

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Evidenčné číslo: FEI-184492-111043

Prepínacia matica s nízkym termoelektrickým napätím
pre meracie aplikácie
Diplomová práca

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Evidenčné číslo: FEI-FEI-184492-111043

Prepínacia matica s nízkym termoelektrickým napätím
pre meracie aplikácie
Diplomová práca

Študijný program:	Aplikovaná elektrotechnika
Študijný odbor:	Elektrotechnika
Školiace pracovisko:	Ústav elektrotechniky FEI STU
Vedúci práce:	doc. Ing. Daniel Valúch, PhD.

Bratislava 2025

Bc. David Janiga



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent: **Bc. David Janiga**
ID študenta: 111043
Študijný program: aplikovaná elektrotechnika
Študijný odbor: elektrotechnika
Vedúci práce: doc. Ing. Daniel Valúch, PhD.
Vedúci pracoviska: Ing. Ján Halgoš, PhD.

Názov práce: **Prepínacia matica s nízkym termoelektrickým napätím pre meracie aplikácie**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

Vysoko presné merania elektrických veličín často vyžadujú použitie jedného meracieho prístroja (napríklad referenčného multimetra) na simultánne meranie a vzájomné porovnávanie niekoľkých elektrických signálov. Tieto sa k multimetru pripájajú pomocou elektronicky ovládanej prepínacej matice. Cieľom práce je navrhnuť diaľkovo ovládanú prepínaciu maticu, ktorá sa bude používať pre 4-vodičové merania odporu a pre vysoko presné merania napätia. Použité relé musia byť vybrané s ohľadom na schopnosť spínať nízke prúdy a napätia a zariadenie musí byť navrhnuté pre dosiahnutie minimálnych termoelektrických napätí (EMF) na prechodoch rôznych kovov. Prepínacia matica je diaľkovo ovládaná pre integráciu v automatizovanom meracom systéme.

Úlohy:

- navrhnete metódu pre meranie termoelektrického napätia na kontaktoch relé
- zrealizujete prípravok pre meranie termoelektrického napätia a zmerajte hodnoty pre vybrané typy a modely relé (prípadne iných spínačov) pre typické prevádzkové scenáre
- navrhnete architektúru prepínacej matice tak aby bolo možné merať odpor s dvojvodičovým pripojením, odpor so štvorvodičovým pripojením, napätie individuálnych zdrojov, rozdielové napätie medzi ľubovoľnými dvoma zdrojmi, reverzácia polarita meraní
- s použitím nameraných parametrov relé vyberte najvhodnejší typ a navrhnutú prepínaciu maticu zrealizujte
- do zariadenia vytvorte ovládaci program, ktorý umožní pomocou sériového portu (ethernet výhodou) riadiť signálové cesty
- zmerajte skutočne dosiahnuté parametre zariadenia

Zoznam odbornej literatúry:

1. HOROWITZ, P; HILL, W. *The Art of Electronics*. Cambridge : Cambridge University Press, 2015. 1192 s. ISBN 978-0-521-80926-9.

Termín odovzdania diplomovej práce:	16. 05. 2025
Dátum schválenia zadania diplomovej práce:	17. 02. 2025
Zadanie diplomovej práce schválil:	prof. Ing. René Hartánský, PhD. – garant študijného programu

Čestné prehlásenie

Čestne prehlasujem, že som celú diplomovú prácu „Prepínacia matica s nízkym termoelektrickým napätím pre meracie aplikácie“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce na základe poznatkov, ktoré som nadobudol počas štúdia a s použitím odbornej literatúry a zdrojov, ktoré sú uvedené v zozname použitej literatúry.

V Bratislave, dňa 16. 5. 2025

.....

Bc. David Janiga

Podakovanie

Touto cestou by som rád vyjadril vďaku vedúcemu záverečnej práce, docentovi Danielovi Valúchovi, za jeho ochotu, čas a trpezlivosť počas vypracovávania tejto záverečnej práce. Taktiež si veľmi vážim cenné informácie, rady a konzultácie, ktoré mi počas práce poskytol. Možnosť pracovať pod jeho vedením bola pre mňa obrovským prínosom. Vďaka tejto skúsenosti som získal množstvo informácií o procese návrhu a realizácie technického zariadenia.

Abstrakt

Slovenská technická univerzita v Bratislave

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Študijný program: Aplikovaná elektrotechnika

Autor: Bc. David Janiga

Názov záverečnej práce: Prepínacia matica s nízkym termoelektrickým napätím pre meracie aplikácie

Vedúci záverečnej práce: doc. Ing. Daniel Valúch, PhD.

Mesiac a rok odovzdania: máj 2025

Cieľom diplomovej práce bolo navrhnuť a zrealizovať prepínaciu maticu pre vysoko presné merania napätia a pre dvoj- a štvor-vodičové merania odporu. Vzhľadom na požadovanú vysokú presnosť meraní bolo potrebné zariadenie navrhnuť tak, aby sa minimalizovali teplotné gradienty na prechodoch rôznych kovov, ktoré by mohli značne ovplyvňovať výsledky merania. Z tohto dôvodu je v práci vykonané experimentálne testovanie rôznych modelov relé z hľadiska veľkosti generovaného termoelektrického napätia pri ich prevádzke. Na základe získaných výsledkov z porovnania bolo následne vybrané vhodné relé do finálneho návrhu zariadenia.

Kľúčové slová: Prepínacia matica, Termoelektrické napätie, Relé, Metrológia, Presnosť

Abstract

Slovak University of Technology in Bratislava

Faculty of Electrical Engineering and Information Technology

Study Program: Applied Electrical Engineering

Author: Bc. David Janiga

Title of the final thesis: Low thermal EMF scanner for measurement applications

Supervisor: doc. Ing. Daniel Valúch, PhD.

Date of the submission: May 2025

The aim of this master thesis was to design and construct a switching matrix for high-precision voltage measurements and four-wire resistance measurements. Due to the high accuracy of the measurements required, it was necessary to design this device in such a way that it minimized the effect of thermal voltage that could significantly affect the measurement results. For this reason, the work includes experimental testing of various relay models in terms of thermoelectric voltage generated during their operation. Based on the results obtained, the most suitable relay was selected for implementation in the final device design.

Keywords: Matrix scanner, Thermoelectric voltage, Relay, Metrology, Precision

Obsah

Úvod	1
1 Úvod - typické merania v elektrotechnike	2
1.1 Prepínacia matica	3
1.1.1 Topológia prepínania	3
1.1.2 Dostupné možnosti na trhu	6
1.2 Prepínače	8
1.2.1 Relé	9
1.2.2 Otočné prepínače	11
1.2.3 Materiály kontaktov	12
1.3 Termoelektrické napätie	14
1.3.1 Minimalizovanie vplyvu termoelektrického napätia reverzáciou polarita .	17
2 Meranie termoelektrického napätia	19
2.1 Návrh a realizácia nízkošumového zosilňovača	19
2.2 Zoznam testovaných relé	22
2.3 Metódy testovania vybraných relé	23
2.3.1 Výsledky merania pre astabilné relé	25
2.3.2 Výsledky merania pre bistabilné relé	32
2.4 Dynamika prepínania	43
2.5 Výber relé	45
3 Návrh prepínacej matice	48
3.1 Výber topológie	48
3.2 Zapojenie kanálov prepínacej matice	49
3.3 Realizácia zariadenia	50
3.3.1 Relé panel	51
3.3.2 Predný panel	57
3.4 Softvér	60
4 Dosiahnuté parametre	64
4.1 Neistoty merania	69
4.2 Porovnávanie článkov	73

Záver	79
Zoznam použitej literatúry	82
Príloha č.1 - Výrobné podklady zosilňovača	I
Príloha č.2 - Výrobné podklady meracieho prípravku	VI
Príloha č.3 - Výrobné podklady - Relay Panel	XI
Príloha č.4 - Výrobné podklady - Front Panel	XXVIII
Príloha č.5 - Výrobné podklady krytu zadnej dosky s relé	XL
Príloha č.6 - Výrobné podklady uchytenia Arduina	XLIII

Zoznam obrázkov

1	Skenovacia topológia	4
2	Multiplex topológia (1:N).	5
3	Multiplex topológia (N:1).	5
4	Maticová topológia	6
5	Dostupné prepínacie moduly. [1]	7
6	Zapojenie s jednou cievkou pre zmenu stavu relé.	10
7	Zapojenie s dvomi samostatnými cievkami pre zmenu stavu relé.	10
8	Typy relé podľa konfigurácie.	11
9	12 polohový otočný prepínač v rôznych konfiguráciách. [2]	12
10	Reverzácia polarity.	18
11	Nesprávna GND vrstva.	21
12	Oprava GND vrstvy.	21
13	Nesprávna $+V_{DC}$ vrstva.	21
14	Oprava $+V_{DC}$ vrstvy.	21
15	Nízkošumový zosilňovač s OZ ADA4523-1.	22
16	Testovací prípravok relé.	23
17	Zapojenie 1 (Coto 3602-05-52).	24
18	Zapojenie 2 (Coto 3602-05-52).	24
19	Zapojenie 1 (Ostatné relé).	24
20	Zapojenie 2 (Ostatné relé).	24
21	Relé Coto Technologies 3602-05-52 (Zapojenie 1).	25
22	Relé Coto Technologies 3602-05-52 – detail intervalu zopnutia s dobou ustálenia (Zapojenie 1).	25
23	Priemerná hodnota termoelektrického napätia jednotlivých meraní (Coto 3602-05-52).	26
24	Coto 3602-05-52 - Porovnanie oboch zapojení.	27
25	Citlivosť na vonkajšie vplyvy (Coto 3602-05-52).	27
26	Relé Panasonic Industrial Devices TXS2-4,5V (Zapojenie 1).	28
27	Relé Panasonic Industrial Devices TXS2-4,5V – detail zopnutia relé s dobou ustálenia (Zapojenie 1).	29
28	Priemerná hodnota termoelektrického napätia jednotlivých meraní (TXS2-4,5V).	30

29	TXS2-4,5V - Porovnanie oboch zapojení.	31
30	Citlivosť na vonkajšie vplyvy (TXS2-4,5V).	31
31	Relé Omron G6KU-2F-Y-TR DC5 (10ms/5s/10ms/5s) - Zapojenie 1.	32
32	Relé Omron G6KU-2F-Y-TR DC5 (10ms/5s/10ms/5s) – detail intervalu zopnutia s dobou ustálenia - Zapojenie 1.	33
33	Priemerná hodnota termoelektrického napätia jednotlivých meraní (G6KU-2F-Y-TR DC5).	34
34	Relé Omron G6KU-2F-Y-TR DC5 (5s/1ms/10ms/5s) - Zapojenie 1.	34
35	Relé Omron G6KU-2F-Y-TR DC5 – porovnanie rôznych prevádzkových stavov - Zapojenie 1.	35
36	Omron G6KU-2F-Y-TR DC5 – Porovnanie oboch zapojení.	35
37	Relé Panasonic Industrial Devices TQ2SA-L-5V-Z (10ms/5s/10ms/5s) - Zapojenie 1.	36
38	Relé Panasonic Industrial Devices TQ2SA-L-5V-Z (10ms/5s/10ms/5s) – detail intervalu zopnutia s dobou ustálenia - Zapojenie 1.	36
39	Priemerná hodnota termoelektrického napätia pre jednotlivé merania (TQ2SA-L-5V-Z).	37
40	Relé Panasonic Industrial Devices TQ2SA-L-5V-Z (5s/1ms/10ms/5s) - Zapojenie 1.	38
41	Relé Panasonic Industrial Devices TQ2SA-L-5V-Z – porovnanie rôznych prevádzkových stavov - Zapojenie 1.	38
42	TQ2SA-L-5V-Z – porovnanie rôznych prevádzkových stavov - detail.	39
43	TQ2SA-L-5V-Z – Porovnanie oboch zapojení.	39
44	Relé Panasonic Industrial Devices TXS2-L-4,5-1 (10ms/5s/10ms/5s) - Zapojenie 1.	40
45	Relé Panasonic Industrial Devices TXS2-L-4,5-1 (10ms/5s/10ms/5s) – detail intervalu zopnutia s dobou ustálenia - Zapojenie 1.	40
46	Priemerná hodnota termoelektrického napätia pre jednotlivé merania (TXS2-L-4,5-1).	41
47	Relé Panasonic Industrial Devices TXS2-L-4,5-1 (5s/1ms/10ms/5s) - Zapojenie 1.	42

48	Relé Panasonic Industrial Devices TXS2-L-4,5-1 – porovnanie rôznych prevádzkových stavov - Zapojenie 1.	42
49	TXS2-L-4,5-1 – Porovnanie oboch zapojení.	43
50	Dynamika prepínania.	43
51	Dynamika prepínania.	44
52	Priemerné termoelektrické napätie bistabilných relé s rozsahom, v ktorom sa pohybovali jednotlivé merané napätia.	46
53	Zapojenie prepínačov pre jeden kanál prepínacej matice.	49
54	Uchytenie Arduina na zadný panel zariadenia.	51
55	Uchytenie Arduina na zadný panel zariadenia.	51
56	Pôvodné zapojenie jedného modulu.	53
57	Finálne zapojenie jedného modulu.	53
58	Kryt zadnej strany dosky s relé.	54
59	Osadená doska s relé, spodná strana.	54
60	Osadená doska s relé, vrchná strana.	55
61	Kryt zadnej strany dosky s relé - detail.	55
62	Priestor medzi doskou s relé a predným panelom	56
63	Priestor medzi doskou s relé a predným panelom	56
64	Predný panel vrchná strana DPS (vonkajšia strana prístroja).	57
65	Predný panel s detailom LED podsvietenia.	58
66	Predný panel spodná strana DPS.	58
67	Predný panel.	59
68	Testovanie LED podsvietenia zdierok pre pripojovacie banániky.	59
69	Prepínacia matica.	63
70	Zapojenie merania.	64
71	Automatizované meracie pracovisko pre porovnanie hodnoty napätia troch elektrochemických etalónov napätia.	65
72	Rozdiel napätia článku W1 voči referencii pri oboch polaritách.	66
73	Rozdiel napätia článku W2 vzhľadom k referencii pri oboch polaritách.	67
74	Rozdiel napätia článku W3 voči referencii pri oboch polaritách.	67
75	Rozdiel medzi kladnou a zápornou polaritou článku 1.	68
76	Rozdiel medzi kladnou a zápornou polaritou článku 2.	68

77	Rozdiel medzi kladnou a zápornou polaritou článku 3.	69
78	Neistoty merania.	73
79	Zapojenie merania pre články W1 a W3.	73
80	Zapojenie merania pre články W1 a W3 (reverzácia polarity).	73
81	Rozdiel napätia medzi článkom 1 a 2.	75
82	Rozdiel napätia medzi článkom 2 a 3.	77
83	Rozdiel napätia medzi článkom 1 a 3.	78

Zoznam tabuliek

1	Technické parametre modulu 34921A. [1]	7
2	Technické parametre prepínacích matíc série 42XXA. [3]	8
3	Typy termočlánkov a ich Seebeckove koeficienty	15
4	Hodnota Sebeckovho koeficientu pre rôzne materiály, pre 0 °C. [4]	16
5	Parametre zosilňovača ADA4523-1.	19
6	Zoznam testovaných relé.	22
7	Namerané údaje termoelektrického napätia (3602-05-52).	26
8	Citlivosť na vonkajšie vplyvy (3602-05-52).	28
9	Namerané údaje termoelektrického napätia (TXS2-4,5).	30
10	Namerané údaje termoelektrického napätia (G6KU-2F-Y-TR DC5).	33
11	Namerané údaje termoelektrického napätia (TQ2SA-L-5V-Z).	37
12	Namerané údaje termoelektrického napätia (TXS2-L-4,5-1).	41
13	Namerané údaje termoelektrického napätia pre vybrané relé.	45
14	Maximálne a minimálne termoelektrické napätie pre vybrané relé.	46
15	Parametre relé Omron G6KU-2F-Y-TR 5VDC. [5]	47
16	Porovnanie modelov konektorov.	52
17	Zoznam prístrojov.	65
18	Výsledná stredná hodnota napätia článkov.	69
19	Výsledky meraní napäťových rozdielov medzi Westonovými článkami W2 a W3 pomocou jednotlivých multimetrov.	76
20	Výsledky meraní napäťových rozdielov medzi Westonovými článkami W1 a W3 pomocou jednotlivých multimetrov.	77

Úvod

Prepínacie matice našli uplatnenie v oblasti elektrickej metrológie, kde sa využívajú pri vysoko presných meraniach a porovnávaní elektrických veličín. Pri vysoko presných meraniach sa často vyžaduje použitie jedného meracieho prístroja, ktorým realizujeme merania z rôznych zdrojov signálov. Využitím prepínacej matice dokážeme vykonávať automatizované prepínanie medzi viacerými vstupmi a výstupmi bez potreby manuálneho zasahovania do merania. Keďže je matica priamo v ceste elektrických signálov, ktoré by mohla ovplyvniť, je dôležité ju navrhnuť tak, aby sme dokázali dosiahnuť čo najpresnejšie meranie bez artefaktov.

Naša práca je zameraná na návrh a realizáciu prepínacej matice určenej pre 2- a 4-vodičové merania odporu a pre vysoko presné merania napätia. Hlavnou požiadavkou pri návrhu zariadenia bolo minimalizovanie vzniku termoelektrického napätia na prechodoch rôznych kovov. Aby sme splnili túto požiadavku, vykonáme experimentálne testovanie termoelektrických vlastností rôznych relé, na základe ktorého vyberieme najvhodnejšie relé do finálneho zariadenia.

1 Úvod - typické merania v elektrotechnike

Neoddeliteľnou súčasťou elektrotechniky je meranie elektrických veličín. Vykonávaním meraní získavame potrebné informácie o správaní sa konkrétnych elektrických zariadení. Medzi základné merania v elektrotechnike patria:

1. Meranie napätia (U) – vykonáva sa pomocou voltmetra, ktorý sa pripája paralelne k obvodu, ktorý chceme merať. Výsledná hodnota má jednotku Volt [V].
2. Meranie prúdu (I) – vykonáva sa pomocou ampérmetra, ktorý sa pripája do série s meraným obvodom. Výsledná hodnota má jednotku Ampér [A].
3. Meranie odporu (R) – odpor dokážeme zmerať pomocou ohmmetra. Základná jednotka elektrického odporu je Ohm [Ω]. Existujú dve základné metódy merania odporu:
 - Dvojvodičová metóda.
 - Štvorvodičová metóda.

Dvojvodičová metóda merania odporu

Pri klasickej metóde je hlavným zdrojom chyby pridanie odporu meracích vodičov k výsledku merania. Testovací prúd spôsobuje úbytok napätia na odporoch vodičov a namerané napätie na svorkách prístroja potom nezodpovedá hodnote napätia na testovanom rezistore a môže viesť ku chybe vo výslednej hodnote. [6]

Štvorvodičová metóda merania odporu

Metóda známa aj ako Kelvinova metóda, je technika používaná na meranie elektrických odporov s vysokou presnosťou. Používa sa predovšetkým v aplikáciách vyžadujúcich meranie nízkych odporov. Pri tejto metóde sa eliminujú chyby spôsobené odporom meracích vodičov. Pri meraní touto metódou sú dva vodiče určené na privedenie prúdu do meraného rezistora a zvyčajne majú nízky odpor. Ďalšia dvojica vodičov je oddelená od prúdových a používa sa na meranie úbytku napätia na rezistore. Napäťové vodiče sa pripájajú čo najbližšie k miestu merania. Cez tieto vodiče prechádza nízky prúd, a preto sa ich vlastný odpor prejaví na výsledku merania len zanedbateľne. Hlavná výhoda tejto metódy je, že eliminuje kontaktný odpor vodičov, ktorý dokáže ovplyvniť presnosť merania. Preto sa táto metóda využíva v meraniach, kde sú požadované presné hodnoty. [7]

1.1 Prepínacia matica

Pre realizáciu ktoréhokoľvek z troch základných meraní elektrických veličín môžeme použiť univerzálny merací prístroj - multimeter. Použitie tohto zariadenia nám umožňuje merať rôzne elektrické veličiny bez potreby použitia viacerých samostatných prístrojov. Čo však v prípade, ak máme viacero meraných objektov? Aby sme ich dokázali zmerať, museli by sme použiť zodpovedajúce množstvo multimetrov, čo je finančne náročné riešenie. V prípade využitia jedného multimetra by sme museli manuálne zasahovať do merania, aby sme menili merané objekty. Pri vyššom počte meraných objektov by toto riešenie bolo nepraktické a časovo náročné. Preto sa v meracej technike využívajú prepínacie matice.

Prepínacie matice sú zariadenia tvorené viacerými prepínačmi, pomocou ktorých dokážeme vhodne riadiť tok signálov medzi vstupmi a výstupmi matice. Riadenie signálov takýmto spôsobom umožňuje automatizáciu meraní, čo má za následok redukcii času a ceny merania. Prepínacie matice sa využívajú vo viacerých oblastiach:

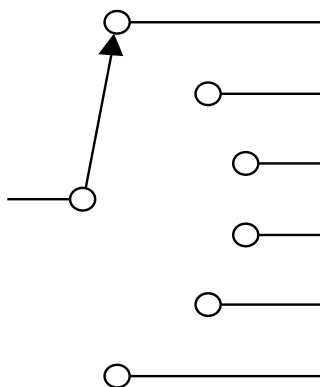
- Meracia technika – napríklad prepínanie signálov medzi meranými objektami a meracím zariadením,
- telekomunikácie,
- audio/video technika,
- vysokofrekvenčné systémy.

1.1.1 Topológia prepínania

Keďže existuje viacero oblastí využitia prepínacích matíc, požiadavky na riadenie signálov môžu byť rôzne. V závislosti od týchto požiadaviek máme pri návrhu prepínacieho systému k dispozícii viacero topológií, na základe ktorých môžeme vybrať tú najvhodnejšiu pre naše zariadenie.

Skenovacia topológia

Ide o najjednoduchšie usporiadanie prepínačov v systéme. Takúto topológiu môžeme opísať ako viacpolohový prepínač. Ten sa využíva na pripojenie viacerých vstupov k jednému výstupu, alebo opačne. Prepínanie je však vždy v sekvenčnom poradí. Neumožňuje zopnutie dvoch signálových ciest súčasne. [8]

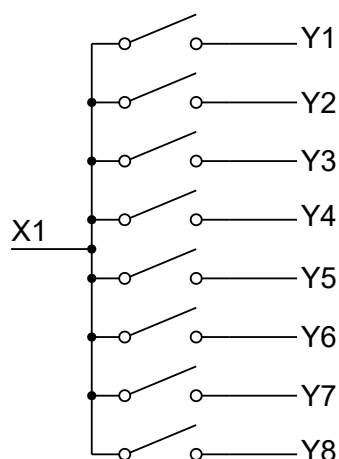


Obr. 1: Skenovacia topológia

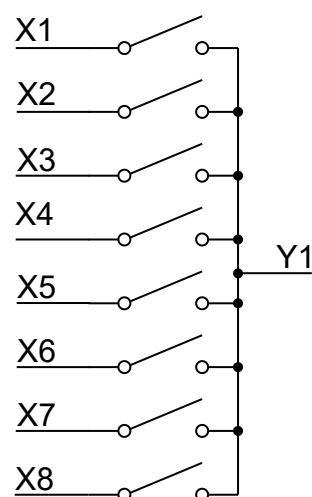
Multiplex (MUX/DeMUX topológia)

Jedná sa o spôsob usporiadania prepínačov tak, aby bolo umožnené pripojenie jedného vstupu ku viacerým výstupom (1:N), alebo opačne (N:1). Poskytuje efektívny spôsob pripojenia viacerých testovaných zariadení ku meraciemu prístroju. Na rozdiel od skenovacej topológie dokážeme pri multiplexovaní súčasne pripojiť viacero kanálov. Pri tejto topológii poznáme dve verzie: [9]

- MBB (Make Before Break) – vytvorí sa nové spojenie pred prerušením predchádzajúceho (vhodné pre merania, kde nesmie nastať strata signálu).
- BBM (Break Before Make) – preruší sa existujúce pripojenie pred vytvorením nového (vhodné na zabránenie skratom).



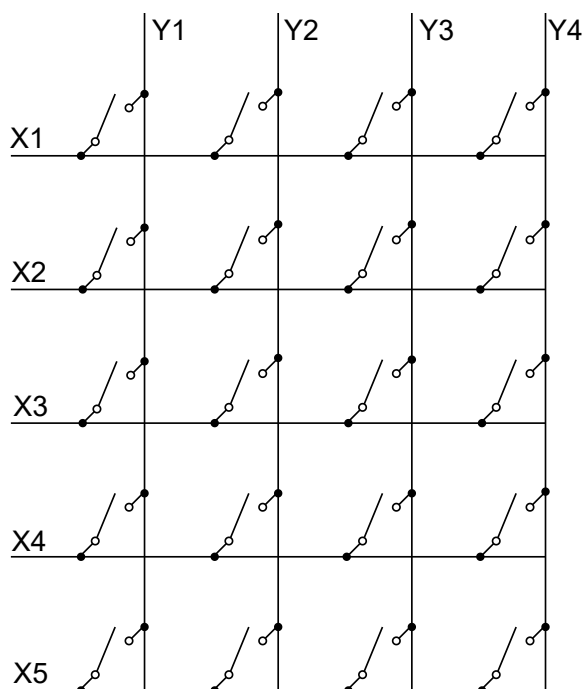
Obr. 2: Multiplex topológia (1:N).



Obr. 3: Multiplex topológia (N:1).

Maticová topológia

Táto topológia je najuniverzálnejšia, pretože umožňuje prepojenie viacerých vstupov a výstupov. Vďaka tejto topológii máme veľa možností konfigurácie signálových ciest. Ako z názvu vyplýva, prepínače v maticovej konfigurácii vytvoria mriežku, v ktorej dokážeme vytvoriť vodivé spojenie medzi ľubovoľným vstupom a výstupom. Počet vstupov zariadenia predstavuje počet riadkov matice a počet výstupov jej stĺpce. Na ich priesečníkoch sú umiestnené prepínače, pomocou ktorých riadime signály. Vzhľadom na vysokú flexibilitu sa táto topológia využíva napríklad v testovacích systémoch, automatizovaných meraniach alebo v telekomunikačných sieťach. [8]



Obr. 4: Maticová topológia

1.1.2 Dostupné možnosti na trhu

V tejto kapitole sa podrobnejšie pozrieme na komerčne dostupné možnosti, ktoré sa používajú v automatizovaných testovacích systémoch. Medzi hlavných výrobcov prepínacích matic patria spoločnosti ako Measurements International, National Instruments alebo Keysight. Keďže existuje viacero oblastí využitia prepínacích matic, výrobcovia ponúkajú širokú škálu zariadení v závislosti od konkrétneho zamerania. Preto dokážeme nájsť matice pre vysoko presné merania s nízkym termoelektrickým napätím, matice pre vysokonapäťové a prúdové aplikácie alebo na využitie vo VF oblasti. Okrem celých prepínacích matic ponúkajú niektorí výrobcovia aj multifunkčné meracie jednotky. Jedná sa o modulárne riešenia, ktoré umožňujú používateľovi zostaviť si merací systém podľa vlastných požiadaviek. Jedným z takýchto zariadení je napríklad multifunkčný merací systém 34980A od spoločnosti Keysight. Toto zariadenie umožňuje pripojiť až 8 zásuvných modulov, pričom na výber máme k dispozícii až 21 rôznych možností. Na výber sú multiplexorové, maticové, RF a digitálne I/O a D/A moduly. [1]

Module	Description	Max volts ⁵	Switch/Carry current	BW (MHz)	Scan ch/sec	Thermal offset	Comments
Multiplexer modules							
34921A	40-channel armature multiplexer w/low thermal offset	$\pm 300 \text{ V}^{1,6}$	1A /2A	45 MHz	100	$< 3 \mu\text{V}$	Temperature reference 4 current channels Config as 2- or 4-wire
34922A	70-channel armature multiplexer	$\pm 300 \text{ V}^{1,6}$	1A /2A	25 MHz	100	$< 3 \mu\text{V}$	Config as 2- or 4-wire
34923A	40/80-channel reed multiplexer	$\pm 150 \text{ V}^{2,7}$	0.5A /1.5A	45 MHz	500	$< 50 \mu\text{V}$	Config as 1-, 2- or 4-wire
34924A	70-channel reed multiplexer	$\pm 150 \text{ V}^{2,7}$	0.5A /1.5A	25 MHz	500	$< 50 \mu\text{V}$	Config as 2- or 4-wire
34925A	40/80-channel optically isolated FET multiplexer	$\pm 80 \text{ V}_{\text{peak}}^6$	0.02A	1 MHz	1000	$< 3 \mu\text{V}$	Config as 1-, 2- or 4-wire
Matrix modules							
34931A	Dual 4x8 armature matrix	$\pm 300 \text{ V}^{1,6}$	1A /2A	30 MHz	100	$< 3 \mu\text{V}$	Backplane expandable
34932A	Dual 4x16 armature matrix	$\pm 300 \text{ V}^{1,6}$	1A /2A	30 MHz	100	$< 3 \mu\text{V}$	Backplane expandable
34933A	Dual/Quad 4x8 reed matrix	$\pm 150 \text{ V}^{2,7}$	0.5A /1.5A	30 MHz	500	$< 50 \mu\text{V}$	Backplane expandable Config as 1- or 2-wire
34934A	Quad 4x32 reed matrix	$\pm 100 \text{ V}_{\text{peak}}^8$	0.5A /0.5A	20MHz	500	$< 50 \mu\text{V}$	Row expansion kit. Config as 1- or 2-wire
General-purpose modules							
34937A	28-channel Form C and 4-channel Form A	$\pm 300 \text{ V}^{1,6}$ $\pm 250 \text{ VAC}^{3,6}$	1A /2A 5A/7A	10 MHz	N/A	$< 3 \mu\text{V}$ $< 3 \mu\text{V}$	
34938A	20-channel 5-amp Form A	$\pm 250 \text{ VAC}^{3,6}$	5A /7A	1 MHz	N/A	$< 3 \mu\text{V}$	
34939A	64-channels Form A	$\pm 100 \text{ V}_{\text{peak}}^{4,6}$	1A /2A	10 MHz	N/A	$< 3 \mu\text{V}$	

Obr. 5: Dostupné prepínacie moduly. [1]

Z dostupných modulov uvedených na obrázku 5 vidíme, že modul 34921A má nízky termoelektrický offset (generuje len veľmi malé termoelektrické napätie). Toto ho robí ideálnym na presné merania nízkonapäťových signálov. Modul obsahuje 40 kanálov pre 2-vodičové pripojenie alebo 20 kanálov pre 4-vodičové pripojenie. Rovnako modul obsahuje aj 4 prúdové kanály. Pre ešte lepšie termoelektrické vlastnosti je možné k modulu zakúpiť blok 34921T, ktorý obsahuje referenčný uzol pre termočlánok. [10]

Tabuľka 1: Technické parametre modulu 34921A. [1]

Parameter	Hodnota
Maximálne napätie	$\pm 300 \text{ V}$
Maximálny pracovný/spínací prúd (DC, AC RMS)	2 A/1 A
Počiatkový prechodový odpor	$< 1.5 \Omega$
Termoelektrické napätie	$< 3 \mu\text{V}$
Čas zopnutia/rozopnutia	4 ms/4 ms

Okrem modulárnych riešení, ktoré pokrývajú širokú škálu aplikácií, existujú aj samostatné prepínacie matice určené priamo na náročné meracie aplikácie. Príkladom takýchto zariadení sú napríklad prepínacie matice série 42XXA od spoločnosti Measurements International. Ide o sériu prepínacích matíc s nízkym termoelektrickým napätím navrhnutých pre presné merania odporu. V zariadeniach sa využívajú ultra citlivé zapuzdrené relé, ktoré eliminujú vlastné zahrievanie.

