

Obsah

Úvod	3
1 Základní teorie akvaristiky	4
1.1 Historie	4
1.1.1 Počátky	4
1.1.2 Věda a technika	4
1.2 Rozdělení akvárií	4
1.3 Technické vybavení akvária	5
1.3.1 Filtrace vody	5
1.3.2 Osvětlení	6
1.3.3 Ohřev	8
1.3.4 Monitorování	9
1.3.5 Dostupná komplexní řešení	10
2 Systémový návrh	14
2.1 Požadavky	14
2.2 Blokové schéma	14
2.3 Komunikační rozhraní	16
2.3.1 Výběr datové sběrnice	16
2.3.2 Sběrnice CAN	18
3 Návrh řídicí jednotky	19
3.1 Mikrokontrolér	19
3.2 Návrh zapojení a tvorba DPS	20
3.2.1 Zapojení ESP32 modulu	20
3.2.2 Napájecí obvod	21
3.2.3 Deska plošných spojů	22
3.3 Konektivita	24
4 Obecný modul periferie	26
4.1 Mikrokontrolér	26
4.2 Návrh zapojení a tvorba DPS	26
5 Volba a návrh periferií	28
5.1 LED osvětlení	28
5.1.1 Návrh zapojení	28
5.1.2 Tvorba DPS	32
5.2 Senzor teploty	32

5.2.1	Metody měření teploty	32
5.2.2	Realizace sensoru	33
5.3	Senzor výšky hladiny	34
5.4	Senzor pH	34
5.5	Ovládání 230V periferií	34
6	Software	36
6.1	Architektura	36
6.2	Firmware řídicí jednotky	36
6.3	Firmware periferií	36
6.4	Webové rozhraní	36
7	Sestavení a testování	37
	Literatura	38
	Seznam symbolů a zkratk	42
	Seznam příloh	43
A	Schéma řídicí jednotky	44
A.1	Blokové schéma	44
A.2	Zapojení MCU	45
A.3	Napájecí obvod	46
A.4	Konektory	47
A.5	Sběrnice periferií	48
B	Schéma modulu periferií	49
C	Schéma modulu LED osvětlení	50

Úvod

V dnešní době, kdy jsou na vzestupu fenomény jako chytrá domácnost, IoT (Internet of Things) nebo Průmysl 4.0, se na trhu objevuje stále více výrobků, jejichž úkolem je automatizovat a zjednodušit různé oblasti našeho života. Tento trend se dnes dotýká nejedné volnočasové aktivity a to včetně akvaristiky. Tu lze samozřejmě provozovat na různé úrovni, ale i majitelé malých domácích akvárií potřebují k provozu svého koníčku relativně velké množství elektroniky. Běžnou praxí je, že každé z použitých zařízení je ovládáno buďto zcela ručně nebo, pokud disponuje možností vzdáleného přístupu a automatizace, má svou samostanou aplikaci a uživatel tak provoz akvária musí ovládat z několika různých míst, což může být značně nepohodlné a nepřehledné.

Na trhu samozřejmě existují také velmi sofistikované a komplexní systémy, ty ovšem svou cenou vysoce přesahují rozpočet běžného „domácího“ akvaristy. Tato práce se věnuje návrhu a tvorbě zařízení, které má za cíl nabídnout pohodlnou kontrolu a ovládání všech potřebných součástí domácího akvária, a to při zachování jednoduchosti a nízké pořizovací ceny.

1 Základní teorie akvaristiky

1.1 Historie

1.1.1 Počátky

Akvaristika v různých podobách provází lidstvo téměř od prvopočátku. Nejprve se jednalo spíše o chov ryb užitkových, tedy rybářství, ovšem už ve starověké Mezopotámii docházelo také k chovu ryb okrasných. Počátky akvaristiky byly prováděny spíše metodou pokusů a omylů, protože lidem nebyla známa velká část přírodních zákonitostí – životní potřeby chovaných ryb, způsob jejich rozmnožování a v neposlední řadě také procesy, odehrávající se v přírodním ekosystému, zajišťující jeho rovnováhu. Základem udržení chovaných ryb naživu byla zejména častá výměna vody, ani tak ale dlouho nebylo možné udržet ryby při životě dlouhodobě.

V období středověku se poprvé objevuje také dovoz exotických okrasných rybek z cizích zemí, pro naprostý nedostatek znalostí ale často brzy hynou, např. jen proto, že chovatele nenapadne je nakrmit [1].

1.1.2 Věda a technika

Na konci 18. století dochází k rozvoji vědy a několika objevům, které historii akvaristiky zásadně ovlivnily. Poprvé byl izolován kyslík, byl objasněn princip dýchání živočichů a následně také fotosyntéza. Akvaristika, v tehdejší době umělý chov ryb za účelem pozorování a výzkumu, byla provozována zejména na vědecké půdě a byl zde zájem o zdokonalení používaných technik a postupů. V roce 1837 S. H. Ward prakticky prokázal, že osvětlené akvárium obsahující jak rybky, tak i rostliny, vydrží velmi dlouho bez nutnosti výměny vody [1]. Princip výměny plynů byl významným milníkem ve snaze dosáhnout v akváriu rovnováhy podobné přírodnímu prostředí.

Při stále nových poznatcích o životních potřebách ryb a o akvariijní rovnováze bylo nutné přijít s různými technickými řešeními. Akvária 19. a 20. století už byla vytápěná a uměle okysličovaná. Původní mechanická řešení a lihové kahany byly postupně nahrazovány elektrickými přístroji. V pozdějších letech pak přibýlo i umělé osvětlení a systémy filtrace vody.

1.2 Rozdělení akvárií

Akvária je možné rozdělit na základě mnoha různých parametrů jako je např. velikost, materiál a tvar anebo jejich funkce. Pro účely této práce jsou však relevantní zejména rozdělení, která jsou zásadní pro rozsah použité akvaristické techniky.

V jednoduchosti lze tedy akvária rozdělit podle biotopu [2]:

- Sladkovodní
- Brakická – salinita přibližně 5 až 15 ‰
- Mořská – salinita přibližně 30 až 40 ‰

Asi není potřeba vysvětlovat, že pro akvária mořská a brakická nestačí použít běžnou kohoutkovou vodu, ale je potřeba ji před použitím upravit. Má-li být systém automatizován, je nutné přidat zařízení, které bude salinitu průběžně monitorovat a upravovat. Komplexní profesionální systémy tyto možnosti nabízejí, ale pořizovací cena je relativně vysoká (viz kapitola 1.3.5). Lze tedy konstatovat, že po technické stránce je provoz sladkovodních akvárií jednodušší než provoz akvárií mořských.

Další dělení akvárií je možné z hlediska jejich obsazení:

- Čistě rostlinná akvária
- S běžnými druhy ryb
- Se speciálními druhy – zvýšené nároky na parametry vody

Rozsah použité akvaristické techniky a zejména požadavek na její přesnost je závislý na volbě umístěných druhů rostlin a živočichů. Každý druh má své optimální životní podmínky a zatímco některým živočichům se bude dařit ve vodě o teplotě v rozsahu klidně i 10 °C, jiné vyžadují téměř konstantní teplotu v rozsahu třeba jen 2 °C [3], to zásadně ovlivní požadavky na přesnost měření teploty i způsob její regulace. Stejně tak je tomu i s dalšími parametry.

Zařízení vytvořené v rámci této práce bude určeno pro použití v menším sladkovodním akváriu osazeném běžnými druhy rostlin a živočichů bez speciálních životních potřeb – tedy scénář běžného domácího akvaristy s omezeným rozpočtem. Není ale vyloučeno jeho budoucí rozšíření i pro náročnější aplikace.

1.3 Technické vybavení akvária

V této kapitole je uveden výčet základní akvaristické techniky nutné k provozu domácího akvária, rozčleněné podle svého účelu. Ve druhé části se text věnuje přehledu různých dostupných komplexních systémů zaměřujících se na automatizaci provozu akvária. Cílem kapitoly je seznámit čtenáře blíže s problematikou založení a provozu akvária a různými možnostmi technického zajištění jak domácích, tak i profesionálních akvárií.

1.3.1 Filtrace vody

Úkolem filtru je průběžně odstraňovat z vody nečistoty a to jak mechanické, tak zejména v podobě škodlivých látek vznikajících v akváriu. Filtrační materiál je volen tak, aby tvořil vhodné prostředí pro život filtračních bakterií, které se těmito

škodlivými látkami živí [4]. Rozlišujeme tři základní typy akvariálních filtrů – vnější, vnitřní a závěsné. Na obr. 1.1 se nachází ukázka vybraných zástupců jednotlivých typů.

Vnější filtr se rozumí zařízením umístěné obvykle ve skřínce pod akváriem, mívá připojeny dvě hadice – na vstup a výstup vody. Toto řešení je považováno za nejlepší, protože filtr není omezen rozměry a může tak dosahovat daleko vyššího výkonu a účinnější filtrace díky většímu množství filtračních materiálů.

Vnitřní filtr (někdy také ponorný) je levným, ale nepříliš účinným řešením pro malá akvária. Nachází se z velké části v akváriu a za pomoci motorku tlačí vodu přes obvykle molitanovou náplň.

Závěsný filtr je kompromisním řešením. Cenou i účinností filtrace se pohybuje mezi oběma zmíněnými typy. Nezabírá prostor uvnitř akvária a může tak využít větší objem filtrační hmoty než filtr vnitřní. Instalace je provedena zavěšením na stěnu akvária, je tedy velmi jednoduchá.



SUNSUN HJ-752
vnitřní filtr



SUNSUN CBG-500
závěsný filtr



Oase BioMaster 350
vnější filtr

Obr. 1.1: Příklad různých typů filtrů. Převzato z [5].

1.3.2 Osvětlení

Funkce osvětlení akvária je dvojitá. Jednak jde o estetický dojem z pohledu pozorovatele, kdy vhodné nasvícení přidává akváriu na atraktivitě. Druhá se osvětlení snaží nasimulovat osazenstvu akvária přirozené životní podmínky, aby celý ekosystém mohl fungovat.

Hlavními parametry při výběru svítidla jsou jeho **intenzita**, **spektrální charakteristika** a **spotřeba**.

Příliš intenzivní světlo zvyšuje riziko nežádoucí tvorby řas a pro ryby může být stresovým faktorem, nízká intenzita zase může způsobit špatný růst rostlin [6]. Na internetu existuje mnoho návodů a rad na stanovení správné intenzity, ale protože zde hraje roli spousta dalších parametrů jako např. výška hladiny nebo konkrétní typ rostlin, je vhodné tyto hodnoty brát pouze jako orientační a intenzitu osvětlení upravit během provozu podle potřeby. Výpočet se také liší pro jednotlivé typy svítidel.

Spektrum světla hraje roli hned z několika důvodů. Rostliny pro tvorbu chlorofylu a následnou fotosyntézu potřebují světlo zejména vlnových délek 440 nm (modrá barva) a 660 nm (červená barva) [7], pokud by zvolené osvětlení tyto vlnové délky neobsahovalo, nemohou rostliny správně fungovat. Akvárium osvětlené pouze těmito dvěma barvami by ale nevypadalo vizuálně dobře, proto se využívá také širokospektrální bílé světlo, které svým spektrem odpovídá co nejlépe dennímu světlu. Specializovaná svítidla pak nabízejí možnost napodobit světelné spektrum různých vodních prostředí a přizpůsobit se tak i rostlinám a živočichům žijícím ve velkých hloubkách.



Obr. 1.2: Trubice s LED páskem a manuální stmívač a časovač. Převzato z [5].

Na trhu jsou v současné době tři typy akvaristických světel: **zářivky**, **výbojky** a **LED svítidla** [8]. Zářivky jsou považovány za dnes již nepříliš moderní řešení a bývají nahrazovány LED svítidly, ty se vyznačují lepší účinností (tedy nižší spotřebou energie při stejné intenzitě světla), delší životností a širší paletou barev. U zářivek také nebylo možné plynule regulovat intenzitu, jako je tomu u LED, a dosáhnout tak např. postupného rozsvícení nebo zhasnutí světla simulujícího východ a západ slunce. Skoková změna při zapnutí nebo vypnutí světla je pro ryby také zbytečným stresovým faktorem [3]. Co se týče výbojek, ty nacházejí uplatnění zejména pro hluboké nádrže, protože jejich světlo je bodové a intenzita dostatečná k prosvícení

velkého objemu vody, spotřeba energie je ale v porovnání s LED vysoká, takže pokud to není nezbytně nutné, je lepší se jim vyhnout.

Typické domácí akvárium je osvětleno jedním nebo několika samostatně stmívatelnými LED svítidly a to buďto v podobě LED pásků nalepených na hliníkovém profilu anebo hotového svítidla, ve kterém jsou čipy s LED zabudovány napevno. Stmívání je nastavováno buď ručně anebo za pomoci mobilní aplikace dodané výrobcem stmívače. Příklad běžně dostupného výrobku lze vidět na obr. 1.2.

1.3.3 Ohřev

Většina okrasných sladkovodních ryb běžně chovaných akvaristy pochází z tropických krajů a vyžaduje teplotu vody v rozmezí 22 – 26 °C [9], to je o něco málo vyšší teplota než bývá v domácnosti typická a proto je nutné zajistit akváriu možnost dodatečného ohřevu. Nejčastějším řešením je ponorné topné těleso na odporové bázi s vlastní termostatovou regulací, viz obr. 1.3.



Obr. 1.3: SUNSUN topítka 100W s termostatem. Převzato z [5].

Z principu fungování termostatu vyplývá, že výsledná teplota vody není v čase konstantní, ale osciluje okolo nastavené hodnoty. Rozsah kolísání teploty je pak závislý na hysterezi termostatu, obecně lze říci, že to může být i několik stupňů. Pro většinu aplikací to není velký problém, ale některé druhy ryb mohou být na změny teploty náchylnější, v takovém případě je potřeba buďto vybrat topítka takové, kde výrobce rozsah teplot uvádí, anebo zvolit jiný způsob regulace.

1.3.4 Monitorování

Jak již vyplynulo z úvodních kapitol, v akváriu probíhá celá řada procesů ovlivňujících jeho stav. Klíčem k vytvoření prosperujícího akvária je dosažení rovnováhy a stability mezi nimi za pomoci vhodně nastavené akvarijní techniky. Nejen u začínajících akvaristů se mohou vyskytnout problémy s růstem rostlin, zdravím ryb nebo třeba výskytem řasy. Odhalit příčiny těchto problémů může být mnohdy obtížné, ovzvláště pokud není k dispozici dostatečné množství informací o tom, co se v akváriu děje.

