvidovat chemické látky. Další výhodou je technologické zjednodušení úpravy povrchu materiálů. [9]



Obrázek 5: Změny kontaktních úhlů vody pro různé materiály před a po ošetření plazmatem [10]

## 2. MIKROKONTROLÉRY

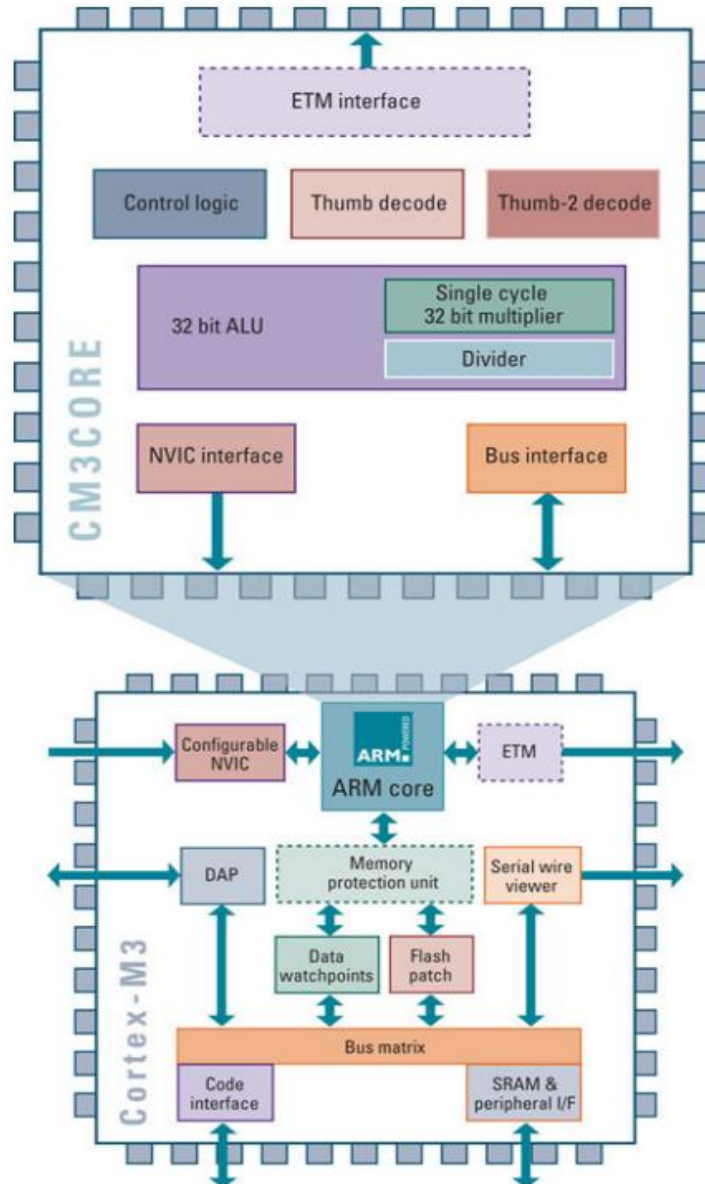
Pod pojmem mikrokontrolér je označen víceúčelový integrovaný obvod, který za pomoci instrukcí zpracovává data ze vstupu a zobrazuje výsledky na výstupu.

Mikrokontroléry můžeme dělit podle celé řady kritérií. Mezi ty nejzákladnější patří vnitřní architektura, délka operandu v bitech a pracovní frekvence. Pojem délka operandu udává šířku v bitech, která je zpracována v jednom kroku.

Mikrokontroléry se nejčastěji rozdělují na osmi, šestnácti a třiceti dvou bitové. Osmi bitové mikrokontroléry se používají pro méně náročné aplikace, jako je spotřební elektronika. Pro složitější aplikace jako např. tablety, mobilní telefony a jiná zařízení využívající barevné LCD displeje se nejčastěji používají šestnácti nebo třiceti dvou bitové procesory. Práce je orientována na 32bitové procesory s ARM architekturou od společnosti STM, proto budou následující informace zaměřeny tímto směrem.

## 2.1 Vnitřní bloky mikrokontrolérů

Blokové uspořádání jádra ARM Cortex M3 u mikrokontrolérů od společnosti ST Microelectronics je zobrazeno na obrázku 6.



Obrázek 6: Blokové schéma jádra mikrokontroléru ARM Cortex M3 [11]

### 2.1.1 Jádro a paměti

Jádro je jeden z nejdůležitějších bloků mikrokontroléru. Slouží ke zpracování informací. Jádra můžeme dělit z několika hledisek. Jedním z nich je architektura, která může být buď Harvardského, nebo Von Neumanova typu. Charakteristickým znakem Harvardské architektury je rozdělení paměť programu od datové paměti. Mezi základní bloky jádra patří aritmeticko-logická jednotka, řadiče, instrukční sady a paměti pro data.

## Architektura RISC

Architektura RISC (Reduced Instruction Set Computing) využívá vysoce optimalizovanou sadu instrukcí. Tyto instrukce lze provádět v jednom hodinovém cyklu. Znakem RISC architektury jsou instrukce *load* a *store*. Oproti CISC (Complex Instruction Set Computing) architektuře využívá RISC, díky své malé instrukční sadě, menšího počtu tranzistorů. Proto je možné toto volné místo vyplnit registry pro všeobecné účely. Další výhodou RISC architektury je tzv. Pipelining. Tato funkce umožňuje procesoru používat různé části procesoru na různé části instrukcí. Tím se dosahuje většího počtu funkcí za stejný čas. [12]

## Architektura ARM

Architektura ARM (Advanced RISC Machine) je nejpočetnější architekturou mikrokontrolérů. Jde o vylepšenou nebo rozšířenou RISC architekturu, aby bylo dosaženo nízké spotřeby, vysokého výkonu a malé velikosti jádra. Výhody mikrokontrolérů STM32 založených na jádře ARM jsou:

- velmi nízká spotřeba a vysoký výpočetní výkon - jsou tedy vhodné pro mobilní aplikace, které mají omezené možnosti napájení
- volně dostupné softwarové vybavení pro programování těchto mikrokontrolérů
- i přes napájení napětím 3,3 V lze na většinu vstupů přivést logickou úroveň 5 V bez potřeby přizpůsobení napěťových úrovní
- obsahují velké množství periférií (USART, I2C, USB a jiné)

Architektura ARM se dělí podle konkrétního zaměření mikrokontrolérů. První skupinou jsou Cortex-A (aplikační procesory). Tyto procesory mají vysoký výpočetní výkon při optimální spotřebě elektrické energie. Používají se pro průmyslové aplikace, v automobilovém průmyslu, lékařství a pro datová úložiště. [13]

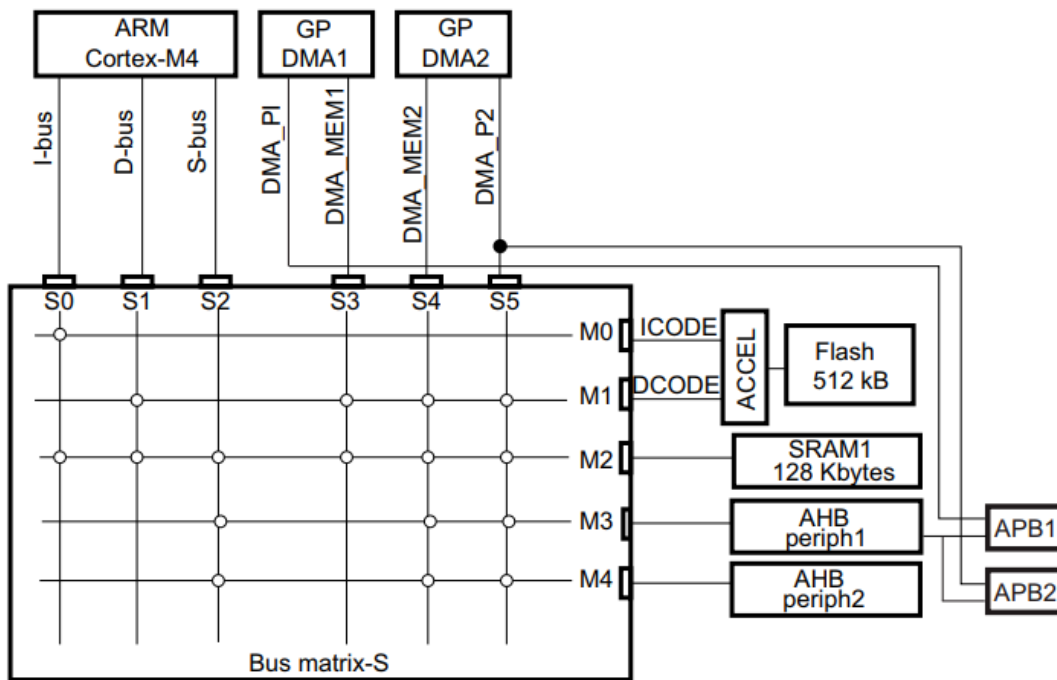
Další skupinou jsou Cortex-R (procesory s podporou operací v reálném čase). Jsou zaměřeny na zpracování dat v reálném čase. Umožňují velice rychlá přerušení. Používají se pro zpracování signálu z kamer, pro lékařské přístroje a pro automobilový průmysl. [13]

Poslední velkou skupinou jsou Cortex-M. Tyto mikrokontroléry nabízejí efektivní a snadnou možnost ovládnutí a zpracování signálu. Mají nízkou spotřebu a jejich cena je dostupná. Obsahují instrukční sadu Thumb 2, která obsahuje 16 a 32bitové instrukce. Díky tomu bylo možné dosáhnout větší hustoty kódu společně s výhodami ARM. [13]

Dalším důležitým blokem mikrokontrolérů je paměť SRAM (Static Random Access Memory). Tato paměť slouží jako operační paměť v mikrokontroléru. Výhodou zmíněné paměti je velká rychlost, proto se využívá pro přístup k neustále používaným informacím. Vzhledem k ceně této paměti na čipu, je její velikost omezena. Velikost paměti záleží na konkrétní aplikaci. Pokud bude potřeba pracovat s velkým množstvím dat, je nutné se při výběru vhodného mikrokontroléru řídit právě velikostí paměti.

Kromě SRAM paměti obsahuje mikrokontrolér také Flash paměť, která může být díky své nízké ceně podstatně větší než SRAM. [13]

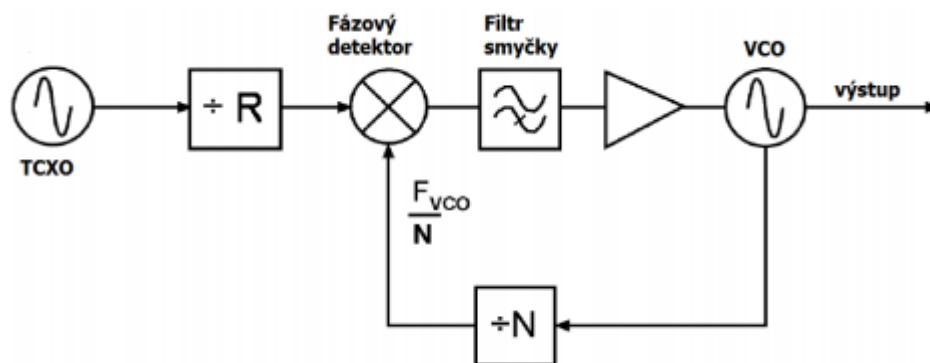
Většina mikrokontrolerů STM32 má k dispozici přímý přístup do paměti DMA (Direct Memory Access), který umožňuje výměnu dat s okolím nebo periferiemi, zatím co procesor vykonává jinou činnost. Jedná se o přenos dat mezi SRAM pamětí, pamětí Flash a registrů periferií bez použití jádra. Přenos informací za pomoci přímého přístupu do paměti lze provádět oběma směry. Tyto vlastnosti jsou možné díky zapojení AHB sběrnice dohromady s více sběrnicemi viz obrázek 7. Díky této sběrnici dokáže běžet několik periferií současně. [14]



Obrázek 7: Multi-AHB sběrnice STM32F411 [15]

### 2.1.2 Zdroje hodinového signálu

Jako zdroj hodinového signálu lze použít jak interní oscilátor, tak externí. Pro řízení hodinového signálu se využívá PLL. Zkratka PLL je v překladu smyčka fázového závěsu. Toto zařízení slouží k automatickému ladění frekvence a má široké uplatnění v elektronice.

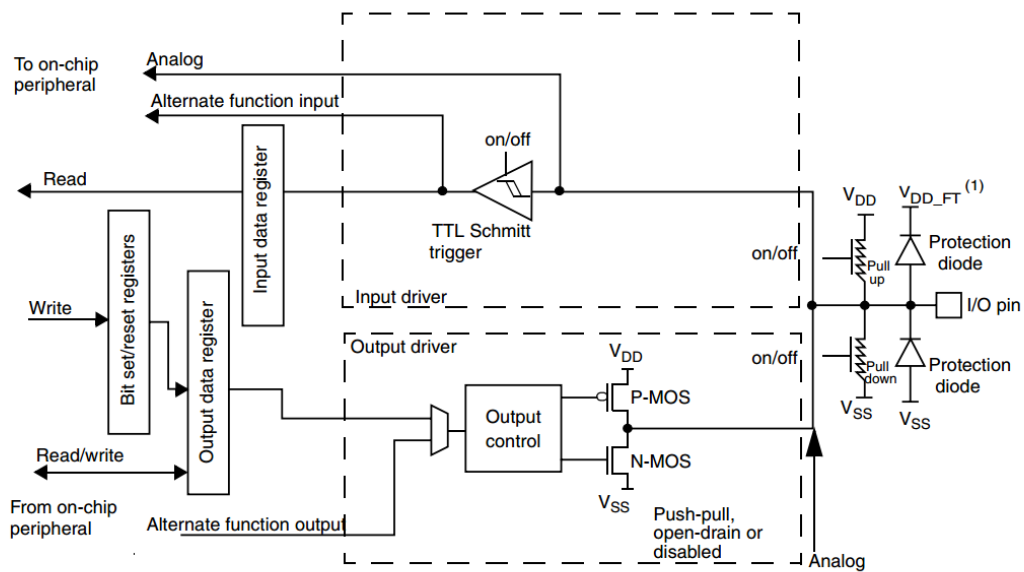


Obrázek 8: Smyčka fázového závěsu [16]

V mikrokontrolérech PLL slouží jako zdroj přesného hodinového signálu pro procesor. Na PLL u mikrokontrolérů navazuje několik volitelných děliček a násobiček signálu. Pomocí těchto prvků lze zvýšit nebo snížit frekvenci, která je odvozena od frekvence hodinového krystalu. Díky tomu je umožněno nastavovat u mikrokontrolérů různou frekvenci pro jádro, periferie i časovače. Kromě hodinového signálu pro jádro a periferie se také často používá RTC (Real Time Clock). Používá se jako zdroj hodinového reálného času. Důvodem používání takto rozsáhlého nastavení hodinového signálu je možnost některé periferie provozovat s nízkou rychlostí, což znamená úsporu energie. [16]

### 2.1.3 Porty GPIO

Pomocí GPIO (General Purpose Input/Output) mikrokontroléry komunikují s okolím. Blokové schéma jednoho portu je zobrazeno na obrázku 9. Port může být nastaven do několika režimů, které lze dynamicky přepínat. Mezi dva základní režimy patří nastavení, zda je port vstup, nebo výstup. V obou režimech je možno programově připojit k pinu rezistor, který je přizemněný (pull-down) nebo připojen na napájecím napětí (pull-up). Dalším parametrem při nastavení je výstupní mód push-pull, nebo open drain. Kromě těchto základních funkcí umožňují porty vyvolat přerušení, a to na vzestupnou či sestupnou hranu, nebo všeobecně při změně úrovně. Dalším nastavením lze portu přiřadit některou z alternativních funkcí. Podstatným parametrem je u GPIO jeho rychlost. [15]



Obrázek 9: Blokové schéma GPIO (STM32F411) [15]

#### 2.1.4 A/D a D/A převodníky

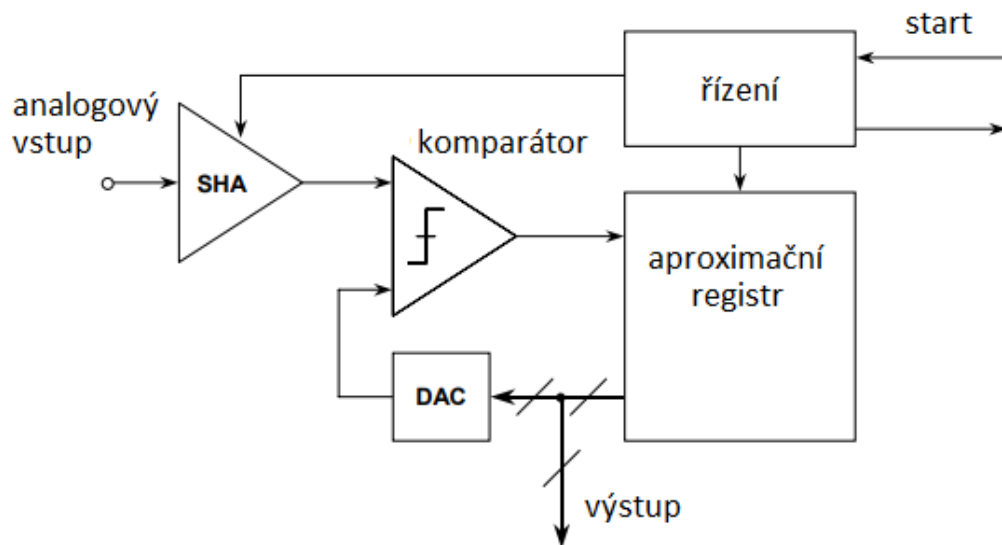
Analogově digitální převodníky, jak z názvu vyplývá, převádí analogový signál na digitální. Důvodem převodu je, že digitální signál se dá lépe zpracovat a přenášet na velké vzdálenosti bez zkreslení signálu.

Převod analogové hodnoty na digitální se děje ve dvou základních krocích. Prvním krokem je vzorkování. Při vzorkování se „označí“ místa, která budou převedena do digitální podoby. U vzorkování je důležité dodržet pravidlo (Nyquistův-Shannonův teorém), že vzorkovací frekvence musí být nejméně dvojnásobná než nejvyšší frekvence převáděného analogového signálu. Není-li zmíněné pravidlo dodrženo, dochází k aliasingu, což vede k poškození převáděného signálu. Jelikož nelze neustále zvyšovat vzorkovací frekvenci, je zpracovaný analogový signál nejprve filtrován dolní propustí tzv. antialiasingovým filtrem. [17]

Po vzorkování signálu následuje kvantování. Amplituda signálu je rozdělena po krocích, jejichž počet odpovídá počtu bitů A/D převodníku. Při kvantování se odečte hodnota amplitudy signálu ve vyvzorkovaných místech. V tomto kroku dochází k chybě kvantování, protože vzorky, které neleží přesně v některé z kvantizačních úrovní, jsou přiřazeny k nejbližší možné úrovni. Velikost chyby kvantování závisí na rozlišení A/D převodníku.

