



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VIAC-KANÁLOVÉ ZARIADENIE NA ROZVOD ELEKTRICKEJ ENERGIE DO ZÁTAŽÍ

MULTI-CHANNEL POWER DISTRIBUTION UNIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Alexander Sloboda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Alexander Sloboda

ID: 193261

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Viac-kanálové zariadenie na rozvod elektrickej energie do záťaží

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvorte viac-kanálové zariadenie, na rozvod elektrickej energie do viacerých záťaží. Zariadenie by malo byť schopné diaľkového ovládania cez UTP Ethernetový protokol. Zariadenie by zároveň malo obsahovať aj fyzické manuálne ovládanie spínania energie do záťaže, nezávislé od diaľkového ovládania cez Ethernet. Vstupné napätie 3x 400VAC/50HZ. Výstupné napätie do záťaží: 28VDC s celkovým maximálnym výstupným výkonom 15 kW alebo podľa potreby. Toto napájacie zariadenie bude po výrobe pripojené k simulačnej testovacej stanici, kde bude fungovať ako hlavný napájací a rozvodný prvok sústavy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podľa pokynů vedoucí práce

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 23.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.

Konzultant: Tomáš Hejč

doc. Ing. Petr Bača, 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 práca sa venuje elektrickému návrhu zapojenia zariadenia na ovládanie a kontrolu výkonových napätových výstupov. Predstavené sú hlavné komponenty, logická postupnosť pri ich vyberaní a systémový nadhľad na celé vnútorné zapojenie zariadenia. Práca obsahuje teoretický úvod do napätových zdrojov a to AC/DC meničov, so zameraním na spínané meniče a DC/DC meniče. Uvedení je aj stručný prehľad polovodičových súčiastok.

Kľúčové slová

Ovládač výkonových výstupov, výkonové zdroje, relé pevného stavu, AC/DC meniče, polovodičové spínacie prvky, tranzistory

Abstract

This master's thesis focuses on electrical design of a power supply controller, able to independently control multiple power outputs. Described are main components, process of choosing components and systematic view of inner connection of this device. Thesis contains theoretical introduction into power supplies such as AC/DC converters with focus on switch-mode converters and DC/DC converters. Brief overview of semiconductor components is included.

Keywords

Power supply controller, power supplies, solid state relay, AC/DC converters, semiconductor switching devices, transistors

Bibliografická citácia

SLOBODA, Alexander. Viac-kanálové zariadenie na rozvod elektrickej energie do záťaží [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152062>. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Kristýna Jandová.

Prehlásenie autora o pôvode diela

Meno a priezvisko študenta:	Alexander Sloboda
VUT ID študenta:	193261
Typ práce:	Diplomová práca
Akademický rok:	2022/23
Téma záverečnej práce:	Viac-kanálové zariadenie na rozvod elektrickej energie do záťaží

Prehlasuje, že svoju prácu na tému Viac-kanálové zariadenie na rozvod elektrickej energie do záťaží som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitým odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky uvedené v zozname literatúry na konci práce

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem že v súvislosti vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomí dôsledkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúceho autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4. Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.

V Brne dne: 23.5.2023

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcim diplomovej práce Ing. Kristýne Jandovej, Ph.D. a Ing. Tomášovi Hejčovi, za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri zapracovaní mojej diplomovej práce. Ďakujem aj kolegovi Ing. Ondrejovi Jandovi za pomoc pri realizácii práce.

V Brne dne: 25. Mája 2023

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK	10
ÚVOD	11
1. TEORETICKÝ ÚVOD	13
1.1 AC/DC MENIČE	13
1.1.1 Transformátorový menič	13
1.1.2 Spínané meniče	14
1.2 NAPĀŤOVÉ REGULÁTORY	16
1.2.1 Lineárne napĀťové regulátory	17
1.2.2 Spínané napĀťové regulátory	18
1.3 ELEKTRONICKÉ SPÍNACIE PRVKY	21
1.3.1 Dióda	21
1.3.2 Bipolárny tranzistor	22
1.3.3 MOSFET Tranzistory	23
2. PRINCÍP FUNKCIE ZARIADENIA	24
3. ZDROJE JEDNOSMERNÉHO NAPĀTIA	27
3.1 VÝKONOVÉ NAPĀJACIE ZDROJE JEDNOSMERNÉHO NAPĀTIA 28 V	28
3.2 VÝKONOVÝ NAPĀJACÍ ZDROJ JEDNOSMERNÉHO NAPĀTIA 5 V	29
3.3 POMOCNÉ ZDROJE JEDNOSMERNÉHO NAPĀTIA	29
3.3.1 Pomocný zdroj jednosmerného napĀtia 12 V	30
3.3.2 Pomocný zdroj jednosmerného napĀtia 5 V	30
4. OVLĀDACÍ OBVOD	32
4.1 MIKROKONTROLÉR	32
4.2 WIZNET W5500 INTERNETOVÝ KONTROLÉR	33
4.3 DPS PRE OVLĀDACÍ OBVOD	34
4.3.1 DPS OvlĀdacieho obvodu revĀzia A	36
5. VÝKONOVÉ SPÍNACIE PRVKY A ICH OVLĀDANIE	37
5.1 VÝKONOVÉ SPÍNACIE PRVKY	37
5.1.1 DPS pre zapojenie relé pevného stavu revĀzia A	38
5.1.2 DPS pre zapojenie relé pevného stavu revĀzia B	41
5.2 SPÍNANIE VÝKONOVÝCH SPÍNACÍCH PRVKOV	42
5.2.1 Spínanie pomocou tlačidiel	42
5.2.2 Spínanie v režime diaľkového ovlĀdania	44
5.2.3 Prepínanie režimu operácie	44
5.3 OBVOD PRE VZDIALENÉ OVLĀDANIE	44
5.3.1 DPS pre spínací obvod vzdialeného ovlĀdania revĀzia A	46
5.3.2 DPS pre spínací obvod vzdialeného ovlĀdania revĀzia B	48
6. REALIZĀCIA ZARIADENIA	49
6.1 VSTUPNÝ NAPĀJACÍ OBVOD	50

6.2	REALIZÁCIA SPÍNACIEHO OBVODU	50
6.3	TLAČIDLOVÝ PANEL	52
6.3.1	<i>DPS pre tlačidlový panel</i>	53
6.4	KONEKTOROVÝ PANEL	54
6.5	STAVOVÝ PANEL	55
6.6	FINANČNÉ ASPEKTY REALIZÁCIE	55
6.6.1	<i>Počiatočný odhad nákladov</i>	55
6.6.2	<i>Reálne náklady</i>	56
7.	ZÁVER	58
	LITERATÚRA	60
	ZOZNAM SYMBOLOV A ZKRATIEK	62
	ZOZNAM PRÍLOH	63

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	TRANSFORMATOROVÝ MENIČ	14
1.2	SPÍNANÝ AC/DC MENIČ.....	15
1.3	TYPICKÉ POUŽITIE NAPĀŤOVÝCH REGULÁTOROV [3]	16
1.4	PRINCÍP FUNGOVANIA LINEÁRNEHO NAPĀŤOVÉHO REGULÁTORA [6].....	17
1.5	VNÚTORNÉ ZAPOJENIE NAPĀŤOVÉHO REGULÁTORA [5]	18
1.6	PRINCÍP FUNKCIE „BUCK“ MENIČA VYSVETLENÝ POMOCOU PREPÍNAČA: (A) SCHÉMA ZAPOJENIA, (B) SPÍNACIA FUNKCIA [1]	19
1.7	VNÚTORNÉ ZAPOJENIE „BUCK“ SPÍNANÉHO REGULÁTORU SPOLU S OVLÁDACÍM OBVODOM [1] ..	20
1.8	A-V CHARAKTERISTIKA POLOVODIČOVEJ DIÓDY[12].....	22
1.9	PRINCÍP FUNKCIE BIPOLÁRNEHO TRANZISTORU[13]	22
1.10	ŠTRUKTÚRA MOSFET TRANZISTORU S INDUKOVANÝM KANÁLOM[11]	23
2.1	ZÁKLADNÉ BLOKOVÁ SCHÉMA ZAPOJENIA ZARIADENIA PSC.....	25
3.1	BLOKOVÁ SCHÉMA NAPÁJACÍCH ZDROJOV	27
3.2	BLOKOVÁ SCHÉMA NAPÁJANIA VÝKONOVÝCH ZDROJOV JEDNOSMERNÉHO NAPĀTIA 28 V	29
4.1	VÝVOJOVÁ DOSKA ARDUINO DUE [14].....	33
4.2	VÝVOJOVÁ DOSKA WIZNET W5500 ETHERNET SHIELD [15].....	34
5.1	BLOKOVÝ DIAGRAM VNÚTORNÉHO ZAPOJENIA RELÉ PEVNÉHO STAVU D1D20 [22]	37
5.2	DPS PRE VÝKONOVÉ SPÍNACIE PRVKY: A) VONKAJŠÍ OBAL SÚČIASTKY D1D20 [23], B) SVORKOVNICA LPTA 2,5/8-5,0 [24]	39
5.3	CHYBY DPS: A) POŠKODENÁ MASKA NAD UZEMNENÍM, B) POŠKODENÁ MASKA A VODIVÁ CESTA	41
5.4	TLAČIDLO EAO 31-483.036: A) VONKAJŠÍ TVAR TLAČIDLA, B) VNÚTORNÉ ZAPOJENIE TLAČIDLA	43
5.5	BLOKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENIA OVLÁDACIEHO OBVODU PRE VZDIALENÉ OVLÁDANIE A RELÉ PEVNÉHO STAVU	45
5.6	BLOKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENIA OVLÁDACEJ DPS, SPÍNACIEHO OBVODU A TLAČIDLOVÉHO PANELU	46
6.1	PRVÝ BLOKOVÝ DIAGRAM PRE SYSTÉMOVÉ ZAPOJENIE ZARIADENIA PSC	49
6.2	VSTUPNÝ NAPÁJACÍ OBVOD ZARIADENIA PSC	50
6.3	POROVNANIE DPS PRE PREPOJENIE RELÉ PEVNÉHO STAVU REVÍZIA A (ZELENÁ MASKA) A REVÍZIA B (ČERVENÁ MASKA).....	51
6.4	ROZPRACOVANÝ SSR BOX	51
6.5	HOTOVÝ SSR BOX (BEZ HORNEJ KRYTU) NAINŠTALOVANÝ V ZARIADENÍ PSC.....	52
6.6	PREDNÁ STRANA TLAČIDLOVÉHO PANELU	52
6.7	ZADNÁ STRANA TLAČIDLOVÉHO PANELU	53
6.8	KONEKTOROVÝ PANEL OSADNÝ KONEKTORMI.....	54
6.9	STAVOVÝ PANEL	55

ZOZNAM TABULIEK

5.1	Vybrané vstupné parametre súčiastky D1D20 pri teplote okolia $\vartheta_c = 25^\circ\text{C}$ [22].....	38
5.2	Vybrané výstupné parametre súčiastky D1D20 pri teplote okolia $\vartheta_c = 25^\circ\text{C}$ [22].....	38
6.1	Odhad hodín potrebných na návrh a realizáciu zariadenia PSC	55
6.2	Odhad ceny materiálu.....	56
6.3	Reálne náklady v osobohodinách	56
6.4	Reálne náklady na materiál	57

ÚVOD

Táto Diplomová práca sa zaoberá návrhom a fyzickou realizáciou zariadenia na ovládanie napájania do jednotlivých záťaží. Zátáže pripojené do sústavy sú vo forme leteckej avioniky, jedná sa o displeje, ovládacie kurzory, rádia, výpočetné jednotky (palubný počítač) a iné. Zariadenie bude súčasťou a hlavným napájacím prvkom simulačného pracoviska na vývoj softwaru, certifikáciu a integráciu avioniky spoločnosti Honeywell pri spolupráci s ďalšou firmou na vývoji nového lietadla.

Toto zariadenie je schopné spínať jednosmerné napájacie napätie 28 V samostatne do jednotlivých záťaží, bez ohľadu na stav ostatných záťaží pripojených do zariadenia. Teda zariadenie obsahuje 96 samostatne ovládaných silových napájacích kanálov, z ktorých každý kanál podporuje prúdové zaťaženie až do 20 Ampérov. Pred návrhom zariadenia boli obdržané nasledujúce požiadavky na funkciu:

- Výstupné jednosmerné napájacie napätie: 28 V
- Maximálne prúdové zaťaženie napájacieho kanálu: 20 A
- Maximálny výstupný výkon pre všetky kanály: 15 kW
- Minimálny počet silových napájacích kanálov: 80
- Ochrana každého kanálu proti vysokému prúdu pomocou ističov pre jednosmerné napätie 28 V
- Lokálne ovládanie pomocou fyzických tlačidiel
- Diaľkové ovládanie pomocou Ethernetového UDP protokolu
- Signalizácia zapnutých kanálov cez indikátory LED respektíve indikačné žiarovky
- Umiestnenie zariadenia do 19 palcového kabinetu
- Bezpečnostný obvod s E-STOP tlačidlom
- Pomocné jednosmerné napájacie napätie 28 V
- Pomocné jednosmerné napájacie napätie 5 V s možnosťou variácie cez potenciometer. Toto napätie slúži ako referencia pre stíevanie podsvietenie displejov a tlačidiel na pripojenej avionike, ktorú zariadenie napája
- Pripojenie na štandardnú Európsku 3-fázovú sieťovú zásuvku

Tento druh zariadenia určeného na ovládanie napájacích výstupov je možné realizovať zadaním vývoja a realizácie externému návrhárovi a výrobcovi elektrotechnických sústav. Avšak z dôvodov variability a cenovej výhody najmä pri realizácií viacerých kusov, bol firmou Honeywell zvolený prístup vlastnej realizácie. Táto diplomová práca sa zameriava na už samotný návrh a technické prevedenie takéhoto druhu zariadenia.

Počas uskutočnenia došlo k viacerým technickým výzvam, ktoré vyplynuli z povahy realizácie zariadenia, nie všetky technické problémy sa dali v navrhovej fáze predvídať. Riešenie týchto prekážok je súčasťou tejto diplomovej práce.

K práci bol vypracovaný aj stručný teoretický úvod, popisujúci jednotlivé hlavné prvky, z ktorých bolo zariadenie skompletizované. Jedná sa o teoretické minimum zachytávajúce základné funkčné princípy niektorých polovodičových súčiastok, AC/DC meničov a napätových regulátorov.

1. TEORETICKÝ ÚVOD

1.1 AC/DC Meniče

Táto kapitola sa zaoberá rôznymi spôsobmi ako je možné zo striedavého napätia vyrobiť jednosmerné napätie na napájanie zariadenia, ktorý je predmetom tejto práce. Nakoľko záťaž, ktoré bude toto zariadenia napájať požadujú nominálne napätie 28 VDC.

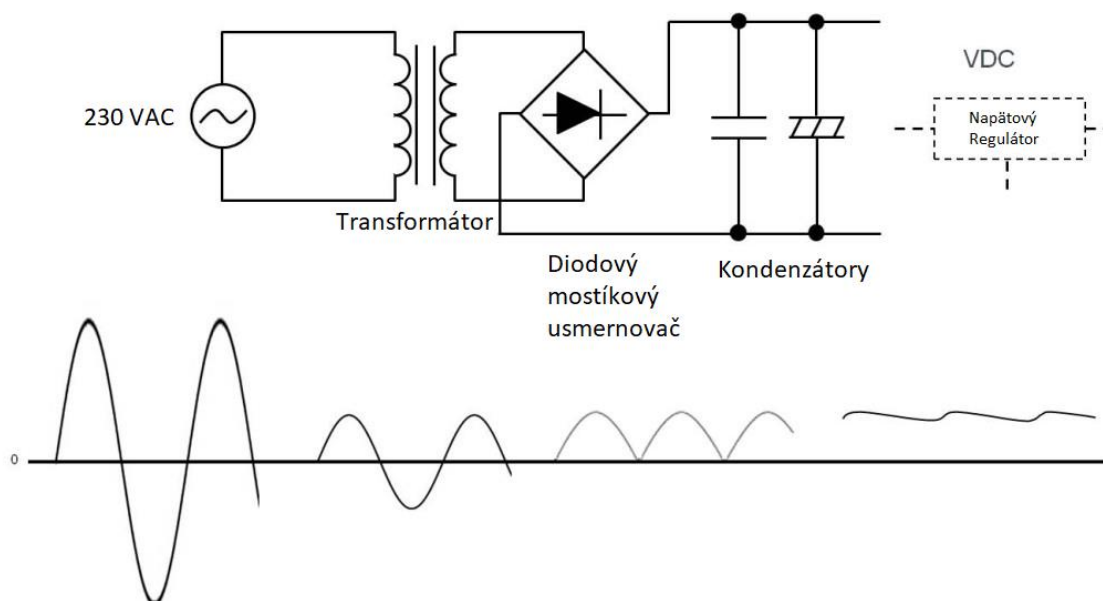
Elektrická energia je z elektrárni prepravovaná vo forme striedavého napätia nakoľko prenos energie pomocou striedavého napätia má hneď niekoľko výhod, napríklad jednoduchú konverziu napätí pomocou transformátorov. Nakoľko je energia z elektrárni prenášaná pri veľmi vysokom striedavom napätí, nie je potrebný veľký prúd a teda sú straty na vodičoch menšie.

Meniče nasmerujú striedavý prúd, keďže sa mení aj jeho napätie, do prvkov reaktívnej impedancie, ako sú indukory (L) a kondenzátory (C), kde je uložený a integrovaný. Tento proces oddeľuje výkon spojený s pozitívnym a negatívnym potenciálom. Filtre sa používajú na vyhladenie uloženej energie, čo vedie k vytvoreniu jednosmerného napätia pre ďalšie obvody. Tento obvod môže mať mnoho podôb, ale vždy pozostáva z rovnakých základných prvkov a môže mať jeden alebo viac stupňov konverzie. [1][3]

1.1.1 Transformátorový menič

Transformátorový menič je z pohľadu počtu použitých súčiastok veľmi jednoduché zariadenie. V prvej fáze dôjde k poníženiu striedavého napätia pomocou transformátoru, čo je feritové alebo kovové jadro na ktorom sa nachádzajú 2 vinutia – primárne a sekundárne. Podľa pomeru otáčok primárneho a sekundárneho vinutia je podelené aj vstupné striedavé napätie. V ďalšej fáze dochádza k usmerneniu striedavého napätia, kedy dochádza k preklopeniu zápornej fázy sínusoidy cez diódový mostíkový usmerňovač. Nakoniec je striedavé napätie vyhladené kondenzátormi. Na konci tohoto obvodu dostávame usmernené jednosmerné napätie v takej napäťovej hladine akej požadujeme.

Topológiu tohto meniča je možné vidieť na obrázku 1.1. Tento typ meniča bol hojne využívaný v 20. storočí, avšak najväčšiu nevýhodu predstavuje samotný transformátor. Jeho cena, veľkosť a váha predstavovala veľkú nevýhodu a preto sa v súčasnosti používa už len veľmi málo. [2]



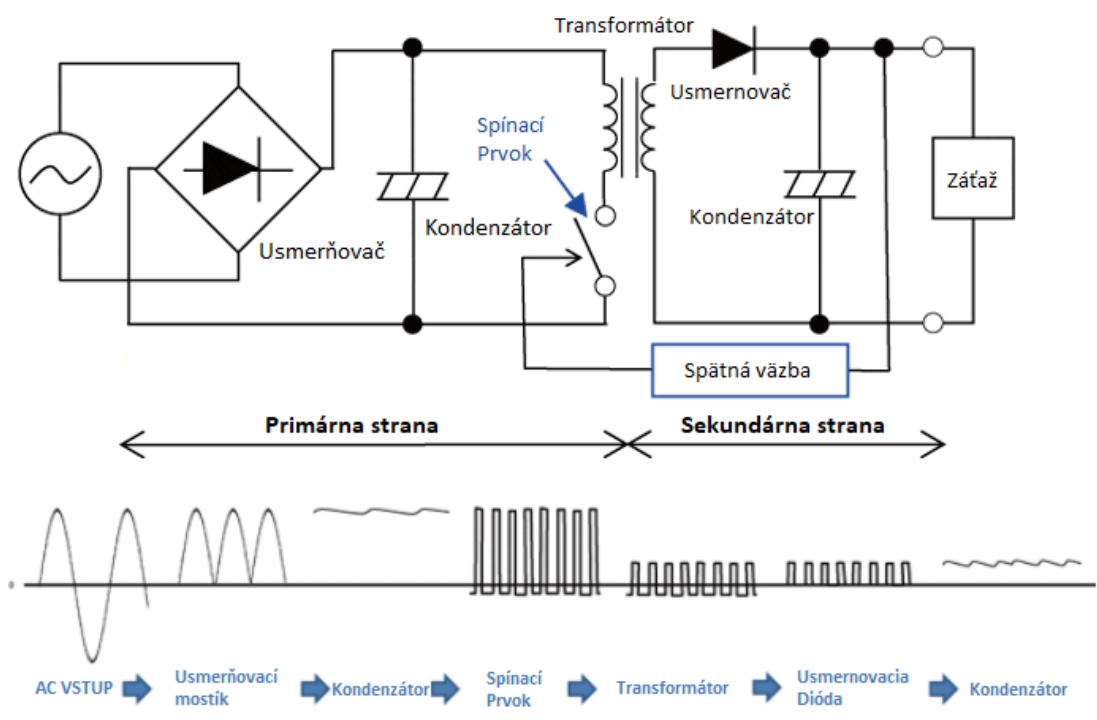
Obrázok 1.1 Transformátorový menič

1.1.2 Spínané meniče

Pri tejto metóde premeny striedavého napätia na jednosmerné dochádza najprv k usmerneniu a vyhladeniu fázového napätia. To znamená, že pri fázovom napätí 230 VAC po usmernení a vyhladení kondenzátormi dostávame 325 VDC. Toto vysoké jednosmerné napätie je pomocou spínaného prvku, najčastejšie MOSFET-u, vysoko-frekvenčne pripájané na primárnu cievku transformátora. To znamená, že v prvom cykle spínaného zdroja je do cievky privádzané energia zo siete. V druhom cykle je sieťové napätie odpojené od cievky a dochádza k prenosu energie z primárnej strany do sekundárnej pomocou magnetického toku cez kovové jadro transformátora.

Na sekundárnej strane je napätie usmernené diódov a vyhladené kondenzátormi. Aby mohol riadiaci obvod zvoliť správnu PWM frekvenciu, je na sekundárnej strane zapojená spätná väzba galvanicky oddelená od primárnej strany. Galvanické oddelenie je dosiahnuté použitím optoelektronických prvkov.

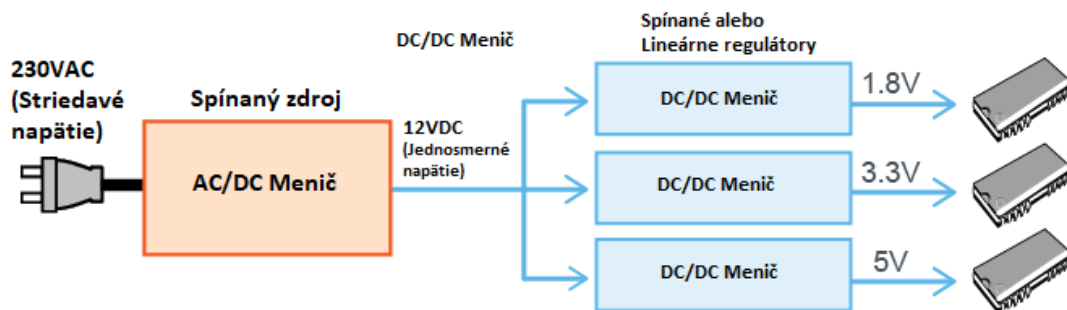
Rozdiel medzi spínaným a transformátorovým meničom predstavením v kapitole 1.1.1 je v tom, že pri transformátorovom meniči dochádza k poníženiu (alebo aj zvýšeniu) striedavého napätia pomocou pomeru vinutí, ktoré je potom vyhladené kondenzátormi. Nepochádza k žiadnemu spínaniu a transformátor pracuje kontinuálne. Pri spínanom meniči dochádza pri vysokej frekvencii (desiatky až stovky kilohertzov) k spínaniu energie do transformátora a teda vieme pomocou striedy signálu regulovať množstvo energie, ktoré je cez jadro transformátora prenesené na sekundárnu stranu. Čím je vyššia spínacia frekvencia tým je možné použiť menší a ľahší transformátor. [1][3]



Obrázok 1.2 Spínaný AC/DC menič

1.2 Napät'ové regulátory

Napät'ové regulátory sa v praxi vyskytujú v skoro v každom zariadení. Ich funkcia spočíva v tom, že sú schopné z neregulovaného vstupu, vytvoriť regulovaný výstup. To znamená, že výstupné napätie je nezávislé od prípadnej meniacej sa impedancie pripojenej záťaže. Jednosmerné meniče sú zároveň schopné meniť veľkosť výstupného napätia (znižovať alebo zvyšovať) a aj jeho polaritu. Nakoľko môže výstupný výkon takého zariadenia dosahovať desiatky až stovky wattov, je nutné aby zariadenie pracovalo s vysokou efektívnosťou. Bez vysokej efektivity, by dochádzalo ku generovaniu nadmerného stratového tepla, ktoré je nákladné a náročné na odstránenie. Ideálny DC/DC menič by mal 100% účinnosť, v praxi však dosahujeme účinnosť medzi 70 až 95%. Na obrázku 1.3 môžeme vidieť typické využitie jednosmerných napät'ových regulátorov. [1]



Obrázok 1.3 Typické použitie napät'ových regulátorov [3]

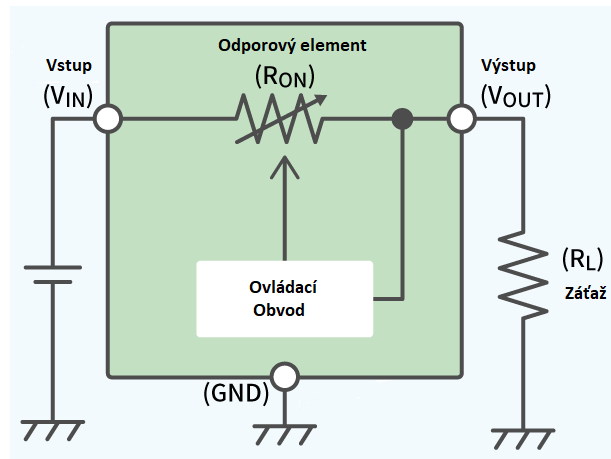
DC/DC meniče môžu byť buď spínané alebo lineárne, v závislosti na metóde konverzie napätia. Lineárne regulátory majú oproti spínaným regulátorom hneď jednu nevýhodu. Vzhľadom na metódu akou regulujú vstupné napätie je možné na výstupe obdržať iba napätie menšie od vstupného napätia. Spínané regulátory sa vo všeobecnosti dajú zapojiť do štyroch rôznych topológií:

- „Buck“ resp. „step-down“ regulátor (voľne preložené do slovenčiny ako znižovací) je schopný generovať na výstupe napätie nižšie ako je vstupné
- „Boost“ resp. „step-up“ regulátor (voľne preložené do slovenčiny ako zosilnovací) je schopný generovať na výstupe napätie vyššie ako je vstupné
- „Buck-boost“ regulátor je schopný generovať konštantné napätie na výstupe bez ohľadu na to, či je vstupné napätie vyššie alebo nižšie ako výstupné
- „Inverting“ regulátor (voľne preložené do slovenčiny ako obracajúci) je schopný generovať na výstupe napätie nižšie ako je vstupné [2]

Z krátkeho porovnania v predchádzajúcom odstavci je jasné, že spínaný regulátor nám ponúka vyššiu všestrannosť. Na rozdiel od lineárneho regulátora je schopný výstupné napätie nie je len znížiť ale aj zvýšiť alebo invertovať (zmeniť polaritu výstupného napätia).

