



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

AUTOMATIZOVANÉ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ PRO TESTOVÁNÍ PROGRAMÁTORŮ ELNEC

AUTOMATED MEASURING DEVICE FOR TESTING ELNEC PROGRAMMERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Pražák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Jiří Pražák

ID: 203327

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Automatizované měřicí zařízení pro testování programátorů ELNEC

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vytvoření automatizovaného měřicího zařízení, které bude sloužit pro ověření definovaných parametrů programátorů Elnec. Téma práce je vypsáno ve spolupráci s firmou EPS Czech, s.r.o.

- 1) Popište funkci a základní parametry programátoru Elnec. Popište stávající postup ověření definovaných parametrů programátoru a navrhněte možná zlepšení.
- 2) Proveďte analýzu možných řešení návrhu automatizovaného měřicího zařízení pro ověřování parametrů programátoru Elnec.
- 3) Na základě provedené analýzy řešení z bodu č. 2 zadání, vyberte vhodné řešení automatizovaného měřicího zařízení a toto zařízení navrhněte.
- 4) Proveďte průzkum trhu a realizujete elektronickou část automatizovaného měřicího zařízení.
- 5) Navrhněte a realizujte testovací přípravek sloužící k ověření funkčnosti realizovaného měřicího zařízení.
- 6) Navrhněte a realizujte firmware pro automatizované měřicí zařízení.
- 7) Ověřte funkčnost testovacího přípravku a celého měřicího zařízení.
- 8) Zhodnoťte dosažené výsledky. Srovnejte časovou náročnost kontroly funkčnosti programátoru v případě manuální a navržené automatizované kontroly.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ELNEC - User manual for BeeHive304. Online
https://www.elnec.com/sw/beeHive304_beeprog3_manual_uk.pdf

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 18.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, 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

Tato práce se zabývá automatizováním procesu ověřování parametrů programátorů Elnec BeeHive304. Nejprve je čtenář stručně seznámen s programátorem Elnec BeeHive304. Velký důraz je kladen na dosavadní manuální ověřování parametrů. Cílem práce je navrhnout a realizovat možná řešení automatizace měřicího procesu. V hlavní části práce jsou navrženy a realizovány dva prototypy vhodného automatického elektronického měřicího přístroje pro automatizované měření parametrů programátoru Elnec BeeHive304.

Klíčová slova

Programátor, Elnec, BeeHive304, ověřování, DPS, ESP32, A/D převodník, I/O expander, analogový multiplexor, relé, KiCad

Abstract

This thesis deals with the verification of parameters of Elnec BeeHive304 programmers. First, the reader is briefly introduced to the Elnec BeeHive304 programmer. Much emphasis is placed on the previous manual parameter verification. The aim of the work is to design and implement possible solutions for automation of the measuring process. In the main part of the thesis, two prototypes of a suitable automatic electronic measuring instrument for automated parameter measurement of the Elnec BeeHive304 programmer are designed and implemented.

Keywords

Programmer, Elnec, BeeHive304, verification, PCB, ESP32, A/D converter, I/O expander, analog multiplexer, relay, KiCad

Bibliografická citace

PRAŽÁK, Jiří. *Automatizované měřicí zařízení pro testování programátorů ELNEC* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-05]. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141612>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Soňa Šedivá.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Bc. Jiří Pražák</i>
VUT ID studenta:	<i>203327</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Automatizované měřicí zařízení pro testování programátorů Eltec</i>

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

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

V Brně dne: 15. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí svojí diplomové práce Ing. Soně Šedivé, Ph.D. za cenné rady a korekce této práce. Dále děkuji řediteli společnosti EPS Czech s.r.o. Ing. Lud'ku Mrázkovi za metodické rady a konzultace týkající se návrhu a zhotovení prototypů měřicích zařízení.

V Brně dne: 15. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK	12
ÚVOD	13
1. PROGRAMÁTORY ELNEC	14
1.1 PROGRAMÁTOR BEEHIVE304.....	14
1.1.1 Základní parametry programátoru Elnec BeeHive304.....	16
1.2 OVĚŘENÍ PARAMETRŮ PROGRAMÁTORU BEEHIVE304.....	16
1.2.1 Selftest.....	17
1.2.2 Úplné manuální ověření parametrů.....	18
2. AUTOMATIZOVANÉ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ PRO TESTOVÁNÍ PROGRAMÁTORŮ ELNEC	22
2.1 POŽADAVKY NA ZAŘÍZENÍ.....	22
2.1.1 Rychlost měření.....	22
2.1.2 Přesnost měření	22
2.1.3 Maximální rozměry zařízení a zástavba.....	22
2.1.4 Napájení a konektivita	23
2.1.5 Kalibrační přípravek pro měřicí zařízení.....	23
2.1.6 Indikace probíhajícího měření	24
2.1.7 Diferenční měření	24
2.1.8 Připnutí zátěže a maximálně jednoho měřicího pinu	24
2.1.9 Částečné využití předem definovaných komponent	24
3. MOŽNÁ ŘEŠENÍ AUTOMATICKÉHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ	25
3.1 SČÍTÁNÍ SIGNÁLŮ	25
3.2 ŘEŠENÍ S VÍCE A/D PŘEVODNÍKY	26
3.3 ŘEŠENÍ S RELÉOVÝMI PŘEPÍNAČI.....	27
3.4 ŘEŠENÍ S POUŽITÍM ANALOGOVÝCH MULTIPLEXORŮ.....	28
3.5 VYHODNOCENÍ VHODNOSTI ŘEŠENÍ.....	29
4. NÁVRH AUTOMATICKÉHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ	30
4.1 NÁVRH ŘEŠENÍ S RELÉOVÝMI PŘEPÍNAČI.....	31
4.1.1 Schématický návrh přepínací karty.....	33
4.1.2 Návrh layoutu desky plošných spojů přepínací karty.....	35
4.1.3 Schématický návrh spodní desky plošných spojů.....	36
4.1.4 Návrh layoutu spodní desky plošných spojů	37
4.1.5 Schématický návrh řídicí desky plošných spojů	38
4.1.6 Návrh layoutu řídicí desky plošných spojů	40
4.2 NÁVRH ŘEŠENÍ S POUŽITÍM ANALOGOVÝCH MULTIPLEXORŮ	41
4.2.1 Schématický návrh řešení s použitím analogových multiplexorů.....	41
4.2.2 Návrh layoutu řešení s použitím analogových multiplexorů	44
5. POUŽITÉ KOMPONENTY	45
5.1 SPOLEČNÉ KOMPONENTY PRO OBĚ ŘEŠENÍ	45

5.1.1	<i>Modul s mikrokontrolerem ESP32</i>	45
5.1.2	<i>Jazyčkové relé</i>	45
5.1.3	<i>Regulátor napětí</i>	46
5.1.4	<i>A/D převodník</i>	46
5.1.5	<i>Indikační displej</i>	46
5.1.6	<i>Souhrn společných komponent obou řešení</i>	47
5.2	KOMPONENTY ŘEŠENÍ S RELÉOVÝMI PŘEPÍNAČI	47
5.2.1	<i>I/O Expander</i>	47
5.2.2	<i>Souhrn komponent pro řešení s reléovými přepínači</i>	48
5.3	KOMPONENTY ŘEŠENÍ S ANALOGOVÝMI MULTIPLEXORY	49
5.3.1	<i>Analogový multiplexor</i>	49
5.3.2	<i>Operační zesilovač</i>	49
5.3.3	<i>Modul se Step-Up měničem</i>	49
5.3.4	<i>Souhrn komponent pro řešení s analogovými multiplexory</i>	50
6.	REALIZACE ELEKTRONICKÉ ČÁSTI AUTOMATICKÉHO MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE	51
6.1	REALIZACE ŘEŠENÍ S RELÉOVÝMI PŘEPÍNAČI	51
6.1.1	<i>Realizace přepínací karty</i>	51
6.1.2	<i>Realizace spodní desky</i>	52
6.1.3	<i>Realizace vrchní (řídící) desky</i>	52
6.1.4	<i>Sestava řešení s reléovými přepínači</i>	53
6.2	REALIZACE ŘEŠENÍ S ANALOGOVÝMI MULTIPLEXORY	55
7.	TESTOVACÍ PŘÍPRAVEK PRO MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ	57
7.1	NÁVRH TESTOVACÍHO PŘÍPRAVKU	57
7.1.1	<i>Schématický návrh testovacího přípravku</i>	57
7.1.2	<i>Návrh layoutu testovacího přípravku</i>	59
7.2	POUŽITÉ KOMPONENTY TESTOVACÍHO PŘÍPRAVKU	59
7.2.1	<i>Regulátor napětí</i>	60
7.2.2	<i>Napájecí zdroj a konektor</i>	60
7.2.3	<i>Souhrn komponent pro testovací přípravek</i>	61
7.3	REALIZACE TESTOVACÍHO PŘÍPRAVKU	61
8.	NÁVRH FIRMWARU AUTOMATICKÉHO MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE PRO ŘEŠENÍ S RELÉOVÝMI PŘEPÍNAČI	63
8.1	FUNKCE SETUP	64
8.2	PŘÍJEM A ROZKLÍČOVÁNÍ PŘÍKAZU ZE SÉRIOVÉ LINKY	64
8.3	FUNKCE CALIBRATE	65
8.4	FUNKCE LOAD, GAIN A FACTORY	65
8.5	FUNKCE MEASURE	66
8.6	DISPLEJ	66
8.7	KOMUNIKACE S ELNEC APLIKACÍ PG4UW	69
9.	NÁVRH FIRMWARU AUTOMATICKÉHO MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE PRO ŘEŠENÍ S ANALOGOVÝMI MULTIPLEXORY	70
10.	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI TESTOVACÍHO PŘÍPRAVKU A AUTOMATICKÝCH MĚŘICÍCH ZAŘÍZENÍ	71
10.1	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI TESTOVACÍHO PŘÍPRAVKU	71

10.2	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ S RELÉOVÝMI PŘEPÍNAČI	71
10.2.1	<i>Ověření funkčnosti kalibrační sekvence</i>	72
10.2.2	<i>Ověření funkčnosti měření na požadovaných pinech</i>	73
10.2.3	<i>Ověření funkčnosti připojení zátěže</i>	74
10.2.4	<i>Přesnost měřicího zařízení s reléovými přepínači.....</i>	75
10.3	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ S ANALOGOVÝMI MULTIPLEXORY.....	76
10.3.1	<i>Ověření funkčnosti kalibrační sekvence</i>	76
10.3.2	<i>Ověření funkčnosti měření na požadovaném pinu.....</i>	77
10.3.3	<i>Ověření funkčnosti připojení zátěže</i>	77
10.3.4	<i>Přesnost měřicího zařízení s analogovými multiplexory.....</i>	78
11.	ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	80
11.1	POROVNÁNÍ ČASOVÉ NÁROČNOSTI	81
	ZÁVĚR	82
	LITERATURA.....	83
	SEZNAM PŘÍLOH.....	86

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Programátor Elnec BeeHive304	15
Obr. 2 – Příklad druhů programovacích patič	15
Obr. 3 – Přípravek pro ověřování parametrů dodávaný výrobcem	17
Obr. 4 – Přípravek sloužící k úplnému manuálnímu ověření parametrů.....	18
Obr. 5 – Ověřovací řetězec pro ověření parametrů programátoru BeeHive304.....	19
Obr. 6 – Výzva od desktopové aplikace obsluhy	19
Obr. 7 – Proces ověření parametrů	20
Obr. 8 – Výstřížek z ověřovacího protokolu programátoru BeeHive304	21
Obr. 9 – Rozložení pinů desky pro manuální ověřování parametrů.....	23
Obr. 10 – Schéma řešení pomocí sčítání signálů	25
Obr. 11 – Možné řešení s více A/D převodníky.....	26
Obr. 12 – Schéma řešení s reléovými přepínači.....	27
Obr. 13 – Schéma řešení s multiplexory	28
Obr. 14 – Blokové schéma zařazení měřicího zařízení do systému	30
Obr. 15 – Rozměry jazýčkového relé SIP-1A05 [4]	32
Obr. 16 – Schéma zapojení přepínací karty	33
Obr. 17 – Layout DPS přepínací karty.....	36
Obr. 18 – Schéma zapojení spodní desky	37
Obr. 19 – Layout DPS spodní desky.....	38
Obr. 20 – Schéma zapojení řídicí (vrchní) desky.....	40
Obr. 21 – Layout DPS řídicí (vrchní)	41
Obr. 22 – Zjednodušené schéma zapojení s použitím analogových multiplexorů	42
Obr. 23 – Layout řešení s použitím analogových multiplexorů	44
Obr. 24 – Modul s mikrokontrolerem ESP32	45
Obr. 25 – I ² C OLED displej.....	46
Obr. 26 – Zjednodušené schéma expanderu [5].....	48
Obr. 27 – Step-Up modul [22]	49
Obr. 28 – Realizace přepínací karty.....	51
Obr. 29 – Realizace spodní DPS.....	52
Obr. 30 – Vrchní pohled na řídicí desku.....	53
Obr. 31 – Spodní pohled na řídicí desku.....	53
Obr. 32 – Sestava řešení s reléovými přepínači (boční pohled).....	54
Obr. 33 – Zasazení Elnec přípravku pro úplné manuální ověření parametrů do sestavy	54
Obr. 34 – Vrchní pohled na řešení s analogovými multiplexory	55
Obr. 35 – Vrchní pohled na řešení s analogovými multiplexory	56
Obr. 36 – Spodní pohled na řešení s analogovými multiplexory	56
Obr. 37 – Schéma zapojení testovacího přípravku pro měřicí zařízení.....	58
Obr. 38 – Návrh layoutu testovacího přípravku.....	59
Obr. 39 – Nastavení pevné výstupné hodnoty Step-Down měniče [24]	60
Obr. 40 – Napájecí zdroj a konektor [25][26].....	60
Obr. 41 – Realizace testovacího přípravku	61
Obr. 42 – Připojení testovacího přípravku k oběma řešením měřicího zařízení	62
Obr. 43 – Zjednodušený diagram toku programu	63
Obr. 44 – Diagram průběhu funkce setup	64
Obr. 45 – Dělení přijatého řetězce ze sériové linky	64
Obr. 46 – Zobrazení firemního loga na displeji měřicího přístroje.....	67

Obr. 47 – Zobrazení stavových hlášek na displeji ve stavu STANDBY	67
Obr. 48 – Zobrazení stavové hlášky a průběhu kalibračního měření	68
Obr. 49 – Zobrazení stavových hlášek při a po měření požadovaného pinu	68
Obr. 50 – Ověření funkčnosti testovacího (kalibračního) přípravku	71
Obr. 51 – Spuštění kalibrační sekvence	72
Obr. 52 – Kalibrační rutina	73
Obr. 53 – Měřicí sekvence	74
Obr. 54 – Připojení a odpojení zátěže	74
Obr. 55 – Indikace připojení/odpojení zátěže	75
Obr. 56 – Kalibrační sekvence	76
Obr. 57 – Měřicí sekvence	77
Obr. 58 – Připojení a odpojení zátěže	77
Obr. 59 – Indikace připojení/odpojení zátěže	78

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Souhrn společných komponent obou řešení	47
Tab. 2 – Souhrn komponent pro řešení s reléovými přepínači.....	48
Tab. 3 – Souhrn komponent pro řešení s analogovými multiplexory	50
Tab. 4 – Souhrn komponent pro testovací přípravek	61
Tab. 5 – Přesnost měřicího zařízení s reléovými přepínači.....	75
Tab. 6 – Přesnost měřicího zařízení s analogovými multiplexory	78
Tab. 7 – Porovnání požadavků obou realizací	80

ÚVOD

Tato diplomová práce bude pojednávat o manuálním ověřování parametrů programátorů Elnec BeeHive304 a možné automatizaci tohoto procesu pomocí automatického měřicího zařízení. Programátor slouží k programování NAND Flash pamětí a pravidelné ověřování jeho parametrů je nezbytné pro udržení správných provozních podmínek programátoru dle kalibračního listu. Cílem práce je navrhnout, zkonstruovat a otestovat automatický elektronický měřicí přístroj, který nahradí dosavadní časově náročné manuální ověřování parametrů.

Nejprve bude programátor BeeHive304 stručně představen a budou popsány jeho základní parametry. Důraz bude kladen především na otázku dosavadního manuálního ověřování parametrů programátoru.

Před návrhem automatického měřicího zařízení bude nezbytné vytyčit požadavky pro tento přípravek, které bude při následném návrhu třeba dodržet. Tyto požadavky budou vycházet převážně ze zadání od firmy (rychlost měření, konektivita, rozměry, atd.).

V této práci bude proveden rozbor možných řešení, jak k problematice automatického elektronického měřicího zařízení přistupovat. Cílem je vybrat nejvhodnější řešení splňující požadavky, které bude následně navrženo a realizováno.

Hlavní částí práce bude následně samotný návrh vyhovujícího řešení, výběr vhodných komponent a následná realizace měřicího přípravku.

Pro účely oživování, testování a kalibraci měřicího přípravku bude taktéž navržen a realizován testovací přípravek, který bude využíván při prověření funkčnosti měřicího zařízení.

Další důležitou součástí této práce bude návrh firmwaru automatického měřicího zařízení a ověření funkčnosti celého měřicího přípravku.

Práce bude zakončena zhodnocením dosažených výsledků a porovnáním časové náročnosti dosavadního manuálního ověřování parametrů s automatickým ověřováním.

1. PROGRAMÁTORY ELNEC

Elnec je slovenská firma zabývající se mimo jiné i poskytováním řešení pro programování NAND Flash pamětí, mikrokontrolérů a programovatelných obvodů obecně. Výjimečnost oproti konkurenčním výrobcům tkví především v široké kompatibilitě podporovaných typů čipů. Firma Elnec vyrábí mnoho typů programátorů, které se dají použít nejen pro stolní programování (obsluha zasazuje čipy do patič programátorů), ale hlavně pro automatizované programování, které se využívá především při programování velkého množství čipů. Pro účely této práce je stěženi model BeeHive304 od již zmíněného výrobce. Více informací je dostupných na stránkách výrobce: <https://www.elnec.com/sk/>.

1.1 Programátor BeeHive304

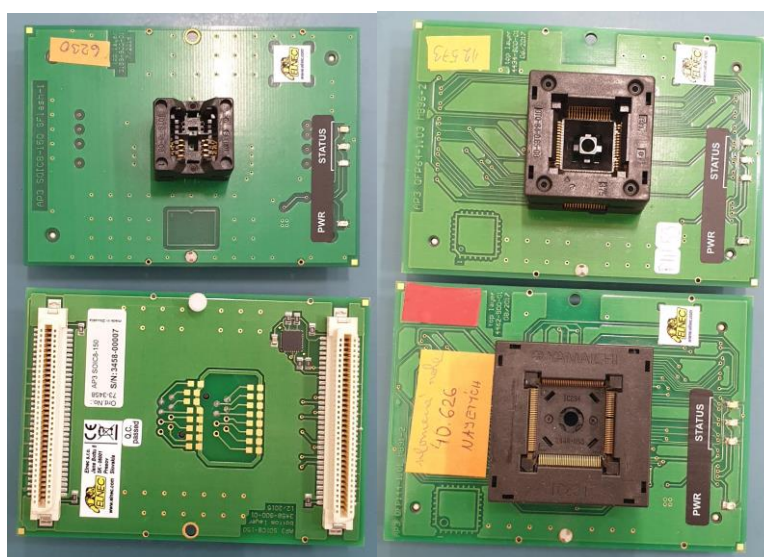
BeeHive304 je v současné době nejvýkonnější programátor vyvinutý firmou Elnec. Tento programátor slouží k programování NAND Flash pamětí. Programátor lze použít nejen pro ruční programování, kde je nutná obsluha pro vkládání čipů do jednotlivých programovacích patič. Vhodnější využití programátoru je osazení do automatických programovacích automatů, toto řešení je využíváno pro řešení, kde je požadována vysoká propustnost naprogramovaných čipů. Výrobce poskytuje k tomuto typu programátoru pouze uživatelskou příručku [1].

Programátor BeeHive304 obsahuje čtyři na sobě nezávislé stanice, které jsou osazeny programovacími paticemi. Programovací patice pracují v asynchronním režimu, tento režim dovoluje programovat čipy nezávisle na sobě. Programování čipu je vždy programově spuštěno po vložení čipu do programovací patice, začátek programování v jedné programovací patici je nezávislý na fázi ve které se nachází programování čipů na ostatních paticích.



Obr. 1 – Programátor Elneec BeeHive304

Na obrázku (*Obr.1*) je vyobrazen programátor BeeHive304, na kterém jsou viditelné čtyři programovací stanice, jedna ze stanic je na obrázku pod číslem 1. Stanice umožňují připojení programovacích patic nebo přípravku pro ověření parametrů daného programátoru. Přípravek pro ověření parametrů programátoru je na obrázku viditelný pod číslem 3. Ve dvou případech je programovací stanice chráněna protiprašným krytem, na obrázku pod číslem 2, těmito ochrannými krytkami je stanice osazena, pokud není připojena ani programovací patice ani přípravek pro ověřování parametrů. Některé z možných druhů programovacích patic jsou vyobrazeny na následujícím obrázku (*Obr.2*).



Obr. 2 – Příklad druhů programovacích patic

Programovací patice, která je vyobrazena na levé části obrázku (*Obr.2*), slouží k programování malých čipů, dále je zde také vyobrazen pohled na spodní část patice, která obsahuje konektor sloužící k připojení programátoru. Naopak patice v pravé části obrázku je využívána k programování velkých čipů. Výrobce programátorů Elnec nabízí velkou škálu těchto patic podporující různé druhy čipů. Výrobce také nabízí zakázkovou výrobu patic a dodatečnou kompatibilitu díky čemuž je možné programovat nejrůznější druhy čipů.

1.1.1 Základní parametry programátoru Elnec BeeHive304

Následující podkapitola je zaměřena na základní parametry programátoru BeeHive304, které výrobce veřejně udává na svých internetových stránkách [2].

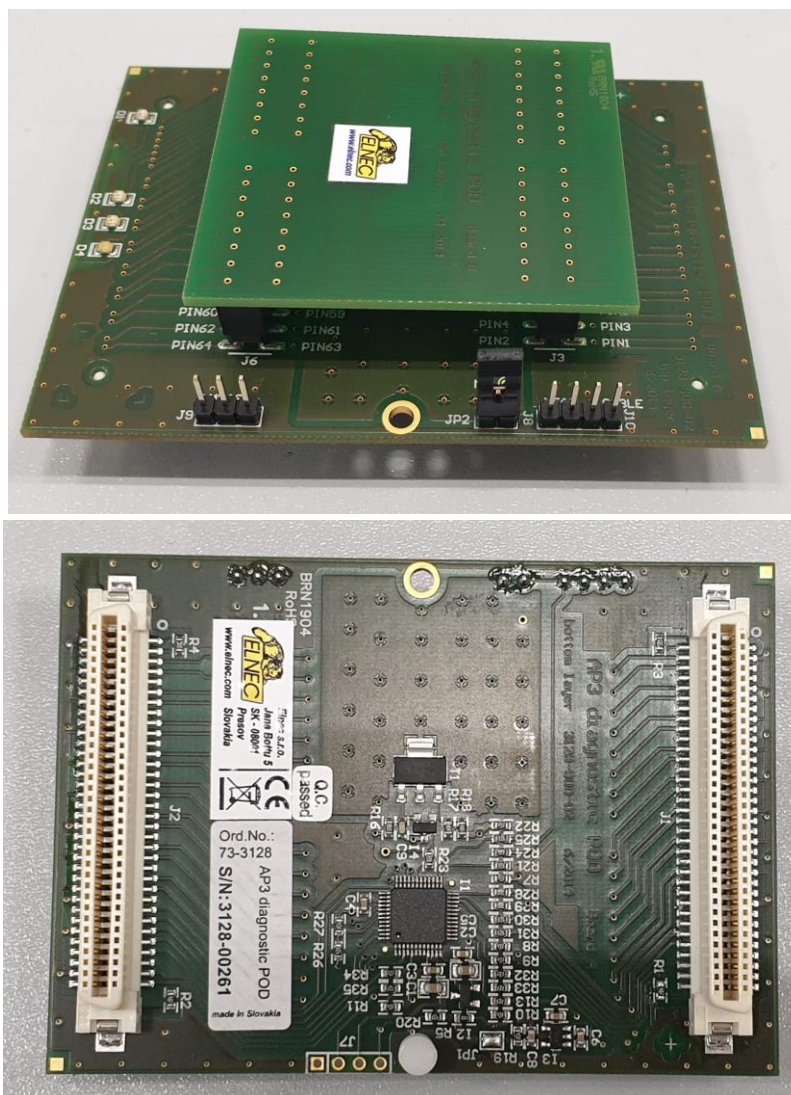
Zmíněný programátor vychází z designu programátoru BeeProg3. Jak již bylo zmíněno, programátor dokáže pracovat v asynchronním režimu a díky tomu je možnost provádět programování na více stanicích nezávisle na sobě. Stejně jako programátor BeeProg3 je i BeeHive304 založen na FPGA (programovatelné hradlové pole), ARM procesoru a interním 128 GB SSD disku. Kontinuální rychlost zápisu programu přesahuje 31 MB/s. Díky takto velkým rychlostem je programovací čas extrémně krátký. Za méně než 250 sekund je možné zapsat až 8 GB dat do eMMC NAND Flash paměti, pokud je tato rychlost programovanou pamětí podporována. Velkou výhodou je modulární konstrukce hardwaru, jelikož programovací stanice pracují nezávisle je možnost nepřetržitého provozu i při poruše na jedné ze stanic. Tento programátor je kompatibilní s osobními počítači s operačním systémem Microsoft Windows. Propojení osobního počítače a programátoru je umožněno přes port USB 2.0 nebo přes ethernet, na kterém je dosahováno rychlosti komunikace až 1 Gb/s, přičemž k jednomu osobnímu počítači je možné připojit maximálně dva programátory BeeHive304. Tento programátor dále disponuje banánkovým konektorem, díky kterému má obsluha možnost se připojit s ESD náramek, programátor obsahuje také ochranné obvody sloužící k ochraně proti ESD až do 15 kV. Programovací patice podporují pouzdra PDIP, PLCC, JLCC, SOIC, SDIP, SOP, PSOP, SSOP, TSOP, TSOPII, TSSOP, QFP, PQFP, TQFP, VQFP, QFN (MLF), SON, BGA, EBGA, FBGA, VFBGA, UBGA, FTBGA, LAP, CSP, SCSP, LQFP, MQFP, HVQFN, QLP, QIP a další.

1.2 Ověření parametrů programátoru BeeHive304

Ověřováním parametrů se rozumí měření napěťových referencí stanic programátoru. Jelikož se jedná o velmi citlivé zařízení, jsou udávány intervaly, kdy musí docházet k ověření parametrů tohoto programátoru. Výrobce společně s programátorem dodává také přípravek pro ověření těchto parametrů včetně aplikace, která umožňuje průchod ověřením. Jsou dvě možnosti ověření parametrů:

- I. Selftest
- II. Úplné manuální ověření parametrů

Na následujícím obrázku je zachycen přípravek pro ověřování parametrů dodávaný výrobcem.



Obr. 3 – Přípravek pro ověřování parametrů dodávaný výrobcem

Tento přípravek lze rozložit, jelikož vrchní část je snímatelná. Pro případ selftestu je použit celý přípravek, tak jak je zobrazeno na *Obr.3*. Na obrázku je zachycen jak vrchní pohled přípravku, tak i pohled spodní. Pro případ úplného manuálního ověření parametrů je použita pouze spodní deska plošných spojů, vrchní desku plošných spojů je třeba odpojit.

1.2.1 Selftest

V případě ověřování parametrů pomocí selftestu je, jak již bylo zmíněno, nutné použít celý tento přípravek. Přípravek je nutné postupně připojit do jednotlivých stanic programátoru, stejně jako programovací patice. Následně pomocí desktopové aplikace PG4UW dodávané výrobcem, je spuštěn automatický ověřovací test parametrů.

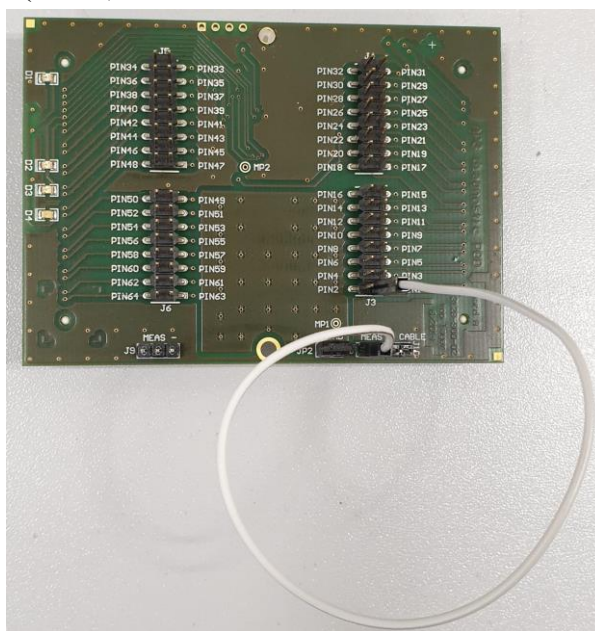
Tento test je rychlý, trvá v řádu jednotek minut a v provozu se provádí přibližně

jednou týdně. Výstupem testu je pouze informace v aplikaci, zda je programátor v pořádku, či nikoli. Ve spodní části předchozího obrázku (*Obr.3*) je zachycena spodní strana ověřovacího přípravku. Je zde opět viditelný konektor pro připojení do stanice.

1.2.2 Úplné manuální ověření parametrů

Jak již bylo zmíněno je nutné jednou za delší časový úsek, nejčastěji jednou za rok, provést na programátorech Elnec úplné manuální ověření parametrů.