Mezi nejzákladnější druhy A/D převodníků patří paralelní převodníky, převodníky s postupnou aproximací, integrační převodníky a převodníky sigma-delta.

Důležité parametry při výběru A/D převodníku jsou vzorkovací frekvence, rozlišení, napájecí napětí a druh komunikačního rozhraní. [17]

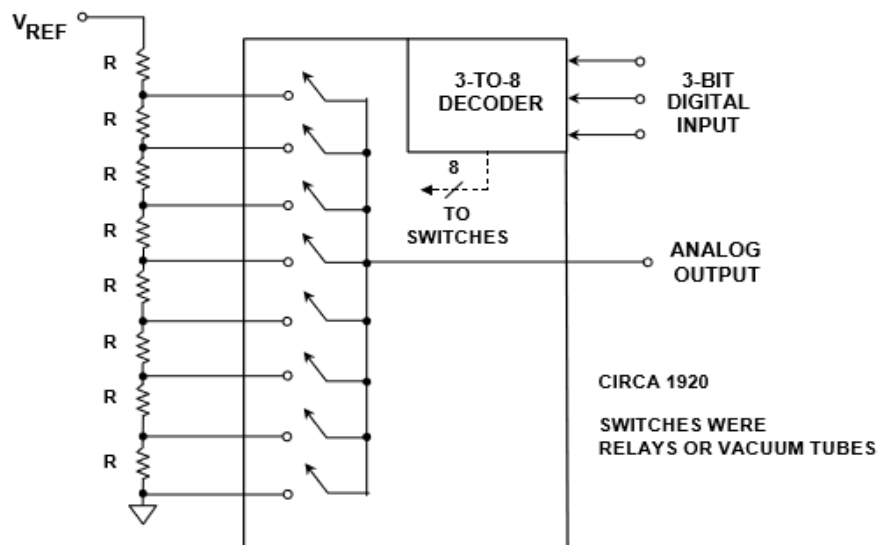


Obrázek 10: Blokové schéma aproximačního A/D převodníku [18]

D/A převodníky převádějí číselně vyjádřenou hodnotu na analogovou hodnotu. Existuje několik principů převodu digitálního signálu na analogový signál. Mezi dva základní druhy patří převodníky s rezistorovou sítí a nepřímé převodníky využívající jiných principů než rezistorové sítě. Na obrázku 10 je znázorněno blokové zapojení A/D převodníku s postupnou aproximací, který je často použit v mikrokontrolérech. [18]

Mezi základní vlastnosti D/A a A/D převodníků patří:

- rozlišovací schopnost - počet možných úrovní
- maximální rychlost převodu
- přesnost převodu
- napájecí napětí



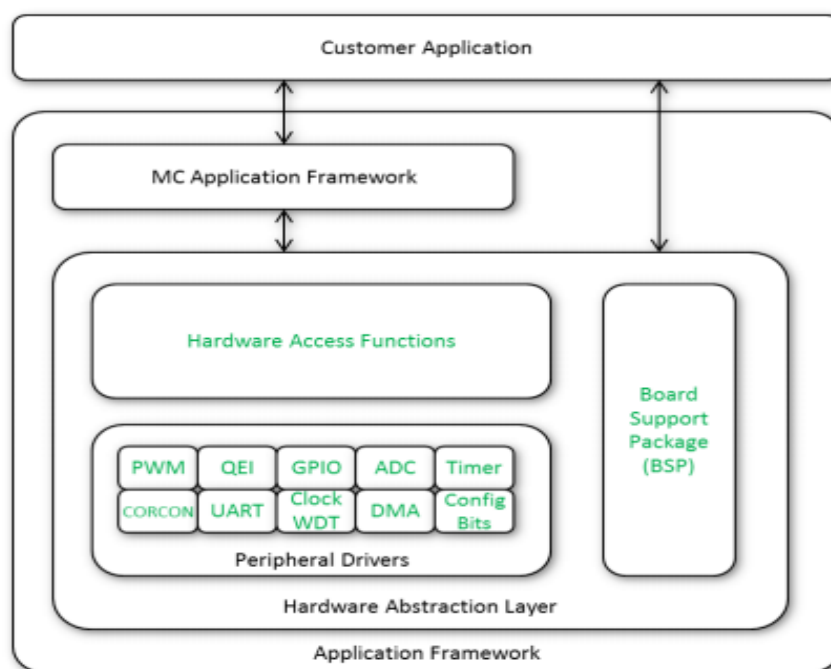
Obrázek 11: Základní princip D/A převodníků [18]

### 2.1.5 Čítače a časovače

Čítače a časovače jsou důležitou součástí mikrokontrolérů. U mikrokontrolérů STM32 jsou čítače velice propracované. Základní funkce čítače je jeho inkrementace vyvolaná hodinovým signálem. Při dosažení přednastavené hodnoty vyvolá čítač přerušeni běhu programu a následně je vykonána předem definovaná akce mikrokontroléru. Prvním blokem čítače je dělička hodinového signálu. Ta je důležitá především pro počítání delších časů na úrovni milisekund. Dalším blokem je samotný čítač. V něm se při příchodu hodinového signálu přičítá nebo odečítá hodnota, jež je poté porovnávána s porovnávacími registry, které při shodě vyvolají např. přerušeni, aktivují výstup atd. Každý čítač má vždy několik kanálů, které obsahují tyto porovnávací registry. Čítače podporují také možnost připojit externí zdroje signálu a celou řadu dalších funkcí.

## 2.2 Programovací vrstva HAL

Programovací vrstva HAL (Hardware Abstraction Layer) je vrstva umožňující aplikacím fungovat bez ohledu na typ základního hardwaru. Díky tomu je možné program používat mezi podskupinami STM32. HAL vrstva umožňuje jednoduše ovládat různé periferie mikrokontroléru jako například komunikaci s okolím pomocí různých komunikačních protokolů, nebo zpracovávat externí přerušeni. HAL je mezivrstva mezi nižší vrstvou programování, kde bylo nutné zapisovat data do konkrétních registrů, a vyšší aplikační vrstvou. [19]



Obrázek 12: Struktura HAL [19]

### 2.3 Srovnání mikrokontrolérů ARM Cortex-M

Mikrokontroléry STM32 se dají rozdělit do dvou základních skupin. První skupinou jsou mikrokontroléry s velmi nízkou spotřebou označeny písmenem „L“. Tyto procesory se používají pro bateriemi napájené aplikace. V dynamickém chodu mají spotřebu řádově 100  $\mu\text{A}/\text{MHz}$ . Ovšem v režimu nejhlubšího spánku dosahují proudového odběru pouze 30 nA. [13]

Další skupinou jsou výkonnější procesory s označením „F“. Výhodou oproti skupině „L“ je nízká cena a vysoký výkon. Mají bohatší výběr dostupných periférií. Možnosti této skupiny mikrokontrolérů budou popsány důkladněji, jelikož HMI zařízení nebude napájeno pomocí baterií, ale z elektrické sítě a bude založeno právě na této skupině mikrokontrolérů. [13]

Tabulka 1: Porovnání vlastností jednotlivých řad mikrokontrolérů STM32F [13]

Označení	Jádro	Paměť	Další vlastnosti
STM32F0	ARM Cortex-M0 s maximální taktovací frekvencí 48 MHz	SRAM od 4 do 32 kB Flash od 16 do 256 kB	Napájecí napětí 1,8 až 3,6 V
STM32F1	ARM Cortex-M3 s taktovací frekvencí až 72 MHz	SRAM od 4 do 96 kB Flash od 16 do 256 kB	Napájecí napětí 2,0 až 3,6 V Ethernet, CAN, USB
STM32F2	ARM Cortex-M3 s taktovací frekvencí 120 MHz	SRAM od 64 do 128 kB Flash od 128 do 1024 kB	4KB SRAM zálohovány externí baterií
STM32F3	ARM Cortex-M4F s taktovací frekvencí 72 MHz	SRAM od 16 do 80 kB Flash od 32 do 512 kB	Precizní 16-bit A/D převodník 12-bit D/A převodník
STM32F4	ARM Cortex-M4F s taktovací frekvencí 84 až 180 MHz	SRAM od 128 do 384 kB Flash od 256 do 2048 kB	Napájecí napětí 1,8 až 3,6 V I2C, USB, SPI, USART
STM32F7	ARM Cortex-M7 s taktovací frekvencí až 216 MHz	SRAM až 512 kB L1 cache (až 16 kB) Flash od 512 do 2048 kB	Napájecí napětí 1,8 až 3,6 V I2C, USB, SPI, USART

Řada F0 pracuje s 32bitovým mikrokontrolérem a je velice oblíbená díky své nízké ceně. Používá se pro méně výkonově náročné aplikace. První mikrokontrolér s ARM od společnosti ST byl z řady F1. Díky snadné dostupnosti vývojových DPS a široké komunitě lidí používajících tuto řadu mikrokontrolérů, byla tato řada nejprodávanější. Řada F2 byla založena na ARM Cortex-M3 s ART akcelerátorem. Tato řada byla poprvé použita pro „inteligentní“ hodinky. Mikrokontroléry z řady F3 jsou komerčně používány pro různé robotické hračky. Řada F4 obsahuje největší skupinu mikrokontrolérů. Používá se pro multimediální aplikace, některé z mikrokontrolérů obsahují podporu LCD displejů. Poslední řada F7 obsahuje nejvýkonnější skupinu mikrokontrolérů. Používá se pro multimediální aplikace, některé z mikrokontrolérů obsahují podporu LCD displejů. [13]

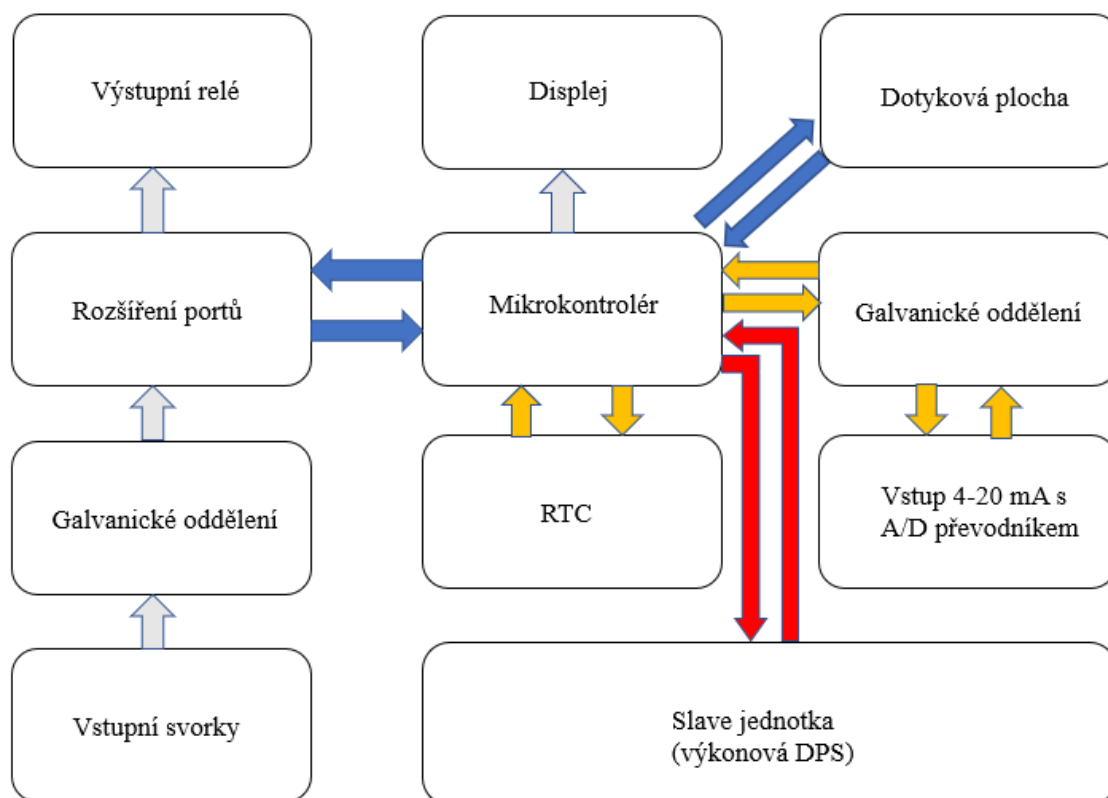
### 3. NÁVRH PROTOTYPU

Před výběrem základních komponentů pro stavbu HMI zařízení je nutné mít k dispozici seznam funkcí celého zařízení. Proto byl zhotoven návrh řídicí části HMI. HMI pro plazmové generátory musí splňovat následující požadavky:

- generování řídicích impulsů s proměnným kmitočtem pro spínání výkonových tranzistorů silové části
- měření příkonu dodávaného do výboje (soustava vn transformátor-elektroda)
- měření napětí meziobvodu
- spínání relé k bezpečnému nabíjení kapacitoru meziobvodu
- měření teploty
- signalizace provozních a poruchových stavů pomocí relé
- připojení externích spínačů
- řízení požadovaného výkonu proudovou smyčkou 4-20 mA
- režim změny kmitočtu k regulaci na požadovaný výkon
- plynulé změny kmitočtu při změně výkonu (rampy)
- měření, zobrazení a nastavení parametrů na displeji

#### 3.1 Master jednotka

Hlavním úkolem master jednotky je ovládání a nastavení všech parametrů pro *slave* jednotku. Nastavení parametrů bude probíhat za pomoci dotykového LCD displeje. Další úkoly *master* jednotky budou uchovávat nastavené parametry, umožňovat nastavení výstupního výkonu proudovou smyčkou 4-20 mA, ovládání pomocí externích tlačítek, signalizovat stavy provozní a poruchové pomocí reléových výstupů a komunikovat se *slave* jednotkou.



Obrázek 13: Blokové uspořádání řídicí (master) jednotky

Na obrázku 13 je vidět blokové uspořádání master jednotky. Komunikace mikrokontroléru s rozšiřovačem portů a ovladačem dotykové plochy bude probíhat přes SPI komunikaci (modré šipky). Oranžové šipky reprezentují I2C komunikaci. Po této komunikaci bude probíhat výměna dat s RTC a A/D převodníkem proudové smyčky. Červené šipky zobrazují komunikaci UART se slave jednotkou.

### 3.1.1 Mikrokontrolér

Volba mikrokontroléru je klíčová pro správný a rychlý chod celého zařízení. Do master jednotky byl vybrán mikrokontroler STM32F411RE. Tento mikrokontroler pracuje se 32bitovým jádrem ARM Cortex M4 na taktovací frekvenci 100 MHz. Od maximální frekvence je odvozená rychlost procesoru, která je 1,25 DMIPS/MHz. Ta je důležitá především pro plynulé vykreslování obrazu na displej, který bude mít rozlišení 800 x 480 pixelů s 16bitovou barevnou hloubkou. Mikrokontroler obsahuje 512 kB FLASH a 128 kB SRAM paměti. Dalším kritériem pro výběr tohoto mikrokontroleru bylo dostatečné komunikační rozhraní. Pro komunikaci s externími integrovanými obvody bude zapotřebí rozhraní I2C, SPI a UART. Těchto komunikačních periférií má mikrokontroler hned několik. Dalším důležitým prvkem jsou čítače/časovače. Pomocí nich lze přesně odečítat čas bez nutnosti zatížení jádra. Využití najdou například

v komunikačních protokolech. Dále musí mikrokontroler disponovat dostatečným množstvím pinů pro připojení všech externích obvodů. [15]

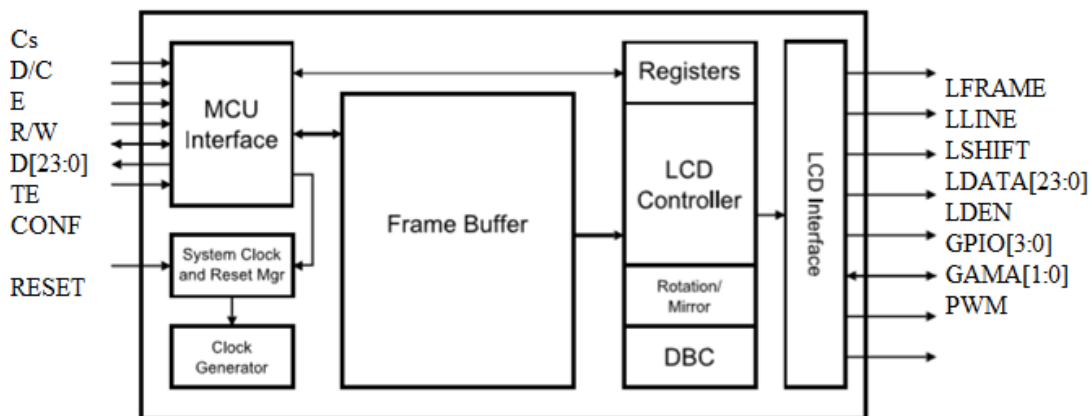
Tabulka 2: Parametry STM32F411 [15]

Napájecí napětí	1,7 až 3,6	[V]
Bitová šířka	32	[bit]
Flash paměť	512	[kB]
SRAM	128	[kB]
Maximální frekvence	100	[MHz]
DMA	2x8 kanálů	[-]
Časovače	7x obecný, 1x rozšířený	[-]
I2C	3x	[-]
USART	3x	[-]
SPI	5x	[-]
USB	1x	[-]
ADC	1x 12 bit, 16 kanálů	[-]
RTC	1x	[-]

### 3.1.2 Displej a dotyková plocha

Mezi klíčové komponenty pro HMI patří především displeje. V závislosti na složitosti zařízení a počtu zobrazovaných parametrů je potřeba vhodně zvolit velikost a počet bodů LCD displeje. Dalším důležitým parametrem je kontrast a barevná hloubka. Při výběru je potřeba také myslet na způsob výměny dat s displejem.