Dostupných je niekoľko verzií: 10, 16 a 20 kanálové matice. [3]

Tabuľka 2: Technické parametre prepínacích matíc série 42XXA. [3]

Parameter	Hodnota
Max. pracovné/spínacie napätie	1000 V/220 V @ < 100 mA DC
Max. prúd (pracovný/spínací)	4 A/2 A @ < 30 V DC
Odpor kontaktu	< 0.05 Ω
Termoelektrické napätie	< 50 nV
Materiál konektorov	Telúrová meď

1.2 Prepínače

Veľmi dôležitou úlohou pri návrhu prepínacej matice je výber prepínačov. Pred samotným výberom je dôležité určiť požiadavky na finálne zariadenie, aby sme vedeli zvoliť správny typ prepínača v závislosti od konkrétnej aplikácie. Po sformulovaní požiadaviek môžeme začať s výberom vhodného prepínača, na základe faktorov ako napríklad:

- elektrické parametre,
- životnosť,
- rozmery,
- rýchlosť prepínania

Typy prepínačov vhodné pre prepínanie matice sú napríklad:

- relé,
- otočné prepínače,
- polovodičové spínače

Použité prepínače musia mať veľmi dobrú izoláciu a nízke termoelektrické napätie. Aby sme teda dosiahli čo najlepšiu funkčnosť zariadenia musíme zabezpečiť presné a stabilné merania, pričom kľúčovou požiadavkou je minimalizácia nežiadúcich faktorov ako sú kontaktné odpory a termoelektrické napätia. V práci sa budeme teda zaoberať výberom vhodných spínačov a porovnávať ich parametre.

1.2.1 Relé

Relé je elektricky ovládaný spínač, pomocou ktorého dokážeme riadiť obvody nízkonapäťovými signálmi. Vstupný a výstupný obvod relé je elektricky izolovaný. Umožňuje spínanie vysoko výkonových záťaží aj pri nízkych riadiacich signáloch. Relé našlo využitie v množstve aplikácií, ako napríklad v telekomunikáciách, ochranných systémoch alebo meracích systémoch. [11]

Základné delenie relé:

- elektromagnetické relé,
- polovodičové relé (Solid-State Relay)

Polovodičové relé (Solid-State Relay)

Polovodičové relé využívajú na oddelenie vstupných a výstupných obvodov optočlen. Pomocou tohto optočlena je zabezpečené galvanické oddelenie medzi vstupnými a výstupnými obvodmi. Na vstupe optočlena je infračervená LED, ktorá po privedení riadiaceho impulzu emituje žiarenie na fotodetektor (napríklad fotodióda, fototranzistor alebo fototyristor), ktorý riadi výstupné elektrické obvody. Výhodou oproti elektromagnetickým relé je, že neobsahujú pohyblivé časti, čo má za následok dlhšiu životnosť, rýchle spínanie alebo tichšiu prevádzku. Taktiež sú vysoko odolné voči nárazom a vibráciám. Ponúkajú kratšiu dobu odozvy a teda schopnosť použiť vyššie prevádzkové frekvencie. Nevýhodou je pomerne vysoký sériový odpor v zapnutom stave, čo má za následok generovanie tepla. [12] [11]

Elektromagnetické relé

Ide o najbežnejší typ relé. Keď cievkou relé prechádza riadiaci prúd vytvorí sa magnetické pole. Vplyvom tohto poľa sa vo vnútri relé pritiahne kotva, ktorá spôsobí pripojenie alebo odpojenie elektrického obvodu. Po odstránení riadiaceho napätia z cievky, magnetické pole zaniká a kotva sa vráti naspäť do pôvodnej polohy. [11]

Elektromagnetické relé sa rozdeľujú ďalej podľa princípu ich fungovania na:

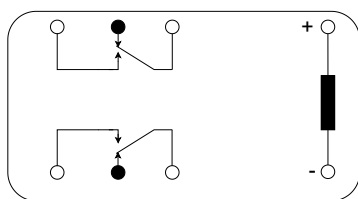
- monostabilné relé,
- bistabilné relé,
- jazýčkové relé.

Monostabilné relé

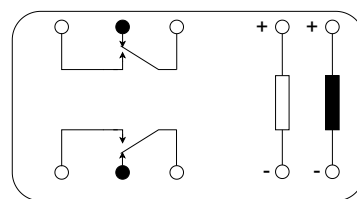
Po privedení riadiaceho napätia na cievku, relé prejde do aktívneho stavu (zopne kontakty alebo rozopne). Relé je v aktívnom stave počas celej doby trvania riadiaceho impulzu. V momente kedy odstránime riadiace napätie sa kontakty relé vrátia do pôvodnej polohy. [11]

Bistabilné relé

Toto relé má dve stabilné polohy. Na jeho riadenie sa používajú krátke riadiace impulzy. Keď privedieme krátky riadiaci impulz na cievku, relé prejde do aktívneho stavu a zotrváva v ňom aj po odstránení riadiaceho impulzu. Aby sme relé vypli, musíme opäť priviesť impulz na cievku. V tomto type relé sa využívajú buď samostatné cievky na riadenie zopnutia a vypnutia alebo jedna, kde meníme polaritu, na základe ktorej sa relé zopne alebo rozopne. [11]



Obr. 6: Zapojenie s jednou cievkou pre zmenu stavu relé.



Obr. 7: Zapojenie s dvomi samostatnými cievkami pre zmenu stavu relé.

Jazýčkové relé

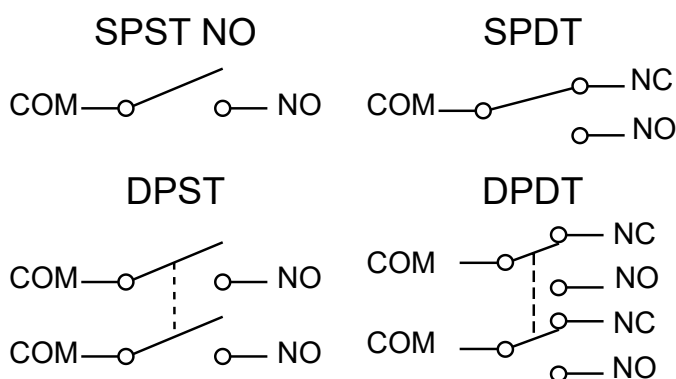
Výhodou týchto relé je, že sú uzavreté v sklenenej trubici vďaka čomu sú odolné voči atmosférickej korózii. Ponúkajú dlhú životnosť a rýchle spínanie. Vo vnútri sklenenej trubice sa nachádzajú dva lamelové kontakty, ktoré sú oddelené malou medzerou. Ak sú konce týchto kontaktov vystavené magnetickému poľu, dochádza k ich zopnutiu. [12]

Ďalej rozdeľujeme relé aj podľa vnútorného zapojenia kontaktov. Dôležitý je údaj o počiatčnom stave kontaktov:

- **NO – Normally Open** – daný kontakt je v neaktívnom stave rozpojený. Po privedení riadiaceho napätia sa zopne.
- **NC – Normally Closed** – daný kontakt je v neaktívnom stave zopnutý. Po privedení riadiaceho napätia sa rozopne.

Následne poznáme rôzne formy vyhotovenia v závislosti od počtu vstupov a výstupov:

- **SPST** – Single Pole Single Throw,
- **SPDT** – Single Pole Dual Throw,
- **DPST** – Dual Pole Single Throw,
- **DPDT** – Dual Pole Dual Throw.

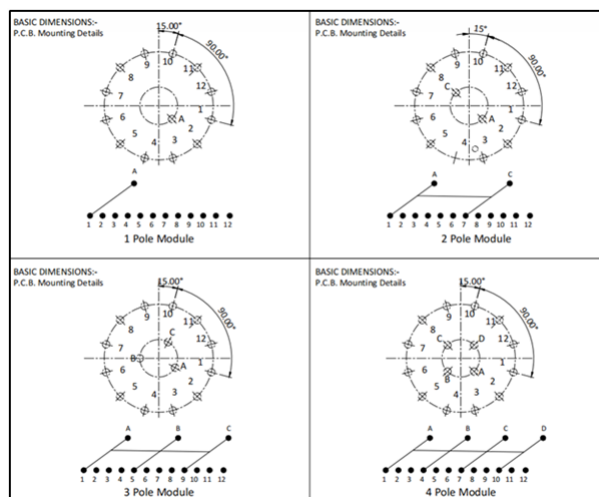


Obr. 8: Typy relé podľa konfigurácie.

Keďže niektoré aplikácie vyžadujú zložitejšie konfigurácie, dokážeme nájsť relé aj s vyšším počtom vstupov. Potom sa označenie mení v závislosti od tohto počtu, napríklad 3P3T.

1.2.2 Otočné prepínače

Otočné prepínače sú mechanické spínače, ktoré umožňujú prepínanie medzi viacerými obvodmi ich otáčaním. Obsahujú teda niekoľko kontaktov, ktoré sú umiestnené okolo osi otáčania v pevne daných uhloch – 30°, 45°, 60° alebo 90°. Väčšina konfigurácií týchto prepínačov má 3, 4, 6 alebo 12 polôh, ale existujú aj prepínače s vyšším množstvom. Okrem toho sa tieto prepínače delia aj podľa počtu pólov na jedнопólové alebo viacpólové. Pri jedнопólových prepínačoch dokážeme ovládať jeden obvod a pripájať ho na rôzne výstupy, v závislosti od polohy prepínača. V prípade viacpólových prepínačov dokážeme ovládať dva a viac obvodov. Na obrázku 9 je znázornený spôsob prepínania medzi obvodom a výstupom pre 12 polohový prepínač s rôznym počtom pólov. [13] [2]



Obr. 9: 12 polohový otočný prepínač v rôznych konfiguráciách. [2]

Aby sme dokázali využiť tieto prepínače v plne automatizovaných meraniach, môžeme využiť riadenie prepínačov použitím krokových motorov. Takto by sme dokázali prepínače ovládať diaľkovo. Príklad použitia otočných prepínačov s diaľkovým riadením nájdete v práci *A very low thermal EMF computer-controlled scanner*. [14]

1.2.3 Materiály kontaktov

Materiál kontaktov relé ovplyvňuje jeho elektrické vlastnosti, životnosť a mechanickú odolnosť. V závislosti od aplikácie relé sa mení nielen jeho konštrukcia, ale aj tvar a materiál kontaktov relé. V tejto kapitole sa bližšie pozrieme na porovnanie materiálov používaných v nízko-signalových relé a vo výkonových relé.

Výkonové relé

Sú určené na spínanie vyšších prúdov. Keďže dochádza k prenosu veľkého množstva energie, kontakty týchto relé musia byť mechanicky a tepelne odolné. Hlavné materiály, ktoré sa využívajú pre tieto aplikácie sú:

- AgNi,
- AgCdO,
- AgSnO₂.

Okrem zliatín sa v niektorých aplikáciách môžeme stretnúť aj s kontaktmi z čistého striebra. Využívajú sa pri stredných až vyšších napätiach od 20 V s prúdom do 10 A. Oxidácia kontaktov

sa vplyvom vysokého prúdu elektricky vyčistí a tak aj strieborné kontakty dokážu zabezpečiť efektívnu a spoľahlivú prevádzku. [15] Pre zlepšenie vlastností ako je napríklad spoľahlivosť alebo odolnosť voči vonkajším vplyvom sa využívajú zliatiny striebra. Kontakty vyrábané zo zliatiny AgNi (najčastejšie s obsahom niklu na úrovni medzi 10 až 20%) sú vhodné pre spínanie jednosmerných prúdov a pre spínanie nízkych striedavých prúdov. Táto zliatina má výhodu vysokej tvrdosti a odolnosti voči erózii kontaktov, avšak môže dochádzať ku pretaveniu niklu a zvarom materiálov. Zliatina AgCdO sa využíva najmä v oblasti induktívnych a odporových záťaží. Rozsah použitia tejto zliatiny je od 12 VAC po 380 VAC a 100 mA až 30 A. Na rozdiel od zliatiny AgNi ponúka vyššiu odolnosť proti zvarom materiálov. V prípade kontaktu zo zliatiny AgSnO₂ sú vlastnosti podobné zliatinám z AgCdO, ale ponúkajú lepšiu stabilitu v DC aplikáciách. [16]

Nízko-signalové relé

Tieto relé spínajú malé prúdy. Kľúčové pri tomto type relé nie je zvládať vysoké výkony, ale poskytnúť vodivé stabilné spojenia s nízkym odporom kontaktov bez oxidácie. Najčastejšie sa používajú kontakty zo striebra a jeho zliatín. Použitím kontaktu z čistého striebra dostaneme dobrú vodivosť, avšak striebro je náchylné na oxidáciu a na jeho povrchu časom vznikne tenká vrstva sulfidu, ktorý spôsobí zvýšenie prechodového odporu. Z tohto dôvodu sa pri signálových relé využíva pozlátenie kontaktov. Zlato a jeho zliatiny sú odolné voči korózii a majú nízky prechodový odpor, čo je výhodné v nízkoúrovňových signálových aplikáciách, kde aj malé zvýšenie odporu môže spôsobiť nesprávnu funkciu obvodu. Vďaka vysokej odolnosti voči oxidácii sú pozlátené kontakty ideálne aj pre aplikácie v prostrediach, kde sa vyskytuje vlhkosť alebo nečistoty. Nanášanie zlatej vrstvy na kontakt môže prebiehať rôznymi spôsobmi:

- valcovaním (gold clad),
- galvanickým pokovovaním (gold overlay),
- naprašovaním (gold flash).

Naprašovaním zlatých vrstiev dosiahneme lepšiu čistotu povrchu v porovnaní s ostatnými spôsobmi. [17] [18] [16]

1.3 Termoelektrické napätie

Termoelektrické napätie je veľmi nízke napätie v rozsahu mikrovoltov, ktoré je generované teplotnými rozdielmi na spojoch rôznych materiálov. Veľkosť generovaného napätia závisí od termoelektrického koeficientu materiálov, ktorých plochy sa dotýkajú. Jeho vznik súvisí s tromi termoelektrickými javmi. Prvý z termoelektrických javov bol objavený v roku 1821 nemeckým fyzikom Thomasom Seebeckom. Tento jav hovorí o tom, že keď spojíme dva rôzne elektrické vodiče na dvoch miestach tak, aby vytvorili slučku, v obvode sa vplyvom rozdielu teplôt týchto spojov generuje napätie. Jedná sa o termočlánok. [19] Veľkosť napätia generovaného vplyvom Seebeckovho javu sa dá vypočítať pomocou vzťahu:

$$\Delta V_{\text{Temf}} = S \cdot \Delta T \quad (1)$$

kde:

- ΔV_{Temf} – generované termoelektrické napätie medzi materiálmi [V],
- S – Seebeckov koeficient (termoelektrický koeficient) materiálov [V/K],
- ΔT – rozdiel teplôt medzi spojmi [K].

Druhý termoelektrický jav objavil v roku 1834 Francúz Jean Peltier, ktorý zistil, že vplyvom prechodu elektrického prúdu cez termočlánok dochádza k absorpcii alebo uvoľňovaniu tepla v mieste spoja v závislosti od smeru prúdu. V prípade, že smer elektrického prúdu prechádzajúceho cez termočlánok sa zhoduje so Seebeckovým prúdom, teplo sa uvoľňuje.

Súvis medzi Seebeckovým a Peltierovým javom objavil v roku 1855 William Thomson. Dokázal, že v homogénnom vodiči, cez ktorý prechádza elektrický prúd, môže pri nerovnomernom rozložení teploty vzniknúť dodatočné termoelektrické napätie. Tento jav sa prejavuje pri dlhých vodičoch, kde sa mení teplota pozdĺž dĺžky vodiča. [20]

Na základe Seebeckovho javu vidíme, že vznik termoelektrického napätia je v niektorých aplikáciách žiadúci. Praktické využitie termoelektrického napätia sa uplatňuje napríklad pri termočlánoch alebo pri termoelektrických generátoroch.

Termočlánky

Termočlánky sú jednoduché teplotné senzory skladajúce sa z dvoch vodičov, ktoré sú vyrobené z rôznych kovov. Tieto vodiče sú spojené v jednom bode (merací spoj) a vplyvom

zmeny teploty pozdĺž celej dĺžky vodičov sa generuje napätie. V súčasnosti poznáme niekoľko typov termočlánkov. Rozdeľujeme ich na základe materiálov, ktoré obsahujú a podľa rozsahu meraných teplôt. [21]

Tabuľka 3: Typy termočlánkov a ich Seebeckove koeficienty

Typ termočlánku	Materiály	Seebeckov koeficient [$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$]
E	Nikel - Konštantán	60
J	Železo - Konštantán	51
T	Meď - Konštantán	40
K	Chromel - Alumel	40
N	Nikrosil - Nisil	38
S	Platina - Platina (10% Rh)	11
B	Platina (30% Rh) - Platina (6% Rh)	8
R	Platina - Platina (13% Rh)	12

Termoelektrické generátory

Termoelektrické generátory sú zariadenia, ktoré slúžia na premenu tepla na elektrickú energiu. Tieto generátory sú zložené zo sústavy termočlánkov (Thermopile) zapojených v sérii. Nevýhodou je ich nižšia účinnosť, avšak ponúkajú jednoduchý dizajn, dlhú životnosť a nulové nároky na údržbu. Uplatnenie našli napríklad vo vesmírnych aplikáciách. [22]

Naopak, v oblasti ako je meracia technika sa vznik termoelektrického napätia považuje za nežiadúci jav a snažíme sa ho eliminovať. Je tomu tak z toho dôvodu, že vo väčšine prípadov požadujeme vysokú presnosť merania a vznik termoelektrického napätia na signálových cestách by mohol výrazne skresliť výsledky merania. Aby sme teda minimalizovali vznik termoelektrického napätia musíme dbať na:

- minimalizáciu spojov rôznych materiálov,
- minimalizáciu teplotných rozdielov v obvode,
- používať káble a spoje s nízkym termoelektrickým napätím,
- používať reverzačné techniky,
- používať štvorvodičovú metódu (pre presné meranie odporu). [23]

Napätie generované vplyvom Seebeckovho javu spočíva vo veľkosti termoelektrického koeficientu S . Tento koeficient vyjadruje napäťový rozdiel, ktorý vznikne medzi dvoma materiálmi pri teplotnej zmene. V momente, keď sa teplotný rozdiel blíži k nule, vzťah medzi ΔT a ΔV sa stáva lineárnym.

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2)$$

kde:

- S – Seebeckov koeficient,
- ΔV – napäťový rozdiel medzi dvoma bodmi [V],
- ΔT – teplotný rozdiel medzi dvoma bodmi [K].

Seebeckov koeficient je vlastnosťou daného materiálu a môže nadobúdať kladnú alebo zápornú hodnotu. Ak spojíme dva rôzne materiály A a B, výsledné generované napätie bude dané relatívnym Seebeckovým koeficientom (S_{AB}). Ten sa vypočíta ako rozdiel absolútnych koeficientov materiálov S_A a S_B [24]:

$$S_{AB} = S_A - S_B = \frac{\Delta V_A}{\Delta T} - \frac{\Delta V_B}{\Delta T} \quad (3)$$

Tabuľka 4: Hodnota Sebeckovho koeficientu pre rôzne materiály, pre 0 °C. [4]

Materiál	Seebeckov koeficient [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]	Materiál	Seebeckov koeficient [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]
Hliník	3,5	Olovo	4,0
Antimón	47	Ortuť	0,6
Bizmut	-72	Nikróma	25
Kadmium	7,5	Nikel	-15
Uhlík	3,0	Platina	0
Konštantán	-35	Draslík	-9,0
Meď	6,5	Ródium	6,0
Germánium	300	Selén	900
Zlato	6,5	Kremík	440
Železo	19	Striebro	6,5
Sodík	-2,0	Telúr	500
Tantal	4,5	Wolfrám	7,5

Príklad vzniku termoelektrického napätia: Máme vodiče A a B, ktoré sú spojené na jednom konci. Vodič A je z medi a vodič B z konštantánu. Teplota horúceho spoja je

$T_H=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplota studeného spoja $T_C=20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aké bude výsledné termoelektrické napätie?

Riešenie: Seebeckove koeficienty materiálov z tabuľky 4 sú nasledovné:

$$S_{\text{Cu}} = 6,5\text{ }\mu\text{V}/(^{\circ}\text{C}) \quad (4)$$

$$S_{\text{CuNi}} = -35\text{ }\mu\text{V}/(^{\circ}\text{C}) \quad (5)$$

Rozdiel teploty medzi horúcim a studeným spojom bude:

$$\Delta T = T_H - T_C = 80\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

Vzniknuté termoelektrické napätia jednotlivých vodičov:

$$\Delta V_{\text{Cu}} = S_{\text{Cu}} \cdot \Delta T = (6,5 \times 10^{-6}) \cdot 80 = 0,500\text{ mV} \quad (7)$$

$$\Delta V_{\text{CuNi}} = S_{\text{CuNi}} \cdot \Delta T = (-35 \times 10^{-6}) \cdot 80 = -2,800\text{ mV} \quad (8)$$

Teraz z absolútnych Seebeckových koeficientov materiálov vypočítame hodnotu relatívneho koeficientu, pomocou ktorej získame výsledné termoelektrické napätie:

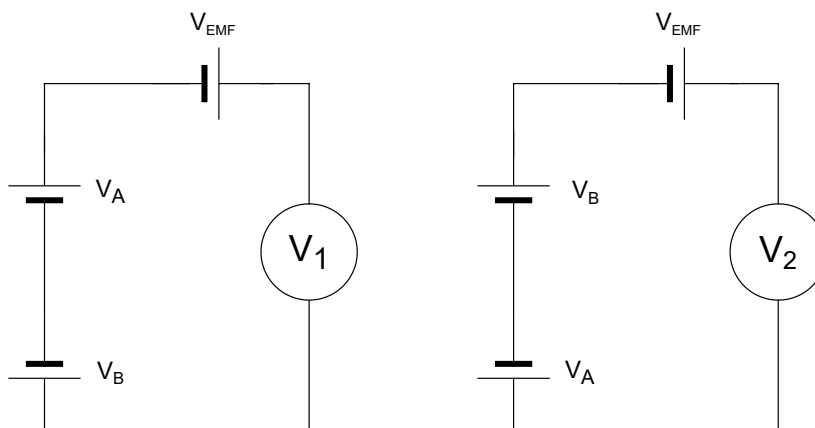
$$S = S_{\text{Cu}} - S_{\text{CuNi}} = 41,5\text{ }\mu\text{V}/(^{\circ}\text{C}) \quad (9)$$

$$\Delta V_{\text{emf}} = S \cdot \Delta T = (41,5 \times 10^{-6}) \cdot 80 = 3,320\text{ mV} \quad (10)$$

Z tabuľky hodnôt Seebeckových koeficientov a rovnako aj z príkladu vidíme, že niektoré materiály majú záporný koeficient. Keď je hodnota koeficientu kladná, znamená to, že spoj s vyššou teplotou má nižšie napätie ako studený spoj a opačne. V prípade zliatiny ako je konštantán bude teda platiť, že na horúcom konci vodiča je generované termoelektrické napätie nižšie ako na studenom konci. Platí, že v prípade polovodičov typu P (diery ako nosiče náboja) je S kladný a v polovodičoch typu N (elektróny ako nosiče náboja) záporný. [24]

1.3.1 Minimalizovanie vplyvu termoelektrického napätia reverzáciou polarít

Pri vysoko presných meraniach napätia sa využíva metóda reverzácie napätia na svorkách. Táto metóda súvisí so znižovaním chýb merania a zvyšovaním presnosti. V súvislosti s elimináciou termoelektrického napätia pomáha reverzácia polarít tak, že hodnota termoelektrického napätia nemení smer pri zmene polarít, zatiaľ čo merané napätie áno. [25]



Obr. 10: Reverzácia polarity.

Z obrázka 10 vyplýva:

$$V_1 = V_{emf} + V_a - V_b \quad (11)$$

$$V_2 = V_{emf} + V_b - V_a \quad (12)$$

$$\frac{V_1 - V_2}{2} = \frac{V_{emf} + V_a - V_b - V_{emf} - V_b + V_a}{2} = V_a - V_b \quad (13)$$

2 Meranie termoelektrického napätia

Cieľom merania je zistiť veľkosť termoelektrického napätia rôznych typov relé a ich následné porovnanie. Keďže sa hodnota termoelektrického napätia pohybuje na úrovni rádovo mikrovoltov, na správne zmeranie napätia generovaného vplyvom teplotných gradientov máme dve možnosti:

- meranie nanovoltmetrom,
- zostrojenie zosilňovača.

Pri zvolení merania pomocou nanovoltmetra získame údaj o amplitúde termoelektrického napätia. Na základe tohto by sme dokázali zvoliť vhodný typ prepínača, avšak ak chceme vidieť priebeh termoelektrického napätia a sledovať ho v čase, musíme zostrojiť zosilňovač, pomocou ktorého môžeme merať napätie na osciloskope. Takýmto spôsobom budeme môcť vidieť dynamiku napätia. Ide o veľmi citlivé meranie reagujúce na zmeny vplyvom prúdenia vzduchu alebo otrasov, preto je dôležité vidieť priebeh napätia, aby sme vedeli určiť jeho ustálenú hodnotu.

2.1 Návrh a realizácia nízkošumového zosilňovača

Očakávame, že merané termoelektrické napätie vybraných relé sa pohybuje v rozsahu niekoľkých mikrovoltov. Vzhľadom na nízku úroveň signálu, zostrojíme nízkošumový zosilňovač so zosilnením 1000. Takto zvýšime merané napätie z úrovne mikrovoltov na milivolty a budeme môcť sledovať priebeh napätia pomocou osciloskopu. Pri návrhu zosilňovača je dôležité minimalizovať šum obvodu, ktorý by mohol mať výrazný vplyv na celkovú presnosť merania. Preto je veľmi dôležité vybrať správny operačný zosilňovač. Zvolili sme operačné zosilňovače ADA4523-1 s veľmi nízkym šumom a veľmi nízkym offsetom.

Tabuľka 5: Parametre zosilňovača ADA4523-1.

Parameter	Hodnota
Rozsah napájacieho napätia	4,5 V - 36 V
Offsetové napätie	0,5 μV
Teplotný drift	0,01 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
Spektrálna hustota šumu	4,2 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Vstupný prúd	300 pA

Tieto zosilňovače zapojíme v neinvertujúcom zapojení. Aby sme dokázali znížiť celkový napäťový šum, ktorý vznikne, pripojíme 16 zosilňovačov paralelne. Výsledný napäťový šum sa zníži o $\sqrt{N}$, kde N je počet OZ, zatiaľ čo sa celkový prúdový šum násobí počtom zosilňovačov N. Zvýšením počtu OZ sa zvýši pomer signál/šum, čo je dôležité pre merania malých signálov. Udáva pomer medzi úrovňou užitočného signálu a úrovňou šumu.