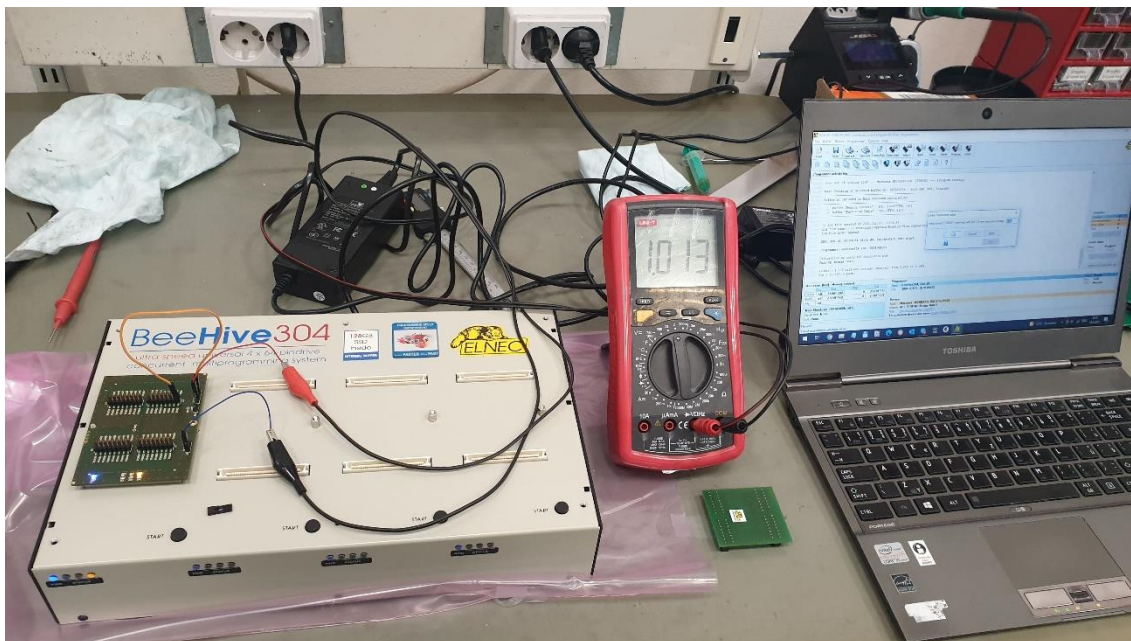
K tomuto ověření parametrů je nezbytná obsluha sestávající se z jednoho až dvou kompetentních pracovníků. Před začátkem procesu ověřování je nezbytné odpojit vrchní část desky (*Obr.3*), samotná spodní část ověřovacího přípravku je zachycena na následujícím obrázku (*Obr.4*).



Obr. 4 – Přípravek sloužící k úplnému manuálnímu ověření parametrů

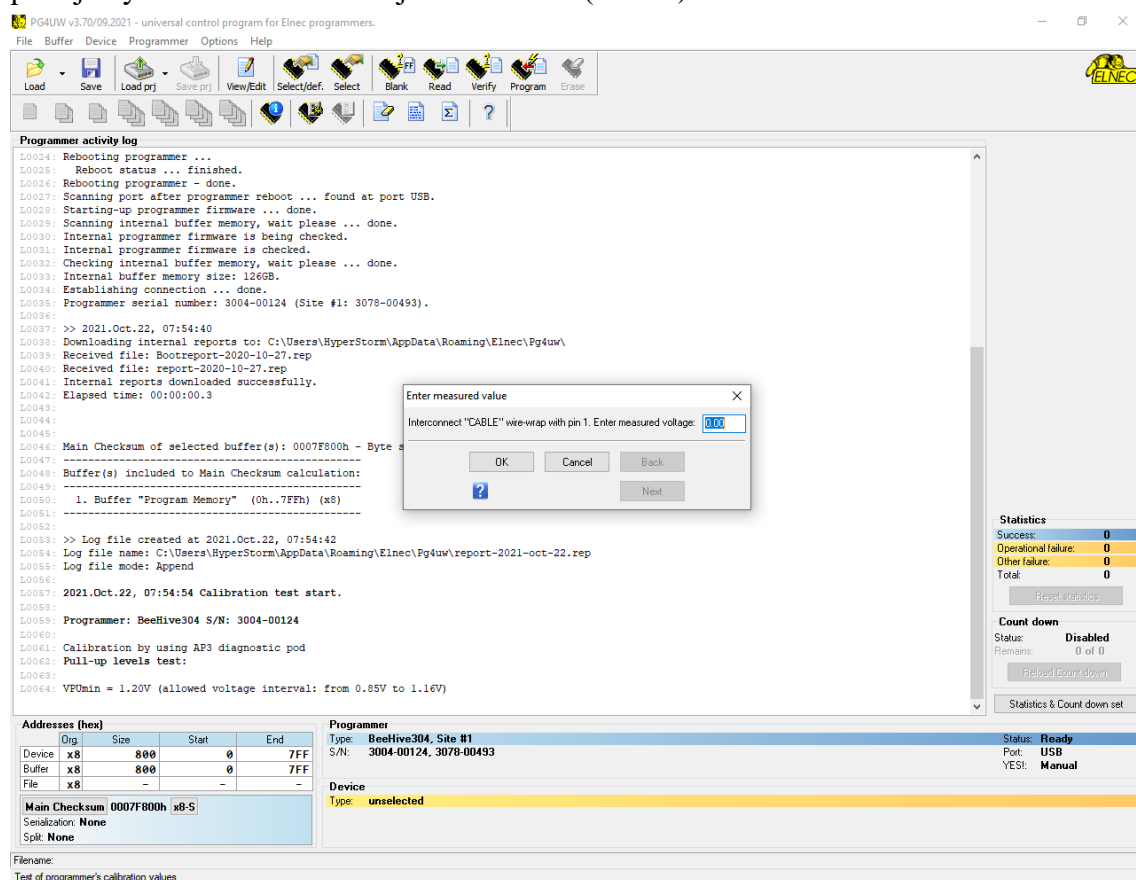
Tento přípravek, shodně jako v případě selftestu, je vložen do stanice programátoru.

V další fázi je programátor Elnec BeeHive304 připojen k osobnímu počítači za pomoci USB rozhraní. Na osobním počítači je opět spuštěna desktopová aplikace PG4UW dodávaná výrobcem. Další nezbytnou komponentou pro ověření parametrů programátoru je voltmetr, který je připojen na piny *MEAS + CABLE* a *MEAS* ověřovacího přípravku. Tento použitý voltmetr nemá podle uživatelské příručky výrobce nijak specifikované parametry. Ověřovací řetězec je vyobrazen na *Obr.5*.



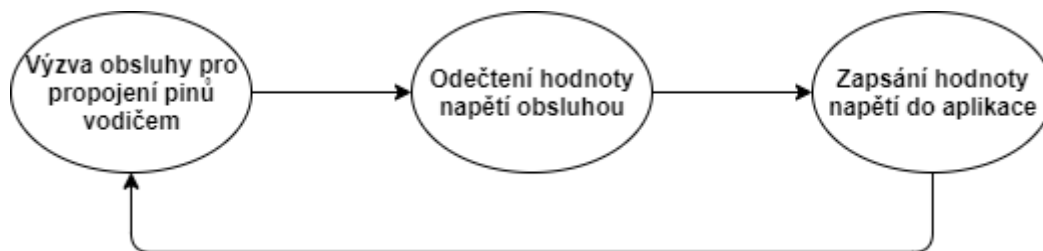
Obr. 5 – Ověřovací řetězec pro ověření parametrů programátoru BeeHive304

Aplikace PG4UW postupně vyzývá obsluhu k propojování pinu *MEAS* + *CABLE* a pinů 1 - 64 na přípravku za pomoci vodiče. Desktopová aplikace s výzvou pro propojení pinů je vyobrazena na následujícím obrázku (Obr. 6).



Obr. 6 – Výzva od desktopové aplikace obsluhy

Proces ověření parametrů (napět'ových referencí) tedy probíhá cyklicky následovně:



Obr. 7 – Proces ověření parametrů

- I. Obsluha je aplikací vyzvána k propojení pinů na ověřovacím přípravku
 - II. Je odečtena hodnota napětí z voltmetru
 - III. Naměřená hodnota je obsluhou zapsána do aplikace
- Tento postup je opakován. Postupně je propojeno všech 64 pinů přípravku s pinem *MEAS + CABLE*.

Na všech 64 pinech programátoru je vždy nastavena shodná hodnota napětí. Měřená hodnota na jednotlivých pinech je odlišná jen nepatrně (nejčastěji v řádu setin voltu). Po změření všech 64 napětí z jednotlivých pinů je na programátoru nastaveno další napětí (napětí jsou vypsána v pěti skupinách pod tímto odstavcem) a celý cyklus je opakován. Programátorem jsou postupně nastavována napětí na všech pinech ověřovacího přípravku, a to v rozsahu 1 – 21 V.

Programátor ověřuje 5 základních skupin signálů:

- I. **Pull-up napětí** – ověřováno pro napětí $VPU_{min} = 1,20$ V, $VPU_{nom} = 3,30$ V a $VPU_{max} = 5,00$ V.
- II. **Stav high TTL komunikace** – ověřováno pro napětí $VH_{min} = 1,20$ V, $VH_{nom} = 3,30$ V a $VH_{max} = 5,00$ V.
- III. **Napájecí napětí VCC1** – ověřováno pro napětí $VCC1_{min} = 1,20$ V, $VCC1_{nom} = 3,30$ V a $VCC1_{max} = 6,50$ V.
- IV. **Napájecí napětí VCC2** – ověřováno pro napětí $VCC2_{min} = 1,20$ V, $VCC2_{nom} = 3,30$ V a $VCC2_{max} = 6,50$ V.
- V. **Programovacího napětí VPP** – ověřováno pro napětí $VPP_{min} = 1,20$ V, $VPP_{nom} = 12$ V a $VPP_{max} = 21$ V.

Na následujícím obrázku je vyobrazen výřez z ověřovacího protokolu, na němž je demonstrována první ze skupin měřených signálů.


```

Pull-up levels test:

VPUmin=1.20V (allowed voltage interval: from 0.85V to 1.16V *)
Pin 1=pass, Pin 2=pass, Pin 3=pass, Pin 4=pass, Pin 5=pass, Pin 6=pass, Pin 7=pass
Pin 8=pass, Pin 9=pass, Pin 10=pass, Pin 11=pass, Pin 12=pass, Pin 13=pass, Pin 14=pass
Pin 15=pass, Pin 16=pass, Pin 17=pass, Pin 18=pass, Pin 19=pass, Pin 20=pass, Pin 21=pass
Pin 22=pass, Pin 23=pass, Pin 24=pass, Pin 25=pass, Pin 26=pass, Pin 27=pass, Pin 28=pass
Pin 29=pass, Pin 30=pass, Pin 31=pass, Pin 32=pass, Pin 33=pass, Pin 34=pass, Pin 35=pass
Pin 36=pass, Pin 37=pass, Pin 38=pass, Pin 39=pass, Pin 40=pass, Pin 41=pass, Pin 42=pass
Pin 43=pass, Pin 44=pass, Pin 45=pass, Pin 46=pass, Pin 47=pass, Pin 48=pass, Pin 49=pass
Pin 50=pass, Pin 51=pass, Pin 52=pass, Pin 53=pass, Pin 54=pass, Pin 55=pass, Pin 56=pass
Pin 57=pass, Pin 58=pass, Pin 59=pass, Pin 60=pass, Pin 61=pass, Pin 62=pass, Pin 63=pass
Pin 64=pass

VPUnom=3.30V (allowed voltage interval: from 2.35V to 3.18V *)
Pin 1=pass, Pin 2=pass, Pin 3=pass, Pin 4=pass, Pin 5=pass, Pin 6=pass, Pin 7=pass
Pin 8=pass, Pin 9=pass, Pin 10=pass, Pin 11=pass, Pin 12=pass, Pin 13=pass, Pin 14=pass
Pin 15=pass, Pin 16=pass, Pin 17=pass, Pin 18=pass, Pin 19=pass, Pin 20=pass, Pin 21=pass
Pin 22=pass, Pin 23=pass, Pin 24=pass, Pin 25=pass, Pin 26=pass, Pin 27=pass, Pin 28=pass
Pin 29=pass, Pin 30=pass, Pin 31=pass, Pin 32=pass, Pin 33=pass, Pin 34=pass, Pin 35=pass
Pin 36=pass, Pin 37=pass, Pin 38=pass, Pin 39=pass, Pin 40=pass, Pin 41=pass, Pin 42=pass
Pin 43=pass, Pin 44=pass, Pin 45=pass, Pin 46=pass, Pin 47=pass, Pin 48=pass, Pin 49=pass
Pin 50=pass, Pin 51=pass, Pin 52=pass, Pin 53=pass, Pin 54=pass, Pin 55=pass, Pin 56=pass
Pin 57=pass, Pin 58=pass, Pin 59=pass, Pin 60=pass, Pin 61=pass, Pin 62=pass, Pin 63=pass
Pin 64=pass

VPUmax=5.00V (allowed voltage interval: from 3.56V to 4.82V *)
Pin 1=pass, Pin 2=pass, Pin 3=pass, Pin 4=pass, Pin 5=pass, Pin 6=pass, Pin 7=pass
Pin 8=pass, Pin 9=pass, Pin 10=pass, Pin 11=pass, Pin 12=pass, Pin 13=pass, Pin 14=pass
Pin 15=pass, Pin 16=pass, Pin 17=pass, Pin 18=pass, Pin 19=pass, Pin 20=pass, Pin 21=pass
Pin 22=pass, Pin 23=pass, Pin 24=pass, Pin 25=pass, Pin 26=pass, Pin 27=pass, Pin 28=pass
Pin 29=pass, Pin 30=pass, Pin 31=pass, Pin 32=pass, Pin 33=pass, Pin 34=pass, Pin 35=pass
Pin 36=pass, Pin 37=pass, Pin 38=pass, Pin 39=pass, Pin 40=pass, Pin 41=pass, Pin 42=pass
Pin 43=pass, Pin 44=pass, Pin 45=pass, Pin 46=pass, Pin 47=pass, Pin 48=pass, Pin 49=pass
Pin 50=pass, Pin 51=pass, Pin 52=pass, Pin 53=pass, Pin 54=pass, Pin 55=pass, Pin 56=pass
Pin 57=pass, Pin 58=pass, Pin 59=pass, Pin 60=pass, Pin 61=pass, Pin 62=pass, Pin 63=pass
Pin 64=pass

```

Obr. 8 – Výstřížek z ověřovacího protokolu programátoru BeeHive304

Mimo hodnoty pull-up napětí jsou na předchozím obrázku (*Obr.8*) definovány i toleranční pásma, ve kterých jsou naměřená napětí považována za přijatelné („pass“). Po proměření všech pěti signálových skupin je obsluha vyzvána ke zkratování pinů LOAD, které připojují zatěžovací odpor, a celý tento proces probíhá znovu.

Pro proměření této jedné ze čtyř stanic programátoru BeeHive304 je nutné provést velký počet měření a zaznamenání naměřených hodnot napětí do aplikace, konkrétně 1920 (15 měření pro každý pin (64) se zátěží (*LOAD*) a bez). Pro ověření celého programátoru je nutné provést 7680 měření a zaznamenání hodnoty do aplikace. V případě programovacího automatu s konfigurací tří programátorů BeeHive304 je nutné tento počet měření ještě rapidně zvýšit. Tři programátory BeeHive304 jsou dohromady osazeny dvanácti stanicemi. Jak již bylo zmíněno na každé ze stanic je nutné provést 1920 měření, což činí 23040 měření u jednoho programovacího automatu. Zkušené obsluze složené ze dvou pracovníků trvá naměřit a zaznamenat jednu hodnotu průměrně 5 sekund. Pro většinu provozoven je nepředstavitelné odstavit programovací automat na takto dlouhou dobu (4 – 5 dnů pro dva operátory).

Jelikož je čas, který je potřebný pro úplné ověření programátoru velký (řády jednotek hodin), je neudržitelné toto manuální ověření provádět na programovacích automatech s vysokou propustností.

2. AUTOMATIZOVANÉ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ PRO TESTOVÁNÍ PROGRAMÁTORŮ ELNEC

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole (1.2.2), je velmi časově náročné provádět manuální ověření parametrů programátoru Elneec. V průmyslové praxi není možné na takto dlouhou dobu odstavit automat a zaměstnat dvojici operátorů manuálním ověřovacím procesem. Je třeba vyvinout takové automatizované řešení pro ověřování parametrů, které celý tento proces výrazně urychlí. Na vývoj a konstrukci je zaměřena tato diplomová práce.

Cílem je navrhnout a vyrobit takové zařízení, které obsluha pouze vloží do programovací stanice. Podle výzev desktopové aplikace dodávané s programátorem automatizované měřicí zařízení naměří hodnoty napětí na příslušném pinu a předá ji zpět aplikaci, ať již s připojenou zátěží, či nikoli.

2.1 Požadavky na zařízení

Na začátku vývoje je nezbytné vytyčit požadavky na zařízení jako jsou rychlost měření, maximální rozměry, napájení zařízení, konektivita a další.

2.1.1 Rychlost měření

Jak již bylo nastíněno v předchozí kapitole, manuální ověřování parametrů je v průmyslu nevyhovující a velmi časově náročné. Požadavek na rychlost je tedy zcela na místě a cílem měřicího zařízení je provést ověření parametrů jednoho programátoru BeeHive304 (4 programovací stanice o celkovém počtu měření 7680) v čase menším než jedna hodina.

2.1.2 Přesnost měření

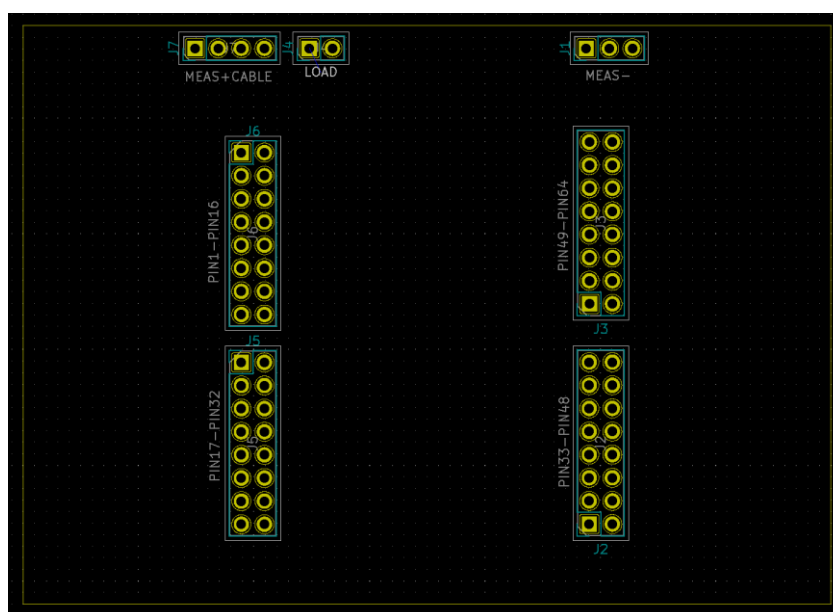
Neopomenutelným parametrem měřicího zařízení je jeho přesnost měření. Výrobce Elneec neudává přesné požadavky na měřicí přístroj, se kterým má být úplné manuální ověření parametrů prováděno. Z tohoto důvodu byl požadavek na přesnost měření stanoven na ± 10 mV. I přesto je třeba zhotovit co možná nejpřesnější měřicí přístroj.

2.1.3 Maximální rozměry zařízení a zástavba

Jelikož ověřování programátorů probíhá přímo v programovacím automatu, je nezbytné stanovit maximální přípustné rozměry automatizovaného ověřovacího zařízení. Tyto rozměry byly naměřeny přímo na automatu HyperStorm, ve kterém je největší problém s místem v okolí programátoru. Z tohoto důvodu je kladen nárok na malé zařízení o maximálních rozměrech, jehož délka nepřesahuje 120 mm, šířka 85 mm a výška 100 mm.

Zástavba samotného měřicího zařízení musí být taková, aby bylo možné tento

přípravku přímo připojit k přípravku pro úplné manuální ověření parametrů (Obr.5), dodávaném společně s programátorem od firmy Elneec. Při ověřování parametrů se tedy použije jako vrchní část k desce pro úplné manuální ověření parametrů deska pro selftest, dodávaná také s programátorem (Obr.3). Selftest ověřování zůstává nezměněno, jelikož již automatizované je. Naopak pro úplné ověření parametrů již nebude použita pouze deska pro manuální ověření parametrů, ale bude k ní připojeno automatické měřicí zařízení, které nahradí manuální část ověřování. Bylo by vhodné navrhnout půdorys měřicího zařízení tak, aby byl rozměr měřicího zařízení shodný s přípravkem pro úplné manuální ověření parametrů. Šířka zmíněného přípravku je 89 mm a délka 70 mm. Rozvržení pinů a velikost desky byla překreslena do návrhového prostředí pro návrh desek plošných spojů KiCad a je zachycena na následujícím obrázku (Obr.9).



Obr. 9 – Rozložení pinů desky pro manuální ověřování parametrů

2.1.4 Napájení a konektivita

Požadavkem je napájet celý měřicí přípravek pomocí USB 2.0, stejnou sběrnici bude realizována i komunikace s osobním počítačem. Z tohoto důvodu je třeba zajistit, aby celé zařízení bylo schopno pracovat s napájením 5 V a aby maximální příkon zařízení byl menší než 2,5 W. Žádný externí zdroj napájení není žádoucí připojovat, už kvůli jednoduchosti a snadné obsluze celého zařízení.

2.1.5 Kalibrační přípravek pro měřicí zařízení

Jelikož bude konstruováno měřicí zařízení, je zde stejně jako u jiných měřicích zařízení nutné provádět kalibraci, ať už výrobní nebo dodatečnou po přesně určených časových intervalech. Na tomto kalibračním přípravku také bude oživována a testována funkčnost celého měřicího zařízení. Kalibrační přípravek bude při kalibrační sekvenci také

kalibrován, a to pomocí přesného voltmetru připojeného pomocí banánků.

2.1.6 Indikace probíhajícího měření

Aby mohla obsluha rychle zkontrolovat průběh měření, je vhodné zaručit přehlednou indikaci stavu, ve kterém se zařízení nachází. Doporučené možnosti indikací jsou buď pomocí LED diod, signalizující průběh měření a případný chybový stav anebo indikace za pomoci displeje. Indikace displejem je vhodnější řešení, protože je možné takto zobrazovat, zda probíhá kalibrace, či měření na samotném programátoru. Jde snadno zobrazovat i naměřená hodnota napětí a číslo pinu, na kterém byla tato hodnota naměřena. Displej umožňuje také lepší variabilitu ve zobrazování chybových stavů a pro obsluhu je přijatelnější z hlediska přehlednosti.

2.1.7 Diferenční měření

Je vhodné použít AD převodník s diferenčními vstupy, které mají řadu výhod. Měřené napětí mezi potenciály *MEAS + CABLE* a *MEAS -* je připojeno právě na dvojici vstupních pinů AD převodníku, díky kterým je zajištěno oddělení nulového potenciálu měřícího a měřeného zařízení. Další výhodou je odolnost vůči rušení a absence zemní smyčky.

2.1.8 Připnutí zátěže a maximálně jednoho měřícího pinu

Cílem je vyvinout plně automatický měřicí přístroj, je tedy nezbytné, aby zde bylo řešeno automatické připnutí zátěže. Jelikož tento měřicí přístroj bude nadstavbou přípravku pro úplné manuální ověření parametrů, bude automatické připnutí zátěže realizováno automatickým zkratováním svorek *LOAD*.

Jedním z velmi důležitých požadavků je propojení maximálně jednoho měřícího pinu (1-64) s pinem *MEAS + CABLE*. Snahou je udělat přípravek, který bude přesně kopírovat chování obsluhy při manuálním ověřování parametrů. Jelikož propojení více pinů není možné u manuálního postupu nebude možné ani u automatického měřícího zařízení.

2.1.9 Částečné využití předem definovaných komponent

Z důvodu skladových zásob ve firmě je doporučeno využívat přednostně ty komponenty, které jsou ve firmě používány majoritně do jiných aplikací. Například jednou z takto definovaných komponent je modul s mikrokontrolerem ESP32 [11], který bude v měřicím zařízení zastávat řídicí funkci. Dalšími předem určenými komponentami jsou zejména step-down měniče, které budou použity v kalibračním přípravku pro měřicí zařízení a IO expandery, pro rozšíření IO pinů mikrokontroleru.

Použití takto částečně definovaných komponent má několik výhod. Jednou z nich je, že jsou již ověřeny v několika aplikacích, zejména v řídicích deskách, které byly vyvíjeny a oživeny ve firmě. Další výhodou je držení menšího množství skladových zásob, které zároveň slouží víceúčelově, nejen pro konstrukci nových zařízení, ale i pro servis již distribuovaných zařízení.

3. MOŽNÁ ŘEŠENÍ AUTOMATICKÉHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

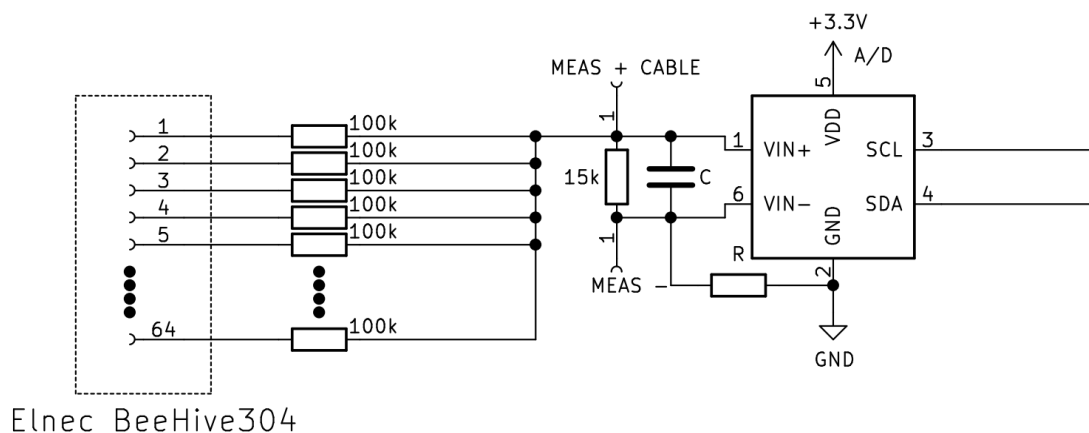
Tato kapitola je zaměřena na rozbor možných řešení pro návrh a realizaci automatizovaného měřicího zařízení pro ověřování programátorů Elnec BeeHive304. Návrh, který bude nejlépe vyhovovat zadaným požadavkům, které byly rozebrány v předchozí kapitole, bude použit a zkonstruován. Je důležité mít na paměti, že kromě rychlosti a přesnosti měření, je nezanedbatelným parametrem také cena, která sice u prototypu nehraje takovou roli, naopak při větším množství vyrobených kusů se jedná o důležitý parametr.

Jak již bylo zmíněno, je třeba vytvořit zařízení, které bude v co nejkratším čase, s přesností lepší než 10 mV postupně měřit napětí na 64 pinech. Dále musí disponovat funkcí připnutí zátěže, která je realizována zkratováním svorek LOAD na přípravku pro úplné manuální ověření parametrů programátoru Elnec, dodávané společně s programátorem.

3.1 Sčítání signálů

Jelikož je nutné zařízení navrhnout jako nadstavbu na přípravku pro úplné manuální ověření parametrů od firmy Elnec, je nezbytné zajistit postupné propojování všech 64 měřicích pinů s měřicím pinem *MEAS + CABLE*.

Nejjednodušším řešením návrhu této měřicí části je propojit všechny tyto piny vhodnými odpory (například 100 k Ω) s měřicím pinem. Je předpokládáno, že napětí je dostupné vždy jen na jednom z pinů přípravku, a proto by toto napětí mělo být naměřeno přímo proti *MEAS -*. Na měřicí piny bude připojen A/D převodník, který bude zajišťovat digitální napěťový výstup. Připojení zátěže by mohlo být realizováno pomocí relé, které by bylo pomocí mikrokontroleru ovládáno.



Obr. 10 – Schéma řešení pomocí sčítání signálů

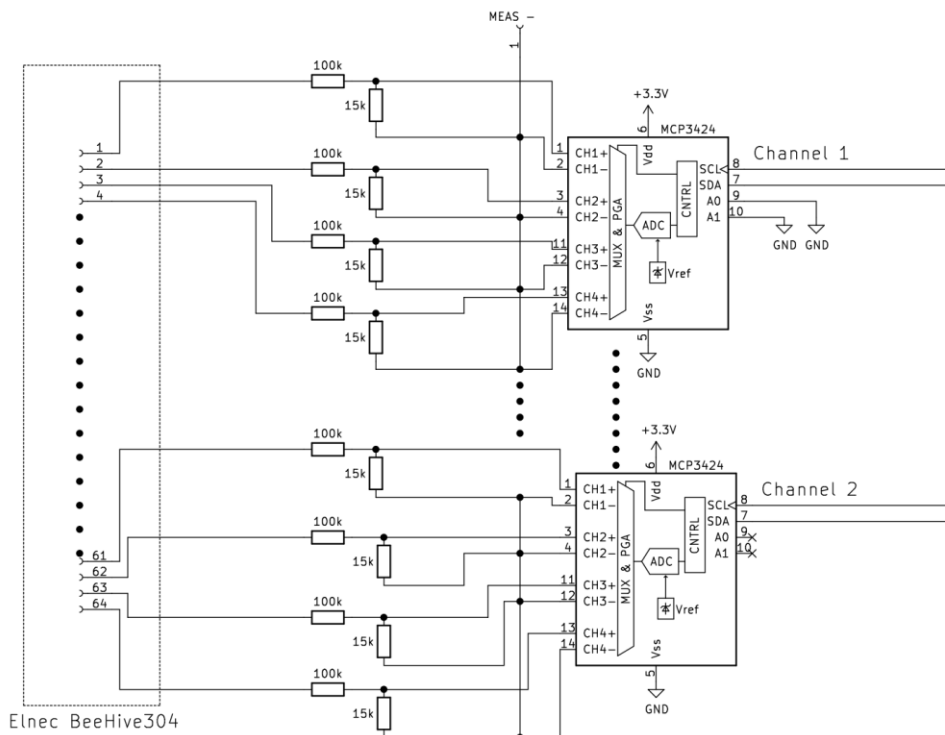
Na předchozím obrázku je zachyceno schéma řešení pomocí sčítání signálu. Jedinou výhodou tohoto řešení je jednoduchost a výrobní náklady.