Existuje několik veličin, které úzce souvisí s procesy v akváriu a které je možné také poměrně jednoduše sledovat. Na trhu je celá řada produktů sloužících k tomuto účelu. Většinou je na výběr možnost analogového nebo čistě mechanického přístroje případně samostatného digitálního čidla, existují ale také komplexní řešení, těm se dále věnuje kapitola 1.3.5.

Teplota

Umístěním teploměru (ať už v analogové nebo digitální podobě) do akvária je možné zkontrolovat správné nastavení topného tělesa a následně provést jeho úpravu. Také lze včas získat informaci o jeho případné poruše a nebo třeba jen nedostatečném výkonu.

pH a CO₂

Hodnota pH popisuje kyselost resp. zásaditost měřeného vodného roztoku. Běžně se používá logaritmická stupnice s hodnotami 0 až 14, přičemž zcela neutrální voda má pH rovno 7, menší hodnoty mají roztoky kyselé a větší než 7 pak roztoky zásadité. Obecně lze říci, že pro ryby je vyhovující pH v rozsahu 6 až 8 [9].

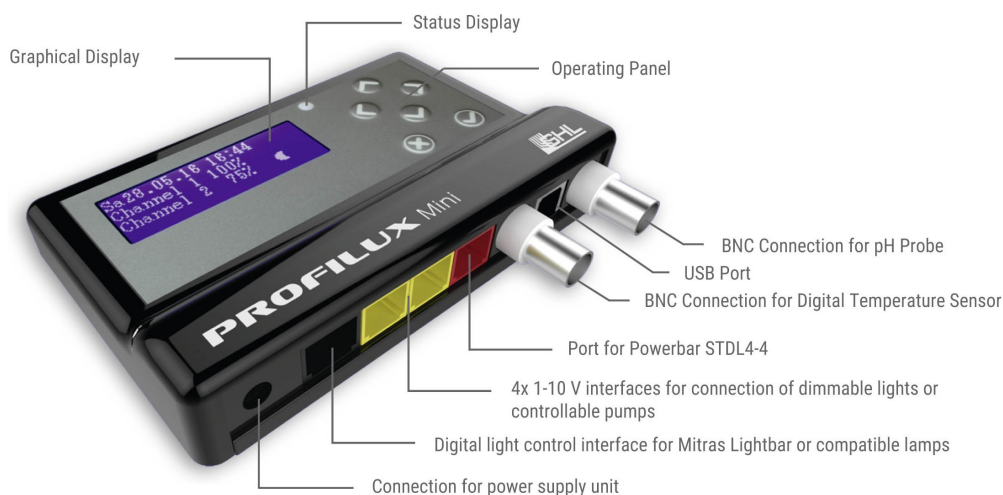
Důležitým parametrem vody z pohledu rostlin a ryb je koncentrace CO₂. Přirozeně platí, že rostliny CO₂ spotřebovávají při fotosyntéze a jistá koncentrace je tedy nutná pro jejich prosperitu, naopak příliš vysoká koncentrace může být nebezpečná pro ryby, kterým (obdobně jako např. lidem) komplikuje dýchání. Obsah CO₂ ve vodě je obtížné přímo měřit, jeho měnící se koncentrace má ale vliv právě na hodnoty pH, s rostoucí koncentrací CO₂ se pH vody snižuje a obráceně [10, 6].

K měření pH vody se používají různé chemické testy (kapkové testy, testovací papírky), které je možné zakoupit v chovatelských potřebách. Z pohledu automatizace je mnohem zajímavějším řešením pH sonda, která umožňuje nepřetržité měření této veličiny a případnou okamžitou regulaci dávkování CO₂.

1.3.5 Dostupná komplexní řešení

Tato sekce se věnuje porovnání několika nejznámějších systémů v oblasti automatizace akvárií. Je důležité připomenout, že ve všech oblastech elektrotechniky dochází k rychlému rozvoji a každý rok se na trhu objevují nové produkty se stále lepšími parametry a nižší cenou. Informace uvedené v této kapitole, a to zejména cenové údaje, se mohou velmi rychle stát neaktuálními a jsou tedy relevantní pouze v době vzniku této práce.

Při tvorbě této kapitoly byly jako zdroj informací použity jednak oficiální materiály výrobců, ty ovšem samozřejmě obsahují vždy pouze pozitivní informace, dále pak různé uživatelské recenze na platformě YouTube popř. diskuzních fórech, nejedná se o zcela seriózní zdroje a proto je nutné také informace z této kapitoly brát s rezervou.



Obr. 1.4: GHL ProfiLux Mini, nejmenší dostupný kontroler této firmy. Převzato z [11].

GHL – ProfiLux

Německá firma GHL se v oblasti akvaristiky pohybuje již přes 20 let a patří nepochybně ke špičce na trhu z hlediska komplexity a spolehlivosti. Základem jejich systému ProfiLux je kontrolér (např. nejmenší varianta viz obr. 1.4), který je možné konfigurovat z PC za pomoci kabelu anebo vzdáleně s použitím aplikace nebo webového rozhraní. Ke kontroleru lze připojit celou řadu periférií z portfolia firmy, jedná se o různé typy senzorů, dávkovače (pro úpravu parametrů vody), pumpy nebo říditelný prodlužovací přívod pro síťové zásuvky (laicky řečeno „chytrá prodlužovačka“). Společnost si zakládá na opravdu vysoké kvalitě a přesnosti svých výrobků, což se ale odráží také na jejich ceně.

Na výběr je z několika variant systému, přičemž ty nejdražší dokážou obsloužit i opravdu rozsáhlé a náročné akvaristické instalace. Cena nejlevnějšího základního setu je přibližně od 10 000 Kč [11, 12].

Neptune Systems – Apex

Systém Apex je nepochybně další ze světových leaderů v této oblasti. Opět je k dispozici několik variant systému podle požadavků a finančních možností uživatele a systém je také velmi modulární. Stejně jako firma GHL, i Neptune Systems je na trhu více než 20 let a jedná se tedy o léty ověřenou značku. Architektura systému je podobná a kromě samotného kontroleru je opět v nabídce celá řada kompatibilních periférií. Dle uživatelských recenzí je konfigurace systému oproti GHL výrazně jednodušší a není nutná znalost programování, navíc systém už od výroby obsahuje přednastavené nejčastější scénáře použití.



Obr. 1.5: Neptune Systems Apex EL, základní set. Převzato z [13].

Cena opět závisí na množství zakoupených modulů, základní set s podobnou výbavou jako u GHL je k dispozici přibližně od 12 000 Kč [14, 13].

CoralVue – HYDROS

Firma CoralVue se svým systémem HYDROS je na trhu oproti svým konkurentům relativně krátce, přibližně 3 roky, svým originálním přístupem a cenově dostupným řešením si ale své zákazníky našla rychle. Systém je svou architekturou ještě více modulární než jeho konkurenti, umožňuje v rámci jedné aplikace spojit i více kontrolerů, které mezi sebou komunikují. Dokonce v případě poruchy hlavního kontroleru dokáže jeho roli převzít jiný připojený kontroler a systém tak zůstane dále v provozu.

Kromě bezdrátově řízeného modulu se čtyřmi síťovými zásuvkami nově firma nabízí také modul Control XP8, který krom zásuvek obsahuje i vlastní kontroler, může tak fungovat zcela samostatně, stále však umožňuje také drátové spojení s dalšími

kontrolery nebo bezdrátové připojení k dalším zásuvkám. Toto může sloužit jako jednoduché univerzální řešení pro menší akvária s možností budoucího rozšíření.



Obr. 1.6: CoralVue HYDROS Control X2 Starter pack. Převzato z [15].

Základní minimální sada je dostupná již od přibližně 4500 Kč, aby byla ale výbava stejná jako u výše zmíněných konkurentů je potřeba dokoupit ještě pH sondu za přibližně 800 Kč [16, 15].

Seneye

Společnost Seneye nenabízí komplexní řešení pro automatizaci, ale i přesto jsou její produkty zajímavé a pro mnoho akvaristů mohou být skutečně užitečné. Místo pokročilého ovládání akvarijní techniky se výrobky zaměřují pouze na monitorování parametrů vody (popř. dalších veličin), důraz je kladen na maximální jednoduchost použití. Vnitřním sladkovodním akváriím je věnována řada Seneye Home a veškeré monitorování je zajištěno jedním malým zařízením, které uživatel přímo ponoří do vody a pomocí kabelu připojí k počítači ze kterého se zařízení napájí a zároveň do něj odesílá data. Alternativně lze přikoupit také krabičku, která slouží jako webserver, do ní se zařízení připojí namísto počítače a data jsou rovnou zálohována do cloudu, odkud jsou uživateli dostupná v mobilní aplikaci.

Zařízení monitoruje teplotu, pH, úroveň škodlivého amoniaku, osvětlení a hladinu vody. Umožňuje také odesílat oznámení při překročení nastavené meze některého z parametrů.

Cena samotného monitorovacího zařízení je přibližně 3000 Kč a podobná je také cena zmíněného webserveru. Pro automatické monitorování se zálohou na cloud je tedy potřeba počítat s investicí okolo 6000 Kč [17].



Obr. 1.7: Seneye Home a Seneye Web Server. Převzato z [17].

2 Systémový návrh

Tato část práce popisuje proces návrhu vlastního zařízení, které by mělo být výstupem této práce. Věnuje se konkretizaci požadavků na zařízení a koncepčnímu návrhu na systémové úrovni, který je zde podpořen blokovým schématem. Po celou dobu tvorby zařízení je kladen důraz na požadavky stanovené v této kapitole a na jejich základě jsou tvořena vhodná technická řešení. Detailně se jednotlivým blokům a jejich návrhu věnují následující kapitoly.

2.1 Požadavky

Cílem je vytvořit zařízení, které umožní co nejvíce automatizovat provoz akvária. Hlavním aspektem by měla být jednoduchost použití pro koncového uživatele, vše by mělo být nanejvýš intuitivní a přehledné. Zařízení musí mít možnost připojení k internetu prostřednictvím sítě Wi-Fi, uživatel tak bude moci zařízení konfigurovat a sledovat z libovolného místa za pomoci webové stránky popř. mobilní aplikace.

Požadavky jednotlivých akvaristů se mohou lišit a zároveň se v čase měnit. Vytvoření dokonalého a všestaránného zařízení, které vyhoví všem účelům použití není v časových ani finančních možnostech bakalářské práce, proto byl stanoven požadavek, aby bylo zařízení co nejvíce modulární a rozšiřitelné. Musí být zvolena taková architektura, aby bylo možné v budoucnu přidat další funkce a periferie bez nutnosti modifikovat stávající hardware.

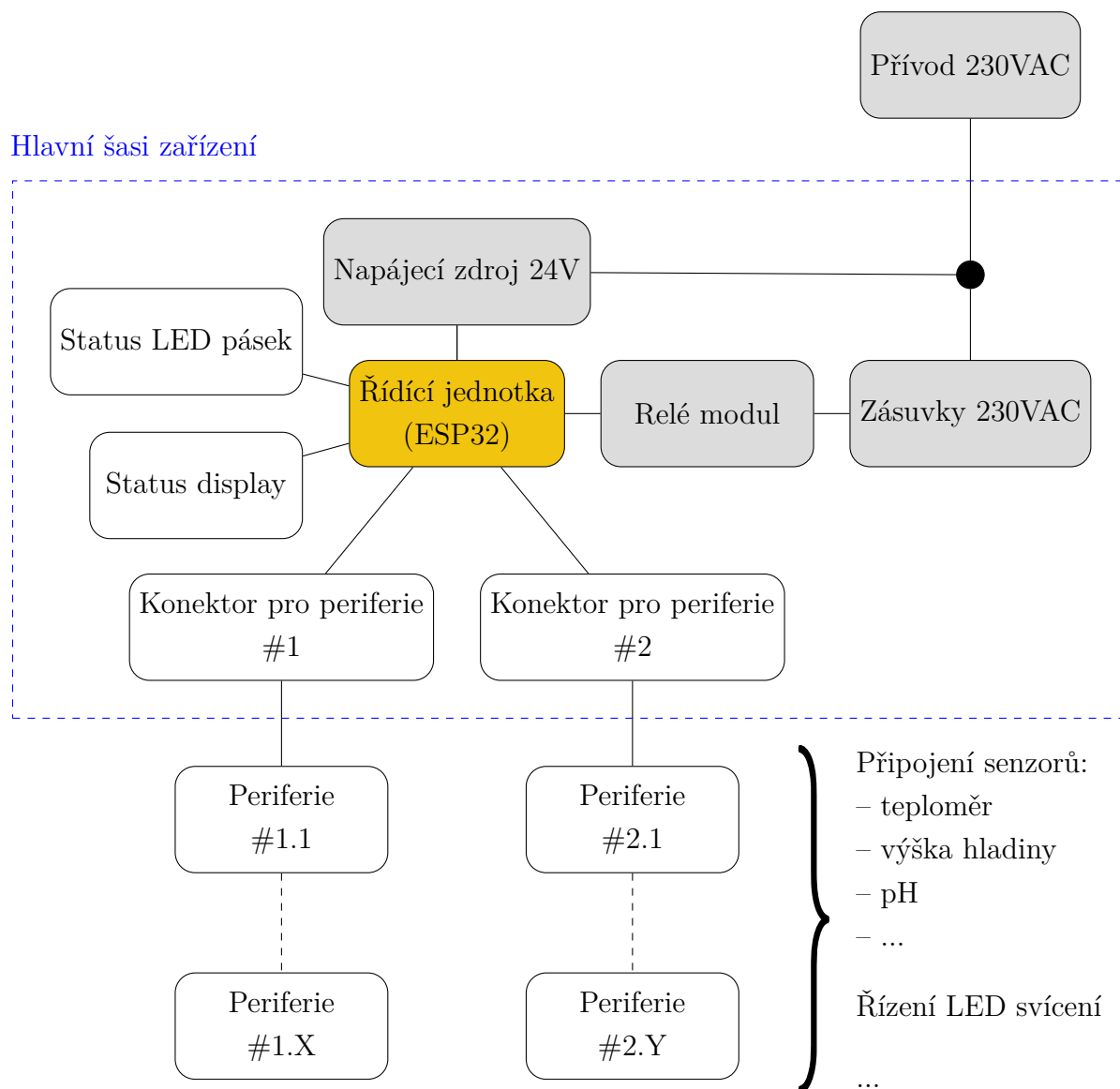
Výstupem bakalářské práce by mělo být zařízení schopné monitorovat některé akvaristické veličiny a na základě jejich hodnoty informovat uživatele a ovládat akvárium. Zařízení bude přímo řídit LED páskové osvětlení na 12 V a spínat popř. vypínat již existující akvaristické přístroje pracující se síťovým napětím 230 V.