Zapojením 16 OZ paralelne sa šumové parametre zmenia nasledovne:

Šum vo frekvenčnom pásme od 0,1 Hz po 10 Hz

$$e_{n\text{ P-P}} = \frac{88\text{ nV}_{\text{P-P}}}{\sqrt{N}} = \frac{88\text{ nV}_{\text{P-P}}}{\sqrt{16}} = 22\text{ nV}_{\text{P-P}} \quad (14)$$

Napäťová hustota šumu

$$e_n = \frac{4,2\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}}{\sqrt{N}} = \frac{4,2\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}}{\sqrt{16}} = 1,05\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (15)$$

Prúdová hustota šumu

$$i_n = \sqrt{N} \cdot 1\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}} = \sqrt{16} \cdot 1\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}} = 4\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (16)$$

Vstupný prúd

$$I_B = N \cdot i_b = 16 \cdot 300\text{ pA} = 4,8\text{ nA} \quad (17)$$

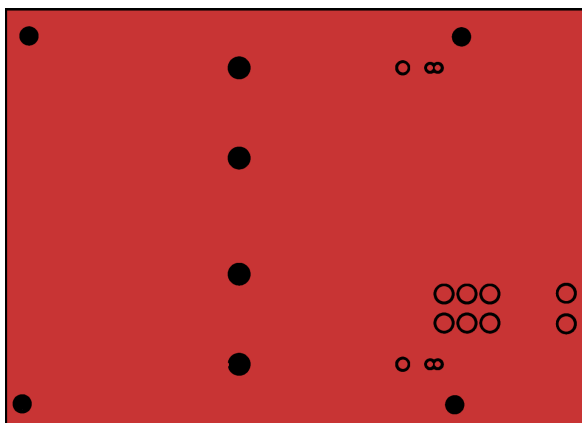
Napájanie operačných zosilňovačov zabezpečíme pomocou štyroch 1,5 V batérií tak, aby bolo napájacie napätie zosilňovačov $\pm 3\text{ V}$. Týmto spôsobom dosiahneme aj to, že zamedzíme vzniku väzby so sieťou a tým pádom zamedzíme ďalšiemu šumu.

Pri návrhu DPS sme použili 4-vrstvovú dosku, kde sú jednotlivé vrstvy usporiadané nasledovne:

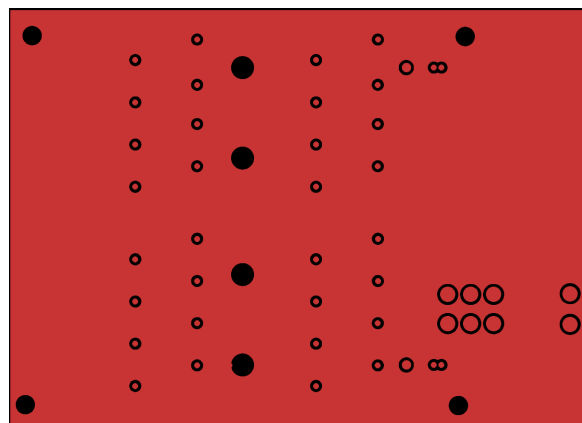
1. signál,
2. záporný pól napájacieho napätia ($-V_{\text{DC}}$),
3. kladný pól napájacieho napätia ($+V_{\text{DC}}$),
4. zem (GND).

Pri oživovaní zosilňovača sme zistili, že vrstvy $+V_{\text{DC}}$, $-V_{\text{DC}}$ a GND sú medzi sebou skratované. Pri diagnostike zariadenia sme prišli na to, že chyba nastala pri exportovaní gerber

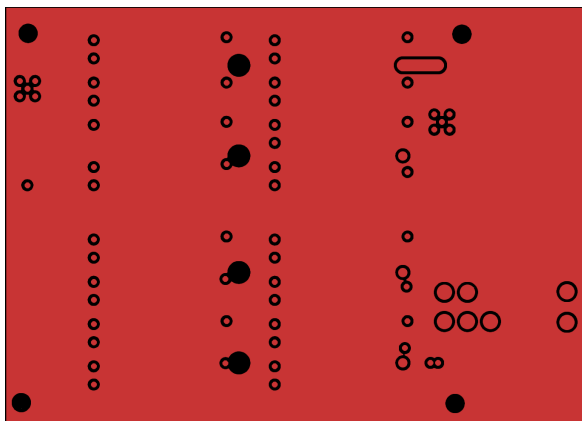
súborov, kedy sa na doske neaktualizovali vyplnené zóny jednotlivých vrstiev, a tak zostali spojené. Na obrázku 11 je zobrazený vyexportovaný gerber súbor, podľa ktorého bola doska plošných spojov vyrobená. V porovnaní s opravenou verziou na obrázku 12 je vidieť všetky miesta, na ktorých vznikli skraty medzi jednotlivými vrstvami dosky. Na odstránenie chyby sme museli v týchto miestach dosku navrátať tak, aby sme odstránili vodivé spojenie vrstiev $+V_{DC}$ a $-V_{DC}$ s vrstvou GND. Rovnako sme postupovali aj pri odstraňovaní vodivého spojenia medzi napäťovými vrstvami na obrázkoch 13 a 14.



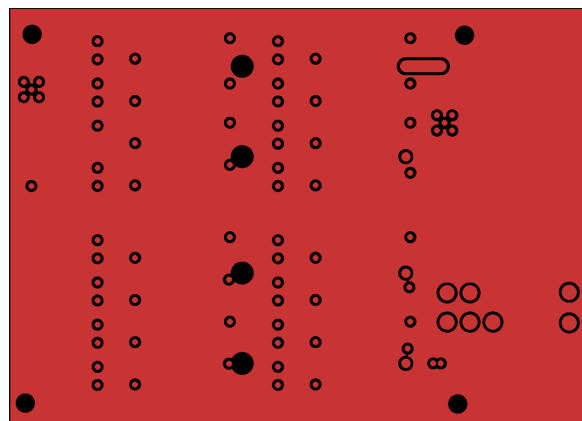
Obr. 11: Nesprávna GND vrstva.



Obr. 12: Oprava GND vrstvy.



Obr. 13: Nesprávna $+V_{DC}$ vrstva.

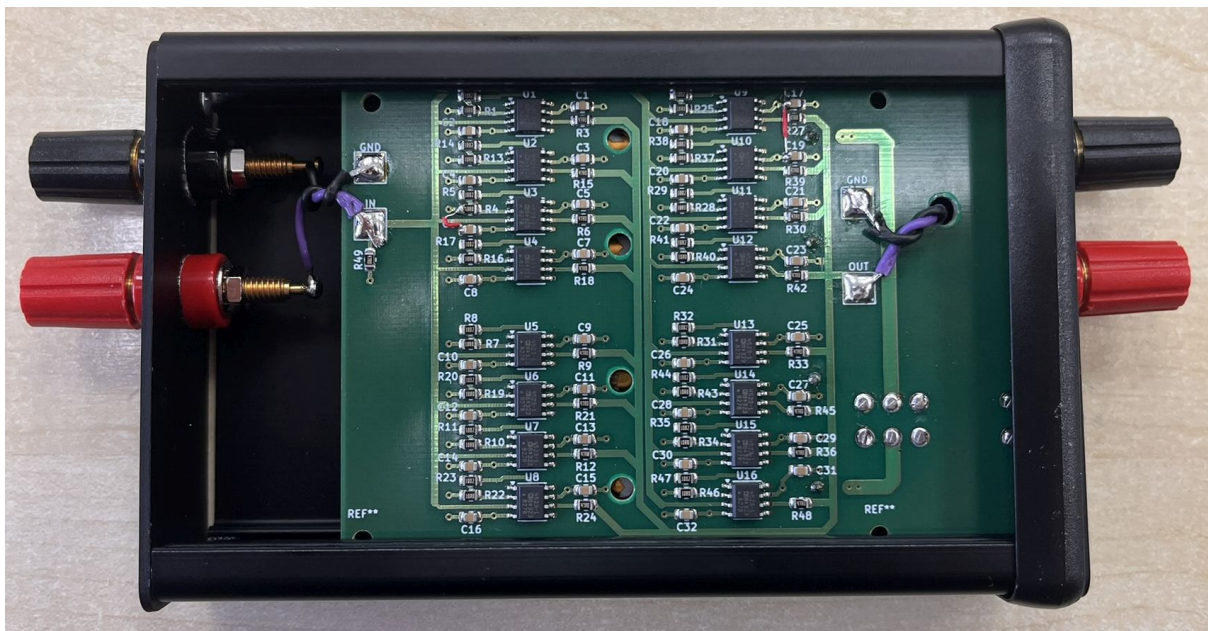


Obr. 14: Oprava $+V_{DC}$ vrstvy.

Na získanie zosilnenia o veľkosti 1000, sme použili $10\ \Omega$ a $10\ k\Omega$ rezistory. Okrem minimalizácie napäťového šumu musíme dbať aj na termoelektrické napätia v zapojení. Preto je dôležitý aj výber konektorov. Ako vstupné a výstupné konektory sme zvolili banánikové konektory POMONA 3770. Tieto konektory sú vhodné na použitie v meracích aplikáciách, pretože majú nízke termoelektrické napätie. Ich vodivé spojenie s DPS je zabezpečené prostredníctvom

skrútených vodičov.

Vzhľadom na meranie veľmi nízkych napätí je tento zosilňovač citlivý aj na zmeny spôsobené prúdením vzduchu. Preto sme zariadenie vložili do krabičky.



Obr. 15: Nízkošumový zosilňovač s OZ ADA4523-1.

2.2 Zoznam testovaných relé

Hlavnou požiadavkou pri návrhu prepínacej matice je minimalizácia teplotných gradientov. Výber spínačov je teda veľmi dôležitý faktor. Rozhodli sme sa odmerať hodnotu termoelektrického napätia pre rôzne spínače od rôznych výrobcov. Na základe výsledkov tohto porovnania následne zvolíme vhodné relé do našej prepínacej matice.

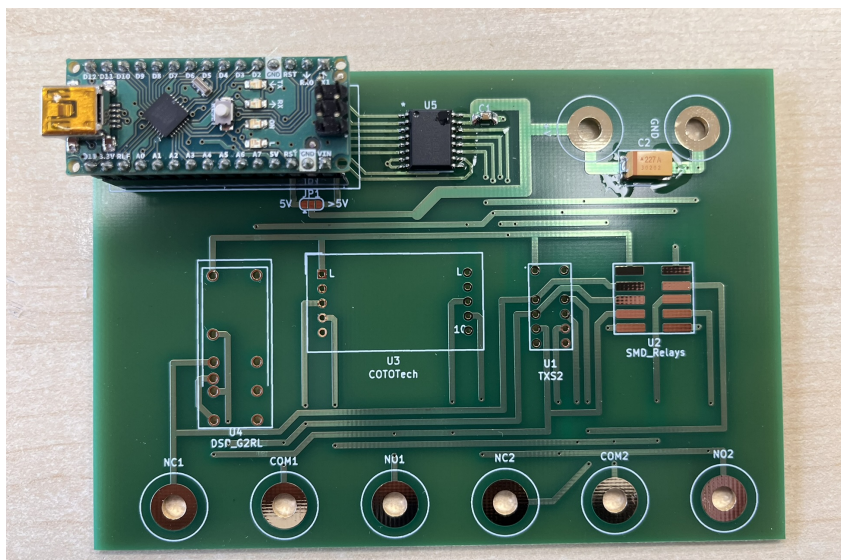
Pre experimentálne testovanie sme vybrali nasledovné relé:

Tabuľka 6: Zoznam testovaných relé.

Typ	Výrobca	Druh
3602-05-52	COTO Technologies	Jazyčkové relé Low thermal EMF
TXS2-4.5V	Panasonic Industrial Devices	Signálové relé astabilné
G6KU-2F-Y-TR	Omron Electronics	Malosignálové relé bistabilné
TQ2SA-L-5V-Z	Panasonic Industrial Devices	Malosignálové relé bistabilné
TXS2-L-4.5-1	Panasonic Industrial Devices	Malosignálové relé bistabilné

2.3 Metódy testovania vybraných relé

Aby sme nemuseli navrhovať niekoľko dosiek pre každé vybrané relé, vytvorili sme dosku s viacerými univerzálnymi footprintami, aby sme dokázali vykonať meranie na všetkých vybraných spínačoch. Na riadenie sme použili mikrokontrolér Arduino Nano spolu s Mosfet driverom TC4468.



Obr. 16: Testovací prípravok relé.

Po oživení zosilňovača a osadení dosky s mikrokontrolérom sme začali meranie na relé Coto Technologies 3602-05-52. Výstup zosilňovača sme pripojili na osciloskop. Napájacie napätie testovacej dosky sme zvolili 7 V. Priebeh napätia na osciloskope bol výrazne zašumený, preto sme pripojili kontakty relé (Common a Normaly Open) pomocou vodičov priamo ku vstupu zosilňovača a nepoužili sme dosku s mikrokontrolérom. Na spínanie relé sme použili taktiež vodiče, ktoré sme pripojili na testovací prípravok. Konce vodičov pripojených priamo na vstup zosilňovača sme nepocínovali, aby sme zamedzili vzniku ďalších teplotných gradientov. Taktiež sme používali rovnakú dĺžku vodičov, ktoré sme zatočili aby sme zamedzili vzniku rušenia. Keďže sme merali veľmi nízke napätia, pozorovali sme zmeny spôsobené aj prúdením vzduchu. Preto sme relé a zosilňovač prikryli servítkami. Takýto postup sme použili pri meraní všetkých relé.

Pri astabilných relé sme relé zopli na 5 sekúnd a následne na 5 sekúnd vypli. Pri bistabilných relé sme vykonávali dve merania pre dva rôzne prevádzkové stavy:

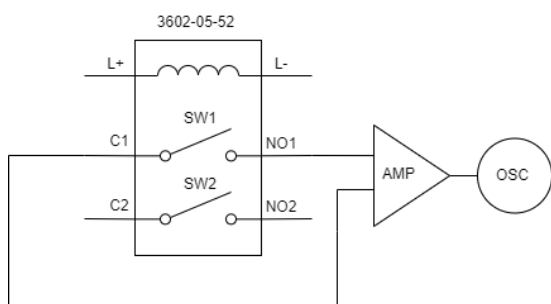
1. Impulz na zopnutie trval 5 sekúnd a následne bol odstránený na 1 ms. Potom prišiel krátky impulz na rozopnutie s dĺžkou 10 ms, za ktorým nasledoval 5 sekundový interval

na reset.

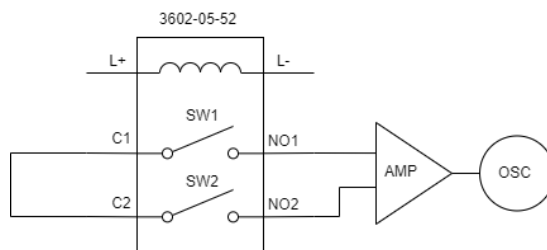
2. Impulz na zopnutie a rozopnutie relé s trvaním 10 ms, po ktorých nasledoval 5 sekundový interval (normálna prevádzka).

Pri podmienkach simulujúcich normálnu prevádzku sme vykonali experiment, kde sme zmenili zapojenie kontaktov jednotlivých relé. Pri pôvodnom zapojení vykonávame meranie napätia medzi kontaktmi Common a Normally Open. Keďže každé z vybraných relé obsahuje dva spínače, spojili sme oba kontakty Common medzi sebou a na vstupy zosilňovača priviedli kontakty Normally Open. Z časti 1.3.1 vieme, že hodnota termoelektrického napätia nemení smer pri zmene polarity. Ak teda zopneme relé, signál bude prechádzať cez oba spínače v jeho vnútri a vznikne termoelektrické napätie na oboch kontaktoch. V závislosti od vnútornej konštrukcie relé sa toto napätie môže sčítať alebo odčítat. Ak by sa napätie od seba odčítalo, dokázali by sme viac eliminovať vzniknuté termoelektrické napätie a dosiahnuť lepšie výsledky.

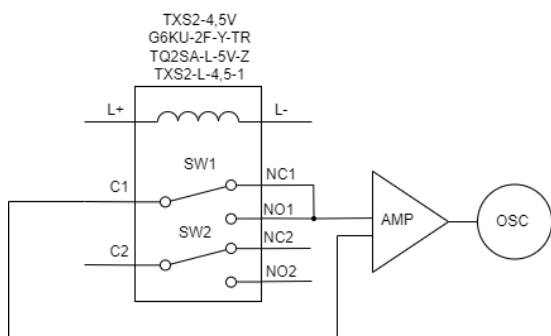
Zapojenia kontaktov jednotlivých relé boli nasledovné:



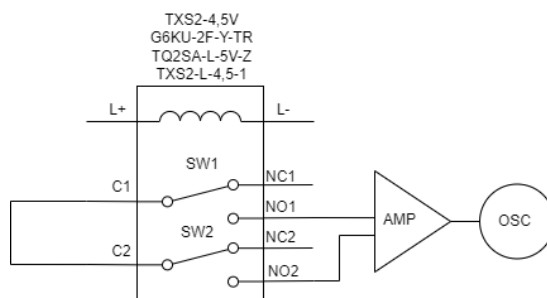
Obr. 17: Zapojenie 1 (Coto 3602-05-52).



Obr. 18: Zapojenie 2 (Coto 3602-05-52).



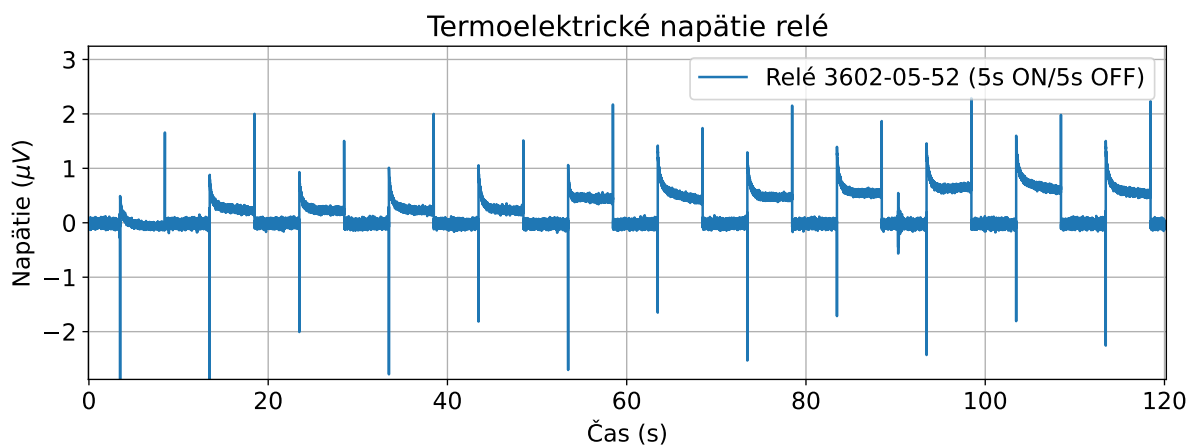
Obr. 19: Zapojenie 1 (Ostatné relé).



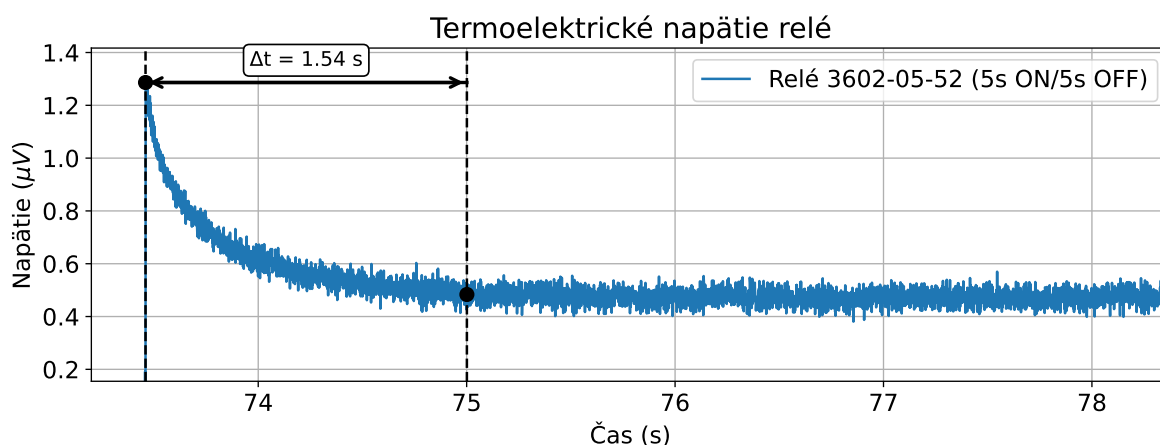
Obr. 20: Zapojenie 2 (Ostatné relé).

2.3.1 Výsledky merania pre astabilné relé

Coto Technologies 3602-05-52



Obr. 21: Relé Coto Technologies 3602-05-52 (Zapojenie 1).

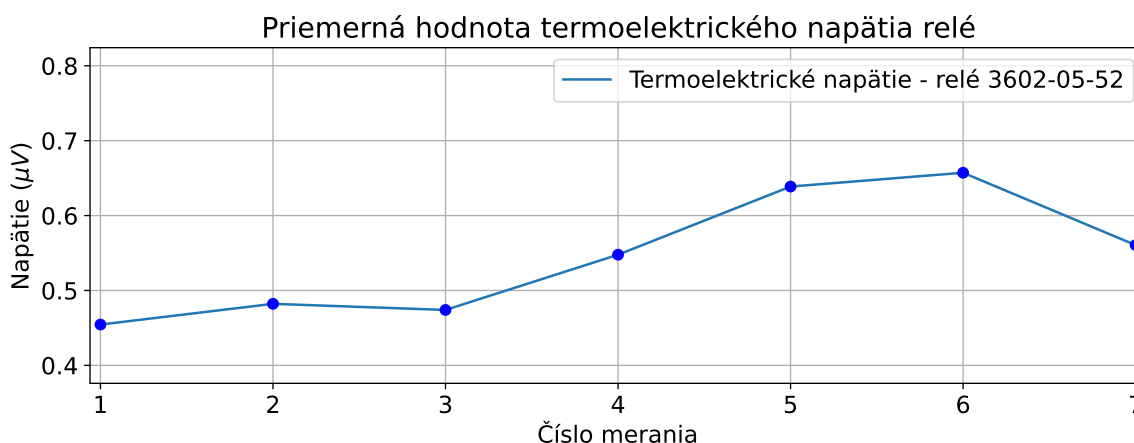


Obr. 22: Relé Coto Technologies 3602-05-52 – detail intervalu zopnutia s dobou ustálenia (Zapojenie 1).

Z nameraných údajov sme vybrali posledných 7 intervalov zopnutia relé. Tieto údaje sme následne spriemerovali (uvažovali hodnoty od ukončenia doby ustálenia). Pre obrázok 22 sme vybrali hodnoty z časového intervalu od 75 s po 78 s. Doba ustálenia napätia bola v tomto intervale $t_s = 1.54 \text{ s}$. Z priebehu na obrázku 21 vidíme, že v niektorých intervaloch napätie počas celej doby zopnutia relé klesalo alebo narastalo a neustálilo sa v okolí jednej hodnoty. Preto sme ako dobu ustálenia zvolili interval kedy došlo k výraznému poklesu napätia z jeho špičkovej hodnoty.

Tabuľka 7: Namerané údaje termoelektrického napätia (3602-05-52).

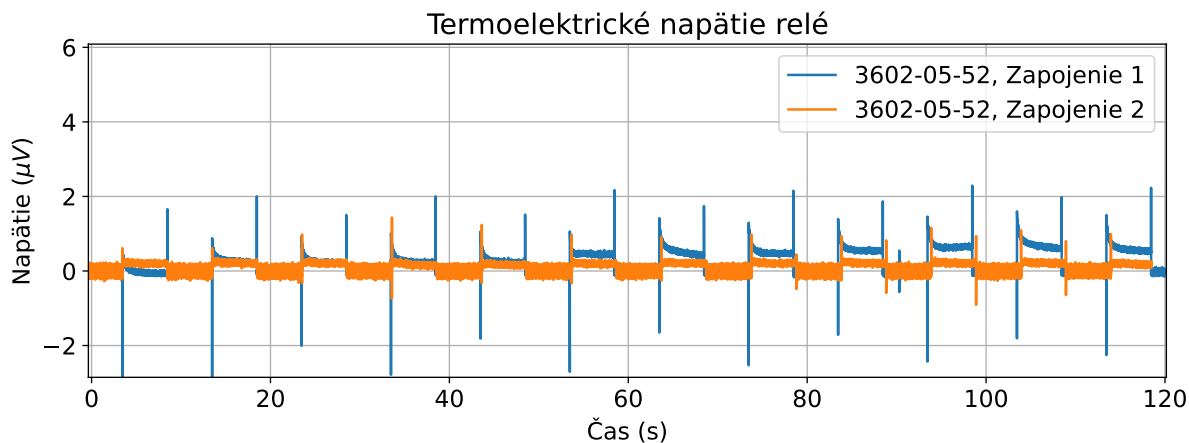
Meranie č.	Priemerná hodnota napätia (μV)	Doba ustálenia t_s (s)
1	0,454	0,72
2	0,482	1,54
3	0,474	1,54
4	0,548	1,55
5	0,639	1,55
6	0,657	1,55
7	0,561	1,55
Priemerná hodnota	0,545	1,43



Obr. 23: Priemerná hodnota termoelektrického napätia jednotlivých meraní (Coto 3602-05-52).

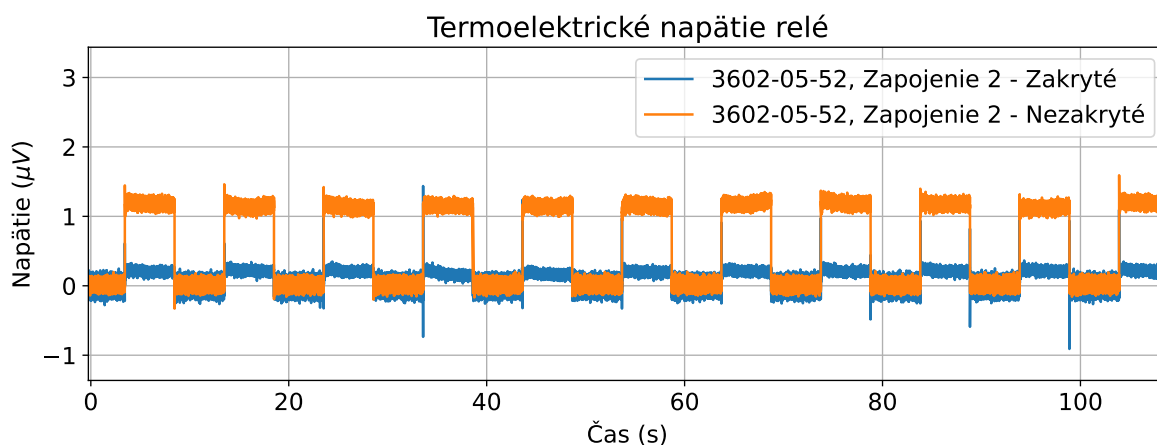
Výrobca udáva hodnotu termoelektrického napätia $< 0,5 \mu\text{V}$. Po prvých 50. sekundách vidíme, že hodnota termoelektrického napätia začala stúpať. Toto môže byť spôsobené zohrievaním relé, vplyvom privedeného napätia na ovládanie relé. V posledných siedmich intervaloch zopnutia bola priemerná nameraná hodnota $0,545 \mu\text{V}$. Hodnota sa však výrazne menila, rozdiel medzi minimálnou a maximálnou nameranou hodnotou bol až $0,203 \mu\text{V}$. Z niektorých intervalov zopnutia taktiež vidíme, že sa hodnota napätia neustálila a aj po uplynutí piatich sekúnd stále narastala alebo klesala. Výrobca taktiež udáva hodnotu dlhodobej stability termoelektrického napätia 50 nV . Namerané údaje by sa mali teda pohybovať v rozsahu od $0,45 \mu\text{V}$ po $0,55 \mu\text{V}$. Priemerná nameraná hodnota bola o 5 nV nižšia ako maximálna predpokladaná hodnota. Tento rozdiel mohol byť spôsobený pridanými teplotnými gradientami na kontaktoch materiálov alebo vonkajšími vplyvmi, ako napríklad prúdenie vzduchu, poprípade otrasy.

Následne sme zopakovali meranie pre zapojenie 2 (obrázok 18). Pri porovnaní nameraných údajov z oboch zapojení vidíme, že zapojenie 2 nám poskytuje výrazne stabilnejší priebeh. V intervaloch zopnutia sa hodnota napätia výrazne nemení počas celej doby prevádzky.



Obr. 24: Coto 3602-05-52 - Porovnanie oboch zapojení.

Na obrázku 25 možno vidieť citlivosť testovaného relé na vonkajšie vplyvy. Vykonali sme rovnaké meranie pre dva rôzne prípady. V prvom prípade sme relé a zosilňovač prikryli aby sme zabránili prúdeniu vzduchu. V druhom prípade sme relé a zosilňovač nechali odokryté. V oboch prípadoch je merané napätie stabilné v porovnaní so zapojením 1. Avšak po odokrytí relé sa hodnota napätia zväčšila mnohonásobne.