Bohužel z důvodu požadavků na zařízení je toto řešení nevhodné. Nemí zde splněno připojení maximálně jednoho pinu současně k programátoru, a to je zásadní nedostatek. Dále je zde možnost ovlivnění měření šumem z ostatních pinů, u kterých není známo jejich chování, pokud na nich zrovna neprobíhá měření (teoreticky hodnota napětí 0 V, nicméně vlivem náhodných jevů, jako je interference a šum, nebude tato hodnota nulová). Jelikož zde dochází ke sčítání signálů, mělo by to zcela zásadní dopad na přesnost měřicího přístroje.

3.2 Řešení s více A/D převodníky

Dalším řešením, které se nabízí je připojit na každý výstupní pin přípravku pro manuální ověření parametrů jeden diferenční A/D převodník (nebo několik pinů měřit jedním vícekanalovým A/D převodníkem).

V této kapitole bude jako příklad vhodného A/D převodníku použit Microchip MCP3424. Tento převodník je 18 – bitový, 4 – kanálový, diferenční a komunikace je realizována pomocí sběrnice I²C. Adresa převodníku na sběrnici je realizována pomocí dvou adresních pinů, které mohou nabývat 3 stavů a to HIGH, LOW a FLOAT. Lze tedy použít 8 těchto převodníků na jednom kanálu I²C mikrokontroleru. Jelikož je třeba měřit 64 pinů, je nutné použít 16 těchto převodníků připojených na 2 kanály I²C. Datasheet A/D převodníku je dostupný zde [3].



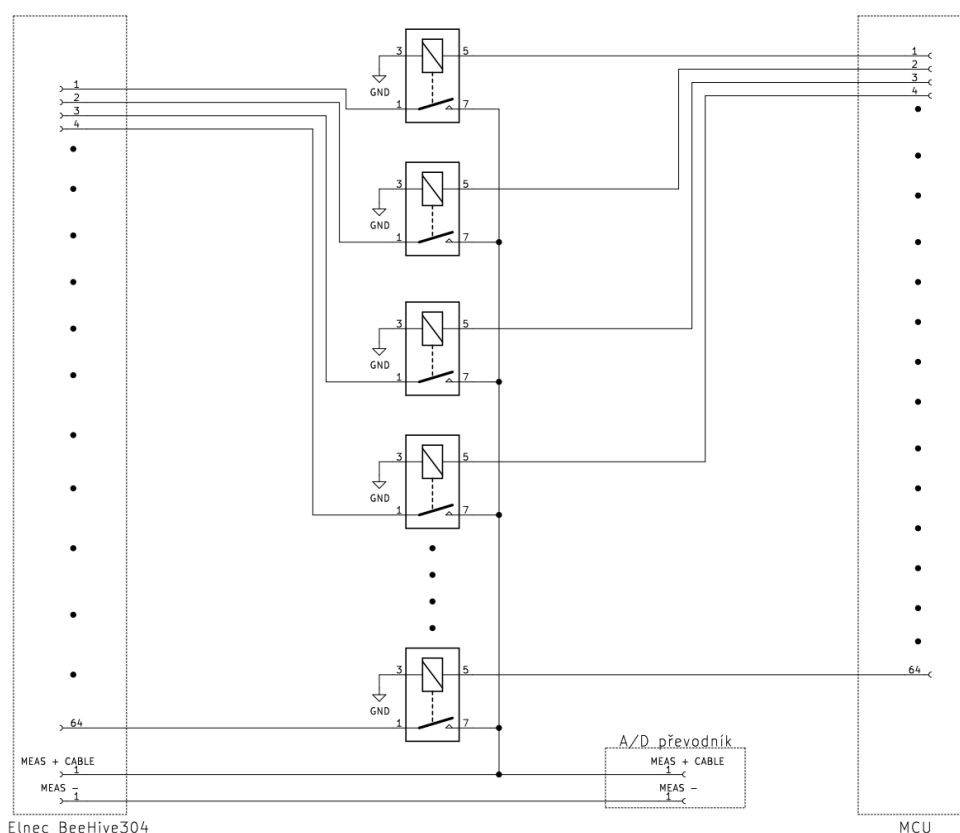
Obr. 11 – Možné řešení s více A/D převodníky

Na předchozím obrázku (Obr.11) je zobrazeno možné řešení automatizovaného měřicího zařízení s použitím více A/D převodníků. Bohužel toto řešení nepřináší žádné výhody oproti předchozímu řešení. Tento návrh porušuje hned několik vytyčených pravidel pro měřicí zařízení. Shodně jako v případě sčítání signálů je hlavní problém propojení současně více než jednoho pinu. Je nemožné připojit *MEAS + CABLE*, jelikož by došlo ke zkratování všech pinů při měření. Cena takového zařízení je navíc díky použití velkého počtu A/D převodníků vysoká. Dalším problémem je velký počet adresovatelných zařízení, které by musely využívat hned dva kanály I²C.

3.3 Řešení s reléovými přepínači

Jelikož je nutné zajistit propojení a měření maximálně jednoho pinu je vhodné pro měřicí zařízení použít relé. Pro každý pin (1 – 64) je třeba použít jedno relé, dohromady pro měřicí část je nutné použít 64 relé. Naskýtá se zde možný problém vycházející z požadavků na zařízení, a to je požadavek na velikost zařízení. Je tedy třeba využít co možná nejmenší relé.

Pro ovládání takto velkého počtu relé je nezbytný velký počet ovládacích signálů. Jelikož je požadavek použít mikrokontroler ESP32, který nedisponuje dostatečným počtem ovládacích pinů, je třeba rozšířit I/O signály vhodným obvodovým prvkem, například I/O expanderem.

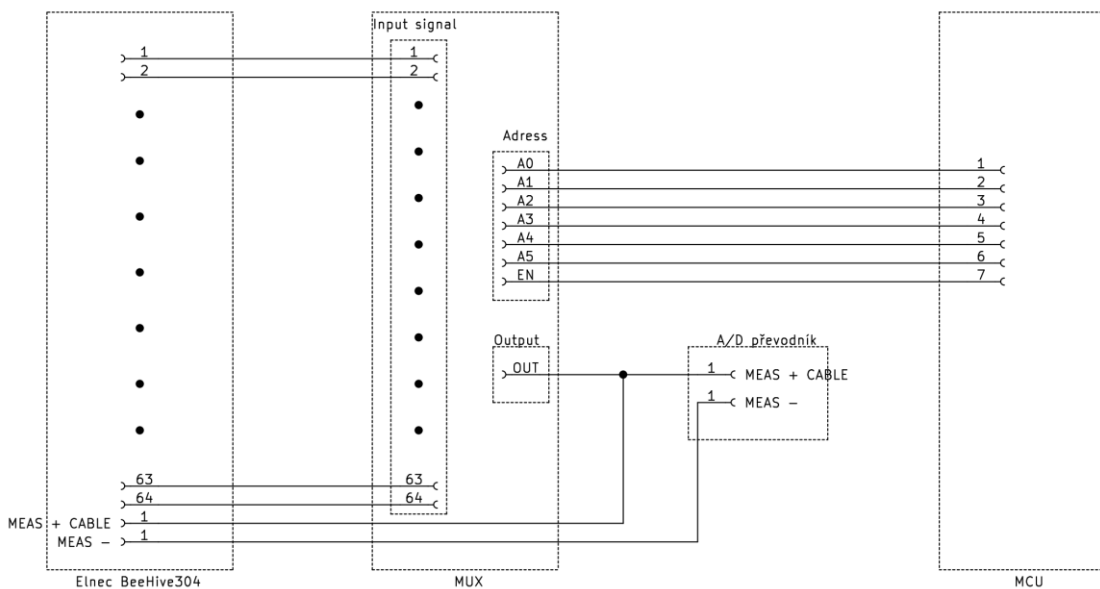


Obr. 12 – Schéma řešení s reléovými přepínači

Díky zapojení se spínacími relé je splněna podmínka pro připojení maximálně jednoho pinu současně. Zapojení je velmi výhodné a v principu jednoduché. Principiální ukázka řešení s reléovými přepínači je vyobrazena na *Obr.12*.

3.4 Řešení s použitím analogových multiplexorů

Jako velmi vhodné řešení se nabízí zapojení s analogovými multiplexory. Multiplexory zajistí připojení pouze jednoho pinu, přičemž ostatní piny jsou ve stavu vysoké impedance. Při použití vstupních děličů je vstupní impedance odpojených pinů přibližně rovna impedanci vstupního děliče. Vhodným analogovým multiplexorem, použitelným pro toto řešení, je multiplexor 64:1, který dokáže připnout vždy maximálně 1 ze 64 vstupů na výstup. Ideální multiplexor, který by mohl být použit do této aplikace, je multiplexor s napájecím napětím větším než 24 V, které je zároveň omezením pro signál při průchodu ze vstupu na výstup. Takovéto multiplexory jsou bohužel schopny přepínat méně než 16 pinů a mají vysoké pořizovací náklady. Z tohoto důvodu je třeba použít multiplexory s nižším jmenovitým napájecím napětím a se schopností přepínat alespoň 16 signálů ze vstupu na výstup.



Obr. 13 – Schéma řešení s multiplexory

Jak je z předchozího zapojení (viz *Obr.13*) zřejmé, všechny měřené piny přípravku pro úplné manuální ověření parametrů jsou propojeny s multiplexorem. Multiplexor za pomoci logické kombinaci na adresních vodičích $A0 - A5$ připojí odpovídající vstupní pin na svůj výstup OUT . Vstupní pin EN slouží k přepnutí výstupu multiplexoru do stavu vysoké impedance.

Toto řešení je shodně jako řešení s reléovými přepínači velmi vhodné, jelikož z velké části splňuje vytyčená kritéria. Požadavek na připojení maximálně jednoho pinu

přípravku je splněn pouze částečně, jelikož k neměřeným pinům jsou neustále fyzicky připojeny napěťové děliče. Řešení je v principu jednoduché a prostorově a cenově nenáročné.

3.5 Vyhodnocení vhodnosti řešení

Jak již bylo zmíněno, řešení pomocí sčítání signálů není vhodné. Nejen že zde není vyhověno zcela zásadnímu požadavku o nepřipojování více než jednoho měřicího pinu současně, toto řešení je také velmi náchylné na šum a bylo by ho možné realizovat pouze za předpokladu, že je přítomno napětí pouze na jednom měřicím pinu současně, což není zaručeno.

Ani řešení s více A/D převodníky se neprojevují jako vhodné. Nejen že opět není zajištěno připojení pouze jednoho měřicího pinu současně. Řešení dále znemožňuje připojení MEAS + CABLE a je očividně finančně náročnější z důvodu použití velkého množství nákladných A/D převodníků.

Řešení s reléovými přepínači se ukazuje jako velmi vhodné z pohledu vytyčených parametrů. Je zde zajištěno propojení pouze jednoho měřicího pinu současně. Malým úskalím se jeví použití jazýčkových relé, u kterých hrozí stárnutí mechanické části a opotřebení. Další malou nevýhodou je potenciální velikost zařízení vzhledem k velkému množství použitých součástek.

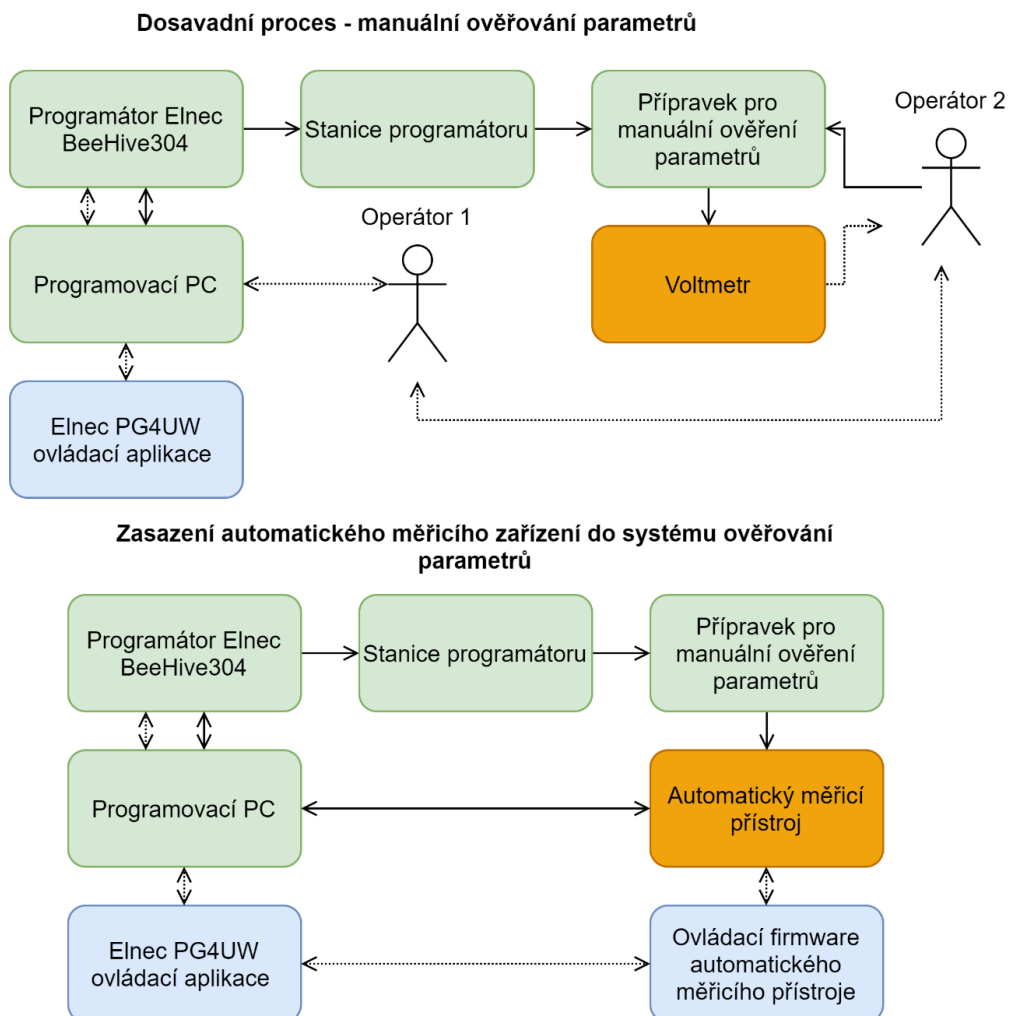
Posledním z popsaných možností je řešení s analogovými multiplexory. Toto řešení se ukázalo jako velmi vhodné. Je zde částečně zajištěno propojení maximálně jednoho měřicího pinu. Zařízení vyhovuje vytyčeným parametrům. Jedná se o v principu jednoduché zařízení, jehož velikost bude řádově menší než u řešení s reléovými přepínači.

Byla tedy vybrána dvě řešení (návrh s reléovými přepínači a návrh s analogovými multiplexory), která budou zkonstruována a otestována. Pro sériovou výrobu bude vybráno pouze vhodnější řešení po otestování.

4. NÁVRH AUTOMATICKÉHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

Tato kapitola je zaměřena na návrh automatického elektronického měřicího zařízení pro ověřování parametrů (napětí) programátoru BeeHive304. Na následující dvojici blokových diagramů (viz Obr.14) je ukázán dosavadní proces manuálního ověření parametrů (horní diagram) v porovnání s řešením za použití automatického měřicího zařízení. Na spodním diagramu je zřejmé umístění automatického měřicího přístroje v systému ověřování parametrů programátoru.

Dosavadní manuální ověřování parametrů a jeho nevýhody již byly v této práci popsány. Ze spodního diagramu je zřejmé, že není třeba operátorů na obsluhu měřicího zařízení. Jediná obsluha operátora je nutná při vkládání měřicího zařízení do stanice programátoru a následně spuštění ověřovacího procesu v aplikaci Elnec PG4UW. Jelikož se tato kapitola zabývá pouze samotným návrhem měřicího zařízení, nebude zde v této kapitole rozebírána softwarová část, jelikož ji je věnována pozornost později.



Obr. 14 – Blokované schéma zařazení měřicího zařízení do systému

V předchozí kapitole byla vybrána dvě možná řešení a ta budou dále v této kapitole navržena a popsána. Obě zařízení musejí být osaditelná do Elnece přípravku pro úplné manuální ověření parametrů a musejí splňovat i ostatní vytyčené požadavky popsané v kapitole 2.

Před samým začátkem návrhu je vhodné definovat společné prvky obou řešení. Obě řešení budou obsahovat stejné jádro, které zahrnuje především volbu, čím ovládat celý měřicí systém, přes jaké rozhraní ovládat potřebné komponenty a jakým způsobem bude měřeno napětí.

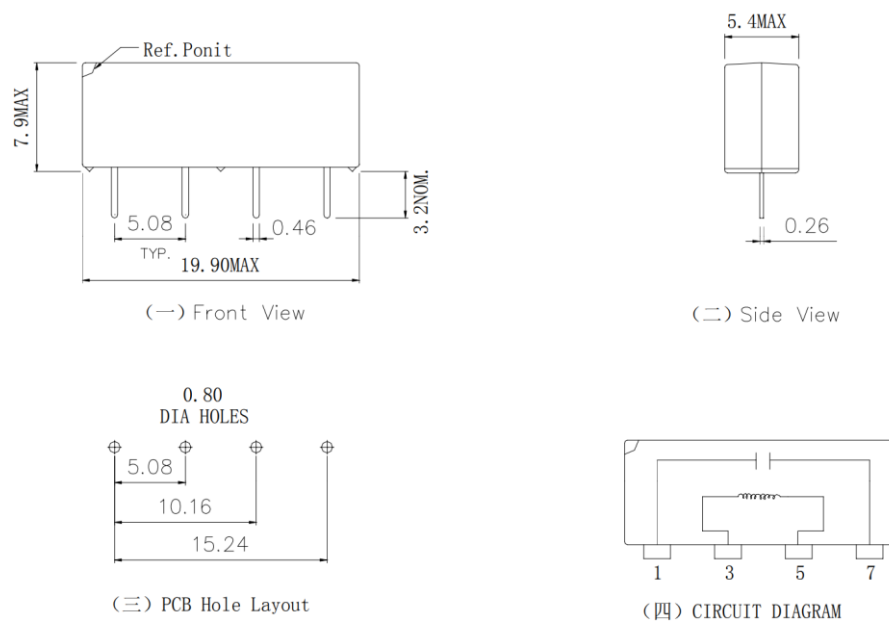
Ovládání celého měřicího přístroje včetně komunikace s programem Elnece PG4UW bude zajištěno mikrokontrolerem ESP32 pomocí rozhraní USB 2.0, ze kterého bude současně celé zařízení napájeno. K ovládání měřicího přístroje budou využity I/O piny mikrokontroleru ESP32. Důležitými I/O piny jsou především ty, které jsou již továrně určeny pro komunikaci pomocí rozhraní I²C. Za pomoci tohoto rozhraní bude realizována komunikace s A/D převodníkem. Dále bude využito displeje, který shodně komunikuje přes I²C, výběr displeje bude rozebírán dále v této práci. Po předchozích zkušenostech se ukázalo jako vhodné nepřipojovat displej na stejný kanál I²C společně se zbytkem takto ovládaných komponent. Z tohoto důvodu bude s displejem komunikováno pomocí samostatného kanálu I²C. Použití displeje je velmi výhodné zejména pro obsluhu, která bude tímto způsobem ihned informována o stavu měřicího přístroje.

Jak již bylo zmíněno, nejvhodnějším způsobem měření napětí je použití I²C A/D převodníku. Vhodný výběr A/D převodníku bude dále popsán v kapitole 5.1.4 o průzkumu trhu použitých komponent.

4.1 Návrh řešení s reléovými přepínači

Podle zadaných požadavků je toto řešení jediné, které korektně splňuje všechny vytyčené požadavky. Zejména požadavek na připojení maximálně jednoho měřicího pinu s programátorem Elnece. Výhodou tohoto typu řešení je přesné principiální kopírování chování obsluhy při úplném ověřování parametrů (měření napětí na jednotlivých pinech). Potenciálním úskalím tohoto řešení se jeví poruchovost zařízení z důvodu použití velkého množství jazýčkových relé. Dalším úskalím se jeví velikost zařízení, která může být pro velký počet součástí (zejména použitých jazýčkových relé) problematická, avšak návrh bude proveden tak, aby zařízení bylo co možná nejmenší. V případě, že dané řešení bude splňovat kritérium velikosti, pak se bude jednat o návrh, který nejlépe splňuje vytyčené parametry.

Jelikož je třeba rozmístit 64 jazýčkových relé (pro každý měřicí pin jedno), viz *Obr. 12*, je nezbytné použít taková relé, která budou disponovat co nejmenším rozměrem. Vhodným relé se pro svoji velikost ukázalo jazýčkové relé SIP-1A05, jehož datasheet je dostupný zde [4]. Na následujícím obrázku jsou zaneseny rozměry tohoto jazýčkového relé [4].



Obr. 15 – Rozměry jazýčkového relé SIP-1A05 [4]

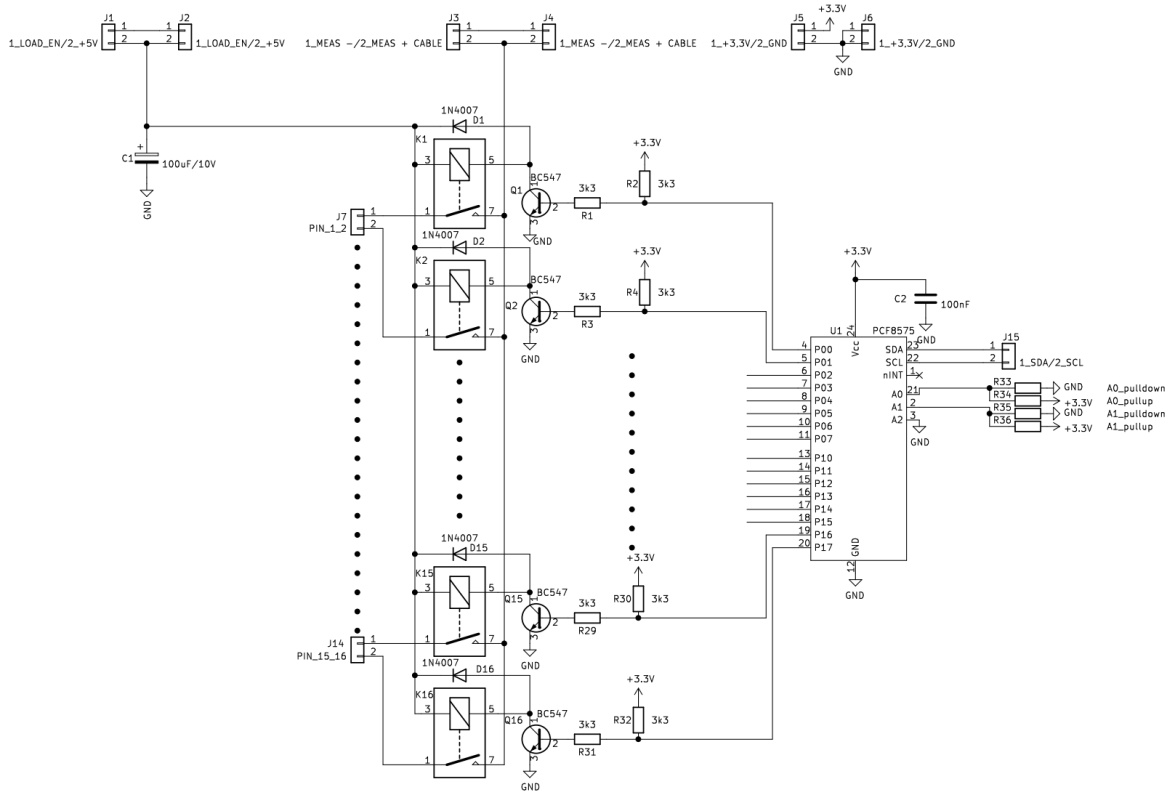
Již od samého začátku bylo zřejmé, že je nemožné osazení jediné desky takto velkým počtem jazýčkových relé. Jedna deska by rozhodně nesplnila požadavek na velikost zařízení, jelikož její rozměr by byl minimálně 140 x 140 mm. Z toho vychází, že je nezbytné vrstvení a propojování desek nad sebe.

V první fázi byl návrh složený dohromady ze čtyřech mezi sebou propojených desek plošných spojů připomínající krychli. Spodní deska sloužící k rozdělení měřených signálů na dvě poloviny. Tato deska disponuje připojením dvou přepínacích karet osazených jazýčkovými relé. Každá z přepínacích karet byla navržena tak, aby mohla být osazena 32 jazýčkovými relé. Vrchní deska poté sloužila jako řídicí část a byla navržena pro osazení mikrokontroleru ESP32 a A/D převodníkem. Tento návrh byl zamítnut, jelikož tato konfigurace nesplňovala požadavky na velikost zařízení. Celé zařízení bylo navrženo s rozměry 120 x 100 x 120 mm.

Návrh byl předesignován pro použití čtyř přepínacích karet po 16 relé namísto dvou karet po 32 relé. Návrh se tedy sestává dohromady ze 6 desek. Spodní deska rozděluje signály do 4 částí (pro každou měřicí kartu 16 signálů). Jednotlivé měřicí karty se sestávají ze 16 měřicích relé. Vrchní deska opět slouží jako řídicí část. Tato konfigurace již splňuje požadavky na velikost a v následujících podkapitolách bude návrh jednotlivých desek plošných spojů podrobněji popsán. Celé zařízení bylo navrženo s rozměry 89 x 70 x 62 mm. Spojení desek je evidentní v kapitole zabývající se realizací tohoto řešení (kapitola 6.1).

4.1.1 Schématický návrh přepínací karty

Je nezbytné přepínací karty navrhnout jako univerzální, jelikož budou v měřicím zařízení použity čtyřikrát. Tyto přepínací karty tedy budou mezi sebou záměnné bez vlivu na funkčnost zařízení. Zkrácené schéma zapojení jedné z přepínacích karet je vyobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. 16 – Schéma zapojení přepínací karty

Aby tato deska byla univerzální, je nutné vyřešit unikátní adresy jednotlivých I/O expanderů. Jak je ze schématu zřejmé, jsou zde na adresách *A0* a *A1* připojené rezistory zároveň na napětí +3,3 V tak i na GND. Při samotném osazování desky bude za pomoci nulových rezistorů určena (zkratována) buď napájecí větev nebo zem, díky tomu lze měnit adresy na jednotlivých přepínacích kartách.

Každá karta obsahuje jeden I/O expander a 16 spínacích relé, tak jak je zřejmé na předchozím obrázku (*Obr. 16*). Je nezbytné, aby přepínací karta propojovala potřebné signály od spodní desky k vrchní. Na schématu jsou zachyceny jako propojení pinů *J1* – *J6*. Tímto způsobem jsou vedeny signály *LOAD_EN* (signál obsluhující zkratování svorek *LOAD* na Eltec přípravku pro úplné manuální ověření parametrů), napájecí větev +5 V, *GND* a měřené signály *MEAS + CABLE*, *MEAS* –.

Pokud by byl výstup I/O expanderu připojen přímo na spínací cívku relé a přizemňoval ji, pak dochází hned ke dvěma negativním jevům. Nejen že v případě sepnutí relé bude proud tekoucí do expanderu přibližně 10 mA, v případě rozepnutí relé mohou nastat dva negativní jevy. Pro rozepnutí relé je na výstupním pinu

expanderu logická 1 (napájecí napětí), předpokládáme-li, že je tento zdroj napětí tvrdý, dochází k jevu, kdy je na jedné straně cívky 5 V a na druhé 3,3 V. V důsledku toho teče proud do expanderu i v sepnutém stavu. Druhým negativním jevem lze nazvat stav, kdy je výstupní pin expanderu měkkým zdrojem, v důsledku toho je napětí na výstupu expanderu 5 V, tím je tedy napětí vyšší než napájecí napětí, což je nežádoucí.