HMI pro generátor plazmatu bude zobrazovat a nastavovat větší množství informací, z těchto důvodů byl pro tuto aplikaci vybrán barevný 7palcový LCD displej s rozlišením 800 x 480 bodů. Tento displej řídí řadič SSD1963. S řadičem probíhá paralelní komunikace v navrhovaném řešení po 16 vodičích (16bitová barevná hloubka). Taktéž je potřebné zapojit hodinový signál, signál reset a napájecí napětí. Pro správnou funkci je potřeba při každé inicializaci zařízení nastavit v řadiči informace o použitém LCD panelu. Kromě těchto základních informací je nutné nastavit i další parametry jako například datový formát, rychlost zasílání dat atd. [20]

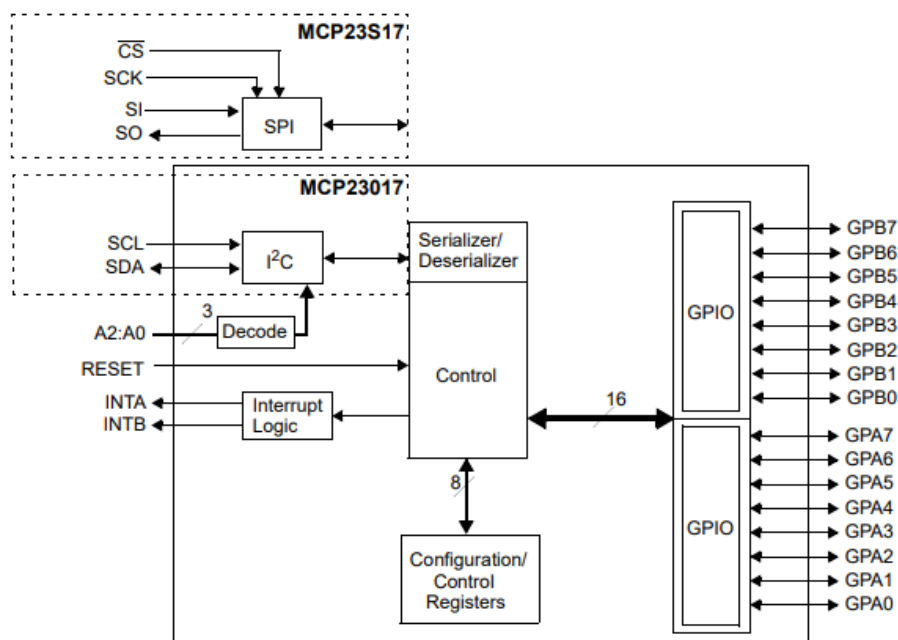


Obrázek 14: Blokové schéma LCD řadiče SSD1963 [20]

Společně s řadičem jsou na DPS potřebné napájecí zdroje pro LCD displej. Tento displej je vybaven dotykovou odporovou vrstvou napojenou na řadič XPT2046. Integrovaný obvod XPT2046 slouží k převodu analogového signálu z dotykového odporového displeje na signál digitální. Základem tohoto obvodu je A/D převodník a napěťová reference. [21]

### 3.1.3 Vstupy a výstupy

Master jednotka bude muset ovládat výstupní relé a také číst externí vstupní signály. Vzhledem k velkému množství potřebných vstupních/výstupních pinů byl zvolen 16bitový portový expandér MCP23S17, který bude komunikovat s mikrokontrolérem přes SPI sběrnici. Portový expandér má k dispozici dvě brány po 8 bitech, které mohou být nakonfigurovány jako vstupy či výstupy. Obvod dokáže signalizovat změnu na vstupu pomocí pinů INTA a INTB. Toho bude využito pro přerušení vykonávaného procesu mikrokontroléru a obsluhu portového expandéru. Blokové schéma portového expandéru je na obrázku 15.

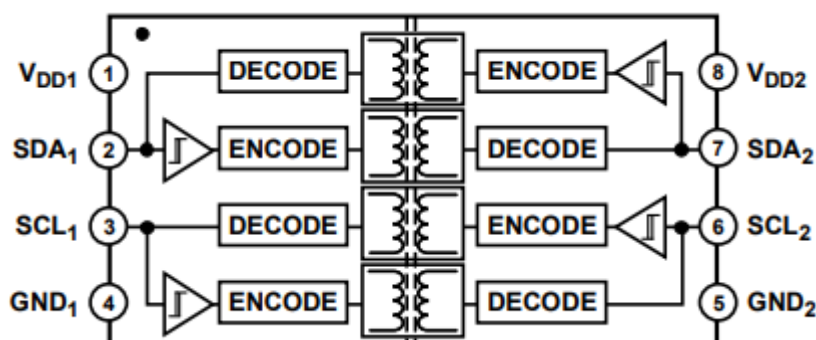


Obrázek 15: Blokové schéma portového expandéru MCP23S17 [22]

Porty GPIOB se využijí k buzení výstupních relé. Jelikož je u portového expandéru omezen výstupní proud, bude nutné vřadit mezi GPIOB a relé obvod tranzistorového pole ULN2003. Jako výstupní relé budou použity relé firmy Omron s označením G6RN.

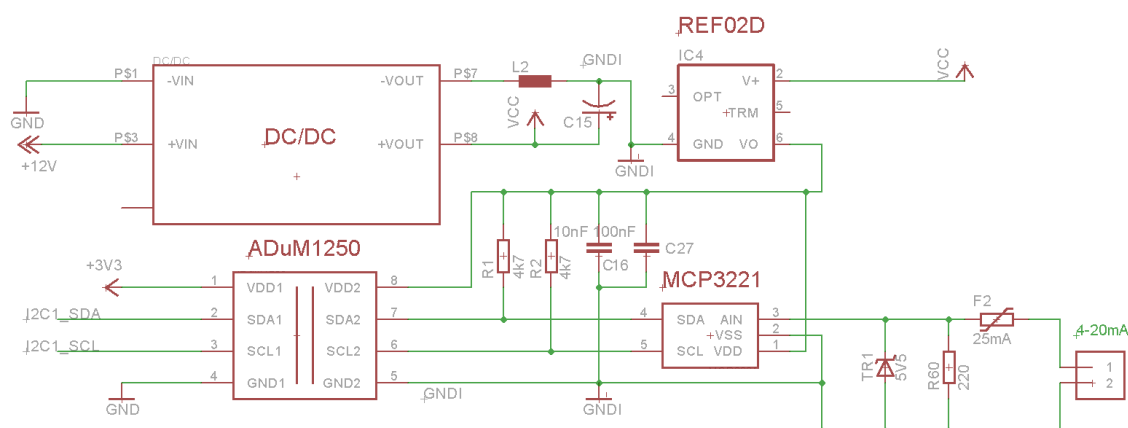
K zajištění bezpečnosti obsluhy musí být master jednotka galvanicky oddělená od externích zařízení. Mezi nejjednodušší oddělovače patří lineární optočleny. Ty jsou založeny na principu zdroje a detektoru optického záření. Jako zdroj záření je nejčastěji použita AlGaAs LED dioda. Ve funkci detektoru je pak využita fotodioda v navrhovaném případě fototranzistor. V prototypu budou použity optočleny TLP293 pro galvanické oddělení externích digitálních vstupů GPIOA.

Pro galvanické oddělení A/D převodníku monitorujícího velikost proudu v proudové smyčce bude použit obvod od společnosti Analog Devices s označením ADuM1250. Jedná se o obousměrný I2C oddělovač, který dokáže přenášet data až na kmitočtu 1 MHz. Výhodou je i rozsah napájení, který je od 3,0 V do 5,5 V. Zmíněný obvod oddělovače má garantovanou izolační schopnost 2,5 kV, což bude dostačující. Obvod pracuje na principu oddělení pomocí planárních transformátorů, jež poskytují velice rychlé a spolehlivé galvanické oddělení. Blokové schéma je zobrazeno na obrázku 16. [23]



Obrázek 16: I2C Oddělovač [23]

Jako napájecí zdroj pro buzení vstupů byl použit DC/DC měnič od výrobce Murata NXE2S1212 s galvanicky odděleným výstupem od vstupu. Jeho výstup bude napájet napětovou referenci REF02 zajišťující neměnné napětí 5 V. Napětí z reference bude napájet A/D převodník a I2C oddělovač. Jako A/D převodník pro snímání velikosti proudu proudovou smyčkou byl vybrán obvod MCP3221. A/D převodník má rozlišení 12 bitů, tedy poskytuje dostatečné rozlišení (viz výpočty níže). Důvodem k volbě tohoto převodníku jsou I2C komunikační rozhraní, malé rozměry a nízká cena.



Obrázek 17: Zapojení měření proudové smyčky 4-20 mA

Pro převod proudu na napětí v proudové smyčce nastavující požadovaný výkon generátoru bude použit rezistor. Výpočet maximální hodnoty rezistoru je uveden v rovnici (3.1).

$$R_{max} = \frac{U_{ADmax}}{I_{INmax}} = \frac{5}{20 \times 10^{-3}} = 250 \Omega \quad (3.1)$$

Kde  $U_{ADmax}$  je maximální měřitelná vstupní hodnota napětí na A/D převodníku a  $I_{INmax}$  je maximální proud proudovou smyčkou. Aby nedošlo k překročení maximální hodnoty A/D převodníku, byla zvolena nižší hodnota rezistoru z dostupné řady s hodnotou 220 Ohmů.

Napětí na vstupu A/D převodníku při minimální hodnotě proudu na proudové smyčce je vypočteno rovnicí (3.2).

$$U_{ADmin} = I_{min} \times R = 4 \times 10^{-3} \times 220 = 880 \text{ mV} \quad (3.2)$$

Z napětí na vstupu A/D převodníku je vypočtena digitální hodnota převedeného signálu dle rovnice (3.3).

$$\begin{aligned} \text{Digit. hodnota při } 4 \text{ mA} &= \frac{\text{rozlišení}}{\text{referenční napětí}} \times U_{ADmin} \\ &= \frac{2^{12}}{5} \times 0,88 \cong 721 \text{ bitů} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Pro navržený 12bitový převodník a referenční napětí 5 V bude minimální digitální hodnota 721 bitů. Maximální napětí na vstupu A/D převodníku je pak vypočteno v rovnici (3.4).

$$U_{ADmax} = I_{max} \times R = 20 \times 10^{-3} \times 220 = 4400 \text{ mV} \quad (3.4)$$

Z napětí na vstupu A/D převodníku při maximálním proudu proudovou smyčkou je vypočtena digitální hodnota, viz rovnice (3.5).

$$\begin{aligned} \text{Digit. hodnota při } 20 \text{ mA} &= \frac{\text{rozlišení}}{\text{referenční napětí}} \times U_{ADmax} \\ &= \frac{2^{12}}{5} \times 4,4 \cong 3604 \text{ bitů} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Pro navržený 12bitový převodník a referenční napětí 5 V bude maximální digitální hodnota 3604 bitů. Digitální rozsah A/D převodníku je pak dán rozdílem maximální a minimální digitální hodnoty A/D převodníku dle rovnice (3.6).

$$\begin{aligned} \text{Digit. rozsah měřené hodnoty} &= \text{hodnota při } 20 \text{ mA} - \\ &\text{hodnota při } 4 \text{ mA} = 3604 - 721 = 2883 \text{ bitů} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Počet hodnot A/D převodníku na změnu nastaveného výkonu o 1 W je dáno rovnicí (3.7).

$$\begin{aligned} & \text{digit. rozsah měřené hodnoty jednoho kroku} \\ & = \frac{\text{rozsah měřené hodnoty}}{\text{maximální počet kroků}} = \frac{2883}{800} = 3,6 \text{ bitů} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Rozlišení A/D převodníku určuje rovnice (3.8).

$$\begin{aligned} \text{Rozlišení} & = \frac{\text{rozsah měřeného proudu}}{\text{digitalni rozsah}} = \frac{20 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-3}}{2883} \\ & = 5,55 \mu\text{A} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Z výše uvedených výpočtů je patrné, že při proudu proudovou smyčkou 4 mA bude na výstupu A/D převodníku hodnota 721 bitů. Při maximálním proudu 20 mA bude na výstupu hodnota 3604 bitů. Pro zvýšení nastaveného výkonu do výboje o jeden watt, bude při maximálním uvažovaném výkonu 800 W potřeba zvýšit hodnotu A/D převodníku o 3,6 jednotek, viz rovnice (3.7). V rovnici (3.8) bylo spočítáno rozlišení proudu v proudové smyčce na 5,55  $\mu\text{A}$ . To znamená, že pro tento účel je zvolený A/D převodník dostatečný.

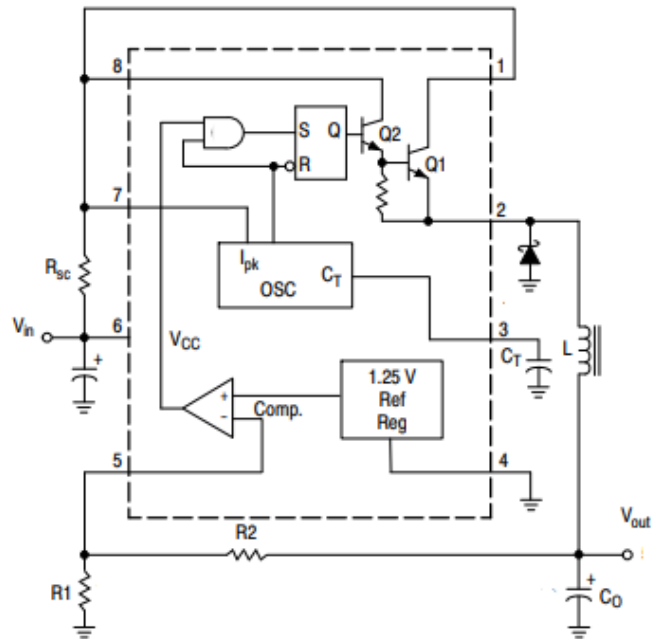
### 3.1.4 Ostatní obvody a součástky

Další důležitá součástka je obvod reálného času (RTC). Jako RTC byl zvolen PCF8563, který umožňuje komunikaci po I2C sběrnici. Ke své funkci potřebuje externí krystal 32,768 kHz a zálohovací kapacitor nebo baterii. V našem zapojení byl zvolen kapacitor s kapacitou 1 F a maximálním napětím 5,5 V. Integrovaný obvod reálného času má zálohovací proud pouze 0,25  $\mu\text{A}$  a dokáže zálohovat čas až do napětí 1 V. S těmito parametry by v ideálních podmínkách kapacitor dokázal zálohovat čas desítky dnů, viz rovnice (3.9). V rovnici se nepočítá se svodovým proudem kapacitoru a závěrným proudem sériové diody před kondenzátorem, proto bude reálná doba zálohy o něco kratší.

$$t = C \times \frac{\Delta U}{I} \rightarrow t = C \times \frac{U_{cc} - U_{min}}{I} = 1 \times \frac{5-1}{0,25 \times 10^{-6}} = 277 \text{ dní} \quad (3.9)$$

Master jednotka bude napájena centrálním napětím 12 V, proto bude nezbytné toto napětí snížit na 5 V pomocí snižujícího měniče a následně stabilizovat pomocí LDO regulátoru na hodnotu 3,3 V. Jako měnič bude použit obvod MC34063. Ten dovoluje

maximální výstupní proud 1,5 A, což bude při uvažovaném odběru do 500 mA dostatečné. [24]



Obrázek 18: Zapojení snižujícího měniče [24]

Vstupní hodnoty pro výpočet tlumivky snižujícího měniče:

- $V_{out} = 5 V$
- $V_{in} = 12 V$
- $V_{in(min)} = 10 V$
- $f_{min} = 50 kHz$
- $I_{max} = 500 mA$
- $I_{min} = 200 mA$
- $V_{ripple(pp)} = 10 mV$

Pro poměr sepnutého a rozepnutého tranzistoru platí rovnice (3.10).

$$\frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{V_{out} + V_F}{V_{in(min)} - V_{sat} - V_{out}} = \frac{5 + 0,8}{10 - 0,8 - 5} = 1,38 \quad (3.10)$$

Doba sepnutí a rozepnutí tranzistoru (3.11).

$$t_{on(max)} + t_{off} = \frac{1}{f_{min}} = \frac{1}{50 \times 10^3} = 20 \mu s \quad (3.11)$$

$$t_{off} = \frac{t_{on(max)}}{\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1} = \frac{20 \times 10^{-6}}{1,38 + 1} = 8,4 \mu s \quad (3.12)$$

Doba sepnutí tranzistoru je spočítána dle rovnice (3.13)

$$t_{on} = t_{on(max)} - t_{off} = 20 \times 10^{-6} - 8,4 \times 10^{-6} = 11,6 \mu s \quad (3.13)$$

Z doby sepnutí tranzistoru vypočítáme potřebný časovací kapacitor dle rovnice (3.14).

$$C_T = 4 \times 10^{-3} \times t_{on} = 4 \times 10^{-5} \times 11,6 \times 10^{-6} = 464 pF \quad (3.14) \\ \rightarrow 470 pF$$

Špičková hodnota kolektorového proudu při režimu sníženého podsvícení displeje je dána rovnicí (3.15).

$$I_{pk} = 2 \times I_{out} = 2 \times 0,2 = 0,4 A \quad (3.15)$$

Minimální hodnota indukčnosti tlumivky stanovuje rovnice (3.16).

$$L_{min} = \frac{V_{In(min)} - V_{sat} - V_{out}}{I_{pk}} \times t_{on} = \frac{10 - 0,8 - 5}{0,4} \times 11,6 \times 10^{-6} = 122 \mu H \rightarrow 150 \mu H \quad (3.16)$$

$$I_{pk(max)} = 2 \times I_{out(max)} = 2 \times 0,5 = 1 A \quad (3.17)$$

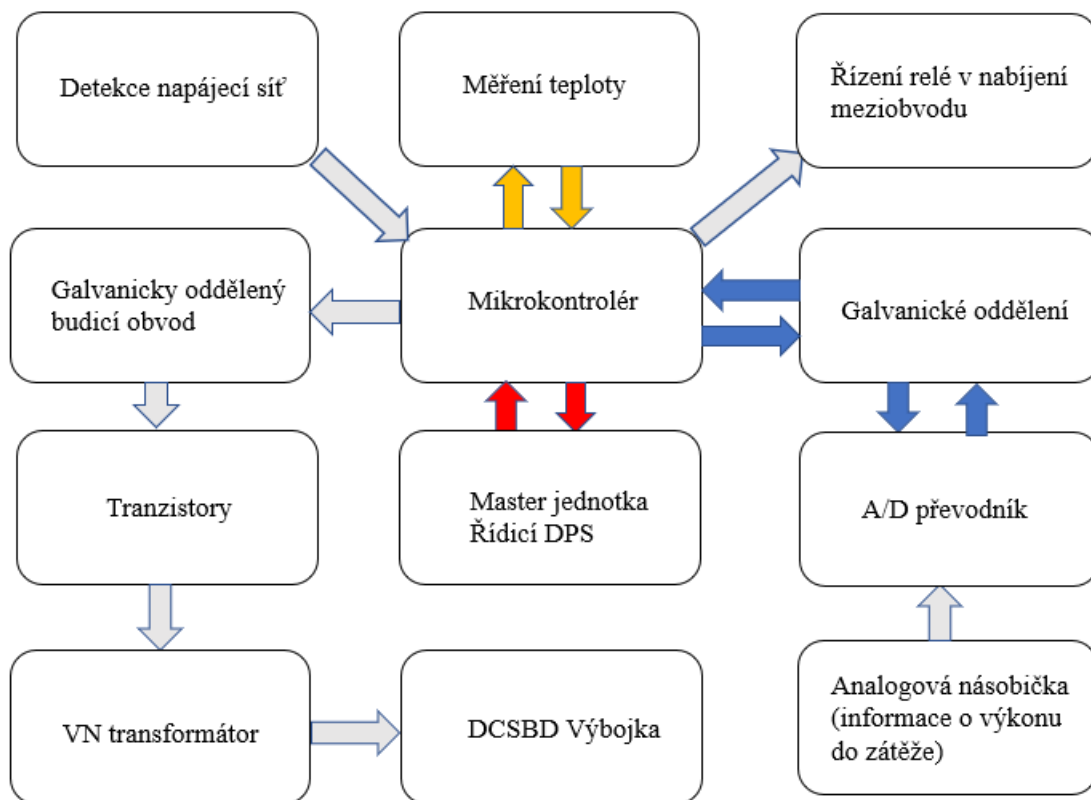
Výpočet filtračního kapacitoru na výstupu se stanoví na základě rovnice (3.20).