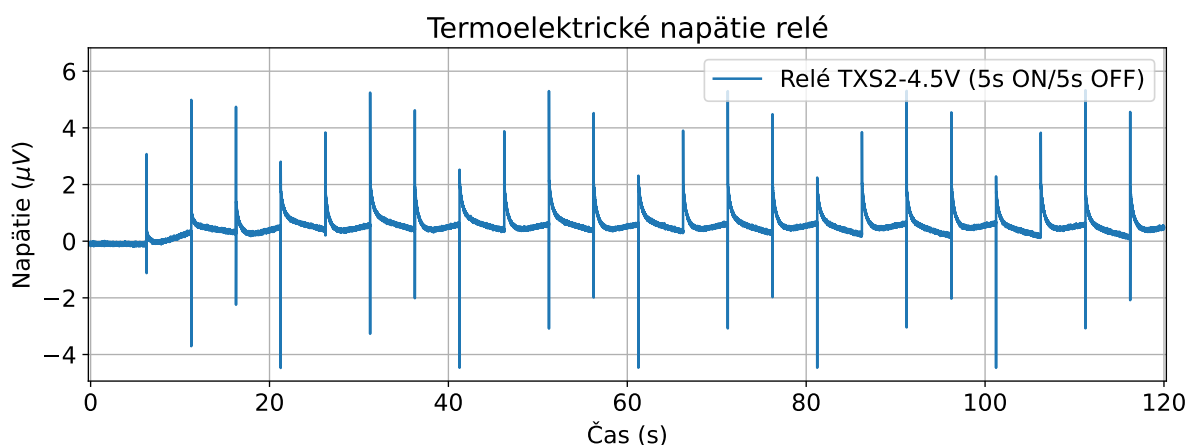
Obr. 25: Citlivosť na vonkajšie vplyvy (Coto 3602-05-52).

Tabuľka 8: Citlivosť na vonkajšie vplyvy (3602-05-52).

Meranie č.	Priemerná hodnota napätia (μV)	
	Zakryté	Nezakryté
1	0,214	1,185
2	0,218	1,144
3	0,213	1,138
4	0,171	1,149
5	0,171	1,149
6	0,197	1,151
7	0,209	1,189
8	0,212	1,192
9	0,212	1,181
10	0,213	1,126
11	0,214	1,193
Priemer	0,206	1,163

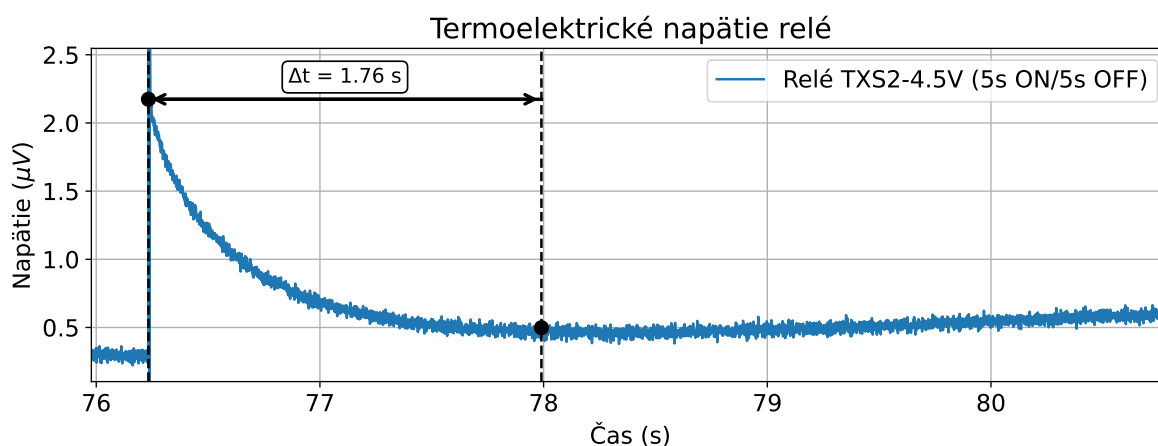
Zo získaných údajov pre relé Coto 3602-05-52 môžeme zhodnotiť, že najvýhodnejšie je relé použiť v zapojení 2, kedy využijeme oba spínače vo vnútri puzdra. Avšak, toto relé je výrazne náchylné na vonkajšie vplyvy, čo by mohlo mať nežiadúce účinky v presných meraniach. V prípade jeho použitia je veľmi dôležité dbať na jeho dobrú izoláciu.

Panasonic Industrial Devices TXS2-4,5V



Obr. 26: Relé Panasonic Industrial Devices TXS2-4,5V (Zapojenie 1).

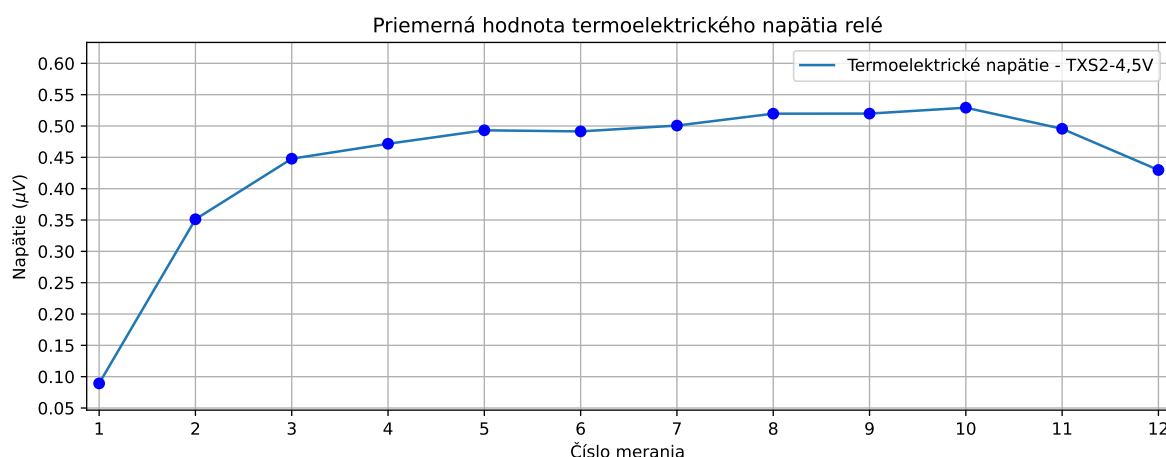
Pri tomto type relé vidíme, že celkové zohrievanie relé malo vplyv na merané napätie približne 40 sekúnd, po tomto čase už sa hodnota meraného napätia opakovala. Pri odstránení riadiaceho impulzu začne hodnota napätia klesať, avšak nedosiahne nulovú úroveň ani po 5 sekundovom intervale, pretože sa nestihne dostatočne ochladiť. Toto sme pri predchádzajúcom relé (Coto Technologies) nemohli pozorovať, pretože dané relé má len dva kontakty, a to Common a Normally Open (NO). Relé TXS2-4,5V je typu 2 form C, čo znamená, že po privedení riadiaceho impulzu sa vytvorí kontakt medzi Common a NO a po odstránení riadiaceho impulzu medzi Common a Normally Closed (NC). Pri meraniach sme kontakty NC a NO medzi sebou prepojili krátkym vodičom, a tak dokážeme pozorovať aj klesanie termoelektrického napätia po odstránení riadiaceho impulzu. Pri zopnutí relé vznikne skokové napätie, ktoré klesne a následne začne narastať počas celej doby zopnutia. Interval 5 sekúnd nebol dostatočne dlhý na ustálenie hodnoty termoelektrického napätia.



Obr. 27: Relé Panasonic Industrial Devices TXS2-4,5V – detail zopnutia relé s dobou ustálenia (Zapojenie 1).

Tabuľka 9: Namerané údaje termoelektrického napätia (TXS2-4,5).

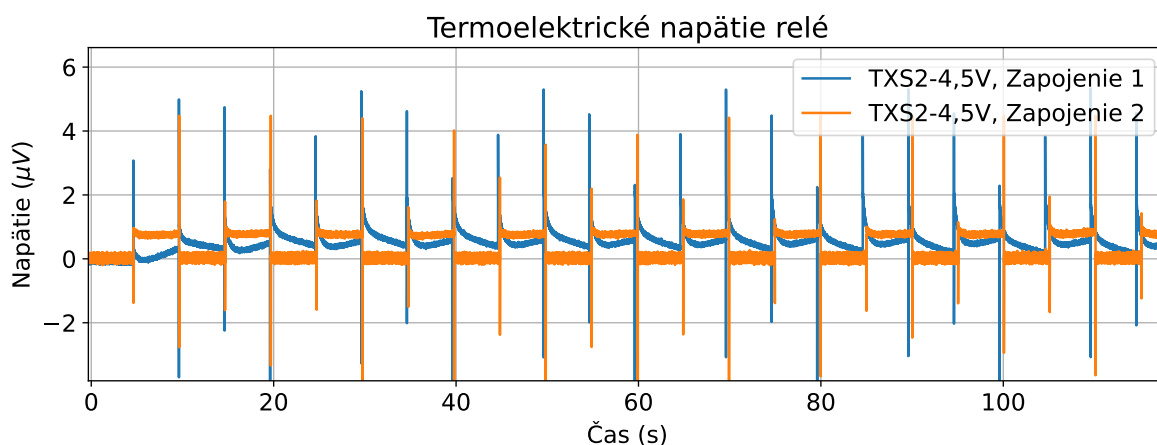
Meranie č.	Priemerná hodnota napätia (μV)	Doba ustálenia t_s (s)
1	0,089	0,75
2	0,351	1,74
3	0,448	1,75
4	0,472	1,76
5	0,493	1,77
6	0,491	1,76
7	0,501	1,77
8	0,520	1,76
9	0,520	1,77
10	0,530	1,77
11	0,496	1,77
12	0,430	1,77
Priemerná hodnota	0,446	1,67



Obr. 28: Priemerná hodnota termoelektrického napätia jednotlivých meraní (TXS2-4,5V).

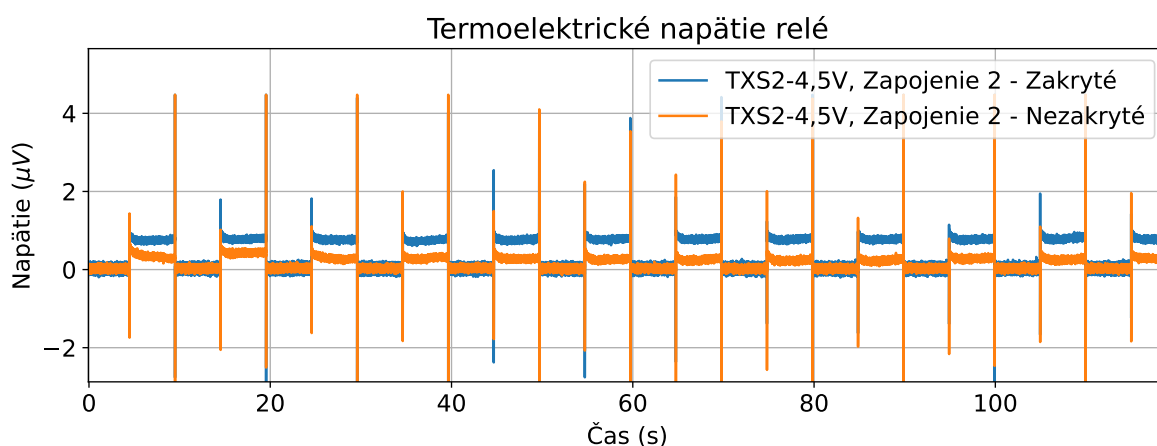
Z nameraných údajov vidíme, že hodnota napätia počas prvých štyroch zopnutí narastala vplyvom zohrievania relé. Následne sa ustálila okolo hodnoty $0,5 \mu\text{V}$. Celková priemerná hodnota termoelektrického napätia bola $0,446 \mu\text{V}$. Tento údaj je skreslený vplyvom prvých meraní kedy sa relé zahrievalo, preto do výpočtu priemernej hodnoty nebudeme uvažovať prvé štyri intervaly zopnutia. Potom je priemerná hodnota termoelektrického napätia relé TXS2-4,5 na úrovni $0,497 \mu\text{V}$. Rozdiel medzi maximálnou a minimálnou hodnotou termoelektrického napätia po ustálení je $0,1 \mu\text{V}$.

Pri porovnaní oboch zapojení pozorujeme rovnako ako pre predchádzajúcom relé výrazne stabilnejší priebeh. Doba ustálenia napätia je rádovo nižšia a generované napätie udržiava konštantnú hodnotu počas celého intervalu zopnutia.



Obr. 29: TXS2-4,5V - Porovnanie oboch zapojení.

Zaujímavý výsledok sme dosiahli pri porovnávaní zakrytého a nezakrytého obvodu. Zatiaľ čo pri relé Coto 3602-05-52 sa nám odizolovanie relé od vonkajších vplyvov osvedčilo a malo za následok zníženie celkového generovaného napätia. Pri relé TXS2-4,5V je výsledok opačný a zakrytý obvod spôsobil jeho zvýšenie. Jedna z možností, ktorá mohla spôsobiť tento jav je, že vplyvom dlhých riadiacich impulzov sa relé zohrialo a pri zakrytí obvodu toto teplo nemalo kam unikať. To mohlo vo výsledku spôsobiť zvýšenie meraného napätia. Presný dôvod tohto nárastu však nevieme určiť vzhľadom na vysokú citlivosť termoelektrických javov.

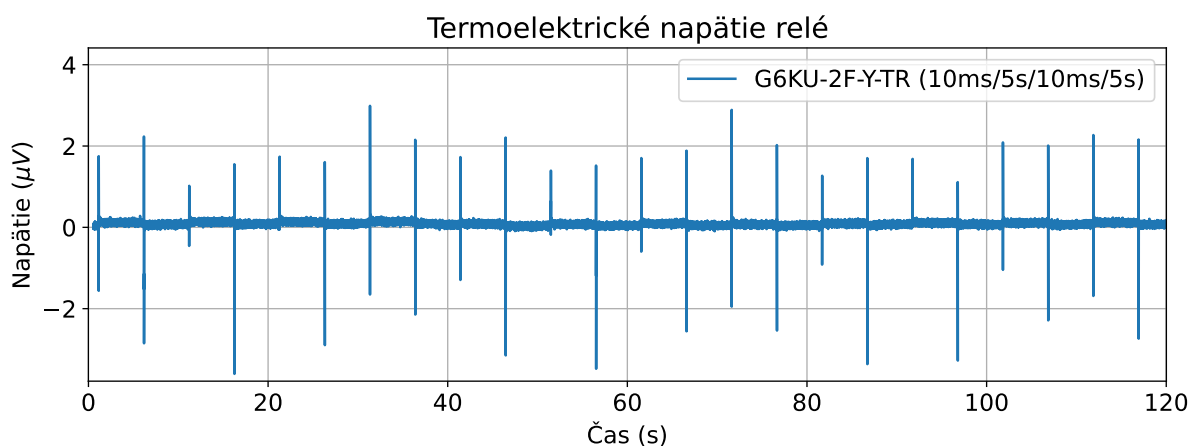


Obr. 30: Citlivosť na vonkajšie vplyvy (TXS2-4,5V).

Výsledky testovania relé TXS2-4,5V ukázali, že na dosiahnutie najlepších výsledkov je vhodné použiť zapojenie 2. Relé pri tomto zapojení poskytuje stabilnejší priebeh napätia s výrazne nižšou dobou ustálenia. V prípade použitia tohto typu relé vo vysoko presných meraniach je dôležité vykonať meranie termoelektrického napätia priamo v podmienkach, v akých bude relé pracovať. Takto predídeme skresleniu výsledkov, ktoré môže byť spôsobené vonkajším prostredím, ako je vidieť na obrázku 30.

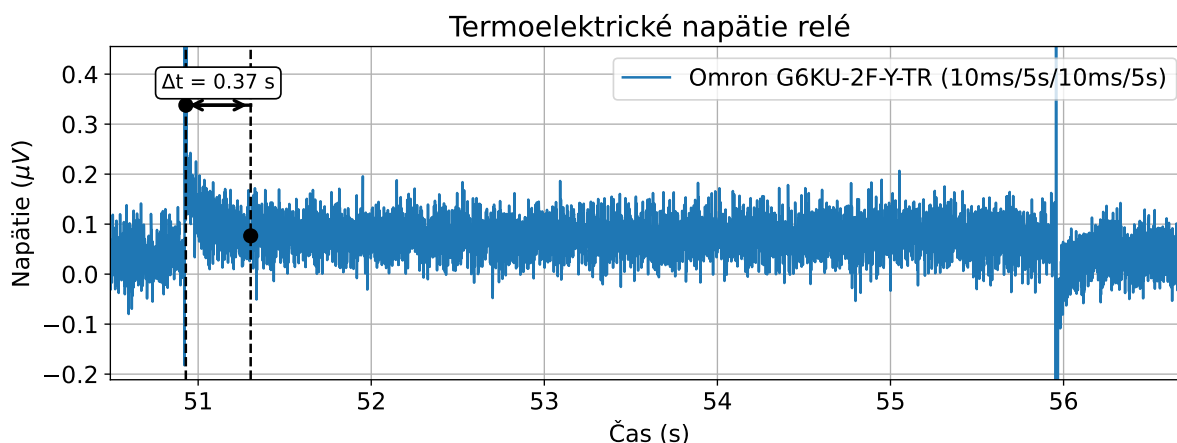
2.3.2 Výsledky merania pre bistabilné relé

Omron G6KU-2F-Y-TR DC5



Obr. 31: Relé Omron G6KU-2F-Y-TR DC5 (10ms/5s/10ms/5s) - Zapojenie 1.

Z nameraných údajov pri použití krátkych riadiacich impulzov (simulácia prevádzkového stavu) vidíme opakujúci sa priebeh už od začiatku prevádzky relé. Privedením 10 ms riadiaceho impulzu sa relé zopne. Hodnota napätia sa skokovo zvýši a po krátkom časovom intervale sa ustáli.



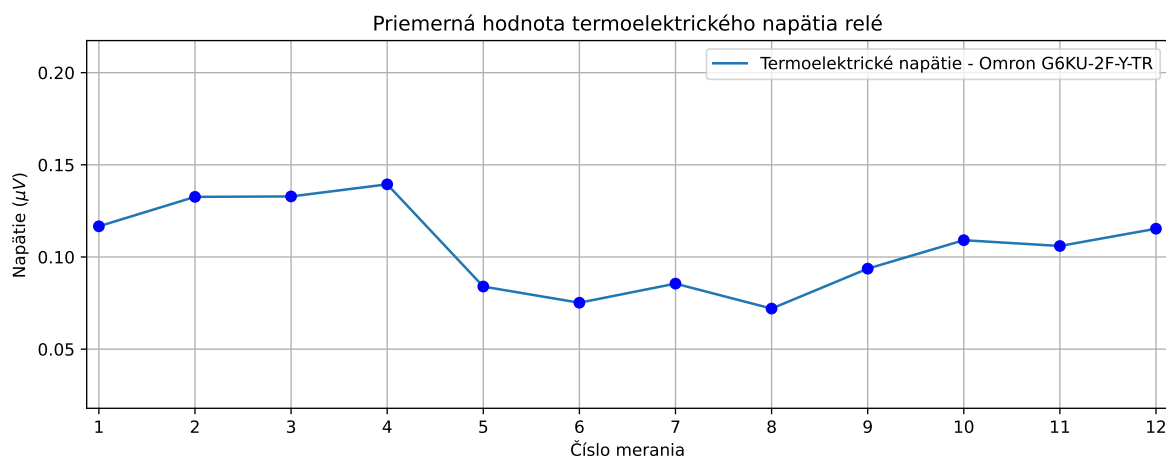
Obr. 32: Relé Omron G6KU-2F-Y-TR DC5 (10ms/5s/10ms/5s) – detail intervalu zopnutia s dobou ustálenia - Zapojenie 1.

Tabuľka 10: Namerané údaje termoelektrického napätia (G6KU-2F-Y-TR DC5).

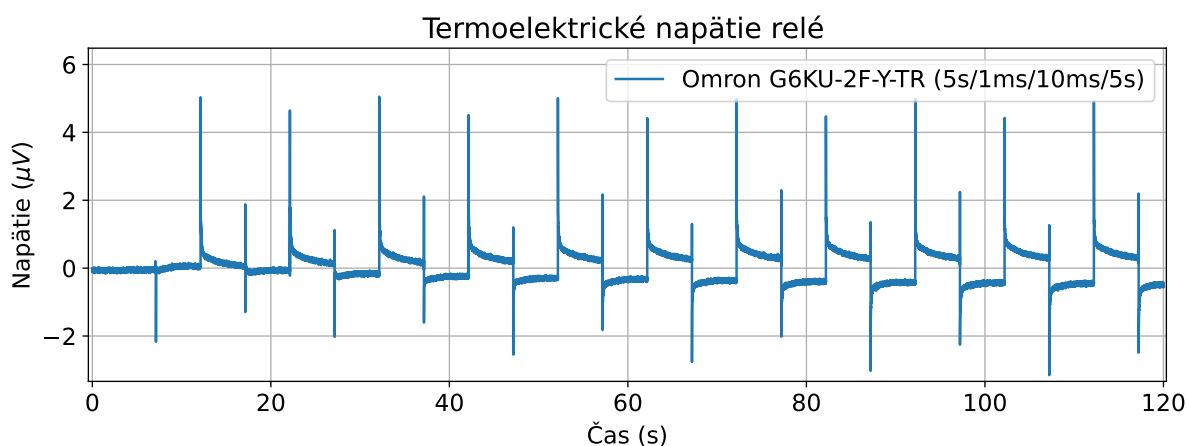
Meranie č.	Priemerná hodnota napätia (μV)
1	0,117
2	0,133
3	0,133
4	0,139
5	0,084
6	0,075
7	0,086
8	0,072
9	0,094
10	0,109
11	0,106
12	0,115
Priemerná hodnota termoelektrického napätia	0,105

Rozdiel medzi maximálnou a minimálnou nameranou hodnotou napätia je 0,067 μV. Z tohto údaja vidíme, že stabilita relé je lepšia ako pri relé TXS2-4,5 a taktiež celková hodnota termoelektrického napätia je výrazne nižšia. Takisto relé nie je ovplyvnené zahrievaním sa na začiatku prevádzky a doba ustálenia $t_s = 370$ ms je v porovnaní s klasickými relé výrazne

nižšia.

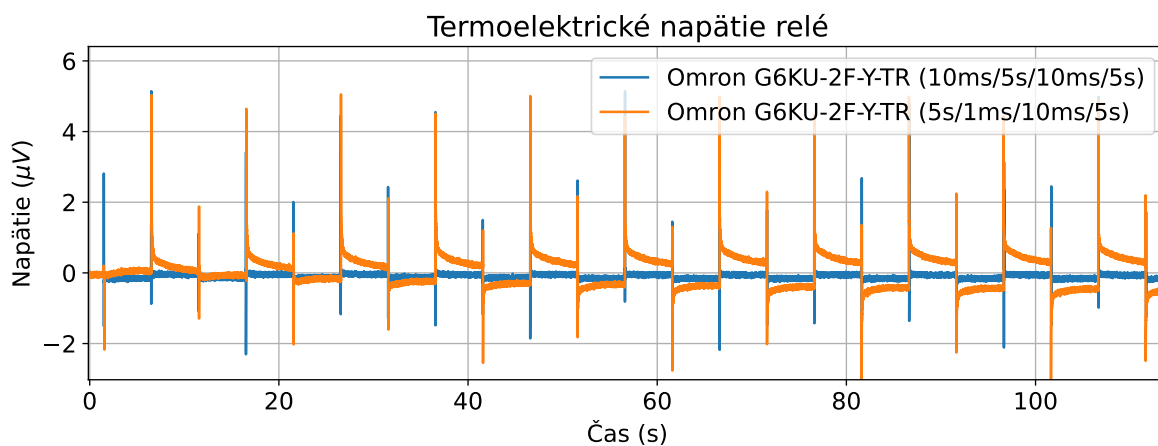


Obr. 33: Priemerná hodnota termoelektrického napätia jednotlivých meraní (G6KU-2F-Y-TR DC5).

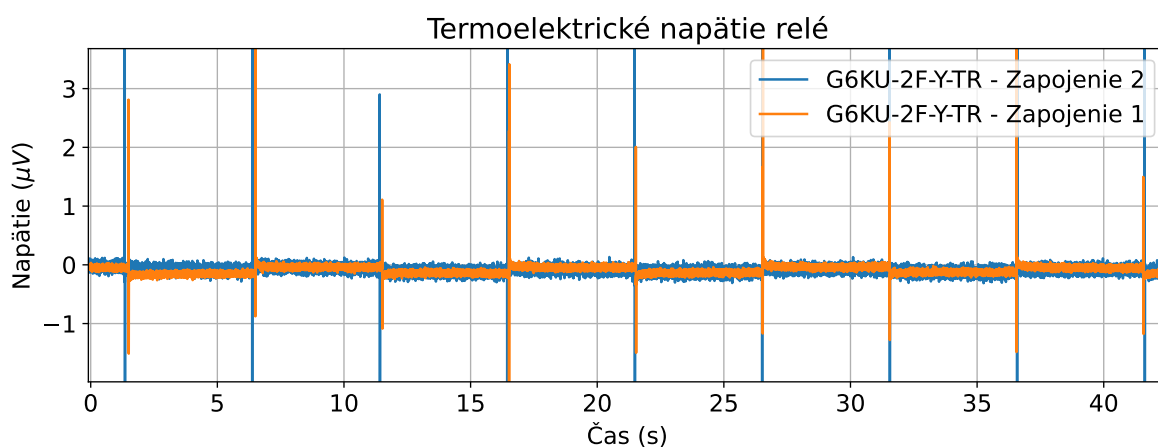


Obr. 34: Relé Omron G6KU-2F-Y-TR DC5 (5s/1ms/10ms/5s) - Zapojenie 1.

Privedenie dlhého riadiaceho impulzu spôsobilo, že hodnota napätia narastá vplyvom zahrievania celého relé. Pri porovnaní s prevádzkovým stavom, kde je impulz riadenia 10 ms, sa napätie začne s každým zopnutím relé zvyšovať. Pri poslednom odmeranom intervale je hodnota napätia pri nesprávnom spínaní vyššia až o 0,3 µV (obrázok 35).



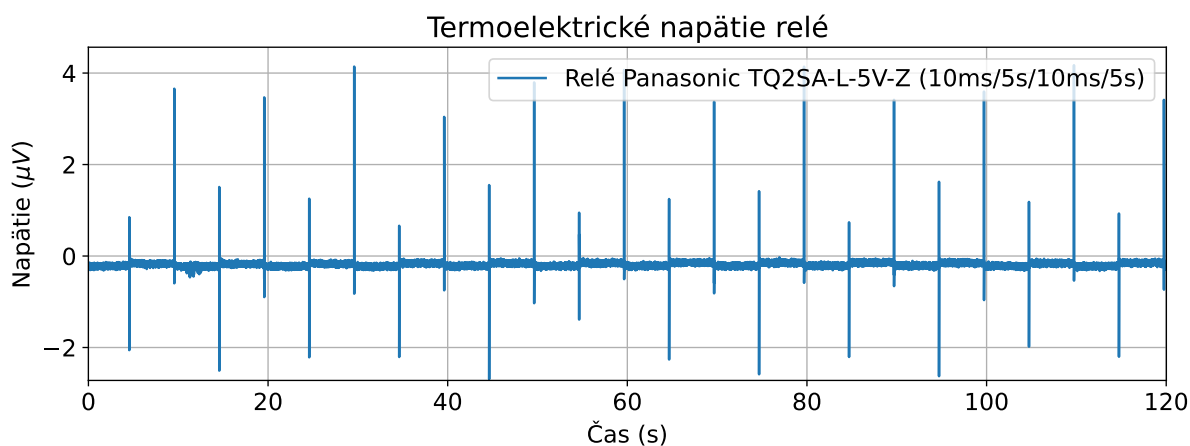
Obr. 35: Relé Omron G6KU-2F-Y-TR DC5 – porovnanie rôznych prevádzkových stavov - Zapojenie 1.



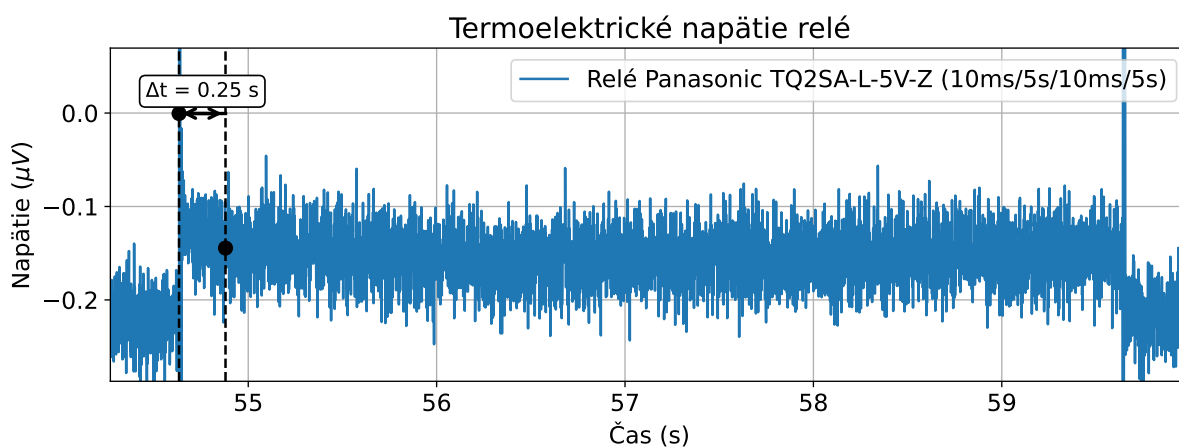
Obr. 36: Omron G6KU-2F-Y-TR DC5 – Porovnanie oboch zapojení.

Využitím oboch prepínačov vo vnútri relé sa hodnota termoelektrického napätia nezmenila. V prípade použitia tohto typu relé je dôležité dodržiavať správne dĺžky riadiacich intervalov.

Panasonic Industrial Devices TQ2SA-L-5V-Z



Obr. 37: Relé Panasonic Industrial Devices TQ2SA-L-5V-Z (10ms/5s/10ms/5s) - Zapojenie 1.