Jelikož modulární architektura bude nepochybně vyžadovat použití více než jednoho mikrokontroleru a tedy také více různých firmwarů, je potřeba zajistit jejich vzájemnou kompatibilitu a stabilitu celého systému. Veškerý firmware tak musí být verzovaný a po připojení nové periferie musí řídicí jednotka rozpoznat, o jakou periferii se jedná. V případě připojení nekompatibilní periferie (např. z důvodu zastaralého firmwaru řídicí jednotky) musí být uživatel upozorněn a nesmí být nijak narušena funkce zbytku systému. Aby bylo možné těmto situacím předejít, musí mít řídicí jednotka možnost vzdálené aktualizace firmwaru.

2.2 Blokové schéma

Blokové schéma zařízení se nachází na obr. 2.1. Pro pohodlné použití je hlavní část zařízení soustředěna do jedné krabičky napájené přívodním síťovým kabelem. Uživa-

tel pak dle potřeby připojí příslušenství pracující s napětím 230 V do integrovaných síťových zásuvek a veškeré další periferie za pomoci jednoho z univerzálních konektorů. O stavu zařízení bude uživatel informován sérií notifikačních LED a malým displayem.



Obr. 2.1: Blokové schéma systému.

Pro napájení vlastní elektroniky zařízení je v šasi umístěn hotový modul spínaného zdroje převádějící síťové napětí 230 V na stejnosměrných 24 V se kterými pak zařízení dále pracuje (viz kapitola 3.2.2).

Z hlediska bezpečnosti je potřeba zajistit, aby se uživatel ani samotná nízkonapěťová část obvodu nemohli dostat do kontaktu s nebezpečným napětím. Toho je dosaženo galvanickým oddělením částí zařízení pracujících se síťovým napětím.

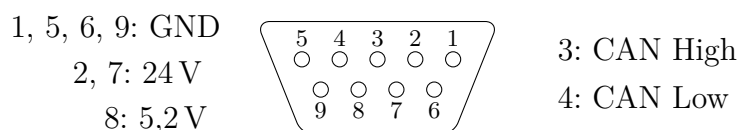
V blokovém schématu (obr. 2.1) jsou všechny tyto části podbarveny šedou barvou. Pro spínání síťových zásuvek jsou použita relé, které samy o sobě tvoří galvanickou izolaci, pro ještě lepší ochranu mikrokontroleru je pak zvolena varianta s optočleny. Pro napájecí zdroj s výstupem 24 V je přítomnost galvanického oddělení kontrolována v dokumentaci výrobce.

2.3 Komunikační rozhraní

Před návrhem jednotlivých částí zařízení je zapotřebí definovat komunikační rozhraní mezi řídicím modulem a periferiemi, protože právě od jeho specifikace se následně odvíjí tvorba zbytku zařízení.

Úkolem rozhraní je obousměrně komunikovat s periferiemi, tedy např. stahovat data z připojených sensorů a zároveň za pomoci příkazů periferie řídit. Kromě datové komunikace musí rozhraní periferie také napájet a to i v případě energeticky náročnějších obvodů jako např. osvětlení.

Pro připojení periferií byl zvolen konektor typu D'sub 9, který je cenově dostupný, disponuje dostatečným množstvím pinů a umožňuje montáž jak do panelu, tak i jako zakončení kabelu. Přiřazení a funkce jednotlivých vodičů jsou vyobrazeny na obr. 2.2. Konektor disponuje dvěma úrovněmi napájení, 5 V slouží k napájení mikrokontrolerů modulů periferií a k nim připojených sensorů nebo jiné nenáročné elektroniky. Je pravděpodobné, že s připojením více periferií za sebe dojde k úbytku napětí v důsledku ztrát na vedení, aby bylo toto částečně kompenzováno, napětí vystupující z měniče řídicí jednotky je přibližně o 0,2 V vyšší. Druhou napájecí linkou je výstup přímo z externího spínaného zdroje, tedy s napětím 24 V, ten slouží pro výkonově náročnější periferie, které si již napětí dále upraví podle potřeby a nebudou neúměrně zatěžovat první zmíněnou napájecí linku.



Obr. 2.2: Přiřazení pinů konektorů D'sub 9 pro připojení periferií.

2.3.1 Výběr datové sběrnice

Existuje celá řada datových sběrnic, které jsou v elektrotechnice hojně využívány. Každá z nich má své výhody a nevýhody stejně jako jisté limitace použití. V tab. 2.1 se nachází výčet různých sběrnic, které byly při výběru uvažovány.

Tab. 2.1: Datové sběrnice, porovnání [18].

Typ	Výhody	Nevýhody	Limitace
SPI	Více zařízení na sběrnici Vysoká rychlost přenosu dat Jednoduchý protokol	Nutný CS pin pro každé zařízení	Určeno na krátkou vzdálenost
I ² C	Pouze 2 piny Více zařízení – 128 adres	Riziko kolize adres Nižší rychlost přenosu dat proti SPI	Určeno na krátkou vzdálenost
CAN	Vysoká spolehlivost Dlouhé propojení	Vyšší náklady na implementaci Nižší rychlost přenosu dat	Nepodporovano běžnými MCU – nutný externí řadič
UART	Jednoduchá implementace Možnost asynchronní komunikace	Nižší rychlost přenosu dat proti SPI Pouze 2 zařízení	Pouze 2 zařízení Určeno na krátkou vzdálenost

Protože hlavní šasi zařízení nabízí dva konektory, ale žádoucí je připojit větší předem nedefinovaný počet periférií, je potřeba, aby sběrnice umožnila připojení více zařízení. Obecný problém všech sběrnic je omezení jejich maximální délky, s rostoucí délkou se sběrnice snáze zaruší, navíc z důvodu parazitních vlastností vedení dochází k zaoblení ostrých hran signálu, dlouhé vedení se chová jako filtr typu dolní propust. V důsledku toho se snižuje maximální rychlost sběrnice.

Sběrnice SPI nebo I²C je obecně doporučeno používat pouze v rámci DPS, tedy na krátké vzdálenosti. Při snížení rychlosti je možné je používat i na větší vzdálenost, ovšem modulární scénář vytvářeného systému teoreticky nestanovuje žádný délkový limit a bylo by velmi obtížné spolehlivě určit, kolik periférií uživatel může za sebe zapojit při zachování spolehlivé komunikace.

UART je výhodný svou jednoduchou implementací a umožňuje obousměrnou asynchronní komunikaci. Nevýhodou je že funguje pouze pro dvě zařízení. Jednou z možností jak tuto limitaci obejít by bylo zavedení řetězového způsobu komunikace, kdy by každé zařízení komunikovalo se dvěma sousedními a informace by se postupně předávala dále až k cílovému zařízení. Tento systém je relativně jednoduchý, ale například v případě poruchy jednoho zařízení se odpojí všechna následující zařízení, což může mít neočekávané následky.

Sběrnice CAN je určena pro provoz v průmyslovém prostředí (zejména je po-

užívána v automobilovém průmyslu) a díky své robustnější konstrukci ji lze bez problému použít i na delší vzdálenosti a pro více zařízení. Při komunikaci je používán diferenční pár vodičů, takže i odolnost proti rušení je výrazně lepší. Nevýhodou je ale její o něco složitější a dražší implementace. Většina běžných mikrokontrolerů nemá pro CAN vestavěnou periférii a je tak potřeba buďto zvolit dražší mikrokontroler nebo připojit externí ovladač řízený např. přes SPI, dále je nutné přidat i řadič, který převede signál na diferenční a zároveň umožní zvýšit provozní napětí na 12 nebo 24 V, čímž dojde k ještě lepšímu potlačení šumu.

2.3.2 Sběrnice CAN

Po důkladné rešerši a zvážení zmíněných kladů a záporů byla zvolena sběrnice CAN. ESP32 jakožto již zvolený mikrokontroler řídící jednotky obsahuje vestavený CAN kontroler a pro moduly periférií byl na základě tohoto rozhodnutí zvolen také vhodný mikrokontroler. Co se týče nutnosti přidání řadiče, jedná se sice o další součástku, která na první pohled navyšuje cenu zařízení, kromě převodu signálu na diferenční ale zajišťuje také ochranu konektorů proti mnoha nežádoucím jevům jako je zkrat, ESD výboj nebo přepětí. Tímto se ve výsledku celé zapojení zlevní a zjednoduší.

3 Návrh řídicí jednotky

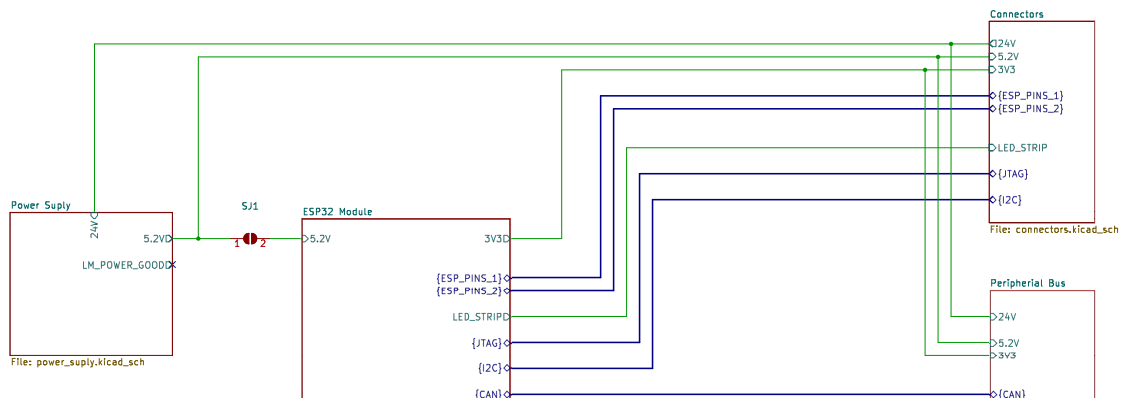
Řídicí jednotka je jádrem celého zařízení. Její funkcí je řízení systému a zároveň komunikace s uživatelem za pomoci Wi-Fi. Musí v sobě nést informaci o konfiguraci systému a na jejím základě zpracovávat data z jednotlivých připojených periferií. Podle uživatelem nastavených scénářů pak dynamicky reaguje na změny hodnot měřených akvaristických veličin a ovládá akční členy (osvětlení, ohřev, filtr vody). Za pomoci displaye a LED pásku také informuje uživatele o momentálním stavu zařízení.

3.1 Mikrokontrolér

Při výběru vhodného mikrokontroleru bylo potřeba zohlednit výše zmíněné požadavky, tedy zejména Wi-Fi konektivitu a dostatečný výkon k její obsluze, periferii CAN a dostatek GPIO pinů pro připojení zbylých modulů v hlavním šasi (viz obr. 2.1). Na trhu existuje vícero výrobců nabízejících mikrokontrolery s vhodnými parametry, z důvodu jednoduchosti použití a nízké ceny byl nakonec zvolen model ESP32 od firmy Espressif, konkrétně modul WROOM-32E [19] s čipem ESP32-D0WDR2-V3 [20]. Tento modul je často využíván v různých hobby projektech, ale také v komerčních aplikacích zejména v oblasti chytré domácnosti. Z tohoto důvodu k němu existuje velká škála softwarových knihoven a v rámci komunity uživatelů je také sdíleno mnoho projektů, kterými je možné se inspirovat.

3.2 Návrh zapojení a tvorba DPS

Řídící jednotka je tvořena jednou speciálně navrženou DPS, která kromě samotného mikrokontroleru obsahuje také měnič napětí typu BUCK ke snížení napájecího napětí externího zdroje na hodnotu 5,2 V. Toto napětí je pak dále používáno pro napájení samotného mikrokontroleru řídicí jednotky a zároveň je vyvedeno na konektor pro připojení periférií. Blokové schéma na úrovni logických bloků v rámci jedné DPS je na obr. 3.1, jednotlivým částem se blíže věnují další kapitoly. Celé schéma je k dispozici v příloze A.



Obr. 3.1: Blokové schéma řídicí jednotky. Vytvořeno v KiCad 7.0.

3.2.1 Zapojení ESP32 modulu

Při tvorbě schématu bylo vycházeno z dokumentace výrobce [19] a také ze schématů různých existujících vývojových desek. K zajištění správné a spolehlivé funkce modulu je potřeba dodržet několik věcí. Výřez schématu obsahující potřebné doplňující obvody pro ESP32 modul je na obr. 3.2.

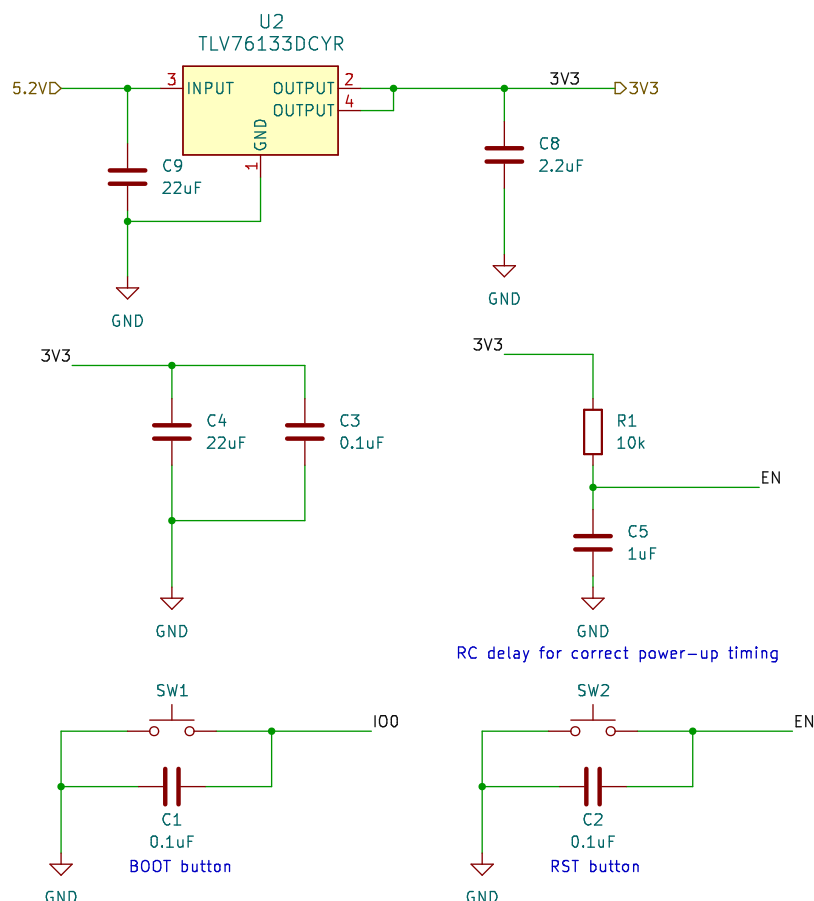
Na napájecí pin (3V3) je třeba přivést stabilní napětí a opatřit ho blokovacími kondenzátory (C1, C3). Ke snížení napětí z původních 5,2 V na požadovaných 3,3 V je použit lineární regulátor TLV76133 (U4).