1.2.1 Lineárne napät'ové regulátory

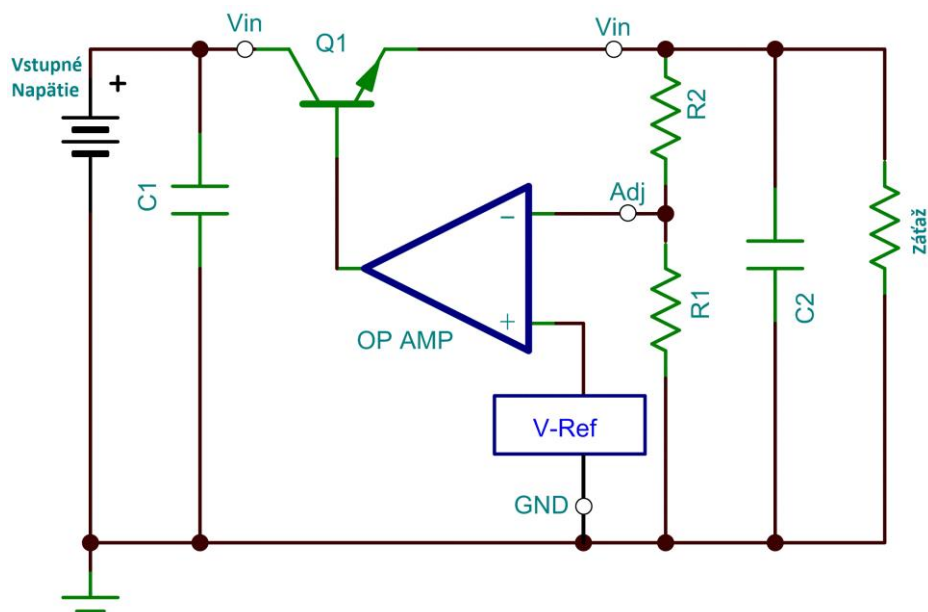
Lineárne napät'ové regulátory využívajú zmenu odporu a teda zmenu úbytku napätia na dosiahnutie regulovaného výstupného napätia. Môžeme si ich predstaviť ako spätnou väzbou ovládaný potenciometer. Tento nastaviteľný odpor je schopný vytvoriť dostatočne veľký úbytok napätia, aby sme dosiahli požadovaný level výstupného napätia. Tento zjednodušený pohľad na danú problematiku je dobre ilustrovaný na obrázku 1.4 . [4]



Obrázok 1.4 Princíp fungovania lineárneho napät'ového regulátora [6]

Ako nastaviteľný potenciometer sa používa polovodičový tranzistor, buď bipolárny alebo MOSFET. Vďaka jeho A-V charakteristike je schopný pri pripojení napätia na jeho bázu, v rámci jeho limitácií dosahovať akýkoľvek odpor medzi kolektorom a emitorom.

Ako ovládací obvod sa používa operačný zosilňovač, v zapojení ako komparátor. Na vstupy komparátoru je pripojená napät'ová referencia a spätná väzba. Napät'ová referencia poskytuje operačnému zosilňovaču konštantné napätie. Na druhý vstup zosilňovača je pripojený odporový delič, ktorý zohráva úlohu spätnej väzby. Výstupné napätie je v určitom pomere, v závislosti od veľkosti odporov v deliči, podelené a následne predané na vstup zosilňovača. Operačný zosilňovač, mení svoj výstup až pokiaľ nie je rozdiel napätia medzi jeho vstupmi rovný 0 V. Meniaci sa výstup operačného zosilňovača ovplyvňuje predpätie na báze resp. „gate“ tranzistoru a tým mení jeho odpor. Predpätie na báze tranzistoru je upravované dovedy, kým sa na výstupe deliča (spätnej väzby) neobjaví rovnako veľké napätie ako je veľkosť napätia napät'ovej referencie pripojenej na operačný zosilňovač. Pre lepšie pochopenie problematiky je na obrázku 1.5 vnútorné zapojenie lineárneho regulátora. [4]



Obrázok 1.5 Vnútorné zapojenie napät'ového regulátora [5]

Lineárny regulátor je jednoduchý a lacný. Vďaka jeho rýchlej odozve na meniace sa vstupné napätie je schopný vytvoriť výstup, ktorý neobsahuje skoro žiadne „ripple“. Taktiež tým, že sa nejedná o spínaný regulátor, tak sa vo výstupnom napätí nenachádza vysokofrekvenčné rušenie, ktoré by bolo spôsobené práve týmto spínaním.

Hlavná nevýhoda lineárneho regulátora je jeho nízka účinnosť. Je to spôsobené poklesom napätia na tranzistore. Čím väčší je rozdiel medzi vstupom a výstupom, tak tým väčší musí byť úbytok na tranzistore a tým väčšie bude stratové teplo, ktoré budeme musieť ochladiť. [4]

1.2.2 Spínané napät'ové regulátory

Spínané regulátory sú na rozdiel od lineárnych schopné pracovať s vysokou účinnosťou medzi 70 až 95%. Samozrejme ideálny regulátor by mal účinnosť 100% a nevytváral by stratové teplo, čo nie je možné dosiahnuť. Vysoká účinnosť je dosiahnutá spínaním vstupného napätia. Spínanie je ovládané moduláciou šírky pulzu (PWM), ktorá dokáže kontrolovať a regulovať výstupné napätie. [1]

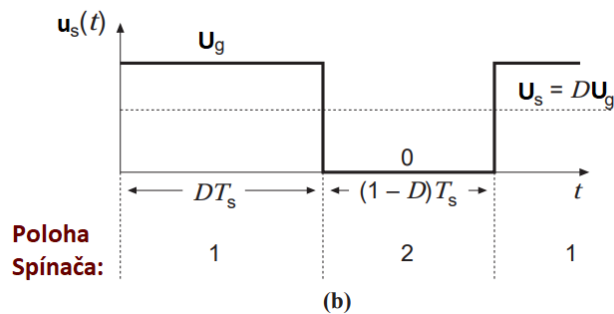
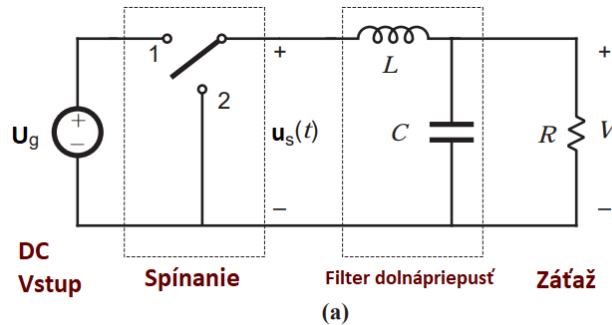
Sú používané na efektívne vytváranie regulovaného napätia zo zdroja, ktorý môže alebo nemusí byť dobre regulovaný, do záťaže, ktorá môže, ale nemusí byť konštantná. Spínané meniče sú vysokofrekvenčné obvody na konverziu energie, ktoré využívajú vysokofrekvenčné spínanie a induktory, transformátory a kondenzátory na vyhladenie spínacieho šumu na vytvorenie regulovaného jednosmerného napätia. Uzavretá spätná väzba udržuje konštantné výstupné napätie aj pri zmene vstupného napätia a výstupného prúdu. Pri účinnosti 90 % sú vo všeobecnosti oveľa efektívnejšie a menšie ako lineárne regulátory. Ich nevýhodou je vysokofrekvenčný šum, spôsobený spínaním a zložitosť. [6]

Základný princíp funkcie je ilustrovaný na obrázku 1.6. Ak je prepínač v pozícií 1, tak je $u_s(t)$ rovné vstupnému napätiu U_g . V pozícií 2, je $u_s(t)$ rovné zase 0 V. Pozícia prepínača sa mení periodicky, tak že $u_s(t)$ je vo forme obdĺžnikovej vlny s periódou T_s , frekvenciou $f=1/T_s$ a striedov D . Typická spínacia frekvencia je v rozsahu od 1 kHz až do 1 MHz.

Spínací obvod teda mení jednosmernú zložku napätia. Jednosmerná zložka striedavého napätia je určená podľa jej priemernej hodnoty:

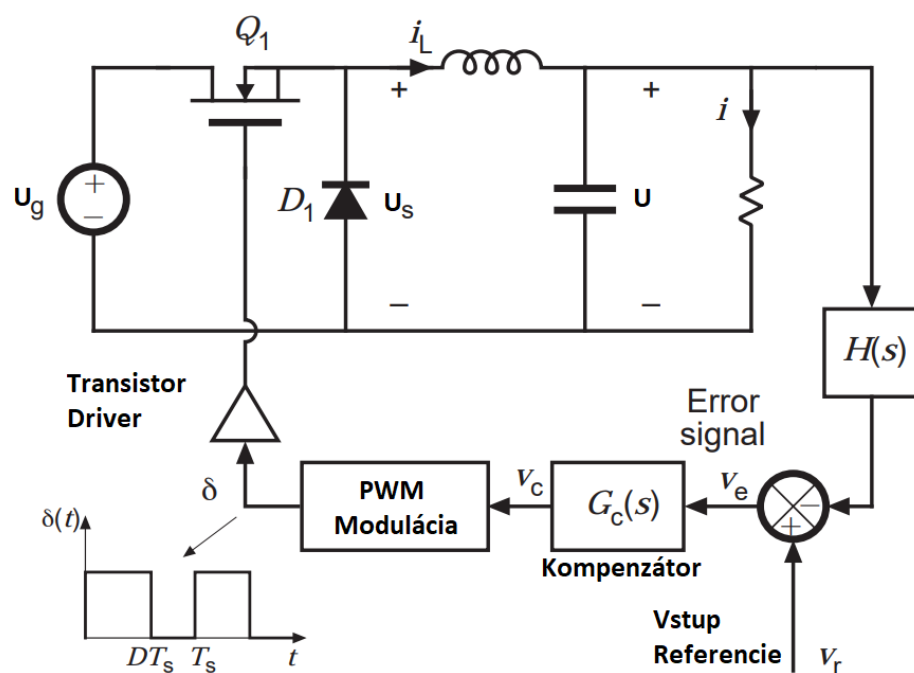
$$U_s = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_s(t) dt = D U_g. \quad (\text{X.1})$$

Integrál je rovný ploche pod funkciou a to je výška U_g vynásobená časom, čo predstavuje násobok striedy D a periódy funkcie T_s . Keďže $0 \leq D \leq 1$, tak výstupné napätie nemôže byť vyššie ako vstupné napätie U_g . Jedná sa teda o vyššie spomínaný „Buck“ (ponižovací) regulátor.



Obrázok 1.6 Princíp funkcie meniča vysvetlený pomocou prepínača: (a) Schéma zapojenia, (b) Spínacia funkcia [1]

V praxi je prepínač realizovaný formou polovodičovej súčiastky (bipolárny tranzistor, MOSFET, IGBT alebo thyristor). Keďže je výstupné napätie funkciou vstupného napätia a striedy, je možné k spínaču pripojiť ovládací obvod meniaci svoju striedu na dosiahnutie rôznych veľkostí výstupného napätia. Na obrázku 1.7 je zobrazený „Buck“ menič s tranzistorom a ovládacím obvodom spolu so spätnou väzbou. [1]



Obrázok 1.7 Vnútrné zapojenie spínaného regulátoru spolu s ovládacím obvodom [1]

1.3 Elektronické spínacie prvky

Spínač je zariadenie schopné prerušiť tok elektrického prúdu v obvode. Spínače sú nevyhnutnou súčasťou moderných elektronických zariadení. Okrem klasického mechanického spínača a elektromechanického relé poznáme niekoľko rôznych druhov elektronických spínačov, založených na polovodičovej technológii

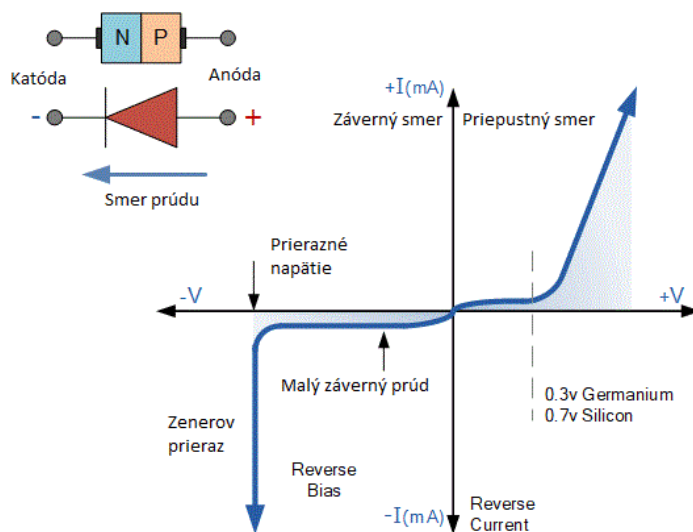
- Dióda
- Bipolárny tranzistor
- Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)
- Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)
- Tyristor
- Triak
- Diak

Elektronické spínače sa v anglickej terminológii označujú ako solid state (voľne preložené ako pevný stav), a to preto že neobsahujú žiadne pohyblivé časti. Spínanie je dosiahnuté využitím PN prechodu a jeho kombinácií.

PN prechod je rozhranie polovodiča typu P a polovodiča typu N. Po priložení polovodiča typu P k polovodiču typu N, dochádza k difúzií dier z polovodiča typu P do polovodiča typu N a difúzií elektrónov z N do P. Akonáhle sa majoritné nosiče náboja dostanú do prostredia, kde sa stávajú minoritnými, rekombinujú s voľným nosičom opačnej polaroty. Za voľnými nosičmi náboja ostávajú pevne viazané nabité atómy prímеси, ktoré blízko prechodu vytvárajú pole priestorového náboja pôsobiace proti difúznemu prúdu (Difúzne napätie). PN prechod sa tak dostane do rovnovážneho stavu, kedy cez PN prechod tečie iba zanedbateľný zostatkový prúd. Polovodičový PN prechod sa tak navonok javí ako elektricky neutrálny. [8][9]

1.3.1 Dióda

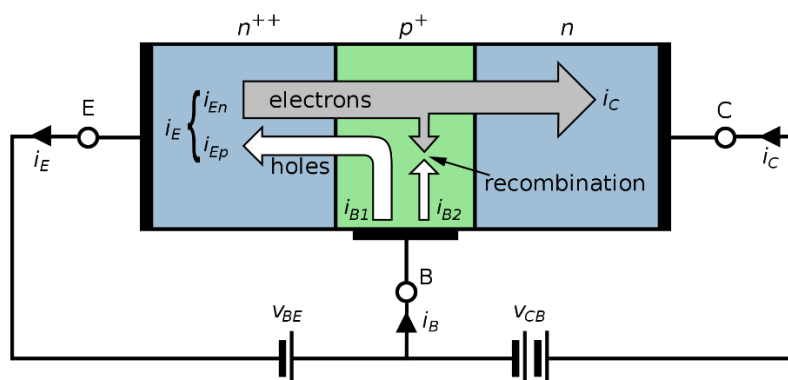
Dióda je tvorená PN prechodom vytvoreným z polovodičového materiálu typu P a typu N. Má dve elektródy a to anódu a katódu. Pri priložení kladného potenciálu na polovodič typu P (anódu) a záporného napätia na polovodič typu N (katódu), pôsobí priložené napätie proti difúznemu napätiu, dôjde k zníženiu potenciálovej bariéry brániacej difúznemu prúdu a PN prechod prepúšťa prúd. Pri priložení kladného potenciálu na polovodič typu N (katódu) a záporného napätia na polovodič typu P (anódu), pôsobí priložené napätie v smere difúznemu napätiu, dôjde k zvýšeniu potenciálovej bariéry brániacej difúznemu prúdu a PN prechod neprepúšťa prúd. [8]



Obrázok 1.8 A-V charakteristika polovodičovej diódy[12]

1.3.2 Bipolárny tranzistor

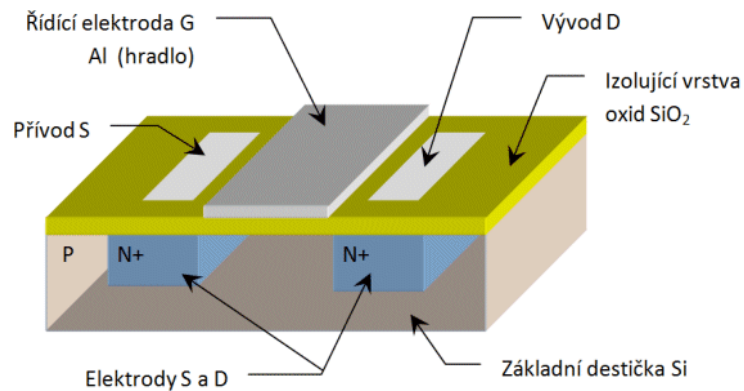
Bipolárny tranzistor je kombinácia dvoch PN prechodov, buď v zapojení NPN, alebo PNP. Meno bipolárny získalo z toho faktu, že na vedenie prúdu sa podieľajú ako elektróny tak aj diery. V NPN tranzistore tečie prúd z kolektoru do emitoru, zatiaľ čo v PNP tranzistore je to naopak. Po pripojení kladného napätia na kolektor a záporného napätia na emitor, prechádza tranzistorom iba veľmi malý prúd. Po pripojení kladného napätia väčšieho ako difúzne napätie, začnú elektróny tiecť z emitoru do báze, odkiaľ sú odsávané kladným nábojom priložením na kolektor. Nakoľko je báza veľmi tenká, iba malá časť elektrónov rekombinuje s dierami, ktoré sú v oblasti báze majoritnými nosičmi náboja. Prikladaním kladného napätia teda vieme kontrolovať vodivosť tranzistoru a jeho spínanie. [8][10]



Obrázok 1.9 Princíp funkcie bipolárneho tranzistoru[13]

1.3.3 MOSFET Tranzistory

MOSFET tranzistory sú na rozdiel od bipolárnych tranzistorov unipolárne komponenty a teda na vedenie elektrického prúdu používajú iba jeden typ nosičov elektrického náboja. Tranzistor je tvorený základným materiálom polovodiča jedného typu (P alebo N), do ktorého sú vytvorené elektródy polovodičového materiálu opačného typu (P+ alebo N+). Riadiaca elektróda G je izolovaná dielektrickým materiálom SiO_2 a je z kovového materiálu, zvyčajne hliníka. V prípade N-kanálového tranzistora, ak nie je na riadiacu elektródu G privedené kladné napätie, vytvorí sa v oblasti prechodu vyprázdnená oblasť. Po priložení dostatočne veľkého kladného napätia na elektródu G dochádza k priťahovaniu elektrónov zo základového materiálu a k vzniku inverznej vrstvy, ktorá obsahuje dostatočný počet voľných nosičov náboja na vedenie prúdu medzi elektródami D a S. [8][11]



Obrázok 1.10 Štruktúra MOSFET tranzistoru s indukovaným kanálom[11]

2. PRINCÍP FUNKCIE ZARIADENIA

Zariadenie, ktore je vo firme Honeywell označované ako Power Supply Controller (PSC) a ďalej pre potreby tejto diplomovej práce označované ako „PSC“, musí byť schopné spínať až 96 silových kanálov, z ktorých každý má prúdové zaťaženie až 20 Ampérov pri jednosmernom napätí 28 V. Každý silový kanál musí byť chránený ističom určeným pre 28 V jednosmerného napätia, ktorý chráni pripojené periférie pred zvýšením prúdom. Napätie sa na jednotlivé kanály pripája pomocou deväťdesiatich šiestich relé pevného stavu (každé relé musí mať priradený vlastný kanál). Tieto relé sú ovládané buď vzdialene cez UDP protokol a mikrokontrolér alebo fyzicky pomocou tlačidiel osadených priamo v zariadení.

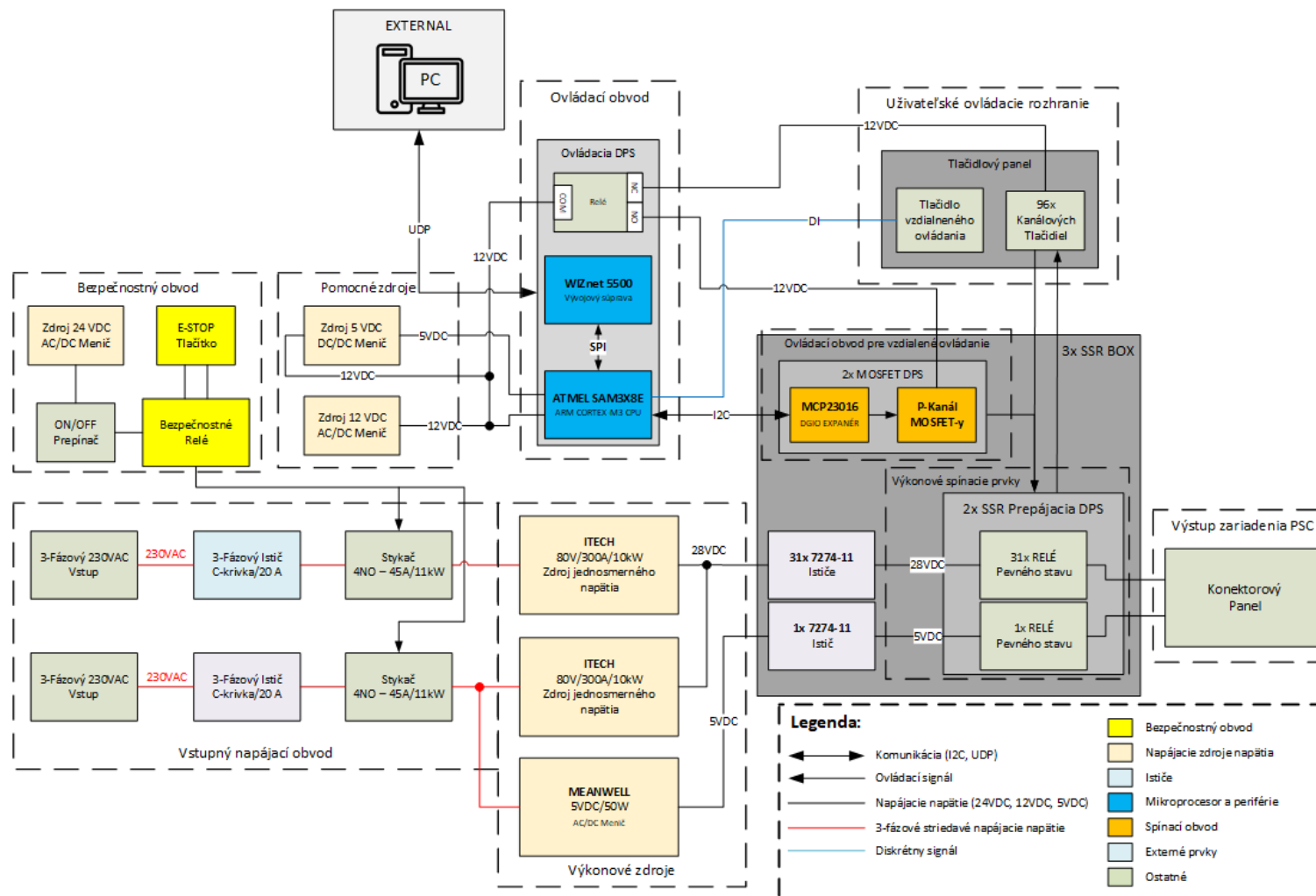
Pri ovládaní vo vzdialenom režime sú relé pevného stavu spínané pomocou príkazov cez UDP protokol posielané z externého počítača, ktorý nie je súčasťou tohto zariadenia. Mikrokontrolér obdrží a preloží príkaz na zopnutie určitých konkrétnych kanálov. Cez I₂C komunikáciu posielajú správu ďalej do expandéru digitálnych výstupov, ktoré cez sústavu bipolárnych tranzistorov a P-kanálových MOSFET-ov privedú jednosmerné napätie priamo na vstupné kontakty relé pevného stavu.

Ak je režim vzdialeného ovládania neaktívny, dochádza k spínaniu relé priamo pomocou tlačidiel osadených v prednom paneli zariadenia. Tlačidlá sú aretačné a po ich aktivovaní je na vstupe relé pevného stavu privádzané spínacie jednosmerné napätie. Toto napätie je na vstupe relé prítomné až do doby pokiaľ nie je tlačidlo opätovne stlačené, čím dôjde k rozpojeniu kontaktov tlačidla.

Zariadenie obsahuje aj tlačidlo, ktoré určuje a prepína medzi módmi operácie. Toto tlačidlo privádza napätiový signál na digitálne vstupy mikrokontroléru a zároveň prepína medzi výstupnými kontaktami elektromagnetického relé. Toto relé je odlišné od výkonových relé pevného stavu, ktoré privádzajú výkon na výstupné periférie. Jeho funkcia iba podporuje prepínanie medzi pracovnými režimami zariadenia. Výstupné kontakty relé sú pripojené buď na tlačidlá alebo na tranzistory MOSFET. Na spoločný terminál relé je pripojené spínacie jednosmerné napätie, určené na spínanie relé pevného stavu. Stláčaním tlačidla vzdialeného ovládania teda rozhodujeme ako budú spínané relé pevného stavu a to buď pomocou tlačidiel alebo pomocou mikrokontroléru a tranzistorov.

Ako hlavné napájacie prvky a zdroje jednosmerného napätia 28 V sa používajú dva vysoko-výkonové zdroje s výkonom 10 000 W a s možnosťou variácie výstupného napätia od 0 až do 80 V. Celkový výkon sústavy týchto dvoch zdrojov je 20 000 W a maximálne prúdové zaťaženie až 600 A. Tieto zdroje sú napájané 3-fázovým systémom bez nulového vodiča. Jedná sa o vyváženú sústavu so zapojením do trojuholníka. Zdroje sú chránené 3-fázovými ističami priamo v zariadení.

Jednotlivé komponenty spomenuté v tejto kapitole sú bližšie popísané v kapitolách 3, 4, 5 a 6.



Obrázok

2.1 Základné bloková schéma zapojenia zariadenia PSC

Blokové schéma poskytuje nadhľad na vnútorné zapojenie. Jedná sa o zjednodušenú verziu s obmedzením počtom náväzností a prepojení medzi jednotlivými blokmi. Nasledujúce kapitoly, ktoré sa venujú jednotlivým vyznačeným blokom v blokovej schéme na obrázku 2.1, sú doplnené o vlastné blokové schémy, ktoré preberajú problematiku hlbšie do detailu.

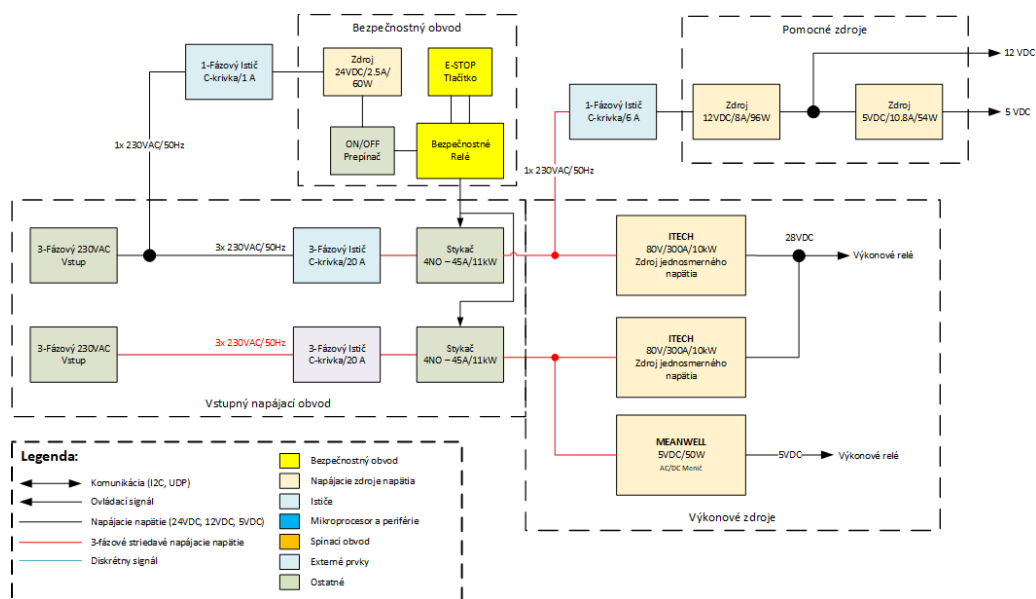
3. ZDROJE JEDNOSMERNÉHO NAPÄTIA

V tejto kapitole budú predstavené vybrané napájacie zdroje zariadenia PSC. Tieto zdroje sú rozdelené do dvoch skupín: hlavné výkonové napájacie zdroje a pomocné zdroje. Rozdiel medzi týmito skupinami zdrojov v PSC, je ten že pomocné zdroje slúžia iba na napájanie vnútorných častí zariadenia. Hlavné napájacie zdroje slúžia na napájanie jednotiek pripojených na výstupné konektory PSC.

Návrh tohto obvodu vychádza z celkovej architektúry uvedenej na obrázku 2.1 časť „Vstupný napájací obvod“, „Výkonové zdroje“ a „Pomocné zdroje“. Na vstup 3-fázových sieťových konektorov je privedené 3-fázové sieťové napojenie 230 V striedavého napätia, v celkovo troch fázových vodičoch spolu s neutrálnym a ochranným vodičom. Toto napätie je cez trojfázový istič privedené na kontakty stykača.

Zároveň je z jedného vstupného konektora vyťahnutá jedna fáza vstupného sieťového napätia na napájanie 24 V jednosmerného zdroja, ktorý figuruje ako napájací prvok bezpečnostného obvodu. Po otočení hlavného vypínača do polohy „ON“, dochádza k pripojeniu napätia na napájacie kontakty bezpečnostného relé. Toto bezpečnostné relé vyhodnotí, či je stlačené bezpečnostné tlačidlo „E-STOP“, a podľa jeho stavu buď privedie napájacie napätie 24 V na spínacie cievky stykača, alebo ostáva bezpečnostné relé rozopnuté a zvyšok zariadenia bez elektrickej energie.

Ak je „E-STOP“ tlačidlo vymačknuté, tak môže dôjsť k zapnutiu zariadenia a to tak, že je na cievky stykačov je privedené dostatočne vysoké napätie na ich energizovanie. Po privedení napätia na cievky dochádza k prepoineniu vstupných a výstupných kontaktov stykačov a privedeniu napájacieho napätia priamo na hlavné napájacie zdroje a cez ďalšie istič aj na pomocné napájacie zdroje.