Z důvodu těchto negativních vlivů je měkkost napěťového zdroje výstupních pinů posílena pomocí pull-up rezistorů. Dále jsou relé spínané pomocí spínacích tranzistorů a výpočet hodnoty jejich bazových rezistorů je popsán v následující rovnici. Bylo určeno, že proud do báze tranzistoru by neměl přesáhnout 1 mA z důvodu zátěže I/O expanderu. Výpočet bazového odporu je poté realizován pomocí Ohmova zákona následovně:

$$R_B = \frac{U_{OUT} - U_{BE}}{I_{OUTMAX}} = \frac{3,3 - 0,7}{0,001} = 2600 \Omega = 2,6 \text{ k}\Omega \quad (1)$$

Kde:

R_B	–	bázový odpor [Ω]
U_{OUT}	–	výstupní napětí I/O expanderu [V]
U_{BE}	–	napětí báze – emitor [V]
I_{OUTMAX}	–	určený maximální proud z I/O expanderu [A]

Je tedy možné použít rezistor o jmenovité hodnotě 2,7 k Ω a vyšší, nicméně je nutné provést zároveň i výpočet maximální jmenovité hodnoty bazového rezistoru. Při tomto výpočtu je nutné vyjít z datasheetu relé viz [4]. Z tohoto vyplývá, že jmenovitý výkon relé je 50 mW. V následujícím vztahu je uveden výpočet nominálního proudu potřebného k sepnutí relé:

$$I_{NOM} = \frac{P_{NOM}}{U_L} = \frac{0,050}{5} = 0,01 \text{ A} = 10 \text{ mA} \quad (2)$$

Kde:

I_{NOM}	–	nominální spínací proud relé [A]
P_{NOM}	–	nominální výkon relé [W]
U_L	–	nominální napětí spínací cívky relé [V]

Vybraný tranzistor BC547C disponuje minimálním proudovým zesílením 420. Za pomoci údaje o proudovém zesílení tranzistoru a nominálního spínacího proudu relé je možné provést výpočet minimálního bazového proudu, při kterém ještě dojde k sepnutí relé. Výpočet je proveden následujícími rovnicemi.

$$I_{BMIN} = \frac{I_{NOM}}{h_{21min}} = \frac{0,01}{420} = 2,38 \cdot 10^{-5} \text{ A} \doteq 24 \mu\text{A} \quad (3)$$

Kde:

I_{BMIN}	–	minimální bázový proud [A]
h_{21min}	–	minimální proudové zesílení tranzistoru [-]

$$R_{BMAX} = \frac{U_{OUT} - U_{BE}}{I_{BMIN}} = \frac{3,3 - 0,7}{2,38 \cdot 10^{-5}} \doteq 109243 \Omega \cong 100 \text{ k}\Omega \quad (4)$$

Kde:

R_{BMAX}	–	maximální bázový odpor [Ω]
------------	---	-------------------------------------

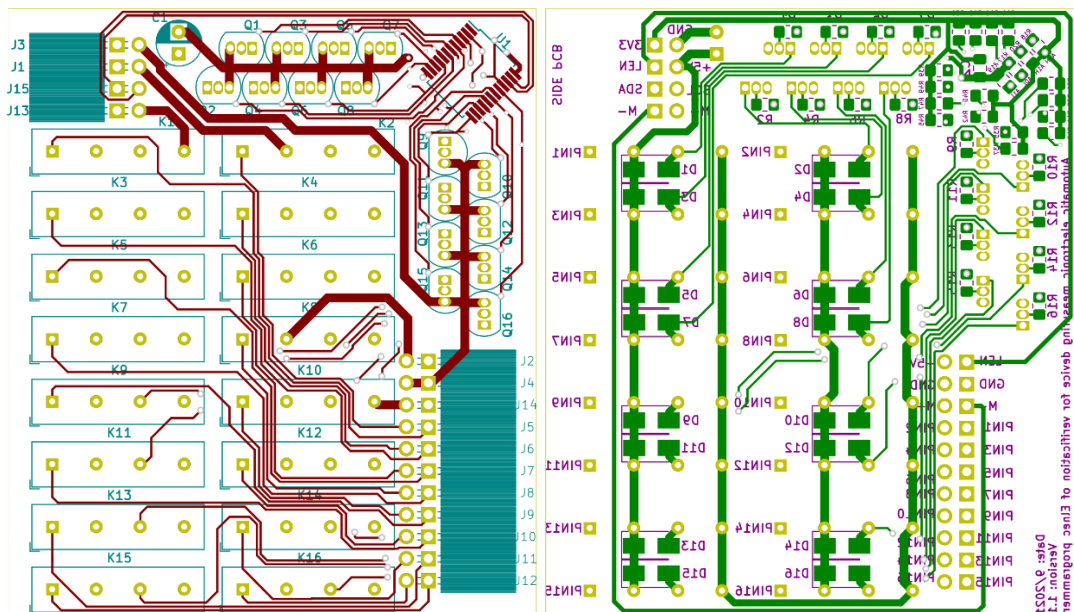
Bázový rezistor s maximální jmenovitou hodnotou 100 k Ω je tedy krajně použitelný v této aplikaci, aby došlo k sepnutí relé. Z hlediska spolehlivosti sepnutí a proudové zatížitelnosti digitálního výstupu I/O expanderu bude použit rezistor o jmenovité hodnotě 3,3 k Ω .

4.1.2 Návrh layoutu desky plošných spojů přepínací karty

Cílem je vytvoření co nejmenší desky plošných spojů (dále jen DPS). Potenciálním problémem se jevila nemožnost umístění dvou jazýčkových relé do vzájemné blízkosti. Byla zde možnost, že při sepnutí jednoho relé dojde zároveň v důsledku jeho magnetického pole k sepnutí relé sousedního. Tento jev byl otestován a ani při doteku pouzder obou relé ve všech vzájemných plochách k tomuto jevu nedocházelo. Z tohoto důvodu je možnost zanedbat ochranná pásma mezi jednotlivými relé a tímto způsobem zmenšit rozměry výsledné DPS.

Deska byla navržena v programu KiCad jako dvouvrstvá a obě strany (vrstvy) DPS jsou zachyceny na následujícím obrázku, vrchní pohled desky vlevo a spodní vpravo. Vrchní část (vrstva) je osazena všemi šestnácti relé ($K1 - K16$), spínacími tranzistory ($Q1 - Q16$), filtračním kondenzátorem C1, I/O expanderem U1 a dvouřadých úhlových dutinkových lišt. Toto zahnutí je patrné i z layoutu vrchní části desky, kde je pro toto zahnutí vytvořen prostor. Tyto úhlové lišty zajišťují propojení spodní (širší dutinková lišta) a vrchní desky (užší dutinková lišta), které jsou naopak osazeny dvouřadými kolíkovými lištami. Rozteč pinů na těchto lištách je standardních 2,54 mm.

Spodní vrstva DPS je osazena bázovými rezistory, pull-up rezistory a diodami sloužícími k vybití akumulované energie v magnetickém poli relé. Za zmínku stojí adresní vodiče I/O expanderu, které se při osazení nastavují pomocí nulových rezistorů. Díky tomuto je možné nastavit jednotlivé adresní vodiče buď na hodnotu 0 (propojení adresního vodiče se zemí) nebo na hodnotu 1 (propojení s napětím +3,3 V), tak jak již bylo popsáno u schématu.

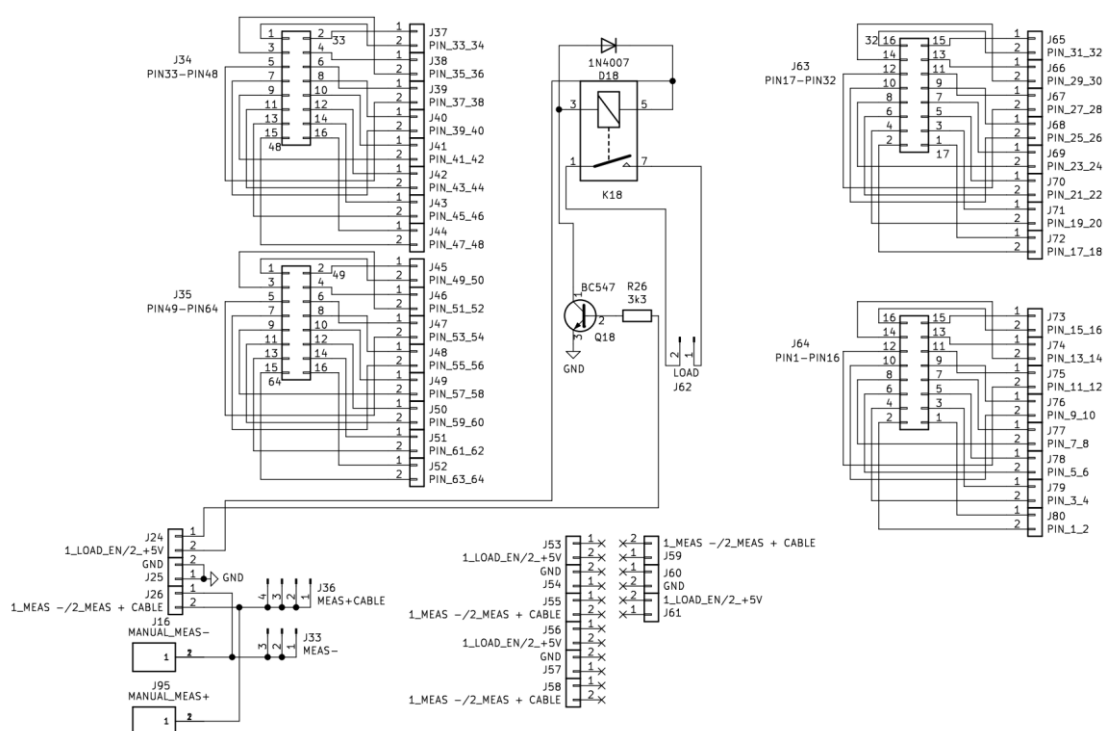


Obr. 17 – Layout DPS přepínací karty

4.1.3 Schématický návrh spodní desky plošných spojů

Na následujícím obrázku (*Obr.18*) je zachycen schématický návrh spodní DPS. Jak již bylo zmíněno, tato deska slouží jako rozvodna měřených signálů do jednotlivých měřicích karet, rozděluje tedy signály do bloků po šestnácti. Spodní deska dále disponuje stejným jazýčkovým relé, které jsou také použity v přepínacích kartách. Toto relé zajišťuje zkratování svorek na Elnece přípravku pro úplné manuální ověření parametrů a je spínáno za pomoci tranzistoru, který je spínán signálem *LOAD_EN*, vedoucí z vrchní řídicí desky měřicího zařízení. Na této desce je dále umístěna dvojice pinů (*J16* a *J95*), jejichž pouzdro dovoluje osazení dvou měřicích banánů pro připojení voltmetru, díky kterému bude zajištěna možnost sledování aktuálního sepnutého napětí mezi piny *MEAS + CABLE* a *MEAS -*.

Za zmínku dále stojí piny *+5 V*, *GND*, *MEAS + CABLE* a *MEAS -*, které jsou stejně jako spínací signál *LOAD_EN* vedeny skrz spínací karty do vrchní řídicí desky. Tyto signály jsou ale vedeny pouze přes jednu krajní spínací kartu. Opět aby byla dodržena možnost univerzálních spínacích desek, tak musejí tyto piny vést do všech spínacích desek, avšak ve zbylých třech případech jsou piny nezapojené, jak si lze všimnout ve středu spodní části schématu.

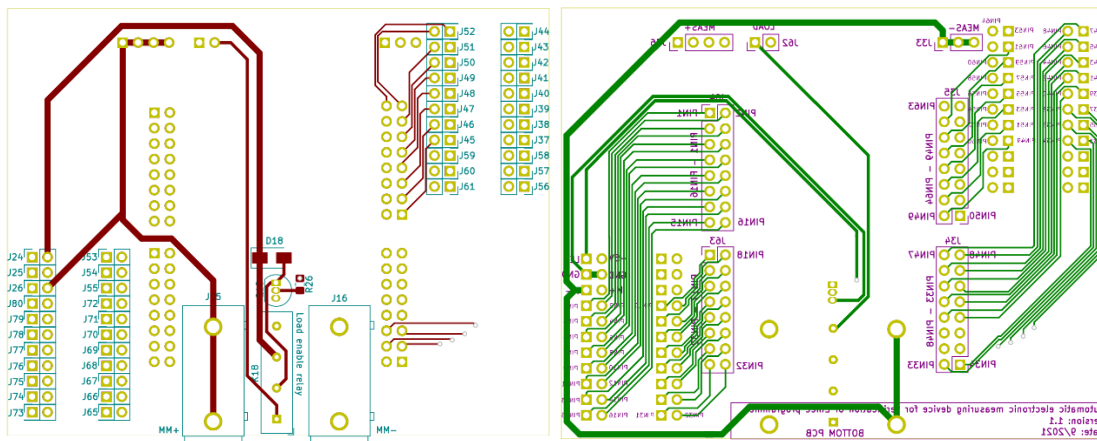


Obr. 18 – Schéma zapojení spodní desky

4.1.4 Návrh layoutu spodní desky plošných spojů

DPS je opět navržena jako dvouvrstvá, vrchní vrstva (vrchní strana DPS) je zobrazena na následujícím obrázku vlevo a spodní vrstva vpravo. Na vrchní straně DPS je vhodné zmínit umístění relé, sloužícího k sepnutí zátěže na Elneec přípravku pro úplné manuální ověření parametrů, včetně jeho spínacího relé, bazového odporu a vybíjecí diody. Jsou zde taktéž umístěny standardní měřicí banánky o tloušťce 4 mm pro připojení voltmetru. Nezbytnou částí této desky jsou opět kolíkové lišty se standardní roztečí 2,54 mm, sloužící k připojení prepínací karty. Jak již bylo zmíněno v předchozí podkapitole, je i zde viditelné, že vývody pouze u jedné karty přenášejí měřicí signál *MEAS + CABLE* a *MEAS -*, společně se signálem *LOAD_EN*.

Spodní strana DPS je osazena pouze dvojčitými dutinkovými lištami pro připojení měřicích pinů Elneec přípravku pro úplné manuální ověření parametrů, dále dutinkovými lištami pro signál *MEAS + CABLE* a *MEAS -*. Rozmístění pinů zde hraje naprosto zásadní roli, jelikož je nutné, aby dutinkové lišty přesně zasedly do Elneec přípravku.



Obr. 19 – Layout DPS spodní desky

4.1.5 Schématický návrh řídicí desky plošných spojů

Nejdůležitějšími komponentami umístěnými na této desce jsou modul mikrokontroleru ESP32 a trojice A/D převodníků ADS1100 [9].

Deska je osazena trojicí A/D převodníků, které mají již z výroby odlišné adresy, ale zároveň patří do stejné typové řady. Při osazování bude rozhodnuto, zda bude osazen pouze jeden nebo více A/D převodníků. Jelikož jsou převodníky zapojeny na měřicí signál paralelně, je zde možnost zkrátit dobu měření v případě průměrování naměřených hodnot o shodném počtu. V případě zapojení jednoho převodníku je nezbytné průměrovat větší počet naměřených hodnot, aby byla zajištěna potřebná přesnost. Pokud je však zapojena trojice těchto A/D převodníků je možnost průměrovat naměřené hodnoty mezi sebou najednou. Ze schématu, které je zachyceno na následujícím obrázku (Obr. 20) je patrné zapojení A/D převodníků na I²C sběrnici včetně jejich vstupních děličů. Použití kondenzátorů mezi piny VIN+ a VIN- A/D převodníku vychází z doporučeného zapojení. Toto zapojení v kombinaci se vstupním děličem tvoří filtr typu dolní propust, přičemž je zvýšena odolnost vůči vysokofrekvenčnímu rušení.

V prostřední pravé části schématu je umístěn regulátor napětí, který stabilizuje napětí +5 V na +3,3 V. Tento regulátor byl přidán do další iterace po zjištění značné teplotní závislosti integrovaného regulátoru modulu s mikrokontrolerem ESP32, který následně ovlivňoval měření změnou maximálního měřicího rozsahu A/D převodníku.

Je nutné zmínit osazení inicializačního relé. Toto relé je absolutní nezbytností. Pokud by toto relé osazeno nebylo, docházelo by k destrukci relé přepínacích karet při inicializaci v kombinaci s připojeným napětím na měřicích pinech. Při spuštění I/O expanderů jsou všechny výstupy nastaveny na logickou 1. Díky tomu dojde k sepnutí všech relé a tím zkratování měřicí větve. Pokud je tedy na měřicích pinech při inicializaci přítomno napětí, dojde ke zkratování všech napětí a dochází k destrukci relé vlivem zkratového proudu. Tomuto jevu je zabráněno připnutím napájení všech relé přepínacích

karet až po inicializaci I/O převodníků. Zkratovému proudu by zároveň mohlo být zabráněno použitím dílčích děličů, přičemž 100 kΩ rezistor by byl umístěn v cestě signálu přímo za přepínacím relé, a byl by zde pouze jeden společný rezistor 15 kΩ a kondenzátor 100 nF. Toto řešení by vyžadovalo kalibraci každého měřícího pinu zvlášť vlivem rozdílných hodnot dílčích děličů a zároveň použití značného počtu součástek navíc.

Jak již bylo zmíněno, je na této desce vyveden výstup pro displej, který je připojený na samostatný kanál I²C. Opět jsou zde také vyvedeny slepé piny stejně jako na spodní desce, aby byla zajištěna univerzálnost přepínacích karet.

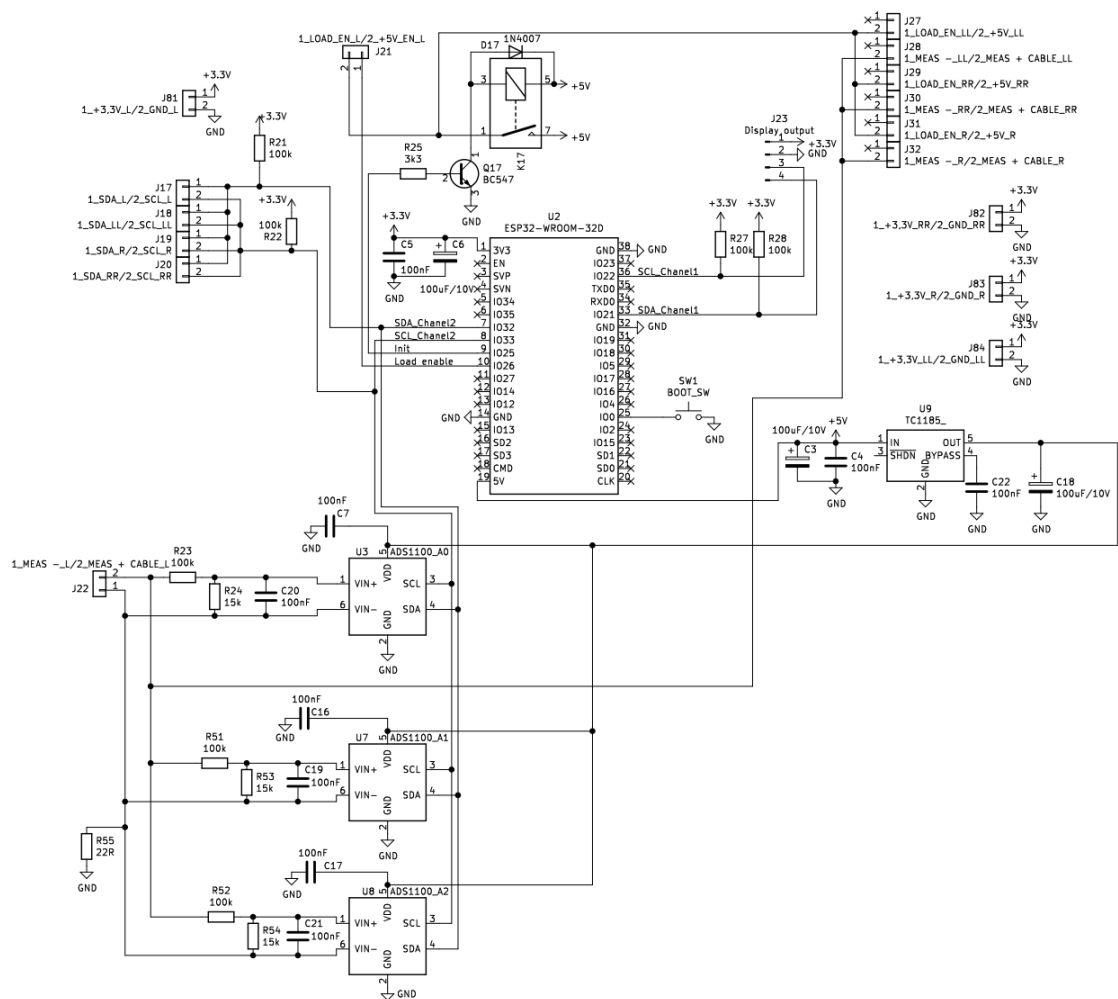
Výpočet vstupních děličů jednotlivých A/D převodníků bude demonstrován v následující rovnici. Jelikož je zvolený A/D převodník schopen měřit v rozsahu 0 – 3,3 V, je nezbytné použít takový dělič napětí na měřený signál, aby bylo možné tímto A/D převodníkem měřit napětí v rozsahu 0 – 24 V. Z tohoto důvodu je nutné, aby dělič napětí disponoval přenosem $A = 3,3 \text{ V} / 24 \text{ V}$, což se rovná $A = 0,1375$. Jedná se o zatížený dělič napětí, který je zatížen diferenčním vstupem A/D převodníku. Podle datasheetu [8] je hodnota tohoto zatížení $R_{IN} = 2,8 \text{ M}\Omega$ / PGA (Programmable Gain Amplifier). Hodnoty napětí v poslední části rozsahu budou měřeny se vstupním programovatelným zesílením 1 A/D převodníku, díky tomu je hodnota této vstupní impedance právě 2,8 MΩ. Jelikož neznámou tvoří obě hodnoty odporu rezistorů, je zvolena hodnota rezistoru $R_{23} = 100 \text{ k}\Omega$. Na následující rovnici bude proveden příklad výpočtu hodnoty rezistoru R_{24} zatíženého vstupního děliče.

$$A = \frac{\frac{R_{24} \cdot R_{IN}}{R_{24} + R_{IN}}}{R_{23} + \frac{R_{24} \cdot R_{IN}}{R_{24} + R_{IN}}} \rightarrow R_{24} = \frac{A \cdot R_{23} \cdot R_{IN}}{R_{IN} - A \cdot (R_{23} + R_{IN})} = \frac{0,1375 \cdot 10^5 \cdot 2,8 \cdot 10^6}{2,8 \cdot 10^6 - 0,1375 \cdot (10^5 + 2,8 \cdot 10^6)} \doteq 16033 \Omega \quad (5)$$

Kde:

A	–	přenos děliče [-]
$R_{23} + R_{24}$	–	hodnoty odporů vstupního děliče [Ω]
R_{IN}	–	hodnota vstupní impedance A/D převodníku (PGA = 1) [Ω]

Výsledné použité hodnoty odporů vstupního děliče tedy jsou $R_{23} = 100 \text{ k}\Omega$ a $R_{24} = 15 \text{ k}\Omega$. V tomto případě je výhodné použít rezistor o lehce menší jmenovité hodnotě, jelikož nevadí, když hodnota napětí, kterou bude schopen A/D převodník změřit lehce přesáhne hodnotu 24 V. Pokud by byl použit rezistor s větší hodnotou, bylo by přesáhnuto maximální vstupní napětí A/D převodníku.



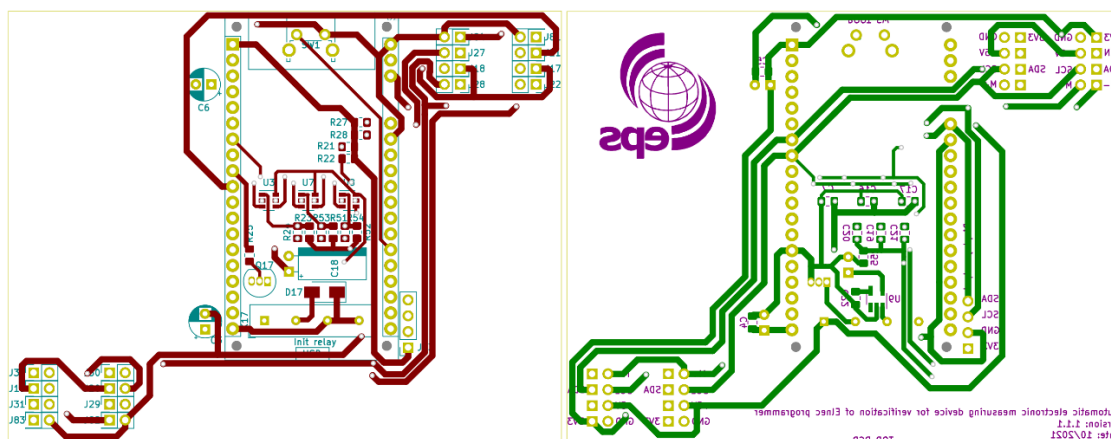
Obr. 20 – Schéma zapojení řídicí (vrchní) desky

4.1.6 Návrh layoutu řídicí desky plošných spojů

Vrchní vrstva řídicí desky měřicího zařízení je osazena dutinkovými lištami pro osazení modulu mikrokontroleru s ESP32. Za zmínku zde také stojí osazení trojice A/D převodníků. Jak již bylo řečeno v předchozí podkapitole, je možné osadit pouze jeden či dva A/D převodníky. Je zde taktéž osazen regulátor napětí pro větší stabilitu napájení A/D převodníků. U A/D převodníků jsou přímo osazeny blokovací keramické kondenzátory u jejich napájecích pinů. Na této straně je taktéž osazeno inicializační relé spínacích karet. Shodně se spodní deskou měřicího zařízení i tato deska disponuje dvouřadými kolíkovými lištami pro propojení s přepínacími kartami. I tato deska obsahuje slepé piny kolíkových lišt pro zaručení univerzality přepínacích karet. Vrchní část vrchní desky je vyobrazena na levé části následujícího obrázku.

Spodní vrstva vrchní desky je vyobrazena v pravé části následujícího obrázku. Jelikož se jedná o vrchní část celého zařízení, je vhodné neumisťovat velké součástky z hlediska větší odolnosti celého měřicího zařízení a zároveň pro zjednodušení návrhu ochranné krabičky celého zařízení. Jak již bylo zmíněno, jsou zde umístěny blokovací

kondenzátory napájecího napětí A/D převodníků.



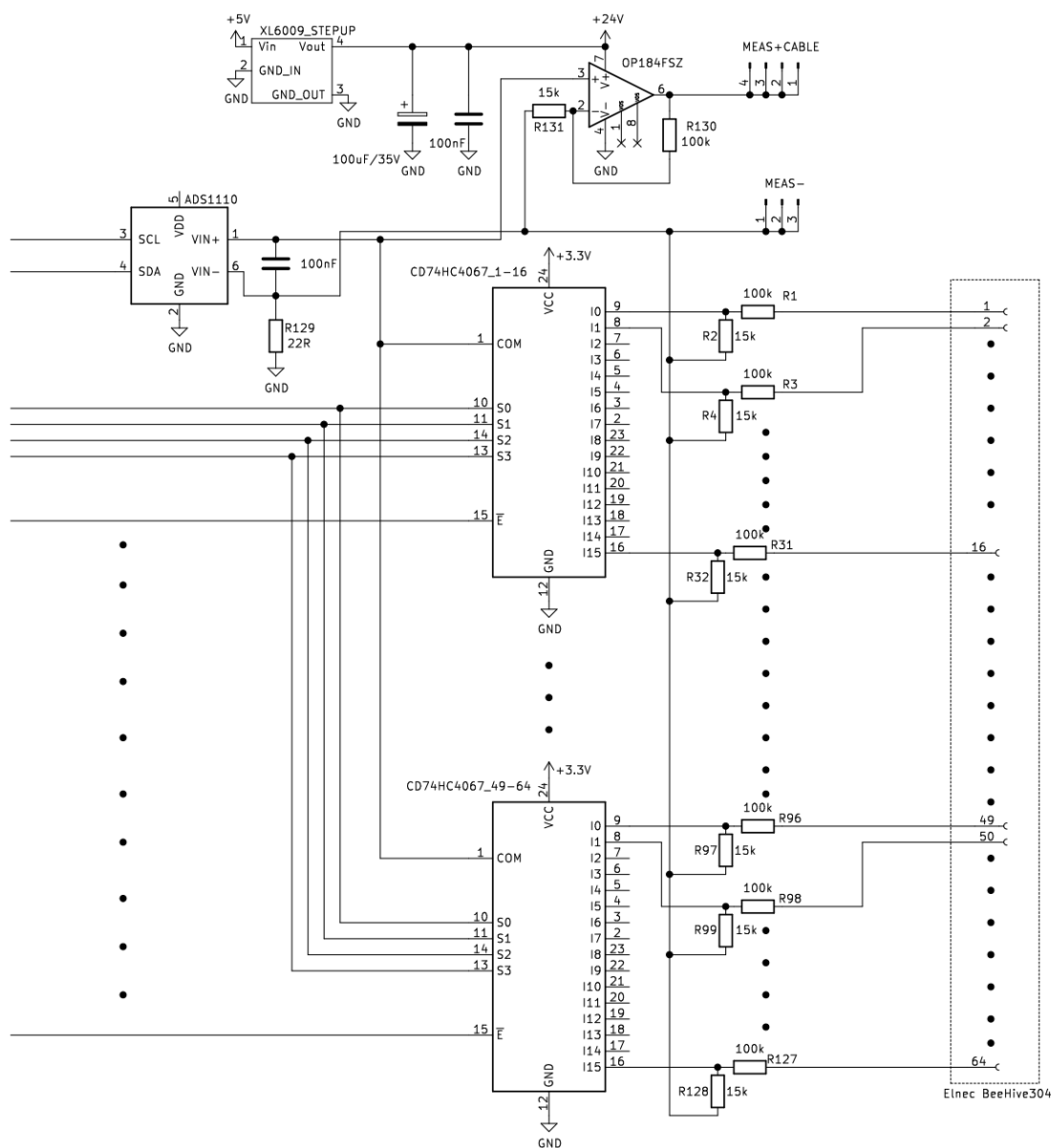
Obr. 21 – Layout DPS řídicí (vrchní)

4.2 Návrh řešení s použitím analogových multiplexorů

Druhým vyhovujícím řešením je použití analogových multiplexorů, a tímto řešením se bude zabývat tato kapitola. Použití multiplexorů se jeví jako velmi výhodné řešení. Multiplexory zajistí připojení pouze jednoho pinu, přičemž ostatní piny jsou ve stavu vysoké impedance. Při použití vstupních děličů je vstupní impedance odpojených pinů přibližně rovna impedanci vstupního děliče. V požadavcích na zařízení je definováno úplné fyzické odpojení neměřených pinů, nicméně pokud se toto řešení ukáže jako vyhovující, bude tento požadavek považován za splněný. Jak již bylo zmíněno v kapitole o rozboru možných řešení, bylo by ideální použít multiplexor s napájecím napětím alespoň 24 V, toto napětí je zároveň mez omezující maximální možná spínací napětí multiplexoru. Dále by byl ideální multiplexor schopný přepínat 64:1 signálů. Dostupné multiplexory, které odpovídají požadovanému napájecímu napětí bohužel nejsou schopny přepínat takto velký počet vstupních signálů. Proto je nutné použít více multiplexorů s menším počtem přepínacích signálů.