$$C_o = \frac{I_{pk(max)} \times t_{on(max)} + t_{off}}{8 \times V_{ripple(pp)}} = \frac{1 \times 20 \times 10^{-6}}{8 \times 0,01} = 250 \mu F \quad (3.18)$$

Časovací kapacitor byl vypočten dle rovnice (3.14) a byla zvolena hodnota z řady E6 a to 470 pF. Při výpočtu tlumivky bylo zohledněno možné snížení intenzity podsvícení LCD displeje, proto bylo počítáno s minimálním proudem 200 mA. Pro tento proudový odběr byla vypočtena tlumivka a zvolena hodnota z dostupné řady, a to 150  $\mu$ H. Minimální hodnota výstupního kapacitoru byla spočítána na 250  $\mu$ F. V zapojení bude použit kapacitor 330  $\mu$ F s nízkou hodnotou sériového odporu (ESR), který zaručí menší zvlnění než v zadání stanovených 10 mV. [25]

## 3.2 Slave jednotka

Hlavním úkolem slave jednotky je reagovat na přijatá data od master jednotky, vyhodnocovat a měřit potřebné hodnoty a ovládat výkonové tranzistory. Blokové uspořádání je zobrazeno na obrázku 19. Komunikace mikrokontroléru s master jednotkou probíhá po UART sběrnici (červené šipky), komunikace s digitálním čidlem pro měření teploty pomocí One-Wire sběrnice (oranžové šipky). Modré šipky znázorňují komunikaci přes SPI sběrnici.



Obrázek 19: Blokové uspořádání výkonové (slave) jednotky

### 3.2.1 Mikrokontrolér

Pro slave jednotku bude důležité, aby obsahovala základní komunikační vybavení I2C, SPI a UART. Pomocí těchto periférií bude komunikovat s externími integrovanými obvody a s master jednotkou.

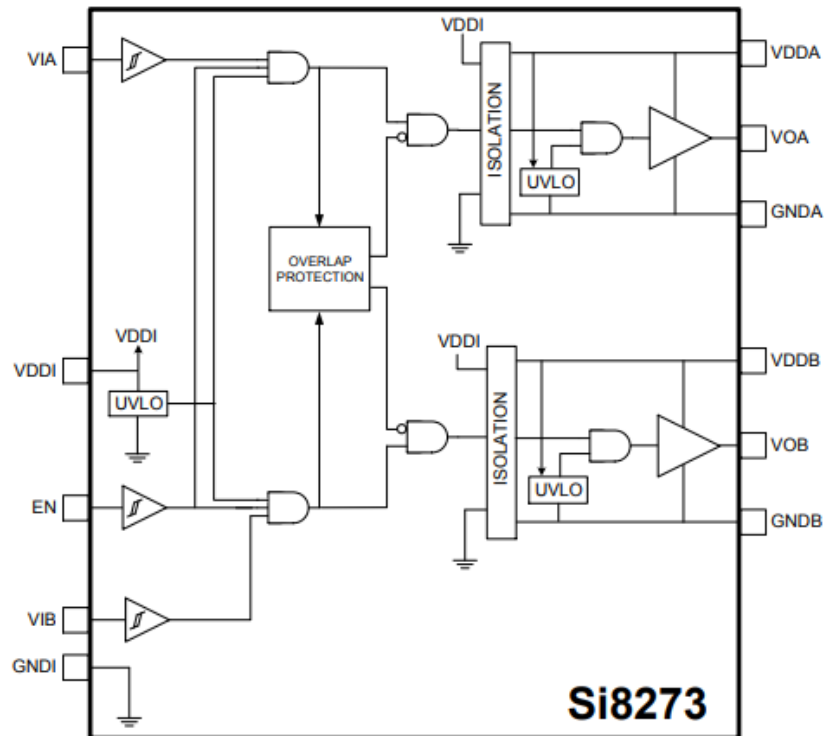
Dalším kritériem při výběru mikrokontroleru je dostatečné množství čítačů/časovačů, pomocí kterých se bude generovat signál pro budič obvod tranzistorů. Rozhodující pro výběr mikrokontroléru je také jeho pořizovací cena. K realizaci slave jednotky byl proto vybrán mikrokontroler STM32F103. Tento mikrokontroler obsahuje jádro ARM Cortex-M3 s taktovací frekvencí 72 MHz a dosahuje rychlosti 1,25 DMIPS/MHz. K dispozici má 128 kB Flash paměti a 20 kB SRAM paměti. Mikrokontroler obsahuje 7 čítačů/časovačů, pomocí kterých bude generován signál pro spínací tranzistory silové části. Obsahuje také několik komunikačních periférií. [26]

### 3.2.2 Budič a výkonové součástky

Budič obvod musí splňovat hned několik parametrů. Základní předpoklad je galvanické oddělení řídicí a silové části řízení tranzistorů. To lze provést pomocí oddělovacích transformátorů nebo pomocí optoelektroniky. Dále musí budič obvod zpracovat signál z mikrokontroléru. Maximální generovaná frekvence bude 80 kHz. S touto frekvencí

souvisí i další parametr pro budicí obvod, jímž je maximální výstupní proud a přípustná výkonová ztráta budicího obvodu. Oba parametry jsou závislé na pracovním kmitočtu a náboji hradla použitých tranzistorů.

Pro realizaci byl vybrán obvod Si8273, který splňuje potřebné parametry. Obvod má optické galvanické oddělení, vysoký výstupní proud (4 A špičkový) a je pro 80 kHz dostatečně rychlý. Další výhodou tohoto obvodu jsou jeho ochranné funkce jako ochrana proti spuštění obou kanálů ve stejný čas a detekce podpětí (UVLO). [27]



Obrázek 20: Blokové schéma obvodu Si8273 [27]

Ke spínání proudu do zátěže byly zvoleny NMOS tranzistory IXFH26N50. Ty jsou dimenzovány na závěrné napětí 500 V, trvalý proud 26 A a obsahují rychlou substrátovou diodu. Důležitou vlastností těchto tranzistorů je malá kapacita hradla a s tím spojená maximální spínací a vypínací rychlost tranzistoru. Výhodou jsou také z toho plynoucí nízké výkonové ztráty. [28]

Tabulka 3: Parametry tranzistoru IXFH26N50 [28]

Pouzdro	TO-247 AD	[-]
$V_{DSS}$	500	[V]
$I_{D25}$	26	[A]
$R_{DS(ON)}$	0,20	[ $\Omega$ ]
$V_{GS}$	$\pm 20$	[V]
$P_D$	300	[W]
$Q_G$	135	[nC]
$Q_{GS}$	28	[nC]
$Q_{GD}$	62	[nC]
$t_{d(off)}$	65	[ns]
$t_f$	30	[ns]

Dle rovnice (3.17) jsou maximální ztráty na každém z tranzistorů složeny z přepínacích a vodivostních ztrát.

$$P_{T1} = P_{prep} + P_{vod} \quad (3.17)$$

Přepínací ztráty se skládají ze zapínacích a vypínacích ztrát. Tranzistor bude spínán vždy při nulovém proudu, protože transformátor (indukční charakter) a výbojka (kapacitní charakter) budou pracovat blízko rezonančního kmitočtu. Z tohoto důvodu se na tranzistoru uplatňuje především vypínací ztráta. Ta je způsobena postupným vybíjením kapacity hradla tranzistoru. Z rovnice (3.18) je patrné, že na vypínací výkonovou ztrátu má vliv napětí, které je vypínáno a proud, který aktuálně tranzistorem prochází. Dalším faktorem ovlivňujícím vypínací ztráty je frekvence přepínání tranzistoru z vodivého do nevodivého stavu. Výkonové ztráty ovlivňují do značné míry parazitní kapacity tranzistoru, jež společně s velikostí budícího proudu určují rychlost sepnutí resp. rozepnutí tranzistoru. Při maximálním pracovním kmitočtu pak lze na základě vypínacích ztrát stanovit výkonové ztráty na tranzistoru viz rovnice (3.18).

$$P_{off} = \frac{U_t \times I_{max} \times f_{max} \times (t_{d(off)} + t_f)}{2} = \frac{325 \times 10 \times 80 \times 10^3 \times (65 \times 10^{-9} + 30 \times 10^{-9})}{2} = 12,35 \text{ W} \quad (3.18)$$

Kde  $U_t$  je napětí na tranzistoru a odpovídá napětí meziobvodu (při napájecím napětí s efektivní hodnotou 230 V je rovno špičkové napětí  $230 \text{ V} \times \sqrt{2} = 325 \text{ V}$ ),  $I_{max}$  je maximální proud tekoucí tranzistorem v době vypínání,  $f_{max}$  maximální spínací kmitočet a  $t_{off} + t_f$  je celková doba vypnutí tranzistoru. Vodivostní ztráty jsou

způsobené vlastní vodivostí tranzistoru v sepnutém stavu a velikostí protékajícího proudu, který je určen maximální hodnotou proudu na štítku vn transformátoru.

$$\begin{aligned}
 P_{vod} &= R_{DS(ON)} \times I_{ef}^2 = R_{DS(ON)} \times \left(\frac{I_{max}}{\sqrt{2}}\right)^2 = \\
 &= 0,20 \times \left(\frac{10}{\sqrt{2}}\right)^2 = 10 \text{ W}
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

Celkový součet maximálních přepínacích a vodivostních ztrát na jednom tranzistoru je 22,35 W. Celkové ztráty na spínacích tranzistorech zapojených v topologii polovičního můstku jsou pak dvojnásobné, tj. přibližně 45 W.

Ztráty na budicím obvodu jsou způsobeny nabíjením a vybíjením kapacity hradla tranzistoru. Ty jsou vyjádřeny v rovnici (3.20).

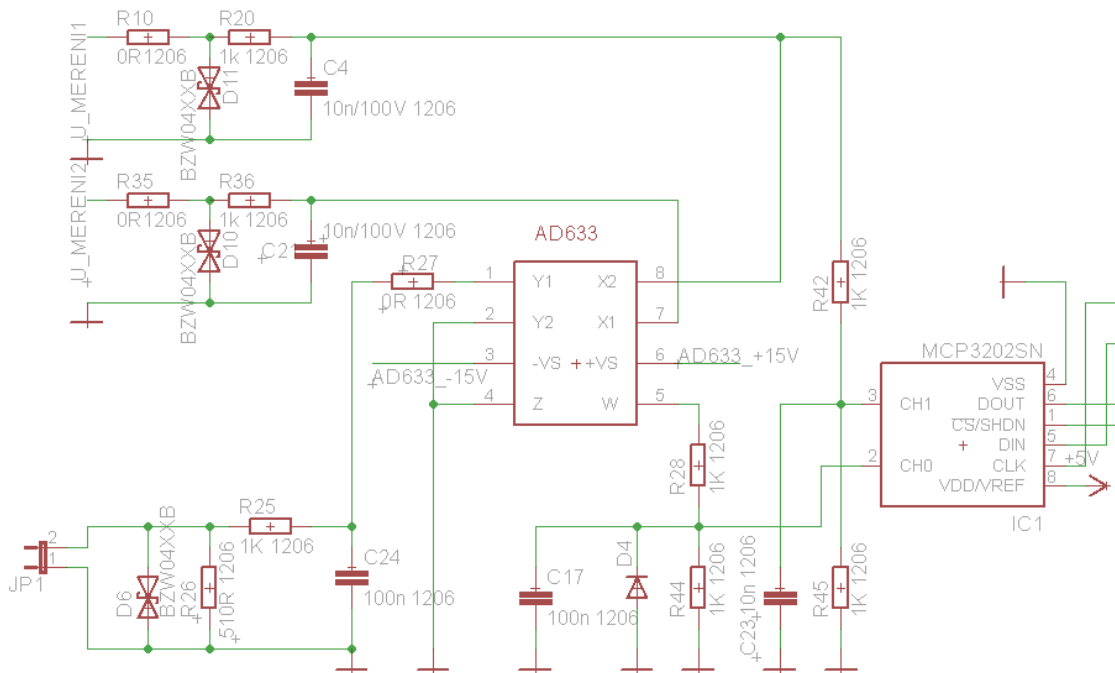
$$\begin{aligned}
 P_{hrad} &= Q_{G(TOT)} \times U_G \times f_{max} = 135 \times 10^{-9} \times 15 \times 80 \times \\
 10^3 &= 0,16 \text{ W}
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

Jako vstupní usměřovač byl zvolen usměřovací můstek KBU1506. Jeho výhoda je robustní konstrukce a možnost upevnění na chladič. Jeho důležité parametry jsou uvedené v tabulce 4.

Tabulka 4: Parametry usměřovacího můstku KBU1506 [29]

$V_{prm}$	600	[V]
$I_{(AV)}$	15	[A]
$V_F$	1,1	[V]

### 3.2.3 Obvody pro měření napětí a výkonu do zátěže



Obrázek 21: Zapojení měřicí části generátoru

Pro výpočet aktuálního výkonu z okamžité hodnoty napětí a proudu zátěží bude využita analogová násobička. Násobička disponuje dvěma diferenciálními kanály. Každý ze vstupů pracuje s napětovým rozsahem  $\pm 10$  V při napájecím napětí  $\pm 15$  V. První kanál A zpracovává údaj o velikosti napětí na primárním vinutí vn transformátoru. Jelikož velikost napětí převyšuje maximální přípustnou úroveň vstupu násobičky, je napětová úroveň přizpůsobena odporovým děličem. Druhý kanál B snímá velikost proudu tekoucího primárním vinutím vn transformátoru pomocí proudového transformátoru AS105. Jeho převodový poměr je 1:750 s maximálním zatěžovacím proudem 40 mA. Velikost zatěžovacího rezistoru byla spočítána tak, aby amplituda napětí na něm nepřesahovala maximální povolenou úroveň násobičky při maximální hodnotě proudu tekoucího do vn transformátoru, jež je 10 A. Násobička tyto signály vzájemně vynásobí a následně výsledek před přivedením na výstup podělí číslem 10. Násobička také umožňuje k vynásobeným signálům přičíst napětí vstupu Z pro korekce ofsetu výstupního signálu. Rovnice (3.21) ukazuje přenosovou funkci analogové násobičky. [30]

$$W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10} + Z \quad (3.21)$$

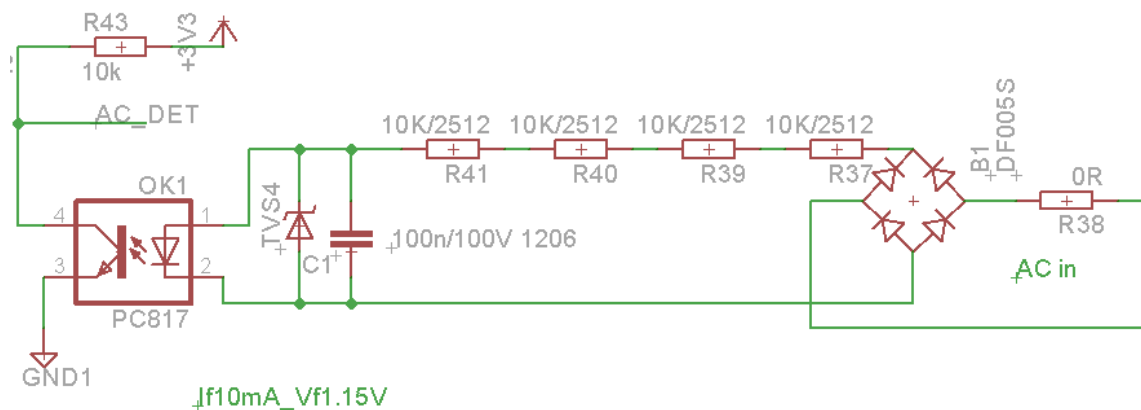
Měřením na primární straně transformátoru je měřen příkon do výboje. Tato hodnota může být přepočtena na výkon vynásobením účinnosti přenosu energie, který se nebude příliš měnit. Na displeji bude zobrazen příkon z důvodu kompatibility se stávajícími generátory, kde je taktéž měřen příkon externím wattmetrem. Bude tak možné pokračovat v experimentech využívající navrhovaný generátor bez nutnosti přepočtu výkonu dodávaného do výboje na příkon.

Signál z analogové násobičky bude zpracovávat A/D převodník. Potřebná rychlost A/D převodníku se odvíjí od rychlosti změny výkonu generátoru. Proto byl vybrán středně rychlý A/D převodník MCP3202, který má maximální vzorkovací frekvenci 100 kSPS a rozlišení 12 bitů. Dalším důvodem pro výběr tohoto převodníku bylo jeho komunikační rozhraní SPI. Převodník disponuje dvěma kanály. Jeden kanál bude použit k měření napětí meziobvodu. Další pak pro měření signálu z analogové násobičky nesoucí informaci o aktuálním příkonu. Před oba vstupy A/D převodníku byly zařazeny RC filtry zapojené jako dolní propust. Pro výpočet RC filtrů byla použita rovnice (3.22)

$$f_M = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times C} \quad (3.22)$$

Po převedení z analogových signálů na digitální budou data odeslána přes galvanický oddělovač SPI sběrnice Adum3154 do mikrokontroléru.