Obrázok 3.1 Bloková schéma napájacích zdrojov

3.1 Výkonové napájacie zdroje jednosmerného napätia 28 V

Jednou z hlavných požiadaviek na zariadenie PSC je schopnosť zásobovať pripojené periférie jednosmerným napätím 28 V pri maximálnom výstupnom výkone 15 000 W. Aby bola táto podmienka splnená obsahuje PSC dvojicu zdrojov od spoločnosti ITECH s produktovým číslom IT6010C-80-300 jedná sa o obojsmerné programovateľné zdroje jednosmerného napätia s obmedzeným do 80 V a 300 A. Tento zdroj je schopný pracovať v dvoch kvadrantoch ampér-voltovej charakteristiky a podľa potreby sa dokáže správať aj ako záťaž a energiu spotrebovať.

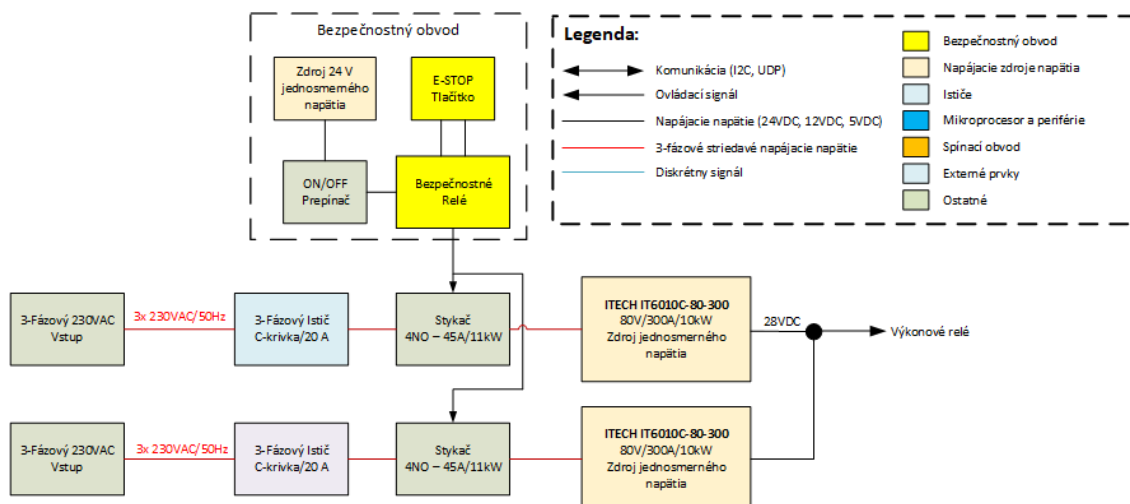
Ďalšou výhodou je schopnosť paralelného zapojenia viacerých zdrojov rovnakej produktovej rady. Za príplatok je možné doobjednať modul, ktorý balancuje paralelne zapojené zdroje, aby boli rovnako prúdovo zaťažené. Takýmto spôsobom je možné dosiahnuť napätie až 2250 V a výstupný výkon 1.152 MW.

Zdroj IT6010C-80-300 obsahuje nasledujúce funkcie:

- Maximálne výstupné napätie: 80 V
- Maximálny výstupný prúd: 300 A
- Maximálny výstupný výkon: 10 kW
- Ochranné funkcie proti predpätiu, vysokému prúdu, vysokému výkonu a proti prehriatiu zdroja
- Obojsmerný transfer výkonu a vysokorychlostné prepínanie medzi zdrojom a záťažou
- Programovateľnosť zdroja cez komunikačné rozhrania: USB, CAN, LAN, RS232, analóg a digital I/O
- Zabudovaný generátor funkcií a generátor arbitrárnych priebehov [16]

Značka zdrojov ITECH bola vybraná na základe splnenia všetkých požadovaných parametrov, dostupnosti zdroja do 12 týždňov od zadania objednávky, priaznivej ceny zdroja a v neposlednom rade aj vďaka predošlým dobrým skúsenostiam so zdrojmi produktovej rady IT6000.

Zdroje sú napájané 3-fázovým sieťovým napätím 400 V z 32 A sieťovej zásuvky. Každý zdroj má prívod z vlastnej 32 A zásuvky a je chránený 20 A ističom s priebehom C-krivky. Istič s krivkou typu C bol zvolený, aby nedochádzalo k vypínaniu ističa spôsobeného prúdovými špičkami pri štarte zariadenia. Zapojenie zdrojov do siete je zobrazené na základnej blokovej schéme na obrázku 2.1, v bloku označenom ako „Vstupný napájací obvod“. Na obrázku 3.2 je zase blokovo schéma zobrazujúce iba zapojenie napájacích zdrojov jednosmerného napätia 28 V, ich ochrana a priestor pre zapojenie 32 A sieťového konektora.



Obrázok 3.2 Bloková schéma napájania výkonových zdrojov jednosmerného napätia 28 V

3.2 Výkonový napájací zdroj jednosmerného napätia 5 V

Jeden z požiadaviek na zariadenie, popísaných v úvode práce, je 5 V výstup pre napájanie podsvietenia prístrojov leteckej avioniky. Tento zdroj je odlišný od pomocného zdroja 5V napájajúceho interné komponenty PSC a patrí do časti „Výkonové zdroje“ na obrázku 2.1 a 3.1. Jeho výstup musí mať maximálny výstupný prúd 10 A pri jednosmernom napätí 5 V. Vzhľadom na cenu, možnosť montáže a výstupné charakteristiky bol vybraný zdroj s produktovým číslom WDR-60-5 od spoločnosti Meanwell. Jedná sa o spínaný menič striedavého napätia na jednosmerné napätie v topológii zapojenia „flyback“.

Niektoré charakteristiky zdroja WDR-60-5:

- Vstup (nominálny): 180 – 550 VAC, 47-63 Hz
- Vstupný prúd: 0.7 A pri 230 VAC
- Výstup: 5 – 6 V
- Max. zvlnenie a šum: 100 mV_{P-P}
- Operačný teplotný rozsah: -25°C až 70°C
- Účinnosť (typ.): 83.5%
- Montáž na DIN lištu [17]

Podobne ako pri výkonovom zdroji 28 V je aj jednosmerné napätie 5 V, privádzané cez výkonové relé pevnej fázy na výstupné konektory zariadenia PSC. Týchto výstupov je však podstatne menší počet a aby nedošlo k zámene 28 V výstupu za 5 V výstup, sú 5 V výstupy z tohto zdroja privádzané na iný druh aj typ konektoru.

3.3 Pomocné zdroje jednosmerného napätia

Zariadenie obsahuje aj pomocné zdroje jednosmerného napätia potrebné na správnu

funkciu riadiaceho, spínacieho a bezpečnostného obvodu. V blokovej schéme PSC na obrázku 2.1 tieto zdroje nájdeme v prerušovanom obdĺžniku s názvom „Pomocné zdroje“. V blokovej schéme sú zobrazené aj prepojenia na ostatné bloky zariadenia, aby bola lepšie viditeľná nadväznosť jednotlivých blokov.

3.3.1 Pomocný zdroj jednosmerného napätia 12 V

Jednosmerné napätie 12 V je v zariadení používané na napájanie ventilátorov, vnútorného osvetlenia, ovládacieho obvodu a na napájanie spínacieho obvodu s výkonovými relé pevného stavu. Ovládací obvod je bližšie popísaný v kapitole 4 a spínací obvod v kapitole 4.3.1.

Jedná sa o menič striedavého napätia na jednosmerné napätie a na vstupe zdroja vyžaduje sieťové striedavé napätie 110-240 V pri frekvencií 50-60 Hz. Konkrétne sa jedná o zdroj s produktovým číslom TPC 120-112 od výrobcu TRACO Power. Plastový obal zdroja je prispôsobený montáži na DIN lištu. Výstupná charakteristika zdroja je jednosmerné napätie 12 V s možnosťou variácie napätia pomocou potenciometra od 12 V do 15 V. Maximálny výstupný výkon je 96 W a maximálny výstupný prúd až 8.0 A.

Niektoré charakteristiky zdroja TPC 120-112:

- Vstup (nominálny): 110 – 240 V, 50-60 Hz
- Výstup: 12 – 15 V
- Max. zvlnenie a šum: 100 mV_{P-P}
- Operačný teplotný rozsah: -25°C až 70°C
- Účinnosť: 87%
- Obmedzenie výstupného prúdu na <200% nominálnej hodnoty
- Montáž na DIN lištu [18]

Pri maximálnom výstupnom výkone 96 W a účinnosti 87%, získanej z technického listu, môžeme očakávať maximálny činný výkon na vstupe 110.3 W. A teda pri maximálnom zaťažení je stratový výkon zdroja 14.3 W.

3.3.2 Pomocný zdroj jednosmerného napätia 5 V

Jednosmerné napätie 5 V je v zariadení používané na napájanie integrovaných obvodov podporujúcich iba napätie do 5.5 V. Z toho dôvodu bol do zariadenia pridaný DC/DC menič s možnosťou inštalácie na DIN lištu. Vstup zdroja je napájaný výstupom zdroja TPC 120-112 popísaného v kapitole 3.3.1. Tento zdroj jednosmerného napätia 5 V sa líši od zdroja popísaného v kapitole 3.2. Zdroje sú oddelené nakoľko jeden z požiadaviek na zariadenie, popísaných v úvode práce, je 5 V výstup pre napájanie podsvietenia prístrojov leteckej avioniky.

Konkrétne sa jedná o zdroj s produktovým označením DDR-60G-5 od výrobcu Meanwell. Niektoré charakteristiky zdroja DDR-60G-5:

- Vstup (nominálny): 9 - 36 VDC
- Výstupný prúd (rozsah): 0 – 10.8 A

- Výstupné napätie: 4.5 – 5.5 V
- Max. zvlnenie a šum: 60 mV_{P-P}
- Operačný teplotný rozsah: -40°C až 85°C
- Účinnosť (typ.): 87.5%
- Montáž na DIN lištu [19]

4. OVLÁDACÍ OBVOD

Funkcia ovládacieho obvodu v zariadení PSC je prijímanie príkazov z externého počítača prichádzajúcich po Ethernetovom protokole UDP, ich následná interpretácia a komunikácia so zvyškom zariadenia cez zbernicu I²C, digitálne vstupy/výstupy a analógové vstupy.

Po obdržaní príkazu z externého počítača po Ethernetovom protokole UDP, dochádza k preloženiu správy a vyhodnotenia, na ktoré výkonové výstupy zariadenia PSC má byť privedené napájacie napätie buď 28 V alebo 5 V jednosmerného napätia. Po interpretácii správy, je na príslušný expandér digitálnych vstupov/výstupov vyslaná správa po komunikácii I²C. Expandér digitálnych vstupov/výstupov po obdržaní a preložení správy privádza jeho napájacie napätie na príslušný výstup expandéru.

Obdržanie a preloženie správy v komunikácii I²C a následná akcia, plynúca z úplne pôvodného príkazu obdržaného po komunikácii UDP, má za následok privedenie napätia na príslušný výstup zariadenia, a spadá pod funkciu spínacieho a výkonového obvodu, ktoré sú detailnejšie popísané v kapitole 4.3.1.

Ovládací obvod má aj funkciu monitorovania teploty v jednotlivých kabinetových krabiciach označovaných v zariadení PSC ako „SSR Box“, v ktorých je uložený spínací obvod pre vzdialené ovládanie spolu s výkonovými spínacími prvkami (relé pevného stavu). Teplomer uložený v každej krabici posiela veľkosť teploty do analógového vstupu mikrokontroléra. Mikrokontrolér porovnáva, či hodnoty veľkosti teploty spĺňajú vopred stanovené limity. Ak teplota v SSR Boxe vzrastie nad hraničnú teplotu, dochádza k zapnutiu ventilátorov, ktoré sú taktiež súčasťou SSR Boxu. Každý SSR Box obsahuje celkovo 2 ventilátory. Popis a realizácia krabíc (SSR Box), v ktorých sú uložené výkonové spínacie prvky, spínací obvod pre vzdialené ovládanie a ventilátory sú popísané v kapitole 4.3.1.

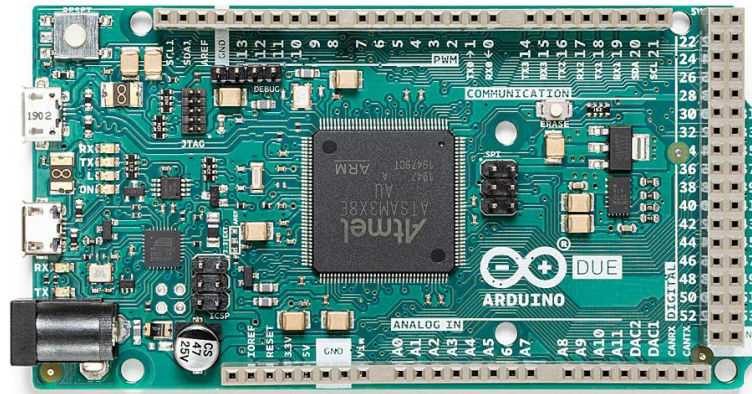
V nasledujúcich podkapitolách je popísaný výber jednotlivých súčiastok, ktoré spolu tvoria riadiaci obvod zariadenia a elektrický návrh tohto obvodu. Zariadenie má byť schopné spínať minimum 80 napájacích kanálov a komunikácie cez UDP Ethernetový protokol.

4.1 Mikrokontrolér

Ako riadiaci obvod bol zvolený 32-bitový mikrokontrolér Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU zainkorporovaný do platformy Arduino. Konkrétne sa jedná o produkt označovaný ako Arduino DUE. Tento mikrokontrolér obsahuje nasledujúce funkcie:

- 54 Digitálnych vstupov/výstupov – 12 z nich je schopných modulácie šírky pulzu
- 12 Analógových vstupov – 2 z nich majú schopnosť DAC – konverzia digitálnej logiky na analógovú

- Komunikácie: CAN, UART, I₂C, SPI
- 96 kB SRAM a 512 kB pamäť
- Rýchlosť hodín 84 MHz
- Veľkosť 53.3x101.5 mm [14]



Obrázok 4.1 Vývojová doska Arduino DUE [14]

Platforma Arduino bola zvolená kvôli jednoduchosti používania. Nie je nutné vytvoriť vlastnú dosku plošného spoja, ktorá by obsahovala všetky potrebné komponenty na správnu funkciu procesora. Zároveň pri výrobe jedného kusa vlastnej DPS, by nebola možnosť dosiahnuť tak nízku cenu pri akej sa komerčne predáva práve procesor Atmel pod platformou Arduino DUE. A to do výslednej ceny nerátame osobo-hodiny nutné na vytvorenie vlastného dizajnu a výrobu vlastnej DPS. Na vytvorenie programu v jazyku C/C++ je dostupný program Arduino IDE, ktorý obsahuje aj funkciu na kompiláciu a nahranie firmware cez USB sériovú linku.

Z týchto vyššie menovaných dôvodov bolo zvolené hotové, komerčne dostupné riešenie pred vytvorením vlastného riešenia, ktoré by s veľkou pravdepodobnosťou obsahovalo rovnaký mikrokontrolér Atmel SAM3X8E.

4.2 Wiznet W5500 Internetový kontrolér

Keďže jednou s požiadaviek na zariadenie je schopnosť komunikácie cez TCP/IP UDP protokol, je nami vybraný mikrokontrolér Atmel SAM3X8E doplnený o integrovaný obvod W5500 od spoločnosti WIZnet. Tento integrovaný obvod obsahuje nasledujúce funkcie:

- Podpora TCP/IP protokolov: TCP, UDP, ICMP, Ipv4, ARP, IGMP, PPPoE
- Podpora 8 nezávislých zásuviek
- Podpora vysokorýchlostnej komunikácie SPI
- Vnútna pamäť 32 kB pre vyrovnávaciu pamäť
- Podpora 10 a 100 MB Ethernet komunikácie

- Napájanie 3.3 V s podporou 5 V digitálnej TTL logiky [15]

Ako aj pri mikrokontroléri bolo zvolené ihneď dostupné hotové komerčné riešenie v podobe vývojovej súpravy kompatibilnej s platformou Arduino. Rozteč vývodov presne sedí s vývojovými doskami Arduino a s procesormi ARM. Integrovaný obvod W5500 s mikrokontrolérom komunikuje pomocou komunikácie SPI (Serial Peripheral Interface). Ďalší z dôvodov prečo bolo vybrané práve toto riešenie, sú už predchádzajúce skúsenosti s čipom W5500 a teda aj kratší čas potrebný na integráciu integrovaného obvodu do zariadenia.



Obrázok 4.2 Vývojová doska WIZnet W5500 Ethernet Shield [15]

4.3 DPS pre ovládací obvod

Pre ovládací obvod bola vytvorená DPS pre integráciu väčšiny komponentov spadajúcich pod ovládací obvod. Nakoľko má mikrokontrolér Atmel v produkte Arduino DUE ako výstupný konektor s rastrom 2.54 mm, ktoré nie sú vhodné na vytvorenie kvalitnej kabeláže, slúži táto DPS aj pre spojenie komponentov ovládacieho obvodu s konektorom.

Ako výstupný konektor dosky bol zvolený konektor z konektorovej rodiny D-SUB (celým menom v anglickej terminológii označovaný ako D-subminiature). Konkrétne sa jedná o D-SUB konektor s vysokou hustotou, s 15 vývodmi a veľkosťou konektoru „DE“. Tento konektor sa celkovo na DPS nachádza 4-krát a to z toho dôvodu, že každý spínací obvod má vlastný ovládací kábel. Tento prístup významne zjednodušil výrobu internej kabeláže zariadenia a zároveň umožnil modulárne zapojenie zariadenia, kde je možné meniť počet spínacích kanálov podľa toho koľko spínacích obvodov je do ovládacieho obvodu zapojených. Modulárny prístup ku kabeláži má pozitívny vplyv na servis, rýchlosť demontáže a prípadné rozšírenie. V prípade zariadenia, ktoré je predmetom tejto práce, sú do ovládacieho obvodu zapojené 3 spínacie obvody (s

možnosťou rozšírenia na 4), z ktorých každý obvod je schopný spínať až 32 výkonových kanálov. Celkovo teda zariadenie dokáže nezávisle ovládať až 96 výkonových kanálov.

DPS, ktorej schéma sa nachádza v prílohe A.1 a A.2 tejto práce, obsahuje jednoriadkové konektory (J7 až J14) s rastrom 2.54 mm, na pripojenie mikrokontroléru Arduino DUE (kapitola 4.1) spolu s Ethernetovým kontrolérom Wiznet 5500 (kapitola 4.2). Ďalej obsahuje štyri rezistory R1, R2, R3 a R4 s hodnotou 887 Ω , na konverziu prúdu na napät'ové hodnoty, ktoré sú paralelne pripojené na analógové vstupy mikrokontroléra. Digitálne výstupy mikrokontroléra, ovládajúce zapínanie ventilátorov v jednotlivých SSR Boxoch sú priamo pripojené na príslušné výstupné konektory J3, J4, J5 a J6. Funkcia obvodu na monitorovanie teploty, ktorého súčasťou sú aj tieto rezistory, je popísaná v kapitole 5.3.1.

Signál „RELAY_REMOTE“ ako aj signál „START_STOP“ sú privedené cez konektor J1 a napät'ové regulátory (príloha A.2) až na digitálne vstupy mikrokontroléru. Nakoľko je prepínanie režimu nezávislé od funkcie mikrokontroléra, je mikrokontroléra poskytnutá informácia o režime zariadenia v podobe signálu „RELAY_REMOTE“.

Signál „START_STOP“ má v tejto verzii DPS pre ovládací obvod iba informačnú funkciu. Mikrokontrolér na základe tejto informácie nevykonáva žiadnu činnosť, ktorá by ovplyvnila režim lokálneho ovládania zariadenia PSC. V prípade, že je zariadenie v režime vzdialeného ovládania musia byť oba signály „START_STOP“ a „RELAY_REMOTE“ v stave logickej 1, aby dochádzalo ku komunikácii mikrokontroléra a expandérov digitálnych vstupov/výstupov cez I²C zbernicu.

Na DPS je osadené aj elektromechanické relé, určujúce režim operácie (lokálne a vzdialené ovládanie výstupov zariadenia PSC), ktorého výstupy sú pripojené na konektor J1. Ovládací signál je na DPS privedený cez konektor J1 z panelu užívateľského ovládacieho rozhrania a na schéme je tento signál označený ako „RELAY_REMOTE“. Podľa stavu signálu „RELAY_REMOTE“ je napätie 12 V z pomocného zdroja privádzané buď na elektródu „S“ P-kanálových MOSFET tranzistorov v prípade režimu vzdialeného ovládania alebo na kontakty tlačidiel umiestnených na paneli užívateľského ovládacieho rozhrania v prípade režimu lokálneho ovládania. Tento signál pomocou sústavy bipolárneho tranzistoru typu NPN a tranzistoru MOSFET s kanálom typu P, privádza na cievku elektromechanického relé jednosmerné napájacie napätie 12 V z kontaktu číslo 2 konektoru J2.

Kontakt „NC“ elektromechanického relé je vodičom pripojený na panel užívateľského ovládacieho rozhrania (popísaný v kapitole 5.2.1) a teda ak je cievka relé demagnetizovaná, nachádza sa zariadenie v režime lokálneho ovládania a je možné ovládať jednotlivé výkonové kanály pomocou tlačidiel na paneli užívateľského ovládacieho rozhrania. Po magnetizácii cievky relé sa zariadenie prepína do režimu vzdialeného ovládania a je možné ho ovládať pomocou externe pripojeného počítača. Kontakt „NO“ elektromagnetického relé je pripojený na MOSFET tranzistory spínacieho obvodu pre vzdialené ovládanie.

Konektor J2 s celkovo 4 kontaktami slúži na pripojenie jednosmerných napätí 12 V a 5 V z pomocných zdrojov, popísaných v kapitole 3.3. Okrem napájacích napätí je na tento konektor pripojená aj uzemnenie jednosmerného napätia.

4.3.1 DPS Ovládacieho obvodu revízia A

Zo schémy DPS popísanej v predchádzajúcej kapitole, bol vytvorený motív, ktorý je súčasťou prílohy A časti A.3 a A.4 tejto diplomovej práce. Vďaka jednoduchosti zapojenia, bolo možné vytvoriť dvojvrstvovú DPS, čo má hneď niekoľko výhod. Jednoduchší výrobný proces, nižšiu cenu, možnosť výroby DPS u dodávateľa v pool servise a kratší čas nutný na vytvorenie motívu DPS. Na obrázkoch v prílohe A časť A.3 a A.4 je zobrazený návrh motívu dvojvrstvovej DPS pre ovládací obvod.

Celkovo boli vytvorené dve triedy vodivých medených prepojení, líšiac sa šírkou vodičov a veľkosťov prekovov, na základe toho či sa jedná o nízko-prúdový signálový spoj alebo napájací spoj:

1. Signálové prepojenia ($I < 0.02 \text{ A}$)
 - a. Šírka: 0.2 mm
 - b. Min. medzera medzi vodičmi: 0.1 mm
 - c. Šírka prekovu: 0.5 mm
 - d. Veľkosť diery prekovu: 0.25 mm
2. Výkonové prepojenia ($I < 0.5 \text{ A}$)
 - a. Šírka: 0.25 mm
 - b. Min. medzera medzi vodičmi: 0.1 mm
 - c. Šírka prekovu: 0.8 mm
 - d. Veľkosť diery prekovu: 0.4

DPS je určená na výrobu so zelenou maskou, bielou servisnou potlačou a povrchovou úpravou metódou ENIG. Jedná sa o dvojvrstvovú povrchovú úpravu, skladajúcu sa z tenkej vrstvy zlata nanesej na vrstvu niklu. Za použitia chemickej reakcie je na odkryté medené plôšky aplikovaná vrstva niklu. Následne je na túto vrstvu niklu nanesená tenká vrstva zlata imersnou metódou. Táto vrstva zlata má za úlohu chrániť vrstvu niklu počas prepravy a skladovania DPS. Ďalšiou výhodou tejto povrchovej úpravy je uniformnosť a rovnosť povrchu, čo priaznivo vplýva na povrchovú montáž SMD súčiastok. [21]

Parametre pre výrobu DPS:

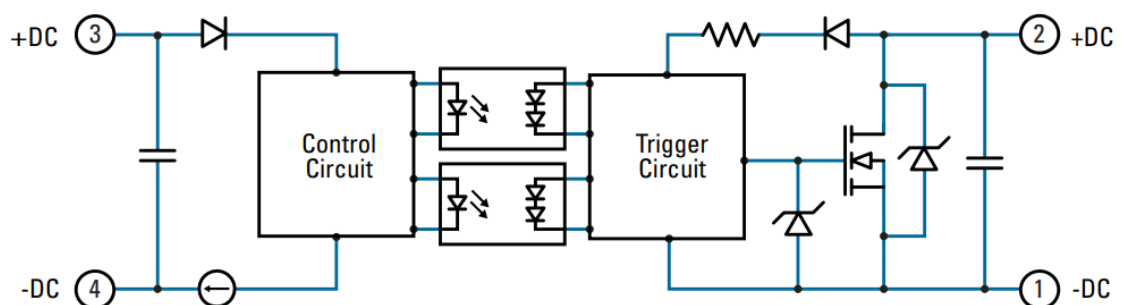
- a. Základný materiál DPS: FR-4
- b. Výška medi: 18 μm
- c. Výška DPS: 1.6 mm
- d. Počet vrstiev: 2
- e. Rozmery :135.6 x 76.2
- f. Povrchová úprava: ENIG
- g. Farba masky: Zelená
- h. Servisná potlač: Biela

5. VÝKONOVÉ SPÍNACIE PRVKY A ICH OVLÁDANIE

Hlavná funkcia zariadenia PSC spočíva v prívode elektrickej energie na užívateľom zvolený výstupný kanál. PSC obsahuje celkovo 96 výkonových kanálov (výstupov), z ktorých každý kanál je samostatne ovládateľný buď pomocou tlačidiel osadených na zariadení alebo pomocou externého počítača prepojeného so zariadením PSC cez Ethernet protokol. Táto kapitola sa venuje jednotlivým častiam zariadenia označených v základnej blokovej schéme na obrázku 2.1 ako „Výkonové spínacie prvky“, „Ovládací obvod pre vzdialené ovládanie“ a „Užívateľské ovládacie rozhranie“.

5.1 Výkonové spínacie prvky

Ako hlavný výkonový spínací prvok bolo vybrané relé pevného stavu od výrobcu CRYDOM s produktovým číslom D1D20. Jedná sa o industriálne relé pevného stavu (v anglickej terminológii označované ako „Solid State Relay“, alebo skratkou „SSR“), kde výstupné kontakty prepája tranzistor typu MOSFET, čo priaznivo vplýva na odpor medzi výstupnými kontaktami počas zapnutého stavu. Nakoľko tento druh relé neobsahuje pohyblivé časti, nazýva sa relé pevného stavu. K vodivému spojeniu výstupných kontaktov nedochádza mechanickým pohybom vnútorného kontaktu, ale vytvorením vodivej cesty medzi kontaktami tranzistoru. Na obrázku 5.1 je bloková schéma zobrazujúca hlavné časti vnútorného zapojenia relé D1D20.



Obrázok 5.1 Blokový diagram vnútorného zapojenia relé pevného stavu D1D20 [22]

Tabuľka 5.1 popisuje vstupné charakteristiky súčiastky D1D20. Na to, aby boli výstupné kontakty vodivo spojené, je nutné na vstup priviesť jednosmerné ovládacie napätie prevyšujúce 3.5 V. Aby nedošlo k poškodeniu vstupného obvodu by toto napätie zároveň nemalo prevyšovať 32 V. Prúdový odber vstupného obvodu je v rozsahu od 10 až do 15 mA.

Tabuľka	5.1	Vybrané vstupné parametre súčiastky D1D20 pri teplote okolia $\vartheta_C = 25^\circ\text{C}$ [22]
Popis	Hodnoty	Jednotky
Ovládacie napätie	3.5 až 32	V
Maximálne napätie pre vypnutý stav	1	V
Minimálny vstupný prúd	10	mA
Maximálny vstupný prúd	15	mA
Maximálny zapínací čas	100	μs
Maximálny vypínací čas	100	μs

Tabuľka 5.2 uvádza výstupné charakteristiky. Súčiastka je schopná na výstupných kontaktoch pracovať s jednosmerným napätím v rozsahu 1 až 72 V. Maximálny prúd cez výstupné kontakty je 20 A. Na základe týchto výstupných parametrov, môžeme tvrdiť že nami vybraná spínacia súčiastka splňuje všetky požadované parametre popísané v úvode práce.

Tabuľka	5.2	Vybrané výstupné parametre súčiastky D1D20 pri teplote okolia $\vartheta_C = 25^\circ\text{C}$ [22]
Popis	Hodnoty	Jednotky
Odporúčané výstupné napätie	1 až 72	V
Maximálne výstupné napätie	100	V
Zvodový prúd vo vypnutom stave	0.3	mA
Maximálny výstupný prúd	20	A
Maximálna prúdová špička (10 ms)	42	A
Maximálny odpor v zapnutom stave	0.039	Ω
Maximálny úbytok napätia v zapnutom stave	0.8	V

Medzi výhody tejto výkonovej spínacej súčiastky patria vysoký rozsah výstupného napätia, nízky elektrický odpor medzi výstupnými kontaktami a tým aj nízky úbytok napätia, rýchle spojenie výstupných kontaktov po privedení ovládacieho napätia a možnosť montáže na dosku plošného spoja. Nevýhodou tejto súčiastky je však vysoká cena v porovnaní s elektromechanickým relé, ktoré by v tomto prípade tiež mohlo byť použité ako výkonový spínací prvok.