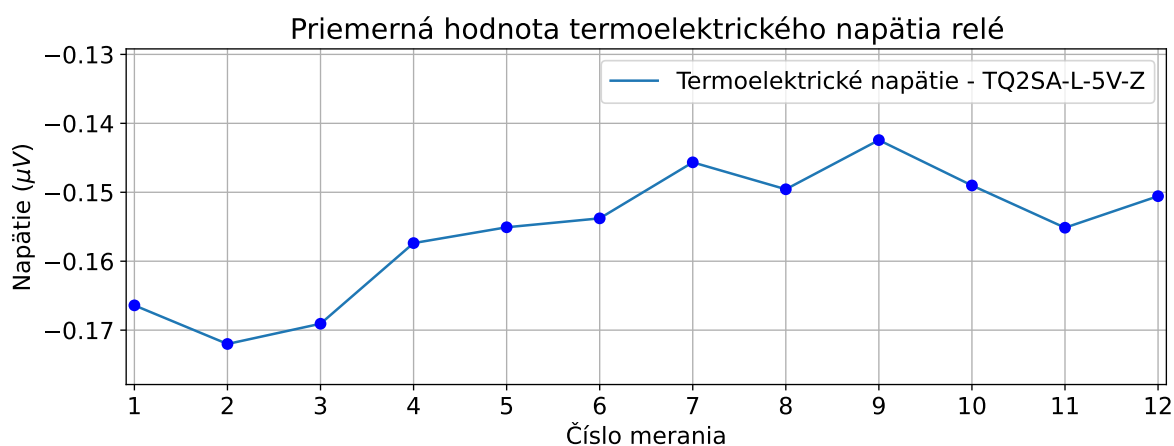


Obr. 38: Relé Panasonic Industrial Devices TQ2SA-L-5V-Z (10ms/5s/10ms/5s) – detail intervalu zopnutia s dobou ustálenia - Zapojenie 1.

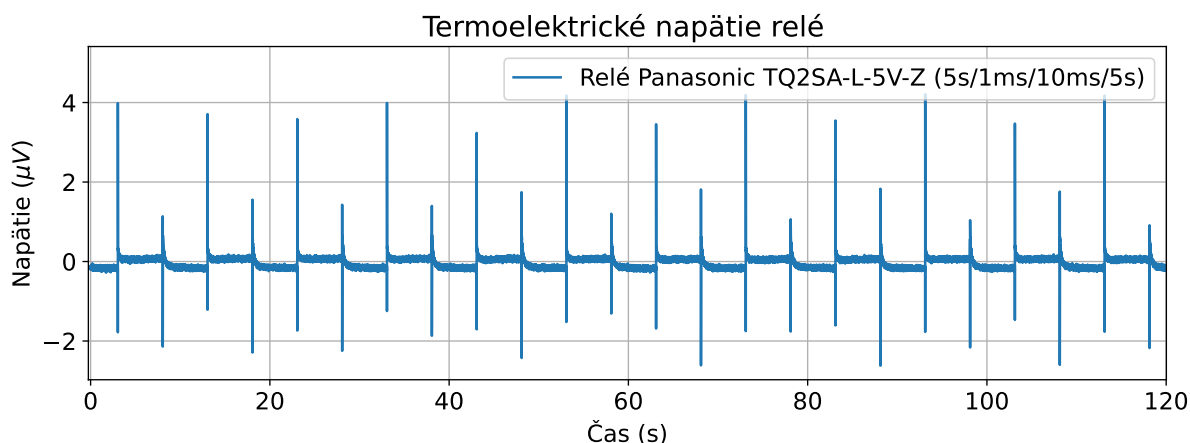
Tabuľka 11: Namerané údaje termoelektrického napätia (TQ2SA-L-5V-Z).

Meranie č.	Priemerná hodnota napätia (μV)
1	-0,166
2	-0,172
3	-0,169
4	-0,157
5	-0,155
6	-0,154
7	-0,146
8	-0,150
9	-0,142
10	-0,149
11	-0,155
12	-0,151
Priemerná hodnota termoelektrického napätia	-0,156

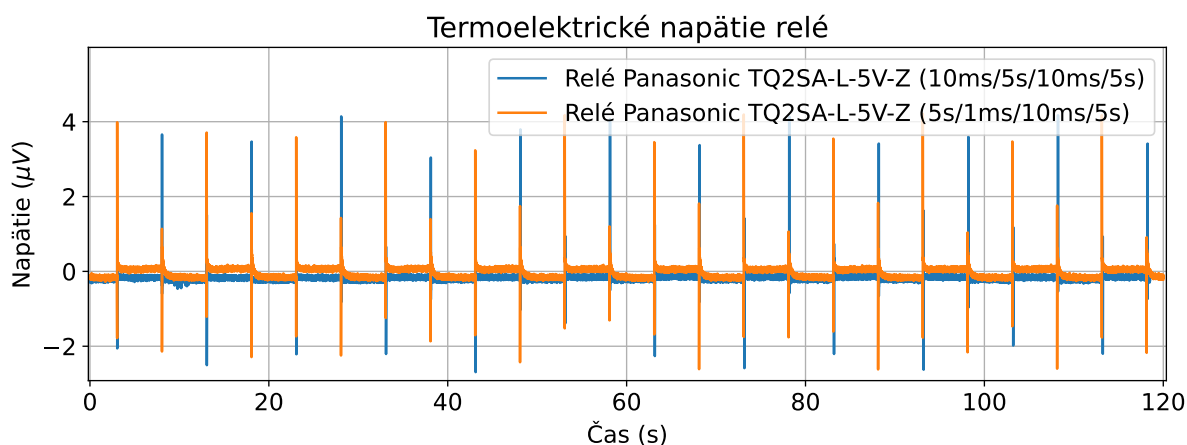
Rozdiel medzi maximálnou a minimálnou nameranou hodnotou napätia je $0,030 \mu\text{V}$. Termoelektrické napätie sa pohybuje na úrovni $-0,156 \mu\text{V}$ aj pri dlhodobej prevádzke. Stabilita tohto relé je takmer rovnaká ako pri relé Omron G6KU-2F-Y-TR DC5. Priemerná hodnota termoelektrického je vyššia o 51 nV . Pri tomto meraní taktiež nepozorujeme výrazné zmeny napätia spôsobené samotným zahrievaním relé na začiatku merania.



Obr. 39: Priemerná hodnota termoelektrického napätia pre jednotlivé merania (TQ2SA-L-5V-Z).

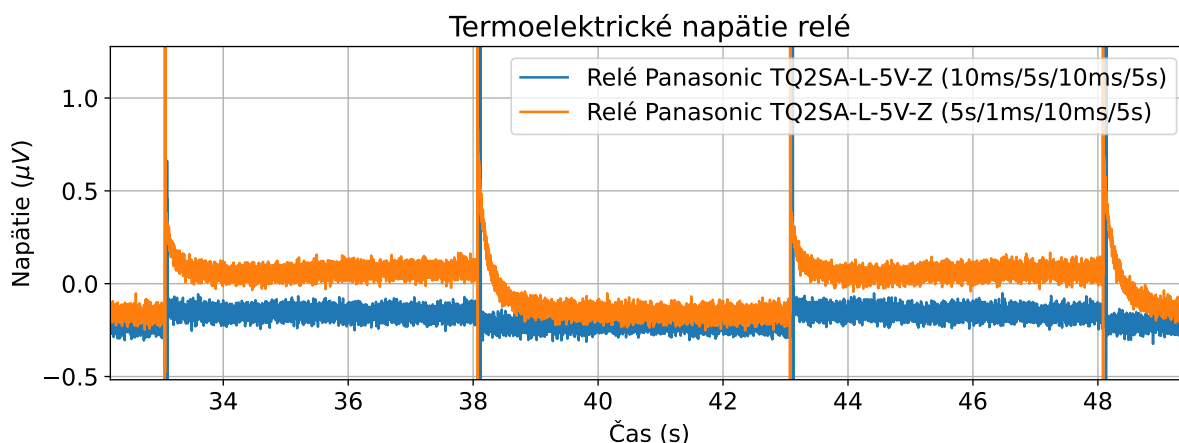


Obr. 40: Relé Panasonic Industrial Devices TQ2SA-L-5V-Z (5s/1ms/10ms/5s) - Zapojenie 1.

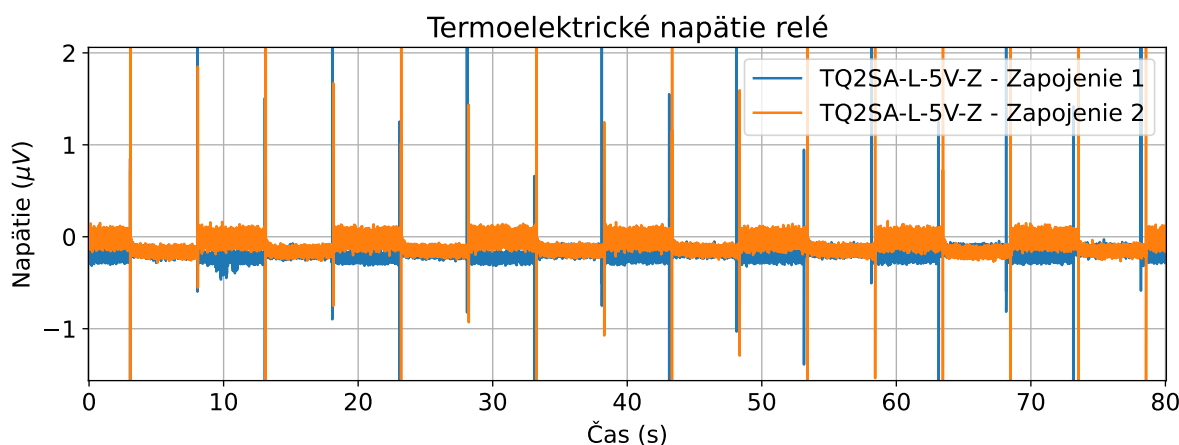


Obr. 41: Relé Panasonic Industrial Devices TQ2SA-L-5V-Z – porovnanie rôznych prevádzkových stavov - Zapojenie 1.

Počas porovnávania oboch prevádzkových stavov sme zistili, že privedenie dlhého riadiaceho impulzu malo za následok vylepšenie výslednej nameranej hodnoty. Pri použití správneho impulzu s trvaním 10 ms bola nameraná hodnota $-156 \mu\text{V}$, zatiaľ čo pri impulze s dĺžkou 5 sekúnd bolo termoelektrické napätie na úrovni približne $0,07 \mu\text{V}$. Použitím riadiacich impulzov výrazne prekračujúcich odporúčanú hodnotu sme dokázali znížiť výsledné termoelektrické napätie, avšak za cenu predĺženia doby ustálenia v porovnaní s korektnými spínacími časmi (obrázok 42).



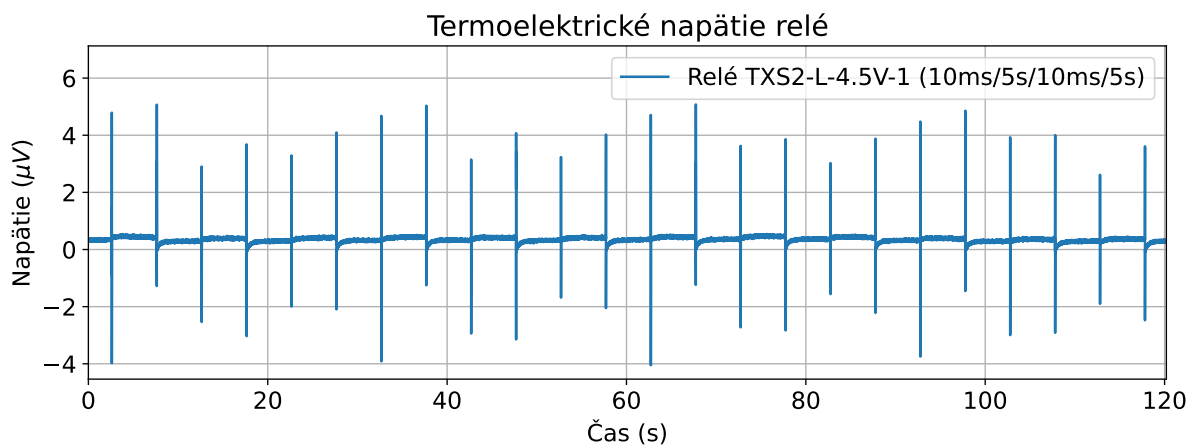
Obr. 42: TQ2SA-L-5V-Z – porovnanie rôznych prevádzkových stavov - detail.



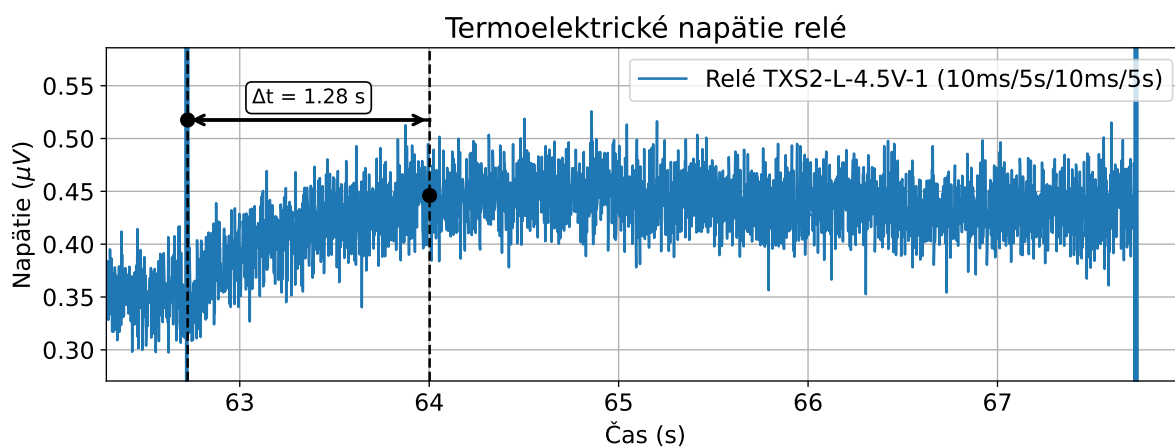
Obr. 43: TQ2SA-L-5V-Z – Porovnanie oboch zapojení.

Porovnaním oboch zapojení sme nezaznamenali žiadne výrazné rozdiely. Obe zapojenia poskytujú takmer totožné výsledné hodnoty termoelektrického napätia. Rovnako ako v prípade predchádzajúceho relé, výber zapojenia nemal vplyv na termoelektrické napätie. Z vykonaných experimentov vidíme, že relé dosiahlo najlepšie hodnoty z hľadiska termoelektrického napätia pri použití nekorektných dĺžok riadiacich impulzov, ktoré výrazne prekročovali odporúčané hodnoty. Nesprávne riadenie relé môže mať za následok zníženie spoľahlivosti meracieho systému. Z tohto dôvodu je dôležité dodržiavať hodnoty stanovené výrobcom, pri ktorých je výsledné napätie mierne vyššie, avšak je zaručená opakovateľnosť merania.

Panasonic Industrial Devices TXS2-L-4,5-1



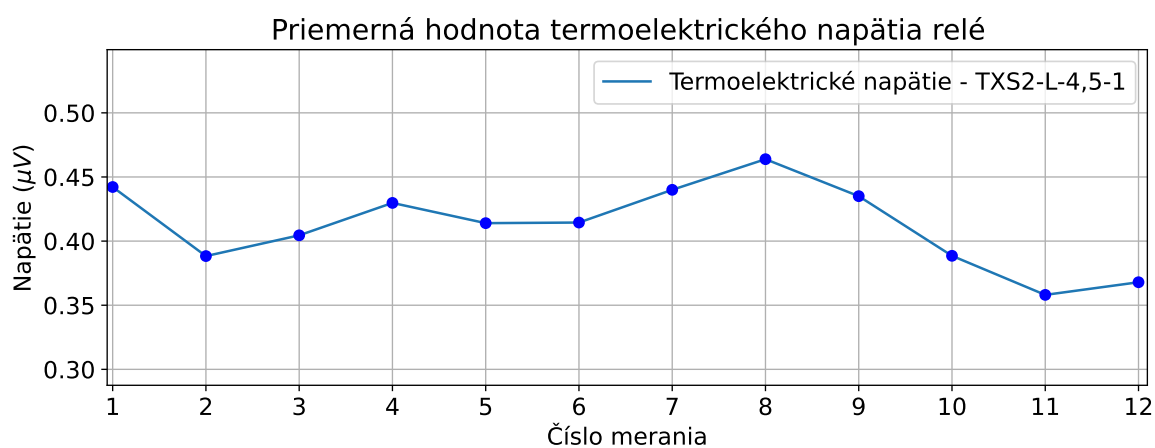
Obr. 44: Relé Panasonic Industrial Devices TXS2-L-4,5-1 (10ms/5s/10ms/5s) - Zapojenie 1.



Obr. 45: Relé Panasonic Industrial Devices TXS2-L-4,5-1 (10ms/5s/10ms/5s) – detail intervalu zopnutia s dobou ustálenia - Zapojenie 1.

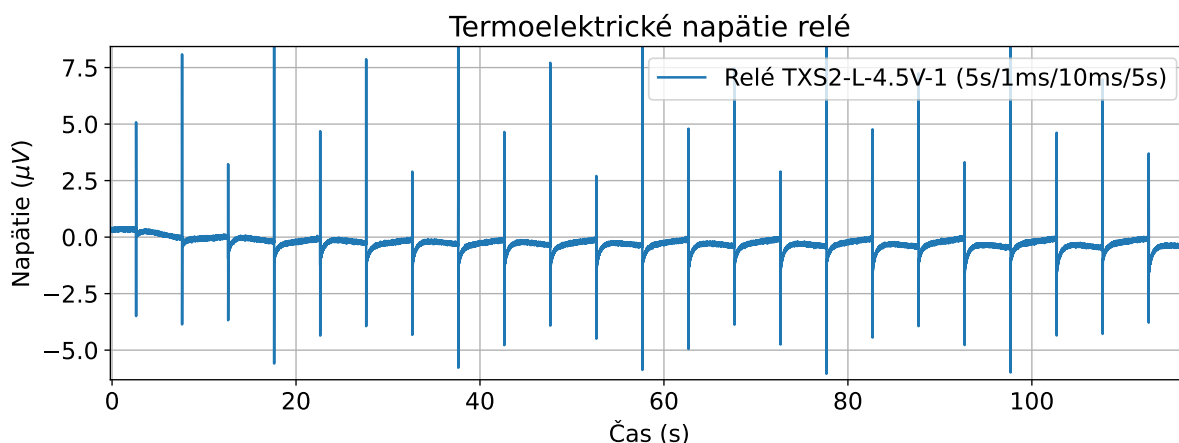
Tabuľka 12: Namerané údaje termoelektrického napätia (TXS2-L-4,5-1).

Meranie č.	Priemerná hodnota napätia (μV)
1	0,442
2	0,388
3	0,405
4	0,430
5	0,414
6	0,414
7	0,440
8	0,464
9	0,435
10	0,389
11	0,358
12	0,368
Priemerná hodnota termoelektrického napätia	0,412

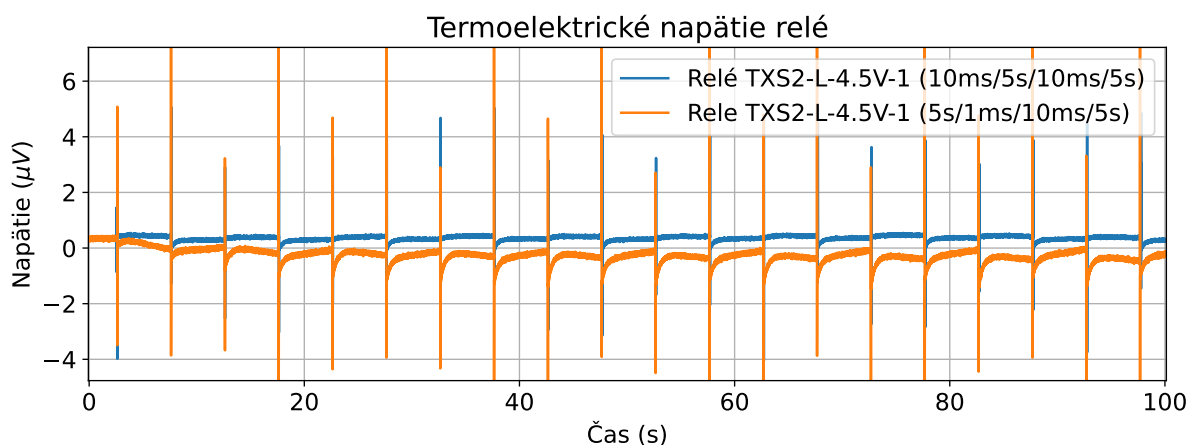


Obr. 46: Priemerná hodnota termoelektrického napätia pre jednotlivé merania (TXS2-L-4,5-1).

Rozdiel medzi maximálnou a minimálnou nameranou hodnotou napätia je $0,106 \mu\text{V}$. Termoelektrické napätie je priemerne $0,412 \mu\text{V}$.

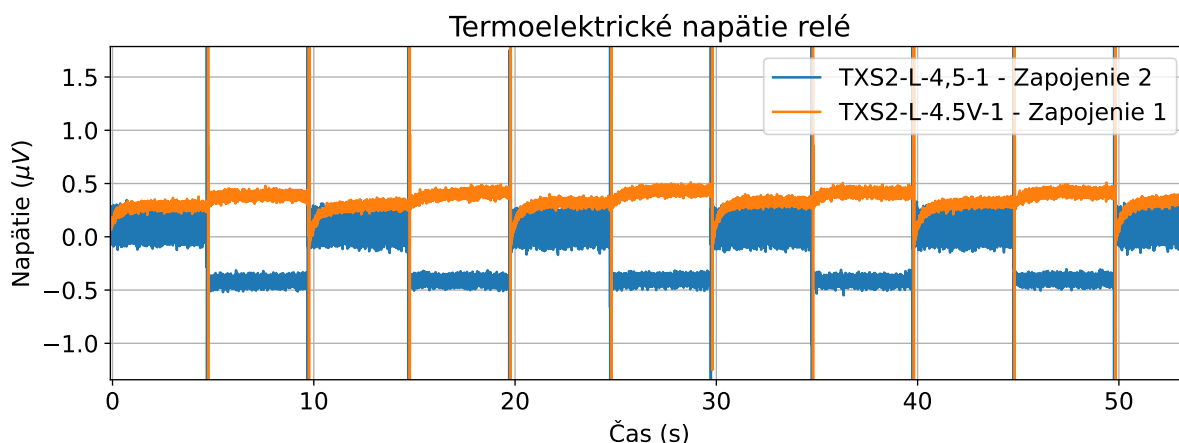


Obr. 47: Relé Panasonic Industrial Devices TXS2-L-4,5-1 (5s/1ms/10ms/5s) - Zapojenie 1.



Obr. 48: Relé Panasonic Industrial Devices TXS2-L-4,5-1 – porovnanie rôznych prevádzkových stavov - Zapojenie 1.

Vplyvom nesprávnej dĺžky riadiaceho impulzu opäť pozorujeme zvýšenie doby ustálenia relé pri prechodoch medzi jednotlivými stavmi. Na začiatku prevádzky hodnota napätia postupne narastá pri prvých troch intervaloch zopnutia z dôvodu zohrievania relé. Následne sa napätie ustáli a počas zvyšnej doby merania dosahujeme opakovateľné výsledky. Pri porovnaní oboch prevádzkových stavov vidíme, že správne dĺžky riadiacich impulzov vykazujú stabilnejší priebeh výstupného napätia. Rovnako vidíme, že interval zopnutia 5 sekúnd nebol dostatočne dlhý na ustálenie hodnoty napätia pri nesprávnom riadení relé.

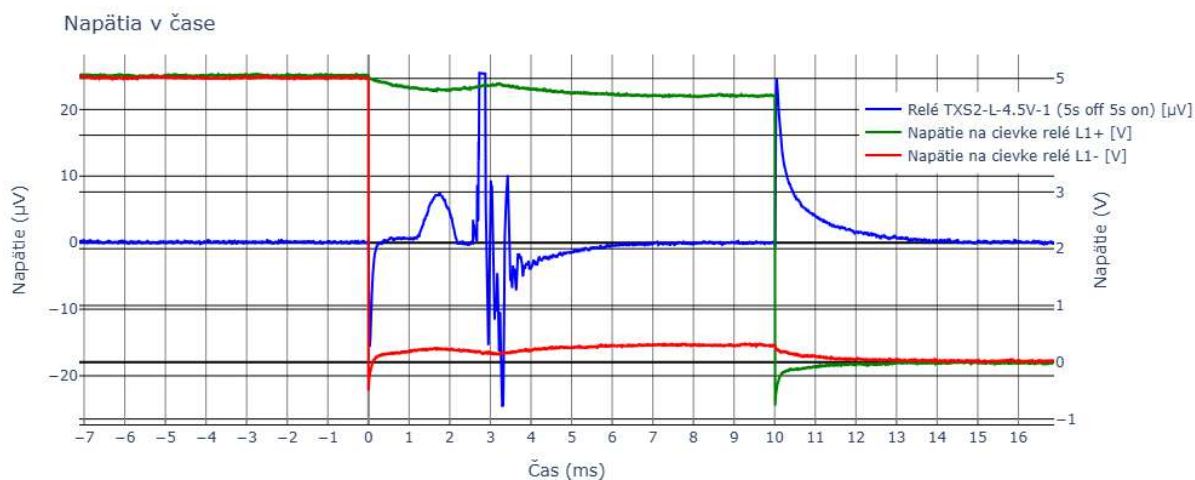


Obr. 49: TXS2-L-4,5-1 – Porovnanie oboch zapojení.

Po zmene zapojenia má výsledné napätie obrátenú polaritu. Jeho amplitúda však zostáva takmer rovnaká. Z priebehu na obrázku 49 vidíme, že využitím druhého zapojenia sa podarilo mierne znížiť dobu ustálenia. Pre dosiahnutie najlepších výsledkov je preto najlepšou voľbou použiť toto zapojenie.

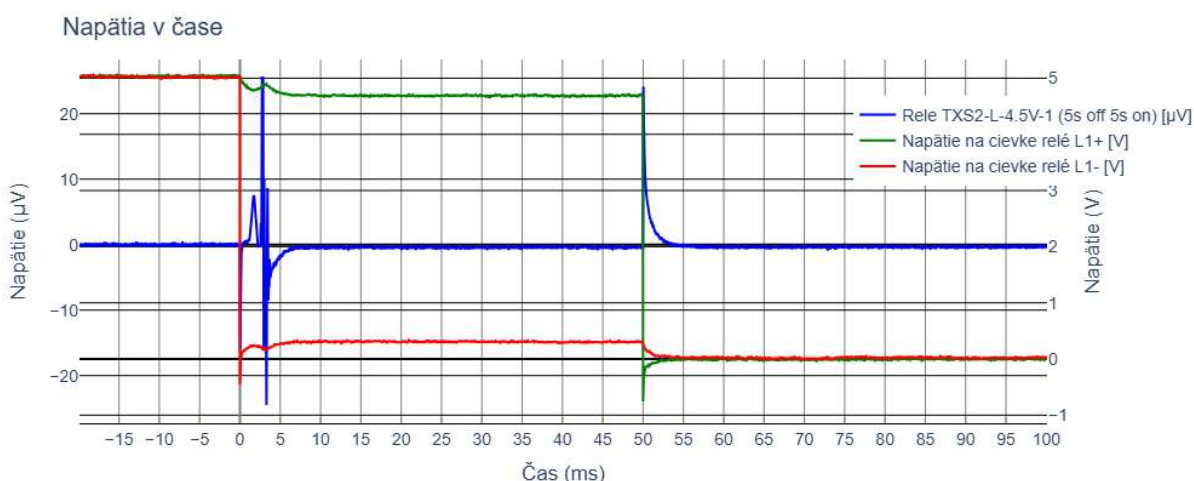
2.4 Dynamika prepínania

Pri meraní termoelektrického napätia na bistabilnom relé TXS2-L-4,5-1 sme sa bližšie pozreli aj na dynamiku prepínania, teda na okamih, kedy dochádza k zopnutiu relé. Na obrázku 50 sú znázornené riadiace napätia spolu s meraným termoelektrickým napätím v momente prechodu medzi stavmi RESET a SET.



Obr. 50: Dynamika prepínania.

Na začiatku priebehu je na oba kontakty cievky relé privedené napätie 5 V. V tomto okamihu je relé v rozopnutom stave a výstupné termoelektrické napätie je nulové. V čase 0 ms dochádza ku zmene stavu ponechaním napätia iba na jednom kontakte cievky (L1+), aby došlo ku zopnutiu kontaktov. Jedná sa o riadiaci impulz, ktorý má dĺžku 10 ms (prevádzkový stav). Po uplynutí doby 10 ms odstránime napätie z kontaktu L1+ a relé zostáva v zopnutom stave. Počas doby riadiaceho impulzu vidíme náhle oscilácie výstupného napätia relé, ktoré vznikajú pohybom kontaktov pri prechode z rozopnutého stavu do zopnutého. Po približne štyroch milisekundách dochádza k ustáleniu hodnoty termoelektrického napätia. Vidíme, že po zopnutí relé sa náhle generuje termoelektrické napätie, ktoré sa znižuje až do ukončenia doby riadiaceho impulzu. Po jeho odstránení vidíme podobnú odozvu, kedy náhle vznikne skokové napätie a následne postupne dochádza k jeho ustáleniu. Aj keď je prepínač plne zopnutý, ustálenie samotného signálu môže trvať aj niekoľko sekúnd.