Další úlohou slave jednotky je detekce výpadku síťového napětí. Po usměrnění síťového napětí protéká přes sériové rezistory a diodu optočlenu proud, který je detekován izolovaným fototranzistorem. Při průchodu sítě nulou neteče diodou optočlenu proud, tranzistor vypne a na vstupu mikrokontroleru se zvedne pomocí pull-up rezistoru logická úroveň z 0 na logickou úroveň 1.



Obrázek 22: Zapojení detekce síťového napětí

Rezistory použité v sérii s diodou optočlenu budou v pouzdře pro povrchovou montáž 2512 z důvodu větších výkonových ztrát. Pouzdro 2512 je dimenzované na maximální ztrátový výkon 1 W. Ztráty v použitém zapojení byly vypočteny pro každý rezistor na 0,66 W. Obousměrná dioda (transil) TVS4 bude zapojena pouze v případě

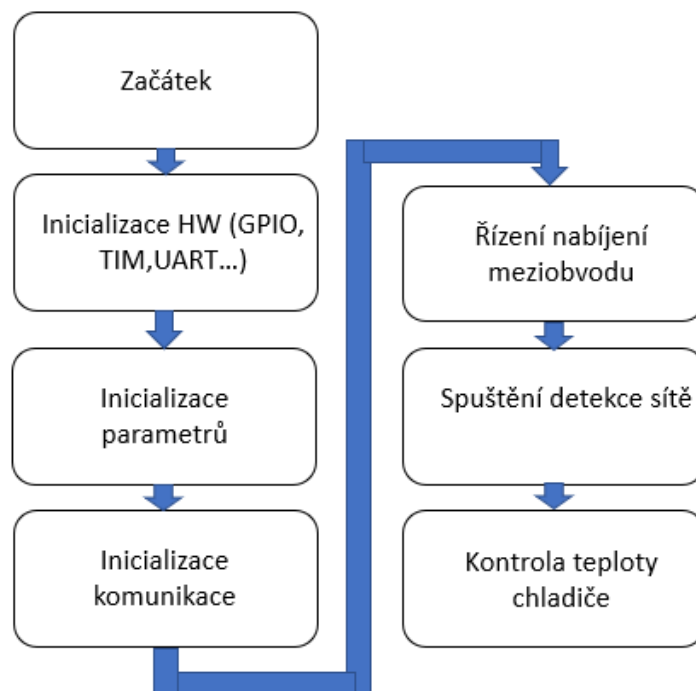
použití jednocestného usměřovače. Velikostí kapacitoru C1 lze určit dobu, po kterou nebude výpadek sítě detekován. Bylo rozhodnuto, že k výpočtu doby mezi jednotlivými průchody sítě nulou bude použit časovač v mikrokontroleru, proto nebude v našem případě kapacitor C1 zapotřebí.

## 4. PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

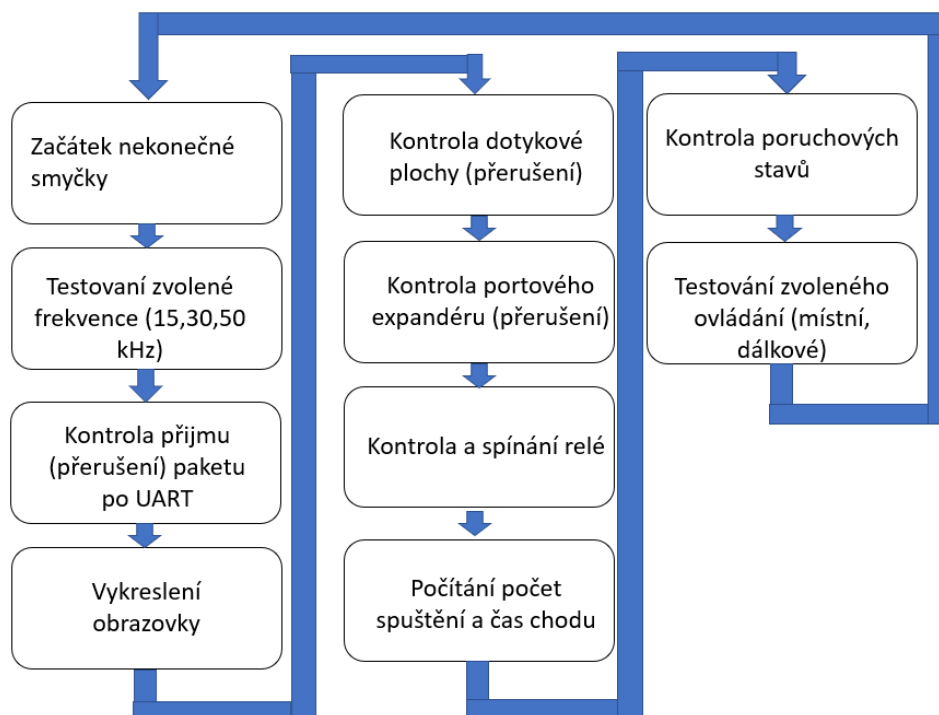
Programové vybavení je klíčovou součástí zařízení. Při nesprávném návrhu hrozí nejen nefunkčnost generátoru, ale i jeho nevratné poškození. Je velice důležité, aby HMI zařízení mělo rychlou odezvu na pokyny uživatele. Rychlá odezva zařízení vede ke komfortní práci a redukci chyb při zadávání parametrů. Další z důležitých vlastností je bezpečnost zařízení. Programové vybavení musí vyhodnotit všechny možné stavy zařízení a povolit spustit výkonovou část pouze za splnění bezpečnostních podmínek.

### 4.1 Master jednotka

Jak již bylo nastíněno výše, master jednotka, která je spojena s LCD displejem slouží k zadávání a čtení procesních parametrů. Dále jsou tyto nastavené parametry poslány přes UART sběrnici do slave jednotky, od které master jednotka přijímá naměřené hodnoty. Master jednotka má za úkol také řízení nabíjení meziobvodu, detekci výpadku napájecí sítě, reakci na vstupní signály, nastavení výstupních relé a vyhodnocování přijatých dat. Vývojový diagram inicializační části programu je zobrazen na obrázku 23 a vývojový diagram „nekonečné“ smyčky na obrázku 24.



Obrázek 23: Vývojový diagram inicializační části programu



Obrázek 24: Vývojový diagram "nekonečné" smyčky programu master jednotky

#### 4.1.1 Inicializace

První funkce, kterou mikrokontroler provede, je inicializace hardware. Ta probíhá v následujících krocích.

- Inicializace HAL knihoven. HAL knihovny obsahují velké množství maker a funkcí, které umožňují zjednodušený přístup k ovládání mikrokontroleru.
- Následuje inicializace systémových hodin. V této inicializaci se nastaví zdroj hodinového signálu a taktovací frekvence. Taktéž zde dochází k nastavení děličky frekvence pro periferie mikrokontroleru.
- Inicializace GPIO je použita pro nastavení vstupů a výstupů mikrokontroleru. Po přivedení taktovacího kmitočtu na používané brány, následuje definování prvotního stavu výstupů po inicializaci. Následně se volí mód pinu GPIO, který může být definován jako:
  - vstup
  - výstup push-pull
  - výstup otevřený kolektor
  - alternativní funkce push-pull
  - alternativní funkce otevřený kolektor
  - přerušení na sestupnou hranu
  - přerušení na vzestupnou hranu
  - přerušení při změně úrovně

Dále je možné připojit na pin interní pull-up nebo pull-down rezistory a zvolit rychlost každého pinu. U vstupů, které budou pracovat s přerušením, bude nutné také zvolit prioritu přerušování.

- V inicializaci I2C sběrnice je definovaná konkrétní sběrnice (mikrokontroler má několik I2C sběrnic), rychlost hodinového signálu a počet adresovacích bitů.
- Při inicializaci SPI sběrnice byla vybrána konkrétní sběrnice, režim (master nebo slave) a druh připojení. Dále byla zvolena velikost dat (8 nebo 16 bitů), polarita, fáze a dělička taktovací frekvence hodinového signálu.
- V následujícím kroku se inicializují čítače/časovače TIM2 a TIM3. TIM2 byl použit jako zdroj PWM signálu pro piezo-akustický měnič. Proto byl mód čítače nastaven jako výstupní PWM mód. Dále byla nastavena jeho dělička vstupního kmitočtu a perioda. TIM3 byl použit pro možnost připojení rotačního enkodéru pro pohodlnější nastavení parametrů. Tento mód tohoto čítače byl nastaven na enkodérový mód.
- Poslední inicializací HW je UART. Při této inicializaci byla nastavena konkrétní UART sběrnice, její rychlost, délka slova, počet stop bitů, parita a mód.

Po inicializaci HW je nezbytné provést i SW inicializaci. Jako první bude inicializovaná USART komunikace. Ta je uskutečněna následujícím způsobem. Nejprve bude zakázáno přerušování od události přijetí paketu, poté vymazán rx buffer a poté znovu povoleno přerušování.

Pro správnou inicializaci displeje bude nutné nastavení celé řady parametrů. Nejprve byly vytvořeny základní funkce pro komunikaci s řadičem displeje. Poté byly prostřednictvím vytvořené komunikace nastaveny parametry dle tabulky 5.

Tabulka 5: Použité registry pro nastavení řadiče SSD1963 [20]

Registr	Význam
0xE2	nastavení PLL
0xE0	zapnutí PLL
0xE0	přepnutí interní hodiny/ PLL
0x01	softwarový reset
0xE6	LSHIFT frekvence
0xB0	TTL mód, rozlišení displeje
0xB4	horizontální synchronizace
0xB6	vertikální synchronizace
0xBA	hodnoty GPIO
0xB8	nastavení GPIO
0xF0	formát dat
0x29	zapnutí displeje

U inicializace portového expandéru byl postup obdobný jako u řadiče displeje. Nejprve byly vytvořeny základní funkce potřebné pro komunikaci s portovým expandérem. Následně byly využity pro nastavení dle tabulky 6.

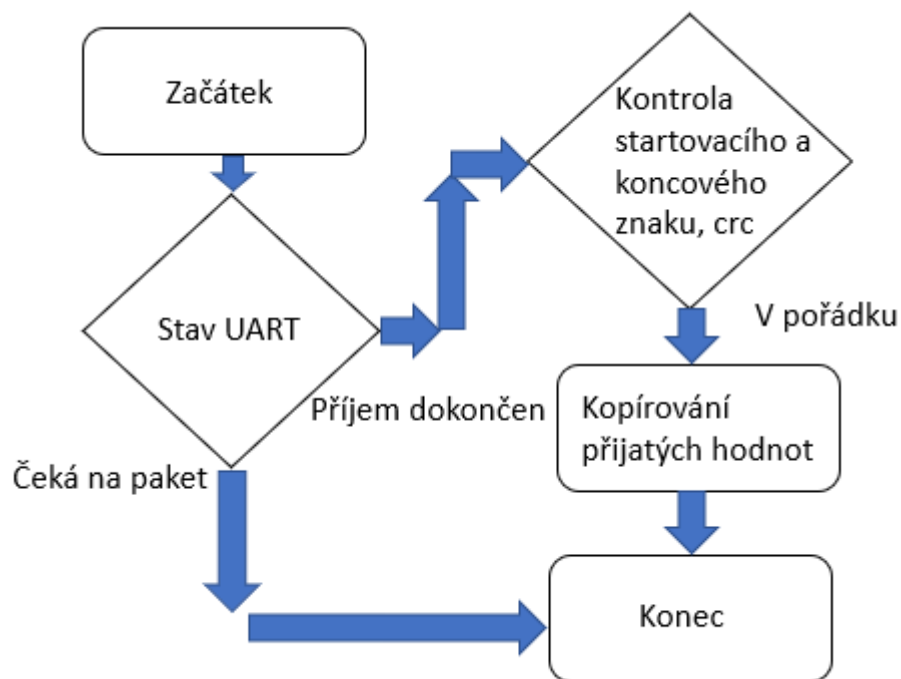
Tabulka 6: Nastavení registrů portového expandéru MCP23S017 [22]

Registr	Hodnota	Význam
IOCON	0x80	Použita banka příkazů (banka 1)
IODIRB	0x00	Nastavení jako výstupy (registr B)
GPIOB	0x00	Nastavení výstupů registru B na 0
IODIRA	0xFF	Nastavení jako vstupy (registr A)
GPPUA	0xFF	Zapnutí pull-up rezistorů (registr A)
IPOLA	0xFF	Obrácení logiky (registr A)
GPINTENA	0xFF	Přerušení na všechny piny (registr A)
INTCONA	0x00	Přerušení na změnu stavu (registr A)
INTCAPA	-	Vyčtení registru nuluje přerušení
INTFA	-	Vyčtení registru nuluje přerušení

Posledním krokem inicializace SW je načtením všech hodnot proměnných, které byly uloženy uživatelem do paměti.

#### 4.1.2 Komunikace

Komunikace mezi řídicí a výkonovou částí DPS je realizována prostřednictvím UART sběrnice. UART komunikace je založena na příchozím signálu RX a odchozím signálu TX. Při změně stavu na pinu RX dojde k vyvolání přerušení běhu programu a uložení přijatého paketu do předem připraveného rx bufferu. Důležitá je také nastavená vysoká priorita přerušení. Kontrola komunikace a přijatých dat probíhá dle hlavní smyčky programu. Blokový diagram kontroly příjmu paketu zachycuje obrázek 25. Odesílání paketu probíhá vždy po deseti cyklech hlavní smyčky. Příjem i odesílání probíhají pomocí jednoho dlouhého paketu, který obsahuje všechny potřebné proměnné. Začátek i konec paketu byl označen specifickým symbolem. Dále se přenáší kontrolní součet CRC. Celková délka přenášeného paketu je 41 bytů.



Obrázek 25: Diagram kontroly příjmu paketu po UART sběrnici

Další komunikace probíhá prostřednictvím I2C sběrnice s A/D převodníkem pro měření proudové smyčky 4-20 mA. Měření proudové smyčky je aktivní pouze při zvoleném dálkovém ovládní zařízení. Pro zvýšení přesnosti měření je vypočten průměr ze třech naměřených hodnot. Následně je hodnota přepočítána a zkopírována do proměnné nastaveného výkonu.

Přes I2C sběrnici také probíhá komunikace s integrovaným obvodem reálného času (RTC) s označením PCF8563. Uvnitř bloku „vykreslení obrazovky“ je přečtena hodnota z obvodu RTC. Při změně minutové hodnoty dojde k obnově data a času zobrazovaných na displeji. Dále se pak RTC uplatňuje při měření času chodu generátoru, kde je počítána každá minuta chodu za účelem monitorování opotřebení výbojky.

Komunikace obvodu dotykové plochy XPT2046 probíhá po SPI sběrnici. Integrovaný obvod XPT2046 má také PENIRQ výstup, který po dotyku vyvolá změnu napěťové úrovně na tomto pinu. Na tento signál reaguje mikrokontrolér přerušním programu a zapsáním informace o příchozím přerušení do proměnné. Odečtení hodnoty probíhá v hlavní smyčce programu, a to odesláním dat do nastavovacího registru, viz tabulka 7. [21]

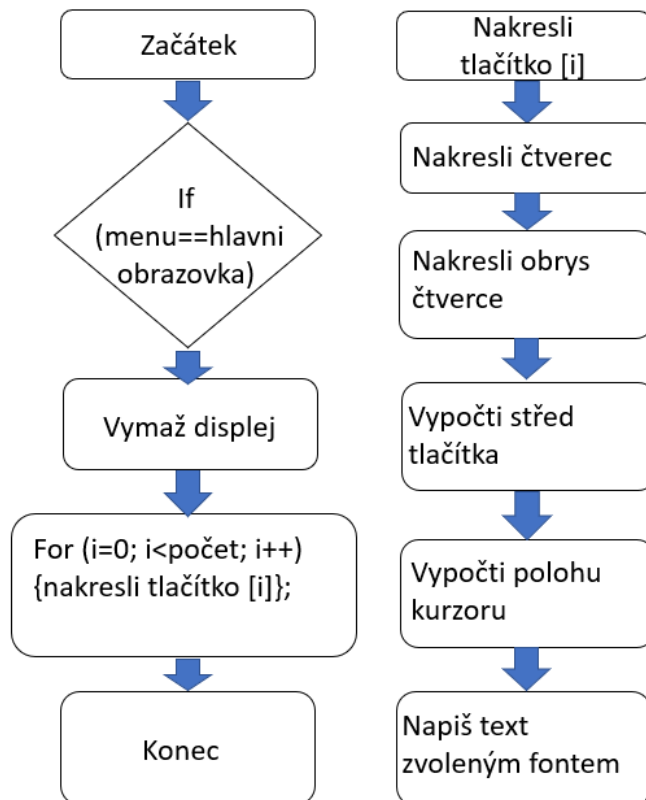
Tabulka 7: Registr nastavení obvodu XPT2046 [21]

Bit7 (MSB)	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0 (LSB)
Start	A2	A1	A0	MODE	SER	PD1	PD0

V tomto registru je 7 bitů tzv. start bit, další dva bity umožňující volbu kanálu. Bit číslo 3 umožňuje měnit rozlišení převodu A/D převodníku z 12 bitů na 8 bitů. Bit 2 umožňuje použít externí referenci. Poslední dva bity umožňují během převodu přejít do některého z režimu spánku. Dokončení převodu signalizuje napěťový pulz na pinu s názvem „Busy“. Se sestupnou hranou začíná obvod posílat převedenou digitální hodnotu pozice dotyku. [31]

### 4.1.3 Grafické rozhraní

Grafické prostředí HMI bylo rozděleno do několika položek menu. V každém menu je několik různých typů prvků. V programu byly vytvořeny datové typy pro tlačítka, zobrazovací pole, pole stavů vstupů/výstupů a pro lištu s datem a stavem zařízení. Poté byly definovány proměnné jako pole vytvořených datových typů. Do takto připraveného pole byly zapsány všechny vlastnosti prvku (pozice, stav, barvy, atd.). Následovalo vytvoření funkcí pro vykreslování jednotlivých datových typů. Zjednodušený algoritmus nakreslení tlačítka pomocí vytvořených funkcí je zobrazen na obrázku 26. Zobrazování ostatních prvků na displeji probíhá obdobným způsobem.



Obrázek 26: Diagram funkce nakreslení prvku na displej

V grafickém rozhraní byla také řešena reakce na dotykovou plochu. Kontrola stisknutí konkrétního tlačítka začíná vyčtením hodnoty souřadnic X a Y z místa dotyku. Pro přesnější měření je hodnota průměrována z pěti měření. Následně se provádí kontrola, jestli souřadnice dotyku jsou uvnitř některého z tlačítek v aktuálně zobrazovaném menu. Pokud souřadnice některého z tlačítek souhlasí, pak přes funkci *switch* dojde po splnění dalších podmínek k překreslení tlačítka a předepsané reakci zařízení.