4.2.1 Schématický návrh řešení s použitím analogových multiplexorů

Jako vhodný byl vybrán multiplexor TEXAS INSTRUMENTS CD74HC4067, jehož datasheet je dostupný zde [6]. Tento multiplexor je možné napájet v rozsahu od 2 V do 6 V a je schopen přepínat mezi 16 vstupy. Přepínání vstupů je ovládáno pomocí 4 adresních pinů $s0$, $s1$, $s2$ a $s3$, jejichž logické kombinaci přímo odpovídá vstupní pin, který má být připojen na výstup. Multiplexor také disponuje negovaným pinem EN (enable). Pokud je tento pin nezapojený, pak hodnota logické kombinace na adresních vstupech přímo odpovídá adrese vstupního pinu na výstupu. V případě logické jedničky na pinu EN není připojen na výstupu žádný ze vstupních pinů.



Obr. 22 – Zjednodušené schéma zapojení s použitím analogových multiplexorů

Na předchozím schématu je vyobrazeno zjednodušené schéma zapojení měřicího přístroje s použitím analogových multiplexorů. Je vhodné propojit příslušné adresní vodiče (např. s0 všech multiplexorů), jak je patrné ze schématu. Tímto propojením je ušetřeno velké množství I/O pinů mikrokontroleru. Propojení adresních vodičů jednotlivých multiplexorů je umožněno funkcí enable, díky které bude vždy pouze jeden multiplexor aktivní. Z toho vyplývá, že je nezbytné ovládat každý EN (dohromady 4) samostatným I/O pinem mikrokontroleru.

V pravé části schématu jsou zaneseny vstupní piny z Elnec přípravku pro úplné manuální ověření parametrů. Tato napětí musejí být snížena na vhodný pracovní rozsah multiplexoru pomocí vstupních děličů. Použití děličů je nezbytné, jelikož použitý multiplexor pracuje s napětím v rozsahu 2 V až 6 V. Při tomto návrhu byly použity stejné

napět'ové děliče, jako u řešení s přepínacími relé. Výpočet hodnoty zatíženého děliče je vyjádřen rovnicí (rov. 5) v části schématického návrhu řídicí desky. Výstupní piny z multiplexorů jsou opět spojeny a výstupní signál vstupuje nejen do A/D převodníku, ale také na vstup $V+$ operačního zesilovače Analog Devices OP184, jehož datasheet je dostupný zde [7]. Tento operační zesilovač je nesymetricky napájen 24 V. Jelikož modul s ESP32 nedisponuje takovýmto napět'ovým výstupem a je nezbytné, aby celé zařízení bylo napájeno z USB byl použit modul se Step-Up měničem osazeným čipem XL6009, jehož datasheet je dostupný zde [10]. Step-Up měnič slouží ke zvýšení napětí z 5 V na 24 V.

Operační zesilovač je v této aplikaci použit pouze pro „vracení“ hodnoty napětí z aktuálně měřeného pinu kalibračnímu přípravku. Tento signál je připojen k MEAS + CABLE a je vrácen programátoru pro úplné simulování manuálního měřicího procesu, se kterým programátor počítá. Zesílení výstupního zesilovače musí být shodné s převrácenou hodnotou přenosu použitých děličů. Na následujících rovnicích bude proveden výpočet hodnot vhodné kombinace rezistorů zajišťující potřebné zesílení již jednou zeslabeného signálu. Je třeba určit hodnoty rezistorů R130 a R131 nastavující zesílení operačního zesilovače. Nejprve bude vypočten přenos A_{AD} vstupního děliče (například použité R1 a R2):

$$A_{AD} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{15 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3} = \frac{3}{23} \doteq 0,130 \quad (6)$$

Kde:

$$\begin{array}{ll} A_{AD} & - \text{ přenos děliče [-]} \\ R_1 + R_2 & - \text{ hodnoty rezistorů vstupního děliče [\Omega]} \end{array}$$

Shodně jako bylo třeba určit hodnotu jednoho rezistoru při výpočtu vhodného děliče v kapitole návrhu řídicí desky, je i zde při návrhu vhodných hodnot rezistorů operačního zesilovače nezbytné jednu hodnotu zvolit, tedy $R_{130} = 100\text{k}\Omega$. Je si třeba uvědomit, že je nezbytné, aby operační zesilovač disponoval zesílením $A_{OZ} = 1/A_{AD}$.

$$A_{OZ} = \frac{1}{A_{AD}} = \frac{1}{\frac{3}{23}} = \frac{23}{3} \doteq 7,66 \quad (7)$$

Kde:

$$A_{OZ} \quad - \quad \text{zesílení operačního zesilovače [-]}$$

Na následující rovnici bude proveden výpočet vhodné hodnoty rezistoru R131:

$$A_{OZ} = 1 + \frac{R_{130}}{R_{131}} \rightarrow R_{131} = \frac{A_{AD} \cdot R_{130}}{1 - A_{AD}} = \frac{\frac{3}{23} \cdot 10^5}{1 - \frac{3}{23}} = 15000 \Omega = 15\text{k}\Omega \quad (8)$$

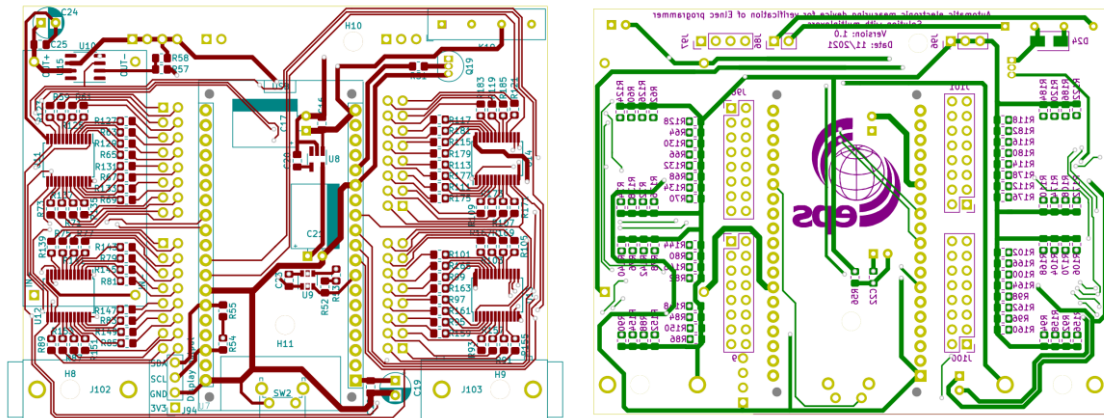
Z tohoto výpočtu je zřejmé, že při použití shodného děliče ve zpětné vazbě operačního zesilovače pracujícím v neinvertujícím zapojení je dosaženo takové hodnoty zesílení, odpovídající převrácené hodnotě přenosu pasivního děliče.

Požadavek na připojení maximálně jednoho měřeného napětí je splněn pouze částečně, jelikož neměřené piny jsou neustále zatíženy impedancí, která je rovna impedanci vstupních děličů. Pokud programátor bude považovat impedanci vstupního děliče za stav nezapojeno, poté je tento požadavek splněn.

4.2.2 Návrh layoutu řešení s použitím analogových multiplexorů

Na následujícím obrázku je vyobrazeno řešení s použitím analogových multiplexorů. Vrchní vrstva (strana) desky je vyobrazena v levé části obrázku. Na této straně jsou umístěny všechny důležité komponenty pro funkci zařízení. V levé a pravé střední části je viditelné umístění čtveřice analogových multiplexorů. Ve střední části je poté umístěn modul s mikrokontrolerem ESP32, A/D převodníkem a regulátorem napětí. Tato část desky také obsahuje bootovací tlačítko, relé pro připojení zátěže a měřicí banány pro možnost manuálního měření právě připnutého napětí. Přes multiplexory *U11* a *U12* je usazen DC – DC Step-Up měnič zajišťující napájení operačního zesilovače.

Na spodní vrstvě (straně) desky jsou shodně jako na spodní desce řešení s reléovými přepínači umístěny dvouřadé dutinkové pin lišty sloužící k propojení 64 měřicích pinů Eltec přípravku pro úplné manuální ověření parametrů. Dále dutinkové lišty pro zapojení *MEAS + CABLE*, *MEAS-* a *LOAD* přípravku. Jsou zde umístěny také drobné součástky, jako například rezistory děličů napětí a vratná dioda relé.



Obr. 23 – Layout řešení s použitím analogových multiplexorů

5. POUŽITÉ KOMPONENTY

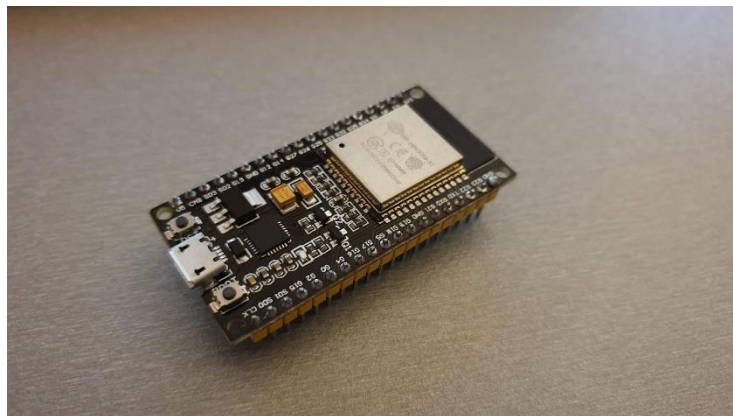
Tato kapitola je věnována průzkumu trhu komponent, které jsou použity pro řešení s reléovými přepínači a pro řešení s analogovými multiplexory. Tato kapitola je rozdělena do podkapitol, které se věnují použitým komponentám v jednotlivých řešení a kapitola pro komponenty společné. U většiny běžných komponent v obou zapojení nebude prováděn průzkum trhu, jelikož jsou tyto komponenty běžně ve firmě používány a je tedy třeba použít tyto komponenty přednostně.

5.1 Společné komponenty pro obě řešení

Běžné komponenty, jakými jsou například rezistory, kondenzátory, tranzistory a diody budou zahrnuty pouze v tabulce (Tab. 1). O ostatních komponentech pojednávají následující kapitoly.

5.1.1 Modul s mikrokontrolerem ESP32

Jak již bylo popsáno v požadavcích na zařízení, je třeba použít pro ovládání měřicího zařízení modul s mikrokontrolerem ESP32 [11]. Modul s ESP32 je osazen dvoujádrovým procesorem ESP32-D0WDQ6. Dále obsahuje řídicí jednotku pro připojení za pomoci Wi-Fi a Bluetooth. Ovládání a komunikace s komponenty je možná za pomoci I²C, SPI a UART nebo přímým ovládáním I/O pinů modulu. Modul je osazen micro-USB konektorem a převodníkem USB-UART pro komunikaci a zápis do paměti programu. Na následujícím obrázku je vyobrazen modul s mikrokontrolerem ESP32.



Obr. 24 – Modul s mikrokontrolerem ESP32

5.1.2 Jazyčkové relé

Po průzkumu trhu reléových přepínačů se ukázaly jako vhodná pouze dvě možnosti. Prvním vhodným je jazyčkové relé COSMO DIA051000 [12] s pořizovací cenou okolo 23 Kč/ks. Druhým vhodným je relé Pan Chang SIP-1A05 [4], toto relé je možno pořídit za 8 Kč/ks. Obě relé disponují jmenovitým napětím 5 V a mají podobně miniaturní

rozměry. Z důvodu pořizovací ceny bude použito relé Pan Chang SIP-1A05, které je možno pořídit za třetinovou cenu oproti COSMO DIA051000. Dimenze relé Pan Chang SIP-1A05 jsou zobrazeny na *Obr.15*.

5.1.3 Regulátor napětí

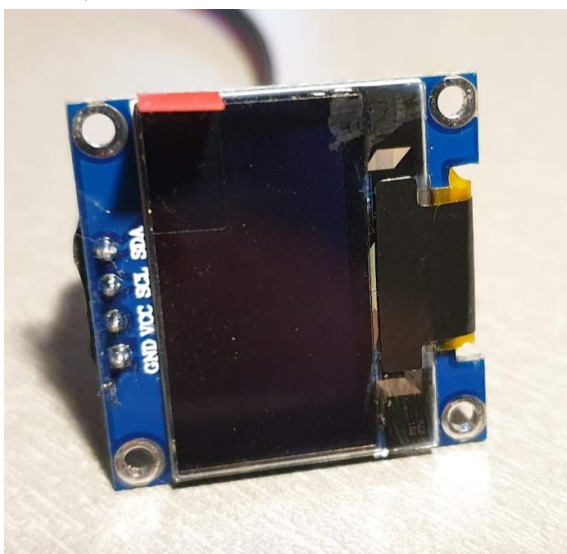
Vhodnými regulátory napětí pro napájení A/D převodníku jsou MICROCHIP TC1185 [13] a MICROCHIP MCP1700 [14]. Oba regulátory regulují na jmenovité napětí 3,3 V. Jejich přesnost regulace je srovnatelná, avšak MICROCHIP TC1185 disponuje zhruba sedmkrát lepší teplotní stabilitou v rozmezí teplot 25 – 125 °C. Změna regulovaného napětí TC1185 při změně teplot 25 – 125 °C je o 0,005 V, zatímco u MCP1700 je rozdíl regulovaného napětí o 0,035 V. Z tohoto důvodu bude použit regulátor napětí MICROCHIP TC1185.

5.1.4 A/D převodník

Napájecím napětím 3,3 V, komunikačním rozhraním přes I²C a diferenčními vstupy parametrově disponují A/D převodníky Texas Instruments ADS1110 [8] a ADS1100 [9]. ADS1110 disponuje rychlostí vzorkování napětí 240SPS (Samples per second), zatímco ADS1100 pouze 128SPS. Avšak ADS1100 vztahuje naměřená data k celému napájecímu rozsahu, zatímco ADS1110 pouze k 2,048 V vnitřní referenci. Převodník ADS1100 je tedy citlivější a z tohoto důvodu bude použit.

5.1.5 Indikační displej

Jako indikační displej pro obě řešení byl vybrán I²C 0,96“ OLED display [15]. Důvodem výběru tohoto typu displeje jsou skladové zásoby ve firmě. Displej komunikuje přes I²C, má kompaktní rozměry, dobré pozorovací úhly a rozlišení 128 x 64 bodů. Výhodou je nízká spotřeba displeje, která je maximálně 80 mW. Indikační displej je vyobrazen na následující obrázku (*Obr.25*).



Obr. 25 – I²C OLED displej

5.1.6 Souhrn společných komponent obou řešení

V následující tabulce (*Tab.1*) jsou vypsané společné komponenty, které jsou použity v obou řešeních automatického měřicího přístroje.

Tab. 1 – Souhrn společných komponent obou řešení

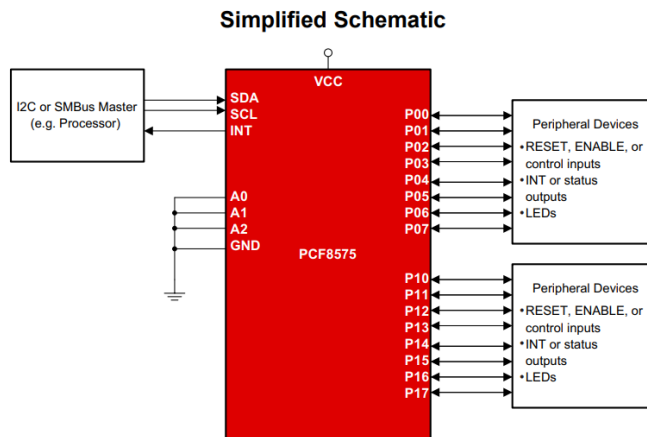
Označení ve schématu	Název komponenty	Pouzdro komponenty	Odkaz na datasheet
Ux	Modul ESP32	-	[11]
Kx	Jazýčkové relé	SIP Form A	[4]
Ux	A/D převodník	SOT23-6	[8]
Ux	Regulátor napětí	SOT23	[13]
Jx	Indikační displej	-	[15]
Dx	Si dioda 1N4007	DO-214AC (SMA)	[19]
Qx	Bipolární NPN tranzistor BC547C	TO-92	[20]
Rx	Rezistor	0805	[21]
Jx	Banánek do DPS	4 mm	[16]
Cx	Keramický kondenzátor	0805	[17]
Cx	Elektrolytický kondenzátor	-	[18]

5.2 Komponenty řešení s reléovými přepínači

Tato podkapitola je zaměřena na popis komponent, které jsou použity pouze v řešení s reléovými přepínači. V tabulce (*Tab.2*) budou opět zachyceny všechny komponenty potřebné pro zhotovení tohoto řešení měřicího přístroje.

5.2.1 I/O Expander

Ve firmě je používán I/O expander PCF8575 [5]. Je vhodný i pro tuto aplikaci, jelikož je ho možné napájet jmenovitým napětím 3,3 V, je ovládán pomocí sběrnice I²C a obsahuje 16 vstupně/výstupních pinů. Zjednodušené schéma expanderu je vyobrazeno na následujícím obrázku (*Obr.26*).



Obr. 26 – Zjednodušené schéma expanderu [5]

5.2.2 Souhrn komponent pro řešení s reléovými přepínači

V následující tabulce jsou vypsány potřebné komponenty pro řešení s reléovými přepínači. Většina těchto komponent byla popsána již v podkapitole 5.1.

Tab. 2 – Souhrn komponent pro řešení s reléovými přepínači

Označení ve schématu	Název komponenty	Pouzdro komponenty	Odkaz na datasheet
Ux	I/O expander	SSOP-24	[5]
Ux	Modul ESP32	-	[11]
Kx	Jazyčkové relé	SIP Form A	[4]
Ux	A/D převodník	SOT23-6	[8]
Ux	Regulátor napětí	SOT23	[13]
Jx	Indikační displej	-	[15]
Dx	Si dioda 1N4007	DO-214AC (SMA)	[19]
Qx	Bipolární NPN tranzistor BC547C	TO-92	[20]
Rx	Rezistor	0805	[21]
Jx	Banánek do DPS	4 mm	[16]
Cx	Keramický kondenzátor	0805	[17]
Cx	Elektrolytický kondenzátor	-	[18]

5.3 Komponenty řešení s analogovými multiplexory

Tato podkapitola je věnována použitým komponentám v řešení s analogovými multiplexory. V následujících podkapitolách jsou popsány komponenty, které jsou unikátní pouze pro toto řešení.

5.3.1 Analogový multiplexor

Při průzkumu trhu byl vybrán multiplexor TEXAS INSTRUMENTS CD74HC4067 [6]. Jedná se cenově nejdostupnější analogový multiplexor schopný přepínat 16 kanálů. Multiplexor disponuje vstupem Enable, schopným odpojit všechny kanály. Tento vstup je stěžejní pro celý princip tohoto řešení.

5.3.2 Operační zesilovač

Jako vhodný operační zesilovač byl zvolen Analog Devices OP184 [7], který je ve firmě hojně používán. Tento operační zesilovač je možné použít díky jeho nesymetrickému napájení a schopnosti tzv. rail – to – rail, což umožňuje zesilovači dosáhnout výstupního napětí blízkého se jeho napájecímu napětí.

5.3.3 Modul se Step-Up měničem

Step-Up měnič je použit DC-DC modul osazený čipem XL6009 [10]. Je vhodný zejména pro rozsah jeho výstupního stejnosměrného napětí, které se nachází v rozmezí 5 – 38 V. Výstup tohoto modulu není plovoucí, jelikož je spojena vstupní zem se zemí výstupní. Modul je možno napájet stejnosměrným napětím od 4,5 V do 32 V.



Obr. 27 – Step-Up modul [22]

5.3.4 Souhrn komponent pro řešení s analogovými multiplexory

V následující tabulce (*Tab.3*) jsou zaneseny komponenty potřebné pro realizaci řešení automatického elektronického měřicího přístroje s využitím analogových multiplexorů.

Tab. 3 – Souhrn komponent pro řešení s analogovými multiplexory

Označení ve schématu	Název komponenty	Pouzdro komponenty	Odkaz na datasheet
Ux	Analogový multiplexor	SSOP-24	[6]
Ux	Operační zesilovač	SOIC-8	[7]
Ux	Step-Up měnič	-	[10]
Ux	Modul ESP32	-	[11]
Kx	Jazýčkové relé	SIP Form A	[4]
Ux	A/D převodník	SOT23-6	[8]
Ux	Regulátor napětí	SOT23	[13]
Jx	Indikační displej	-	[15]
Dx	Si dioda 1N4007	DO-214AC (SMA)	[19]
Qx	Bipolární NPN tranzistor BC547C	TO-92	[20]
Rx	Rezistor	0805	[21]
Jx	Banánek do DPS	4 mm	[16]
Cx	Keramický kondenzátor	0805	[17]
Cx	Elektrolytický kondenzátor	-	[18]

6. REALIZACE ELEKTRONICKÉ ČÁSTI AUTOMATICKÉHO MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE

V následující kapitole je pojednáváno o samotné fyzické realizaci automatického elektronického měřicího přístroje pro ověření parametrů programátoru Eltec. Pozornost zde bude věnována oběma řešením (řešení s reléovými přepínači, řešení s analogovými multiplexory).

6.1 Realizace řešení s reléovými přepínači

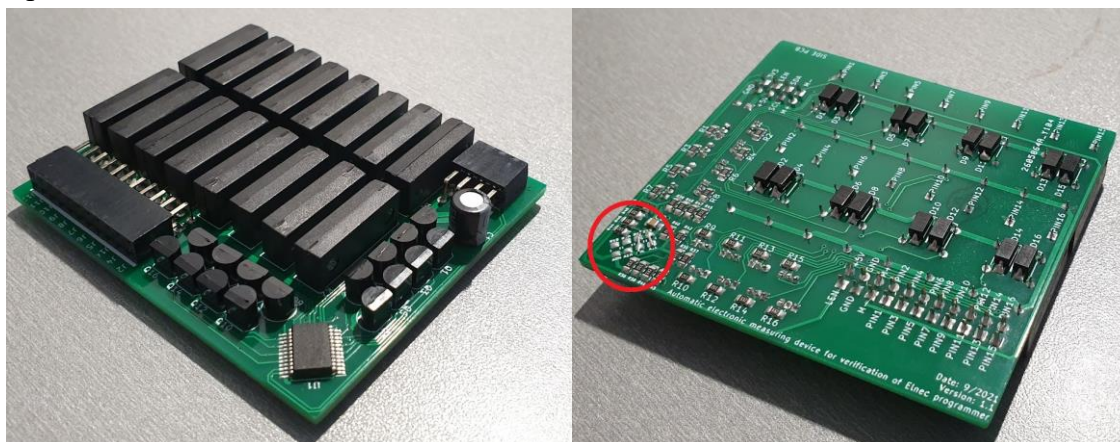
Tato kapitola je zaměřena na realizaci řešení automatického elektronického měřicího přístroje s reléovými přepínači. Jak již bylo zmíněno, celé zařízení je konstruováno do krychlové sestavy. Měřicí přípravek je složen ze spodní desky, čtyřech přepínacích karet a vrchní (řídící desky).

6.1.1 Realizace přepínací karty

Na následující dvojici obrázků (*Obr.28*) je zachycena plně osazená DPS přepínací karty. Vlevo se nachází pohled na vrchní stranu desky, zatímco vpravo pohled na spodní stranu desky. Rozměry přepínací karty jsou 80 x 70 x 12 mm.

Na vrchní straně DPS je osazeno 16 miniaturních jazýčkových relé. V levém a pravém rohu desky jsou osazeny dvouřadé dutinkové pin lišty pro propojení se spodní a vrchní (řídící) deskou. Ve spodní části je osazen I/O expander.

Na spodní straně DPS je třeba zmínit volbu adresy pro I/O expander, tato volba je zvýrazněna v levém dolním rohu. Adresa je volena při osazování, pro každou přepínací kartu ze čtveřice unikátně, aby nedocházelo ke kolizi adres na sběrnici I²C. V tomto případě je zkratována dvojice A0L a A1L. Adresa je volitelná záměrně, díky takovému návrhu je možné vyrábět pouze jeden druh DPS, nikoli čtyři, které by se lišily pouze v pevně nastavené adrese.



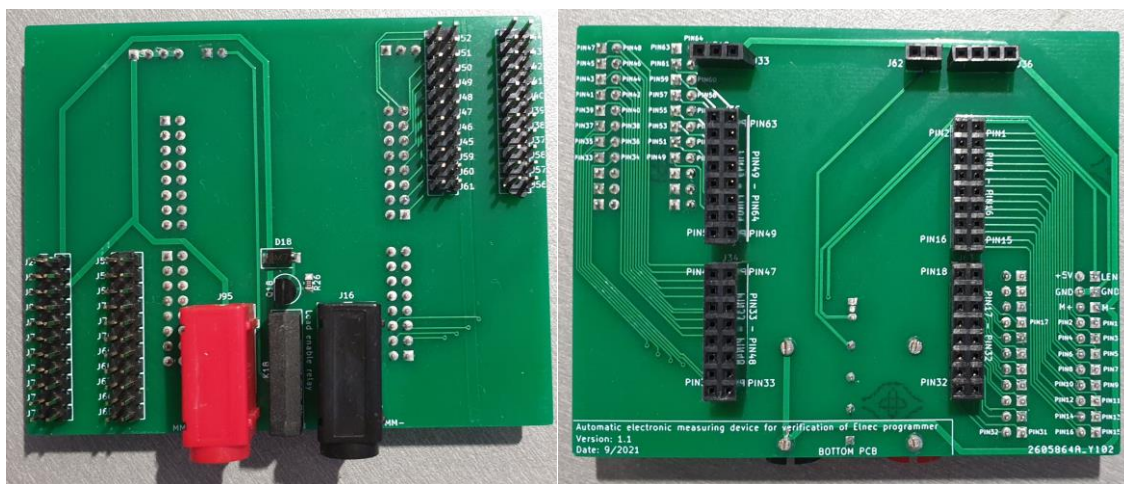
Obr. 28 – Realizace přepínací karty

6.1.2 Realizace spodní desky

Následující dvojice obrázků je zachycena spodní deska měřicího přístroje. Vlevo je vyobrazen vrchní pohled na spodní desku, vpravo pak pohled spodní. Rozměry této desky jsou 90 x 70 x 23 mm.

Vrchní strana je osazena dvojicí 4 mm banánků pro možnost připojení multimetru. Mezi banánky je osazeno miniaturní jazýčkové relé, sloužící ke zkratování svorek *LOAD*. Dále je zde osazena čtveřice dvouřadých kolíkových pin lišt zajišťující připojení čtveřice měřicích karet a následný přenos měřeného napětí z pinů programátoru.

Spodní strana DPS je osazena čtveřicí dvojitých dutinkových pin lišt a trojicí jednořadých dutinkových pin lišt, které zajišťují připojení měřicího zařízení k Elneec přípravku pro úplné manuální ověření parametrů.

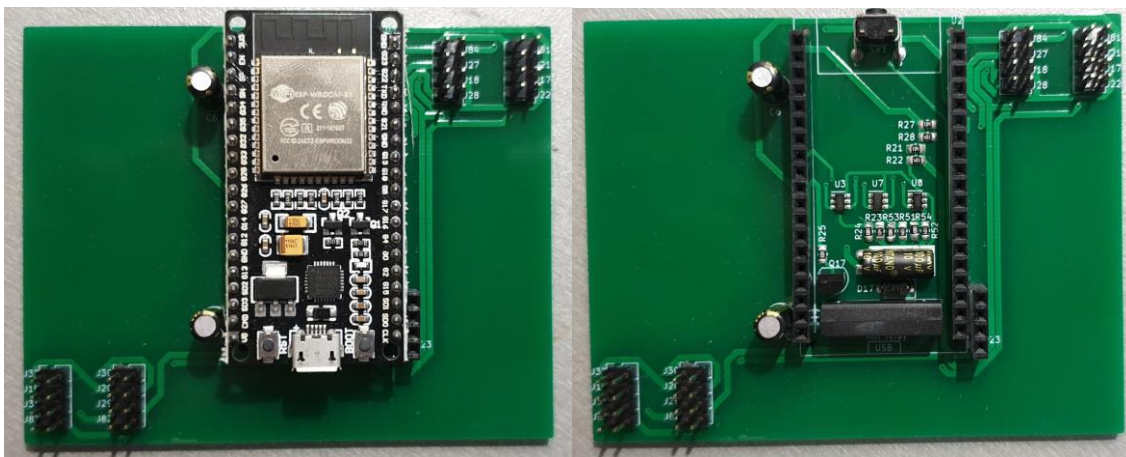


Obr. 29 – Realizace spodní DPS

6.1.3 Realizace vrchní (řídící) desky

Na následujícím obrázku (*Obr.30*) je zobrazen vrchní pohled na řídicí desku. V levé části je zasazen modul s mikrokontrolerem ESP32. Pro ukázkou komponent osazených pod modulem s mikrokontrolerem ESP32 není v pravé části tento modul osazen. Rozměry desky jsou shodné jako u spodní desky, tedy 90 x 70 x 12 mm. Rozdíl je pouze v maximální výšce, která je dána usazeným mikrokontrolerem.

Na vrchním pohledu jsou mimo modul s mikrokontrolerem osazeny dvojité kolíkové pin lišty, které shodně jako na spodní desce zajišťují propojení se čtveřicí prepínacích karet. Pod modulem s mikrokontrolerem je osazena trojice A/D převodníků, bootovací tlačítko a miniaturní inicializační jazýčkové relé pro napájení prepínacích karet. Napravo od relé se nachází čtyřpinová dutinková lišta pro připojení indikačního displeje.