5.1.1 DPS pre zapojenie relé pevného stavu revízia A

Súčiastka D1D20, popísaná v kapitole 5.1, má možnosť montáže na DPS. Kontakty tejto súčiastky sú prispôbené na pripojenie vodiča pomocou káblového oka a skrutky (obrázok 5.2a). Namiesto skrutky je do tohto kontaktu možné namontovať závitové kolíky, tým sa spraví odstup kontaktu od tela súčiastky a na tieto kolíky je možné osadiť DPS a pripevniť ju skrutkami. Nami vytvorená DPS zjednodušuje prepájanie relé

pevného stavu s ostatnými časťami zariadenia PSC.

Z dôvodu zjednodušenia montáže vstupných a výstupných vodičov bola vytvorená DPS, na ktorej dochádza k prepojeniu týchto relé pevného stavu na kontakty svorkovnice (obrázok 5.2b) a zároveň aj k prepojeniu DPS spínacieho obvodu pre vzdialené ovládanie (kapitola 5.3 a 5.3.1). Vybraná svorkovnica je od výrobcu Phoenix Contact a má produktové číslo LPTA 2,5/8-5,0. Táto svorkovnica má 8 kontaktov, prúdové zaťaženie kontaktu do 24 A a vývody svorkovnice sú prispôbené osadeniu na DPS. [24]



a)



b)

Obrázok 5.2 DPS pre výkonové spínacie prvky: a) Vonkajší obal súčiastky D1D20 [23], b) Svorkovnica LPTA 2,5/8-5,0 [24]

Schéma tejto prepojovacej DPS je súčasťou prílohy B časť B.1 a motív DPS vychádzajúci zo schémy je súčasťou prílohy B časť B.2 a B.3 tejto diplomovej práce. Každá DPS obsahuje priestor pre celkovo 16 súčiastok D1D20, dve vstupné svorkovnice (J3 a J4) pre vodiče prenášajúce jednosmerné napätie 28 V z výkonového zdroja (kapitola 3.1), dve výstupné svorkovnice (J1 a J2) pre vodiče spájajúce výstupné kontakty relé pevného stavu a výstupné konektory zariadenia PSC a dva konektory (J5 a J6) pre pripojenie DPS spínacieho obvodu pre vzdialené ovládanie.

Aby bola vyrobená doska schopná preniesť prúdy do veľkosti 20 A, je nutné aby mali výkonové vodivé cesty nízky odpor. Ak by boli vodivé cesty príliš tenké alebo výška medi na DPS príliš nízka, mohlo by dôjsť k zahrievaniu vodivej cesty, jej následnému prerušeniu a v neposlednom rade k defektu na DPS. Aby sme tomuto defektu predošli, musí byť vypočítaná správna šírka medenej cesty pri konštantnej výške medi na základovom materiály DPS. Rovnice pre výpočet šírky vodivej cesty su uvedené rovnicami 5.1 a 5.2.

Na začiatku bola zvolená výška medi. Výška 170 μm bola zvolená ako kompromis vzhľadom na rozmery DPS, šírku výkonových ciest, hustotu komponentov, maximálny prúd a maximálny strátový výkon na každej ceste. Priemyselný štandard IPC-2221 od

asociácie IPC, združujúcej výrobcov elektronických zariadení, udáva na výpočet šírky vodivej cesty nasledujúce rovnice,

$$A = \left(\frac{I}{k \cdot T_{Rise}^b} \right)^{\frac{1}{c}}, \quad (5.1)$$

$$W = \frac{A}{h \cdot 1.3780'}, \quad (5.2)$$

kde I je prúd v ampéroch prechádzajúci cestou, T_{Rise} je tepelný rast teploty vodivej cesty v stupňoch Celzia, A je plocha vodivej cesty v jednotkách oz/ft², W je šírka cesty v jednotkách mils (1 mils je tisícina palca) a k , b a c sú konštanty pochádzajúce zo štandardu IPC-2221. Nakoľko je asociácia IPC pôvodom zo Spojených štátov amerických, sú jednotky použité v rovniciach 5.1 a 5.2 z imperiálneho systému a. [25]

Po dosadení parametrov do rovníc 5.1 a 5.2, bola zvolená šírka jednotlivých vodivých ciest. Celkovo boli vytvorené dve triedy vodivých medených prepojení, líšiace sa šírkou vodičov a veľkosťov prekovov, na základe toho či sa jedná o nízko-prúdový signálový spoj alebo napájací spoj:

1. Signálové prepojenia ($I < 0.02$ A)
 - a. Šírka: 0.2 mm
 - b. Min. medzera medzi vodičmi: 0.3 mm
 - c. Šírka prekovu: 0.9 mm
 - d. Veľkosť diery prekovu: 0.45 mm
2. Výkonové prepojenia ($I \leq 20$ A)
 - a. Šírka: 4.1 mm
 - b. Min. medzera medzi vodičmi: 0.3 mm
 - c. Šírka prekovu: 7.62 mm
 - d. Veľkosť diery prekovu: 3.05 mm

Parametre pre výrobu DPS:

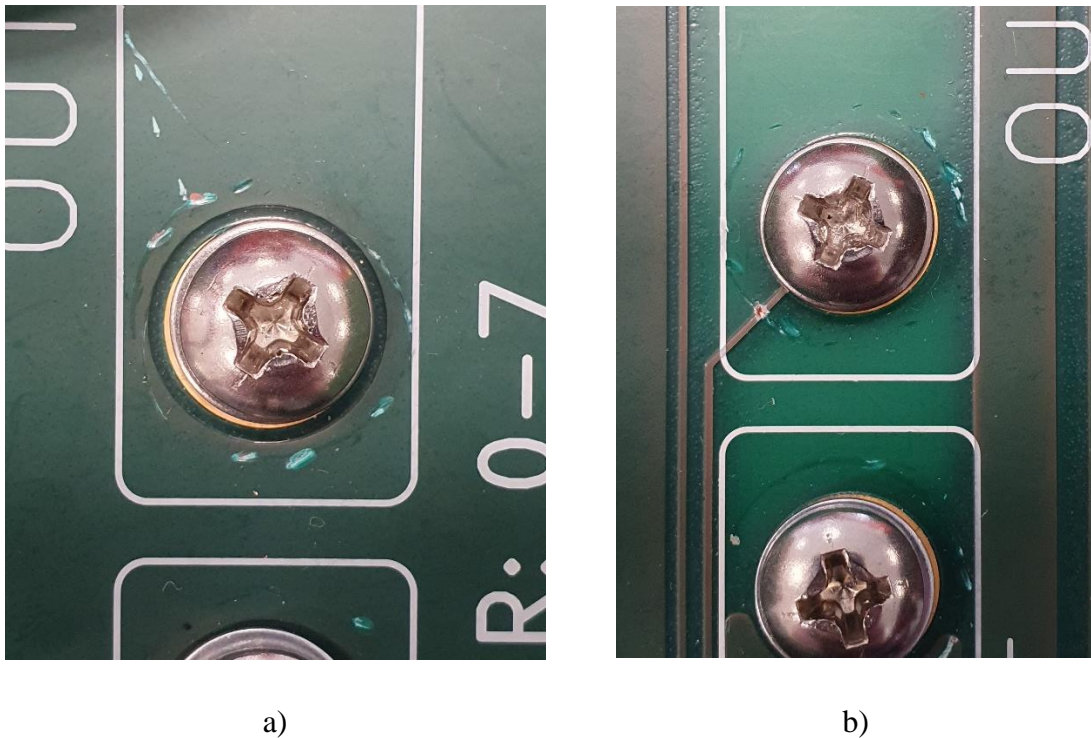
- a. Základný materiál DPS: FR-4
- b. Celková výška medi: 170 μ m
- c. Výška DPS: 1.6 mm
- d. Počet vrstiev: 2
- e. Rozmery: 378.5 x 168.9 mm
- f. Povrchová úprava: ENIG
- g. Farba masky: Zelená
- h. Servisná potlač: Biela

5.1.1.1 Chyby DPS revízie A

Po odskúšaní DPS revízie A, bola odhalená chyba s priamym dopadom na funkciu zariadenia. Po osadení DPS šestnástimi kusami relé pevného stavu a pripojení na zvyšok zariadenia PSC, bol jeden výkonový kanál permanentne zapnutý. Po odobratí DPS zo

zariadenia a investigácií príčiny chyby, bolo zistené že na DPS sa nachádzajú skraty medzi prepojeniami, ktoré nemajú byť spojené ako aj skraty medzi spínacími signálmi relé a uzemnením jednosmerného napätia zariadenia.

Skrutky s podložkami, použité na prepojenie púzdra relé pevného stavu D1D20, poškrabali nepájivú masku DPS a podložky svojim vodivým telom zapríčinili skraty na DPS, ktoré mali fatálny dopad na funkciu niektorých spínacích kanálov. Na obrázku 5.3 je zobrazená poškodená nepájivá maska DPS.



Obrázok 5.3 Chyby DPS: a) Poškodená maska nad uzemnením, b) Poškodená maska a vodivá cesta

Chyba bola odstránená použitím iných podložiek, ktoré nemajú ostré hrany a teda nemôžu poškrabať masku DPS a vytvorením druhej revízie DPS, kde došlo k odstráneniu vyliatej plochy uzemnenia z veľkej časti DPS. Druhá revízia (revízia B) DPS pre zapojenie relé pevného stavu je bližšie popísaná v ďalšej podkapitole.

5.1.2 DPS pre zapojenie relé pevného stavu revízia B

Revízia B prepojovacej DPS pre relé pevných stavov, obsahuje všetky vodivé prepojenia a vstupné a výstupné konektory ako predošlá revízia A. Odlišnosť je v odstránení vyliatej zemniacej plochy z veľkej časti DPS. Zemniaca plocha je obmedzená na región v okolí hrany DPS. Ďalej došlo k zaobleniu rohov DPS na uľahčenie montáže.

Rozmery všetkých vodivých prepojení sa zhodujú s rozmermi prepojení v revízií A. Celkovo boli vytvorené dve triedy vodivých medených prepojení, líšiac sa šírkou

vodičov a veľkosťov prekovov, na základe toho či sa jedná o nízko-prúdový signálový spoj alebo napájací spoj:

3. Signálové prepojenia ($I < 0.02 \text{ A}$)
 - a. Šírka: 0.2 mm
 - b. Min. medzera medzi vodičmi: 0.3 mm
 - c. Šírka prekovu: 0.9 mm
 - d. Veľkosť diery prekovu: 0.45 mm
4. Výkonové prepojenia ($I \leq 20 \text{ A}$)
 - a. Šírka: 4.1 mm
 - b. Min. medzera medzi vodičmi: 0.3 mm
 - c. Šírka prekovu: 7.62 mm
 - d. Veľkosť diery prekovu: 3.05 mm

Parametre pre výrobu DPS:

- i. Základný materiál DPS: FR-4
- j. Celková výška medi: 170 μm
- k. Výška DPS: 1.6 mm
- l. Počet vrstiev: 2
- m. Rozmery: 378.5 x 168.9 mm
- n. Povrchová úprava: ENIG
- o. Farba masky: Červená
- p. Servisná potlač: Biela

Schéma tejto prepojovacej DPS je súčasťou prílohy E časť E.1 a motív DPS vychádzajúci zo schémy je súčasťou prílohy E časť E.2 a 0 tejto diplomovej práce.

5.2 Spínanie výkonových spínacích prvkov

Hlavná funkcia spínacieho obvodu, či už v režime spínania pomocou tlačidiel alebo v režime vzdialeného ovládania, spočíva v privedení jednosmerného spínacieho napätia v rozsahu od 3.5 až 32 V na vstupné kontakty relé pevného stavu, ktoré slúži ako výkonový spínací prvok, starajúci sa o prepojenie výstupu výkonového zdroja a výstupných konektorov zariadenia PSC.

5.2.1 Spínanie pomocou tlačidiel

Spínanie jednotlivých výkonových kanálov je možné vykonať priamo na zariadení PSC na užívateľskom ovládacom rozhraní, ktoré je súčasťou fyzického obalu zariadenia. pre dobrú dostupnosť užívateľa je toto ovládacie rozhranie umiestnené na prednej strane zariadenia.

Panel užívateľského ovládacieho rozhrania je osadený tlačidlami s produktovým číslom 31-483.036 od výrobcu EAO. Jedná sa o tlačidlo celkovo s dvoma kontaktami, jeden kontakt je typu „NO“ (v anglickej terminológii „Normally open“, v preklade

„Normálne otvorený kontakt“) a druhý kontakt je typu „NC“ (v anglickej terminológii „Normally closed“, v preklade „Normálne zatvorený kontakt“). Rozdiel medzi týmito kontaktami je v tom, že ak nedôjde k stlačeniu tlačidla je kontakt „NO“ v stave otvoreného obvodu a kontakt „NC“ v stave uzavretého obvodu. V prípade stlačenia tlačidla je kontakt „NO“ v stave uzavretého obvodu a kontakt „NC“ v stave otvoreného obvodu. Ďalej sa jedná o aretačné tlačidlo a teda po stlačení tlačidla ostáva tlačidlo v stlačenej pozícii a nevracia sa späť do pôvodného stavu. Tlačidlo má možnosť zapojenia vymeniteľnej žiarovky alebo LED diódy (kontakty a- a b+) a je prispôbené na panelovú montáž.



Obrázok 5.4 Tlačidlo EAO 31-483.036: a) Vonkajší tvar tlačidla, b) Vnútorne zapojenie tlačidla

Na kontakt číslo 1 typu „NO“ je privedené cez elektromechanické relé ovládacieho obvodu (bližšie informácie k funkcií relé ovládacieho obvodu sú v kapitole 4.3) napätie z pomocného zdroja jednosmerného napätia 12 V. Kontakt číslo 2 typu „NO“ je privedený na vstupný obvod relé pevného stavu, bližšie popísaného v predchádzajúcej podkapitole 5.1. Po stlačení tlačidla dochádza k pripojeniu jednosmerného napätia 12 V na vstupné kontakty výkonového relé a k aktivácii jeho výstupu. Dôjde k prepojeniu výstupných kontaktov a jednosmerné napájacie napätie 28 V je pripojené na konkrétny výstupný konektor zariadenia PSC. Každý výstupný konektor (výkonový kanál) má pridelené vlastné ovládacie tlačidlo.

Výstupné napájacie napätie z relé pevného stavu sa vracia späť na príslušné ovládacie tlačidlo vo forme signálu spätnej väzby. Tento signál je na tlačidlo privedený na kontakt „b+“ určený pre zapojenie žiarovky. Po prepnutí príslušného relé pevného stavu je privedené výstupné napätie nie len na výstupný konektor zariadenia ale aj na príslušnú žiarovku ovládacieho tlačidla. Užívateľ je touto formou spätnej väzby schopný potvrdiť, že dané relé prešlo do vodivého stavu a môže na výstupe zariadenia očakávať napájacie napätie z výkonového zdroja.

5.2.2 Spínanie v režime diaľkového ovládania

Jedna z požiadaviek na zariadenie popísaných v úvode práce je schopnosť ovládať jednotlivé výkonové kanály vzdialene cez externý počítač prepojený so zariadením PSC cez UDP Ethernetový protokol. Externý počítač komunikuje s ovládacím obvodom, ktorý je bližšie popísaný v kapitole 4, na základe týchto príkazov predáva ďalej mikrokontrolér informáciu o stave jednotlivých kanálov cez zbernicu I²C na obvod pre vzdialené ovládanie relé pevného stavu.

Na ovládací obvod vzdialeného ovládania je privedené cez elektromechanické relé ovládacieho obvodu PSC (bližšie informácie k funkcií relé ovládacieho obvodu sú v kapitole 4.3) napätie z pomocného zdroja jednosmerného napätia 12 V. Toto napätie je cez tranzistory MOSFET s kanálom typu P privádzané na vstupné kontakty relé pevného stavu. Ku každému tranzistoru vedie vlastný digitálny ovládací signál, ovládaný mikrokontrolérom.

Po prijatí správy z externého počítača je po komunikácii I²C do obvodu pre vzdialené ovládanie vyslaná informácia o stave každého kanálu. Obvod pre vzdialené ovládanie ďalej distribuuje túto správu až na ovládací kontakt tranzistora MOSFET. Ak sa nachádza digitálny signál v stave logickej 1, dochádza na tranzistore k prechodu do vodivého stavu a na vstupné kontakty výkonových spínacích prvkov (relé pevného stavu) je privedené jednosmerné ovládacie napätie 12 V, ktoré spadá do rozsahu 3.5 až 32 V nutných na prepnutie relé pevného stavu do zapnutého stavu.

5.2.3 Prepínanie režimu operácie

Na paneli užívateľského ovládacieho rozhrania sa okrem tlačidiel na ovládanie jednotlivých kanálov nachádza aj tlačidlo na ovládanie režimu operácie zariadenia PSC. Po jeho stlačení dôjde k aktivácii cievky elektromechanického relé osadeného na DPS ovládacieho obvodu popísaného v kapitole 4.3. Signál z tohto tlačidla je na DPS ovládacieho obvodu označený ako „RELAY_REMOTE“.

Podľa zapojenia výstupných kontaktov elektromechanického relé ovládacieho obvodu je určený režim operácie. Ak nie je tlačidlo stlačené je napätie 12 V z „COM“ kontaktu elektromechanického relé pripojené na kontakt „NC“. Po stlačení tlačidla a energizácii cievky relé dochádza k prepnutiu kontaktov a napätie 12 V z „COM“ kontaktu elektromechanického relé je pripojené na kontakt „NO“.

5.3 Obvod pre vzdialené ovládanie

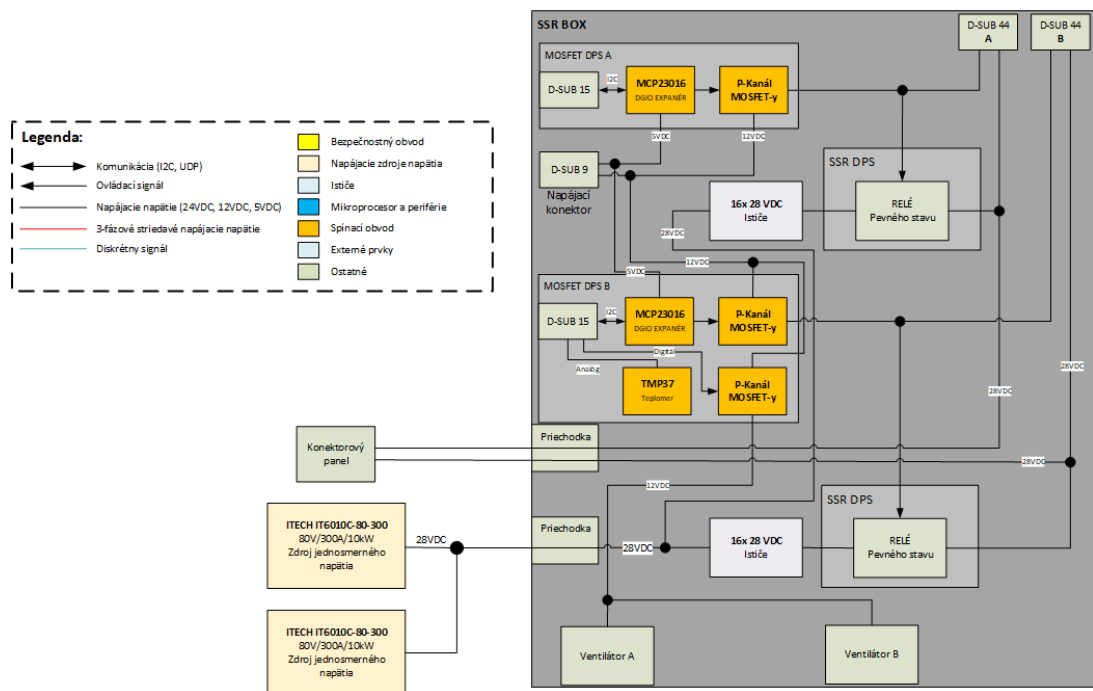
Hlavný komponent obvodu pre vzdialené ovládanie starajúci sa o privedenie ovládacieho napätia na vstupné kontakty relé pevného stavu je integrovaný obvod MCP23016 od výrobcu Microchip. Jedná sa o 16-kanálový expandér digitálnych vstupov/výstupov, ktorý je schopný komunikovať s mikroprocesorom po zbernici I²C. Tento expandér rozširuje počet digitálnych vstupov/výstupov mikrokontroléra. Výstupné kontakty expandéru MCP23016 sú pripojené na sústavu bipolárneho tranzistora typu NPN

a tranzistora MOSFET s kanálom typu P, ktoré fungujú ako elektronicky ovládaný spínač napätia na vstupné kontakty relé pevného stavu.

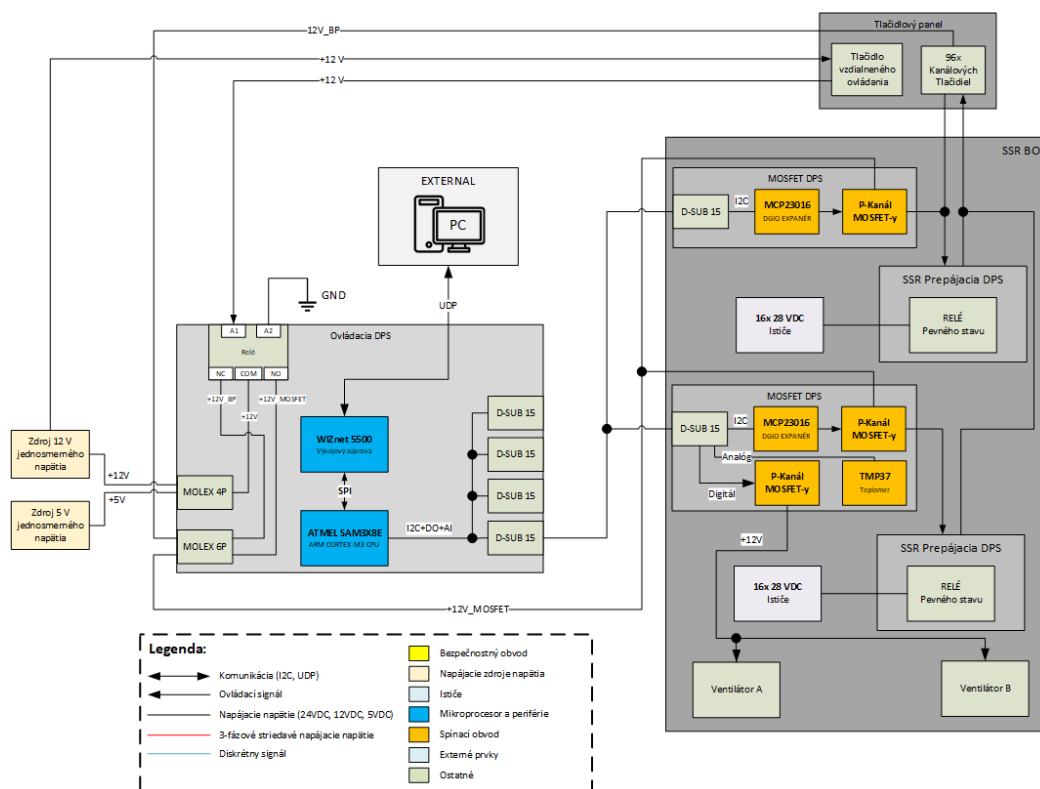
Na obrázku 5.5 je zobrazená bloková schéma prepojenia ovládacieho obvodu pre vzdialené ovládanie s výkonovými spínacími prvkami v podobe relé pevného stavu. Na DPS pre zapojenie relé pevného stavu (na obrázku 5.4 označené ako „SSR DPS“) je privedené jednosmerné napätie 28 V z výkonových zdrojov. Mikrokontrolér po obdržaní správy z externého počítača, posieľa po zbernici I²C do integrovaného obvodu MCP23016 informáciu o stave každého digitálneho výstupu. Tento integrovaný obvod po prijatí správy nastaví každý jeho digitálny výstup podľa požiadavky mikrokontroléra.

Ovládací signál sa cez sústavu tranzistorov dostáva na vstupné kontakty relé pevného stavu, ktoré buď ostáva vo vypnutom stave alebo sa prepína do zapnutého stavu a na výstupné konektory zariadenia PSC privádza požadované napájacie napätie z výkonových zdrojov.

Obrázok 5.6 ozrejmjuje prepojenie medzi ovládacím obvodom (kapitola 4), tlačidlovým panelom (kapitola 5.2.1), výkonovými spínacími prvkami (kapitola 5.1) a ovládacím obvodom pre vzdialené ovládanie. Ovládací obvod interaguje s ovládacím obvodom pre vzdialené ovládanie pomocou komunikácie I²C, digitálnych výstupov a analógových signálov určených na meranie teploty v okolí relé pevného stavu a ovládacieho obvodu pre vzdialené ovládanie.



Obrázok 5.5 Blokové schéma zapojenia ovládacieho obvodu pre vzdialené ovládanie a relé pevného stavu



Obrázok 5.6 Blokové schéma zapojenia Ovládacej DPS, spínacieho obvodu a tlačidlového panelu

5.3.1 DPS pre spínací obvod vzdialeného ovládania revízia A

Schéma DPS ovládacieho obvodu je súčasťou prílohy C časť C.1 a motív DPS vychádzajúci zo schémy je súčasťou prílohy C časť C.2 a C.3 tejto diplomovej práce.

Na schéme v prílohe C.1 môžeme vidieť integrovaný obvod MCP23016 (IC13) v zapojení podľa katalógového listu [26]. Na výstupoch obvodu sú pripojené rezistory (R27 až R42) o hodnote 4700Ω pre limitáciu bázeového prúdu bipolárnych tranzistorov (Q1 až Q16). Obvod MCP23016 je zároveň prepojený s konektorom J7, ktorý poskytuje prepojenie s mikrokontrolérom na DPS ovládacieho obvodu.

Konektory J1 a J2 slúžia na prepojenie DPS s DPS pre zapojenie relé pevného stavu. Konektor J3 je napájací konektor privádzajúci jednosmerné napätia 5 V a 12 V z pomocných zdrojov. Konektory J4 a J5 sú určené na ovládanie a zapojenie ventilátorov do DPS. Konektor J6 prepája relé pevného stavu cez DPS pre zapojenie relé pevného stavu a DPS ovládacieho obvodu pre vzdialené ovládanie s tlačidlovým panelom. Konektor J7 poskytuje prepojenie s DPS ovládacieho obvodu.

Súčasťou obvodu je aj integrovaný obvod TMP36, fungujúci ako teplomer snímajúci teplotu v okolí DPS. Integrovaný obvod cez konektor J7 posielajú informácie o teplote, v podobe prúdového analógového signálu (ktorý je na DPS ovládacieho obvodu

prevedený na napäťový signál), na analógový vstup mikrokontroléra (bližšie informácie o zapojení mikrokontroléra sú dostupné v kapitole 4). Mikrokontrolér porovná teplotu s nastaveným teplotným limitom a v prípade prekročenia tejto hranice, posiela signál na zapnutie ventilátorov. Tieto ovládacie signály ventilátorov sú označené ako „FAN_CTRL_A“ a „FAN_CTRL_B“ a pomocou sústavy tranzistorov privádzajú jednosmerné napätie 12 V na napájacie kontakty ventilátora.

Po dosadení potrebných parametrov do rovníc 5.1 a 5.2, bola zvolená šírka jednotlivých vodivých ciest. Celkovo boli vytvorené dve triedy vodivých medených prepojení, líšiace sa šírkou vodičov a veľkosťov prekovov, na základe toho či sa jedná o nízko-prúdový signálový spoj alebo napájací spoj:

5. Signálové prepojenia ($I < 0.02 \text{ A}$)
 - a. Šírka: 0.2 mm
 - b. Min. medzera medzi vodičmi: 0.2 mm
 - c. Šírka prekovu: 0.6 mm
 - d. Veľkosť diery prekovu: 0.3 mm
6. Výkonové prepojenia ($I \leq 20 \text{ A}$)
 - a. Šírka: 0.4 mm
 - b. Min. medzera medzi vodičmi: 0.2 mm
 - c. Šírka prekovu: 1.0 mm
 - d. Veľkosť diery prekovu: 0.5 mm

Parametre pre výrobu DPS:

- a. Základný materiál DPS: FR-4
- b. Celková výška medi: 18 μm
- c. Výška DPS: 1.6 mm
- d. Počet vrstiev: 2
- e. Rozmery: 53.34 x 117.85mm
- f. Povrchová úprava: ENIG
- g. Farba masky: Zelená
- h. Servisná potlač: Biela

5.3.1.1 Chyby DPS revízie A

V revízií A DPS pre spínací obvod vzdialeného ovládania nebol zapojení externý RC obvod nastavujúci rýchlosť interných hodín integrovaného obvodu Microchip MCP23016, v schéme (príloha C časť C.2 a C.3 tejto diplomovej práce) označný ako IC13. To malo za príčinu neschopnosť správnej funkcie digitálneho expandéru MCP23016.