## 4.2 Slave jednotka

### 4.2.1 Inicializace

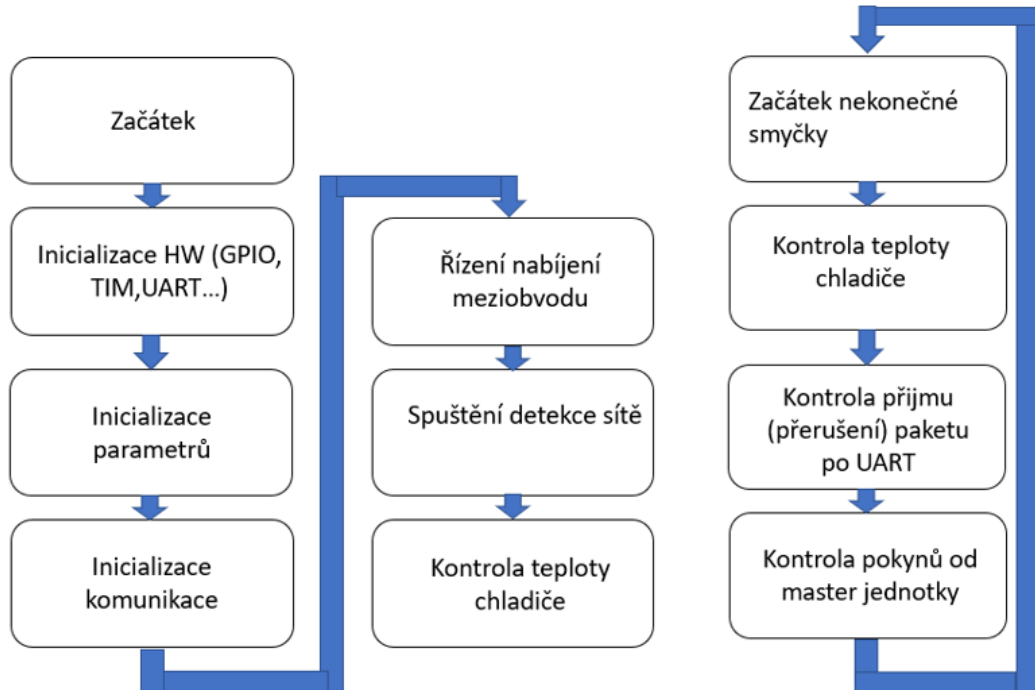
Prvním blokem programu je stejně jako u master jednotky inicializace HW. Inicializace probíhá obdobně jako u master jednotky. Nejprve byla inicializována HAL knihovna a následně systémové hodiny. U inicializace SPI a UART sběrnic bylo použito stejné nastavení jako u master jednotky.

Další inicializovanou periferií byl čítač TIM 1, který byl použit pro generování signálů k řízení spínacích tranzistorů silové části. Kromě základního nastavení tohoto čítače byly využity i jeho pokročilejší funkce. Čítač TIM 1 je přizpůsoben pro řízení tranzistorů a umožňuje nastavit mód, který dokáže vložit ochrannou dobu tzv. *dead-time* mezi vypnutí jednoho tranzistoru a sepnutí druhého tranzistoru. Ten byl nastaven pomocí hodnoty proměnné „*DeadTime*“ ve struktuře čítače. Dále bylo nutné aktivovat funkci „*autoreload\_preload*“, která při změně periody čítače nezmění přímo registr, ve kterém je hodnota periody počítána. Funkce zkopíruje novou hodnotu do jiného registru. Při dokončení periody (přetečení čítače) nahraje tuto hodnotu do registru čítače. Časovač TIM 3 byl využit k měření síťové frekvence. Byl nastaven tak, aby při přetečení došlo k vyvolání přerušování chodu programu. Poslední inicializovaný čítač byl TIM 4, který byl použit jako systémový čas s periodou 1  $\mu$ s. Poté byly časovače TIM 3 a TIM 4 spuštěny.

Následujícím krokem v inicializaci bylo nahrání výchozích stavů a hodnot do paměti. Tento krok společně s inicializací komunikace probíhá shodně s master jednotkou a je popsán výše.

Dalším blokem v inicializaci bylo řízení nabíjení meziobvodu zařízení. Při zapojení slave jednotky do sítě dojde k nabíjení meziobvodu přes usměrňovací můstek a omezovací rezistory. Po odměření doby 1 s, kdy dojde k bezpečnému nabití meziobvodu, mikrokontrolér přečte hodnotu napětí meziobvodu z A/D převodníku. Pokud se nachází naměřená hodnota nad minimální hodnotou dovoleného napětí meziobvodu, která je nastavena na 260 V, dojde k sepnutí relé, které přemostí omezovací rezistory. V opačném případě funkce uloží chybu nabíjení, která bude později v programu odeslána do master jednotky.

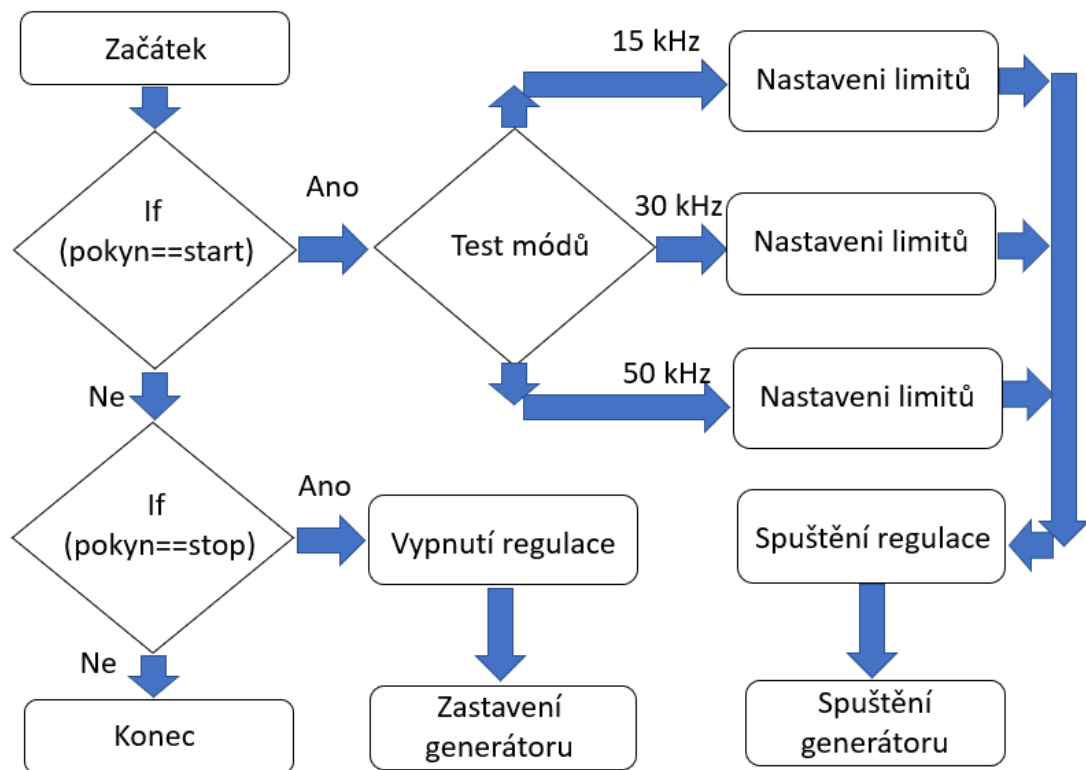
Posledním krokem inicializace je měření teploty chladiče. Ta probíhá přes One-wire komunikaci s digitálním teplotním čidlem DS18B20. V této části programu se pouze naměří teplota. Vyhodnocení překročení teploty (úroveň) nastane až v hlavní smyčce programu.



Obrázek 27: Vývojový diagram programu slave jednotky

#### 4.2.2 Hlavní smyčka programu

Hlavní funkcí výkonové (slave) jednotky je přijmout data od master jednotky, reagovat na její povely a odeslat zpět naměřené hodnoty. Nejprve je vyhodnocena teplota chladiče. Pokud dosáhne naměřená teplota hodnoty maximální teploty, zapíše se chyba teploty chladiče do proměnné. Až po snížení teploty chladiče pod vypínací hodnotu teploty se odstraní chyba teploty. Limity teploty jsou nastavitelné v servisním menu. Poté následuje kontrola přijetí paketu. Pokud paket dorazil v pořádku, překopírují se data do proměnných slave jednotky. V tomto bodě programu jsou naměřeny aktuální hodnoty jako teplota, napětí meziobvodu a příkon do výboje. Tyto hodnoty jsou nakopírovány do komunikačního paketu a následně je tento paket odeslán do master jednotky.



Obrázek 28: Blokový diagram vyhodnocování příkazů od master jednotky

Posledním hlavním blokem programu je vyhodnocování a reakce na pokyny od master jednotky. V tomto bloku se též vyhodnocují chybové stavy. Výchozím krokem tohoto bloku je kontrola proměnné „pokyn“, která může nabývat několika stavů. Měnit stavy na start a stop (spuštění generátoru či jeho zastavení) může pouze master jednotka. Slave jednotka při vyhodnocení chyby nastaví hodnotu proměnné „pokyn“ na chybu, zastaví generátor a konkrétní číslo chyby odešle do master jednotky v proměnné „chyba“. Pokud zařízení nedetekuje žádnou chybu a od master jednotky přijde pokyn „start“, dojde k nastavení parametrové sady v závislosti na zvoleném módu. Poté je spuštěna regulace kmitočtu a povolen výstup signálů z mikrokontroléru. Požadavkem na generátor byla nutnost nastavení náběžných a sestupných ramp výkonu, které by měly být nastavitelné v rozsahu od 100 ms do 2 s. Jelikož je odezva výstupního výkonu v závislosti na změně frekvence velmi rychlá, nebylo nutné regulovat generátor pomocí PI, PD nebo PID regulace. Použitý algoritmus regulace nastaví výstupní frekvenci na maximální hodnotu pro zvolený mód, poté ji sníží o krok = 1 Hz, změří výstupní výkon. Následně odměří dobu vypočtenou z nastavené hodnoty rampy, porovná nastavený výkon se změřeným a vyhodnotí, jestli je nutné opět snížit nebo zvýšit výstupní frekvenci. Výstupní výkon bude tedy oscilovat kolem nastavené hodnoty, jelikož je nastavený minimální krok frekvence 1 Hz, budou oscilace kolem nastavené hodnoty více závislé na přesnosti měření výkonu než na regulační odchylce. Pokud master jednotka změni pokyn ze stavu start na stop dojde ke snižování výkonu generátoru

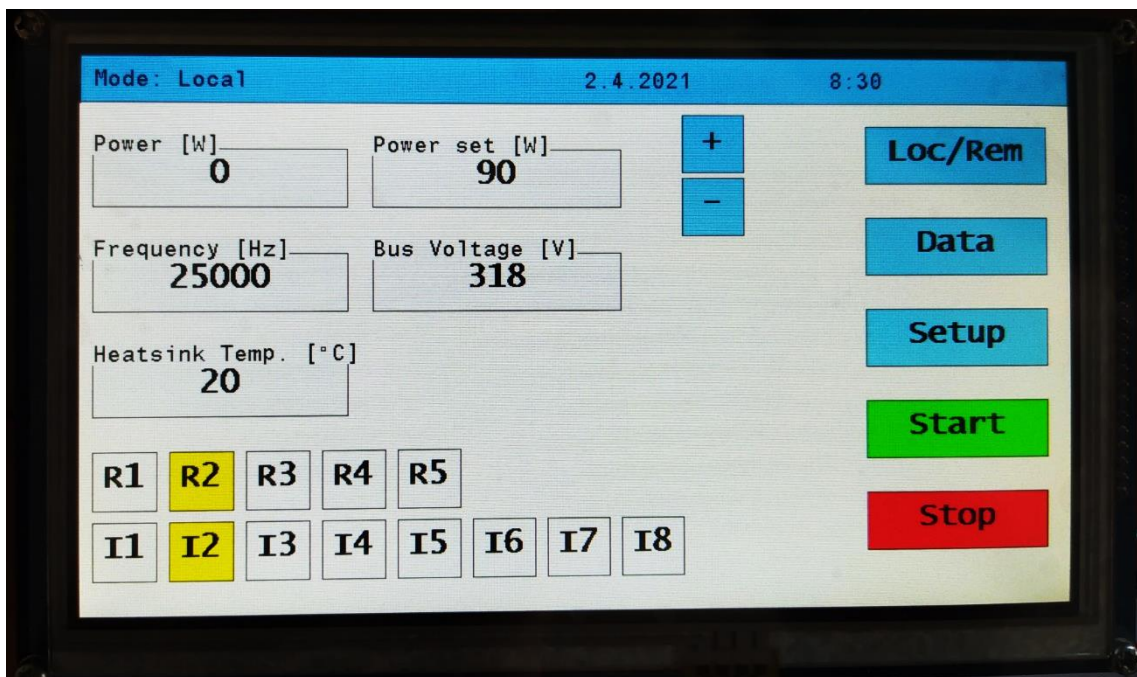
s nastavenou rampou snižování výkonu. Po dosažení minimální hodnoty výkonu dojde k zastavení výstupního signálu z mikrokontroleru.

Jedním z požadavků na generátor byla detekce výpadku síťového napětí. Ta je realizována pomocí čítače, který je spuštěn v inicializační části programu. Fototranzistor optočlenu generuje pulz při průchodu síťového napětí nulovou hodnotou. Při dvoucestném usměrnění síťové frekvence 50 Hz je perioda pulsů 10 ms. Každých 10 ms je vyvoláno přerušení programu a vynulování registru čítače. Ten je nastaven na 70 ms pro detekci výpadku sítě delšího než 3 periody. Při přetečení čítače dojde k vyvolání přerušení běhu programu a vypnutí výstupu generátoru.

## 5. VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

### 5.1 Funkce a ovládání

Při zapnutí zařízení do sítě dojde k nabíjení meziobvodu výkonové jednotky. Po uplynutí času jedné sekundy je změřeno napětí na kapacitorech meziobvodu a následně dojde k vyřazení nabíjecích rezistorů pomocí překlenovacího relé. Poté se na ovládací jednotce zobrazí výchozí obrazovka, která umožňuje změnu nejpoužívanějších parametrů a funkcí.



Obrázek 29: Výchozí obrazovka HMI

V horní části obrazovky je zobrazena lišta s aktuálním datem a časem. Kromě těchto údajů lišta signalizuje zvolený způsob ovládání generátoru. V případě poruchy změni barvu na červenou a vypíše konkrétní poruchu. Dalším vizuálním prvkem jsou aktivní vstupy a výstupy jednotky. Vstupy jsou označeny I1 až I7, výstupy pak R1 až R5. Při aktivaci výstupu nebo k detekci vstupního signálu je pole s příslušným označením podkresleno žlutou barvou. Měřené parametry jsou zobrazeny v obdélnících s označením názvu a jednotky, uvnitř je pak zobrazena hodnota. V této obrazovce je možné z parametrů měnit pouze požadovaný výkon. Nastavení výkonu probíhá v lokálním režimu pomocí zobrazených tlačítek „+“ a „-“. Maximální a minimální hodnota je odvozena od nastaveného frekvenčního módu v nastavení. Tlačítko „Loc/Rem“ přepíná mezi místním a dálkovým ovládaním. Při přepnutí do módu místního ovládání lze ovládat zařízení jak ze vstupních svorek, tak z dotykového displeje. Nastavení výkonu je možné pouze přes displej. Při zvoleném vzdáleném módu

jsou tlačítka pro nastavení výkonu, nastavení parametrů a startovací tlačítko deaktivovány a označeny šedým podbarvením. Nastavení výkonu je možné pouze přes proudovou smyčku a spuštění pouze přes tlačítka.

Další tlačítko „Data“ zobrazuje obrazovku se záznamem provozních stavů jako dobou provozu a počet spuštění výstupu generátoru. Další tlačítko „Setup“ zobrazí nastavovací obrazovku. Tlačítka „Start“ a „Stop“ ovládají výstup generátoru, pokud jsou splněny všechny podmínky pro provoz.

Digitální vstup I1 (Start) spustí výkonovou část, pokud je zařízení připraveno. Digitální vstup I2 (Enable) nastaví zařízení do stavu připraveno. Bez tohoto bezpečnostního signálu nelze v žádném z režimů spustit výkonovou část. Při vyvolání a následnému resetu kterékoliv chyby je nutné opět potvrdit připravenost generátoru vypnutím a opětovným přivedením signálu do vstupu I2. Vstup I3 (Low power mode) slouží k nastavení výstupního výkonu na minimální povolenou hodnotu. Ostatní vstupy nebyly použity.

Tabulka 8: Funkce vstupů

Vstup	I1	I2	I3
Funkce	Spuštění generátoru	Povolení spustit generátor	Mód nízkého výkonu

Zařízení umožňuje signalizaci stavů pomocí reléových výstupů. Výstup R1 signalizuje spuštěný generátor. Výstup R2 signalizuje připravenost generátoru. Výstupy R3 a R4 slouží pro signalizaci chybových stavů. R3 signalizuje přehřátí zařízení a R4 obecnou chybu, R5 nebylo využito.