Obr. 51: Dynamika prepínania.

Na obrázku 51 sme zmenili dĺžku riadiaceho impulzu z predchádzajúcich 10 ms na 50 ms. Vidíme, že aj keď sme priviedli impulz o dĺžke 5 násobne väčšej ako je odporúčaná, priebeh termoelektrického napätia sa oproti predchádzajúcemu prípadu nelíši. Z tohto priebehu by sme mohli tvrdiť, že aj pri viacnásobnom prekročení odporúčaného času impulzu, výstupné napätie nebude ovplyvnené. Avšak pri porovnaní merania prevádzkového stavu ($t_{pulse}=10$ ms) a merania s extrémnym prekročením doby impulzu ($t_{pulse}=5$ s) vidíme, že dĺžka impulzu mala vplyv na celkové merané termoelektrické napätie.

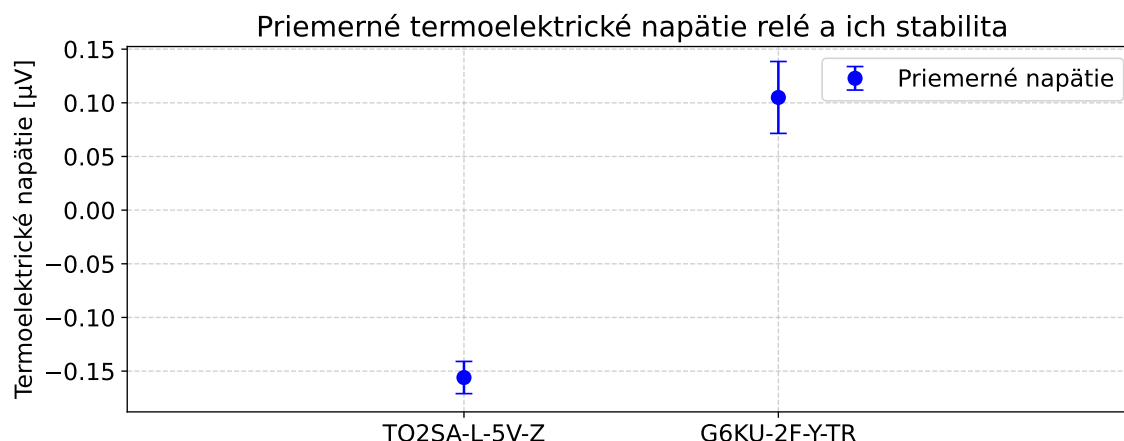
2.5 Výber relé

Hlavným kritériom pri návrhu zariadenia bola minimalizácia termoelektrického napätia, aby bola prepínacia matica vhodná pre použitie v presných meraniach. Voľba správneho prepínača je teda dôležitým faktorom, ktorý bude mať významný vplyv na výsledné merania. Po vykonaní meraní na všetkých vybraných relé, máme potrebné údaje na výber správneho prepínača z hľadiska veľkosti generovaného termoelektrického napätia na jeho kontaktoch. Dôležitým údajom je taktiež aj stabilita tohto napätia, t.j. rozdiel medzi maximálnou a minimálnou nameranou hodnotou. Porovnanie týchto údajov vidíme v tabuľke 13.

Tabuľka 13: Namerané údaje termoelektrického napätia pre vybrané relé.

Model	Priemerná hodnota termoelektrického napätia [μV]	Stabilita [μV]
3602-05-52	0,545	0,203
TXS2-4,5V	0,446	0,100
G6KU-2F-Y-TR	0,105	0,067
TQ2SA-L-5V-Z	-0,156	0,030
TXS2-L-4,5-1	0,412	0,106

Výsledky meraní ukázali, že najnižšiu priemernú hodnotu termoelektrického napätia vykazujú bistabilné relé, konkrétne typy G6KU-2F-Y-TR (ďalej len G6KU) a TQ2SA-L-5V-Z (ďalej len TQ2SA). Výhodou týchto dvoch relé v porovnaní s ďalšími testovanými je aj výrazne nižšia doba ustálenia napätia. Pri relé 3602-05-52 a oboch relé Panasonic rady TXS2 je doba ustálenia rádovo v sekundách, zatiaľ čo pri zvyšných dvoch relé je mnohonásobne nižšia. Preto v ďalšom výbere budeme uvažovať len typy G6KU a TQ2SA. Z tabuľky vyplýva, že najnižšiu hodnotu generovaného termoelektrického napätia má relé G6KU. Pokiaľ ide o stabilitu (rozdiel medzi maximálnou a minimálnou hodnotou meraného napätia), najlepšie sa ukázalo relé TQ2SA s hodnotou stability 0,030 μV .



Obr. 52: Priemerné termoelektrické napätie bistabilných relé s rozsahom, v ktorom sa pohybovali jednotlivé merané napätia.

Tabuľka 14: Maximálne a minimálne termoelektrické napätie pre vybrané relé.

Model	$U_{\min}$ [µV]	$U_{\max}$ [µV]
G6KU-2F-Y-TR	0,072	0,139
TQ2SA-L-5V-Z-1	-0,142	-0,172

Na obrázku 52 sú znázornené priemerné hodnoty meraného termoelektrického napätia spolu s vyznačeným intervalom stability, predstavujúcim rozsah nameraných hodnôt počas jednotlivých meraní. Pri porovnaní stability oboch relé možno pozorovať, že relé G6KU má dvojnásobne väčší rozptyl hodnôt v porovnaní s relé TQ2SA. Avšak po zohľadnení maximálnych a minimálnych hodnôt termoelektrického napätia uvedených v tabuľke 14 vidíme, že po porovnaní maximálnej hodnoty pre relé G6KU a minimálnej hodnoty pre relé TQ2SA dosahuje relé G6KU stále nižšiu hodnotu termoelektrického napätia. Keďže hlavnou požiadavkou pri návrhu prepínacej matice je minimalizovanie vplyvu termoelektrického napätia, relé G6KU predstavuje vhodnejšiu voľbu pre finálny návrh.

Tabuľka 15: Parametre relé Omron G6KU-2F-Y-TR 5VDC. [5]

Parameter	Hodnota
Menovitý prúd	21,1 mA
Odpor cievky	237 Ω
Odpor kontaktov	max. 100 m Ω
Maximálne spínacie napätie	125 VAC / 60 VDC
Maximálny spínací prúd	1 A
Čas zopnutia/rozopnutia	max. 3 ms
Min. šírka SET/RESET impulzu	10 ms
Izolačný odpor	1000 M Ω (pri 500 VDC)
Elektrická životnosť	min. 100 000 zopnutí (pri 1800 zopnutiach/hod)

3 Návrh prepínacej matice

Prepínacia matica s nízkym termoelektrickým napätím je zariadenie, ktoré je navrhnuté tak, aby sme dosiahli minimálne termoelektrické napätia na prechodoch rôznych kovov. Matica sa používa na presné merania napätia a odporu. Požiadavky pre našu prepínaciu maticu sú nasledovné:

- aspoň 4 vstupy pre etalóny napätia,
- aspoň 4 vstupy pre štvorvodičovo pripojené rezistory.

Pre meranie napätia na etalónoch budeme využívať dvojvodičové pripojenie. Je potrebné navrhnuť zapojenie tak, aby sme boli schopní etalóny prepólovať a vytvoriť pomocou spínačov kombinácie tak, aby sme dokázali merať rozdiely medzi jednotlivými etalónmi. Pomocou reverzácie polarít svoriek dokážeme nájsť termoelektrické napätie. Pre presné merania odporu budeme využívať štvorvodičové zapojenie. Ďalšou požiadavkou je navrhnuť maticu tak, aby bola rozšíriteľná (možnosť pripojiť viac ako 4 etalóny).

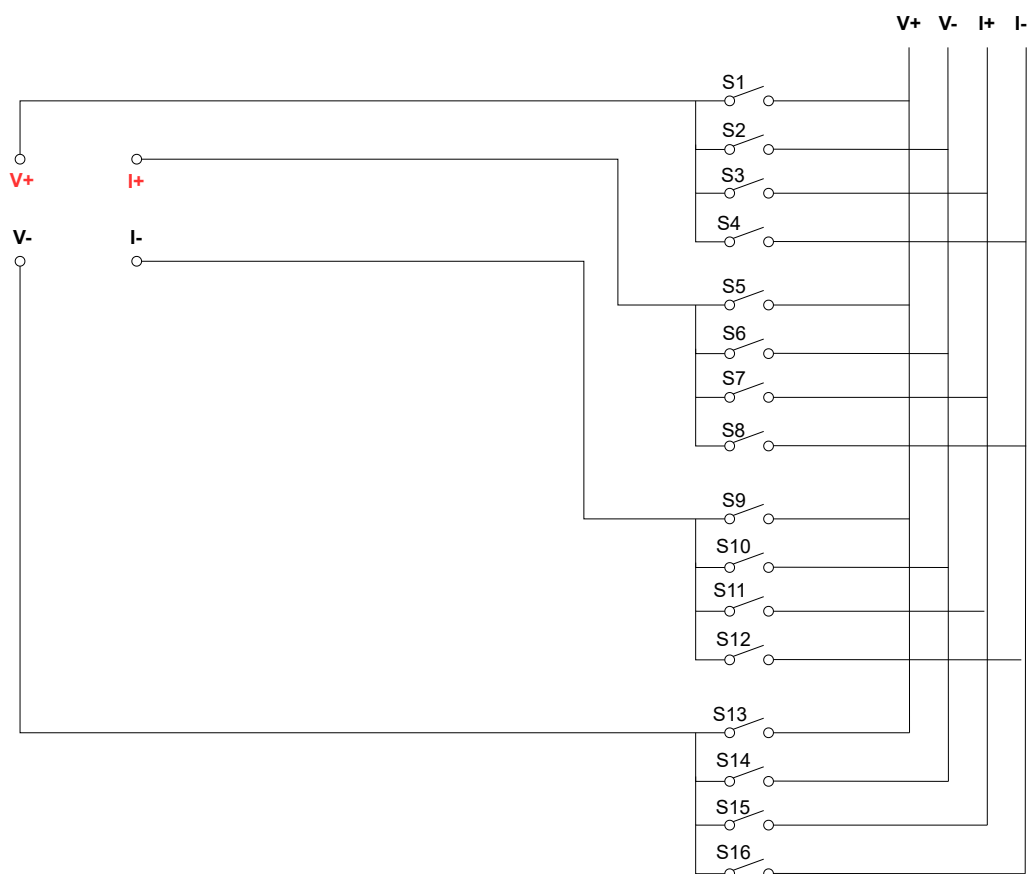
Rozhodli sme sa vytvoriť prepínaciu maticu, ktorá bude obsahovať 12 kanálov. Každý z týchto vstupných kanálov bude mať 2 napäťové vstupy a dva prúdové vstupy. Pomocou takejto konfigurácie budeme môcť ku matici pripojiť 12 rezistorov pre štvorvodičové meranie odporu. Pri meraní napätia dokážeme takýmto spôsobom využiť prúdové vstupy na pripojenie ďalších etalónov napätia, čo znamená, že celkový možný počet pripojených etalónov k zariadeniu bude 24.

3.1 Výber topológie

Pri návrhu schémy zapojenia spínačov je dôležité dbať na minimalizáciu počtu sériovo zapojených spínačov, aby sme zamedzili vzniku termoelektrického napätia, ktoré môže vzniknúť na každom spínači. Preto budeme spínače pripájať medzi sebou paralelne. Pomocou takéhoto zapojenia jednak zamedzíme ďalšiemu vzniku termoelektrického napätia a zároveň budeme môcť vytvoriť ľubovoľné kombinácie pre meranie (sériové, anti-sériové, dvojvodičové, štvorvodičové a pod.).

3.2 Zapojenie kanálov prepínacej matice

Vytvorili sme štyri nezávislé zbernice: $V+$, $V-$, $I+$ a $I-$. Pre porovnávanie etalónov napätia ich musíme prepojiť antisériovo. Práve pre toto prepojenie budeme využívať zbernice $I+$ a $I-$, ktoré sú určené aj pre štvorvodičové pripojenie rezistorov. V prípade porovnávacích meraní napätových etalónov môžeme zbernicu $V+$, $V-$ pripojiť na prvé svorky referenčného multimetra a $I+$ a $I-$ na druhé svorky referenčného multimetra. Multimeter potom môže priamo merať pomer napätia pripojených zdrojov. Na obrázku 53 je znázornené zapojenie prepínačov pre jeden kanál prepínacej matice.



Obr. 53: Zapojenie prepínačov pre jeden kanál prepínacej matice.

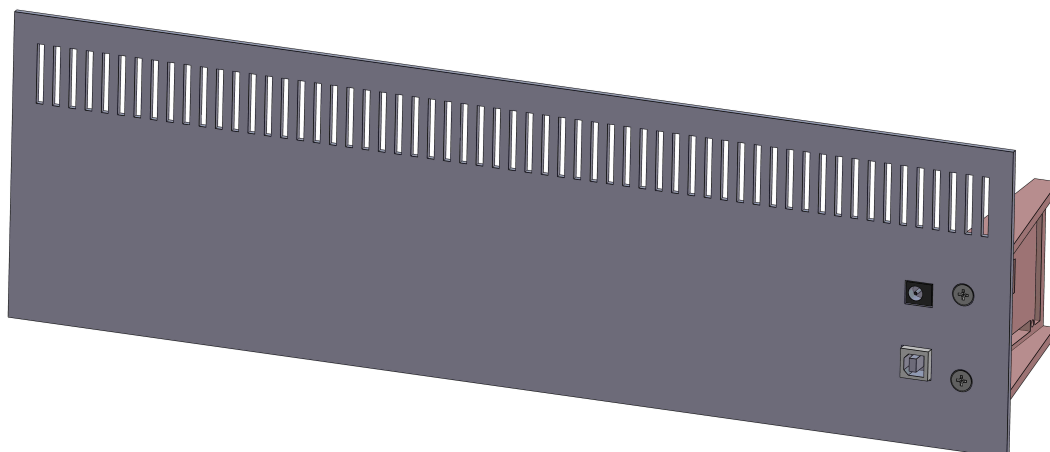
Príklad porovnávania dvoch napätových etalónov:

Prvý z etalónov pripojíme na vstupné napätové svorky matice a druhý na vstupné prúdové svorky. Pri porovnávaní chceme medzi sebou spojiť vstupy $V-$ a $I-$. To dosiahneme zopnutím spínačov $S11$ a $S15$. Využijeme tak práve zbernicu $I+$. Následne vstup $V+$ musíme pripojiť na

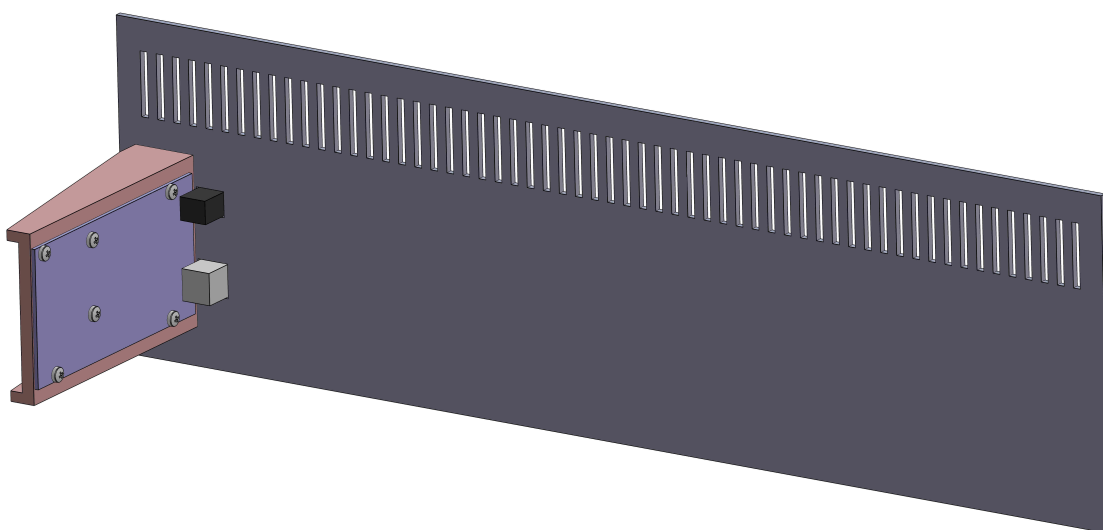
výstup matice V+ zopnutím spínača S1 a rovnako vstup I+ na výstup V- zopnutím spínača S6. Pri reverzácii polarity musíme medzi sebou vymeniť výstupy matice, preto rozopneme spínače S1 a S6 a zopneme S2 a S5. Takto bude vstup V+ privedený na výstup V- a vstup I+ na výstup V+.

3.3 Realizácia zariadenia

Pred samotným návrhom zariadenia je potrebné určiť presné požiadavky, na základe ktorých budeme postupovať. Aby sme minimalizovali tvorbu teplotných gradientov na ceste signálov, musíme zabezpečiť čo najmenší počet prechodov medzi rôznymi materiálmi. Keďže termoelektrické napätie použitého typu relé sme dokázali zmerať, potrebujeme zvoliť vhodné riešenie pre pripojenie vstupných konektorov zariadenia na dosku plošných spojov. Použitím káblov medzi konektormi a doskou by sme vytvorili ďalšie teplotné gradienty, ktorým sa chceme vyhnúť. Preto sme sa rozhodli zariadenie navrhnuť tak, aby sa všetky konektory pripevnili na dosku plošných spojov priamo. Týmto postupom minimalizujeme vznik ďalšieho termoelektrického napätia na ceste signálu. Aby sme mohli využiť takýto postup musíme navrhnuť dve dosky plošných spojov. Jedna doska bude obsahovať relé spolu s ich riadením a druhá bude slúžiť ako predný panel s LED indikáciou spustených vstupov matice. Pre priamy kontakt konektorov s doskou obsahujúcou relé, musia obe dosky plošných spojov do seba pasovať. Na ovládanie a napájanie celého zariadenia použijeme mikrokontrolér Arduino Mega 2560. Aby sme sa dokázali jednoducho pripájať k zariadeniu, navrhli sme a vytlačili držiak, ktorým sme Arduino nainštalovali na zadný panel zariadenia. Zariadenie je vbudované do štandardnej prístrojovej skrinky nVent-Schroff.



Obr. 54: Uchytenie Arduina na zadný panel zariadenia.



Obr. 55: Uchytenie Arduina na zadný panel zariadenia.

3.3.1 Relé panel

Zariadenie obsahuje 12 vstupných kanálov, ktoré dokážeme pripojiť na jeho výstup. Najefektívnejším riešením je navrhnutie jedného modulu (kanála) matice, ktorý následne naklonujeme. Na jeden modul pripadá 16 relé. Aby sme efektívne využili miesto na doske, využijeme obe strany dosky. Pre riadenie relé použijeme 8 bitové posuvné registre MC74HC595. Jeden regis-

ter vystačí na ovládanie štyroch relé, preto bude každý modul obsahovať štyri registre. Veľmi dôležitým krokom pri návrhu je zvoliť správne vstupné konektory. Pri výbere je rozhodujúcim faktorom materiál, z ktorého sú tieto konektory vyrobené. Rozhodli sme sa použiť konektory od spoločnosti Pomona Electronics, ktorá sa špecializuje na výrobu príslušenstva pre meracie prístroje. Na výber máme z troch rôznych typov banánikových konektorov:

1. Pomona 3750
2. Pomona 3760
3. Pomona 3770

Všetky z uvedených typov sú štandardné závitové svorky určené na montáž do panelov. Umožňujú pripojenie banánikových konektorov. Hlavný rozdiel medzi spomenutými modelmi je materiál kontaktu a jeho povrchová úprava.

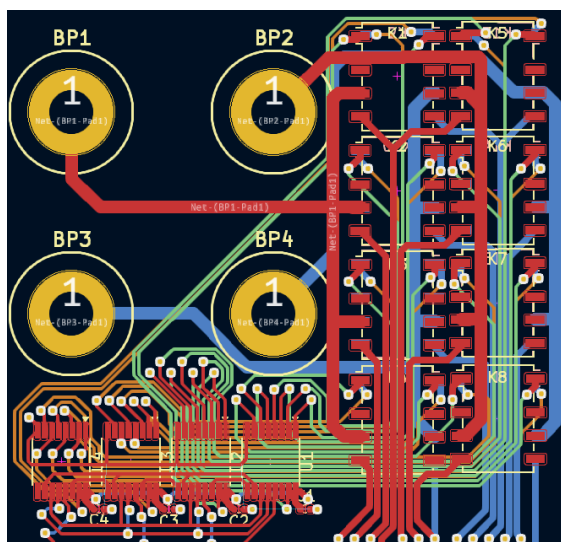
Tabuľka 16: Porovnanie modelov konektorov.

Model	Materiál kontaktu	Povrchová úprava	Maximálny prúd	Maximálne napätie
3750	Mosadz	Pozlátený	15 A	2500 Vrms
3760	Mosadz	Pocínovaný	15 A	2500 Vrms
3770	Telúrová meď	Pozlátený	15 A	2500 Vrms

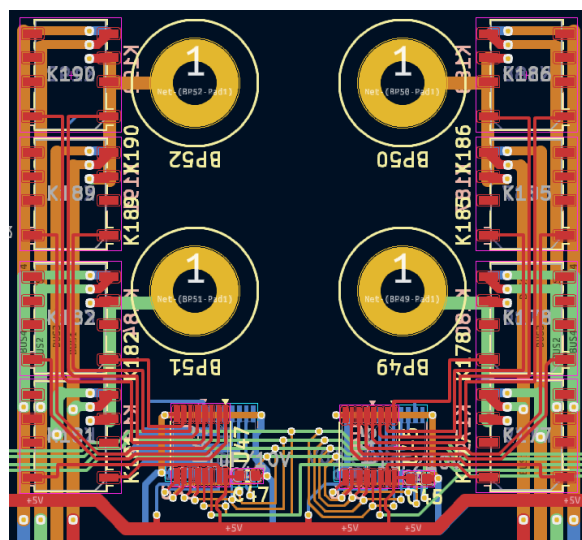
Za účelom dosiahnutia čo najnižšieho termoelektrického napätia použijeme model 3770. Tento model je vyrobený z telúrovej medi, ktorá má nižší termoelektrický efekt v porovnaní s mosadzou. Pozlátený povrch kontaktu navyše zabraňuje oxidácii.

Na obrázku 56 je prvý návrh modulu. V pôvodnom zapojení sme všetky relé umiestnili do dvoch radov vedľa vstupných konektorov. Zapojenie síce spĺňa funkčnosť, avšak dalo by sa zjednodušiť. Preto sme zmenili umiestnenie relé a zamenili poradie výstupov posuvných registrov. Takáto zmena poskytuje oproti pôvodnému zapojeniu viaceré výhody:

- prehľadnejšie a symetrické zapojenie,
- možnosť použiť širšie cesty pre hlavné signály,
- rovnaké dĺžky ciest pre vstupy $V+$, $I+$ a $V-$ a $I-$,



Obr. 56: Pôvodné zapojenie jedného modulu.



Obr. 57: Finálne zapojenie jedného modulu.

Finálny návrh modulu sme naklonovali, a tak získali 12 rovnakých zapojení pre každý kanál prepínacej matice. Moduly sme rozmiestnili do dvoch paralelných riadkov. Medzi oba riadky sme umiestnili hlavné signálové cesty (zbernice), ktoré sa pripájajú k jednotlivým výstupom matice. Každá z týchto zberníc je pripojená s konkrétnou skupinou relé všetkých modulov, aby sme dokázali zabezpečiť ľubovoľné prepínanie medzi vstupmi a výstupmi zariadenia. V blízkom okolí spínacích prvkov nie sú umiestnené žiadne aktívne súčiastky, tým pádom sa v ich okolí neuvolňuje teplo, ktoré by mohlo mať vplyv na výsledky merania. Každý z modulov však obsahuje 4 posuvné registre, ktoré počas svojej prevádzky generujú určité teplo. Použili sme registre MC74HC595A v puzdre TSSOP-16. Z dátového listu tohto komponentu vieme zistiť množstvo uvoľňovaného tepla.

Tepelný odpor

$$\theta_{JA} = 159 \text{ }^{\circ}\text{C/W} \quad (18)$$

Napájacie napätie

$$V_{CC} = 5 \text{ V} \quad (19)$$

Kľudový prúd pre teplotu $T \leq 85^{\circ}\text{C}$

$$I_{CC} = 40 \text{ }\mu\text{A} \quad (20)$$

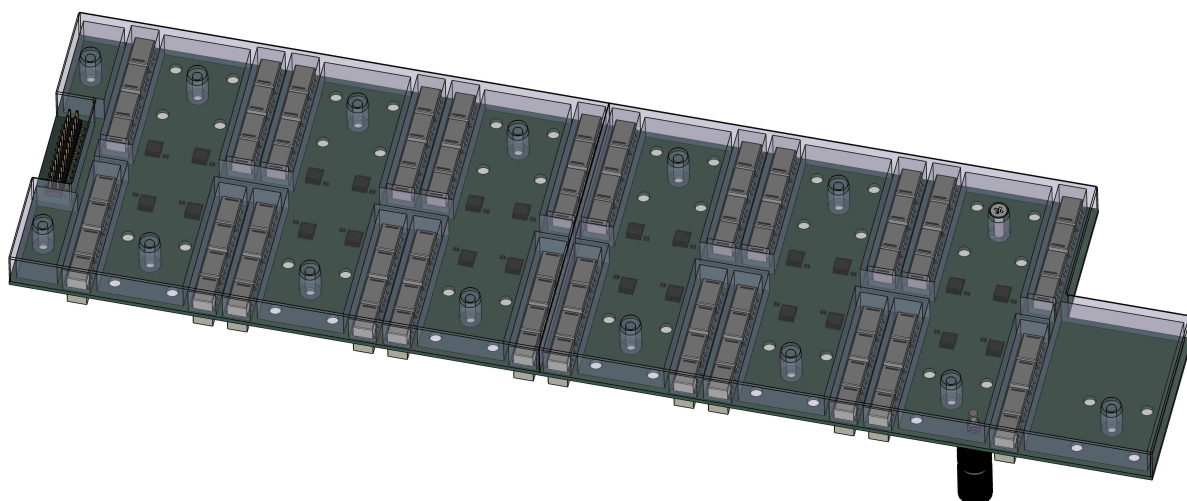
Stratový výkon

$$P = V_{CC} \cdot I_{CC} = 5 \text{ V} \cdot 40 \text{ }\mu\text{A} = 0,0002 \text{ W} \quad (21)$$

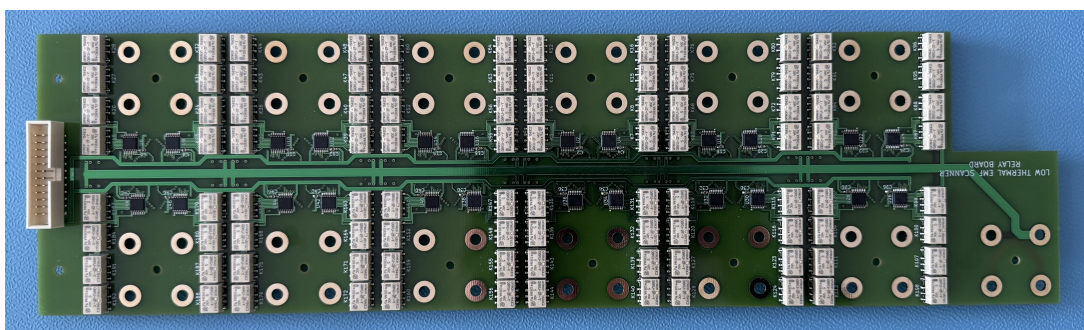
Uvoľnené teplo jedného posuvného registra bude:

$$\Delta T = P \cdot \theta_{JA} = 0,0002 \text{ W} \cdot 159 \text{ }^{\circ}\text{C/W} = 0,0318 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (22)$$

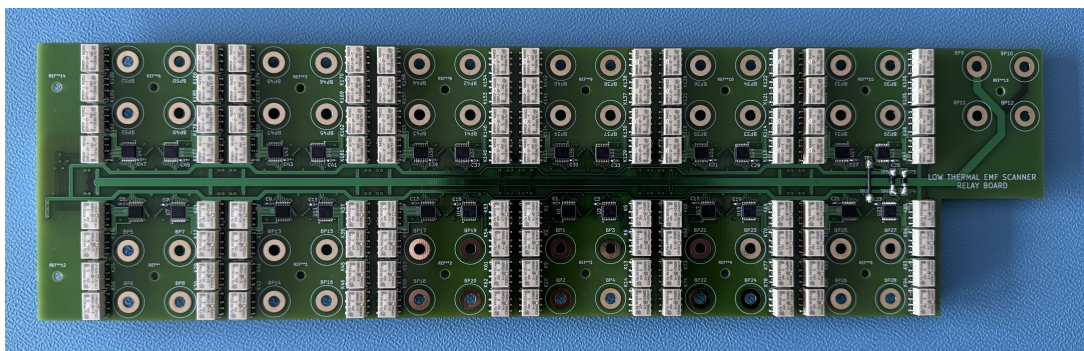
Každý modul obsahuje na jednej strane dva posuvné registre. Zmena teploty vplyvom týchto registrov bude maximálne $\Delta T = 0,0636^{\circ}\text{C}$, čo je prakticky zanedbateľná zmena. Keďže predný panel a doska so spínacími prvkami budú pripevnené spolu, zadná strana dosky bude odkrytá a vystavená voľnému priestoru vo vnútri zariadenia. Preto je dôležité odizolovať všetky relé aby sme zamedzili ovplyvňovaniu merania vplyvom prúdenia vzduchu vo vnútri zariadenia. Navrhli sme kryt, pomocou ktorého zakryjeme dosku a relé. Zo zadnej strany zariadenia takto zabezpečíme teplotné odizolovanie relé od vonkajších vplyvov a zároveň aj od ohrevu vzniknutého vplyvom činnosti posuvných registrov.