Polovodičové tranzistory typu MOSFET v schéme DPS (príloha C časť C.2 a C.3 tejto diplomovej práce) označné ako Q20 až Q35, ktorých ulohou je prepojiť napájacie napätie 12 V na vstupné kontakty polovodičových relé pevného stavu, sa ukázali ako nevhodné na základe reverznej diódy paralelne pripojenej k tranzistoru, vznikajúcej

z inherentnej charakteristiky tranzistoru typu MSOFET. Počas používania režimu manuálneho ovládania pomocou tlačidiel, dochádzalo k napájaniu vetvy označenej ako „+12V_MOSFET“, určenej k napájaniu obvodu pre vzdialené ovládanie, vetvou „+12V_BP“, určenou k napájaniu tlačidiel v tlačidlovom paneli práve cez tieto reverzné diódy.

5.3.2 DPS pre spínací obvod vzdialeného ovládania revízia B

V revízií B bolo k integrovanému obvodu MCP23016 (IC13) zapojení externý RC článok pozostávajúci z rezistoru s hodnotou 3900Ω a kondenzátoru s hodnotou 33 pF . Tento článok umožnil správnu funkciu integrovaného obvodu MCP23016.

Polovodičové tranzistory typu MOSFET (produktové číslo SQ2303) označené ako Q20 až Q35 boli nahradené bipolárnymi tranzistormi BC847 od výrobcu ON Semiconductor.

Rozmery všetkých vodivých prepojení sa zhodujú s rozmermi prepojení v revízií A. Celkovo boli vytvorené dve triedy vodivých medených prepojení, líšiac sa šírkou vodičov a veľkosťov prekovov, na základe toho či sa jedná o nízko-prúdový signálový spoj alebo napájací spoj:

7. Signálové prepojenia ($I < 0.02 \text{ A}$)
 - a. Šírka: 0.2 mm
 - b. Min. medzera medzi vodičmi: 0.2 mm
 - c. Šírka prekovu: 0.6 mm
 - d. Veľkosť diery prekovu: 0.3 mm
8. Výkonové prepojenia ($I \leq 20 \text{ A}$)
 - a. Šírka: 0.4 mm
 - b. Min. medzera medzi vodičmi: 0.2 mm
 - c. Šírka prekovu: 1.0 mm
 - d. Veľkosť diery prekovu: 0.5 mm

Parametre pre výrobu DPS:

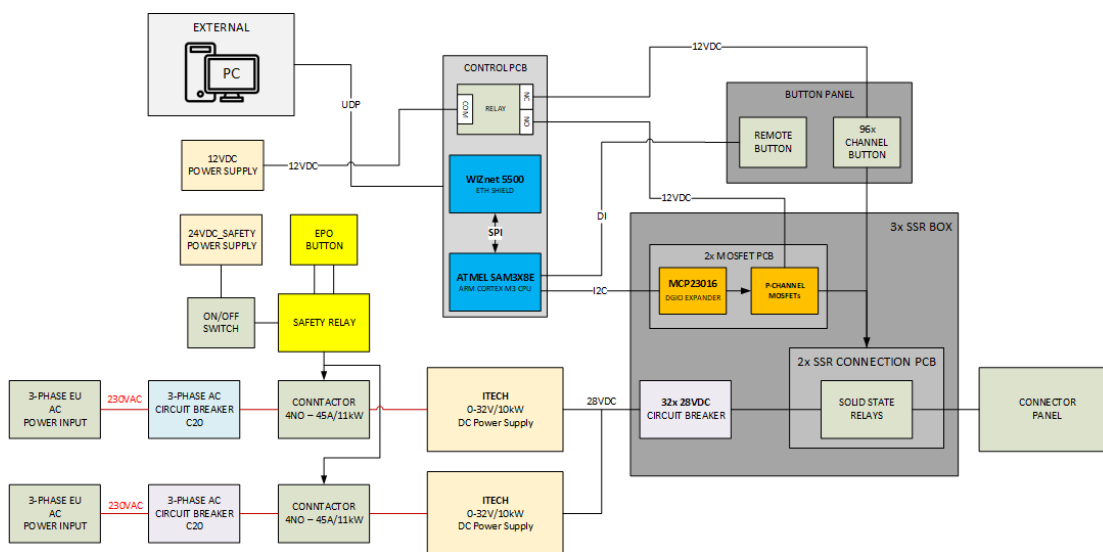
- i. Základný materiál DPS: FR-4
- j. Celková výška medi: $18 \mu\text{m}$
- k. Výška DPS: 1.6 mm
- l. Počet vrstiev: 2
- m. Rozmery: $53.34 \times 117.85 \text{ mm}$
- n. Povrchová úprava: ENIG
- o. Farba masky: Zelená
- p. Servisná potlač: Biela

Schéma tejto prepojovacej DPS je súčasťou prílohy F časť F.1 a motív DPS vychádzajúci zo schémy je súčasťou prílohy F časť F.2 a F.3 tejto diplomovej práce.

6. REALIZÁCIA ZARIADENIA

V prvej fáze vývoja po obdržaní požiadaviek na zariadenie, ktoré sú bližšie popísané v úvode práce, došlo k určeniu konkrétnych hlavných komponentov zariadenia. Bolo nutné špecifikovať parametre hlavného napájacieho zdroja, vybrať spínacie prvky, vybrať mikrokontrolér na ovládanie spínacích prvkov a komunikáciu s externým počítačom a vytvoriť prvotné systémové zapojenie.

Na obrázku 6.1. práce je zobrazená úplne prvá bloková schéma. Tento blokový diagram slúžil ako odrazový mostík počas vývoja zariadenia PSC.



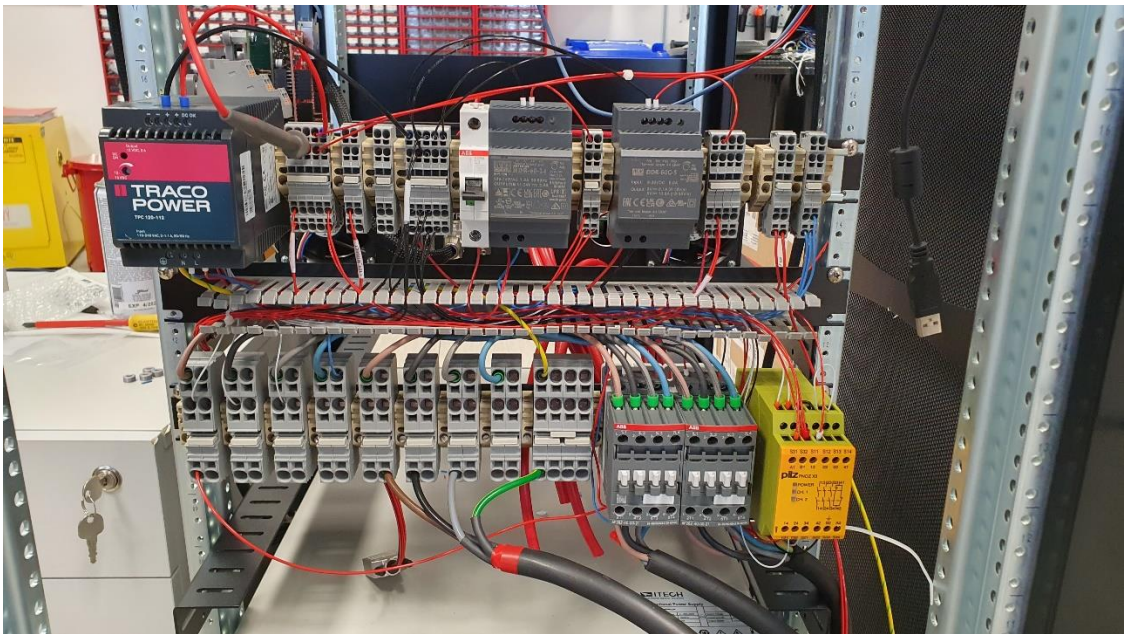
Obrázok 6.1 Prvý blokový diagram pre systémové zapojenie zariadenia PSC

Z prvotnej blokovej schémy bolo na nepájivom poli zapojený prototypový obvod obsahujúci mikrokontrolér integrovaný do platformy Arduino, expandér digitálnych kanálov MCP23016, pasívne súčiastky, polovodičové tranzistory a výkonové spínacie prvky v podobe polovodičového relé pevného stavu značky Crydom s produktovým číslom D1D20. Úlohou tohto prototypového obvodu, ktorý mal obmedzený počet kanálov na štyri, bolo overiť správnosť zapojenia a myšlienkového postupu pri vytváraní systémového zapojenia zariadenia PSC.

Po overení, že nami vytvorené systémové zapojenia sa správa podľa očakávaných predpokladov, začala práca na vytváraní jednotlivých blokov. Bolo nutné navrhnuť niekoľko jedinečných dosiek plošného spoja, skontrolovať zapojenie a zabezpečiť výrobu. Paralelne s vývojovou fázou bolo začaté zaobstarávanie jednotlivých potrebných komponentov. Zoznam všetkých zobstaných komponentov, aj spolu s tými, ktoré neboli v zariadení použité, je v prílohe K tejto diplomovej práce. Na obrázku 6.9 je možné vidieť celé dokončené zariadenie PSC.

6.1 Vstupný napájací obvod

Následne pro prebratí komponentov od dodávateľov došlo k postupnému skladaniu zariadenia do 19 palcového serverového kabinetu značky EMCOR. Prvá časť nainštalovaná do kabinetu bola časť označená v základnej blokovej schéme na obrázku 2.1 ako „vstupný napájací obvod“. Jedná sa o malý rozvádzač napätia s bezpečnostnými prvkami. Bližšia funkcia tohto obvodu je popísaná v kapitole 2. Na obrázku 6.2 je fotografická dokumentácia zo zapájania vstupného napájacieho obvodu. Komponenty do tohto obvodu boli vyberané aj na základe toho, či umožňujú montáž na DIN lištu. Montáž na DIN lištu zjednodušila montáž komponentov a terminálové bloky zjednodušili prepojenie komponentov medzi sebou samými a so zvyškom zariadenia.



Obrázok 6.2 Vstupný napájací obvod zariadenia PSC

6.2 Realizácia spínacieho obvodu

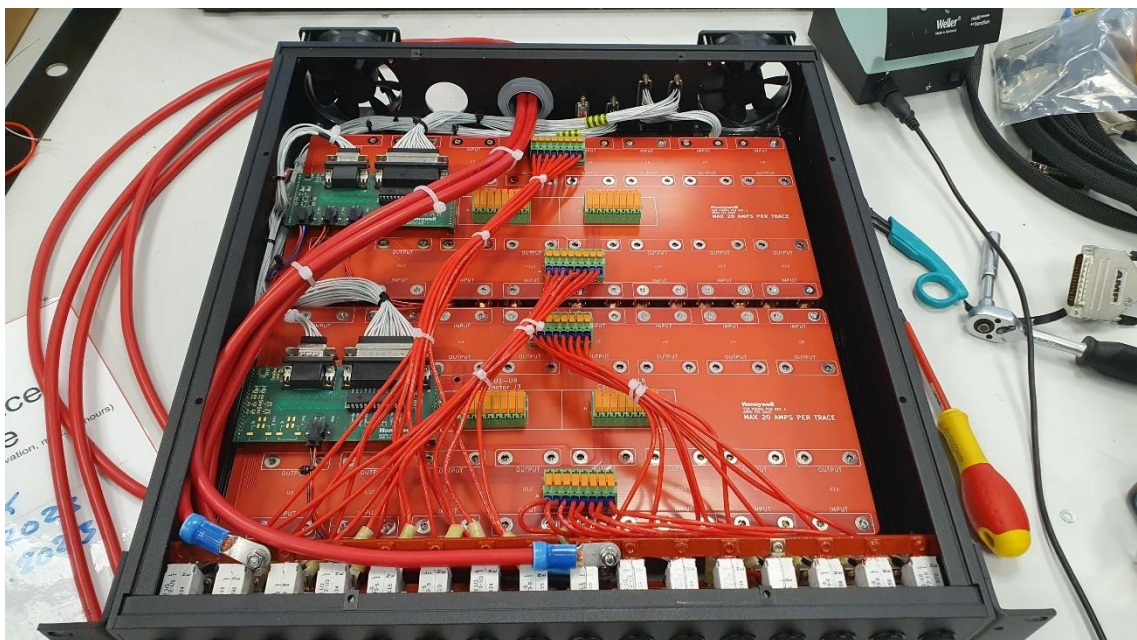
Po inštalácii vstupného napájacieho obvodu, začala práca na vytvorení krabice na uloženie spínacích obvodov pre jednotlivé kanály. Pre tieto potreby boli zaobstarané 3 kabinetové hliníkové krabice od výrobcu Hammond Manufacturing. Tieto krabice majú výšku 8.89 cm, dĺžku 71.12 cm a široké 48.26 cm (19 palcov).

Do jednej krabice je možné vložiť 32 kusov polovodičových relé pevného stavu (Crydom D1D20), 32 jednosmerných istočov, dve DPS pre zapojenie relé pevného stavu (kapitola 5.1.1), dve DPS pre ovládací obvod (kapitola 5.3.1) a dva ventilátory pre aktívne chladenia krabice. Na obrázku 6.3 je možné vidieť rozloženie púzdiel relé pevných stavov, ktoré sú pevne šroubami spojené so spodnou stranou krabice. Na obrázku 6.4 je zobrazená krabica so všetkými komponentami ale bez časti vnútornej kabeláže a na

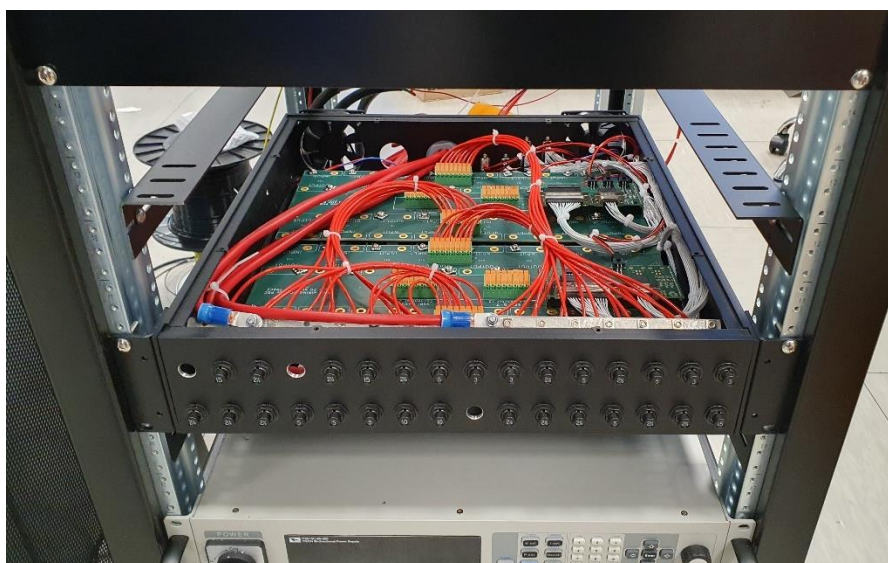
obrázku 6.5 je možné vidieť už skompletovanú krabicu označovanú v základnej blokovej schéme zariadenia PSC na obrázku 2.1 ako „SSR Box“. Celkovo sa v zariadení nachádzajú tri krabice, obsahujúce spínacie prvky, ovládiace obvody a DPS pre prepojenie relé, pevných stavov.



Obrázok 6.3 Rozloženie relé pevných stavov



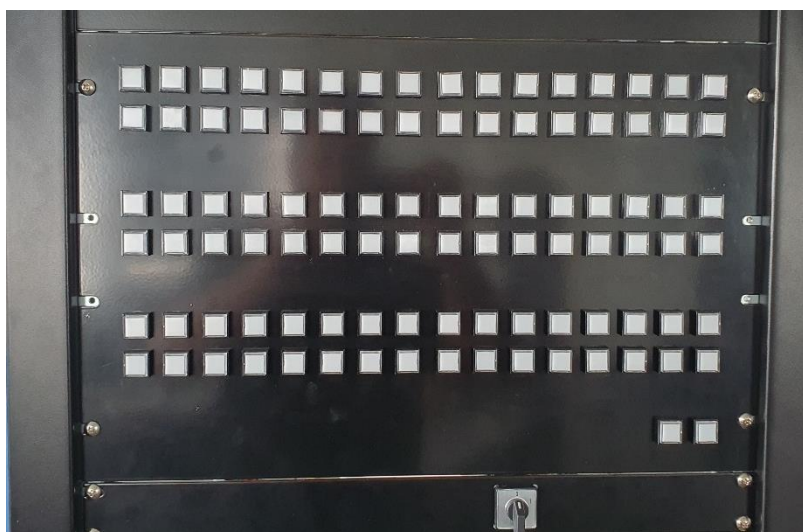
Obrázok 6.4 Rozpracovaný SSR Box



Obrázok 6.5 Hotový SSR Box (bez hornej krytu) nainštalovaný v zariadení PSC

6.3 Tlačidlový panel

Pre manuálne ovládanie výstupných kanálov bol vytvorený panel, do ktorého je možné osadiť celkovo 98 tlačidiel. Z nich 96 tlačidiel slúži na ovládanie jednotlivých na sebe nezávislých napätových kanálov a zo zvyšných dvoch tlačidiel jedno slúži na prepínanie medzi režimami vzdialeného a manuálneho ovládania a druhé na zapnutie a vypnutie spínacej funkcie. Na obrázku 6.6 môžeme vidieť tlačidlový panel inštalovaný na zariadenie PSC.



Obrázok 6.6 Predná strana tlačidlového panelu

6.3.1 DPS pre tlačidlový panel

Pre zjednodušenie pripojenia veľkého množstva tlačidiel so spínacími prvkami uloženými v krabiciach, označných v zariadení PSC ako „SSR Box“, bola pre tlačidlový panel vytvorená DPS zjednocujúca 32 tlačidiel na dva konektory typu D-Subminiature, každý so 44 kontaktami.

Na tejto DPS, ktorej schéma je súčasťou prílohy H časť B.1 a motív DPS vychádzajúci zo schémy je súčasťou prílohy H časť B.2 a B.3 tejto diplomovej práce, sú spínacie kontakty a kontakty pre žiarovku/LED šesťnástich tlačidiel pripojené na jeden spoločný konektor. Ostatných šesťnástich tlačidiel je pripojených na druhý spoločný konektor. Kontakty žiarovky/LED sú pripojené nezávisle od spínacieho kontaktu tlačidla a fungujú ako spätná väzba pre indikáciu zapnutia výstupného napájacieho kanála zariadenia. DPS obsahuje aj konektor pre pripojenie napájania pre spínacie kontakty tlačidiel. Konektor má štyri kontakty a vodičmi je na konektor privedené uzemnenie pre jednosmerné napätie a napájacia vetva označná ako „+12V_BP“, určená na napájanie tlačidiel, keď je zariadenie v režime manuálneho ovládania pomocou tlačidiel.

Celkovo sú v zariadení inštalované tri DPS zjednocujúce 96 tlačidiel so spínaciu funkciou pre manuálne ovládanie na šesť konektorov typu D-Subminiature so 44 kontaktami.

Zároveň bola vytvorená druhá DPS zjednocujúca dve tlačidlá so špeciálnou funkciou (funkcie „RELAY_REMOTE“ a „START_STOP“ popísané v kapitole 4.3) na jeden konektor so štyrmi kontaktami.

Na obrázku 6.6 sú zobrazené DPS pre zapojenie konektorového panelu so zvyškom zariadenia PSC. Celkovo sa na zadnej strane tlačidlového panelu nachádzajú štyri DPS. Zobrazené sú aj káblové zväzky prenášajúce spínací signál vo forme digitálneho výstupu do zariadenia PSC a signál spätnej väzby pre žiarovky/LED umiestnené v telách tlačidiel.

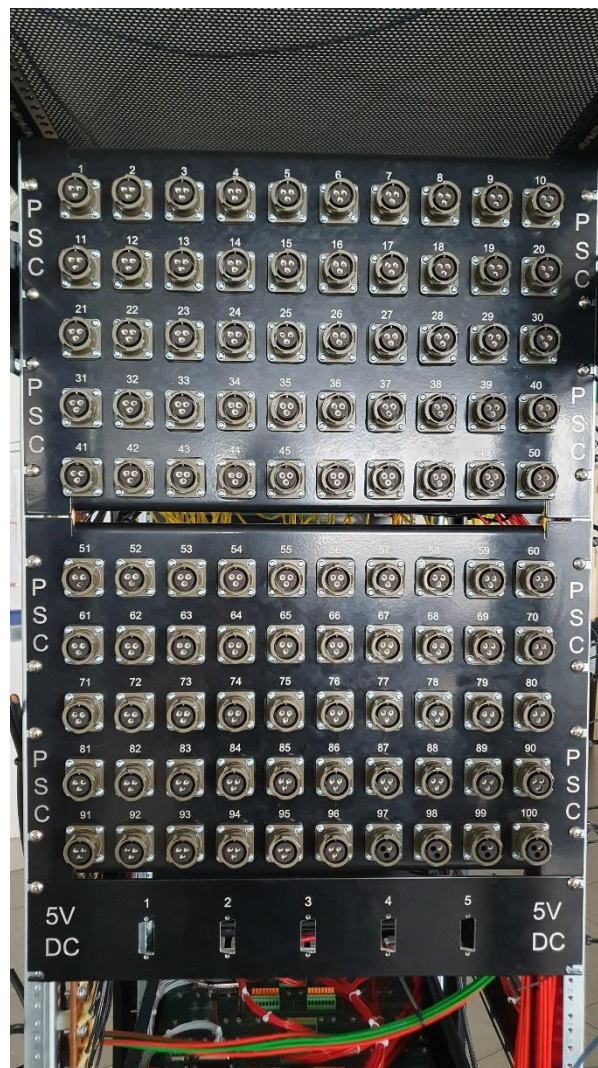


Obrázok 6.7 Zadná strana tlačidlového panelu

6.4 Konektorový panel

Konektorový panel slúži ako výstupná periféria zariadenia. Jedná sa o panel o veľkosti 5U kabinetových jednotiek (1U = 1.75 palca). Do tohto panelu bolo externým sprostredkovateľom vyvrtaných 50 dier, do ktorých je možné osadiť a pripevniť 50 výstupných konektorov s produktovým číslom VG95234A-16-10SN od výrobcu ITT Cannon. Konektory obsahujú celkovo 3 kontakty s prúdovou zatažiteľnosťou do 41 A, pri nominálnej hodnote sériového odporu 3.1 m Ω . [27]

Celkovo sú na zadnú stranu zariadenia PSC inštalované dva konektorové panely s 96 osadenými konektormi z celkového maximálneho možného počtu 100. Na obrázku 6.7 je možné vidieť dva panely s výstupnými konektormi na zadnej strane zariadenia.



Obrázok

6.8 Konektorový panel osadený konektormi

6.5 Stavový panel

Pre potreby zariadenia PSC bol vytvorený aj stavový panel. Tento panel obsahuje LED indikátory, signalujúce prítomnosť napätí v konkrétnych svorkovniciach vstupného napätového obvodu. Konkrétne sa jedná o všetky tri fázové napätia, jednosmerné napätie 12 V, jednosmerné napätie 24 V pre bezpečnostný obvod a jednosmerné pomocné napätie 5 V. V prípade nutnosti je možné jednoducho skontrolovať stav napätových rozvodov na prednej strane kabinetu.

Na paneli na obrázku **Error! Reference source not found.** je osadené aj bezpečnostné EPO tlačidlo na vypnutie zariadenia v prípade poruchy. Toto tlačidlo je prepojené s bezpečnostným relé ovládajúcim spínacie napätie na kontakty cievok stykačov vo vstupnom napätovom obvode. Poslednou funkciou stavového panelu je schopnosť zapnúť a vypnúť striedavé napätie napájajúce celé zariadenie zo siete. Nejedná sa však o bezpečnostnú funkciu ale o spínač hlavného napájania.



Obrázok 6.9 Stavový panel

6.6 Finančné aspekty realizácie

6.6.1 Počiatočný odhad nákladov

Pred realizáciou zariadenia PSC bol vypracovaný odhad hodín potrebných na návrh a zhotovenie zariadenia. V tabuľke 6.1 je uvedený prehľad hodín potrebných na dokončenie jednotlivých úloh.

Tabuľka 6.1 Odhad hodín potrebných na návrh a realizáciu zariadenia PSC

Popis úlohy	Osobohodiny [Hod.]
Definícia požiadaviek na zariadenie	40
Výber komponentov	40
Objednanie súčiastok	24
Systémový dizajn	40
Elektrotechnický návrh	200
Návrh DPS	96
Softwarová integrácia	80

Dokumentácie na obrábanie panelov zariadenia	24
Realizácia zariadenia PSC	120
Vytvorenie vnútornej kabláže zariadenia	60
Integrácia a prvotné spustenie	40
Celkom	764

Zároveň bola nacenená aj predbežná cena materiálu nutná na zhotovenie zariadenia. V tabuľke 6.2 je uvedený prehľad materiálu, u ktorého vznikol predpoklad, že bude potrebný na realizáciu zariadenia.

Tabuľka 6.2 Odhad ceny materiálu

Komponenty	Cena [Kč]
Zdroje jednosmerného napätia	326 250
Výkonové spínacie prvky	87 000
Mikrokontrolér a prvky vzdialeného ovládania	32 625
Výroba DPS	43 500
Elektrické komponenty	10 875
Kabeláž a konektory	21 750
Výroba panelov	21 750
Celkom	543 750

6.6.2 Reálne náklady

Po dokončení realizácie bolo možné vyčísliť výslednú cenu zariadenia PSC a porovnať ju s počiatočným odhadom. Toto porovnanie nám určí ako blízko k realite bol prvotný odhad nákladov a v budúcnosti nám môže pomôcť lepšie a presnejšie odhadnúť náklady pred začiatkom vývoja alebo realizácie buď toho istého alebo nejakého iného typu zariadenia.

V tabuľke 6.3 sú uvedené už reálne hodnoty osobohodín použitých na vývoj a realizáciu zariadenia rozdelené do troch kategórií podľa zamerania.

Tabuľka 6.3 Reálne náklady v osobohodinách

Popis	Osobohodiny [Hod.]
Elektrický návrh a realizácia	722.25
Vývoj softvéru a integrácia	139.25
Projektový manažment	102
Celkom	963.5

V tabuľke 6.4 sú zase uvedené reálne hodnoty materiálu použitého na vývoj a realizáciu zariadenia rozdelené do troch kategórií podľa zamerania. Pre vyššiu presnosť sú uvedené výdavky v celkovo troch menách v ktorých boli produkty kupované. Na vypočítanie celkových výdajov v Českých korunách, boli použité menové kurzy zo dňa 14.5.2023 a ti 1 USD = 23.79 CZK pre prepočet Amerických dolárov a kurz 1 EURO =

21.75 CZK pre prepočet Euro. Všetky položky nakúpené pre potreby vývoja a realizácia zariadenia PSC sú súčat'ou súčasťou **Error! Reference source not found.** tejto diplomovej práce.

Tabuľka 6.4 Reálne náklady na materiál

Mena	Suma
Česká koruna	622 019.1
Americký dolár	3 090.1
Euro	14 498.8
Celkom [Kč]	1 034 160.6

7. ZÁVER

Jedným z cieľov tejto diplomovej práce je položiť teoretický základ pre samotnú realizáciu zariadenia PSC. Kapitola 1 tejto diplomovej práce predstavuje teoretický úvod do problematiky napájacích zdrojov, ako sú meniče striedavého napätia na jednosmerné napätie, nazývané aj AC/DC meniče. Bližšie sú predstavené, dnes hojne využívané, spínané meniče. Ďalej je predstavená problematika jednosmerných DC/DC meničov a v neposlednom rade polovodičové spínacie prvky.

Ďalšie časti práce sa venujú už samotnému návrhu vnútorného zapojenia zariadenia. Predstavený je hlavný princíp funkcie a prvotný návrh elektrického návrhu zariadenia. Následne je v jednotlivých kapitolách poskytnutý bližší popis funkčných blokov. Popis prepojení medzi jednotlivými funkčnými blokmi je, pre lepšie pochopenie zapojenia, doplnený o grafické znázornenie pomocou niekoľkých blokových schém. Táto práca teda poskytuje systémový nadhľad na elektrický návrh zariadenia. Popisuje všetky časti zariadenia, avšak niektoré vedľajšie časti sú, z dôvodu obmedzenia rozsahu diplomovej práce, popísané iba stručne so zameraním hlavne na ich systémovú funkciu.

V diplomovej práci už došlo k fyzickému vytvoreniu zariadenia so všetkými funkčnými časťami. Predstavené boli konkrétne riešenia a manifestácia jednotlivých blokov do konkrétnej podoby. V diplomovej práci sa realizácia zariadenia presunula z teoretickej roviny elektrického návrhu na výrobu funkčného celku, podľa požiadaviek na zariadenie popísaných v úvode práce. Boli vyrobené mechanické diely, dosky plošného spoja a iné prvky tak, aby mohlo dôjsť k vytvoreniu a zapojeniu zariadenia. Zároveň bola práca doplnená o konkrétne parametre pre jednotlivé časti popísané v jadre tejto práce.