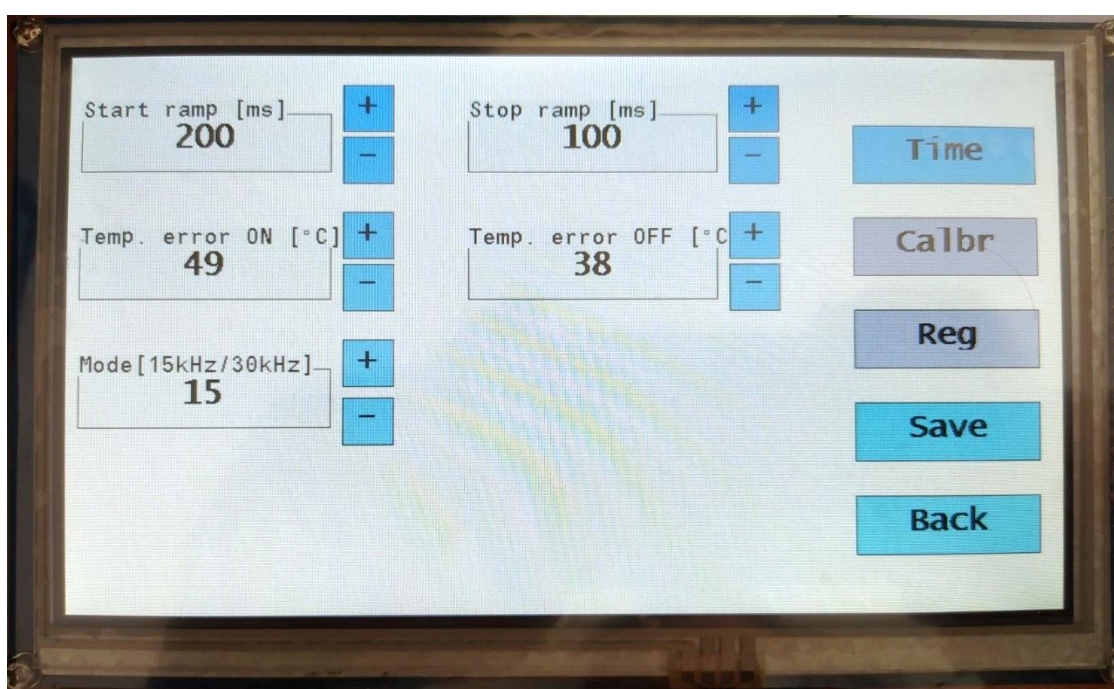
Tabulka 9: Funkce výstupů

Relé	R1	R2	R3	R4
Význam	Spuštěn	Připraven	Přehřátí	Chyba

Při poruchovém stavu dojde nejen k zápisu detekované poruchy do stavové lišty, ale i k vykreslení resetovacího tlačítka. Po odstranění příčiny poruchy a stisku tlačítka „Reset“ dojde k resetu reléových výstupů signalizující poruchu zařízení. Po deaktivaci reléových výstupů je nutné znovu stisknout resetovací tlačítko, které smaže chybu ze stavové lišty.

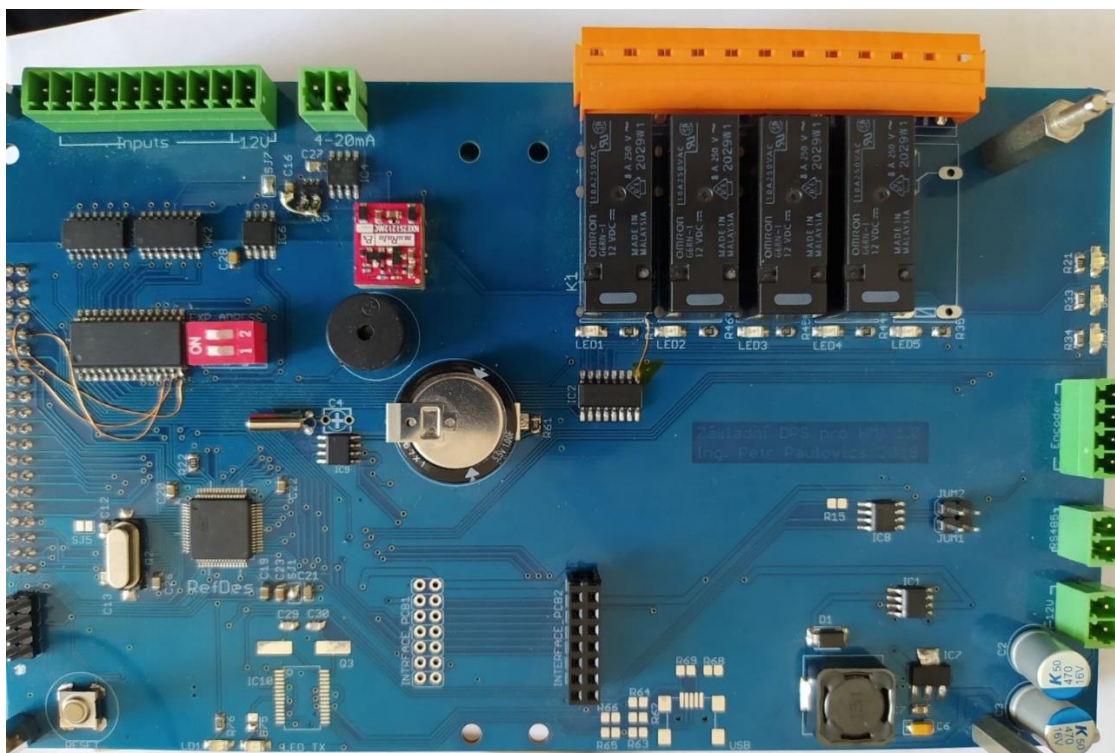
Po stisku tlačítka „Setup“ na hlavní obrazovce, přejde zařízení do režimu nastavení, viz obrázek 30. V prvním řádku je zobrazena vzestupná (start ramp) a sestupná (stop ramp) rychlost náběhu a doběhu rampy výkonu zařízení. Ta lze nastavovat s krokem 100 ms. Dále je nutné nastavit teplotní maximum zařízení. Nastavení probíhá pomocí dvou parametrů, a to teplotě, při které dojde k vyhodnocení stavu přehřátí „Temp error

ON“ a teplotě „Temp error OFF“, při které dojde k možnosti spustit zařízení po resetu poruchy. Parametrem „Mode“ je přepínáno mezi pracovními kmitočty 15, 30 a 50 kHz. Pro uložení nastavených parametrů je nutné uložení parametrů do paměti tlačítkem „Save“ v pravé části obrazovky. Zašedlé tlačítka „Calbr“ a „Reg“ slouží k nastavení parametrů regulace, jelikož nebyla nutná složitější regulace generátoru jsou tyto tlačítka v tomto konkrétním generátoru nevyužita. Ovšem z důvodu rozložení ovládacích prvků a pozdějšího přidání těchto nastavovacích obrazovek nebyly úplně odstraněny. Tlačítko zpět „Back“ slouží k návratu na úvodní obrazovku bez uložení parametrů. Tlačítko „Time“ slouží k přechodu do nastavovací obrazovky data a času, zde jsou opět tlačítka pro uložení a zpět do nižšího menu.

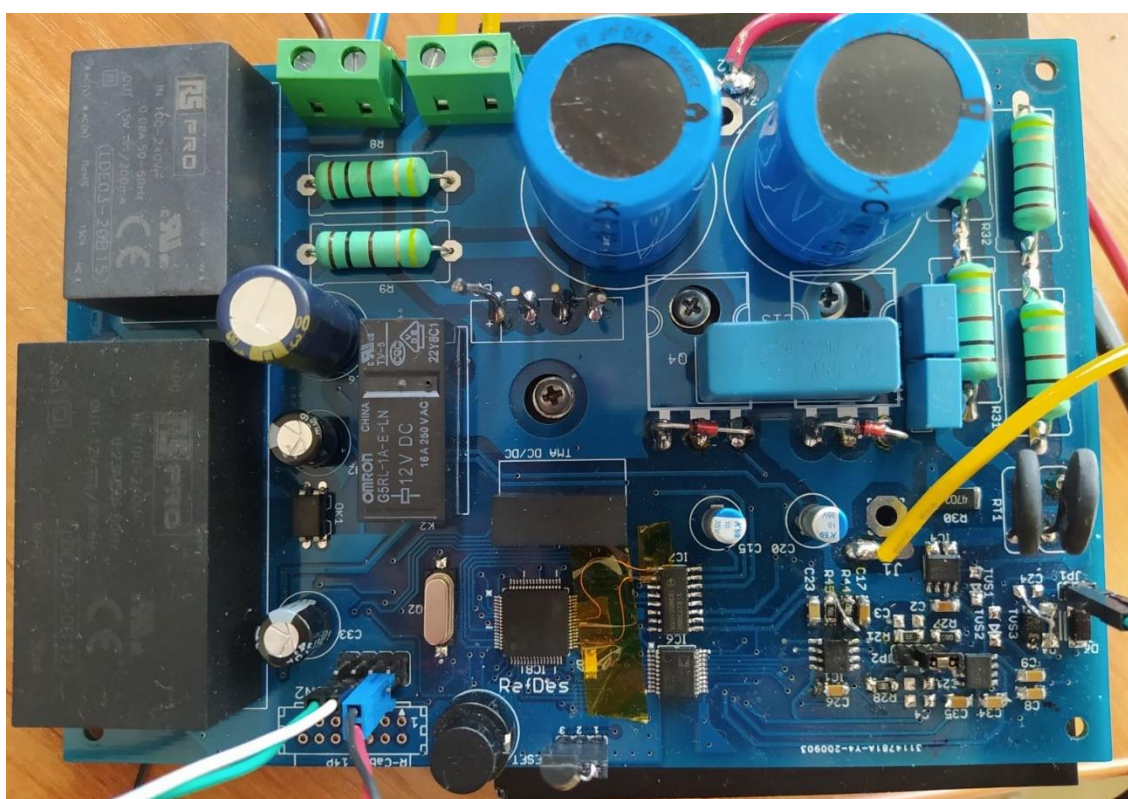


Obrázek 30: Obrazovka nastavovacího režimu

Master i slave jednotky jsou realizované na oboustranné DPS z materiálu FR4. Na spodní straně byly použity SMD součástky. Na horní straně byly použity vývodové součástky v kombinaci se součástkami pro povrchovou montáž. Ovládací DPS umožňuje připojení dvou rozšiřovacích karet nebo zařízení pomocí konektorů, na které jsou vyvedeny komunikační sběrnice a napájecí napětí. Ovládací (master) DPS je přišroubována pomocí distančních sloupků na LCD displej. Displej s jednotkou umožňuje upevnění pomocí distančních sloupků na dveře rozvaděčové skříně. Výkonová (slave) jednotka umožňuje montáž usměrňovacího můstku a tranzistorů na chladič. Jednotky jsou propojeny pomocí plochého kabelu o maximální délce nepřesahující 50 cm.



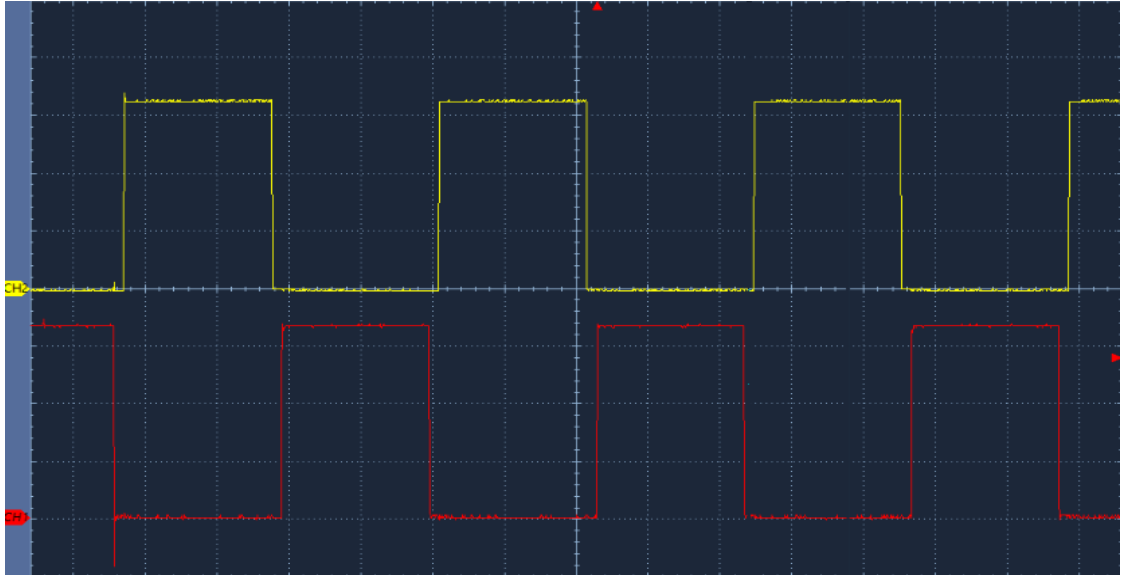
Obrázek 31: Pohled vrchní stranu osazené ovládací DPS (master jednotka)



Obrázek 32: Oživování výkonové části generátoru (slave jednotka)

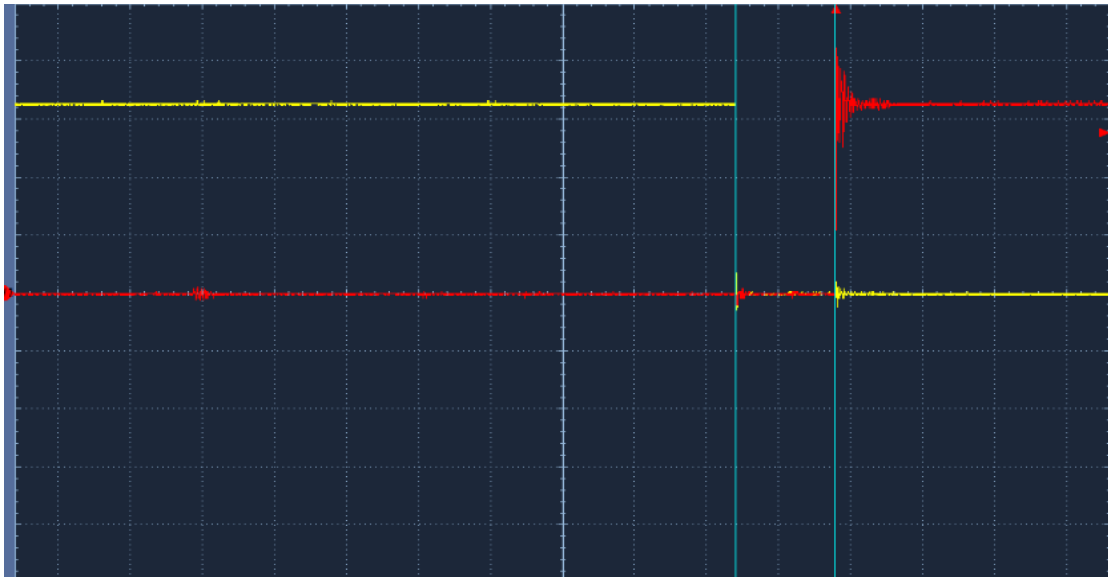
## 5.2 Naměřené průběhy a hodnoty

Po osazení výkonové DPS byly před samotným spuštěním výkonové části naměřeny signály do budicího obvodu tranzistorů. Na obrázku 33 jsou zobrazeny signály do obou kanálů A i B obvodu Si8273.



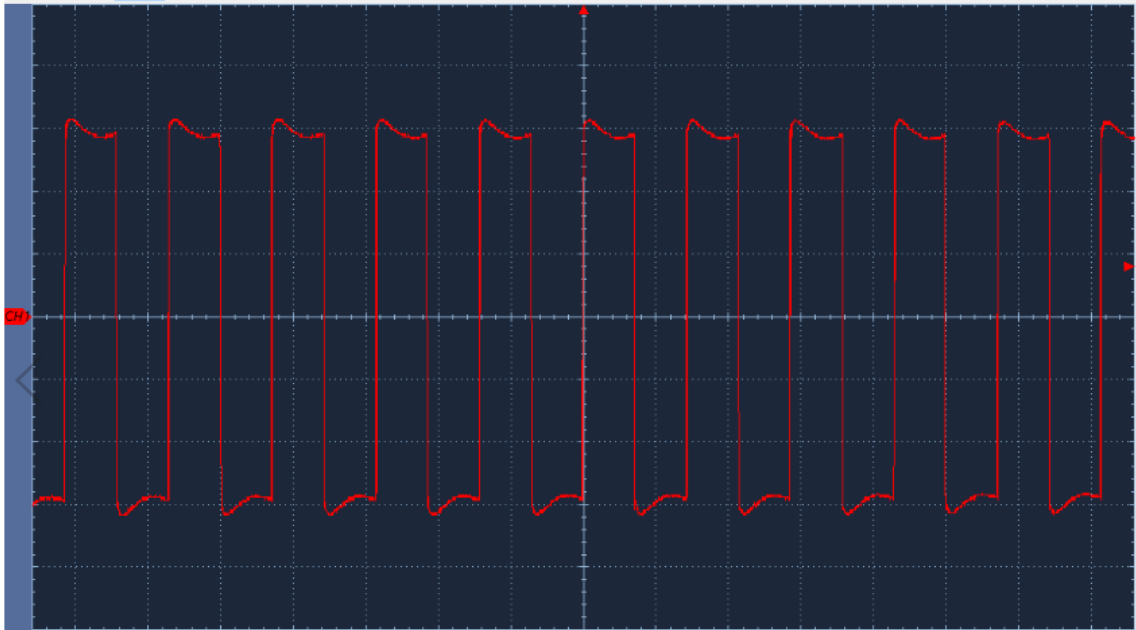
Obrázek 33: Průběh řídicího signálu z mikrokontroléru ( $f=22\text{ kHz}$ ,  $10\text{ }\mu\text{s/d}$ ,  $1\text{ V/d}$ )

Na obrázku 34 je zobrazen detail „dead time“ mezi spínáním jednotlivých tranzistorů. Naměřená hodnota „dead time“ je  $1,38\text{ }\mu\text{s}$ .



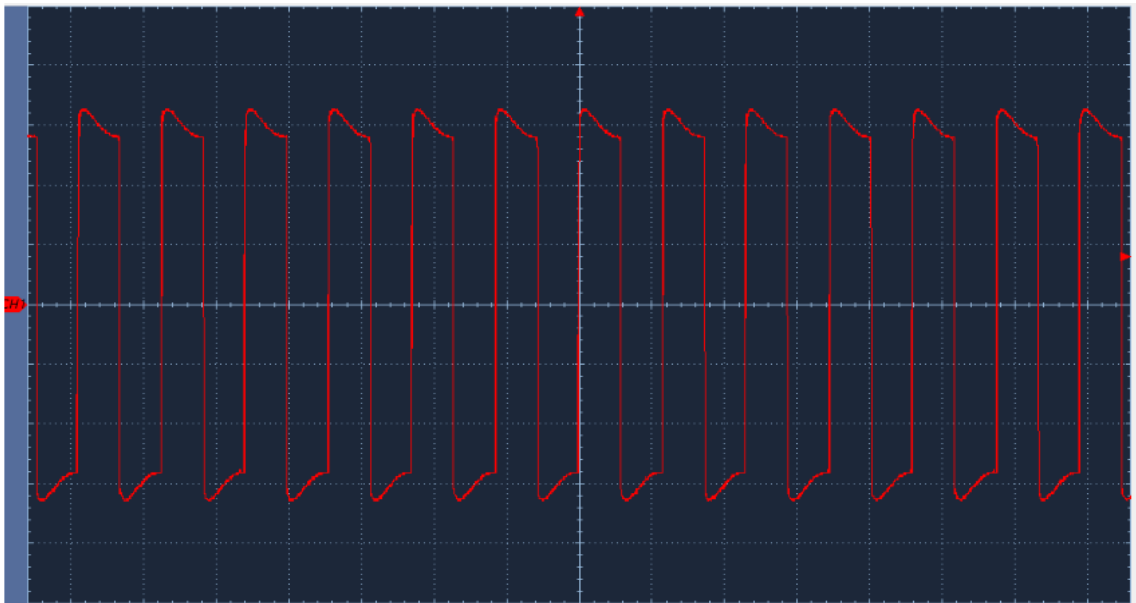
Obrázek 34: Detail dead time mezi kanály A a B ( $f=22\text{ kHz}$ ,  $10\text{ }\mu\text{s/d}$ ,  $1\text{ V/d}$ )

Po ověření správné funkce zařízení generátoru byl na výstup generátoru zapojen vn transformátor, který měl na sekundárním vinutí zapojenou DCSBD výbojku.