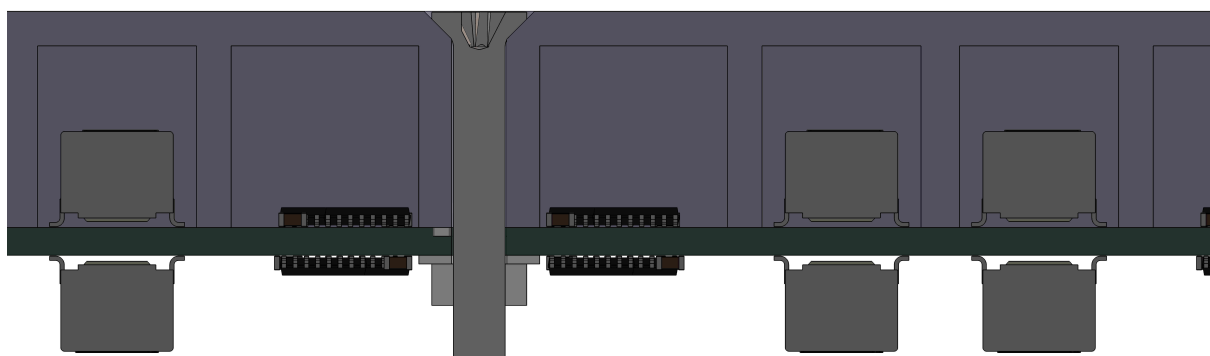
Obr. 58: Kryt zadnej strany dosky s relé.



Obr. 59: Osadená doska s relé, spodná strana.

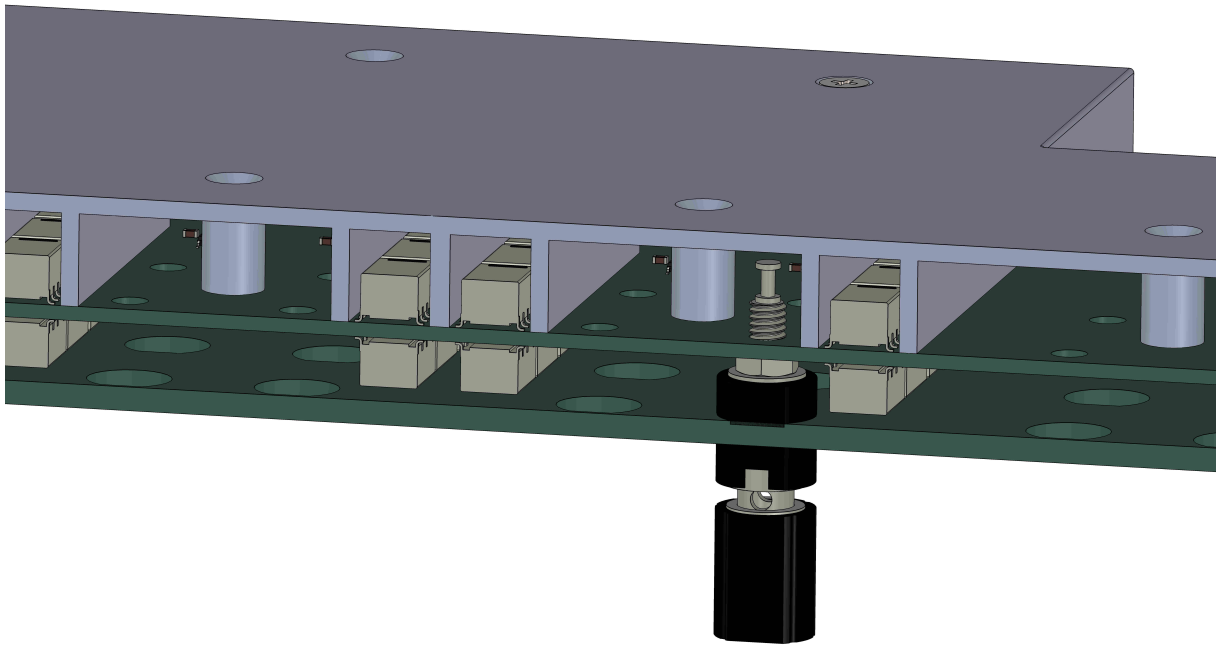


Obr. 60: Osadená doska s relé, vrchná strana.

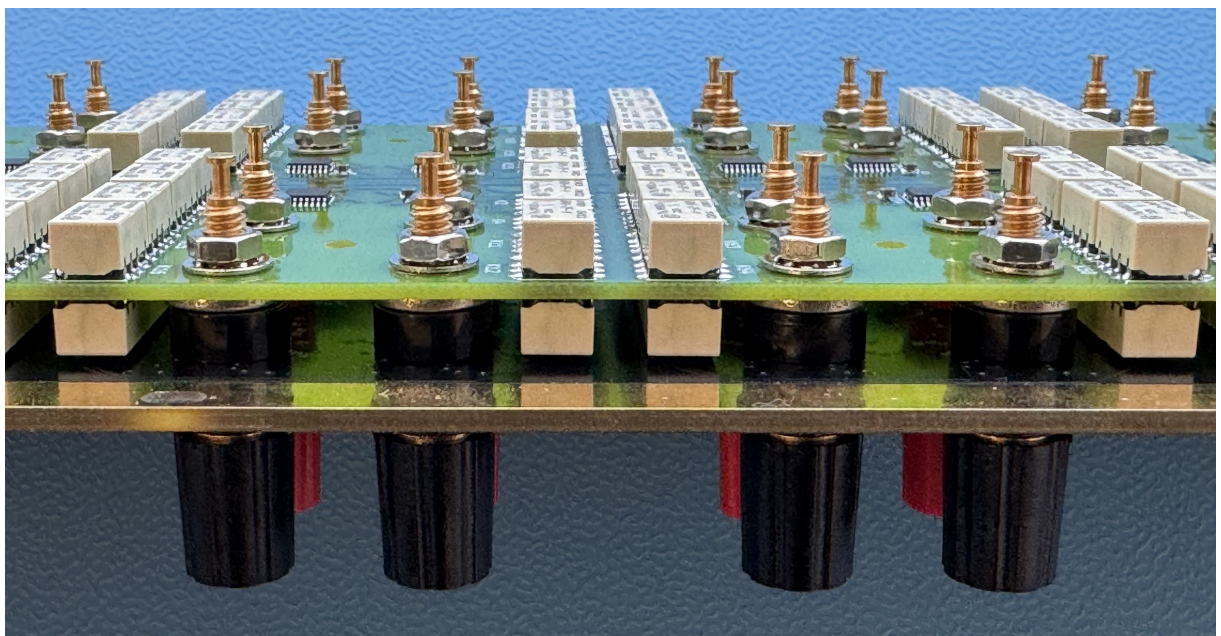


Obr. 61: Kryt zadnej strany dosky s relé - detail.

Predná strana dosky bude v tesnej blízkosti predného panela, s ktorým bude mechanicky spojená. Relé osadené na tejto strane teda nebudú vystavené veľkému priestoru, v ktorom by mohol prúdiť vzduch výrazne ovplyvňujúci merania (obrázok 62).



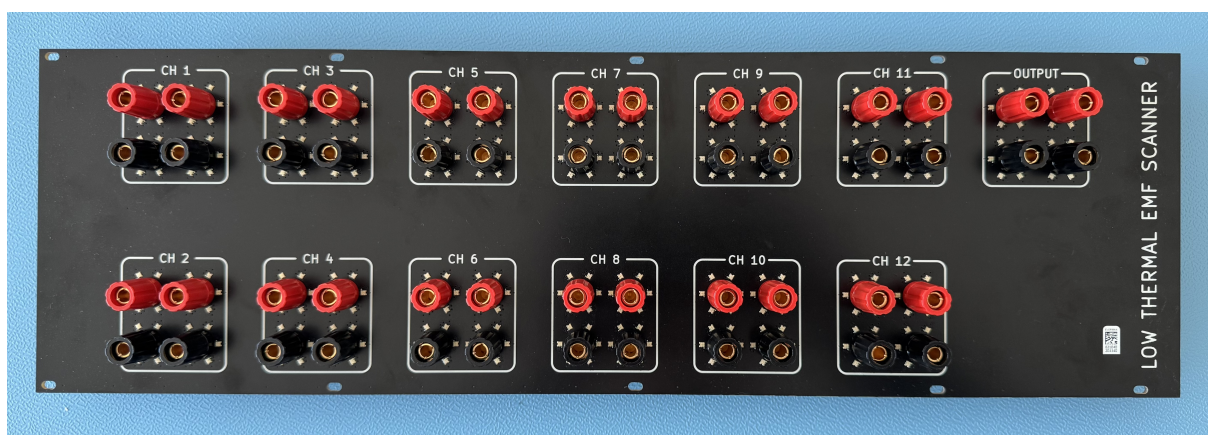
Obr. 62: Priestor medzi doskou s relé a predným panelom



Obr. 63: Priestor medzi doskou s relé a predným panelom

3.3.2 Predný panel

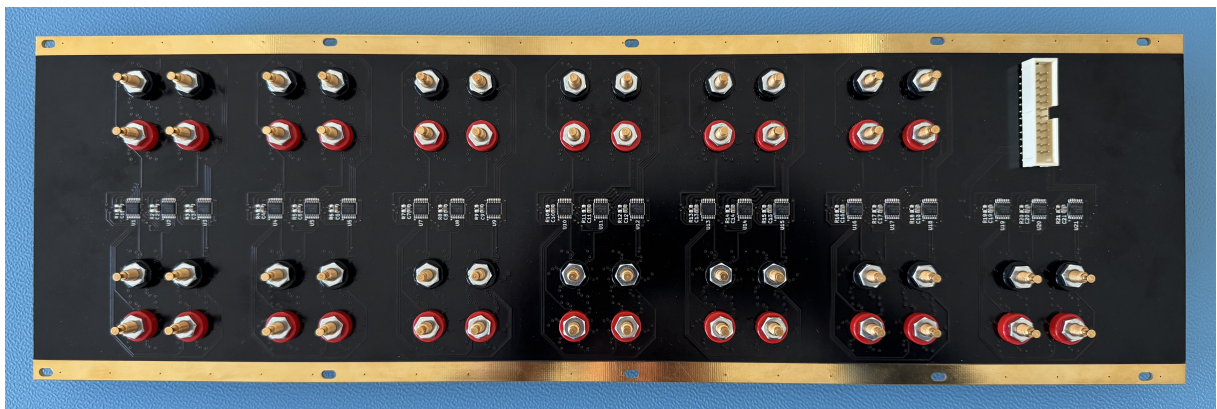
Ako bolo spomenuté vyššie, návrh zariadenia sme rozdelili na dve dosky plošných spojov. Práve druhá doska bude plniť funkciu predného panela samotného zariadenia. Na tejto doske sú mechanicky pripevnené banánikové konektory, ktoré s ňou však nie sú vodivo prepojené. Veľmi dôležité pri návrhu tejto dosky je fakt, že doska musí esteticky zapadať do dizajnu celého zariadenia. Preto je doska vyhotovená v čiernej farbe s grafickým vyznačením jednotlivých kanálov zariadenia a výstupov. Každý konektor má okolo seba umiestnených šesť RGB LED diód, ktoré medzi sebou zvierajú uhol 60° . Tieto diódy nám umožnia svetelnú indikáciu aktívnych vstupov a výstupov, pre zjednodušenie ovládania. Na ovládanie diód využijeme LED driver typu STP08CP05XT. Tieto drivery sú zapojené v sérii, kedy výstup prvého je pripojený na vstup nasledujúceho. Každý z týchto driverov ovláda práve jednu z troch farebných zložiek použitých RGB LED diód pre dvojicu kanálov matice a zároveň jeden výstup drivera ovláda všetkých šesť diód v okolí daného konektora. Pre každú dvojicu kanálov prepínacej matice teda používame tri LED drivery, čo znamená, že celkovo do série zapojíme 21 driverov.



Obr. 64: Predný panel vrchná strana DPS (vonkajšia strana prístroja).



Obr. 65: Predný panel s detailom LED podsvietenia.



Obr. 66: Predný panel spodná strana DPS.



Obr. 67: Predný panel.



Obr. 68: Testovanie LED podsvietenia zdierok pre pripojovacie banániky.

3.4 Softvér

Ovládanie zariadenia je zabezpečené mikrokontrolérom Arduino Mega 2560, preto bol program vytvorený v prostredí Arduino IDE. Keďže máme presne definované merania, na ktoré bude prepínacia matica slúžiť, vytvorili sme príkazy, prostredníctvom ktorých budeme zariadenie ovládať cez Serial Monitor. Formát príkazov na ovládanie:

- “CH[x] [V+/I+] [ON/OFF]” - dvojvodičové meranie na napäťových alebo prúdových svorkách matice kanála x,
- “CH[x] [V-/I-] [ON/OFF]” - reverzácia dvojvodičového merania na napäťových alebo prúdových svorkách matice kanála x,
- “CH[x] 4W [ON/OFF]” - štvorvodičové meranie odporu na kanáli x,
- “CH[x]CH[y] [+/-] [ON/OFF]” - porovnávanie kanála x a y pri normálnom zapojení (+) a pri reverzácii (-).

Príklady použitia:

- “CH1 V+ ON” - vstup V+ kanála 1 bude privedený na výstup V+ a vstup V- kanála 1 na výstup V-,
- “CH1 V- ON” - vstup V+ kanála 1 bude privedený na výstup V- a vstup V- kanála 1 na výstup V+,
- “CH1 4W ON” - aktivuje štvorvodičové meranie na kanáli 1,
- “CH1CH2 + ON” - porovnávanie kanála 1 a 2, vstup V+ kanála 1 je privedený na výstup V+ a vstup V+ kanála 2 na výstup V-,
- “CH1CH2 - ON” - porovnávanie kanála 1 a 2, vstup V+ kanála 1 je privedený na výstup V- a vstup V+ kanála 2 na výstup V+,

Okrem týchto príkazov je možné ovládať aj jednotlivé relé samostatne. Ak zadáme číslo kanála, číslo relé a následne príkaz ON/OFF, zapne sa alebo vypne požadované relé. Takto môžeme ovládať aj viac relé na jednom kanáli, alebo viacerých. Napríklad príkaz:

- “1 177 ON” - zapne relé 177 na kanáli 1,

- “1 177 181 ON” - zapne relé 177 a 181 na kanáli 1,

Pre ovládanie relé na viacerých kanáloch zariadenia, najskôr zadáme relé prvého kanála, potvrdíme voľbu stlačením klávesy Enter, následne zadáme relé ďalšieho kanála a potvrdíme voľbou ON/OFF. Napríklad príkaz:

- “1 177” [Enter] “2 17 ON” - zapne relé 177 kanála 1 a relé 17 kanála 2.

Keďže potrebujeme riadiť celkom až 192 relé, vytvorili sme si v programe štruktúru, aby sme dokázali pristupovať k jednotlivým relé čo najefektívnejšie. Štruktúra obsahuje nasledovné údaje:

- channel - číslo príslušného kanála prepínacej matice,
- relayNumber - číslo relé,
- registerIndex - index posuvného registra, ku ktorému je dané relé pripojené,
- setBit - číslo výstupu posuvného registra pre zapnutie relé,
- resetBit - číslo výstupu posuvného registra pre vypnutie relé.

Po prijatí príkazu “1 177 ON” zo sériovej linky sa zavolá funkcia na aktiváciu relé, ktorá získa parametre:

- channel - v tomto prípade kanál 1,
- relayNumber - v tomto prípade relé 177.

Táto funkcia prechádza štruktúrou, aby našla zodpovedajúce relé. Keď sa hodnota kanála a relé zhoduje s hodnotami v štruktúre, priradí sa index posuvného registra ovládajúceho konkrétne relé a číslo výstupu pre zapnutie relé. Pre zapnutie sa využíva funkcia setBit, pomocou ktorej manipulujeme bity v poli data[]. Táto funkcia má nasledovné vstupné parametre:

- regIndex - index bajtu v poli data[NUM_REGISTERS] zodpovedajúci konkrétnemu posuvnému registru,
- bitIndex - pozícia bitu v danom bajte (výstup registra pre zapnutie relé),
- state - true nastaví bit na 1, false nastaví bit na 0.

```
void setBit(int regIndex, int bitIndex, bool state) {
    if (regIndex < 0 || regIndex >= NUM_REGISTERS) return;
    if (state)
    {
        data[regIndex] |= (1 << bitIndex);
    }
    else
    {
        data[regIndex] &= ~(1 << bitIndex);
    }
}
```

Listing 1: Bitové operácie pre nastavenie výstupov posuvných registrov.

Následne tieto údaje odošleme do posuvných registrov pomocou SPI rozhrania. Potom vykonávame kontrolu času, aby sme zabezpečili impulzy s dĺžkou 10 ms. Keď uplynie táto doba, bit sa nastaví na hodnotu 0 a opäť sa odošlú údaje do registrov.

```
void updateShiftRegisters() {
    digitalWrite(OE_PIN, HIGH);

    SPI.beginTransaction(SPISettings(1000000, MSBFIRST, SPI_MODE0));
    for (int i = NUM_REGISTERS - 1; i >= 0; i--) {
        SPI.transfer(data[i]);
    }
    SPI.endTransaction();

    digitalWrite(RCLK_PIN, HIGH);
    delay(1);
    digitalWrite(RCLK_PIN, LOW);
    digitalWrite(OE_PIN, LOW);
}
```

Listing 2: Odosielanie údajov do posuvných registrov.

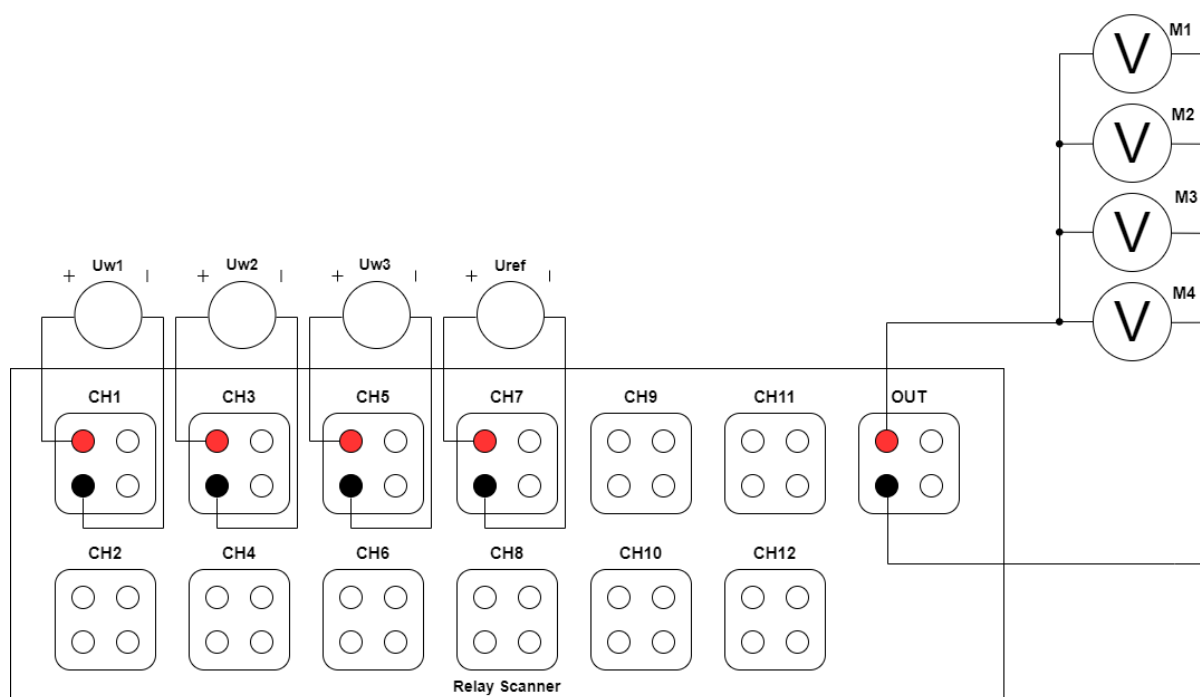
Okrem riadenia dosky s relé cez SPI komunikáciu, je v programe obsiahnutá aj SPI komunikácia pre ovládanie LED panela. Obe dosky majú spoločný dátový (MOSI) pin a hodinový (SCK) pin. Každá z týchto dosiek má však rozdielny Latch a Output Enable pin. Práve pomocou Latch pinu určujeme, ktoré z dvoch zariadení prijíma odoslané dáta a zabraňujeme tak prekryvaniu oboch SPI komunikácií. Pre riadenie LED panela najskôr nastavíme pin OE na úroveň HIGH, čím vypneme výstupy LED driverov. Následne vykonáme prenos dát prostredníctvom SPI. Po vykonaní prenosu nastavíme Latch pin na krátky čas na úroveň HIGH, čím zapíšeme dáta do registrov. Ako posledné vrátime pin OE na LOW, aby sa aktivovali výstupy s aktualizovanými hodnotami. Rovnaký postup je aj v prípade komunikácie s relé doskou.



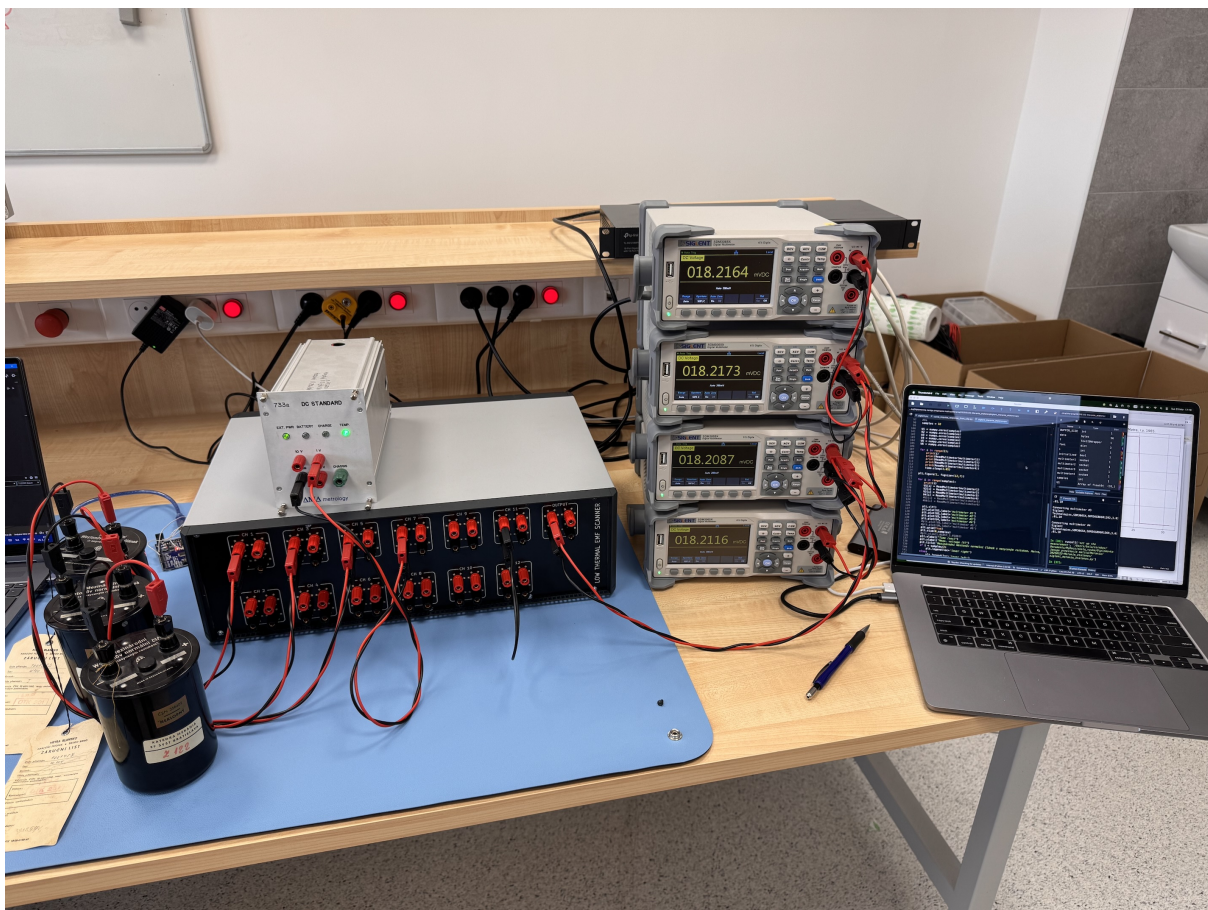
Obr. 69: Prepínacia matica.

4 Dosiahnuté parametre

Prepínaciu maticu sme použili na meranie Westonových normálnych článkov. Meranie sme vykonali prostredníctvom komparačnej metódy, pri ktorej porovnávame meranú veličinu so známou referenčnou hodnotou. Na rozdiel od priameho merania poskytuje táto metóda vyššiu presnosť. Westonove články sme pripojili na tri vstupné kanály prepínacej matice (CH1, CH3 a CH5) a ich výstupné napätie porovnávali s referenčným etalónom napätia pripojeným na kanál 7. Hodnota referencie $U_{REF} = 1,0001472 \text{ V}$. Na výstup prepínacej matice boli pripojené štyri paralelne zapojené multimetre.



Obr. 70: Zapojenie merania.



Obr. 71: Automatizované meracie pracovisko pre porovnanie hodnoty napätia troch elektrochemických etalónov napätia.

Tabuľka 17: Zoznam prístrojov.

Prístroj	Číslo prístroja
Westonov článok W1	1001362
Westonov článok W2	1001457
Westonov článok W3	1001489
Multimeter M1, M2, M3, M4	SIGLENT SDM3065X
Etalón napätia U_{ref}	$\Delta M \Delta$ Metrology 733a
Prepínacia matica	táto diplomová práca

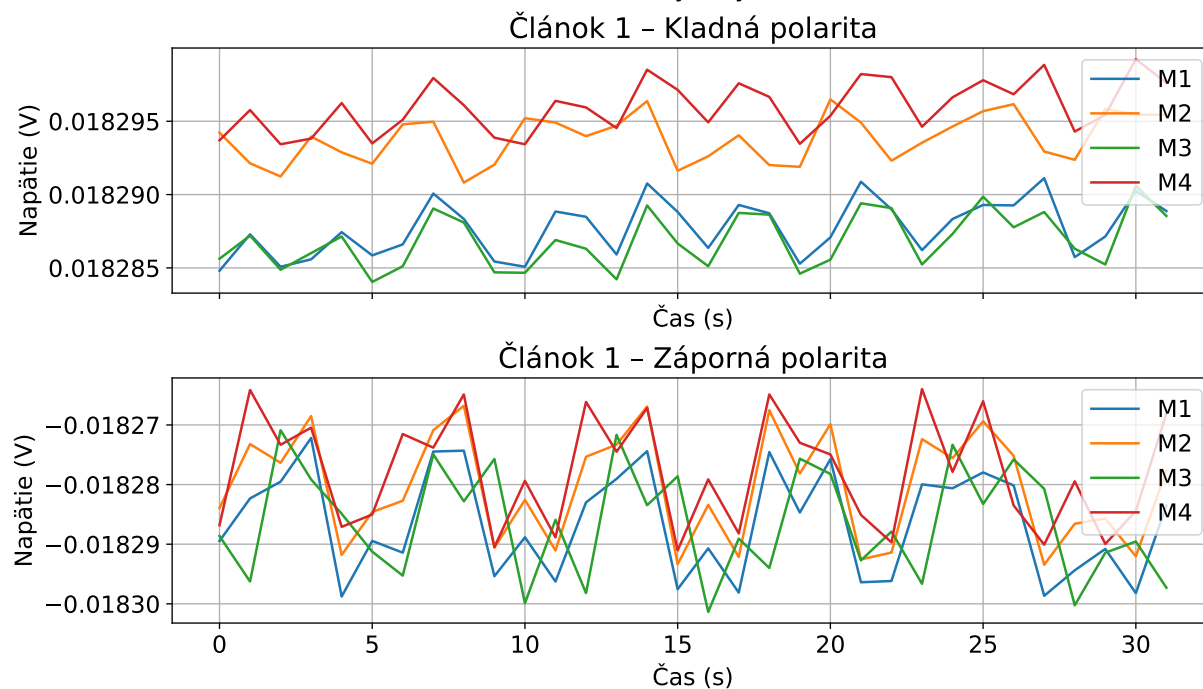
Pomocou matice sme vykonali meranie pre všetky články tak, že sme sledovali rozdiely napätia vzhľadom k referencii pri kladnej a zápornej polarite, aby sme eliminovali vplyv termoelektrického napätia (1.3.1). Pri každom meraní sme zaznamenali 32 vzoriek s časovým rozstupom 4,1 sekundy. Príklad merania pre Westonov článok W1 :

Vstupy V- kanálov CH1 a CH7 sme prepojili medzi sebou. Vstup V+ kanála CH1 sme priviedli

na výstupnú svorku V+ a vstup V- kanála V7 na výstupnú svorku V-. Následne sme zmenili polaritu a vstup V+ kanála CH1 sme priviedli na výstup V- a naopak vstup V+ kanála CH7 na výstup V+. Takto sme postupovali pri meraniach všetkých článkov.