Obr. 30 – Vrchní pohled na řídicí desku

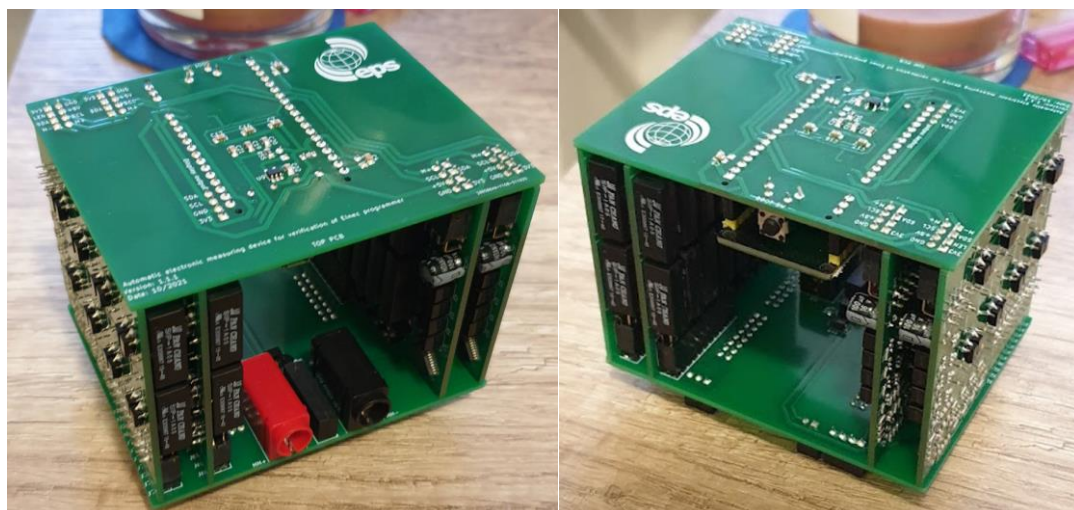
Pohled na spodní stranu řídicí desky je zachycen na následujícím obrázku (*Obr.31*). Za zmínku na této straně desky stojí za zmínku regulátor napětí (*U9*). Jelikož je tato strana desky zároveň vrchní částí celého měřicího zařízení je nežádoucí osazovat na této straně prostorově náročné komponenty.



Obr. 31 – Spodní pohled na řídicí desku

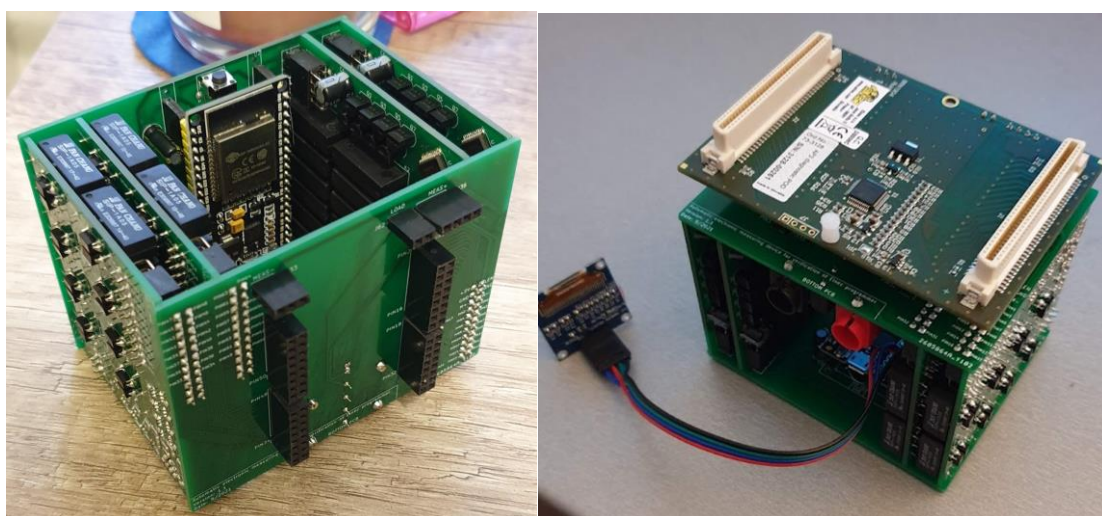
6.1.4 Sestava řešení s reléovými přepínači

Na následujícím obrázku (*Obr.32*) je zachycen boční pohled na sestavu řešení s reléovými přepínači. Měřicí zařízení je tedy sestaveno z desek, které byly popsány v předchozích podkapitolách. Základny tvoří spodní a vrchní deska, které jsou mezi sebou propojeny čtveřicí přepínacích karet. Velikost celého měřicího přípravku je 90 x 70 x 65 mm.



Obr. 32 – Sestava řešení s reléovými přepínači (boční pohled)

Na obrázku (*Obr.33*) je zachycen spodní pohled na sestavu řešení s reléovými přepínači (vlevo). Za pomoci dutinkových pin lišt je tento měřicí přípravek jako celek připojen k Elnec přípravku pro úplné manuální ověření parametrů (vpravo).

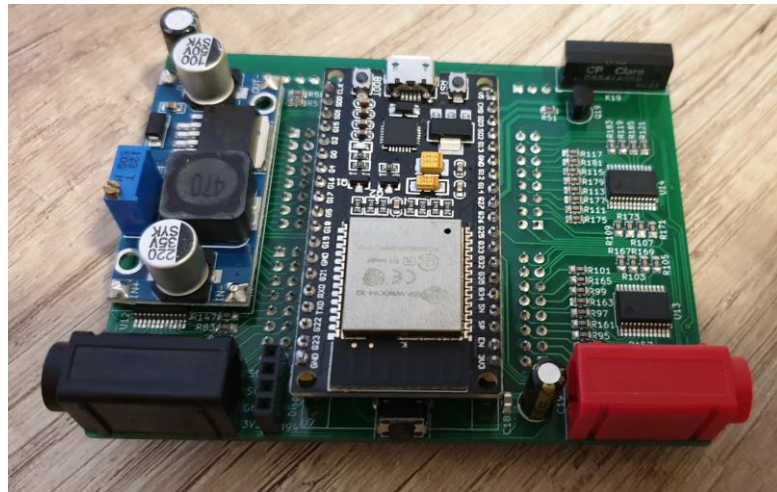


Obr. 33 – Zasazení Elnec přípravku pro úplné manuální ověření parametrů do sestavy

6.2 Realizace řešení s analogovými multiplexory

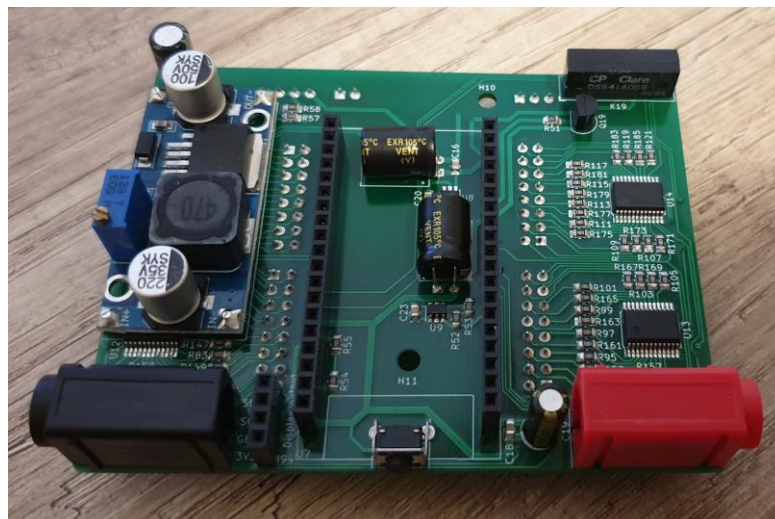
Následující podkapitola je věnována řešení s analogovými multiplexory. Na první pohled se jedná o kompaktní měřicí zařízení při porovnání s řešením pomocí reléových přepínačů. Zařízení disponuje rozměry 92 x 70 x 16 mm.

Následující obrázek (*Obr.34*) zachycuje vrchní pohled na měřicí zařízení. V pravé střední části je třeba zmínit dvojici analogových multiplexorů. Druhá dvojice analogových multiplexorů je osazena symetricky na levé straně desky pod modulem Step-Up měniče společně s operačním zesilovačem. Při oživování tohoto měřicího zařízení je třeba nastavit na trimru modulu Step-Up měniče hodnotu jeho jmenovitého výstupního napětí na 24 V. Ve střední části měřicího zařízení je osazen modul s mikrokontrolerem ESP32. Shodně jako u řešení s reléovými přepínači jsou zde osazeny 4 mm banánky pro připojení multimetru, dutinková pin lišta umožňující připojení indikačního displeje a v pravé horní části miniaturní jazýčkové relé sloužící k sepnutí zátěže.



Obr. 34 – Vrchní pohled na řešení s analogovými multiplexory

Na následujícím obrázku (*Obr.35*) je opět vrchní pohled na měřicí přístroj, zde je ale sejmut modul s mikrokontrolerem ESP32. Lze si povšimnout umístění A/D převodníku společně s regulátorem napětí pro tento A/D převodník pod modulem s mikrokontrolerem ESP32. Pod tímto modulem je taktéž umístěno i bootovací tlačítko.



Obr. 35 – Vrchní pohled na řešení s analogovými multiplexory

Na spodnímu pohledu měřicího přístroje opět dominují dutinkové pin lišty pro připojení měřicího zařízení k ElneC přípravku pro úplné manuální ověření parametrů.



Obr. 36 – Spodní pohled na řešení s analogovými multiplexory

7. TESTOVACÍ PŘÍPRAVEK PRO MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

Jak již z požadavků na zařízení vyplývá, je nezbytné společně s měřicím zařízením navrhnout a zkonstruovat také testovací (kalibrační) přípravek pro možnost oživení, testování a následnou kalibraci měřicího zařízení. Podmínkou pro návrh a konstrukci testovacího přípravku je jeho schopnost zasazení do základen obou měřicích zařízení, tzn. připojení k měřicímu zařízení bude probíhat stejným způsobem jako připojení El nec přípravku pro úplné manuální ověření parametrů. Návrhu testovacího přípravku, použitým komponentám a následné realizaci bude věnována tato kapitola.

7.1 Návrh testovacího přípravku

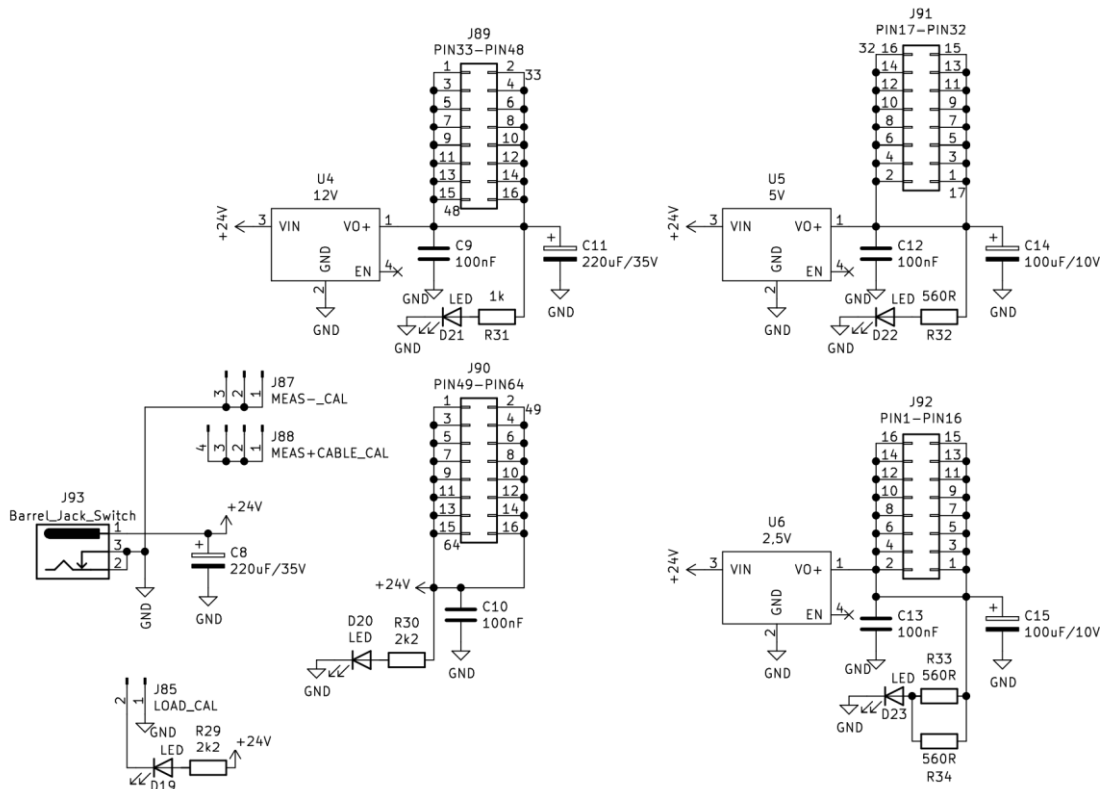
Je vhodné, aby testovací přípravek disponoval několika různými napěťovými referencemi, na kterých budou obě řešení měřicího zařízení testována. Jelikož je u řešení s reléovými přepínači každá přepínací karta určena pro měření napětí na 16 pinech je vhodné vytvořit čtveřici různých napětí, která otestují měřicí zařízení v celém jeho rozsahu. Stejný případ nastává i u řešení s analogovými multiplexory, které přepínají mezi shodnými piny jako přepínací karty. Napěťové reference byly zvoleny na hodnoty 2,5 V pro piny 1 – 16, 5 V pro piny 17 – 32, 12 V pro piny 33 – 48 a 24 V pro piny 49 – 64.

Jelikož pro případ testovacího přípravku není podmínka pro napájení z USB je vhodné využít externí zdroj o jmenovitém výstupním napětí 24 V. Toto napětí je poté třeba za pomoci vhodné komponenty regulovat na již zmíněných 12 V, 5 V a 2,5 V. Vybraný regulátor napětí bude blíže popsán v kapitole o výběru vhodných komponent.

Dále je vhodné například signalizovat připnutí zátěže zkratováním svorek *LOAD* a přítomnost jednotlivých napětí na příslušných pinech.

7.1.1 Schématický návrh testovacího přípravku

Na následujícím obrázku (*Obr.37*) je zobrazeno schéma zapojení testovacího přípravku pro měřicí zařízení. Schématické zapojení je v principu velmi jednoduché. Dané sekce po 16 pinech připadajících na jednu přepínací kartu nebo jeden analogový multiplexor jsou vzájemně propojeny a jsou připojeny na dané napětí, jak již bylo zmíněno výše. Je zde zřejmé, že piny 49 – 64 jsou připojeny přímo na zdroj napětí o jmenovité hodnotě 24 V, paralelně je připojen blokovací kondenzátor *C10* kompenzující možná rušení. Zbylé tři sektory jsou zapojeny v principu podobně, jediným rozdílem je velikost jmenovitého napětí od regulátoru. Kromě blokovacího kondenzátoru jsou zde paralelně připojeny ještě elektrolytické kondenzátory (např. *C11*), které zlepšují tvrdost napěťového zdroje.



Obr. 37 – Schéma zapojení testovacího přípravu pro měřicí zařízení

Ke každé napěťové sekci je připojena LED dioda signalizující přítomnost napětí na daných pinech. Obecně vzato jmenovitý maximální proud LED diodou by neměl přesáhnout 30 mA, aby zde byla dodržena dostatečná bezpečnost, je vhodné nepřesáhnout hodnotu jmenovitého proudu 20 mA. Výpočet hodnoty odporu vhodného předřadného rezistoru (R_{30}) pro jmenovité napětí 24 V bude demonstrován na následující rovnici (rov. 9).

$$R_{30} = \frac{U_{24}}{I_{opt}} = \frac{24}{10^{-3}} = 2400 \Omega = 2,4 \text{ k}\Omega \quad (9)$$

Kde:

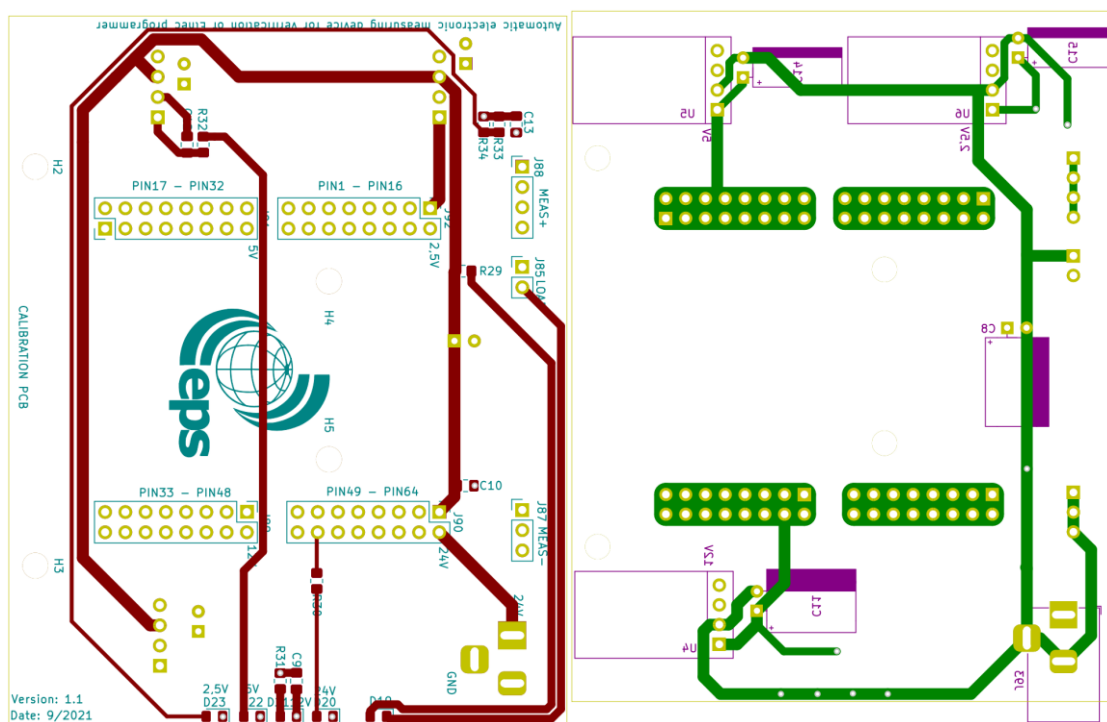
- U_{24} – jmenovitá hodnota napětí 24 V [V]
- I_{opt} – optimální jmenovitá hodnota proudu protékající diodou [A]

Pro tento případ bude použit rezistor o jmenovité hodnotě 2,2 k Ω , díky tomu se mírně zvýší jmenovitý proud protékající LED diodou (11 mA), toto zvýšení není ale nijak kritické. Jelikož je vždy regulované napětí přibližně poloviční, je zde třeba pro zachování poměru použít i rezistory o poloviční (přibližně poloviční podle řady) jmenovité hodnotě.

7.1.2 Návrh layoutu testovacího přípravku

Na následujícím obrázku (Obr.38) je zachycen návrh layoutu desky testovacího přípravku. Deska je opět koncipována jako dvouvrstvá. Na levé části obrázku se nachází vrchní strana (vrstva), na které jsou umístěny kolíkové pin lišty pro připojení základen obou měřících zařízení. Za zmínku zde také stojí umístění signalizačních LED diod, které jsou umístěny při dolní hraně vrchní strany desky.

Na pravé straně obrázku se nachází spodní pohled DPS. Zde je evidentní propojení pinů v rámci sekce a jejich následné připojení na příslušné napětí. Nachází se zde také zmiňované blokovací a filtrační kondenzátory. V pravém dolním rohu je situován konektor pro připojení 24 V napájecího napětí. Nejdůležitějšími komponentami umístěnými na této straně jsou regulátory napětí ($U4$, $U5$, $U6$), zajišťující regulaci napětí na požadovanou hodnotu.



Obr. 38 – Návrh layoutu testovacího přípravku

7.2 Použité komponenty testovacího přípravku

V následujících podkapitolách budou představeny podstatné komponenty potřebné pro realizaci testovacího přípravku. Součástí této kapitoly bude opět tabulka použitých komponent taktéž potřebných pro realizaci.

7.2.1 Regulátor napětí

Jako vhodný regulátor napětí (Step-Down měnič) byl vybrán DC-DC regulátor [24] osazený Step-Down měničem MPS MP2315 [23]. Nezbytným parametrem je jeho napájecí napájení v rozmezí 4,5 – 24 V. Tento měnič je schopen regulovat pouze směrem dolů. Umožňuje ladění svého výstupního napětí za pomoci trimru od 0,8 V do limitního napájecího napětí.

Je zde možnost nastavit pevnou hodnotu výstupního napájení přerušením tištěného spoje s označením *ADJ* a poté propojit spoj s požadovanou hodnotou. Pevně je možno nastavit výstupní napětí Step-Down měniče na hodnoty 1,8 V, 2,5 V, 3,3 V, 5 V, 9 V a 12 V. [24] Na následujícím obrázku (*Obr.39*) je znázorněno, jak nastavit pevnou hodnotu výstupního napětí.

PRO NASTAVENÍ PEVNÉ HODNOTY MĚNIČE JE POTŘEBA PŘERUŠIT TIŠTĚNÝ SPOJ S OZNAČENÍM *ADJ*, POTÉ CÍNEM PROPÁJET POŽADOVANOU HODNOTU. NAPŘÍKLAD 3.3V.



PŘERUŠENÍ JE MOŽNO PROVEST NAPŘÍKLAD NOŽEM NEBO NŮŽKAMI.

Obr. 39 – Nastavení pevné výstupné hodnoty Step-Down měniče [24]

Pevného nastavení výstupního napětí je využito i v realizaci testovacího přípravku, kde jsou takto nastavené hodnoty na 2,5 V, 5 V a 12 V.

7.2.2 Napájecí zdroj a konektor

Jako vhodný se jeví zdroj CELLEVIA POWER CLW-2424-W2E-EB [25]. Tento zásuvkový spínaný zdroj je napájen síťovým napětím a jeho výstupem je jmenovité napětí 24 V. Zdroj disponuje výkonem 24 W a tím disponuje velkou výkonovou rezervou. Výstup je zajištěn přes konektor 5.5/2.1 mm a je tedy třeba zajistit vhodný DPS protikus.

Vhodným kompatibilním konektorem je například úhlový napájecí konektor do DPS Cliff FC68148 [26]. Na *Obr.40* je zachycen napájecí zdroj s vhodným konektorem.



Obr. 40 – Napájecí zdroj a konektor [25][26]

7.2.3 Souhrn komponent pro testovací přípravek

Následující tabulka shrnuje potřebné komponenty sloužící k realizaci testovacího přípravku pro měřicí zařízení.

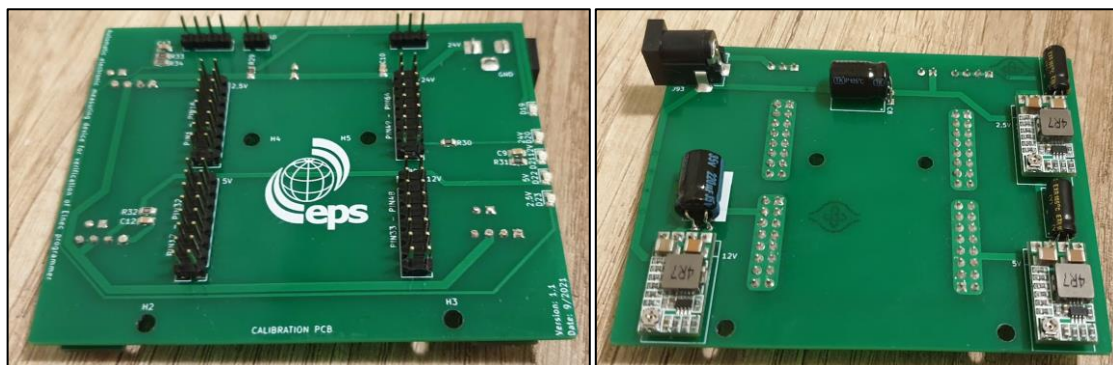
Tab. 4 – Souhrn komponent pro testovací přípravek

Označení ve schématu	Název komponenty	Pouzdro komponenty	Odkaz na datasheet
Ux	Step-Down měnič	-	[24]
-	Napěťový zdroj	-	[25]
Jx	Konektor napájení	-	[26]
Cx	Keramický kondenzátor	0805	[17]
Cx	Elektrolytický kondenzátor	-	[18]
Rx	Rezistor	0805	[21]
Dx	LED dioda	0805	[27]

7.3 Realizace testovacího přípravku

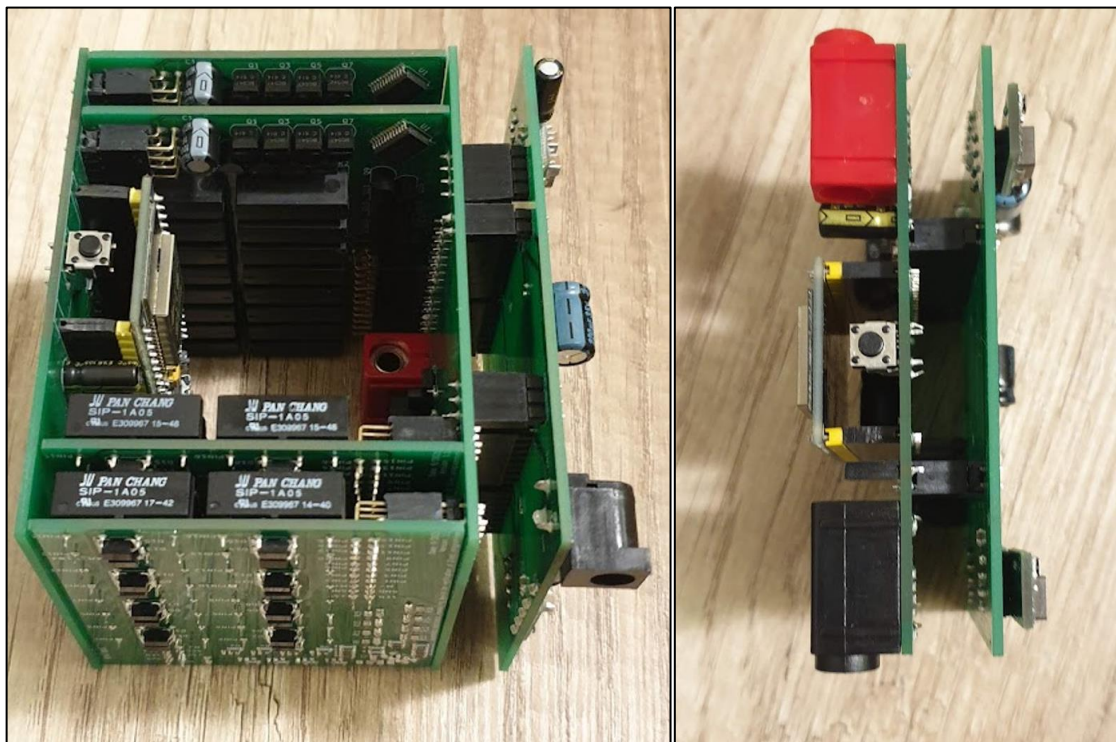
Realizace testovacího přípravku proběhla podle uvedeného návrhu. V levé části obrázku (Obr.41) se nachází vrchní pohled na testovací přípravek. Jsou zde osazeny kolíkové pin lišty, které slouží pro připojení základen obou měřicích zařízení. Dále v pravé části si lze všimnout indikačních diod sloužících pro signalizaci připojené zátěže a přítomnosti napětí na jednotlivých sektorech.

Na spodním pohledu testovacího přípravku, který je vyobrazen vpravo stojí za zmínku umístění trojice napěťových regulátorů a konektoru pro připojení napájecího zdroje.



Obr. 41 – Realizace testovacího přípravku

Na následujícím obrázku (Obr.42) je zaneseno připojení obou realizovaných měřicích zařízení k testovacímu přípravku. Nalevo se nachází sestava řešení s reléovými přepínači, napravo řešení s použitím analogových multiplexorů.



Obr. 42 – Připojení testovacího přípravku k oběma řešením měřicího zařízení

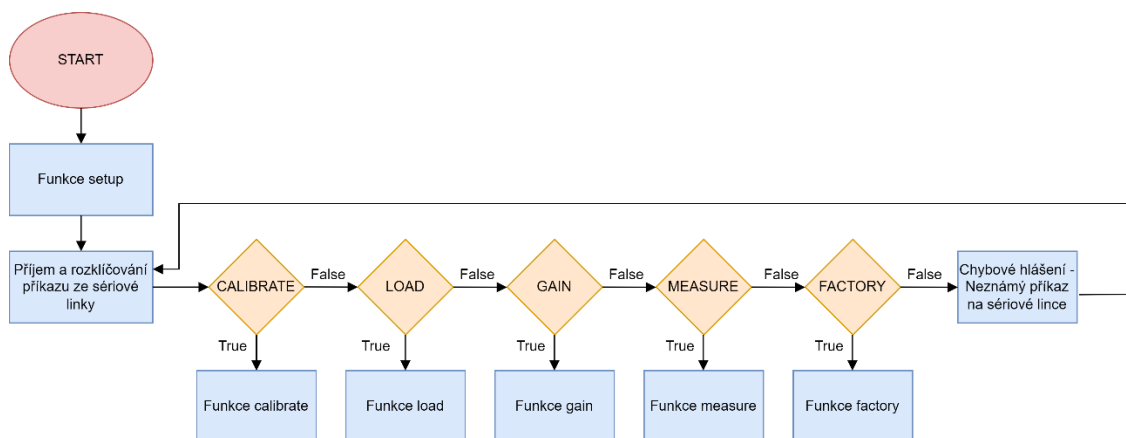
8. NÁVRH FIRMWARE AUTOMATICKÉHO MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE PRO ŘEŠENÍ S RELÉOVÝMI PŘEPÍNAČI

V této kapitole jsou popsány stěžejní části firmwaru navrženého pro řešení s reléovými přepínači. Firmware je naprogramován v programovacím jazyce C++. Programování proběhlo v prostředí *Microsoft Visual Studio Code* s nadstavbou pro programování mikrokontrolérů *PlatformIO*. Byla využita dvojice vestavěných knihoven, knihovna *Wire* pro komunikaci za pomoci I²C a knihovna *EEPROM*. Dále byla využita knihovna pro A/D převodník *ADS1100* [28] a IO expander *PCF8575* [29]. Knihovna *Adafruit_SSD1306* pro I²C 0,96“ OLED displej byla integrována ze správce knihoven.