Dále je potřeba přivést kladné napětí na povolovací pin (EN). Z dokumentace vyplývá, že by mělo být přivedeno až po ustálení napájecí linky. Uvedený čas nutný ke stabilizaci je roven $t_{STBL} = 50 \mu s$ [20]. Požadované zpoždění zajistí RC členek (R1, C2) s časovou konstantou τ :

$$\tau = R_1 C_2 = 10 \text{ k}\Omega \cdot 1 \mu\text{F} = 10 \text{ ms} \quad (3.1)$$

Jak je vidět, byla zvolena dostatečná návrhová rezerva.

Pro možnost resetu zařízení a vstupu do bootloderu byla doplněna také dvě tlačítka (SW1, SW2).

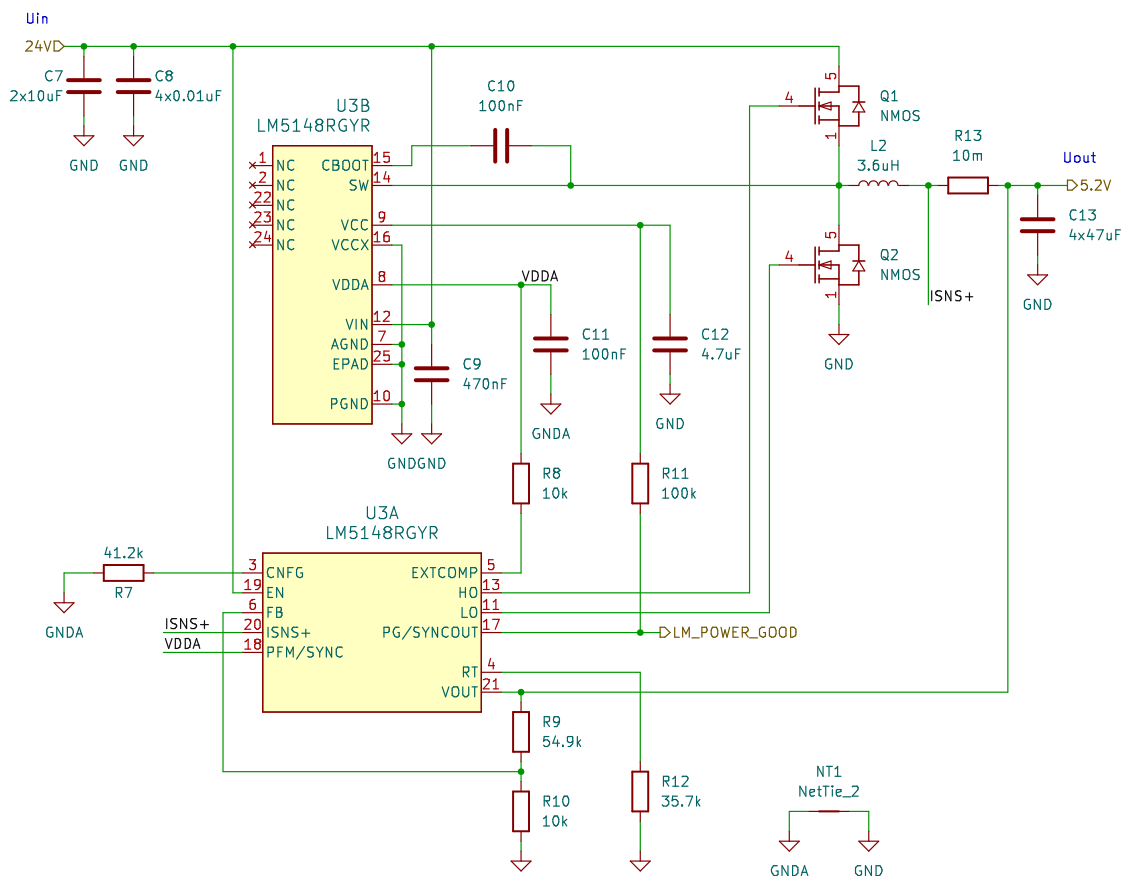


Obr. 3.2: Podpůrné obvody pro modul ESP32-WROOM-E. Vytvořeno v KiCad 7.0.

3.2.2 Napájecí obvod

Pro napájení celého zařízení je použit externí zdroj stejnosměrného napětí 24 V a toto napětí je takto rozvedeno všem připojeným periferiím. Pro většinu komponent je ale nutné napětí snížit. K tomuto účelu byl navržen DC/DC měnič typu buck s požadovaným výstupním napětím 5,2 V. Existuje celá řada čipů vyvinutých pro tento účel. Aplikace v tomto zařízení je specifická svými požadavky na výstupní proud, zatímco samotná řídicí jednotka nebude odebírat velký proud, není jasné, kolik periferií a s jakými výkonovými požadavky uživatel k systému připojí. Navržený měnič tak musí fungovat v širším rozsahu proudů (řádově od desítek mA po jednotky A) a to s co nejlepší účinností.

Aby bylo vyhověno zmíněným požadavkům a zachována návrhová rezerva, byl jako základ buck měniče zvolen čip LM5148 [21]. Jedná se o moderní součástku firmy Texas Instruments s velkou výkonovou rezervou. Tento čip funguje pouze jako buck kontroler a zapojení je potřeba doplnit zapojení dvěma externími MOSFET tranzistory, většina tepelných ztrát vzniká právě na nich, čímž se sníží ohřev samotného



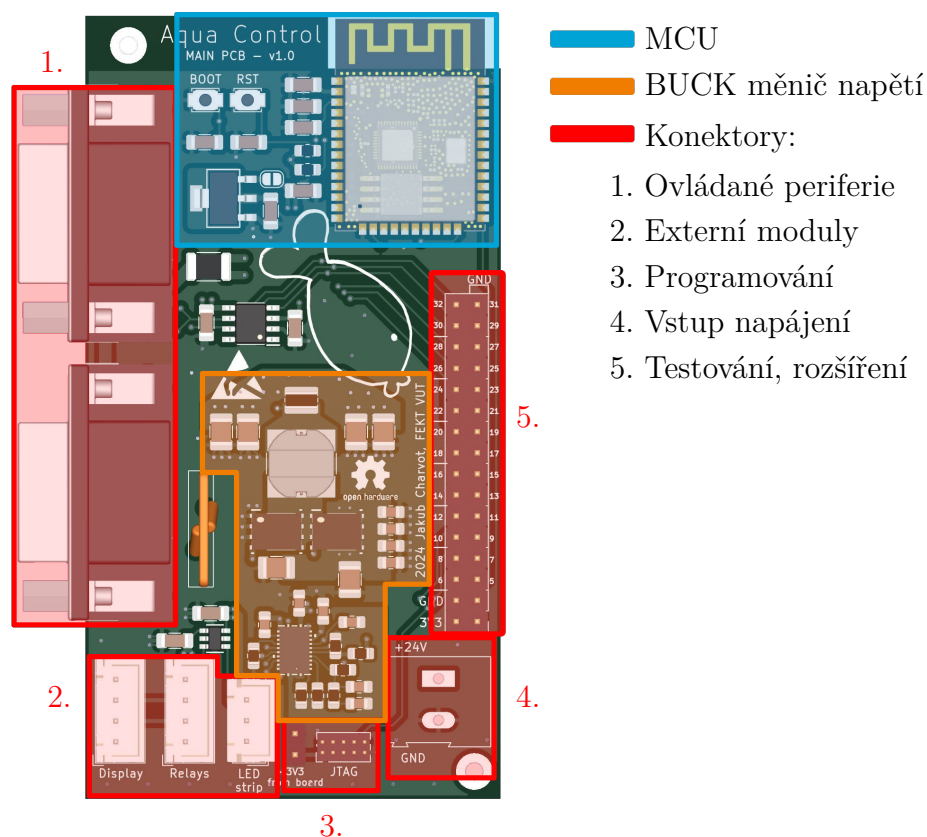
Obr. 3.3: Napájecí obvod řídicí jednotky. Vytvořeno v KiCad 7.0.

čipu a generované teplo se lépe rozloží. Na volbě tranzistorů závisí také výsledná účinnost měniče. Při návrhu zapojení této součástky byl použit nástroj Webench Power Designer [22], který podle zadaných parametrů navrhne konkrétní schéma zapojení, provede simulaci a zobrazí grafy upravené na míru zadaným hodnotám. Tento nástroj uvádí přibližnou účinnost zapojení jako 88 %. V navrženém schématu bylo posléze provedeno několik změn, aby vše odpovídalo požadavkům uvedeným v katalogovém listu součástky [21]. Kompletní schéma zapojení spolu s odkazy k relevantním kapitolám katalogového listu se nachází v příloze A.3, pro přibližnou představu pak postačí zjednodušené schéma na obr. 3.3.

TODO: výpočty by asi bylo dobré uvést co?

3.2.3 Deska plošných spojů

Ačkoliv se jedná o relativně jednoduchou DPS, je potřeba při návrhu dbát jistých pravidel a doporučení. Modul ESP32 je vybaven anténou a volba jeho umístění na DPS je rozhodujícím faktorem pro spřávnou funkci antény. Další částí vyžadující správný návrh rozložení a propojení součástek je pak BUCK měnič.



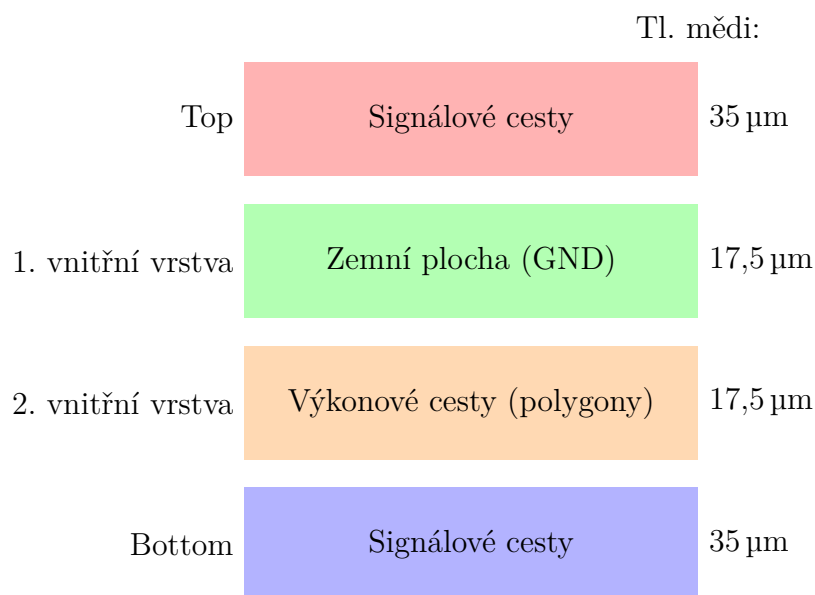
Obr. 3.4: Vizualizace DPS řídicí jednotky s vyznačením jednotlivých částí.

Prvním krokem návrhu je volba počtu vrstev a jejich funkce. Vyšší počet vrstev nabízí více prostoru pro vedení cest a také umožňuje vedení napájecích napětí pomocí rozlitéch měděných polygonů, čímž se zároveň zlepší vlastnosti zařízení z hlediska EMC. Zvolený výrobce (JLC PCB [23]) nabízí výrobu desek s jednou až dvaceti vrstvami mědi. Byla zvolena čtyřvrstvá deska, která je pro danou aplikaci dostatečná a stále se nachází v přijatelné cenové skupině výrobce. Rozložení a funkce vrstev jsou vyobrazeny na obr. 3.5.

Pro optimální funkci Wi-Fi antény výrobce doporučuje umístit ESP32 modul do pravého horního rohu DPS tak, aby se pod anténou nenacházela vrsta mědi a nejlépe ani samotná deska [24]. Na obr. 3.4 je zobrazen výsledný návrh DPS, v modře vyznačené oblasti lze vidět, že tyto požadavky byly splněny. Vedle ESP32 modulu se nachází související součástky popsané v kapitole 3.2.1.

Měnič napětí

TODO: Zde popis návrhu, zdroje, obrázky Q: Jak moc do detailu?



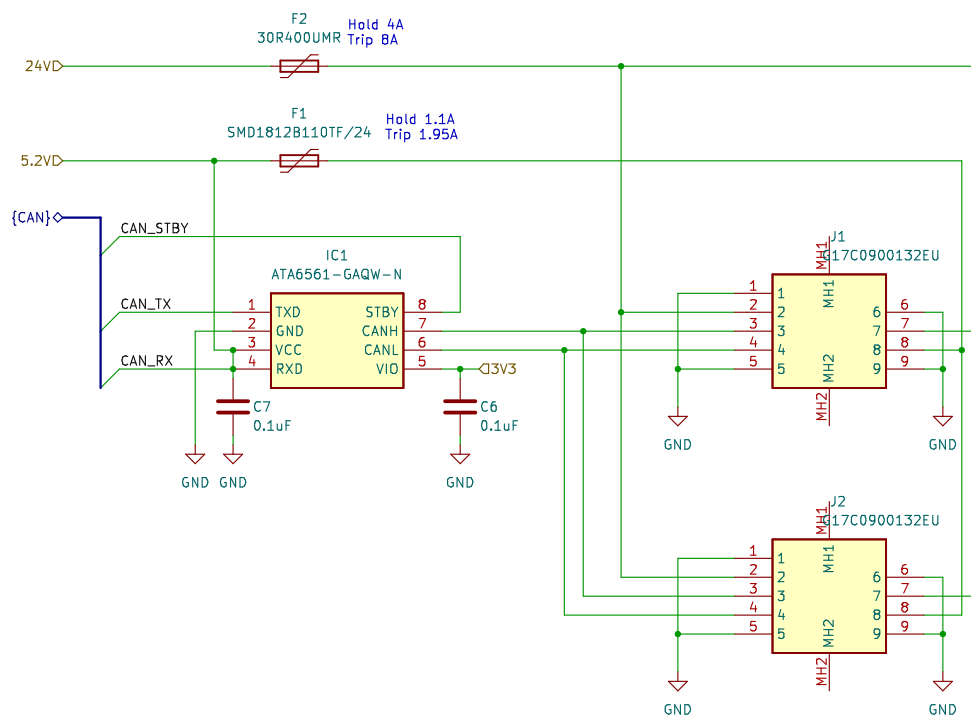
Obr. 3.5: Rozložení vrstev DPS řídicí jednotky.

3.3 Konektivita

Řídicí jednotka je vybavena několika konektory, jak je opět možno vidět na obr. 3.4. Na levé straně DPS (značeno 1.) se nachází konektory pro připojení periférií připravené pro montáž do panelu, kde pak budou přístupné uživateli. Ostatní vyznačené konektory slouží pro připojení externích modulů v rámci hlavního šasi (viz blokové schéma na obr. 2.1) popř. pro programování a testování, nebudou tedy volně přístupné uživateli.