Počas realizácie zariadenia došlo k viacerým technickým výzvam, ktoré vyplynuli z povahy realizácie zariadenia, nie všetky technické problémy sa však dali v návrhovej fáze predvídať. Riešenie týchto prekážok je súčasťou diplomovej práce. Týka sa hlavne vytvorenia dodatočných revízií rôznych typov DPS, ktoré bolo potrebné vytvoriť pre dokončenie realizácie zariadenia PSC. Pred fyzickou realizáciu zariadenia neboli niektoré aspekty montáže považované za komplikované alebo časovo náročné, čo potom neskôr pri realizácii spôsobovalo problémy.

Zariadenie bolo po dokončení otestované. Bola vyskúšaná komunikácia interného mikrokontroléru s externým počítačom, komunikácia mikrokontroléru a expandérov digitálnych signálov, spínanie tranzistorov, spínanie relé pevných častí, manálne ovládanie a ovládanie v režime vzdialeného ovládania a overení napätový výstup z hlavného napájacieho zdroja.

K práci bol vypracovaný predbežný odhad hodín pred začatím vývoja a realizácie. Po skončení vývoja a realizácia bol spravený sumárny prehľad a proovnanie odhadu s reálnymi nákladmi. Z odhadu a sumáru je možné tvrdiť, že odhad bol nepresný a líši sa o 199.5 hodín. Odhad hodín bol vypracovaný detailne pomocou rozpadu veľkých

komplexných úloh na menšie celky. Aj napriek tomu je rozdiel medzi odhadom a realitou zhruba 26%.

Nami vytvorené zariadenie je z povahy svojej koncepcie unikátne a nie je voľne predajné. Jedná sa o zariadenia, ktoré je konštruované na mieru pre konkrétne simulačné pracovisko.

LITERATÚRA

- [1] ERICKSON, Robert W. DC-DC Power Converters. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* [online]. 19 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://www.eng.auburn.edu/~agrawvd/COURSE/READING/LOWP/Erikson_DC_2_DC.pdf
- [2] What is a DC/DC Converter?. *ROHM Semiconductor* [online]. [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.rohm.com/electronics-basics/dc-dc-converters>
- [3] Typical application of DC/DC Converters. In: *ROHM Semiconductor* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://www.rohm.com/documents/11303/4314876/dcdc_img_what3.png/5e73f089-21cc-4f27-a68a-b45ffcf811de?t=15349022242
- [4] KNIGHT, Dave. Introduction to Linear Voltage Regulators. *Digi-Key Electronics* [online]. 2016 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/maker/blogs/introduction-to-linear-voltage-regulators>
- [5] Internal circuit of linear voltage regulator. In: *EE Times* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.eetimes.com/wp-content/uploads/media-1050905-c0334-figure1.gif>
- [6] Introduction to DC-DC Converters. *Digi-Key Electronics* [online]. 2016 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/maker/blogs/introduction-to-dc-dc-converters>
- [7] Operating principle and configuration of a linear regulator. *ABLIC* [online]. [cit. 2022-05-00]. Dostupné z: <https://www.ablic.com/en/semicon/products/power-management-ic/voltage-regulator-ldo/intro-2/>
- [8] JIYA, Immanuel Ninma a Robert GOUWS. *Overview of Power Electronic Switches: A Summary of the Past, State-of-the-Art and Illumination of the Future* [online]. 2020 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-666X/11/12/1116#cite>
- [9] TEJA, Ravi. What is a Switch? What are the Different Types of Switches?. *Electronics Hub* [online]. 2021 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://www.electronicshub.org/switches/#Electronic_Switches
- [10] Bipolární tranzistory. *SPŠE Mohelnice* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zel/tranzistory-bip.htm>
- [11] Unipolární tranzistory. *SPŠE Mohelnice* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zel/tranzistory-unip.htm>
- [12] PN Junction Diode. *Electronics Tutorials* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_3.html
- [13] NPN BJT with forward-biased B–E junction and reverse-biased B–C junction. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar_junction_transistor#/media/File:NPN_BJT_Basic_Operation_\(Active\).jP.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar_junction_transistor#/media/File:NPN_BJT_Basic_Operation_(Active).jP.svg)

- [14] Arduino Due. Arduino [online]. [cit. 2022-11-19]. Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/hardware/duo>
- [15] W5500 Ethernet Shield. WIZnet [online]. [cit. 2022-11-19]. Dostupné z: https://docs.wiznet.io/Product/Open-Source-Hardware/w5500_ethernet_shield/
- [16] IT6000C Series: Bidirectional Programmable DC Power Supply Datasheet. ITECH [online]. [cit. 2022-11-19]. Dostupné z: <https://www.bluemi.cz/documents/3rt1fryq67IT6000C-en.pdf>
- [17] MEANWELL WDR-60-50: Datasheet. MOUSER [online]. [cit. 2022-12-26]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/260/Mean_Well_09242019_WDR-60-spec-1651703.pdf
- [18] TRACO POWER TPC 120-112: Datasheet. MOUSER [online]. [cit. 2022-12-26]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/687/tpc_datasheet-3049613.pdf
- [19] MEANWELL DDR-60G-5: Datasheet. MOUSER [online]. [cit. 2022-12-26]. Dostupné z: <https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=DDR-60#1>
- [20] MEANWELL HDR-60-24: Datasheet. MOUSER [online]. [cit. 2022-12-26]. Dostupné z: <https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=HDR-60#>
- [21] ENIG Surface Finish: Datasheet. Sierra Circuits [online]. [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.protoexpress.com/kb/enig/>
- [22] D1D20 Crydom: Datasheet. MOUSER [online]. [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Crydom/D1D20?qs=KoN42VEC626%2F3skCE05RCg%3D%3D>
- [23] D1D20 Crydom. RS Components [online]. [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: <https://no.rs-online.com/web/p/solid-state-relays/2002058>
- [24] Phoenix Contacts LPTA 2.5/8-5.0: Datasheet. Farnell [online]. [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/3204943.pdf>
- [25] Generic Standard on Printed Board Design: IPC-2221A. IPC [online]. Illinois, USA, 2003, Máj [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: [http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A\(L\).pdf](http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A(L).pdf)
- [26] MCP23016: Datasheet. Microchip [online]. [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: [http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A\(L\).pdf](http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A(L).pdf)
- [27] Datasheet for part number VG95234A-16-10PX [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/2136552.pdf>

ZOZNAM SYMBOLOV A ZKRATIEK

Skratky:

MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PWM	Pulse Width Modulation
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
DPS	Doska plošného spoja
USB	Universal Serial Bus
TTL	Transistor-Transistor Logic
SSR	Solid State Relay
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold
SMD	Surface-Mount Device
NO	Normally Open
NC	Normally Closed
COM	Common terminal
LED	Light-Emitting Diode
mA	miliampér
μ s	mikrosekunda
IC	Integrated Circuit

Symboly:

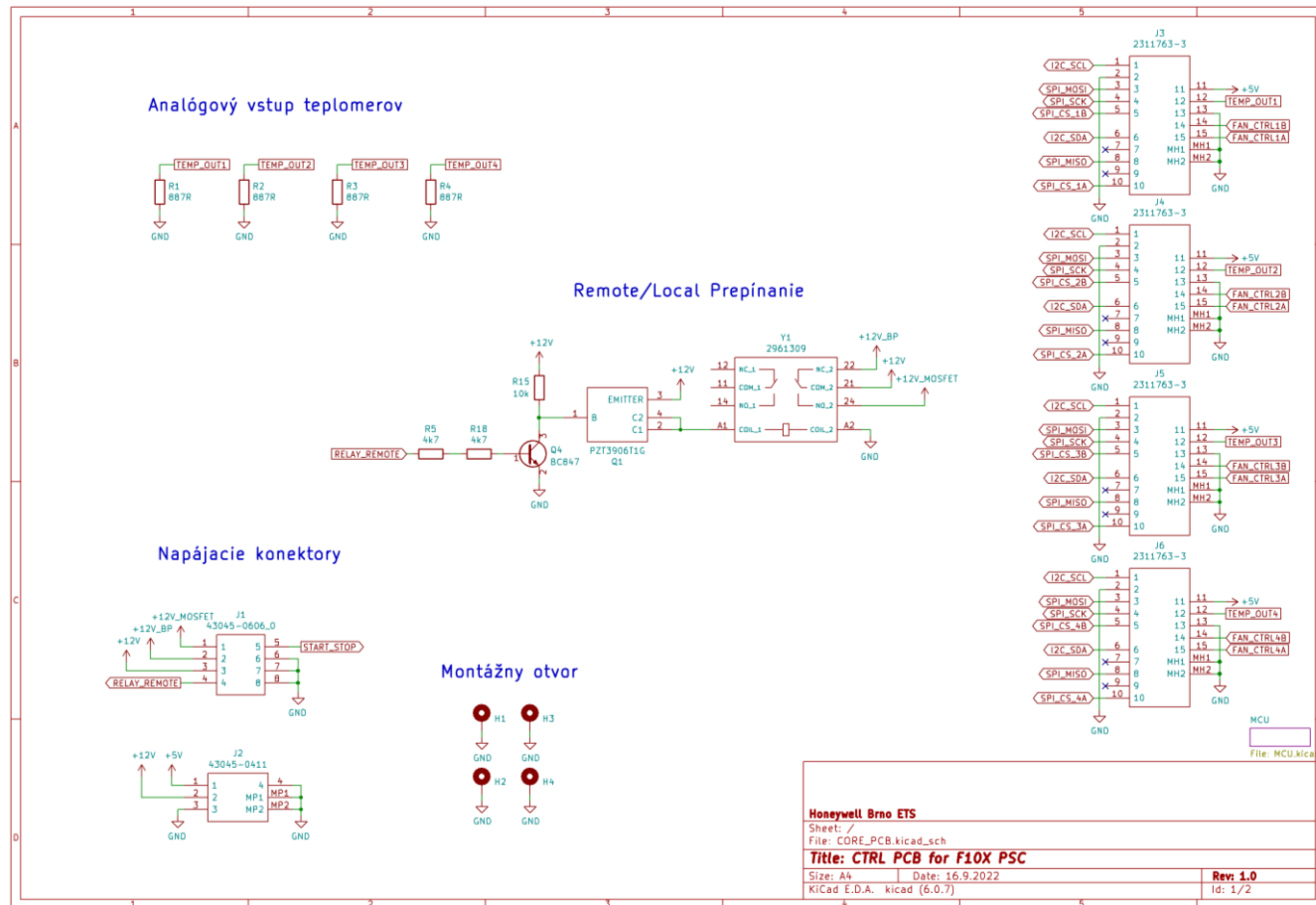
U	napätie	(V)
I	prúd	(A)
F	frekvencia	(Hz)
T	perióda	(s)
D	strieda	(-)
ϑ	teplota	(°C)

ZOZNAM PRÍLOH

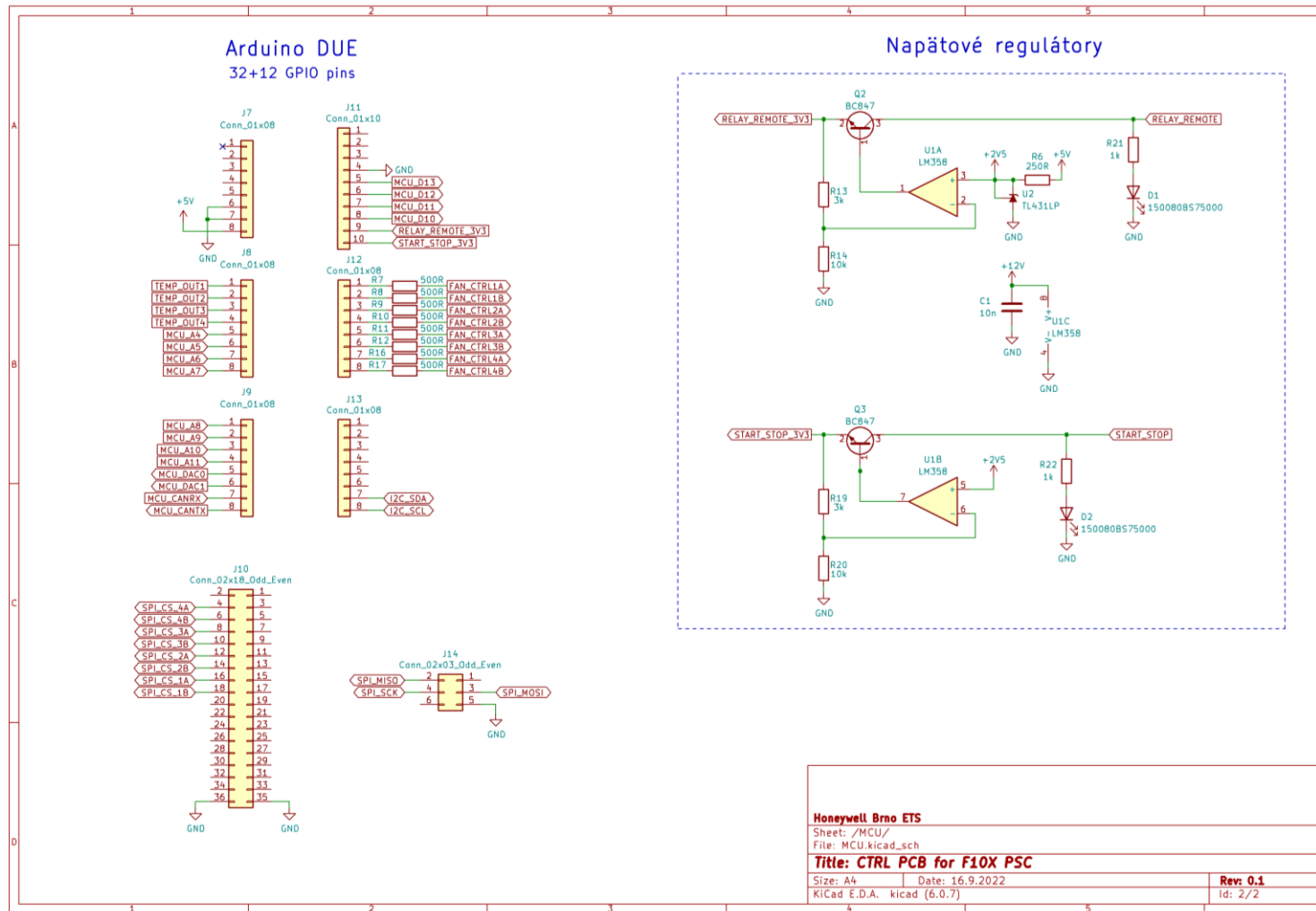
PRÍLOHA A - DPS OVLÁDACIEHO OBVODU REVÍZIA A	64
PRÍLOHA B - DPS PRE ZAPOJENIE VÝKONOVÝCH SPÍNACÍCH PRVKOV REVÍZIA A	68
PRÍLOHA C - DPS SPÍNACIEHO OBVODU PRE VZDIALENÉ OVLÁDANIE REVÍZIA A	71
PRÍLOHA D - DPS OVLÁDACIEHO OBVODU REVÍZIA B.....	74
PRÍLOHA E - DPS PRE ZAPOJENIE VÝKONOVÝCH SPÍNACÍCH PRVKOV REVÍZIA B	78
PRÍLOHA F - DPS SPÍNACIEHO OBVODU PRE VZDIALENÉ OVLÁDANIE REVÍZIA B	81
PRÍLOHA G - DPS PRE TLAČIDLOVÝ PANEL	84
PRÍLOHA H - VÝROBNÉ DÁTA PRE DPS OVLÁDACIEHO OBVODU REVÍZIA A SÚ ULOŽENÉ NA PRILOŽENOM CD.....	86
PRÍLOHA I - VÝROBNÉ DÁTA PRE DPS OVLÁDACIEHO OBVODU REVÍZIA B SÚ ULOŽENÉ NA PRILOŽENOM CD.....	87
PRÍLOHA J - VÝROBNÉ DÁTA PRE DPS PRE ZAPOJENIE VÝKONOVÝCH SPÍNACÍCH PRVKOV REVÍZIA A SÚ ULOŽENÉ NA PRILOŽENOM CD.....	88
PRÍLOHA K - VÝROBNÉ DÁTA PRE DPS PRE ZAPOJENIE VÝKONOVÝCH SPÍNACÍCH PRVKOV REVÍZIA B SÚ ULOŽENÉ NA PRILOŽENOM CD	89
PRÍLOHA L - VÝROBNÉ DÁTA PRE DPS SPÍNACIEHO OBVODU REVÍZIA A PRE VZDIALENÉ OVLÁDANIE SÚ ULOŽENÉ NA PRILOŽENOM CD	90
PRÍLOHA M - VÝROBNÉ DÁTA PRE DPS SPÍNACIEHO OBVODU REVÍZIA B PRE VZDIALENÉ OVLÁDANIE SÚ ULOŽENÉ NA PRILOŽENOM CD	91
PRÍLOHA N - VÝROBNÉ DÁTA PRE DPS TLAČIDLOVÉHO PANELU SÚ ULOŽENÉ NA PRILOŽENOM CD	92