Měřicí zařízení se může nacházet pouze ve čtyřech stavech. Těmito stavy jsou *STANDBY*, *USERINPUT*, *CALIBRATION* a *READING*. Ve stavu *STANDBY* měřicí zařízení čeká na příkaz ze sériové linky. Ve stavu *USERINPUT* je uživatel vyzván k změření a následnému zadání referenčních hodnot. *CALIBRATION* je stav ve kterém dochází ke kalibraci měřicího přístroje. Měřicí přístroj se nachází ve stavu *READING* při měření na žádaném pinu.

Na následujícím diagramu (*Obr.43*) je vyobrazen zjednodušený tok programu. Z tohoto diagramu je patrné, že po připojení mikrokontroleru k napájení je spuštěna inicializační funkce *setup*. Dále je vyčkáváno na zadání příkazu od uživatele po sériové lince. Korektními příkazy jsou *CALIBRATE*, pro spuštění kalibrační sekvence automatického měřicího přístroje. Příkaz *LOAD* pro připojení, či odpojení zátěže. *GAIN* pro nastavení zesílení A/D převodníku. Příkaz *MEASURE* pro změření hodnoty napětí z požadovaného pinu a příkaz *FACTORY* pro uvedení měřicího přístroje do továrního nastavení. Pokud byl příkaz vykonán nebo nebyl zadán korektně, program opět vyčkává na zadání opětovného nebo dalšího příkazu.

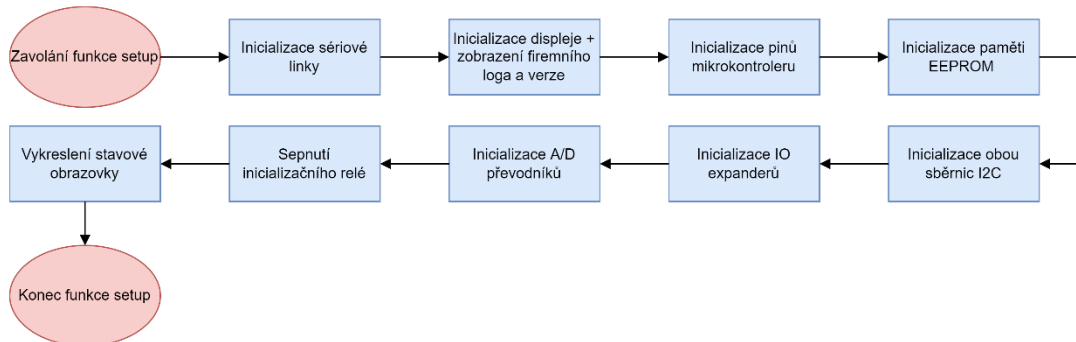
V následujících podkapitolách jsou detailněji popsány jednotlivé funkce z diagramu na *Obr.43*, komunikace a ovládání displeje.



Obr. 43 – Zjednodušený diagram toku programu

8.1 Funkce setup

Funkce *setup* je spuštěna automaticky vždy při připojení mikrokontroleru k napájení. Na následujícím obrázku je zachycen diagram přibližující průběh této funkce.



Obr. 44 – Diagram průběhu funkce setup

Ve funkci *setup* je spuštěna inicializační sekvence. Nejprve probíhá inicializace sériové linky, následně displeje, na kterém je v průběhu funkce *setup* zobrazeno firemní logo. Dále jsou inicializovány piny mikrokontroleru, paměť EEPROM, sběrnice I²C, IO expandery, A/D převodníky. V další fázi je sepnuto inicializační relé, které přivede napájecí napětí +5 V do přepínacích karet měřicího přístroje. Sekvence je ukončena vykreslením stavové obrazovky na displeji měřicího přístroje (viz. 8.6).

8.2 Příjem a rozklíčování příkazu ze sériové linky

Po přijetí řetězce ze sériové linky je nezbytné tato data rozklíčovat. Jelikož validní data obsahují nejen příkaz, ale i parametr, je nezbytné data rozdělit a samostatně vyhodnotit. Na následujícím obrázku je ukázka kódu řešící rozdělení přijatého řetězce na příkaz (*command*) a parametr (*param1*).

```
String buff = Serial.readString();
buff.trim();

String command = getValue(buff, ' ', 0);
String param1 = getValue(buff, ' ', 1);

String getValue(String data, char separator, int index)
{
    int found = 0;
    int strIndex[] = {0, -1};
    int maxIndex = data.length()-1;

    for(int i=0; i<=maxIndex && found<=index; i++){
        if(data.charAt(i)==separator || i==maxIndex){
            found++;
            strIndex[0] = strIndex[1]+1;
            strIndex[1] = (i == maxIndex) ? i+1 : i;
        }
    }

    return found>index ? data.substring(strIndex[0], strIndex[1]) : "";
}
```

Obr. 45 – Dělení přijatého řetězce ze sériové linky

Dělení řetězce je řešeno funkcí *getValue*, která pomocí separátoru vrací řetězec odpovídající požadovanému dílčímu řetězci. Zvoleným separátorem je mezera. Jako příkaz je následně zvolena první hodnota v poli (resp. nultý prvek) a jako parametr hodnota následující.

8.3 Funkce calibrate

Kalibrace probíhá po připojení měřicího přístroje na testovací přípravek. Po rozklíčování příkazu *CALIBRATE* na sériové lince je spuštěna kalibrační sekvence. Nejprve měřicí přístroj přechází do stavu *USERINPUT* v tomto stavu je třeba interakce s obsluhou. Po vložení svorek voltmetru do měřicího přístroje je vždy sepnut první pin na dané prepínací kartě a obsluha je vyzvána k změření a zaznamenání hodnoty napětí z voltmetru.

Následně jsou tyto kalibrační hodnoty předány funkci *calibrate*. V této funkci přechází zařízení do stavu *CALIBRATION* a dochází k postupnému měření pinů na prepínacích kartách. Před každým měřením je provedena kontrola na poruchu, která by mohla být způsobena reléovým prepínačem, který zůstal sepnutý v důsledku poruchy. Při měření na jednotlivých prepínacích kartách (rozsazích) je také automaticky nastavováno zesílení (gain) A/D převodníku, aby byla na každém rozsahu zajištěna maximální citlivost. Zesílení A/D převodníku je pro měření na napěťové úrovni 2,5 V nastavována na 8, pro napěťovou úroveň 5 V na hodnotu 4, pro napěťovou úroveň 12 V na hodnotu 2 a pro úroveň 24 V na hodnotu 1.

Následně jsou za pomoci průměru hodnot změřených napětí na jednotlivých prepínacích kartách (*Prům. hodnota napětí na prep. kartě*), hodnot napětí zadaných uživatelem (*Hodnota napětí změřená obsluhou*) a chyby nuly (*Prům. chyba nuly na prep. kartě*) vypočteny konverzní konstanty sloužící k eliminaci chyby měření. Konverzní konstanty jsou spočteny vždy pro každou z prepínacích karet (pro každý rozsah A/D převodníku) zvlášť podle následujícího vztahu (10) a zapsány do EEPROM paměti.

$$Konv. konst. = \frac{\text{Hodnota napětí změřená obsluhou}}{\text{Prům. hodnota napětí na prep. kartě} - \text{Prům. chyba nuly na prep. kartě}} \quad (10)$$

Následně přechází měřicí zařízení opět do stavu *STANDBY* a je vyčkáváno na další příkaz ze sériové linky.

8.4 Funkce load, gain a factory

Po přijetí příkazu *LOAD* na sériové lince proběhne s parametrem 1 sepnutí relé a tím zkratování svorek *LOAD* na El nec přípravku pro úplné manuální ověření parametrů. Zatímco s parametrem 0 dojde k rozpojení tohoto relé.

Příkazem *GAIN* dochází s vhodným parametrem (1, 2, 4 a 8) k přenastavení vstupního zesílení všech A/D převodníků. O toto přenastavení se stará funkce *setGain*. Možnost volby zesílení je nezbytná pro zajištění co největší citlivosti při měření napětí.

Příkaz *FACTORY* reinitializuje kalibrační data a vymaže paměť EEPROM.

8.5 Funkce measure

Po přijetí příkazu *MEASURE* s parametrem čísla pinu, na kterém má být provedeno měření (1 – 64), dojde ke kontrole validity zadaného parametru. Následuje odpojení všech měřících reléových přepínačů (všechny piny IO expanderu jsou nastaveny na hodnotu logické 0). V dalším kroku je provedena kontrola na poruchu, která spočívá v odečtení hodnoty napětí z A/D převodníků. Pokud zůstane některý reléový přepínač sepnutý, bude naměřena hodnota větší než stanovená nulová hodnota a měření bude ukončeno. V opačném případě přejde měřicí zařízení do stavu *READING*.

Je zavolána funkce *setPin*, jejímž argumentem je hodnota žádaného pinu. Tato funkce ovládá spínání reléových přepínačů na přepínacích kartách. Podle požadovaného pinu, který má být změřen, dojde k sepnutí odpovídajícího pinu na daném IO expanderu a tím k sepnutí příslušného reléového přepínače. Tato funkce je rovněž používána v kalibrační sekvenci.

V dalším kroku je spuštěno paralelní měření na trojici A/D převodníků. K měření dochází za pomoci funkce *adcMeasure*. Parametrem této funkce je požadovaný počet měření, ke kterému má dojít. Návratovou hodnotou této funkce je průměr z trojice A/D převodníků vydělen počtem měření. Tato funkce je rovněž používána při měření v kalibrační sekvenci a ověřování poruchy před měřením.

Po získání hodnoty z trojice A/D převodníků je nutné tuto hodnotu přepočítat na odpovídající napětí, k tomuto je určena funkce *recalculate*, která je zavolána v dalším kroku. Nejprve je získána velikost zesílení, se kterou bylo měření provedeno. Následně jsou použita data z kalibrační sekvence, odpovídající použitému zesílení. Těmito potřebnými hodnotami jsou velikost offsetu nuly a konverzní konstanta. Výpočet je proveden podle následující rovnice (11).

$$\text{Hodnota napětí} = (\text{Hodnota z AD př.} - \text{Offset nuly}) \cdot \text{Konverzní konst.} \quad (11)$$

8.6 Displej

Ovládání displeje vychází z již zmíněné knihovny *Adafruit_SSD1306*. Byla vytvořena funkce *drawScreen*, která komplexně zajišťuje zobrazování příslušných dat na displej v závislosti na stavu, ve kterém se měřicí přístroj nachází. Jelikož je displej již vyroben pevně dvojbarevný, je tohoto rozložení barev využito. Vrchní žlutá část displeje vždy obsahuje verzi nahraného firmwaru a oddělovací čáru. Majoritní modrá část displeje je určena pro zobrazování stavového hlášení.

Po připojení zařízení k napájení je spuštěna inicializace ve funkci *setup*, v této funkci je nastavena velikost písma a kurzor. Dále je na displeji zobrazena již zmíněná verze firmwaru a zkratka AEMD (Automatic Electronic Measure Device). Pod verzí firmwaru je vyobrazeno logo firmy EPS (Electronic Product Services). Toto logo bylo vloženo jako bitmapa a je vyobrazeno na následujícím obrázku (*Obr. 46*). Zde je dobře

viditelné rozdělení displeje na žluté a modré pole.



Obr. 46 – Zobrazení firemního loga na displeji měřicího přístroje

Po inicializaci přechází měřicí zařízení do stavu *STANDBY*. V tomto stavu je na displeji vyobrazeno „Standby“ pro případ zkalibrovaného měřicího zařízení a „Standby Uncalib.“ pro případ nezkalibrovaného měřicího zařízení. Obě tyto stavové hlášky jsou zachyceny na následujícím obrázku (Obr. 47).



Obr. 47 – Zobrazení stavových hlášek na displeji ve stavu *STANDBY*

Dalším možným stavem, ve kterém se může měřicí přístroj nacházet je stav *USERINPUT*. V tomto stavu je na displeji zobrazeno „Waiting Input“. Tato hláška je vyobrazena vlevo na obrázku (Obr. 48).

V souvisejícím stavu *CALIBRATION* je mimo stavovou hlášku zobrazen rovněž indikátor průběhu kalibrace, který zajišťuje funkce *drawProgressbar*. Na displeji je tedy zobrazena stavová hláška „Calib“ společně s číslem aktuálně měřeného pinu, v dolní části displeje je vyobrazen průběh, ve kterém se kalibrační měření aktuálně nachází. Vyobrazení na displeji je zachyceno vpravo na následujícím obrázku (Obr. 48).



Obr. 48 – Zobrazení stavové hlášky a průběhu kalibračního měření

Ve stavu *READING* je po dobu měření požadovaného pinu zobrazena stavová hláška „*Reading*“ společně s číslem měřeného pinu. Tato hláška je vyobrazena vlevo na následujícím obrázku (Obr. 49), v tomto případě byl měřen pin 12.

Po změření hodnoty napětí na požadovaném pinu přechází zařízení opět do stavu *STANDBY*, v tomto případě je ale kromě stavové hlášky „*Standby*“ zobrazen také poslední změřený pin a hodnota napětí na něm změřená a zaokrouhlená na dvě desetinná místa. Tato situace je vyobrazena vpravo na Obr.49.



Obr. 49 – Zobrazení stavových hlášek při a po měření požadovaného pinu

8.7 Komunikace s Elnec aplikací PG4UW

Prvotní možností pro zadávání hodnot změřených napětí do Elnec aplikace PG4UW by zajišťoval ovládací skript, který by simuloval počínání obsluhy při úplném manuálním ověření parametrů programátoru. To obnáší klikání a zadávání naměřených data. Tato možnost však není průmyslově přijatelná, a proto byla vyjednána spolupráce s firmou Elnec o implementaci automatického měřicího zařízení do jejich aplikace.

Implementace ve chvíli psaní této práce ještě není dokončená, mohla by však vypadat následovně. Při výběru možnosti ověřování parametrů programátoru se bude obsluha moci rozhodnout, zda bude parametry ověřovat současnou formou (ručně) nebo zda zvolí automatický měřicí přístroj. V případě zvolení automatického měřicího přístroje bude obsluha vyzvána k zadání COM portu, na kterém je měřicí zařízení připojeno. V další fázi bude aplikace po sériové lince posílat příkazy měřicímu zařízení a ten podle daného příkazu změní napětí na požadovaných pinech, změní vstupní zesílení A/D převodníků a připojí či odpojí zátěž. Kalibraci bude muset vždy před začátkem měření na programátoru provést obsluha na kalibračním přípravku.

9. NÁVRH FIRMWARE AUTOMATICKÉHO MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE PRO ŘEŠENÍ S ANALOGOVÝMI MULTIPLEXORY

Firmware pro řešení s analogovými multiplexory vychází z firmwaru měřicího zařízení s reléovými přepínači.

Rozdílů je zde jen velmi málo. Před měřením zde již neprobíhá kontrola na poruchu způsobenou neodepnutým reléovým přepínačem. Jelikož IO expander byly nahrazeny analogovými multiplexory, projevila se změna pouze ve funkci *setPin*. V této funkci již nedochází k sepnutí odpovídajícího pinu na jednom z IO expanderů, ale k aktivování odpovídajícího multiplexoru. Po aktivování příslušného multiplexoru je zavolána funkce *setMuxOutput*, která nastaví vstupní piny aktivního multiplexoru na kombinaci odpovídající požadovanému pinu, na kterém má dojít k měření.

Měřicí i kalibrační sekvence zůstává shodná. Rozdíl je zde pouze ve výpočtu konverzní konstanty, kde dochází pouze k vydělení hodnoty napětí zadané obsluhou průměrnou hodnotou napětí změřenou na pinech odpovídajícího multiplexoru.

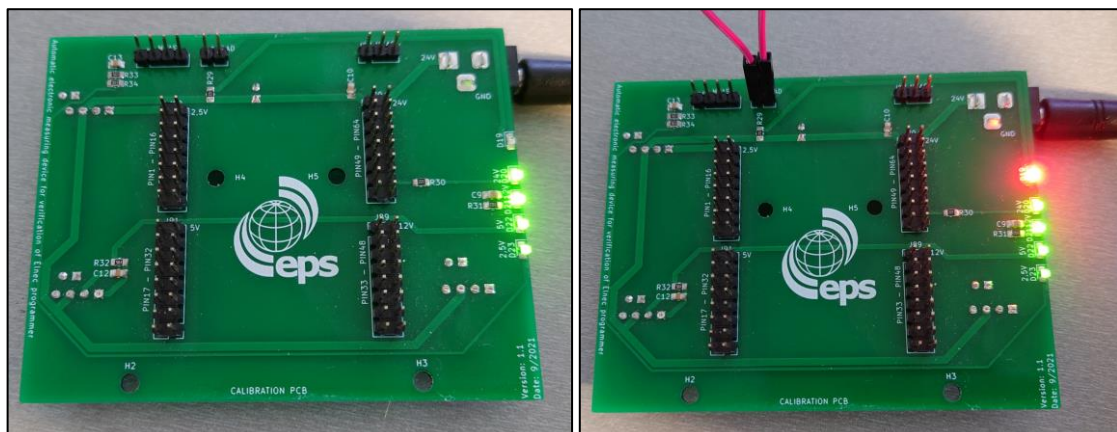
10. OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI TESTOVACÍHO PŘÍPRAVKU A AUTOMATICKÝCH MĚŘICÍCH ZAŘÍZENÍ

Tato kapitola je věnována ověření a demonstraci funkčnosti nejen obou realizovaných měřicích zařízení, ale také testovacího (kalibračního) přípravku.

10.1 Ověření funkčnosti testovacího přípravku

Po připojení testovacího (kalibračního) přípravku na napájecí napětí je na jednotlivých segmentech přítomno požadované napětí. Toto požadované napětí signalizují zelené LED diody. Napětí na jednotlivých segmentech přibližně odpovídá požadovanému.

Testovací přípravek dále disponuje červenou LED diodou signalizující připojenou či odpojenou zátěž (zkratování svorek *LOAD*). Na následujícím obrázku (*Obr. 50*) je v levé části zachycen testovací přípravek s nepřipojenou zátěží, napravo s připojenou zátěží. Lze si všimnout již zmíněných signalizačních LED diod a jejich indikace.



Obr. 50 – Ověření funkčnosti testovacího (kalibračního) přípravku

10.2 Ověření funkčnosti měřicího zařízení s reléovými přepínači

Při ověření funkčnosti měřicího zařízení je nezbytné se zaměřit zejména na měření hodnoty napětí na jednotlivých pinech, na funkčnost kalibrační sekvence a připnutí a odepnutí zátěže. Nezanedbatelným parametrem je rovněž přesnost celého měřicího zařízení.

10.2.1 Ověření funkčnosti kalibrační sekvence

Testování funkčnosti kalibrační sekvence bylo demonstrováno na testovacím přípravku. Pro testování byl spuštěn režim *DEBUG*. Po připojení měřicího zařízení na sériovou linku jsou vypsány poslední konverzní konstanty, je zobrazen maximální rozsah A/D převodníků, jak je zachyceno na následujícím obrázku (*Obr. 51*).

Na zmíněném obrázku je taktéž patrné zadání příkazu *CALIBRATE*, který spouští kalibrační sekvenci. Nejprve je uživatel vyzván k odečtení hodnot napětí na voltmetru připojenému k měřicím svorkám měřicího přístroje. Před každým měřením je provedena kontrola poruchy relé. Uživatel je vyzván dohromady čtyřikrát k odečtení a zadání hodnoty napětí z voltmetru. Při každé požadované hodnotě je vždy připnut první pin na jednotlivých měřicích kartách.

```
17:57:31.670 -> [DEBUG] Calibration values: 8x: 0.000192V/p, 4x: 0.000380V/p, 2x: 0.000757V/p, 1x: 0.001505V/p
17:57:32.067 -> [DEBUG] Calibration offsets: 8x: 105p, 4x: 24p, 2x: -4p, 1x: -9p
17:57:32.149 -> [DEBUG] Setting maximum adc value to 16383
17:57:56.279 -> [DEBUG] Received message: CALIBRATE
17:57:56.323 -> [DEBUG] Command structure: command: CALIBRATE, par1:
17:57:56.357 -> [DEBUG] Starting calibration sequence
17:57:56.399 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -13 -26 10
17:57:56.439 -> [DEBUG] ADC read val: -9
17:57:56.482 -> Measure and input 1 reference voltage
17:58:11.487 -> Input value: 2.490000
17:58:11.573 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:11.617 -> [DEBUG] ADC read val: -9
17:58:11.658 -> Measure and input 2 reference voltage
17:58:14.887 -> Input value: 5.010000
17:58:14.963 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:15.008 -> [DEBUG] ADC read val: -9
17:58:15.047 -> Measure and input 3 reference voltage
17:58:19.346 -> Input value: 11.800000
17:58:19.430 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:19.466 -> [DEBUG] ADC read val: -9
17:58:19.508 -> Measure and input 4 reference voltage
17:58:23.207 -> Input value: 24.200000
```

Obr. 51 – Spuštění kalibrační sekvence

Po úspěšném zadání požadovaných hodnot je spuštěno kalibrační měření, před každým měřením napětí na pinu je provedena kontrola na poruchu. Měření probíhá střídavě na všech kartách (nejprve je změřen pin 1, 17, 33 a 49, následně 2, 18, 34 a 50). Na následujícím obrázku vlevo je zachyceno měření prvního pinu první prepínací karty, vpravo na obrázku pak měření prvního pinu druhé prepínací karty (pin 17). Měření na každém pinu probíhá 10x a následně je proveden průměr z naměřených hodnot pro dosažení maximální přesnosti.

Jelikož jsou předem známá napětí, která bude měřicí přípravek při kalibrační sekvenci měřit, je vhodné nastavit pro jednotlivé měřené segmenty patřičné vnitřní zesílení A/D převodníků. Pro piny 1 – 16 je naměřené napětí zesilováno osmkrát, u pinů 17 – 32 je zesílení 4, hodnota napětí na pinech 33 – 48 je zesílena 2x a zbývající piny jsou měřeny s výchozím zesílením 1.

Po dokončení kalibrační sekvence jsou nově vypočtené konverzní konstanty uloženy do paměti EEPROM.


```

17:58:23.239 -> Starting calibration
17:58:23.275 -> [DEBUG] Setting pin: 1, expander: 1 (pinIndex: 1)
17:58:23.310 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -25 10
17:58:23.393 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:23.432 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:23.471 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:23.509 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:23.549 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:23.589 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:23.625 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:23.661 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:23.743 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:23.788 -> [DEBUG] ADC read val: -9
17:58:23.829 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 94 10
17:58:23.870 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 116 99 126
17:58:23.911 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 116 99 128
17:58:23.954 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 116 99 128
17:58:24.000 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 116 98 128
17:58:24.040 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 116 99 127
17:58:24.083 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 116 98 128
17:58:24.122 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 116 99 127
17:58:24.204 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 116 98 127
17:58:24.245 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 116 98 128
17:58:24.287 -> [DEBUG] ADC read val: 105
17:58:24.328 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13082 13129 13105
17:58:24.369 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13082 13129 13106
17:58:24.445 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13082 13129 13106
17:58:24.479 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13082 13130 13106
17:58:24.521 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13082 13130 13106
17:58:24.605 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13082 13130 13106
17:58:24.648 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13082 13130 13106
17:58:24.689 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13082 13130 13106
17:58:24.730 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13082 13130 13106
17:58:24.773 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13082 13130 13105
17:58:24.858 -> [DEBUG] ADC read val: 13105
17:58:24.858 -> [DEBUG] Setting pin: 1, expander: 2 (pinIndex: 17)
17:58:24.937 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 98 126
17:58:24.983 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:25.023 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -13 -26 10
17:58:25.061 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:25.102 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:25.142 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:25.181 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:25.222 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -13 -26 10
17:58:25.259 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:25.333 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -12 -26 10
17:58:25.383 -> [DEBUG] ADC read val: -1
17:58:25.418 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 26 -26 44
17:58:25.453 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 27 12 45
17:58:25.492 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 27 12 46
17:58:25.536 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 27 12 46
17:58:25.578 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 27 12 45
17:58:25.614 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 26 12 46
17:58:25.652 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 27 12 46
17:58:25.692 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 27 12 45
17:58:25.736 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 27 12 46
17:58:25.778 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 27 12 46
17:58:25.818 -> [DEBUG] ADC read val: 26
17:58:25.906 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13183 13230 13204
17:58:25.947 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13184 13230 13204
17:58:25.986 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13184 13230 13205
17:58:26.062 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13184 13230 13205
17:58:26.107 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13184 13230 13205
17:58:26.147 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13184 13230 13205
17:58:26.189 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13184 13230 13205
17:58:26.271 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13184 13230 13205
17:58:26.311 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13184 13230 13205
17:58:26.353 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13184 13230 13205
17:58:26.392 -> [DEBUG] ADC read val: 13205

```

Obr. 52 – Kalibrační rutina

10.2.2 Ověření funkčnosti měření na požadovaných pinech

K otestování měření na požadovaných pinech byl opět jako zdroj měřeného napětí použit testovací přípravek. Pro demonstraci funkčnosti byly proměřeny piny 1, 17, 33 a 49. Z následujícího obrázku (Obr. 53) je viditelné nastavení vnitřního zesílení A/D převodníku pomocí příkazu *GAIN* a odpovídajícího parametru. Rovněž lze vidět rozdělení zadaného požadavku na příkaz (*command*) a parametr (*par1*).

Po nastavení zesílení je za pomoci příkazu *MEASURE* s číslem požadovaného pinu jako parametru spuštěna měřicí sekvence. Je zde opět patrná kontrola na poruchu reléového přepínače, dále odečtená hodnota A/D převodníků a jejich průměr. V poslední fázi je provedena korekce konverzní konstantou a chybou nuly, následně je zobrazena validní hodnota změřeného napětí a měřicí sekvence je ukončena. Na zmíněném obrázku je vidět proměření všech prvních pinů na přepínacích kartách (1, 17, 33 a 49), aby byla demonstrována funkčnost zesílení.

Je zde taktéž vypsána doba jednotlivých měření, která se pohybuje okolo 262 ms. Tento časový údaj je změřen od odeslání požadavku do jeho provedení.

```

18:00:20.178 -> [DEBUG] Received message: GAIN 8
18:00:20.219 -> [DEBUG] Command structure: command: GAIN, par1: 8
18:00:20.261 -> OK
18:00:24.807 -> [DEBUG] Received message: MEASURE 1
18:00:24.847 -> [DEBUG] Command structure: command: MEASURE, par1: 1
18:00:24.888 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 111 94 10
18:00:24.972 -> [DEBUG] ADC read val: 71
18:00:25.013 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13082 13128 13105
18:00:25.056 -> [DEBUG] ADC read val: 13105
18:00:25.102 -> [DEBUG] Recalculating raw value of 13105 with constant 0.000192 and zero offset 104 to final value 2.490000V
18:00:25.207 -> OK 2.490000
18:00:25.207 -> Stopwatch: 262ms
18:00:31.102 -> [DEBUG] Received message: GAIN 4
18:00:31.142 -> [DEBUG] Command structure: command: GAIN, par1: 4
18:00:31.183 -> OK
18:00:36.426 -> [DEBUG] Received message: MEASURE 17
18:00:36.467 -> [DEBUG] Command structure: command: MEASURE, par1: 17
18:00:36.507 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 28 13 126
18:00:36.547 -> [DEBUG] ADC read val: 55
18:00:36.582 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 13185 13230 13204
18:00:36.667 -> [DEBUG] ADC read val: 13206
18:00:36.667 -> [DEBUG] Recalculating raw value of 13206 with constant 0.000380 and zero offset 24 to final value 5.010380V
18:00:36.780 -> OK 5.010380
18:00:36.831 -> Stopwatch: 261ms
18:00:40.194 -> [DEBUG] Received message: GAIN 2
18:00:40.232 -> [DEBUG] Command structure: command: GAIN, par1: 2
18:00:40.272 -> OK
18:00:48.650 -> [DEBUG] Received message: MEASURE 33
18:00:48.688 -> [DEBUG] Command structure: command: MEASURE, par1: 33
18:00:48.769 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 26 12 45
18:00:48.809 -> [DEBUG] ADC read val: 27
18:00:48.843 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 15550 15604 15566
18:00:48.882 -> [DEBUG] ADC read val: 15573
18:00:48.924 -> [DEBUG] Recalculating raw value of 15573 with constant 0.000758 and zero offset -4 to final value 11.800758V
18:00:49.044 -> OK 11.800758
18:00:49.044 -> Stopwatch: 263ms
18:00:51.910 -> [DEBUG] Received message: GAIN 1
18:00:51.951 -> [DEBUG] Command structure: command: GAIN, par1: 1
18:00:51.984 -> OK
18:00:54.987 -> [DEBUG] Received message: MEASURE 49
18:00:55.021 -> [DEBUG] Command structure: command: MEASURE, par1: 49
18:00:55.061 -> [DEBUG] ADC read partial vals: -8 -21 14
18:00:55.101 -> [DEBUG] ADC read val: -5
18:00:55.146 -> [DEBUG] ADC read partial vals: 16049 16103 16060
18:00:55.229 -> [DEBUG] ADC read val: 16070
18:00:55.229 -> [DEBUG] Recalculating raw value of 16070 with constant 0.001505 and zero offset -9 to final value 24.200000V
18:00:55.348 -> OK 24.200000

```

Obr. 53 – Měřicí sekvence

10.2.3 Ověření funkčnosti připojení zátěže

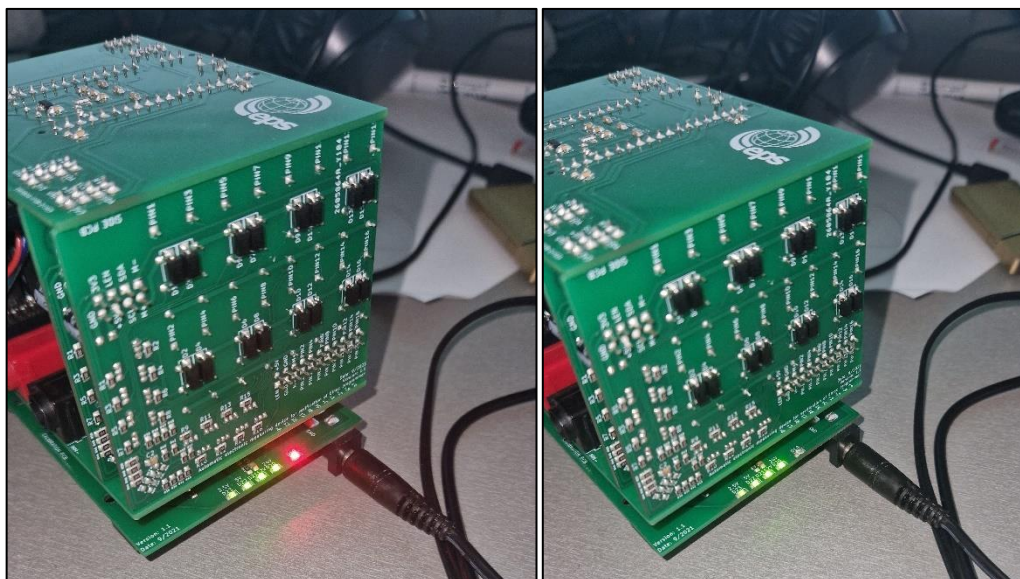
Jak již bylo zmíněno zátěž je připnuta příkazem LOAD s vhodným parametrem. Parametr *1* zajišťuje připojení zátěže, zatímco parametr *0* zajišťuje odpojení zátěže. Následující obrázek (*Obr. 54*) zachycuje příkazy, na *Obr. 55* je viditelná funkčnost připnutí zátěže, která je signalizována rozsvícením červené indikační LED diody na testovacím přípravku.

```

18:01:03.569 -> [DEBUG] Received message: LOAD 1
18:01:03.614 -> [DEBUG] Command structure: command: LOAD, par1: 1
18:01:03.653 -> OK
18:02:30.727 -> [DEBUG] Received message: LOAD 0
18:02:30.763 -> [DEBUG] Command structure: command: LOAD, par1: 0
18:02:30.805 -> OK

```

Obr. 54 – Připojení a odpojení zátěže



Obr. 55 – Indikace připojení/odpojení zátěže

10.2.4 Přesnost měřicího zařízení s reléovými přepínači

Jelikož byly hodnoty zadané obsluhou při kalibrační sekvenci změřeny s přesností maximálně tisíce voltu, je obtížné určit celkovou přesnost měřicího zařízení. Avšak absolutní chyba měření určit lze alespoň orientačně. V následující tabulce (Tab. 5) jsou zaneseny naměřené hodnoty napětí obsluhou a měřicím zařízením. Dále je zde vypočtena absolutní chyba měření. K ručnímu měření napětí obsluhou byl použit multimetr *VOLTCRAFT VC270*.