Abychom předešli poškození zařízení při nevhodném zacházení uživatelem, je potřeba pro volně dostupné konektory přidat dodatečnou ochranu [25]. Jak je vidět na obr. 2.2, konektor pro periferie sdružuje jak datovou komunikaci, tak i napájení. Ochranu diferenční datové linky zajistí samotný CAN řadič, který je určen pro průmyslové použití a obsahuje zabudovanou ochranu jak proti zkratu datové linky s napájením či zemí, tak proti ESD [26].

Co se týče napájecích vodičů, každý z nich je ošetřen vratnou pojistkou (ang. polyfuse) dimenzovanou podle předpokládaného maximálního odběru zařízení. Při překročení tohoto proudu, např. z důvodu zkratu v některé z periférií, pojistka sepne a proud v obvodu omezí na minimum. Schéma zapojení konektorů spolu s hodnotami vratných pojistek se nachází na obr. 3.6.



Obr. 3.6: Zapojení a ochrana konektorů. Vytvořeno v KiCad 7.0.

4 Obecný modul periferie

Díky zvolené koncepci systému je možné za periferii považovat jakékoliv zařízení schopné obousměrně komunikovat po navržené sběrnici. Není vyloučeno, aby byla každá periferie navržena zcela odlišně na základě svých vlastních požadavků na výkon, počet pinů nebo dostupná rozhraní daného MCU. Hlavní výhodou této koncepce je to, že periferie mohou být vyvíjeny postupně a přidávány do již funkčního a odladěného systému bez nutnosti modifikovat stávající hardware. V případě chyby v návrhu periferie je také oprava méně náročná, než by tomu bylo v případě zabudování veškeré funkcionality přímo do řídicí jednotky.

Nicméně pokud by byl pro každou periferii zvolen zcela jiný mikrokontroler a vytvořen vlastní návrh DPS, vývoj více periférií by byl zbytečně drahý a časově náročný. Proto byl zvolen koncept „obecného modulu periferie“, tedy jedné DPS s konkrétním mikrokontrolerem zajišťující připojení ke komunikačnímu rozhraní, napájení periferie a rozhraní pro programování. Kromě toho budou na DPS dvě dutinkové lišty, do kterých bude možné vsadit druhou DPS (popř. během vývoje pouze prototypovací desku) ve funkci dceřinné desky (ang. daughterboard). Vložená deska pak bude obsahovat obvody nutné přímo pro danou konkrétní periferii.

4.1 Mikrokontrolér

Kritéria pro výběr mikrokontroleru byla následující:

- Musí nutně splňovat:
 - CAN periferie – pro komunikaci po sběrnici
 - PWM výstup – řízení LED, popř. jiné
 - ADC – pro práci s analogovými sensory
 - Nízká cena
- Je výhodou:
 - Dobrá dokumentace, komunita uživatelů
 - Zkušenost autora s danou platformou
 - Další periferie (I²C, SPI, ...)

Na základě těchto kritérií byl vybrán mikrokontroler **PIC18F26Q83** od firmy Microchip, ten splňuje všechna kritéria a disponuje také množstvím dalších periférií, které by mohly být v budoucnu užitečné [27].

4.2 Návrh zapojení a tvorba DPS

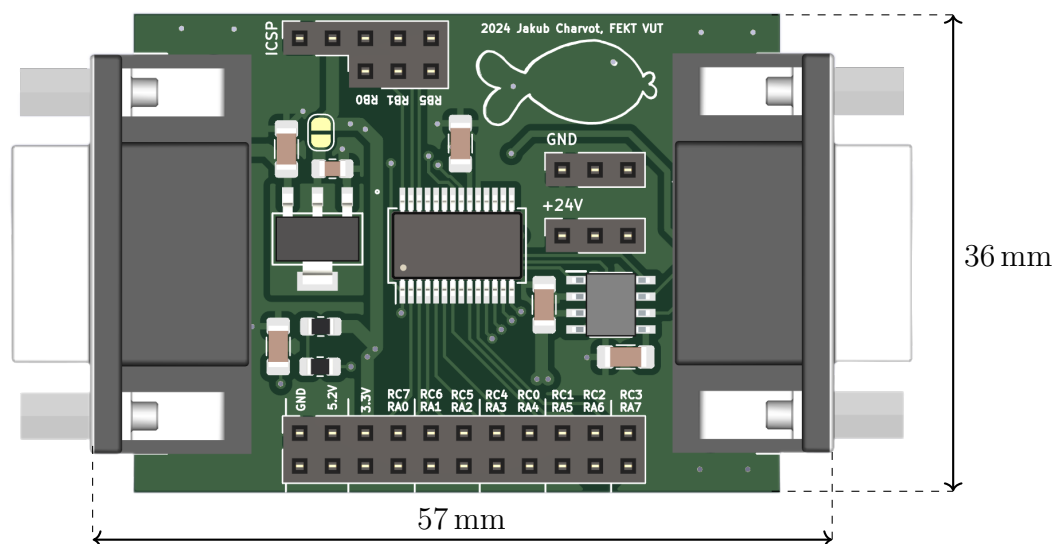
Celé schéma pro obecný modul periferie se nachází v příloze B. Návrh zapojení lze rozdělit na tři části. V prvním kroku je zapojen mikrokontroler tak, aby byly

opět splněny všechny požadavky výrobce. Mikrokontrolery řady PIC se vyznačují značnou jednoduchostí použití a ke správnému chodu jim stačí jen minimum dalších součástek. V případě PIC18F26Q83 postačí připojit blokovací kondenzátor (C6) na napájení (pin VCC) a přivést kladné napětí na resetovací pin (MCLR). MCU je dále doplněn resetovacím tlačítkem pro pohodlnější práci při vývoji a testování firmwaru a regulátorem napětí (U1) s výstupem 3,3 V.

Ve druhém kroku je přidána dvojice D'sub konektorů a CAN řadič ATA6561 obdobně jako u řídicí jednotky popsané v kapitole 3.2. Na závěr jsou všechny dosud nevyužité piny vyvedeny na konektor (dutinkovou lištu), aby byly jednoduše dostupné pro připojenou dceřinnou desku. Pro napájení výkonově náročnějších periferií (např. ovladač LED osvětlení) jsou zvlášť vyvedeny ještě dvě trojice pinů připojené na 24 V a zem (GND).

Tvorba DPS

Hlavním cílem bylo vytvořit DPS co nejmenší. Jedná se o samostatné moduly, kterých bude v systému zapojeno několik a pro manipulaci a rozmístění modulů okolo akvária je menší rozměr výhodou. Hlavní limitací v této snaze není počet součástek, ale spíše rozměry mechanických prvků, zejména konektorů D'sub. Na obr. 4.1 je vidět výsledný návrh DPS s osazenými součástkami a dosaženými rozměry. Je zřejmé že jiným rozložením dutinkových lišt by se návrh dal ještě drobně zmenšit, ale je potřeba ponechat jistou flexibilitu pro tvorbu dceřinných desek.



5 Volba a návrh periférií

Tato kapitola se již věnuje návrhu konkrétních periférií, tedy jednotlivých senzorů a akčních členů. Po technické stránce jsou všechny zmíněné moduly nadstavbou pro „obecný modul periferie“ popsaný detailně v předešlé kapitole. Jelikož je celý systém modulární, je pravděpodobné, že postupem času bude dále rozšiřován o nové typy periférií a i v současné chvíli je jich v plánu více, než je v možnostech této práce. Pro lepší přehlednost se v tab. 5.1 nachází přehled všech realizovaných i v tuto chvíli pouze plánovaných periférií.

Tab. 5.1: Přehled periférií.

Název	Typ	Napájení	Funkce	Realizováno
Sensor teploty	S	5 V	Teplota vody	Ano, kap. 5.2
Sensor hladiny	S	5 V	Výška hladiny (spojitě + skokově)	Ano, kap. 5.3
LED osvětlení	A	24 V	Intenzita osvětlení	Ano, kap. 5.1
Sensor pH	S	5 V	pH vody	Ano, kap. 5.4
Topné těleso	A	230 V	Ohřev vody	Ano, kap. 5.5
Filtr vody	S	230 V	Filtrace vody	Ano, kap. 5.5
Krmítko	A	24 V	Dávkování krmiva	Ne
Sensor průtoku	S	-	Voda tekoucí filtrem	Ne

S = sensor, A = akční člen

5.1 LED osvětlení

Úkolem této periferie je zajistit osvětlení akvária a umožnit jeho ovládání. V porovnání s ostatními moduly je zapojení relativně komplexní a proto byla pro tuto periferii navržena a zhotovena vlastní DPS (fungující jako dceřinná deska, viz. 4). Jako typ svítidla byly zvoleny LED pásy pracující s napětím 12 V. Modul musí být schopen samostatně ovládat 2 LED pásy, kdy za pomoci regulace proudu do LED pásku nastaví intenzitu osvětlení.

5.1.1 Návrh zapojení

Na začátku návrhu je potřeba specifikovat si požadavky na elektrické parametry zapojení. Uvažujeme délku každého pásku $l = 1$ m, vstupní napětí získané z konektoru D'sub $U_{in} = 24$ V a výstupní napětí pro které je pásek určen $U_{out} = 12$ V. Pro stanovení maximálního proudu bylo vycházeno z údajů na e-shopu LED Solution [7],

kdy nejvýkonější nabízený LED pásek pro dané napětí má příkon $P_i = 20 \text{ W/m}$. Pak každý kanál musí být schopen dodat proud odpovídající nejnáročnějšímu scénáři:

$$I_{max} = \frac{P_i \cdot l}{U_{out}} = \frac{20 \cdot 1}{12} = 1,66 \text{ A} \quad (5.1)$$

Jelikož se jedná o dceřinnou desku pro obecný modul, rozměr výsledné DPS je omezen a část plochy je navíc využita konektory pro vsazení do obecného modulu. Je tedy potřeba zvolit co nejvíce integrované řešení, které současně slibuje dobrou účinnost a tedy co nejnižší ohřev zařízení během provozu.

Pro řízení LED osvětlení je často používán proudový zdroj, který umožňuje lineárně regulovat výstupní proud a tím i intenzitu osvětlení. Na trhu existuje opět celá řada čipů určena přímo k ovládání LED pásků [28], problém je zde ale v tom, že uživatel velmi pravděpodobně připojí pásek s nižším, předem neznámým příkonem. Maximální proud je tedy specifický danému LED pásku a proudový zdroj by musel zároveň spolehlivě zaručit, že nebude překročeno napětí $U_{out} = 12 \text{ V}$.

Touto funkcí většina čipů nedisponuje a pokud ano, nejsou dostatečně integrované pro použití v této aplikaci. Po důkladné rešerši a několika iteracích návrhu se nakonec jeví jako nejlepší použití napětového měniče typu BUCK spolu se zesilovačem pro snímání proudu. Snímaný proud je následně zpracován mikrokontrolerem a jsou upraveny poměry ve zpětné vazbě měniče, aby napětí odpovídalo požadovanému proudu.

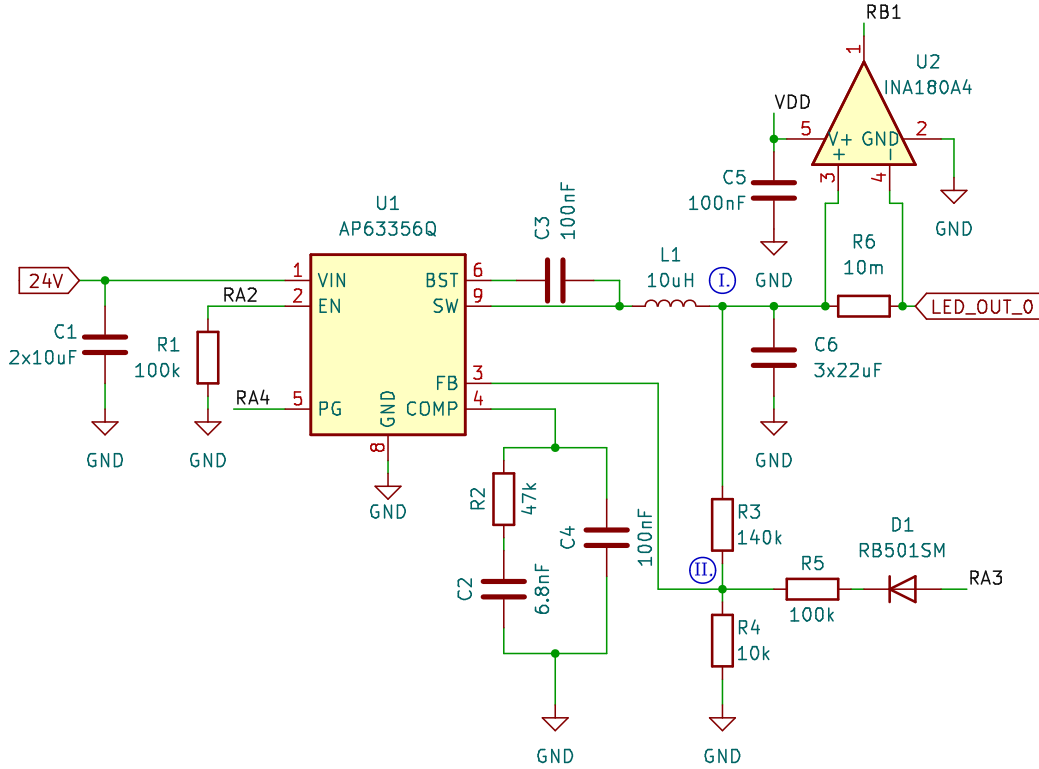
Popis schématu a výpočty hodnot součástek

Zjednodušené schéma pro jeden ovládaný kanál se nachází na obr. 5.1, při výpočtech bude použito označení součástek z tohoto schématu. Úplné schéma modulu pak lze nalézt v příloze C.

Jako BUCK kontroler je zvolen čip AP63356Q vyvinutý společností Diodes incorporated, jedná se o úspornou a velmi malou součástku, která v sobě integruje oba potřebné MOSFET tranzistory a spíná s pevně danou frekvencí $f_{SW} = 450 \text{ kHz}$ [29]. Pro snímání proudu poslouží čip INA180A4 firmy Texas Instruments [30].

Z obrázku je vidět, že pro ovládání jednoho kanálu LED pásků jsou využity 4 piny MCU, RA4 a RB1 fungují jako vstupy, RA2 a RA3 pak jako výstupy. Rezistor R_1 drží BUCK měnič ve vypnutém stavu dokud mikrokontroler nenastaví hodnotu pinu RA2 na logickou 1. Pin RA4 je pak čipem (U_1) stažen k zemi vždy, když na výstupu není odpovídající nastavené napětí.