Príloha A - DPS Ovládacieho obvodu revízia A

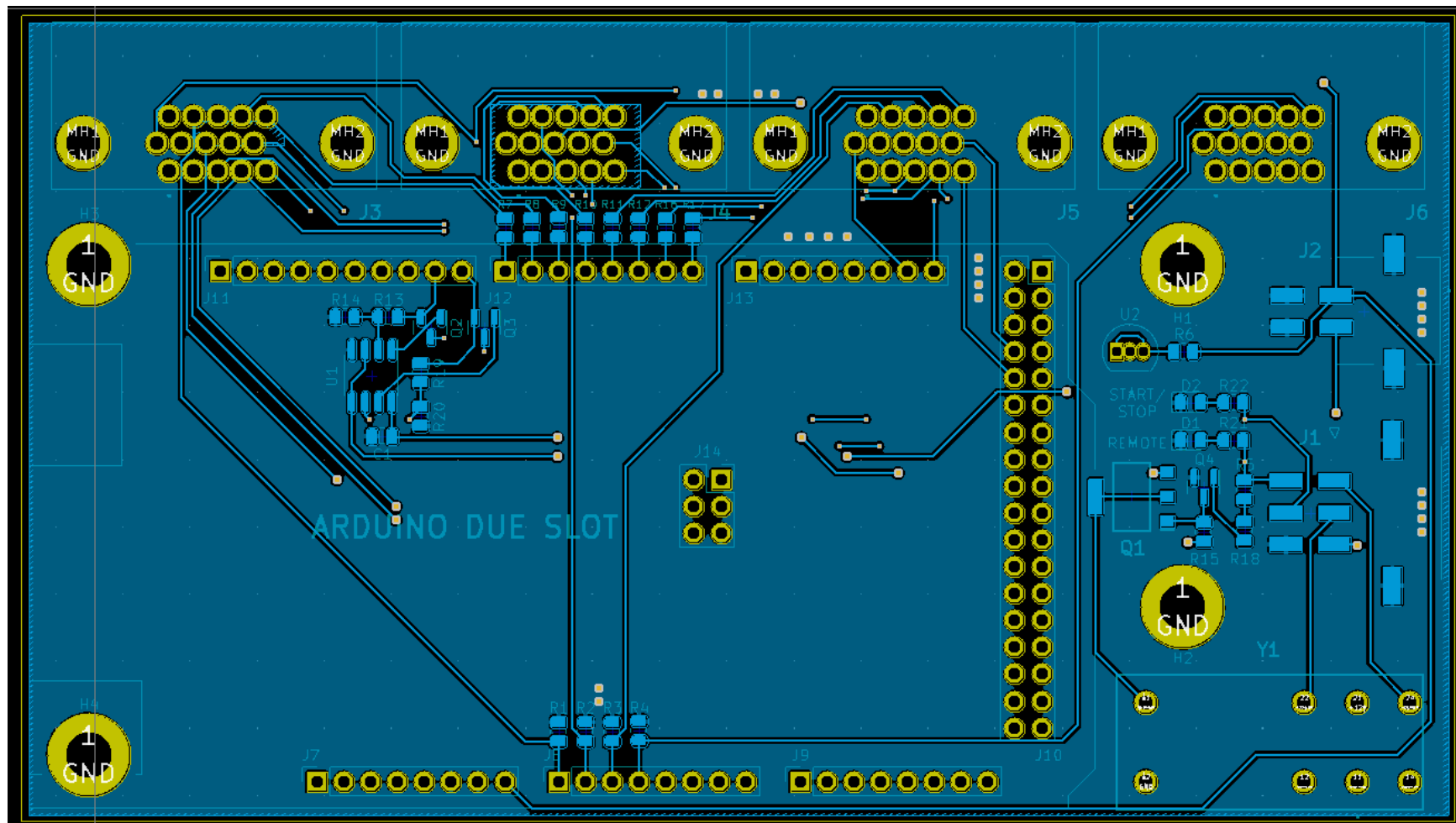
A.1 Schéma obvodu – časť prvá



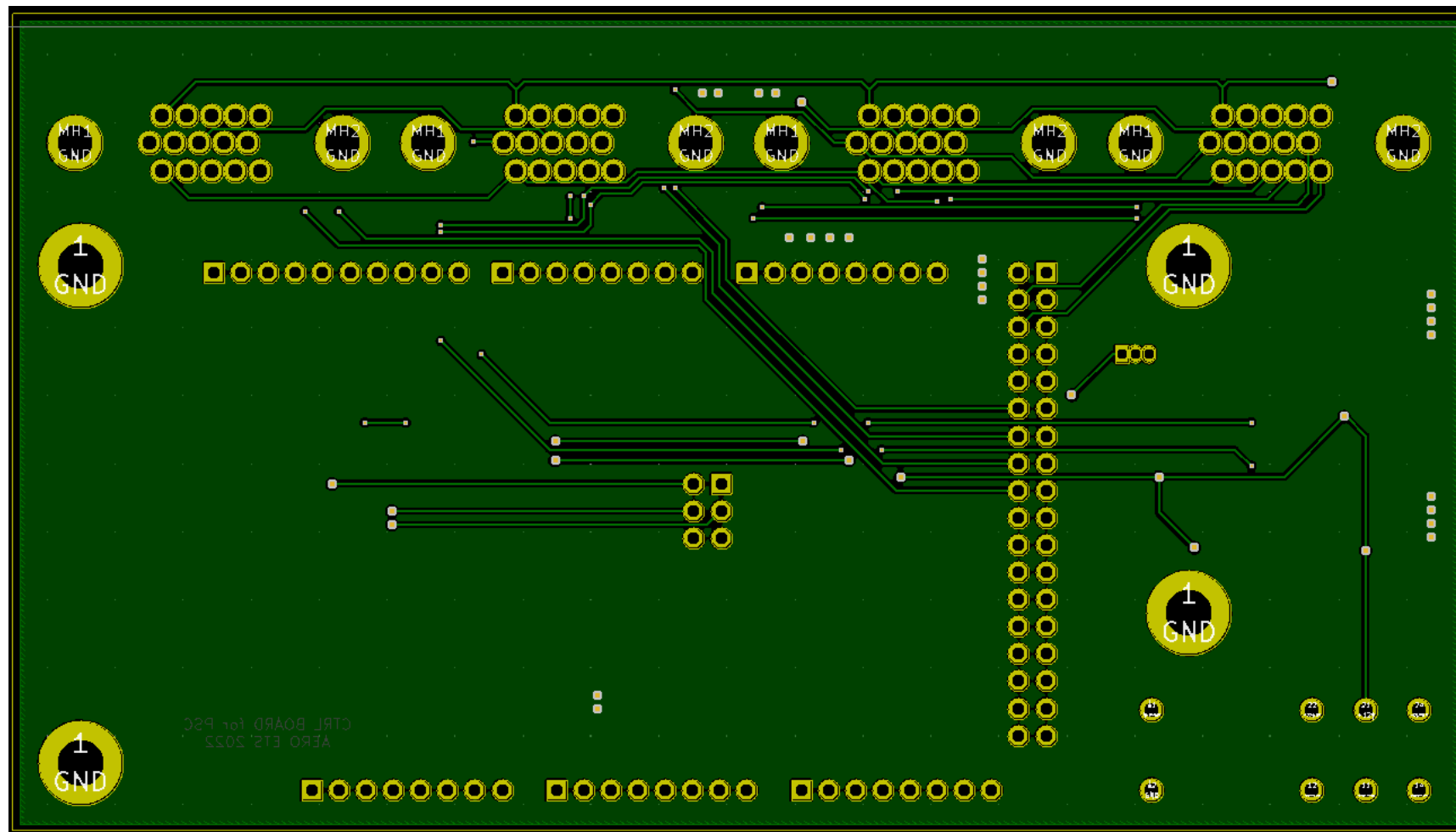
A.2 Schéma obvodu – část druhá



A.3 Motív DPS – Primárna strana



A.4 Motív DPS – Sekundárna strana

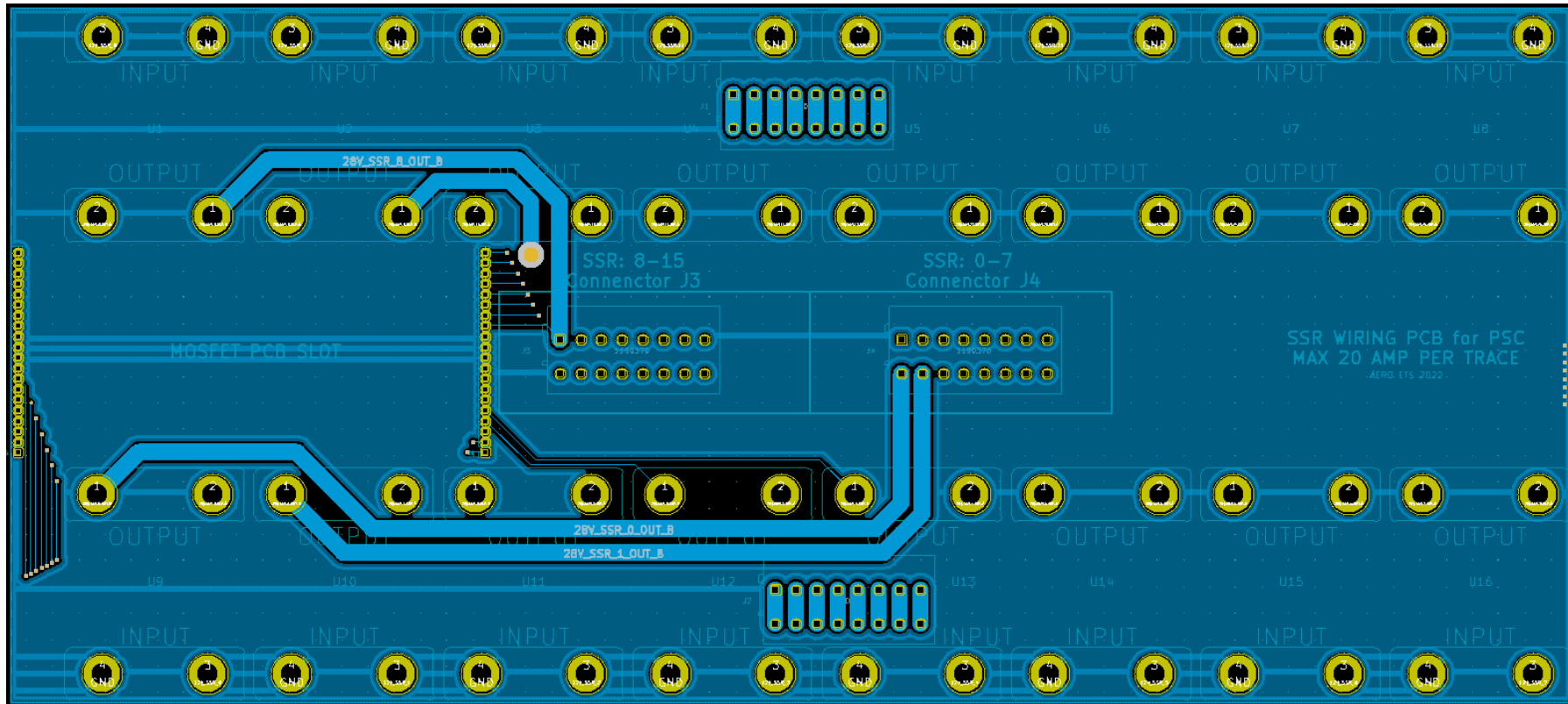


Príloha B - DPS pre zapojenie výkonových spínacích prvkov revízia A

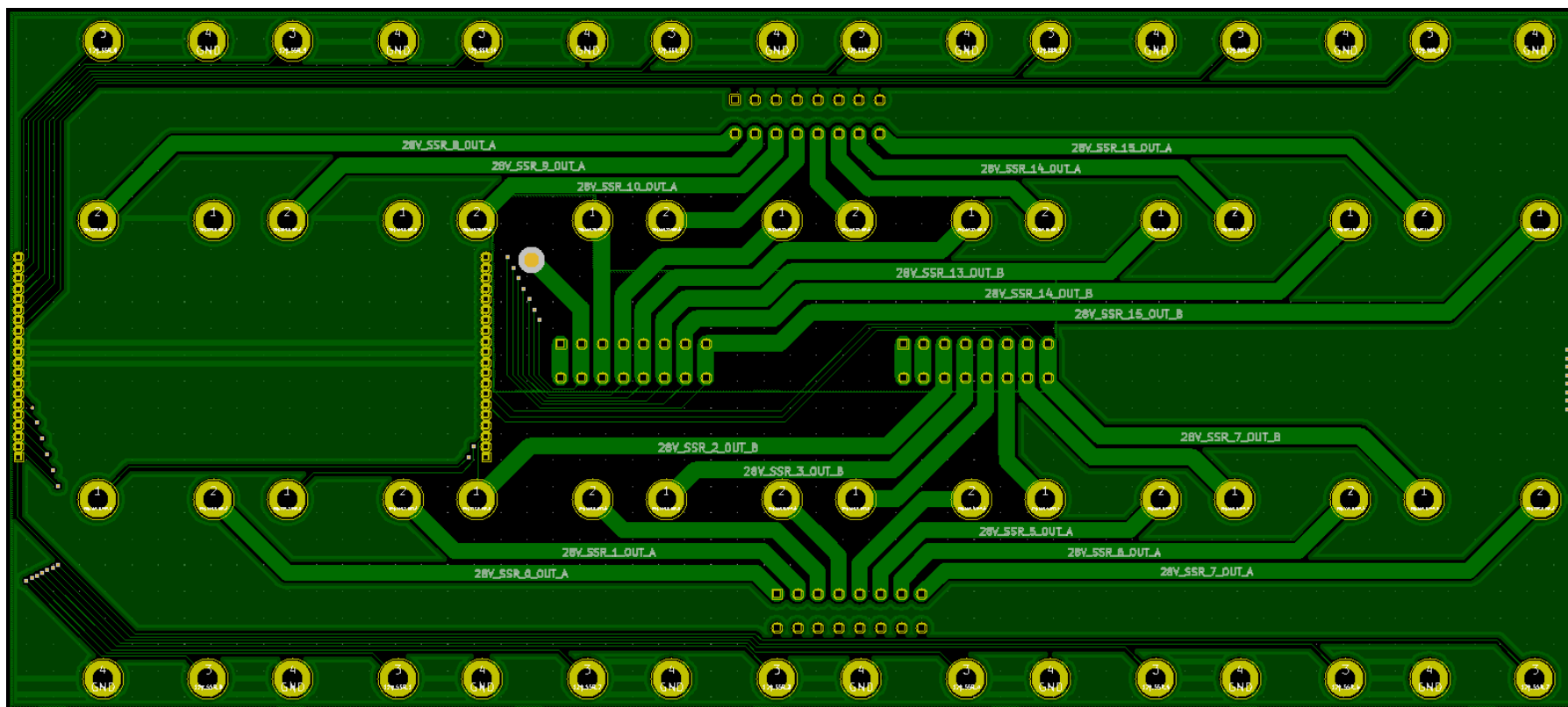
B.1 Schéma obvodu – časť prvá



B.2 Movtív DPS – Primárna strana

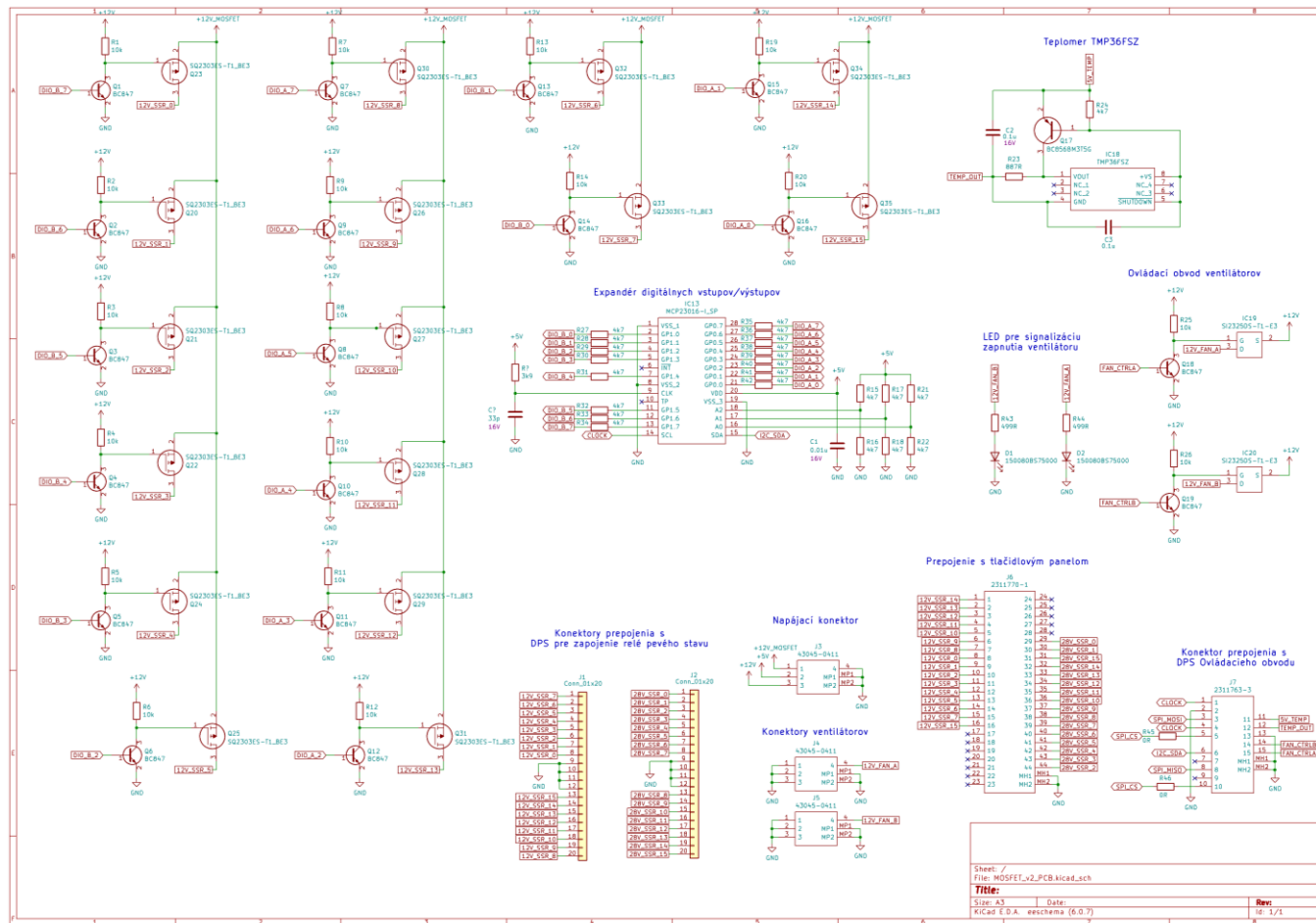


B.3 Movtív DPS – Sekundárna strana

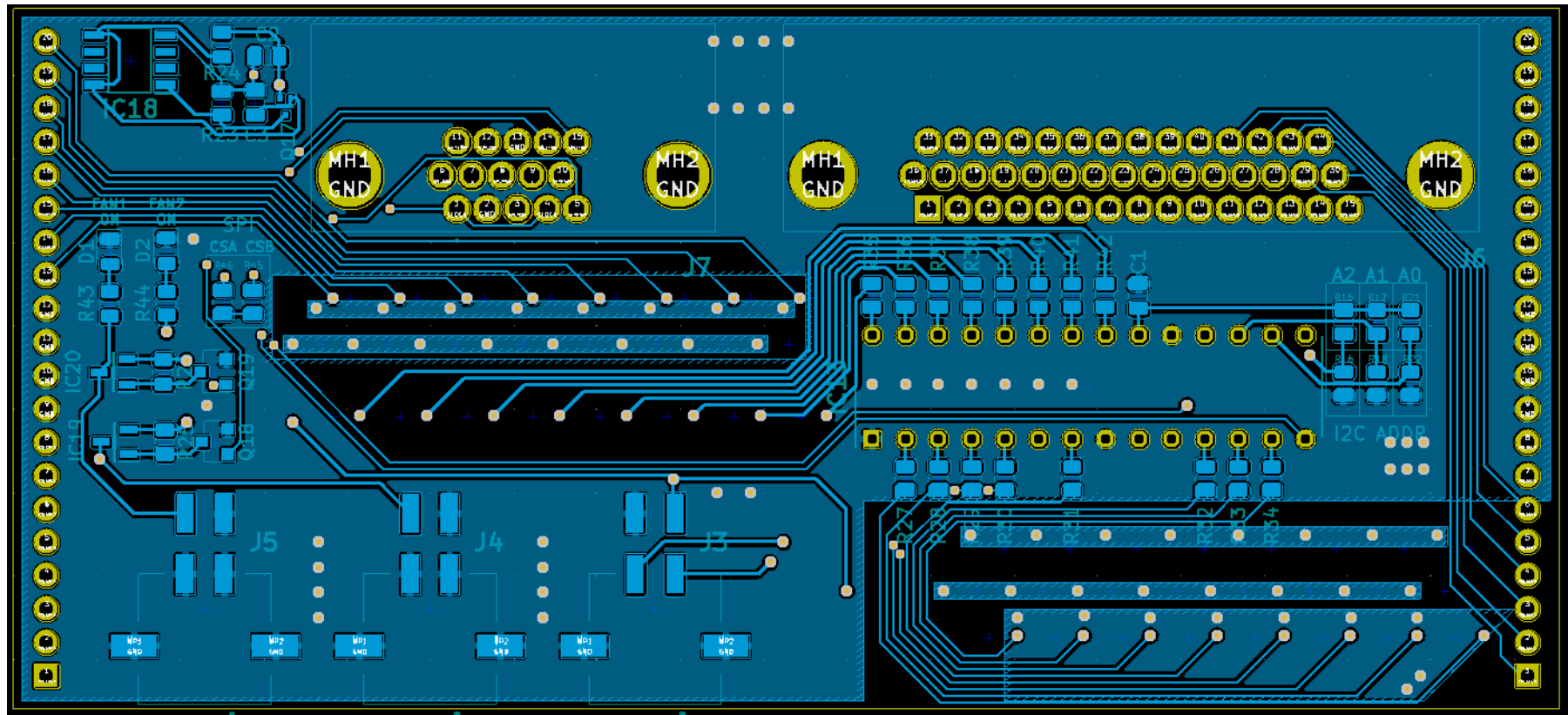


Príloha C - DPS Spínacieho obvodu pre vzdialené ovládanie revízia A

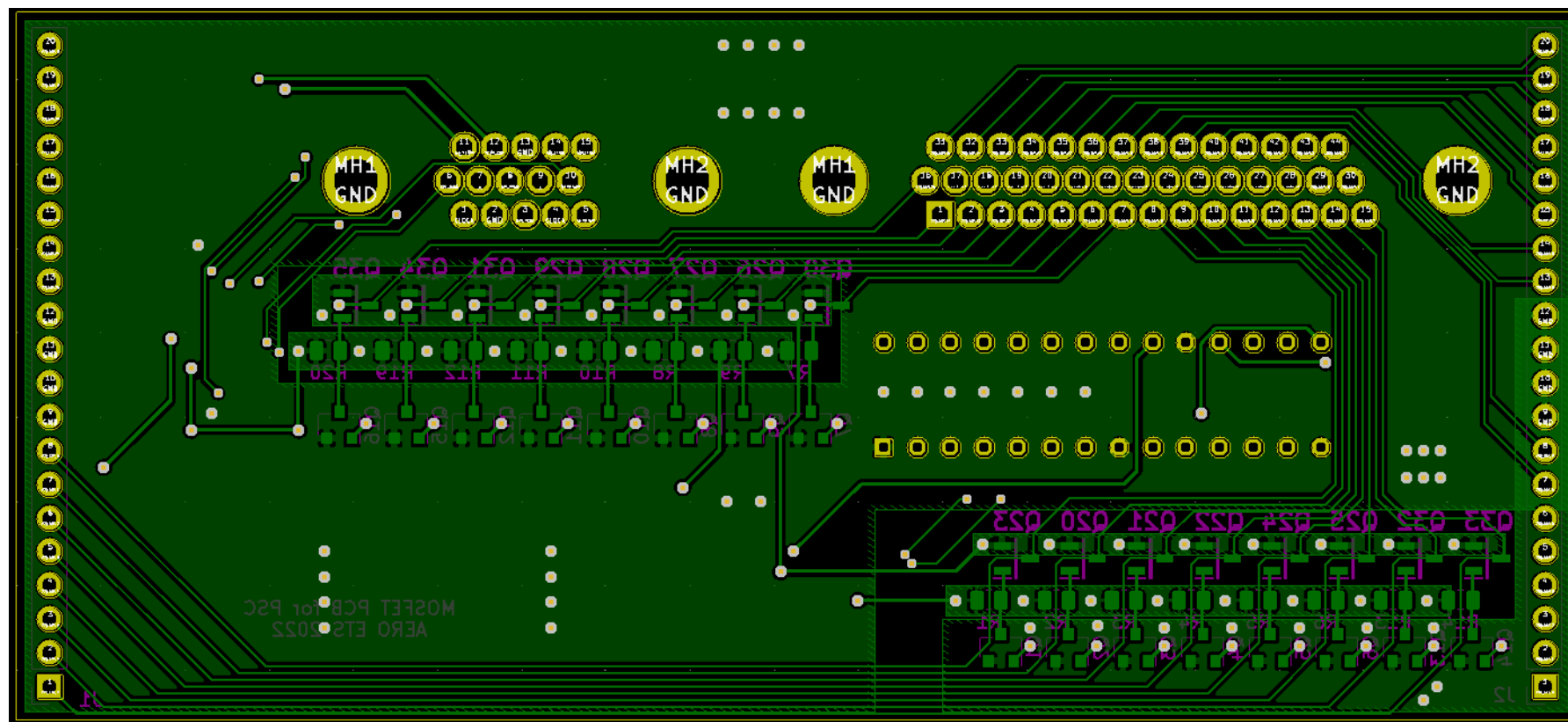
C.1 Schéma obvodu



C.2 Movtív DPS – Primárna strana

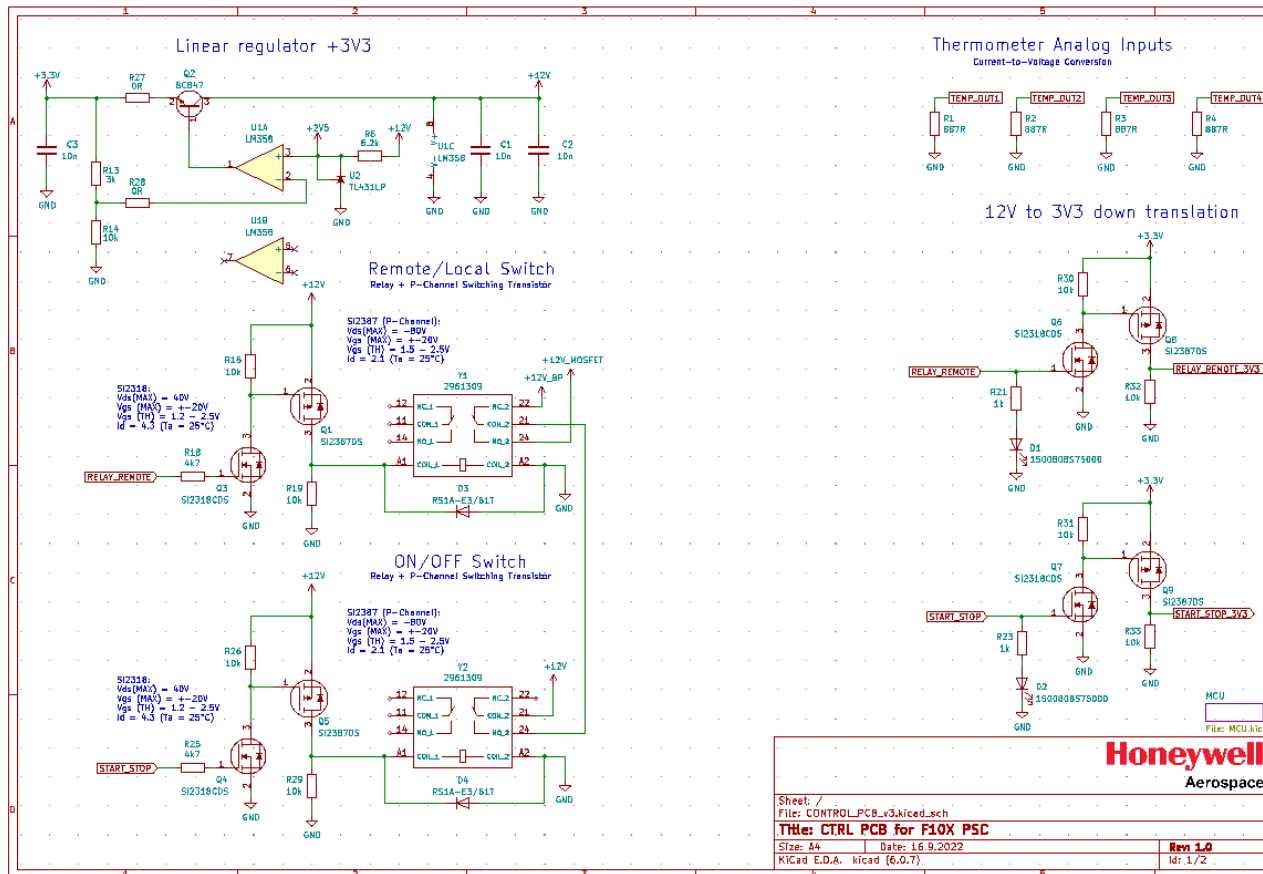


C.3 Movtív DPS – Sekundárna strana

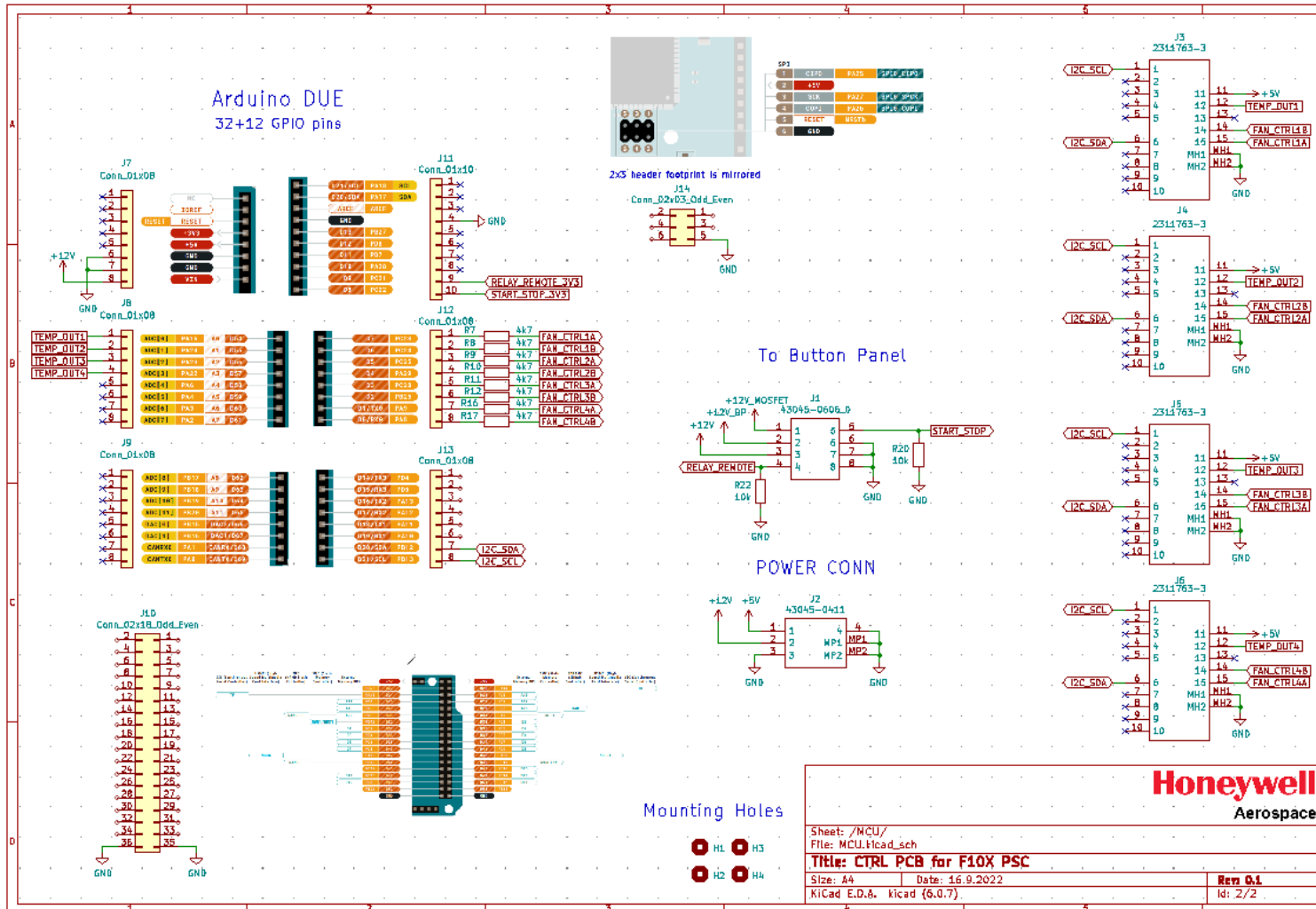


Príloha D - DPS Ovládacieho obvodu revízia B

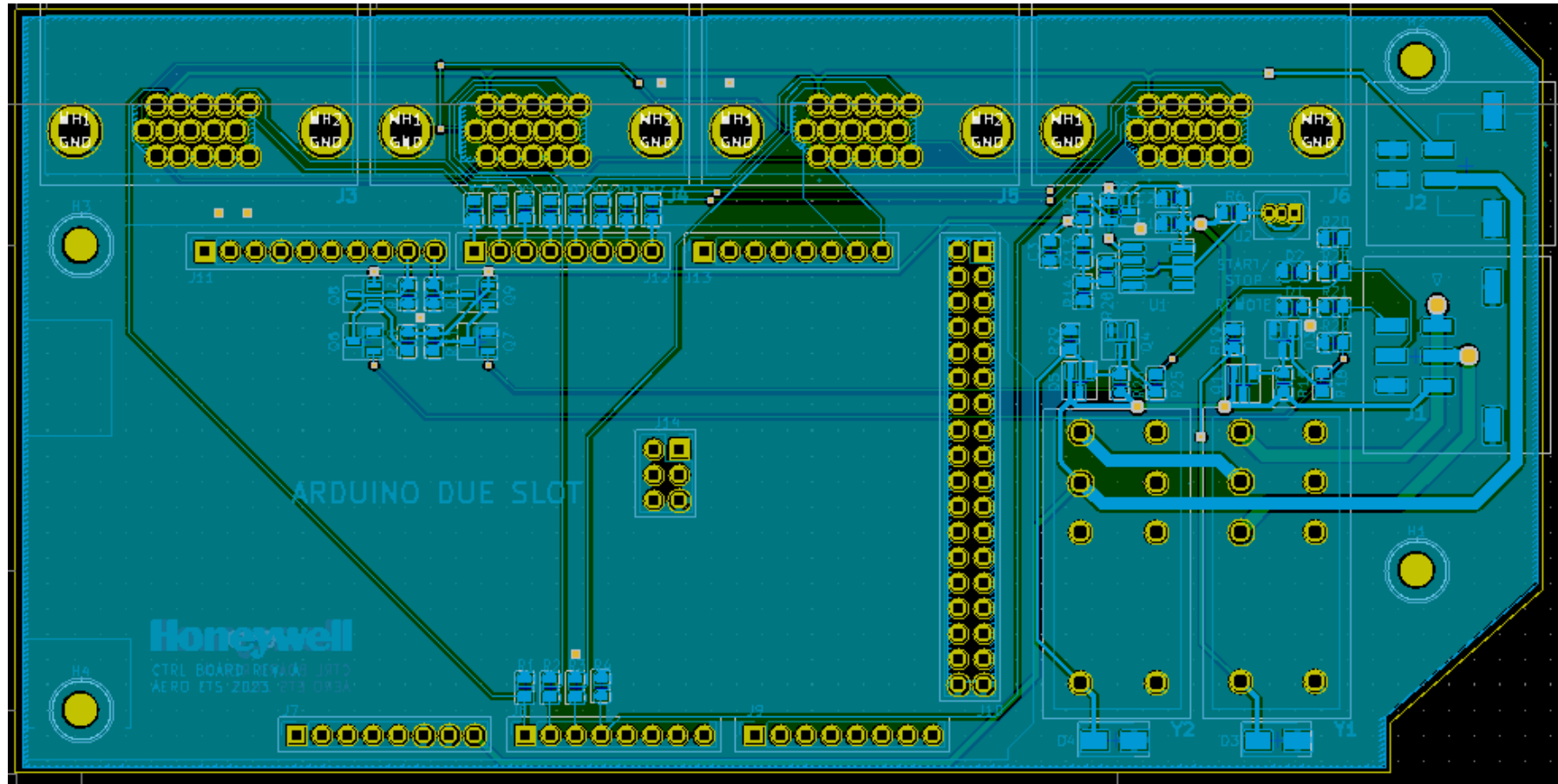
D.1 Schéma obvodu – časť prvá



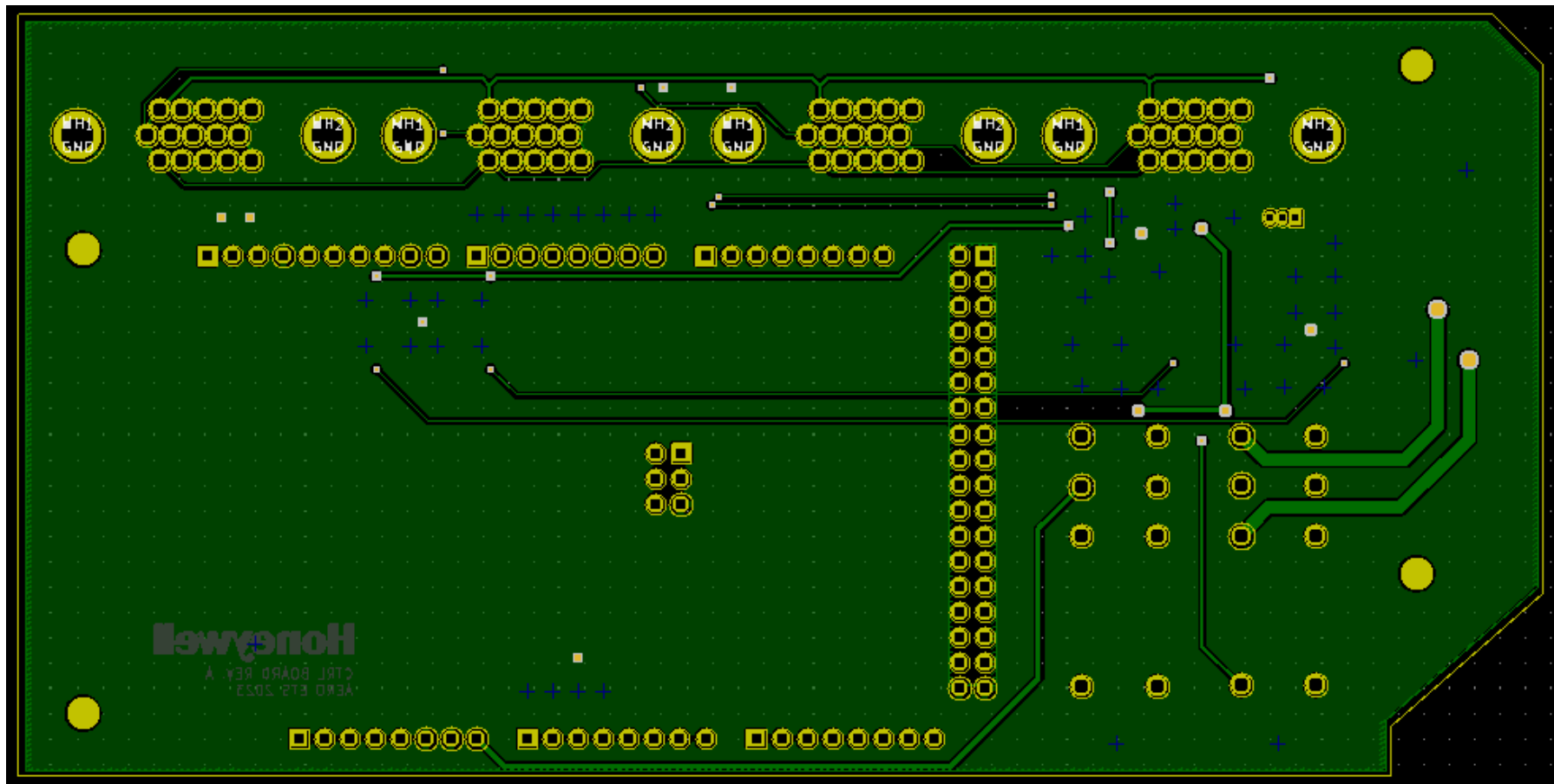
D.2 Schéma obvodu – část druhá



D.3 Motív DPS - Primárna strana

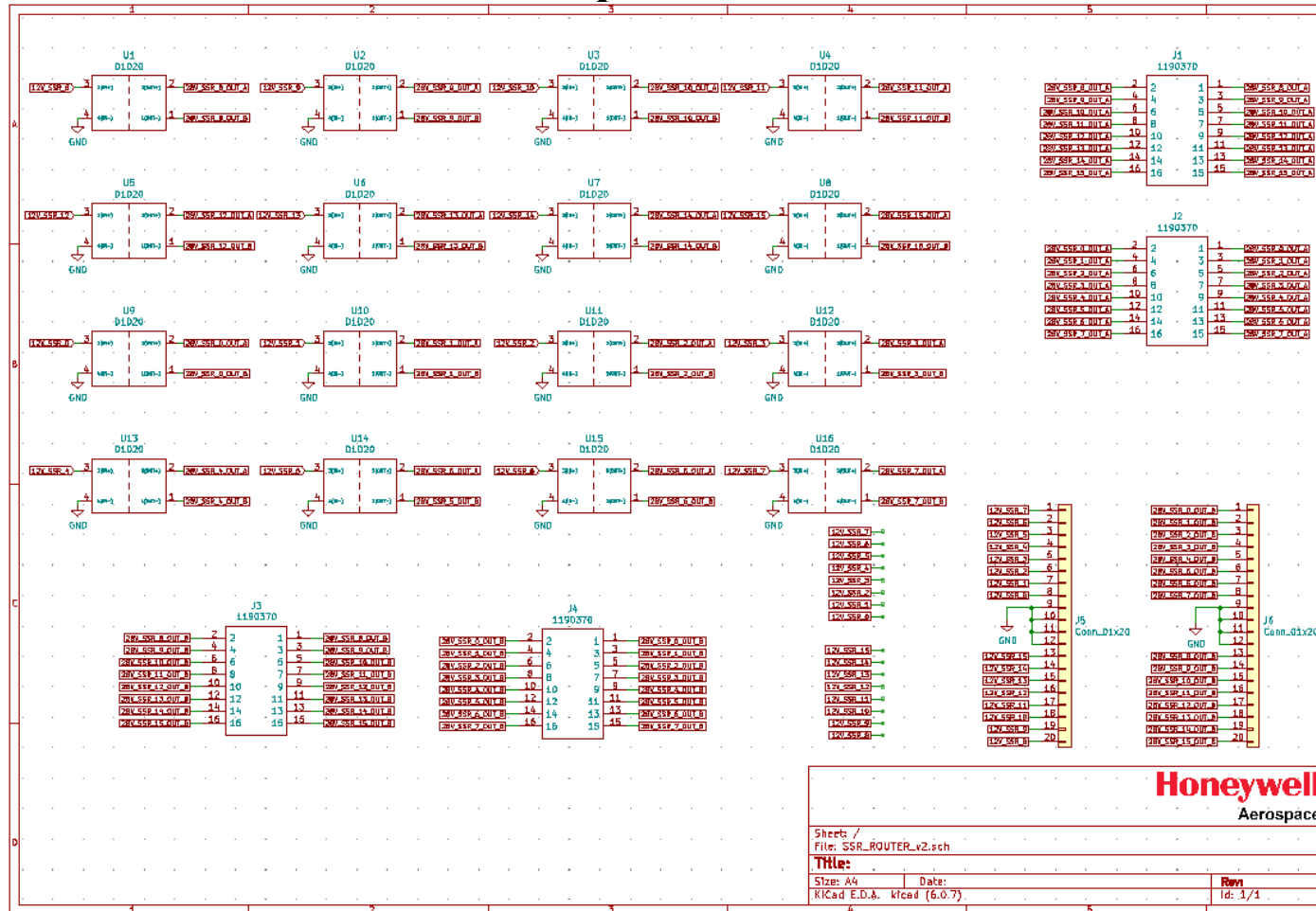


D.4 Motív DPS – Sekundárna strana

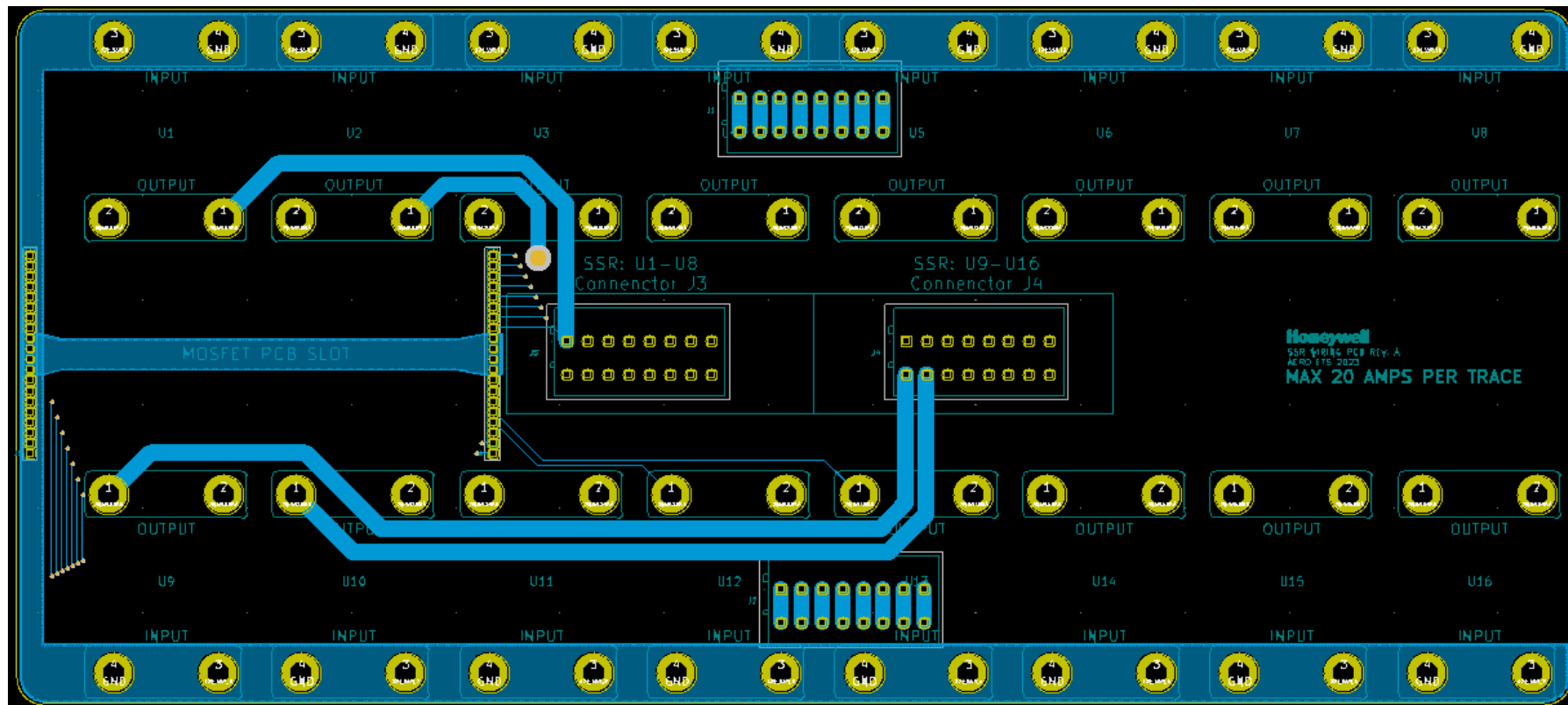


Príloha E - DPS pre zapojenie výkonových spínacích prvkov revízia B

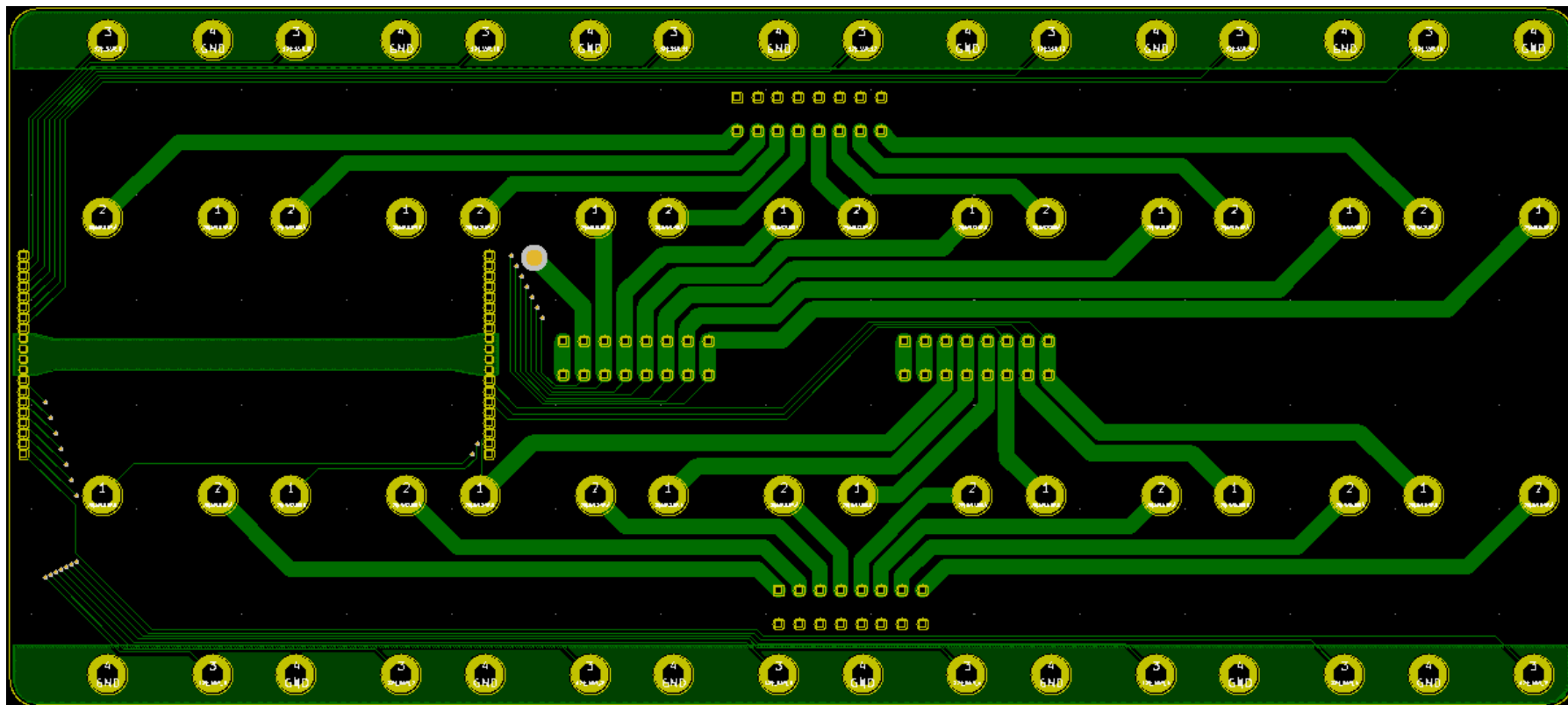
E.1 Schéma obvodu – časť prvá