Tab. 5 – Přesnost měřicího zařízení s reléovými přepínači

Skutečná hodnota napětí [V]	Velikost napětí na svorkách měřicího přístroje [V]	Změřený pin test. přípravku [-]	Velikost napětí změřená měřicím přístrojem [V]	Absolutní chyba měření [V]
2,483	2,483	1	2,4830	0
4,97	4,97	17	4,9700	0
11,71	11,71	33	11,7100	0
24,08	24,08	49	24,0785	-0,0015

Z absolutní chyby měření vyplývá orientační přesnost, která je maximálně 1,5 mV. Jelikož při manuálním ověřování parametrů programátorů Elnece obsluha používá běžně dostupný voltmetr, je tato přesnost více než dostačující.

10.3 Ověření funkčnosti měřicího zařízení s analogovými multiplexory

Shodně jako u řešení s reléovými přepínači budou následující podkapitoly věnovány ověření funkčnosti kalibrační a měřicí sekvence a schopnosti připojit zátěž. Poslední podkapitola bude opět věnována přesnosti měřicího zařízení.

10.3.1 Ověření funkčnosti kalibrační sekvence

Shodně jako u řešení s reléovými přepínači jsou po připojení měřicího zařízení k napájení vypsané hodnoty konverzních konstant z paměti EEPROM.

Po zadání příkazu *CALIBRATE* je opět uživatel vyzván k odečtení a zadání hodnot napětí z voltmetru. Měření probíhá pro všechna čtyři vnitřní zesílení A/D převodníku. Po zadání požadovaných hodnot je spuštěna kalibrační sekvence se stejným průběhem jako u řešení s reléovými přepínači. Zadání hodnot a spuštění kalibrační sekvence je zachyceno na *Obr.56*.

```
18:00:58.271 -> <OFFFFFFM{SPCO[DEBUG] Calibration values: 8x: 0.007716V/p, 4x: 0.029940V/p, 2x: 0.141176V/p, 1x: 0.571429V/p
18:01:04.029 -> [DEBUG] Received message: CALIBRATE
18:01:04.065 -> [DEBUG] Command structure: command: CALIBRATE, pari:
18:01:04.134 -> [DEBUG] Starting calibration sequence
18:01:04.176 -> Setting pins: 0, 0, 0, 0
18:01:04.210 -> Measure and input 1 reference voltage
18:01:15.455 -> Input value: 2.493000
18:01:15.490 -> Setting pins: 0, 0, 0, 0
18:01:15.570 -> Measure and input 2 reference voltage
18:01:18.846 -> Input value: 4.960000
18:01:18.846 -> Setting pins: 0, 0, 0, 0
18:01:18.970 -> Measure and input 3 reference voltage
18:01:23.423 -> Input value: 11.630000
18:01:23.423 -> Setting pins: 0, 0, 0, 0
18:01:23.503 -> Measure and input 4 reference voltage
18:01:26.985 -> Input value: 23.940000
18:01:26.985 -> [DEBUG] Setting pin: 1, mux: 1 (pinIndex: 1)
18:01:27.059 -> Setting pins: 0, 0, 0, 0
18:01:27.339 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12623
18:01:27.408 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12613
18:01:27.453 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12611
18:01:27.543 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12613
18:01:27.639 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12611
18:01:27.674 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12613
18:01:27.753 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12612
18:01:27.832 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12612
18:01:27.911 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12610
18:01:27.950 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12610
18:01:27.991 -> [DEBUG] ADC read val: 12612
18:01:28.030 -> [DEBUG] Setting pin: 1, mux: 2 (pinIndex: 17)
18:01:28.070 -> Setting pins: 0, 0, 0, 0
18:01:28.338 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12784
18:01:28.429 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12783
18:01:28.511 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12783
18:01:28.550 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12783
18:01:28.630 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12783
18:01:28.702 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12784
18:01:28.779 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12784
18:01:28.859 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12784
18:01:28.942 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12783
18:01:28.979 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12784
18:01:29.022 -> [DEBUG] ADC read val: 12783
18:01:29.064 -> [DEBUG] Setting pin: 1, mux: 3 (pinIndex: 33)
18:01:29.106 -> Setting pins: 0, 0, 0, 0
18:01:29.387 -> [DEBUG] ADC read partial val: 15081
18:01:29.472 -> [DEBUG] ADC read partial val: 15080
18:01:29.510 -> [DEBUG] ADC read partial val: 15080
18:01:29.593 -> [DEBUG] ADC read partial val: 15080
18:01:29.674 -> [DEBUG] ADC read partial val: 15080
18:01:29.764 -> [DEBUG] ADC read partial val: 15080
18:01:29.802 -> [DEBUG] ADC read partial val: 15081
18:01:29.870 -> [DEBUG] ADC read partial val: 15080
18:01:29.955 -> [DEBUG] ADC read partial val: 15081
18:01:30.040 -> [DEBUG] ADC read partial val: 15080
18:01:30.040 -> [DEBUG] ADC read val: 15080
```

Obr. 56 – Kalibrační sekvence

10.3.2 Ověření funkčnosti měření na požadovaném pinu

Na následujícím obrázku (*Obr.57*) je demonstrována změna vstupního zesílení A/D převodníku. Toto zesílení je měněno za pomoci příkazu *GAIN* s parametry 1, 2, 4 a 8. Příkazem *MEASURE* s parametrem čísla pinu je provedeno změření napětí na požadovaném pinu.

Lze si povšimnout i doby trvání měření, která nepřesahuje 308 ms.

```
18:02:38.759 -> [DEBUG] Received message: GAIN 8
18:02:38.801 -> [DEBUG] Command structure: command: GAIN, par1: 8
18:02:38.851 -> OK
18:02:41.975 -> [DEBUG] Received message: MEASURE 1
18:02:42.019 -> [DEBUG] Command structure: command: MEASURE, par1: 1
18:02:42.104 -> Setting pins: 0, 0, 0, 0
18:02:42.246 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12623
18:02:42.288 -> [DEBUG] ADC read val: 12623
18:02:42.328 -> [DEBUG] Recalculating raw value of 12623 with constant 0.000197 and zero offset 0 to final value 2.493000V
18:02:42.405 -> OK 2.493000
18:02:42.444 -> Stopwatch: 307ms
18:02:43.905 -> [DEBUG] Received message: GAIN 4
18:02:43.944 -> [DEBUG] Command structure: command: GAIN, par1: 4
18:02:44.016 -> OK
18:02:49.205 -> [DEBUG] Received message: MEASURE 17
18:02:49.240 -> [DEBUG] Command structure: command: MEASURE, par1: 17
18:02:49.332 -> Setting pins: 0, 0, 0, 0
18:02:49.444 -> [DEBUG] ADC read partial val: 12784
18:02:49.519 -> [DEBUG] ADC read val: 12784
18:02:49.519 -> [DEBUG] Recalculating raw value of 12784 with constant 0.000388 and zero offset 0 to final value 4.955736V
18:02:49.643 -> OK 4.955736
18:02:49.643 -> Stopwatch: 306ms
18:02:54.903 -> [DEBUG] Received message: GAIN 2
18:02:54.937 -> [DEBUG] Command structure: command: GAIN, par1: 2
18:02:54.988 -> OK
18:02:59.483 -> [DEBUG] Received message: MEASURE 33
18:02:59.523 -> [DEBUG] Command structure: command: MEASURE, par1: 33
18:02:59.611 -> Setting pins: 0, 0, 0, 0
18:02:59.744 -> [DEBUG] ADC read partial val: 15078
18:02:59.786 -> [DEBUG] ADC read val: 15078
18:02:59.822 -> [DEBUG] Recalculating raw value of 15078 with constant 0.000769 and zero offset 0 to final value 11.597694V
18:02:59.941 -> OK 11.597694
18:02:59.941 -> Stopwatch: 308ms
18:03:03.068 -> [DEBUG] Received message: GAIN 1
18:03:03.105 -> [DEBUG] Command structure: command: GAIN, par1: 1
18:03:03.152 -> OK
18:03:07.329 -> [DEBUG] Received message: MEASURE 49
18:03:07.365 -> [DEBUG] Command structure: command: MEASURE, par1: 49
18:03:07.407 -> Setting pins: 0, 0, 0, 0
18:03:07.572 -> [DEBUG] ADC read partial val: 15612
18:03:07.617 -> [DEBUG] ADC read val: 15612
18:03:07.654 -> [DEBUG] Recalculating raw value of 15612 with constant 0.001535 and zero offset 0 to final value 23.967634V
18:03:07.765 -> OK 23.967634
```

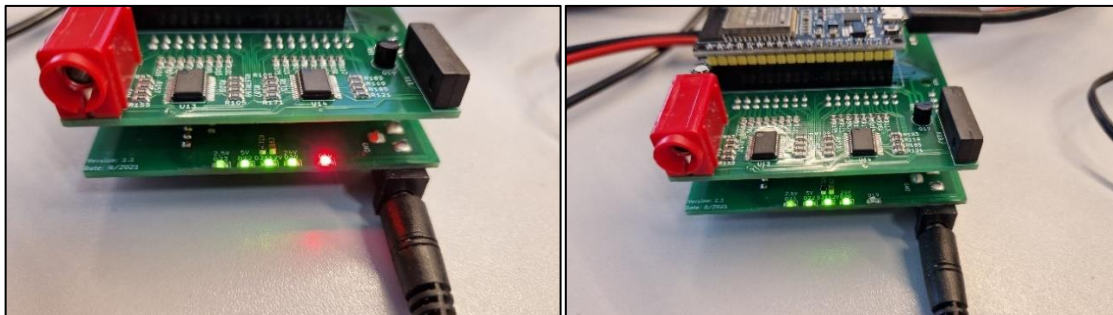
Obr. 57 – Měřicí sekvence

10.3.3 Ověření funkčnosti připojení zátěže

Zátěž je připnuta příkazem *LOAD* s parametrem 1, naopak odepnuta shodným příkazem, avšak s parametrem 0. Následující obrázek (*Obr. 58*) demonstruje funkčnost příkazu, zatímco na *Obr. 59* je viditelné rozsvícení červené LED diody, signalizující zkratování svorek simulující připnutí zátěže.

```
18:08:20.561 -> [DEBUG] Received message: LOAD 1
18:08:20.600 -> [DEBUG] Command structure: command: LOAD, par1: 1
18:08:20.649 -> OK
18:08:22.903 -> [DEBUG] Received message: LOAD 0
18:08:22.945 -> [DEBUG] Command structure: command: LOAD, par1: 0
18:08:22.985 -> OK
```

Obr. 58 – Připojení a odpojení zátěže



Obr. 59 – Indikace připojení/odpojení zátěže

10.3.4 Přesnost měřicího zařízení s analogovými multiplexory

Hodnoty napětí jednotlivých sekcí kalibračního přípravku a hodnoty napětí na svorkách měřicího přístroje byly změřeny multimetrem *VOLTCRAFT VC270*. V následující tabulce (*Tab. 6*) jsou zachyceny změřené hodnoty napětí jednotlivých sekcí kalibračního přípravku a velikosti napětí změřené na svorkách automatického měřicího zařízení. Následují velikosti napětí změřených s příslušným vnitřním zesílením A/D převodníku na pinech 1, 17, 33 a 49. Opět tabulka obsahuje i výpočet absolutní chyby měření, jako skutečná hodnota je zde použita skutečná hodnota napětí na testovacím přípravku.

Tab. 6 – Přesnost měřicího zařízení s analogovými multiplexory

Skutečná hodnota napětí [V]	Velikost napětí na svorkách měřicího přístroje [V]	Změřený pin test. přípravku [-]	Velikost napětí změřená měřicím přístrojem [V]	Absolutní chyba měření [V]
2,483	2,493	1	2,493	0,01
4,97	4,96	17	4,956	-0,014
11,71	11,63	33	11,598	-0,112
24,08	23,94	49	23,968	-0,112

Při měření vyšších napětí je evidentní značná nepřesnost, pohybující se okolo 100 mV. Tato nepřesnost je pravděpodobně způsobena již při kalibrační sekvenci, kdy obsluha odečte z voltmetru nekorektní velikost napětí. Tohoto faktu si lze povšimnout i z již zmíněné tabulky, kde se na rozdíl od řešení s reléovými prepínači rozchází skutečná hodnota napětí testovacího přípravku a velikost napětí naměřená na svorkách měřicího přístroje. Nekorektní velikost napětí je způsobena použitím operačního zesilovače, který je prakticky nemožné vstupními děliči nastavit vhodně tak, aby hodnoty zesíleného napětí přesně odpovídaly hodnotám měřeným. Další možnou příčinou chyby je nepoužití stejného uzemňovacího potenciálu u multiplexorů jako u měřicích svorek pro měření napětí obsluhou. Tyto nedostatky budou implementovány v další iteraci měřicího přístroje.

Je třeba jako pozitivum tohoto řešení zmínit velikost celé zástavby, počet

použitých součástek a poruchovost oproti řešení s reléovými přepínači. Jelikož výrobce Elnec neudává požadavky na přesnost měřicího přístroje, kterým má být úplné manuální ověření parametrů provedeno, je i tato přesnost dostačující. Běžně dostupné multimetry disponují při maximálním rozsahu taktéž přesnosti na jedno desetinné místo měřicího rozsahu.

11. ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V kapitole 2.1 byly vytyčeny požadavky na navrhované měřicí zařízení. Zde v této kapitole bude dodržení těchto požadavků zhodnoceno a zaneseno pro větší přehlednost do tabulky (Tab.7). Zhodnocení rychlosti měření v porovnání s manuálním ověřením parametrů je věnována samostatná podkapitola 11.1.

Požadavek na maximální rozměry byl určen na 120 x 85 x 100 mm z důvodu omezeného prostoru okolo programátoru zejména u programovacího automatu HyperStorm. Řešení s reléovými přepínači disponuje celkovými rozměry 90 x 70 x 65 mm. Celková velikost řešení s analogovými multiplexory disponuje rozměry 92 x 70 x 16 mm. Požadavek na zástavbu, která bude připojitelná k Elnece přípravku pro úplné manuální ověření parametrů byla rovněž u obou řešení splněna.

Požadavek na napájení automatického měřicího přístroje z USB 2.0 byl rovněž splněn u obou realizovaných řešení. Komunikace je rovněž realizována pomocí USB.

Indikace probíhajícího měření a stavu ve kterém se obě realizovaná řešení automatického měřicího přístroje nachází je realizována OLED displejem.

Diferenčního měření bylo dosaženo u obou realizovaných měřicích zařízení. Připnutí zátěže, realizované pomocí jazýčkového relé je taktéž implementováno. Připnutí maximálně jednoho pinu současně bylo dosaženo pouze u řešení s reléovými přepínači. U řešení s použitím analogových multiplexorů je připojení maximálně jednoho pinu sporné a je blíže popsáno v kapitole 4.2.

V následující tabulce (Tab.7) je zachyceno porovnání obou realizací automatického měřicího přístroje s požadavky na zařízení.

Tab. 7 – Porovnání požadavků obou realizací

Požadavek na zařízení	Řešení s reléovými přepínači	Řešení s analogovými multiplexory
Čas měření jednoho pinu	262 ms	308 ms
Maximální rozměry	90 x 70 x 65 mm	92 x 70 x 16 mm
Zástavba	splněno	splněno
Napájení a konektivita	splněno	splněno
Indikace	OLED 0,96“ displej	OLED 0,96“ displej
Připnutí zátěže	splněno	splněno
Připnutí max. jednoho pinu	splněno	částečně splněno – zatíženo vstupními děliči
Výrobní cena	3450 Kč	1570 Kč

11.1 Porovnání časové náročnosti

V kapitole 1.2.2 byla zmíněna rychlost měření obsluhy při úplném manuálním ověření parametrů programátoru Eltec BeeHive304. Průměrný čas měření jednoho pinu byl stanoven na 5 sekund. Jelikož je nutné na každém programátoru osazeném čtveřicí programovacích patič provést 7680 měření, pohybuje se doba měření okolo 10 hodin a 40 minut čistého měřicího času. Je třeba zmínit, že daný čas zabere úplné manuální ověření parametrů dvěma operátory a neobsahuje pauzy a jiné prodlevy, které prodlužují odstávku programovacího automatu. Praxe však ukazuje, že úplné manuální ověření parametrů jednoho programátoru trvá dvě osmihodinové směny.

Jelikož v době tvorby této práce ještě není dokončena implementace automatického měřicího zařízení do Eltec aplikace PG4UW, není možné určit celkový čas měření. Časová náročnost měření zde bude provedena pouze teoreticky. Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, čas měření napětí na jednom pinu se pohybuje okolo 300 ms. Pokud bude uvažován čas na komunikaci mezi aplikací PG4UW a měřicím zařízením 150 ms, bude se celková doba měření jednoho pinu včetně komunikace pohybovat okolo 450 ms. Výhodou automatického měřicího zařízení je absence obsluhy, která bude se zařízením interagovat pouze na kalibrační sekvenci a k přepojování mezi programovacími stanicemi. Čistý čas, po který bude automatický měřicí přístroj měřit jeden programátor obsahující 4 patice (7680 měření), činí 58 minut. V kapitole 2.1.1 zabývající se požadavkem na rychlost měření byla určena časová dotace na změření jednoho programátoru obsahujícího čtveřicí programovacích patič na jednu hodinu, tento požadavek byl splněn.

Je evidentní nejen výrazná časová úspora a rovněž nejsou blokováni dva operátoři. Dále je eliminována možná chyba způsobená špatným odečtem nebo zápisem hodnoty napětí do aplikace. V neposlední řadě je nezbytné, aby ověření parametrů proběhlo co nejrychleji, a to zejména u provozoven s vysokou propustností naprogramovaných NAND Flash pamětí.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout, realizovat a otestovat automatický elektronický měřicí přístroj, který bude sloužit pro ověřování parametrů programátoru Eltec BeeHive304.

V první kapitole této práce jsou stručně představeny programátory Eltec BeeHive304 a jejich základní parametry. Jsou zde popsány dosavadní metody ověřování parametrů těchto programátorů, přičemž největší pozornost je věnována právě úplnému manuálnímu ověření parametrů, kterému se práce věnuje.

Kapitola následující představuje vizi automatického elektronického měřicího přístroje pro ověřování zmíněných programátorů. Jsou zde taktéž vytyčeny požadavky na automatické měřicí zařízení, které bylo třeba při návrhu dodržet.

Principiálně byly představeny čtyři možná řešení, jak zhotovit měřicí přípravek. Řešení za pomoci sčítání signálů se ukázalo jako nevhodné, i když v principu nejjednodušší, nebyl zde dodržen požadavek na zařízení o připnutí maximálně jednoho měřicího pinu. Jako další řešení se nabízelo použití většího počtu A/D převodníků, zde byl problém s adresací a taktéž nebyl dodržen požadavek na připojení pinů. Jako vhodná se ukázala dvě řešení, a to s použitím reléových přepínačů a analogových multiplexorů. Použití reléových přepínačů splňuje vytyčené parametry, je však náročný na počet použitých součástek a je značně komplikovaný. Naopak použití analogových multiplexorů je v principu jednoduché a požadavek na připojení právě jednoho pinu je zde splněn pouze částečně, jak je popsáno v kapitole 3.4.

Pro obě zmíněná řešení proběhl návrh schématu a layoutu v programu KiCad. Schémata a rozložení součástek jsou součástí kapitoly 4. Následně byl proveden výběr vhodných komponent pro obě řešení.

Jak z požadavků na zařízení vychází, byl třeba navrhnout a realizovat taktéž testovací přípravek pro oživení, testování a kalibraci obou měřicích přístrojů. Mimo realizaci obou měřicích zařízení byl realizován i testovací přípravek (viz kapitola 7).

Nedílnou součástí této práce rovněž bylo vytvoření firmwaru pro obě řešení automatického měřicího zařízení. Návrhu firmwaru pro řešení s reléovými přepínači byla věnována kapitola 8, pro řešení s analogovými multiplexory poté kapitola 9.

Kapitola 10 byla věnována pro ověření funkčnosti obou realizovaných měřicích zařízení. Obě realizovaná zařízení se ukázala jako funkční, přičemž realizace s reléovými přepínači dosáhla vyšších přesností než řešení s analogovými multiplexory. Pro sériovou výrobu bude rozhodně vybráno řešení s analogovými multiplexory pro jeho cenu, nízkou výrobní náročnost a náchylnost na mechanickou poruchu. V budoucích iteracích řešení s analogovými multiplexory bude věnována pozornost zejména na přesnost měření.

V závěru této práce byly zhodnoceny dosažené výsledky a byla porovnána časová náročnost. V době realizace této diplomové práce ještě bohužel nebyla dokončena implementace automatického měřicího přístroje do Eltec aplikace PG4UW, proto byla časová náročnost při automatickém měření popsána pouze teoreticky.

LITERATURA

- [1] User manual for BeeHive304 & BeeProg3 [online]. Prešov, Slovensko: Elnec, 2019 [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: https://www.elnec.com/sw/beehive304_beeprog3_manual_uk.pdf
- [2] Elnec. Elnec [online]. 2021 [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: <https://www.elnec.com/en/products/production-programmers/bee-hive304/#features>
- [3] Microchip MCP3422/3/4 [online]. Microchip, 2009 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/630401.pdf>
- [4] Pan Chang SIP-1A05 Reed relay [online]. Pan Chang [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/SIP-1A05_C10496.pdf
- [5] Texas Instruments PCF8575 [online]. Texas Instruments, 2020 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8575.pdf?HQS=dis-mous-null-mouser-mode-dsf-pf-null-ww&ts=1635326791645&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.cn%252F
- [6] Texas Instruments CD74HC4067, CD74HCT4067 [online]. Texas Instruments, 2020 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc4067.pdf>
- [7] Analog Devices OP184/OP284/OP484: Precision Rail-to-Rail input and output operational amplifiers [online]. Analog Devices, 2011 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/de7e02a92261bf9d795c22d2f259c014/OP184_284_484.pdf
- [8] ADS1110 [online]. Burr-Brown Products from Texas Instruments, 2003 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1110.pdf>
- [9] ADS1100 [online]. Burr-Brown Products from Texas Instruments, 2003 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1100.pdf?ts=1637044445682&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [10] XL6009 [online]. XLSEMI [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://www.hwkitchen.cz/user/related_files/xl6009-step-up-boost-dc-dc-nastavitelny-menic-zvysujici-datasheet-pdf.pdf
- [11] ESP32-WROOM-32 (ESP-WROOM-32) [online]. Espressif Systems [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://www.mouser.com/datasheet/2/891/esp-wroom-32_datasheet_en-1223836.pdf
- [12] Read Relay DEA051000 [online]. COSMO Electronic Corporation, 1998 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.634-012.1.pdf>
- [13] TC1014/TC1015/TC1185 [online]. Microchip, 2007 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://docs.rs-online.com/9e8d/0900766b8080626d.pdf>

- [14] MCP1700: Low Quiescent Current LDO [online]. Microchip, 2013 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://docs.rs-online.com/5b2b/0900766b80dd189b.pdf>
- [15] IIC I2C OLED display 0,96" [online]. Eclipse Modules, 2017 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://dratek.cz/docs/produkty/0/114/1487765029.pdf>
- [16] 4mm Angled Socket [online]. Vigan [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.811-161.1.pdf>
- [17] GCM Series: Capacitor for automotive applications such as power train and safety equipment [online]. muRata [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.vpcentrum.eu/index.php?route=product/file&product_id=208659&file_id=2560275
- [18] EXR SERIES [online]. Hitano Enterprise [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.123-847.1.pdf>
- [19] Surface Mount Glass Passivated Rectifier Diode [online]. MulticompPRO, 2019 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/2856370.pdf>
- [20] BC547 / BC547A / BC547B / BC547C [online]. Fairchild semiconductors, 1997 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/59764.pdf>
- [21] Chip Resistors Pulse Withstanding [online]. multicomPRO, 2019 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/2873396.pdf>
- [22] Boost step up modul solárního napájení - nastavitelný DC-DC XL6009. Drátek.cz [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/51529-boost-buck-step-up-modul-solarniho-napajeni-nastavitelny-dc-dc-xl6009.html?gclid=Cj0KCQiAzfuNBhCGARIsAD1nu-9dPdANGel9bhhSdPTXQ4k54QZekFzQ9w4ooLFluURnj6IIRW7rvO4aArt-EALw_wcB
- [23] MP2315: High Efficiency 3A, 24V, 500kHz Synchronous Step Down Converter [online]. MPS, 2014 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/97a205ad669bca30061d3fc6908e138e/MP2315GJ-DTE.pdf>
- [24] Regulátor napětí z 12V-24V DC na 1.8V, 2.5V, 3.3V, 5V, 9V, 12V DC. Ampul [online]. AMPUL SYSTEM [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.ampul.eu/cs/menice-napeti/2643-regulator-napeti-z-12v-24v-dc-na-18v-25v-33v-5v-9v-12v-dc?SubmitCurrency=1&id_currency=1&gclid=Cj0KCQiA8ICOBhDmARIsAEGI6o0_u7KKDvm4q8IMFfynrBXG3m7Hlx58fsPENLIBV0zBBczOYkpDLqAaAkomEALw_wcB
- [25] POSB05200A POS. TME [online]. TME [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/details/posb05200a/zasuvkove-napajeci-zdroje/pos/?brutto=1&cy=CZK&gclid=Cj0KCQiA8ICOBhDmARIsAEGI6o3Q1b-jsVPgCjpk4jHWvNJ6ZXdYu5zjn1ntybfu4ikcCeolJ7-rZbQaArCpEALw_wcB
- [26] DC-10A FC68148 CLIFF. TME [online]. TME [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/fc68148/konektory-dc/cliff/dc-10a-fc68148/?brutto=1&cy=CZK&gclid=Cj0KCQiA8ICOBhDmARIsAEGI6o0ygi518>

OD43FJn6dW21x1BKzHn5ojRXXgvs2u_8M-
1wd7ss6qSDHkaAITREALw_wcB

- [27] ED 0805, zelená, 450mcd, 120° OSG50805C1E. GMElectronic [online]. GMElectronic [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/led-0805-green-450-120-osg50805c1e>
- [28] KNIHOVNA ADS 1100 [online]. GITHUB [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: https://github.com/m5stack/M5-ProductExampleCodes/blob/master/Unit/ADC/Arduino/ADC_ADS1100/ADS1100.h
- [29] KNIHOVNA I/O EXPANDER PCF8575 [online]. GITHUB [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://github.com/RobTillaart/PCF8575>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. – CD, které je součástí tištěné práce

Tato příloha obsahuje:

- Text práce
(„Automatizované_měřicí_zařízení_pro_testování_programátorů_Elnec.pdf“)
- Návrh DPS („KiCad_DPS“)
- Firmware pro řešení s reléovými přepínači („Elnec_calibrator_firmware_Relay“)
- Firmware pro řešení s analogovými multiplexory
(„Elnec_calibrator_firmware_MUX“)