Nastavení výstupního napětí měniče je dosaženo za pomoci zpětnovazební smyčky mezi výstupním uzlem (I.) a zpětnovazebním pinem FB (uzel II.). V uzlu II. je drženo konstantní napětí $0,8 \text{ V}$ [29], poměrem rezistorů R_3 a R_4 je pak definováno výstupní napětí. Zvolíme hodnotu odporu $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$, pro maximální požadované



Obr. 5.1: Zjednodušené schéma ovladače LED. Vytvořeno v KiCad 7.0.

napětí $U_{outMAX} = 12\text{ V}$ platí:

$$R_3 = R_4 \cdot \left(\frac{U_{outMAX}}{0,8} - 1 \right) = 10\text{ k} \cdot \left(\frac{12}{0,8} - 1 \right) = 140\text{ k}\Omega \quad (5.2)$$

Na pin RA3 mikrokontroleru je přivedeno analogové napětí z periferie DAC popř. PWM signál a skrze rezistor R_5 (a ochrannou diodu) pak teče proud do rezistoru R_4 , úbytek napětí na tomto rezistoru je ale konstantní (0,8 V) a tedy je konstantní i proud rezistorem. Z prvního Kirchhoffova zákona pak víme, že proud rezistorem R_3 klesne o hodnotu proudu dodanou z pinu RA3, tím klesne také napětí na výstupu měniče a dojde ke ztlumení jasu LED pásu. Citlivost (nebo také rozsah) změny je definován hodnotou R_5 , snížením jeho hodnoty lze dosáhnout na výstupu ještě nižšího napětí. Pro hodnotu $R_5 = 100\text{ k}\Omega$ zobrazenou ve schématu lze nejnižší možné napětí vypočítat následovně:

$$U_{outMIN} = 0,8 + R_3 \cdot I_3 = 0,8 + R_3 \cdot \left(\frac{0,8}{R_4} - \frac{U_{VDD} - U_{D1}}{R_4 + R_5} \right) \quad (5.3)$$

Kdy $U_{VDD} = 3,3\text{ V}$ je maximální napětí pinu RA3 a $U_{D1} = 0,35\text{ V}$ je prahové napětí zvolené diody. Po dosazení získáme:

$$U_{outMIN} = 0,8 + 140\text{ k} \cdot \left(\frac{0,8}{10\text{ k}} - \frac{3,3 - 0,35}{10\text{ k} + 100\text{ k}} \right) = 8,25\text{ V} \quad (5.4)$$

Toto napětí by mělo být dostatečně nízké k úplnému zhasnutí LED pásku.

TODO: Kompenzace

V dalším kroku je stanovena hodnota induktoru L_1 . Výrobce doporučuje zvolit zvlnění proudu induktorem (ripple) ΔI_L jako 30 až 50 % maximálního proudu čipu. Při zvolení střední hodnoty 40 % získáme:

$$\Delta I_L = 0,4 \cdot I_{IC-max} = 0,4 \cdot 3,5 = 1,4 \text{ A} \quad (5.5)$$

Odpovídající hodnota indukčnosti je vypočtena následujícím vztahem:

$$L_1 = \frac{U_{outMAX} \cdot (U_{in} - U_{outMAX})}{U_{in} \cdot \Delta I_L \cdot f_{SW}} \quad (5.6)$$

Po dosazení získáme:

$$L_1 = \frac{12 \cdot (24 - 12)}{24 \cdot 1,4 \cdot 450 \text{ k}} = 9,52 \text{ } \mu\text{H} \quad (5.7)$$

Zvolíme nejbližší běžně používanou hodnotu $L_1 = 10 \text{ } \mu\text{H}$.

Pro vstupní (C_1) a výstupní (C_6) kapacitu použijeme hodnoty doporučené výrobcem, stejně tak pro bootstrap kondenzátor C_3 .

Poslední součástíou zůstává měřicí rezistor R_6 . Tímto rezistorem protéká celý výstupní proud měniče, v rámci minimalizace ztrátového výkonu by měl mít tedy co nejmenší odpor. Musíme ovšem také brát v potaz rozsah měřicího zesilovače INA180A4. Tato součástka se vyrábí v několika variantách, byla zvolena varianta s nejvyšším ziskem $G_{INA} = 200$ pro zachování co nejnižší hodnoty rezistoru, výstupní napětí zesilovače je v rozsahu 0 až 3,3 V (VDD mikrokontroleru). Při maximálním očekávaném proudu chceme dosáhnout horní hranice rozsahu zesilovače, z této podmínky vyplývá vztah pro výpočet R_6 :

$$R_6 = \frac{U_{VDD}}{I_{max} \cdot G_{INA}} = \frac{3,3}{1,66 \cdot 200} = 9,94 \text{ m}\Omega \quad (5.8)$$

Zvolíme blízkou hodnotu $R_6 = 10 \text{ m}\Omega$.

Očekávané parametry

Pro výpočet výstupního zvlnění (v uzlu I.) chybí údaj o ekvivalentním sériovém odporu (ESR) výstupních kondenzátorů (C_6), který výrobce neuvádí. Vyjdeme tedy z typické hodnoty pro keramický kondenzátor $ESR = 15 \text{ m}\Omega$ [31], kdy počítáme s paralelní kombinací tří kondenzátorů. Očekávané výstupní zvlnění je tedy přibližně:

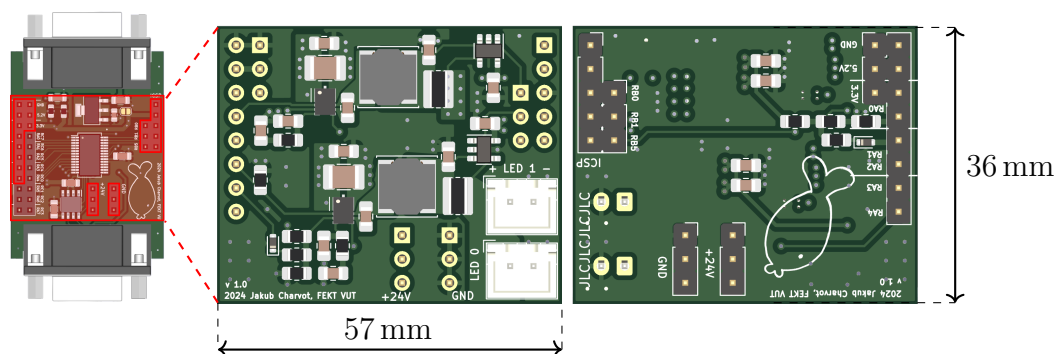
$$\Delta U_{out} = \Delta I_L \cdot \left(\frac{ESR}{3} + \frac{1}{8 \cdot f_{SW} \cdot C_6} \right) \quad (5.9)$$

$$\Delta U_{out} = 1,4 \cdot \left(\frac{15 \text{ m}}{3} + \frac{1}{8 \cdot 450 \text{ k} \cdot 3 \cdot 22 \text{ } \mu} \right) = 13 \text{ mV} \quad (5.10)$$

TODO: Zde velký question: Pokusit se o přesnější výpočet ztrát a účinnosti nebo se odkázat na kalkulačku výrobce, která stejně bude nejpřesnější?

5.1.2 Tvorba DPS

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, jedná se o dceřinnou desku pro obecný modul periferie, čímž jsou jasné určeny její maximální rozměry. Stejně jako u předešlých návrhů, i zde je použita čtyřvrstvá struktura viz obr. 3.5. Vizualizace návrhu se nachází na obr. 5.2 spolu s ukázkou sesazení s obecným modulem periferie.



Obr. 5.2: Vizualizace DPS periferie LED osvětlení.

Za účelem zvětšení plochy pro umístění součástek byly z konektorů obecného modulu vyvedeny pouze některé piny, i přesto bylo nakonec potřeba umístit komponenty také na spodní stranu DPS. Rozmístění součástek je obdobné pro oba měniče napětí a respektuje doporučení výrobce a tedy i obecná pravidla pro návrh měničů napětí [29]. Je kladen důraz na to, aby smyčka ze spínacího uzlu přes výstupní kapacitu a zem zpět do kontroleru byla co nejkratší a vedena za pomoci polygonů. Stejně tak vstupní kapacitor je umístěn přímo vedle vstupních pinů kontroleru.

5.2 Senzor teploty

Cílem tohoto modulu je kontinuálně měřit teplotu vody a naměřená data poskytovat řídící jednotce skrze sběrnici CAN. Při volbě konkrétního teplotního čidla je potřeba vzít v potaz několik faktorů:

- Přesnost a rozsah
- Časová stálost
- Složitost implementace
- Pouzdro určené pro ponoření do vody
- Cena

5.2.1 Metody měření teploty

Nejčastěji používanými součástkami určenými k měření teploty jsou nepochybně termistory a termočlánky [32]. Termistor je rezistor vytvořen z materiálu, který mění

svůj odpor v závislosti na teplotě přičemž rozlišujeme dva základní typy termistorů podle toho, zda s rostoucí teplotou jejich odpor roste (PTC termistor) anebo klesá (NTC termistor). U obou typů lze obecně říci, že závisost odporu na teplotě je značně nelineární, pro zjištění přesné teploty je tedy potřeba buďto měřená data dále zpracovat (např. mikrokontrolerem) anebo využít speciální integrovaný obvod, který výstup z připojeného termistoru linearizuje a dále propaguje buďto v analogové nebo i digitální podobě. Jelikož odpor termistoru a stejně tak i dalších součástek, potřebných k jeho zapojení, má jistou výrobní toleranci, je vhodné sensor před použitím kalibrovat.

Princip termočlánku je odlišný, jedná se o vodivé spojení dvou kovů na kterém díky Seebeckově jevu vzniká termoelektrické napětí. Velikost tohoto napětí je daná použitými materiály a je také teplotně závislá. V praxi se používá nejčastěji několik dvojic materiálů, které svými vlastnostmi a cenou nejvíce vyhovují běžným požadavkům, ty pak získaly také své označení jako termočlánky typu J, K, T nebo E (typů existuje více, uvedeny jsou nejčastěji používané [33]). Termočlánky pracují oproti ostatním sensorům s výrazně větším rozsahem teplot a mohou měřit také teploty velmi vysoké. Nevýhodou je nízké výstupní napětí, které musí být spolehlivě měřeno, tedy ideálně porovnáno s přesnou napěťovou referencí a také je potřeba, aby část zařízení, ke kterému je termočlánek připojen (tzv. studený konec), byla udržována při konstantní referenční teplotě anebo případnou změnu teploty měřila jiným způsobem a kompenzovala výpočtem [32, 33].

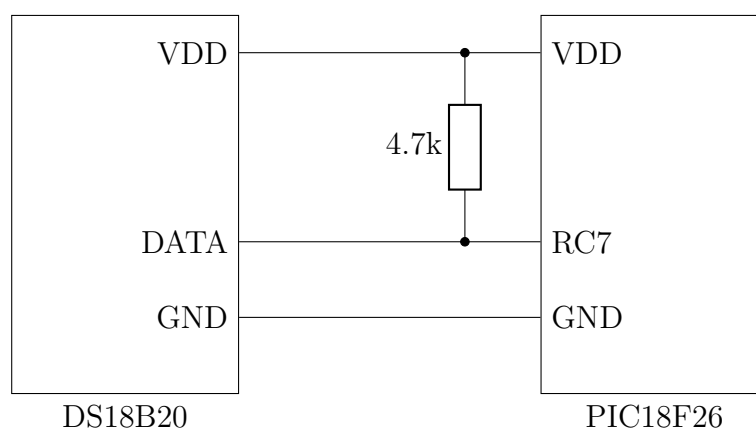
Z hlediska praxe je další často využívanou možností použití zcela integrovaného sensoru s digitálním výstupem. Pro zpracování je sice potřeba mikrokontroler, ale tyto sensory bývají od výroby kalibrovány a také jejich zapojení je velmi jednoduché, což je výhodou.

5.2.2 Realizace sensoru

Při porovnání uvedených metod se použití termočlánku jeví jako nevhodné, zejména kvůli náročnosti implementace, která současně navyšuje také cenu. Zbývá tedy rozhodnutí mezi termistoru a digitálním čidlem. Ve voděodolném pouzdře lze zakoupit jak několik variant termistorů, tak i digitální čidlo (zde DS18B20). Nejlevněji vychází termistor typu NTC, ale v porovnání s cenou celého zařízení je rozdíl v ceně zanedbatelný.

Pro realizaci sensoru bylo zvoleno digitální čidlo DS18B20, které narozdíl od termistoru není potřeba kalibrovat a výrobce garantuje přesnost $\pm 0,5^\circ\text{C}$ na celém teplotním rozsahu od -55°C do 125°C . Rozlišení sensoru je až 12 bitů přičemž minimální měřitelná změna teploty odpovídá $0,0625^\circ\text{C}$. Pro komunikaci s čidlem se využívá protokol 1-Wire, kdy datový vodič funguje obousměrně. Pro propojení čidla

s mikrokontrolerem tedy stačí využít tři vodiče a jeden pull-up rezistor, viz obr. 5.3.



Obr. 5.3: Připojení čidla DS18B20 k MCU.

5.3 Senzor výšky hladiny

5.4 Senzor pH

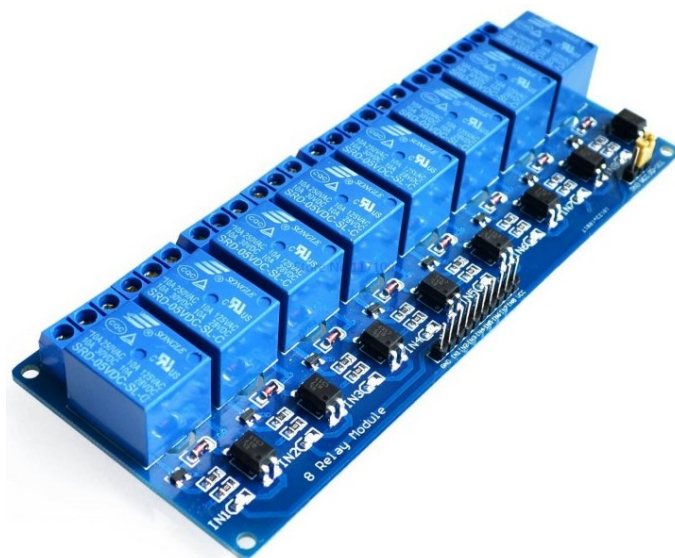
5.5 Ovládání 230V periférií

TODO: Text zatím jen drobně revidován... Obrázky nahradím vlastními fotkami spolu s umístěním v šasi.