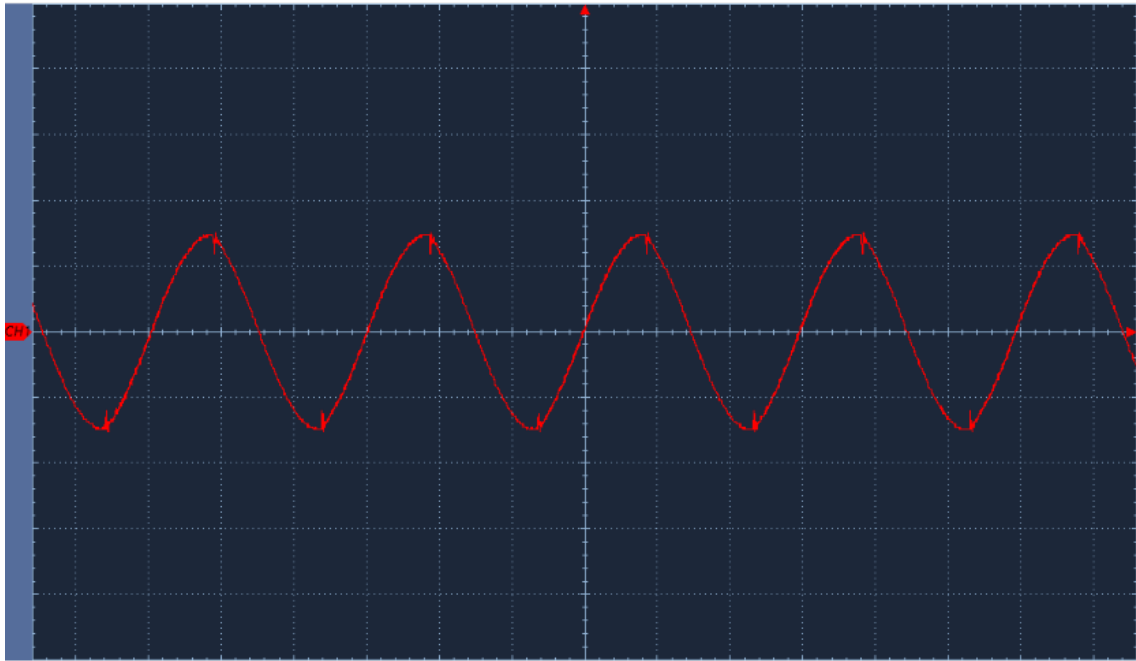
Obrázek 35: Průběh napětí na zátěži při výkonu 400 W (50  $\mu$ s/d, 50 V/d)

Na obrázku 35 je zobrazen průběh napětí na primárním vinutí vn transformátoru při výkonu 400 W. Při výkonu 400 W byla naměřena frekvence 14 kHz s amplitudou 158 V.



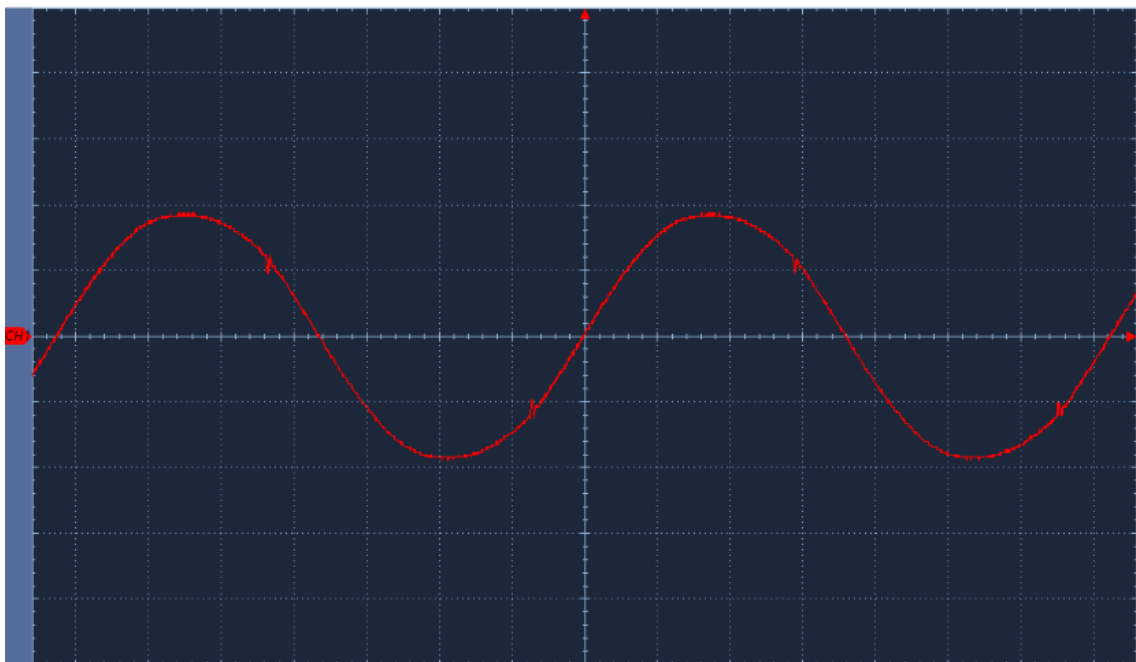
Obrázek 36: Průběh napětí na zátěži při výkonu 100 W (50  $\mu$ s/d, 50 V/d)

Na obrázku 36 je zobrazen průběh napětí při výkonu 100 W. Frekvence při výkonu 100 W byla 17,4 kHz s amplitudou 164 V.



Obrázek 37: Průběh proudu při výkonu 100 W (20  $\mu$ s/d, 2,5 A/d)

Na obrázku 37 je zobrazen průběh proudu do primárního vinutí vn transformátoru při výkonu 100 W. Hodnota amplitudy proudu je 3,8 A.



Obrázek 38: Průběh proudu při výkonu 400 W (10  $\mu$ s/d, 2,5 A/d)

Na obrázku 38 jsou zobrazeny naměřené průběhy proudu do primárního vinutí vn transformátoru při výkonu 400 W. Hodnota amplitudy proudu je 4,7 A. Proud byl měřen pomocí proudového transformátoru AS-104 s převodovým poměrem 1:500. Proudový transformátor byl zatížen rezistorem s hodnotou 1 k $\Omega$ .



Obrázek 39: DCSBD výbojka při příkonu 400 W a pracovním kmitočtu 15 kHz

Na obrázku 39 je zobrazena DCSBD výbojka při provozu. Ze zadní strany výbojky je přiveden olej, který koluje přes výbojku. Slouží jako izolant pro napařené elektrody a zároveň odvádí vytvořené teplo.

## 6. ZÁVĚR

Cílem první části diplomové práce bylo informovat o možných mechanismech vzniku plazmatu a shrnutí jeho základních vlastností a jeho praktické využití. Dále byly shrnuty základní vlastnosti mikrokontrolérů a popis jejich periferií.

Praktická část diplomové práce spočívala v návrhu HMI zařízení pro generátor plazmatu. Nad rámec zadání diplomové práce byla navržena i inovovaná výkonová část generátoru plazmatu. Byla navržena bloková schémata. Dále se diplomová práce zabývala výběrem vhodných součástek pro konstrukci obou jednotek a jejich programového vybavení. Pro realizaci byly použity moderní mikrokontroléry s ARM-Cortex architekturou STM32F411 a STM32F103. Mikrokontrolér z řady F4 byl použit pro obsluhu řídicí jednotky a mikrokontrolér z řady F1 pro měření a generování signálů pro výkonové tranzistory výkonové jednotky. Řídicí jednotka umožňuje ovládat a nastavovat základní parametry generátoru plazmatu skrze dotykovou plochu na LCD displeji. Dále umožňuje ovládat zařízení přes galvanicky oddělené vstupy a signalizovat stavy pomocí výstupních reléových kontaktů. Dovoluje galvanicky oddělené nastavení výkonu do zátěže (výbojky) přes proudovou smyčku 4-20 mA. Nastavené parametry a povely jsou přeneseny po UART komunikaci do výkonové jednotky. Ta generuje řídicí signály pro řízení tranzistorů. Pro proudové zesílení a galvanické oddělení signálů pro řízení tranzistorů byl vybrán obvod Si8273. Pro měření výkonu byla zvolena analogová násobička, která zajišťuje násobení vstupních signálů reprezentujících napětí na výstupu generátoru a proud do zátěže. Vynásobený signál byl následně převeden na digitální hodnotu v A/D převodníku. Komunikační sběrnice SPI měřicí části byla galvanicky oddělena obvodem ADUM3154. Byl zkonstruován funkční prototyp obou částí generátoru včetně programového vybavení. Byly změřeny základní průběhy výkonové jednotky a vytvoření fotografie vzniklého difuzně koplárního bariérového výboje. Z důvodu pandemie nebylo možné v domácích podmínkách naměřit další důležité průběhy na výkonové jednotce.

Hlavní výhodou celkové modernizace generátoru plazmatu je především možnost pohodlně a rychle měnit procesní parametry, které u původního generátoru bylo možné měnit pouze zásahem do zapojení. Další výhodou je přehledné zobrazení měřených a nastavených parametrů na LCD displeji. Díky digitalizaci řídicí části je možné provádět další úpravy programového vybavení, které by např. umožňovaly ovládat generátor pomocí některé z komunikačních sběrnic. Dalším předmětem výzkumu by mohl být vliv změny příkonu do výboje v čase, což by mohlo ovlivnit parametry opracovaných materiálů. Navazující práce bude zaměřena na studium objemových bariérových výbojů. Konkrétně úpravou konstrukce a softwaru stávajícího generátoru plazmatu.

# Literatura

- [1] GROSS B. *Technika plazmatu* [cit.2018-11-12]
- [2] LIMPOUCH J. *Úvod do fyziky plazmatu* [online] [cit. 2018-10-12]  
Dostupné z: [http://www-troja.fjfi.cvut.cz/~limpouch/plazma/01\\_uvod.pdf](http://www-troja.fjfi.cvut.cz/~limpouch/plazma/01_uvod.pdf)
- [3] KULHÁNEK P. *Úvod do teorie plazmatu* [online] 2017 [cit. 2018-12-12]  
Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/studium/fpla.pdf>
- [4] AUBRECHT V. *Technické aplikace plazmatu* [online] 2003 [cit. 2018-12-03] Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-2517-2.pdf>
- [5] FYZWEB *Plazma* [online] [cit. 2018-12-05] Dostupné z:  
[http://fyzweb.cz/materialy/hvizdy/5\\_plazma.pdf](http://fyzweb.cz/materialy/hvizdy/5_plazma.pdf)
- [6] KAZELE J., VANĚK J., MAXA J., ZATLOUKAL M. *Výrobní procesy* 2014 [cit. 2018-12-10]
- [7] BOUŠEK J. *Iontové zdroje* [online] [cit. 2018-12-13] Dostupné z:  
[http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/vak/tab\\_kauf.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/vak/tab_kauf.pdf)
- [8] PAVLIŇÁK D. *Modifikace materiálů v různých formách výbojového plazmatu* [online] 2009 [cit.2018-12-13] Dostupné z:  
[https://is.muni.cz/th/sr4is/DIPLOMOVA\\_PRACE\\_Z\\_MATERIALOVE\\_CHEMEModifikace\\_materialu\\_v\\_ruznych\\_formach\\_vybojoveho\\_plazmatu.pdf](https://is.muni.cz/th/sr4is/DIPLOMOVA_PRACE_Z_MATERIALOVE_CHEMEModifikace_materialu_v_ruznych_formach_vybojoveho_plazmatu.pdf)
- [9] ZISCHKA R. *Multifázový napájecí zdroj dielektrického bariérového výboje* [online] 2018 [cit. 2021-04-04] Dostupné z:  
[https://is.muni.cz/th/apwbr/Diplomova\\_prace\\_Zischka\\_Radek.pdf](https://is.muni.cz/th/apwbr/Diplomova_prace_Zischka_Radek.pdf)
- [10] ZEMÁNAK M., KELAR J., TUČEKOVÁ Z. KRUMPOLEC R., ŠTĚPÁNOVÁ V., HOMOLA T., KOVÁČIK D. ČERNÁK M. *Unique atmospheric-pressure plasma technology for low-cost industrial surface treatments of materials* 2019 [cit. 2021-05-04]
- [11] NOVIELLO C. *Mastering stm32* 2016 [cit. 2018-12-05]

- [12] STANFORD *Pipelining* [online] [cit. 2018-11-05] Dostupné z: <https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/soco/projects/2000-01/risc/pipelining/index.html>
- [13] ST MICROELECTRONICS *STM32 32-bit Arm Cortex MCUs* [online] 2018 [cit. 2018-11-9] Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>
- [14] RUSLING D. *Direct Memory Access (DMA)* [online] [cit. 2018-11-14] Dostupné z: <http://www.science.unitn.it/~fiorella/guidelinux/tlk/node87.html>
- [15] ST MICROELECTRONICS *STM32F411xE* [online] 2018 [cit. 2018-11-9] Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f411re.pdf>
- [16] HEJLEK P. *Návrh smyčky fázového závěsu* [online] 2013 [cit. 2018-10-20] Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30298948.pdf>
- [17] JÁNEŠ V. *D/A a A/D převodníky* [online] [cit. 2018 12-12] Dostupné z: [https://www.fd.cvut.cz/personal/janes/zdt/prednasky/3\\_prevodniky.pdf](https://www.fd.cvut.cz/personal/janes/zdt/prednasky/3_prevodniky.pdf)
- [18] ANALOG DEVICES *Basic linear design* [online] [cit. 2018-11-10] Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Basic-Linear-Design/Chapter6.pdf>
- [19] MICROCHIP TECHNOLOGI *Hardware Abstraction Layer* [online] 2017 [cit. 2018-10-15] Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/hardware-abstraction-layer.pdf>
- [20] SOLOMON SYSTECH LIMITED *SSD1963 Data Sheet* [online] 2012 [cit. 2018-10-16] Dostupné z: <https://www.buydisplay.com/download/ic/SSD1963.pdf>

- [21] SHENZHIEN XPTEK TECHNOLOGYCO *XPT2046 Data Sheet* [online] 2007 [cit. 2018-12-02] Dostupné z: <https://www.buydisplay.com/download/ic/XPT2046.pdf>
- [22] MICROCHIP TECHNOLOGI *MCP23017/MCP23S17 Data Sheet* [online] 2016 [cit. 2021-04-05] Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/20001952c.pdf>
- [23] ANALOG DEVICES ADuM1250 [online] 2015 [cit. 2018-12-06] Dostupné z: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adum1250\\_1251.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adum1250_1251.pdf)
- [24] ON SEMICONDUCTORS *MC34063A, MC33063A, SC34063A, SC33063A*, [online] 2019 [cit. 2021-04-06] Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mc34063a-d.pdf>
- [25] ON SEMICONDUCTORS *Theory and Applications of the MC34063 and A78S40 Switching Regulator Control Circuits* [online] 2013 [cit. 2021-04-09] Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AN920-D.PDF>
- [26] ST MICROELECTRONICS *STM32F103* [online] 2015 [cit. 2021-05-04] Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>
- [27] SILICON LABORATORIES INC. *Si827x Data Sheet* [online] 2016 [cit. 2021-05-04] Dostupné z: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si827x.pdf>
- [28] IXYS *IXFH26N50 Data Sheet* [online] [cit. 2021-05-04] Dostupné z: <https://ixapps.ixys.com/DataSheet/91525.pdf>
- [29] SAMYANG ELECTRONICS *KBU1506* [online][cit. 2021-05-06] Dostupné z: <https://datasheet4u.com/datasheet-pdf/SAMYANGELECTRONICS/KBU1506/pdf.php?id=850786>
- [30] ANALOG DEVICES *AD633*[online] [cit. 2021-05-04] Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD633.pdf>

- [31] CMSIS COMPLIANT *SPI Interface* [online] 2018 [cit. 2018-11-26]  
Dostupné z:  
[https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/Driver/html/group\\_\\_spi\\_\\_interface\\_\\_gr.html](https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/Driver/html/group__spi__interface__gr.html)

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

HMI	Human Machine Interface
DCSBD	Diffuse Coplanar Surface Barrier Discharge
LCD	Liquid Crystal Display
RISC	Reduced Instruction Set Computing
ARM	Advanced RISC Machine
USB	Universal Serial Bus
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter
PLL	Phase locked loop
RTC	Real Time Clock
GPIO	General Purpose Input/Output
SRAM	Static Random Access Memory
DMA	Direct Memory Access
AHB	AMBA High performance Bus
AMBA	Advanced Microcontroller Bus Architecture
IO	Integrovaný obvod
SDA	Synchronious Data
SCL	Synchronious Clock
SDO	Serial Data Out
SDI	Serial Data In
CS	Chip Select
SPI	Seriál Peripheral Interface
HAL	Hardwera Abstraction Layer

## Symboly:

$U$	napětí	(V)
$I$	proud	(A)
$V_{DSS}$	napětí drain-source tranzistoru	(V)
$I_{D25}$	trvalý proud tranzistorem	(A)
$R_{DS(ON)}$	odpor v sepnutém stavu	( $\Omega$ )
$V_{GS}$	napětí na hradle tranzistoru	(V)
$t_f$	sestupná doba	(ns)
$t_{d(off)}$	doba vypnutí tranzistoru	(ns)

## **SEZNAM PŘÍLOH**

<b>PŘÍLOHA A – ZAPOJENÍ SLAVE JEDNOTKY.....</b>	<b>70</b>
<b>PŘÍLOHA B – NÁVRH DPS SLAVE JEDNOTKY.....</b>	<b>75</b>
<b>PŘÍLOHA C – ZAPOJENÍ MASTER JEDNOTKY.....</b>	<b>76</b>
<b>PŘÍLOHA D – NÁVRH DPS MASTER JEDNOTKY.....</b>	<b>82</b>
<b>PŘÍLOHA E – ZDROJOVÉ KÓDY PROGRAMOVÉHO VYBAVENÍ OBOU JEDNOTEK JSOU ULOŽENY NA PŘÍLOŽENÍM CD.....</b>	<b>83</b>