E.2 Motív DPS - Primárna strana

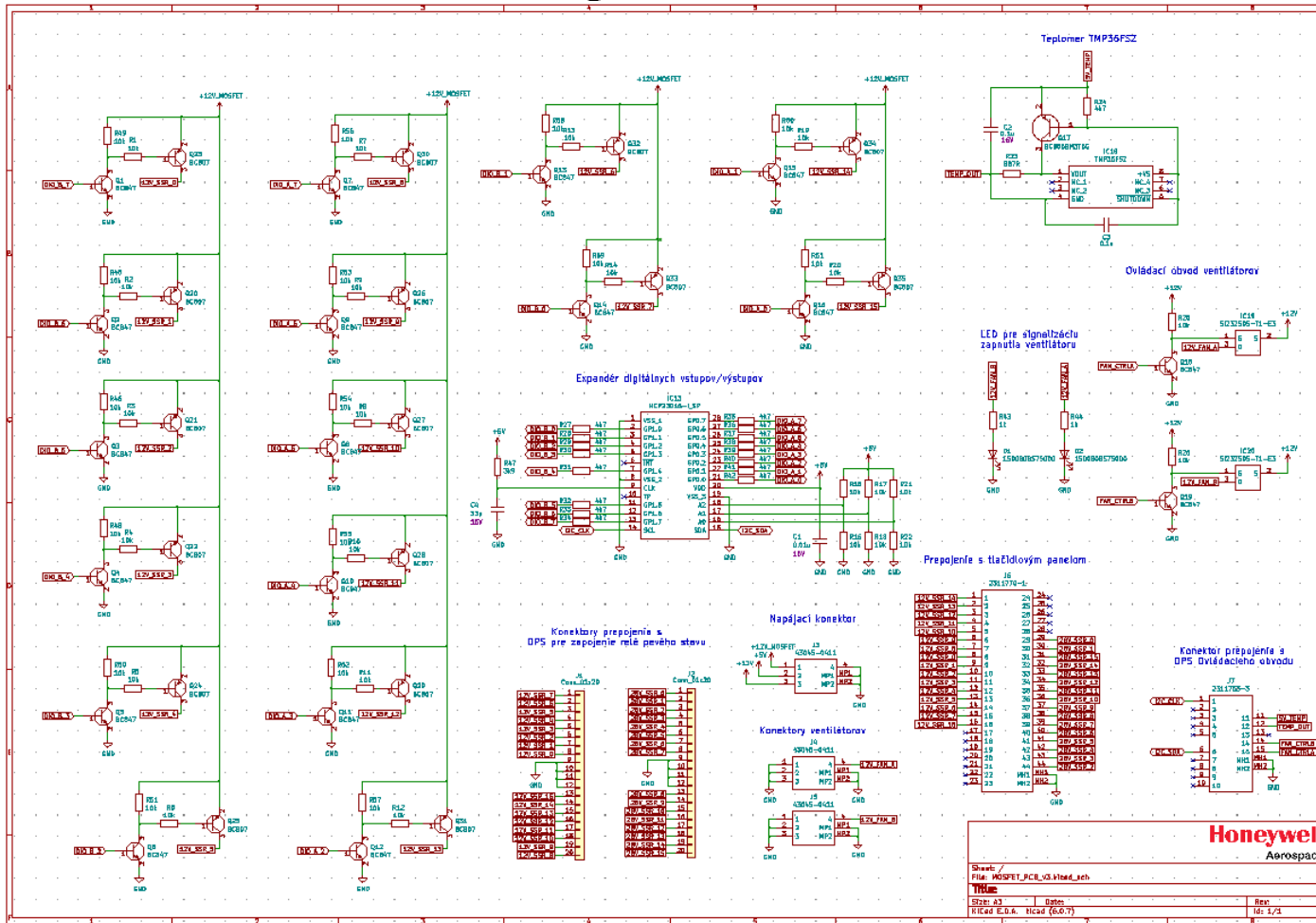


E.3 Motív DPS – Sekundárna strana

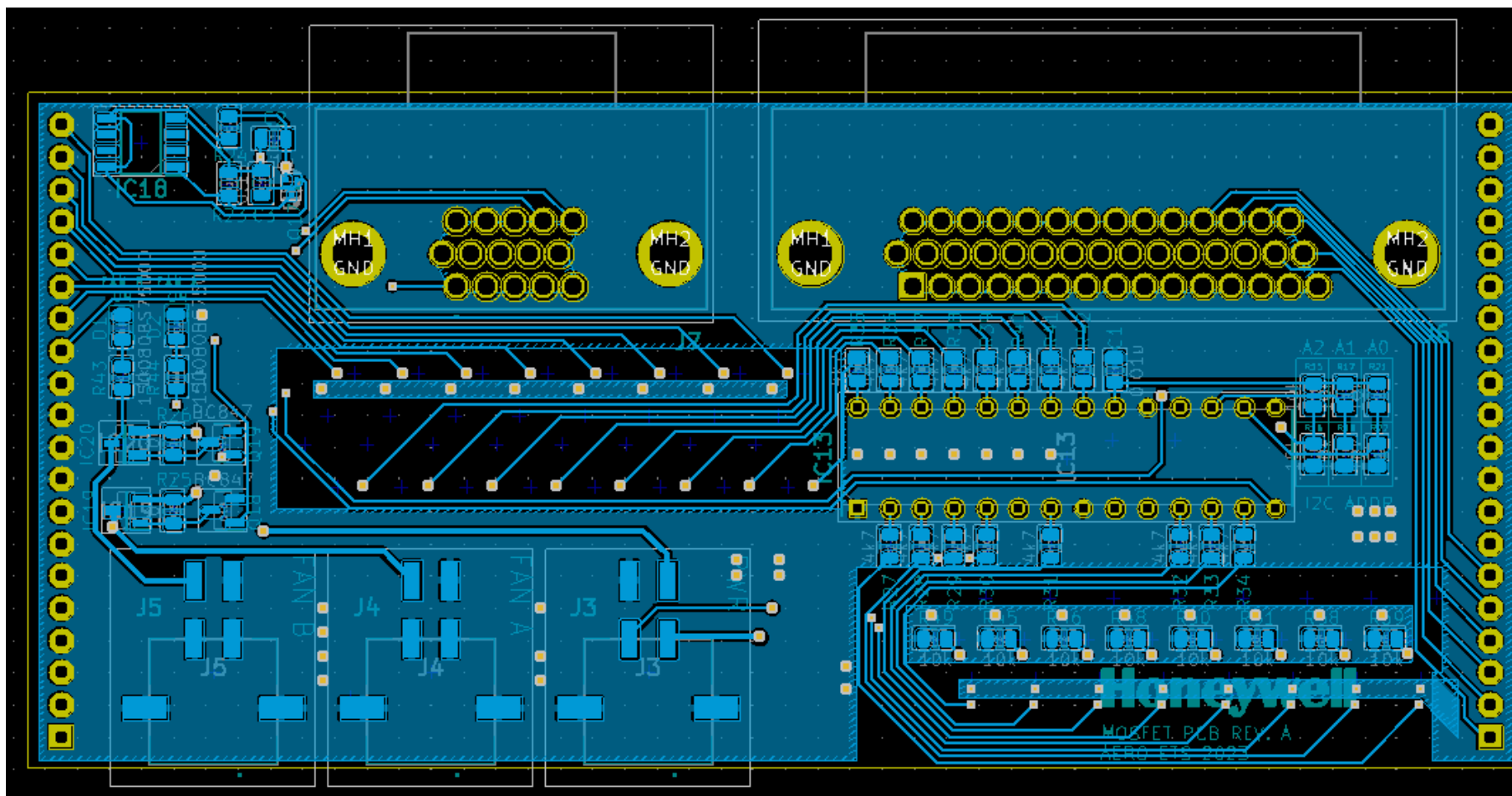


Príloha F - DPS Spínacieho obvodu pre vzdialené ovládanie revízia B

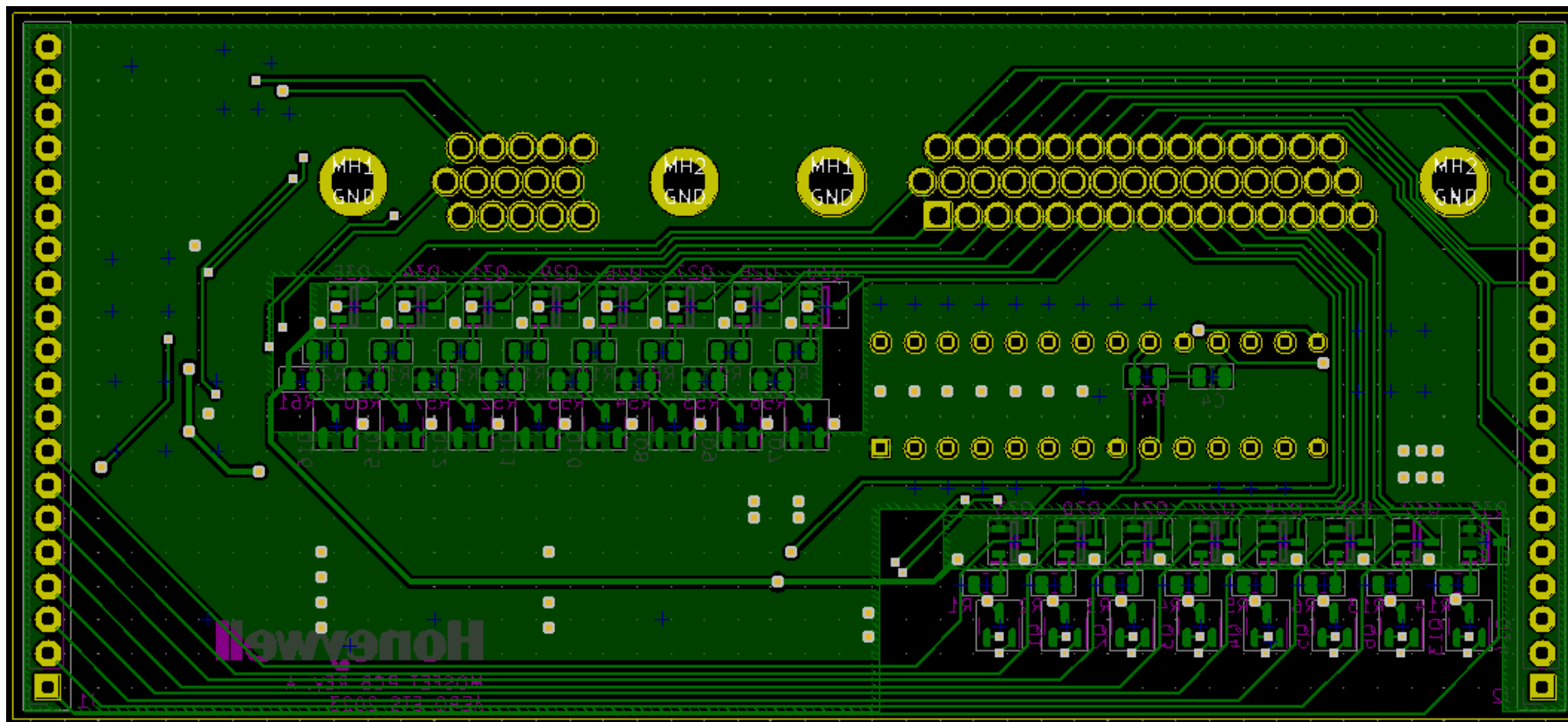
F.1 Schéma obvodu – časť prvá



F.2 Motív DPS - Primárna strana

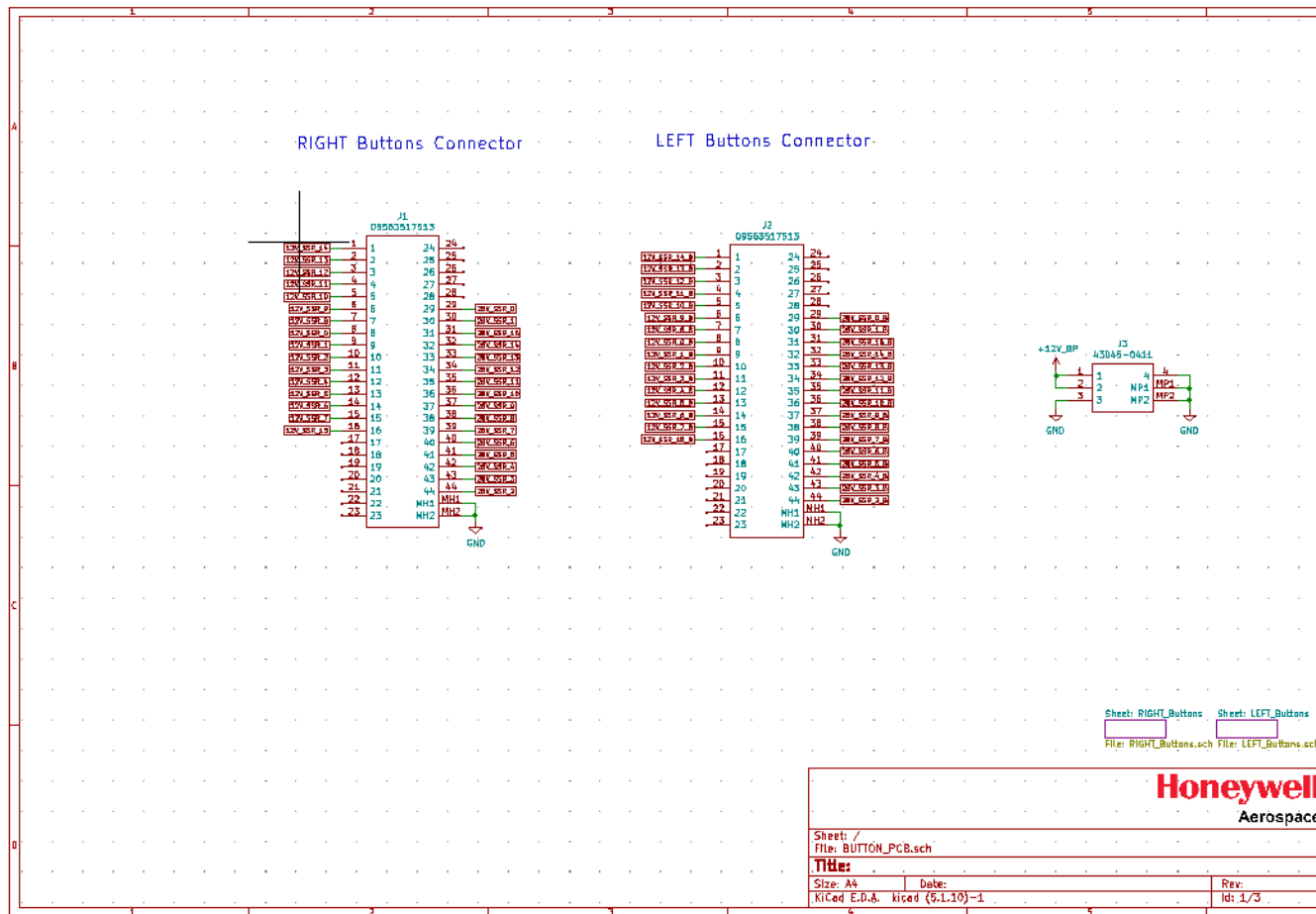


F.3 Motív DPS – Sekundárna strana

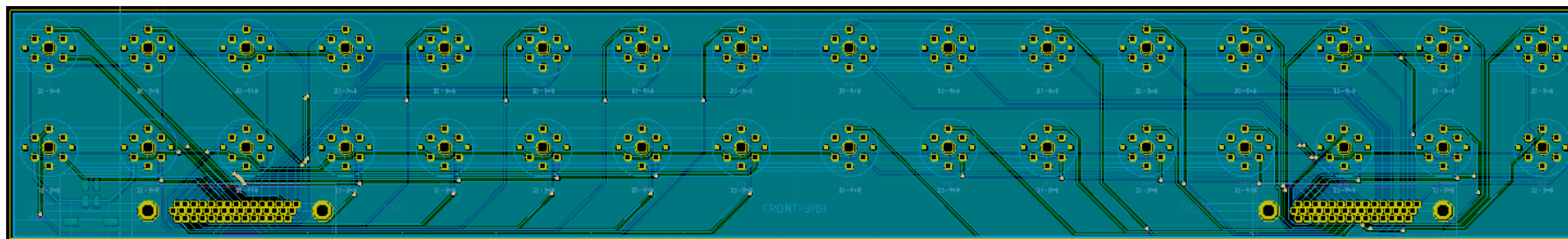


Príloha G - DPS pre tlačidlový panel

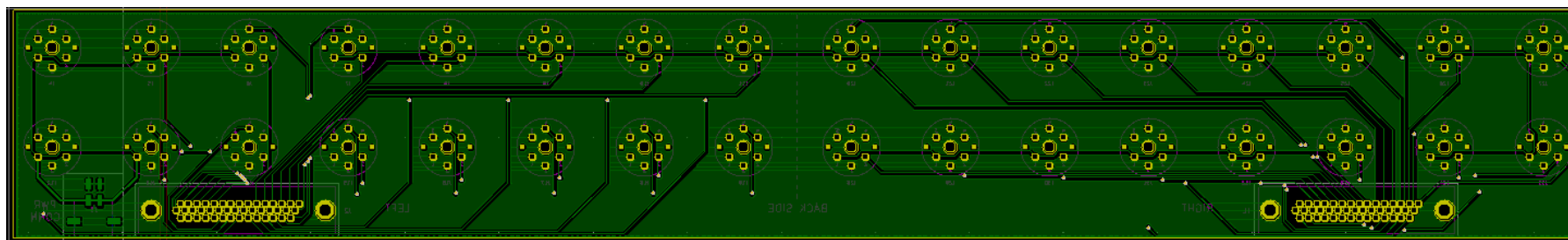
G.1 Schéma DPS



G.2 Motív DPS – Primárna strana



G.3 Motív DPS – Sekundárna strana



**Príloha H - Výrobné dáta pre DPS Ovládacieho
obvodu revízia A sú uložené na priloženom CD**

**Príloha I - Výrobné dáta pre DPS Ovládacieho
obvodu revízia B sú uložené na priloženom CD**

**Príloha J - Výrobné dáta pre DPS pre zapojenie
výkonových spínacích prvkov revízia A sú
uložené na priloženom CD**

**Príloha K - Výrobné dáta pre DPS pre zapojenie
výkonových spínacích prvkov revízia B sú
uložené na priloženom CD**

**Príloha L - Výrobné dáta pre DPS Spínacieho
obvodu revízia A pre vzdialené ovládanie sú
uložené na priloženom CD**

**Príloha M - Výrobné dáta pre DPS Spínacieho
obvodu revízia B pre vzdialené ovládanie sú
uložené na priloženom CD**

**Príloha N - Výrobné dáta pre DPS Tlačidlového
panelu sú uložené na priloženom CD**