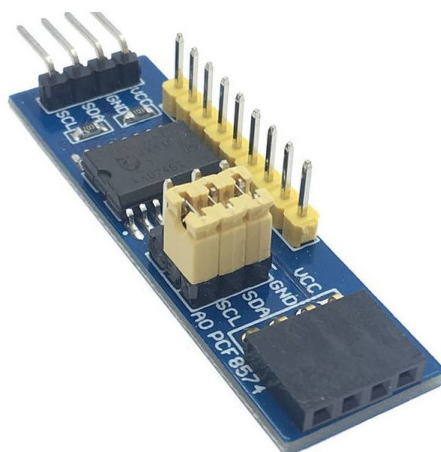
Jak vyplývá z požadavků zařízení a přehledu používané akvaristické techniky, pro automatizovaný provoz akvária je nutné umožnit řídicí jednotce ovládat několik okruhů se síťovým napětím a spínat tak zvláště zakoupené hotové spotřebiče pracující s tímto napětím. Jedná se typicky o ohřev vody, filtr, popř. některé druhy osvětlení.

Aby uživatel mohl zařízení bezpečně zapojit bez nutnosti odborné způsobilosti, nachází se na hlavním šasi zařízení čtyři standartní zásuvky (typ E) s jednofázovým napětím 230 V. Fázové vodiče jsou uvnitř zařízení přerušeny spínacími relé. Je použit předpřipravený modul disponující osmi relé, čtyři z nich tedy zůstanou nevyužité a slouží jako rezerva pro případ poškození některého z používaných relé nebo při potřebě budoucího rozšíření o další zásuvky.

Z důvodu nedostatku pinů na mikrokontroleru řídicí jednotky (ESP32) je k relé modulu připojen ještě jeden externí modul a to expandér GPIO pinů komunikující přes sběrnici I²C [35]. Z pohledu mikrokontroleru tak budou všechny 230 V zásuvky řízeny pomocí dvou datových pinů (SDA, SCL), které je navíc možné dále využít pro připojení jiných periférií jako např. OLED displaye pro zobrazení stavu zařízení.



Obr. 5.4: Relé modul, ilustrační foto. Převzato z [34].



Obr. 5.5: Modul expandéru GPIO pinů, ilustrační foto. Převzato z [35].

Do budoucna by bylo možným zlepšením a rozšířením této práce zahrnutí obou zmíněných modulů přímo na DPS řídicí jednotky.

6 Software

6.1 Architektura

6.2 Firmware řídící jednotky

6.3 Firmware periférií

6.4 Webové rozhraní

7 Sestavení a testování

Literatura

- [1] VÍTEK, Jiří. *Akvaristika včera, dnes a zítra* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: https://www.akvarijni.cz/texty/historie_akvaristiky.htm.
- [2] HÁSKOVÁ, Barbora. *Společenstva prvoků a bezobratlých živočichů ve sladkovodních akváriích a možnosti jejich využití ve výuce*. 2011. Dostupné také z: https://dSPACE.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/39224/BPTX_2010_2__0_258158_0_107901.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Pedagogická Fakulta.
- [3] MUSIL, Libor. *Inteligentní systém pro správu akvária*. 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [4] ROSTLINNÁ AKVARIA | INVITAL. *Akvarijní filtrace* [online]. YouTube, 2023-06-28. [cit. 2023-12-05]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=XRoeJDoC10k>.
- [5] ROSTLINNÁ AKVÁRIA. *E-shop* [online]. 2023. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.rostlinna-akvaria.cz/eshop>.
- [6] KEJZLAR, Radim. *Automatizované řízení provozu akvária*. 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [7] E-SHOP LED SOLUTION. *Jak osvětlit akvárium?* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://eshop.ledsolution.cz/jak-osvetlit-akvarium-led-paskem/>.
- [8] ROSTLINNÁ AKVÁRIA. *Jaké osvětlení vybrat pro Vaše akvárium* [online]. [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.rostlinna-akvaria.cz/jak-vybrat-osvetleni-pro-vase-akvarium-a-usetrit>.
- [9] SLAVOTÍNEK, Jan. *Systém podpory akvarijních životních podmínek*. 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Petr PETYOVSKÝ.
- [10] DVOŘÁK, Jan. *Regulátor PH pro akvárium*. 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [11] GHL. *ProfiLux Aquarium Controller* [online]. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.aquariumcomputer.com/products/profilux-aquarium-controller/>.
- [12] *ProfiLux Sets* [online]. E-shop GHL Store. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://store.aquariumcomputer.com/profilux-sets-2/>.

- [13] *Apex EL Controller System* [online]. E-shop Neptune Systems Store. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://shop.neptunesystems.com/products/apex-el-controller-system?variant=14414158921780>.
- [14] NEPTUNE SYSTEMS. *Why Apex?* [online]. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.neptunesystems.com/products/apex-controllers/why-apex/>.
- [15] *HYDROS* [online]. E-shop CoralVue Aquarium Products. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.coralvue.com/hydros>.
- [16] CORALVUE. *CoralVue Hydros* [online]. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.coralvuehydros.com/>.
- [17] SENEYE. *Seneye Home* [online]. 2023. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.seneye.cz/seneye-home/>.
- [18] PRODIGY TECHNOVATIONS. *I2C vs SPI: Difference Between I2C and SPI* [online]. 2021. [cit. 2023-12-07]. Dostupné z: <https://prodigytechno.com/i2c-vs-spi/>.
- [19] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32-WROOM-32E/ESP32-WROOM-32UE Datasheet*. 2023. Ver. 1.6. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf.
- [20] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Series Datasheet*. 2023. Ver. 4.3. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- [21] TEXAS INSTRUMENTS. *LM5148 Datasheet*. 2023. SNVSC01. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5148.pdf>.
- [22] *Webench Power Designer* [online]. Texas Instruments. [cit. 2023-12-10]. Dostupné z: <https://webench.ti.com/power-designer/>.
- [23] JLCPCB. *JLCPCB* [online]. JLCPCB. [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/>.
- [24] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Hardware Design Guidelines*. 2022. Ver. 3.3. Dostupné také z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-hardware-design-guidelines/en/latest/esp32/esp-hardware-design-guidelines-en-master-esp32.pdf>.
- [25] HARRIS, Mark. *Methods of Circuit Protection* [online]. Altium Resources, 2021. [cit. 2023-12-10]. Dostupné z: <https://resources.altium.com/p/methods-protect-your-circuit>. Aktualizováno 29.11. 2023.

- [26] TI. *ATA6560 Datasheet*. 2022. Ver. 3.3. Dostupné také z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-hardware-design-guidelines/en/latest/esp32/esp-hardware-design-guidelines-en-master-esp32.pdf>.
- [27] MICROCHIP. *PIC18F26Q83* [online]. [B.r.]. [cit. 2023-12-13]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/product/pic18f26q83>.
- [28] INSTRUMENTS, Texas. *LED Drivers Overview*. 2024. Dostupné také z: <https://www.ti.com/power-management/led-drivers/overview.html>. Accessed: 2024-05-15.
- [29] INCORPORATED, Diodes. *AP63356Q 3.5A, 36V Synchronous Buck Converter*. 2020. Dostupné také z: https://www.diodes.com/assets/Datasheets/AP63356Q_AP63357Q.pdf. Accessed: 2024-05-15.
- [30] INSTRUMENTS, Texas. *INAx180 Low- or High-Side, Voltage Output, Current-Sense Amplifier*. 2022. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina180.pdf>. Accessed: 2024-05-15.
- [31] CONTRIBUTORS, Wikipedia. *Equivalent Series Resistance* [https://en.wikipedia.org/wiki/Equivalent_series_resistance]. 2024. Accessed: 2024-05-15.
- [32] DAVIS, Nick. Introduction to Temperature Sensors: Thermistors, Thermocouples, and Thermometer ICs. *All About Circuits*. 2022. Dostupné také z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-temperature-sensors-thermistors-thermocouples-thermometer-ic/>.
- [33] SCIENCE, Techie. *Thermocouples and Temperature Measurement*. 2023. Dostupné také z: <https://techiescience.com/thermocouples-and-temperature/>. Accessed: 2024-05-15.
- [34] *8-kanálové relé modul 5VDC 250VAC 10A* [online]. E-shop LaskaKit.cz. [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/8-kanalu-rele-modul-5vdc-250vac-10a/>.
- [35] *PCF8574 I2C 8bit I/O Expandér* [online]. E-shop LaskaKit.cz. [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/pcf8574-i2c-8bit-i-o-expander/>.
- [36] PETERSON, Zachariah. *Beginner's Guide to ESD Protection Circuit Design for PCBs* [online]. Altium Resources, 2021. [cit. 2023-12-10]. Dostupné z: <https://resources.altium.com/p/beginners-guide-esd-protection-circuit-design-pcbs>. Aktualizováno 13.6. 2023.

- [37] HEDVÍČEK, Michal. *Návrh komplexního automatizovaného systému pro akvaristy*. 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [38] XING HE Daniel Li, Vincent Zhang. An Accurate Approach for Calculating the Efficiency of a Synchronous Buck Converter Using the MOSFET Plateau Voltage. *Texas Instruments*. 2020. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/pdf/slvaeq9>.

Seznam symbolů a zkratek

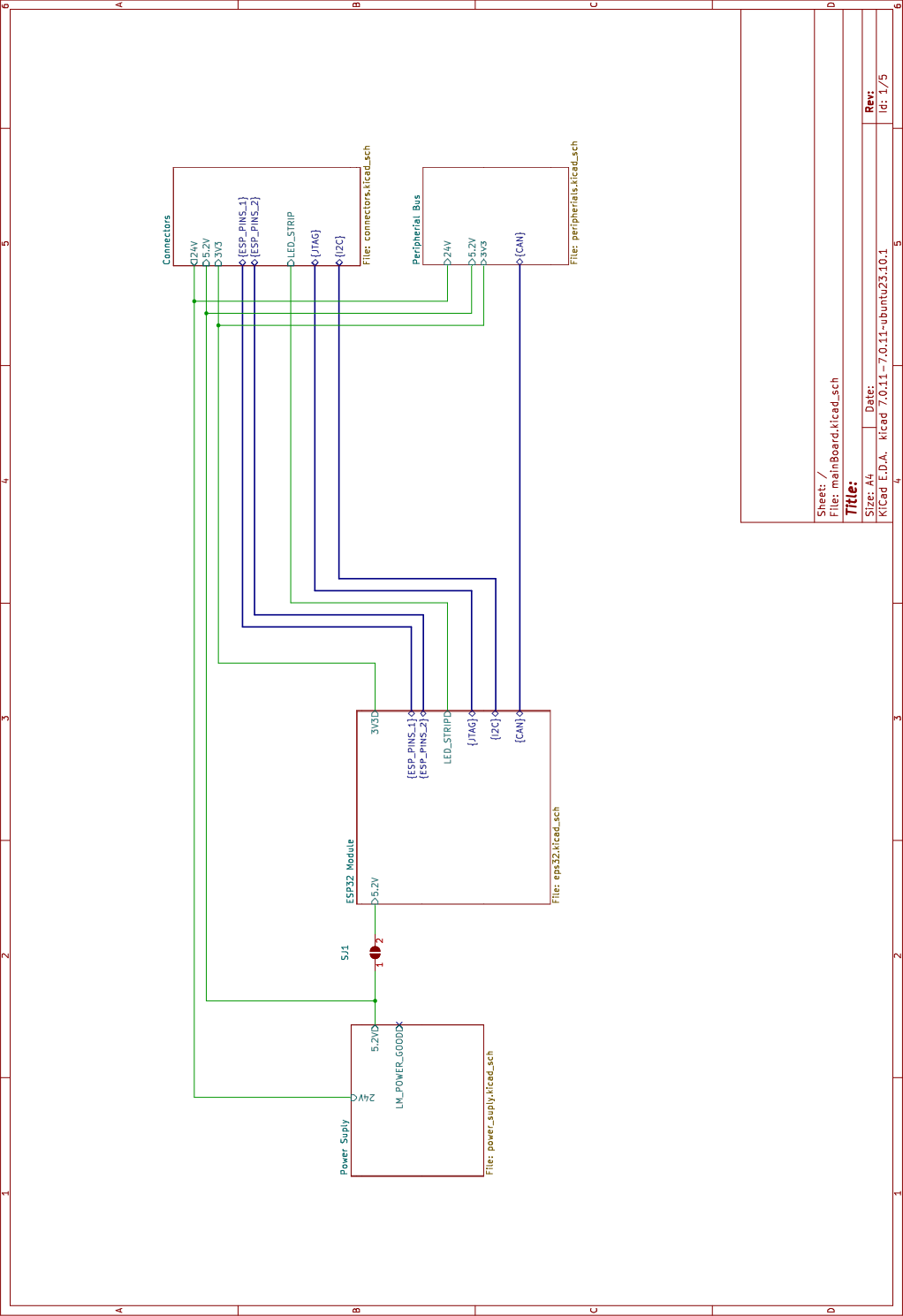
IoT	Internet of Things – internet věcí
LED	Light-Emitting Diode – dioda emitující světlo
pH	Potential of Hydrogen – potenciál vodíku
CO₂	Carbon Dioxide – oxid uhličitý
PC	Personal Computer – osobní počítač
Wi-Fi	Wireless Fidelity – známá bezdrátová síť
SPI	Serial Peripheral Interface – typ sběrnice
I²C	Inter-Integrated Circuit – typ sběrnice
DPS	deska plošných spojů
CAN	Controller Area Network – typ sběrnice
CS	Chip Select – signál patřící k SPI sběrnici
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter – typ sběrnice
MCU	Microcontroller Unit – mikrokontrolér
DC	Direct Current – stejnosměrný proud
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect – typ unipolárního tranzistoru
ESD	Electrostatic Discharge – elektrostatický výboj
VCC	Voltage at the Common Collector – symbol pro kladné napětí
PPTC	Polymeric Positive Temperature Coefficient – také značí typ vratné pojistky
GPIO	General Purpose Input/Output – označení vstupně výstupních pinů MCU
SDA	Serial Data Line – datový signál pro I ² C
SCL	Serial Clock Line – hodinový signál pro I ² C
OLED	Organic Light-Emitting Diode – často používaný typ displaye
PWM	Pulse-Width Modulation – pulzně šířková modulace

Seznam příloh

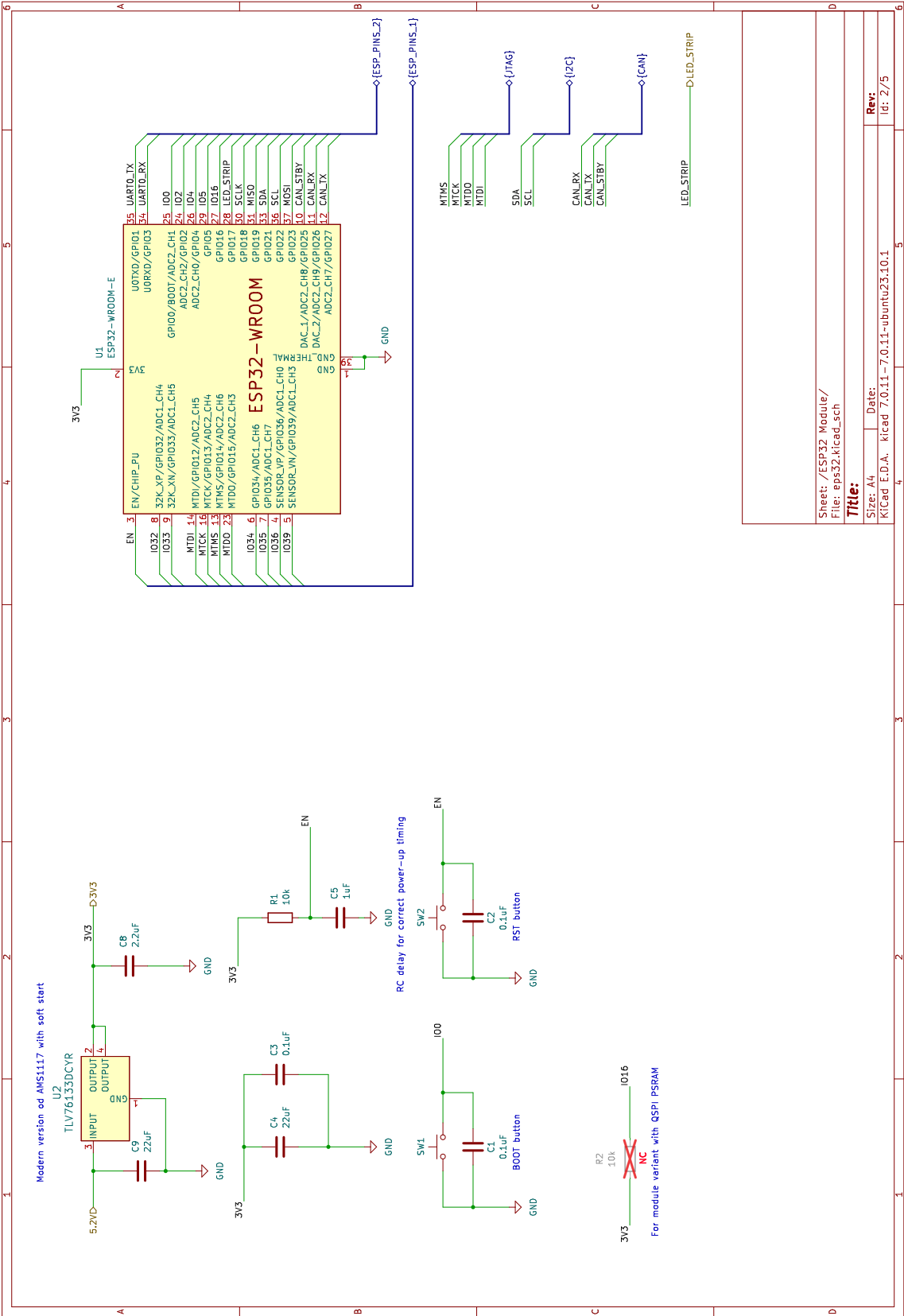
A	Schéma řídicí jednotky	44
A.1	Blokové schéma	44
A.2	Zapojení MCU	45
A.3	Napájecí obvod	46
A.4	Konektory	47
A.5	Sběrnice periférií	48
B	Schéma modulu periférií	49
C	Schéma modulu LED osvětlení	50

A Schéma řídicí jednotky

A.1 Blokové schéma



A.2 Zapojení MCU



From external power supply

24V

Output from buck

5.2V

LM5148QYR

U4B

U4A

Q1

Q2

L1

C18

C17

C16

C15

C14

C13

C12

C11

C26

C25

C24

C23

C22

C21

C20

C19

C18

C17

C16

C15

C14

C13

C12

C11

C10

C9

C8

C7

C6

C5

C4

C3

C2

C1

R1

R2

R3

R4

R5

R6

R7

R8

R9

R10

R11

R12

R13

R14

R15

R16

R17

R18

R19

R20

R21

R22

R23

R24

R25

R26

R27

R28

R29

R30

R31

R32

R33

R34

R35

R36

R37

R38

R39

R40

R41

R42

R43

R44

R45

R46

R47

R48

R49

R50

R51

R52

R53

R54

R55

R56

R57

R58

R59

R60

R61

R62

R63

R64

R65

R66

R67

R68

R69

R70

R71

R72

R73

R74

R75

R76

R77

R78

R79

R80

R81

R82

R83

R84

R85

R86

R87

R88

R89

R90

R91

R92

R93

R94

R95

R96

R97

R98

R99

R100

R101

R102

R103

R104

R105

R106

R107

R108

R109

R110

R111

R112

R113

R114

R115

R116

R117

R118

R119

R120

R121

R122

R123

R124

R125

R126

R127

R128

R129

R130

R131

R132

R133

R134

R135

R136

R137

R138

R139

R140

R141

R142

R143

R144

R145

R146

R147

R148

R149

R150

R151

R152

R153

R154

R155

R156

R157

R158

R159

R160

R161

R162

R163

R164

R165

R166

R167

R168

R169

R170

R171

R172

R173

R174

R175

R176

R177

R178

R179

R180

R181

R182

R183

R184

R185

R186

R187

R188

R189

R190

R191

R192

R193

R194

R195

R196

R197

R198

R199

R200

R201

R202

R203

R204

R205

R206

R207

R208

R209

R210

R211

R212

R213

R214

R215

R216

R217

R218

R219

R220

R221

R222

R223

R224

R225

R226

R227

R228

R229

R230

R231

R232

R233

R234

R235

R236

R237

R238

R239

R240

R241

R242

R243

R244

R245

R246

R247

R248

R249

R250

R251

R252

R253

R254

R255

R256

R257

R258

R259

R260

R261

R262

R263

R264

R265

R266

R267

R268

R269

R270

R271

R272

R273

R274

R275

R276

R277

R278

R279

R280

R281

R282

R283

R284

R285

R286

R287

R288

R289

R290

R291

R292

R293

R294

R295

R296

R297

R298

R299

R300

R301

R302

R303

R304

R305

R306

R307

R308

R309

R310

R311

R312

R313

R314

R315

R316

R317

R318

R319

R320

R321

R322

R323

R324

R325

R326

R327

R328

R329

R330

R331

R332

R333

R334

R335

R336

R337

R338

R339

R340

R341

R342

R343

R344

R345

R346

R347

R348

R349

R350

R351

R352

R353

R354

R355

R356

R357

R358

R359

R360

R361

R362

R363

R364

R365

R366

R367

R368

R369

R370

R371

R372

R373

R374

R375

R376

R377

R378

R379

R380

R381

R382

R383

R384

R385

R386

R387

R388

R389

R390

R391

R392

R393

R394

R395

R396

R397

R398

R399

R400

R401

R402

R403

R404

R405

R406

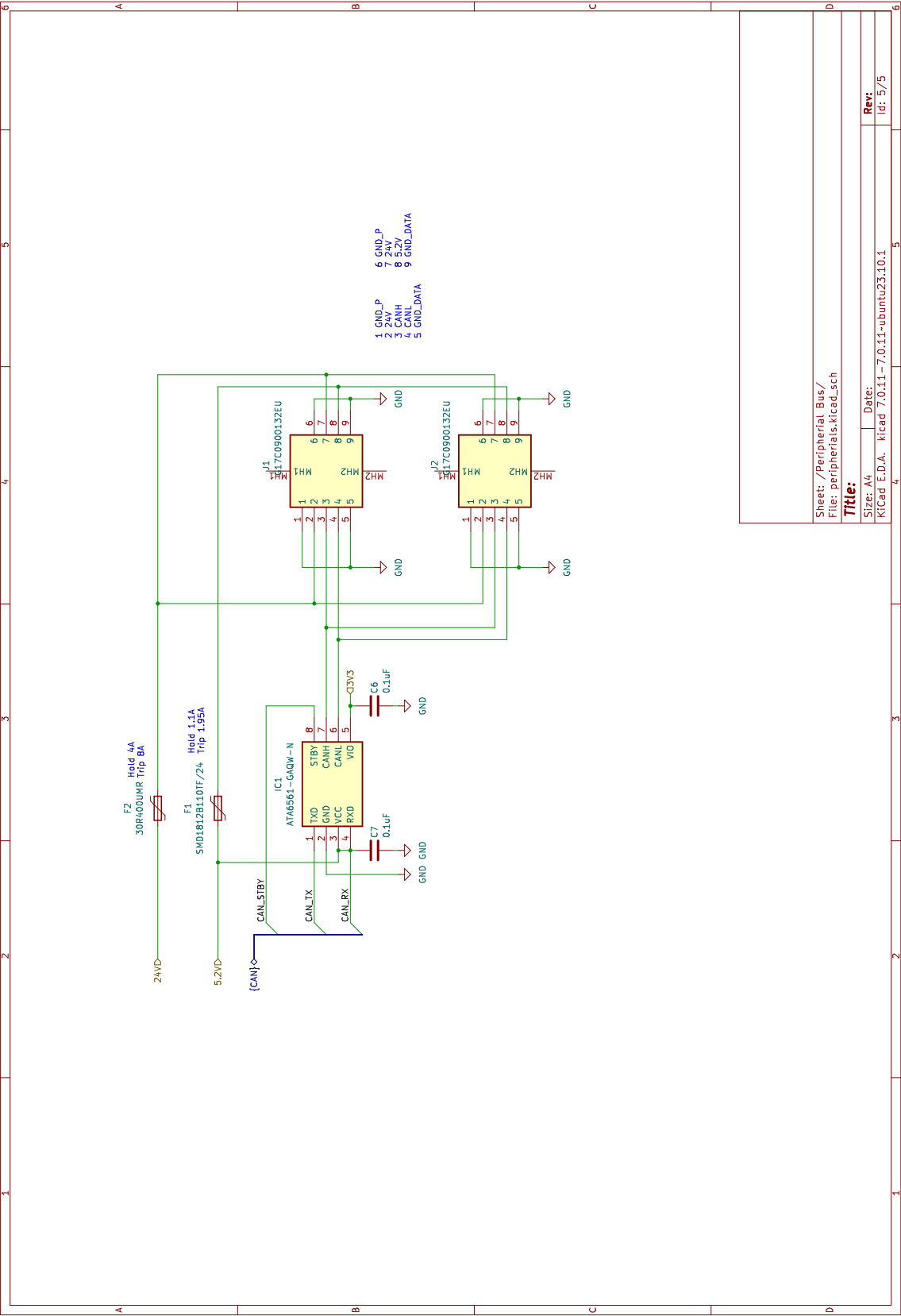
R407

R408

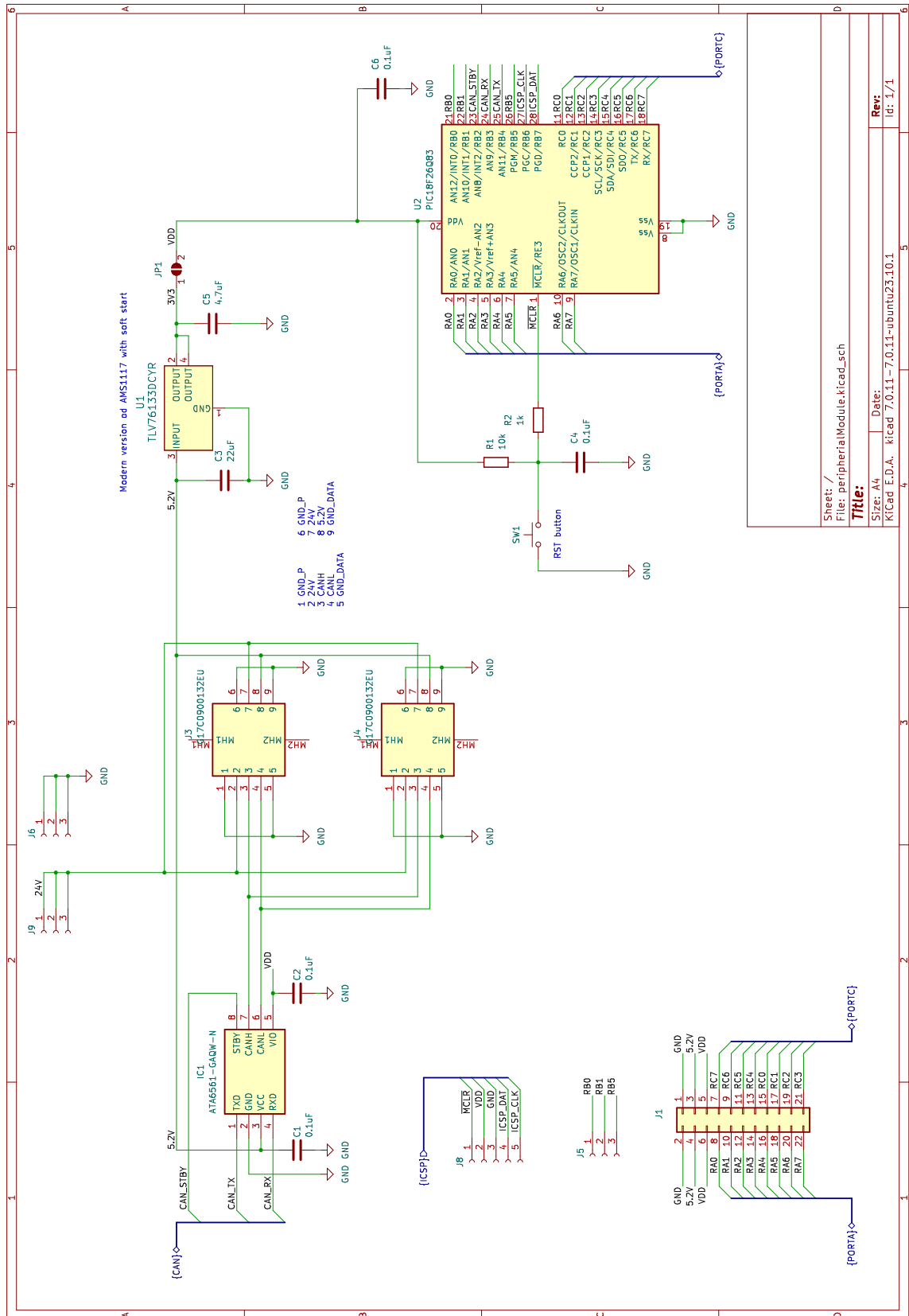
R409

R410

A.5 Sběrnice periferií



B Schéma modulu periferií



C Schéma modulu LED osvětlení