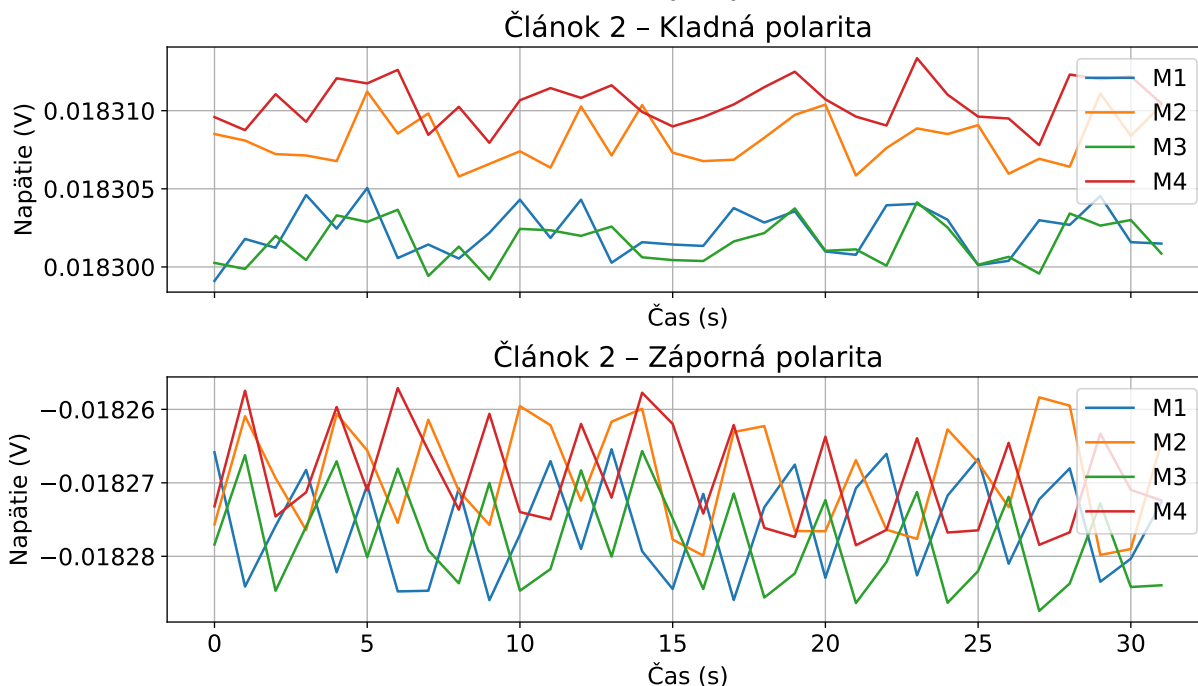
Po získaní dát sme pre jednotlivé merania vypočítali aritmetický priemer zo zaznamenaných údajov multimetrov v danom časovom okamihu. Použitím štyroch multimetrov sme dokázali štatisticky znížiť vplyv náhodných chýb.

Mezinárodní Westonův normální článok s nasyceným roztokem. Metra, r.v. 1965.



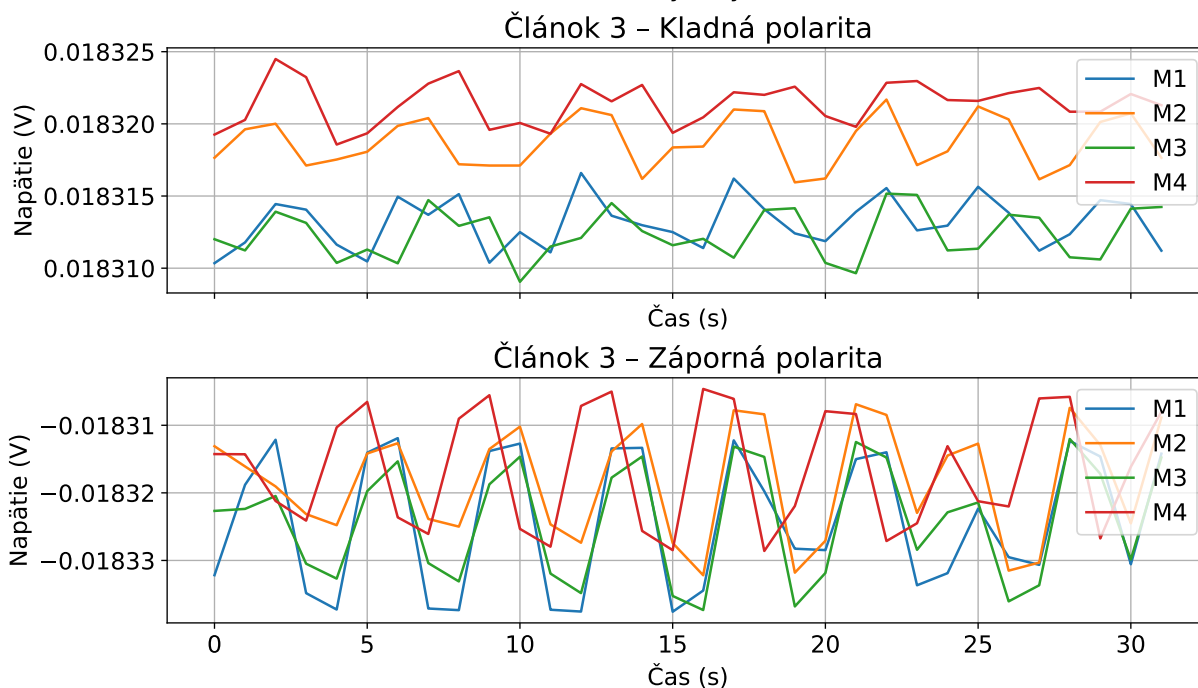
Obr. 72: Rozdiel napätia článku W1 voči referencii pri oboch polaritách.

Mezinárodní Westonův normální článěk s nasyceným roztokem. Metra, r.v. 1965.



Obr. 73: Rozdiel napätia článku W2 vzhľadom k referencii pri oboch polaritách.

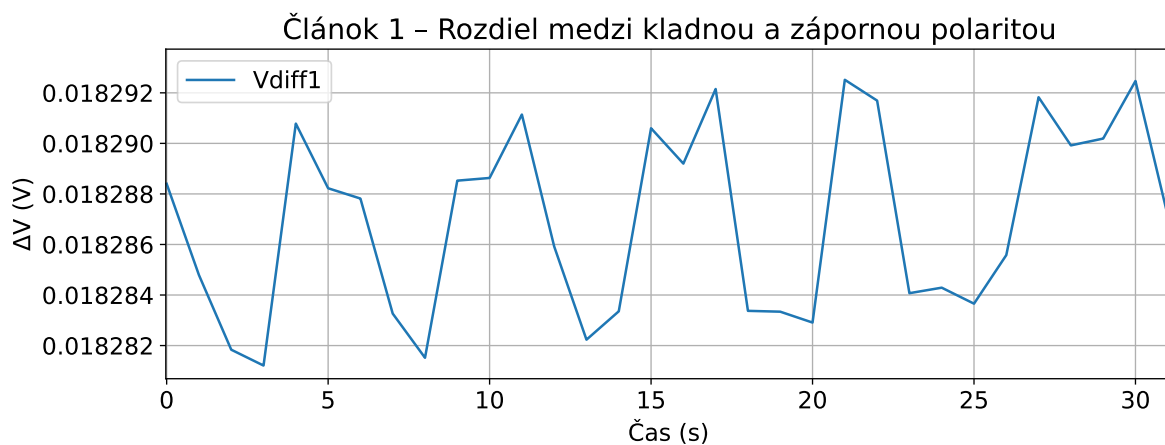
Mezinárodní Westonův normální článěk s nasyceným roztokem. Metra, r.v. 1965.



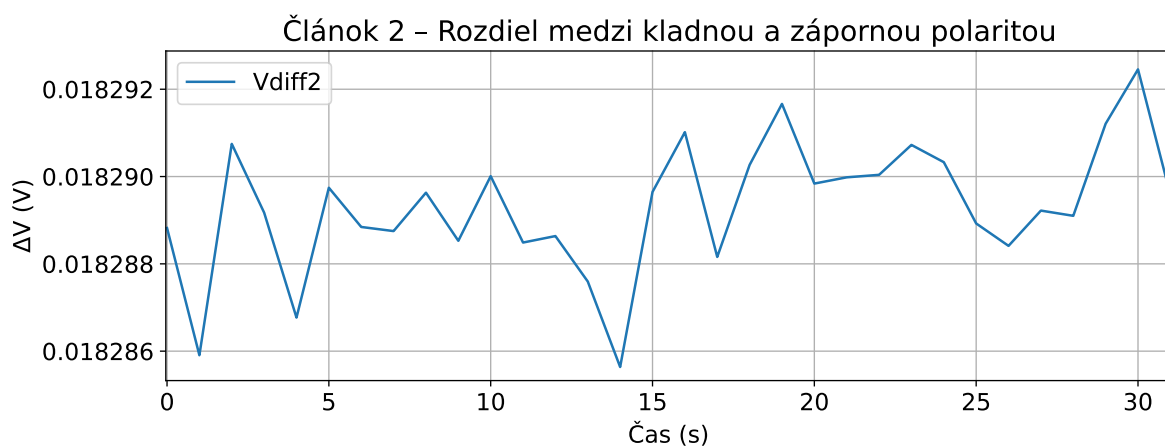
Obr. 74: Rozdiel napätia článku W3 voči referencii pri oboch polaritách.

Keďže sme vykonali meranie kladnej a zápornej polarity, na určenie konečnej hodnoty napätia každého článku sme museli vypočítať rozdiel medzi oboma meraniami, ktorý je definovaný

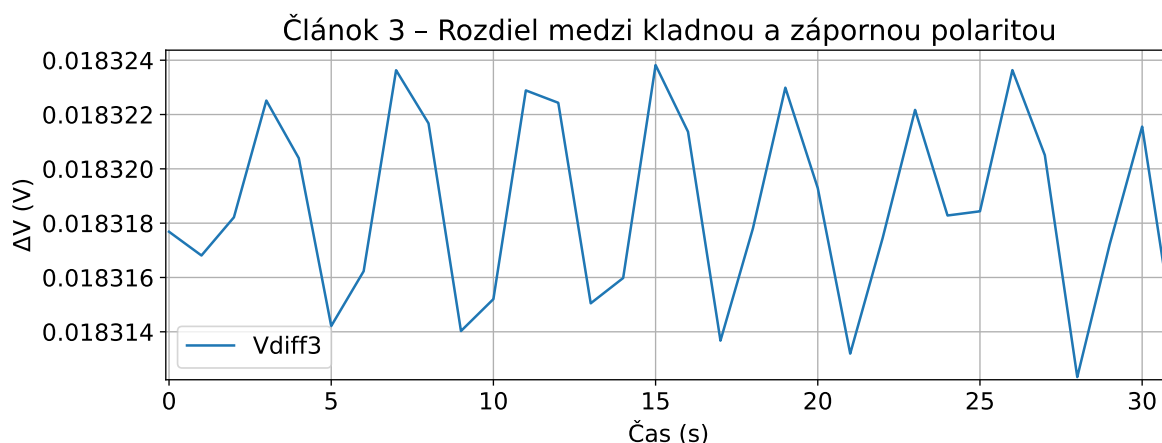
ako polovica rozdielu medzi kladným a záporným meraním.



Obr. 75: Rozdiel medzi kladnou a zápornou polaritou článku 1.



Obr. 76: Rozdiel medzi kladnou a zápornou polaritou článku 2.



Obr. 77: Rozdiel medzi kladnou a zápornou polaritou článku 3.

K tomuto rozdielu sa následne pripočíta hodnota referenčného napätia UREF. Takto získame výslednú strednú hodnotu napätia jednotlivých Westonových článkov.

Tabuľka 18: Výsledná stredná hodnota napätia článkov.

Článok	Stredná hodnota napätia ($\bar{V}$) [V]
1	1,018 434 16
2	1,018 436 51
3	1,018 465 78

Pre získané hodnoty napätia všetkých článkov vypočítame neistotu merania. Pomocou zistenia neistoty určíme interval, v ktorom sa nachádza skutočná hodnota s určitou pravdepodobnosťou.

4.1 Neistoty merania

Ide o parameter určujúci interval hodnôt, v ktorom sa meraná veličina nachádza s určitou pravdepodobnosťou. Neistoty merania delíme podľa spôsobu vyhodnotenia na:

1. Neistota typu A – zisťuje sa štatistickými metódami z opakovaných meraní.
2. Neistota typu B – zisťuje sa napríklad z údajov v katalógovom liste použitého meracieho prístroja, ktorý bol použitý. Nezávisí od počtu opakovaní merania.
3. Kombinovaná neistota – kombinácia neistôt typu A a B.

4. Rozšírená neistota – rozšírenie pravdepodobnostného intervalu, v ktorom sa nachádza skutočná hodnota. Využíva sa koeficient rozšírenia k . [26]

Neistota typu A

Vyplýva z náhodného rozptylu meraných hodnôt pri opakovanom meraní. Tento rozptyl spôsobí, že skutočnú hodnotu meranej veličiny nepoznáme a musíme vykonať jej odhad. Keďže sme vykonávali meranie každého článku pri kladnej a pri zápornej polarite, spriemerujeme údaje namerané jednotlivými multimetrami v každom časovom okamihu. Pre tieto hodnoty následne zistíme rozdiel V_{diff} . Z tohto súboru dát potom vypočítame smerodajnú odchýlku.

Vzťah pre výpočet smerodajnej odchýlky:

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (23)$$

Kde $\bar{x}$ je:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (24)$$

Neistota typu B

Na výpočet neistoty typu B musíme použiť parametre z katalógového listu multimetra SIGLENT SDM3065X. Výrobca udáva hodnotu presnosti v závislosti od použitého rozsahu a doby, kedy bol prístroj kalibrovaný.

$$u_B = (0,0040\% \cdot \text{hodnota}) + (0,0023\% \cdot \text{rozsah}) \quad (25)$$

kde:

- **hodnota** predstavuje nameranú hodnotu napätia,
- **rozsah** je zvolený rozsah meracieho prístroja.

Následne sa vypočíta kombinovaná a rozšírená neistota:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (26)$$

$$U = k u \quad (27)$$

Článok 1

Neistota typu A

$$u_{A1} = \sigma = 0,000\,003\,7\text{ V} = 3,7\text{ }\mu\text{V} \quad (28)$$

Neistota typu B

$$\begin{aligned} u_{B1} &= (0,0040\% \cdot \text{hodnota}) + (0,0023\% \cdot \text{rozsah}) = \\ &= (0,000\,040 \cdot 0,018\,287\text{ V}) + (0,000\,023 \cdot 0,200\text{ V}) = \\ &= 0,000\,005\,3\text{ V} \\ u_{B1} &= 5,3\text{ }\mu\text{V} \end{aligned} \quad (29)$$

Kombinovaná neistota

$$u_1 = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{B1}^2} = \sqrt{3,7^2 + 5,3^2} = 6,5\text{ }\mu\text{V} \quad (30)$$

Rozšírená neistota s koeficientom rozšírenia $k=2$

$$u_1 = k \cdot u_1 = 2 \cdot 6,5 = 13,0\text{ }\mu\text{V} \quad (31)$$

Hodnota napätia článku 1 je teda:

$$U_{\text{článok1}} = \bar{U}_1 \pm u_1 = 1,018\,434\,16\text{ V} \pm 13,0\text{ }\mu\text{V} \quad (32)$$

Článok 2

Neistota typu A

$$u_{A2} = \sigma = 0,000\,001\,47\text{ V} = 1,5\text{ }\mu\text{V} \quad (33)$$

Neistota typu B

$$\begin{aligned} u_{B2} &= (0,0040\% \cdot \text{hodnota}) + (0,0023\% \cdot \text{rozsah}) = \\ &= (0,000\,040 \cdot 0,018\,289\text{ V}) + (0,000\,023 \cdot 0,200\text{ V}) = \\ &= 0,000\,005\,3\text{ V} \\ u_{B2} &= 5,3\text{ }\mu\text{V} \end{aligned} \quad (34)$$

Kombinovaná neistota

$$u_{c2} = \sqrt{u_{A2}^2 + u_{B2}^2} = \sqrt{1,5^2 + 5,3^2} = 5,5\text{ }\mu\text{V} \quad (35)$$

Rozšírená neistota s koeficientom rozšírenia $k=2$

$$u_{w2} = k \cdot u_{c2} = 2 \cdot 5,5 = 11,1 \mu V \quad (36)$$

Hodnota napätia článku 2 je teda:

$$U_{w2} = \bar{U}_2 \pm u_{w2} = 1,018\,436\,51 \text{ V} \pm 11,1 \mu V \quad (37)$$

Článok 3

Neistota typu A

$$u_{A3} = \sigma = 0,000\,003\,50 \text{ V} = 3,5 \mu V \quad (38)$$

Neistota typu B

$$\begin{aligned} u_{B3} &= (0,0040\% \cdot \text{hodnota}) + (0,0023\% \cdot \text{rozsah}) = \\ &= (0,000\,040 \cdot 0,018\,319 \text{ V}) + (0,000\,023 \cdot 0,200 \text{ V}) = \\ &= 0,000\,005\,3 \text{ V} \\ u_{B3} &= 5,3 \mu V \end{aligned} \quad (39)$$

Kombinovaná neistota

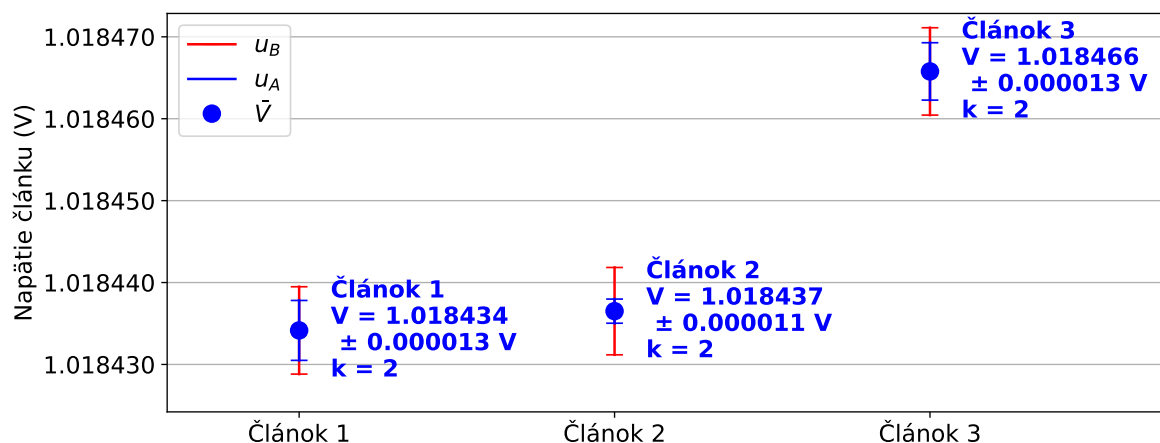
$$u_{c3} = \sqrt{u_{A3}^2 + u_{B3}^2} = \sqrt{3,5^2 + 5,3^2} = 6,4 \mu V \quad (40)$$

Rozšírená neistota s koeficientom rozšírenia $k=2$

$$u_{w3} = k \cdot u_{c3} = 2 \cdot 6,4 = 12,8 \mu V \quad (41)$$

Hodnota napätia článku 3 je teda:

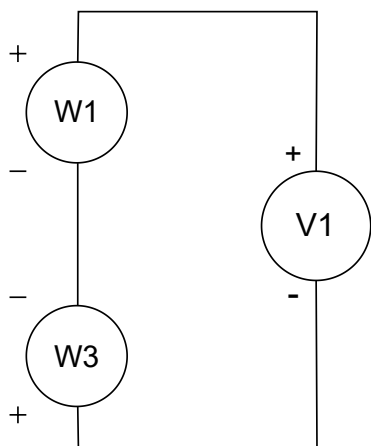
$$U_{w3} = \bar{U}_3 \pm u_{w3} = 1,018\,466\,51 \text{ V} \pm 12,8 \mu V \quad (42)$$



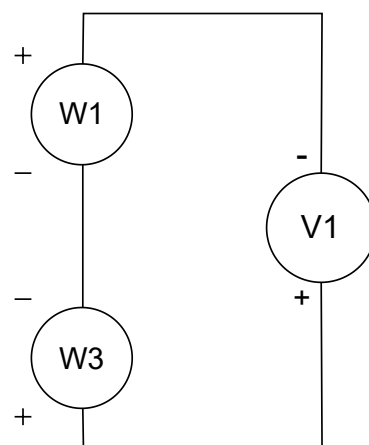
Obr. 78: Neistoty merania.

4.2 Porovnávanie článkov

Pri zisťovaní napätových rozdielov medzi jednotlivými Westonovými článkami bol postup rovnaký ako v predchádzajúcom prípade, avšak namiesto porovnávania článkov voči známej napätovej referencii sme ich porovnávali medzi sebou. Rovnako sme pre každé meranie použili dve zapojenia na eliminovanie termoelektrického napätia. Zapojenia oboch meraní sú na obrázkoch 79 a 80.



Obr. 79: Zapojenie merania pre články W1 a W3.



Obr. 80: Zapojenie merania pre články W1 a W3 (reverzácia polarity).

Rozdiel napätia medzi článkom 1 a 2

Multimeter 1:

Priemerná nameraná hodnota napätia je

$$u_{M1} = 13,10 \mu V \quad (43)$$

Neistota typu A

$$u_{A1} = \sigma = 0,000\,003\,62 \text{ V} = 3,6 \mu V \quad (44)$$

Neistota typu B

$$\begin{aligned} u_B &= (0,0040\% \cdot \text{hodnota}) + (0,0023\% \cdot \text{rozsah}) = \\ &= (0,000\,040 \cdot 0,018 \text{ V}) + (0,000\,023 \cdot 0,200 \text{ V}) = \\ u_B &= 5,3 \mu V \end{aligned} \quad (45)$$

Rozšírená neistota s koeficientom rozšírenia $k=2$

$$u_{c1} = 2 \cdot \sqrt{u_{A1}^2 + u_B^2} = 2 \cdot \sqrt{3,6^2 + 5,3^2} = 12,9 \mu V \quad (46)$$

Multimeter 2:

Priemerná nameraná hodnota napätia je

$$u_{M2} = 12,38 \mu V \quad (47)$$

Neistota typu A

$$u_{A2} = \sigma = 0,000\,003\,31 \text{ V} = 3,3 \mu V \quad (48)$$

Rozšírená neistota s koeficientom rozšírenia $k=2$

$$u_{c2} = 2 \cdot \sqrt{u_{A2}^2 + u_B^2} = 2 \cdot 2 \cdot \sqrt{3,3^2 + 5,3^2} = 12,5 \mu V \quad (49)$$

Multimeter 3:

Priemerná nameraná hodnota napätia je

$$u_{M3} = 12,55 \mu V \quad (50)$$

Neistota typu A

$$u_{A3} = \sigma = 0,000\,003\,55 \text{ V} = 3,6 \mu V \quad (51)$$

Rozšírená neistota s koeficientom rozšírenia $k=2$

$$u_{c3} = 2 \cdot \sqrt{u_{A3}^2 + u_B^2} = 2 \cdot \sqrt{3,6^2 + 5,3^2} = 12,8 \mu V \quad (52)$$

Multimeter 4:

Priemerná nameraná hodnota napätia je

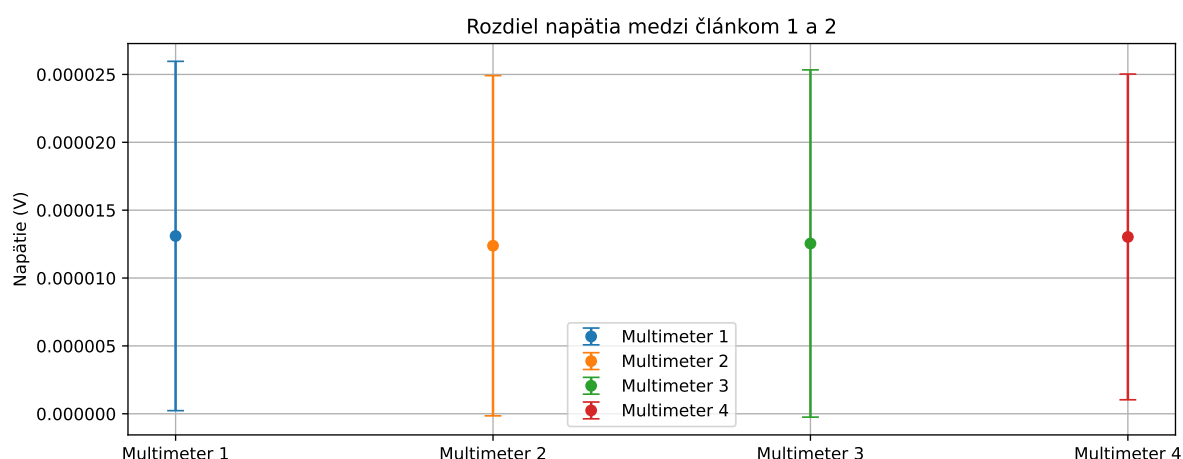
$$u_{M4} = 13,03 \mu V \quad (53)$$

Neistota typu A

$$u_{A4} = \sigma = 0,000\,002\,77 V = 2,8 \mu V \quad (54)$$

Rozšírená neistota s koeficientom rozšírenia $k=2$

$$u_{c4} = 2 \cdot \sqrt{u_{A4}^2 + u_B^2} = 2 \cdot \sqrt{2,8^2 + 5,3^2} = 12,0 \mu V \quad (55)$$



Obr. 81: Rozdiel napätia medzi článkom 1 a 2.

Celková stredná hodnota zo všetkých multimetrov a rozdiel napätia medzi článkom W1 a W2 je:

$$u_{W12} = 12,76 \mu V \quad (56)$$

Zo sekcie 1.3.1 vieme, že termoelektrické napätie nemení svoju polaritu a dokážeme ho dopočítať. Meranie však prebiehalo na rozsahu $200 mV$, pričom úroveň termoelektrického napätia je v jednotkách mikrovoltov. Preto je výpočet čisto ilustračný.

Rozdiel napätia článkov pri zapojení na obrázku 79 je

$$u_{M1+} = u_{EMF} + u_{W1} - u_{W2} \quad (57)$$

Rozdiel napätia článkov pri zapojení na obrázku 80 je

$$u_{M1-} = u_{EMF} + u_{W2} - u_{W1} \quad (58)$$

Potom

$$\begin{aligned} \frac{u_{M1+} + u_{M1-}}{2} &= \frac{(u_{EMF} + u_{W1} - u_{W2}) + (u_{EMF} + u_{W2} - u_{W1})}{2} = \\ &= \frac{2 \cdot u_{EMF}}{2} = u_{EMF} \end{aligned} \quad (59)$$

$$u_{M1,EMF} = -8,67 \mu V \quad (60)$$

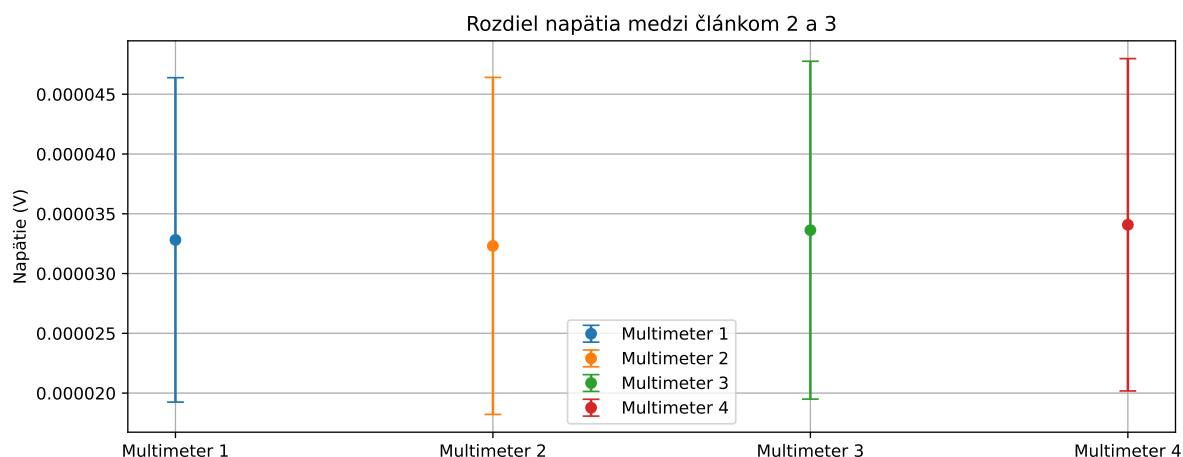
Po spriemerovaní výsledkov zo všetkých štyroch multimetrov je výsledná hodnota termoelektrického napätia

$$u_{EMF} = -5,28 \mu V \quad (61)$$

Rozdiel napätia medzi článkom 2 a 3

Tabuľka 19: Výsledky meraní napäťových rozdielov medzi Westonovými článkami W2 a W3 pomocou jednotlivých multimetrov.

Multimeter	Stredná hodnota [μV]	u_A [μV]	Rozšírená neistota (k=2) [μV]
1	32,8	4,2	13,6
2	32,3	4,6	14,1
3	33,6	4,7	14,1
4	34,1	4,5	13,9



Obr. 82: Rozdiel napätia medzi článkom 2 a 3.

Celková stredná hodnota zo všetkých multimetrov a rozdiel napätia medzi článkom W2 a W3 je:

$$u_{W23} = 33,21 \mu V \quad (62)$$

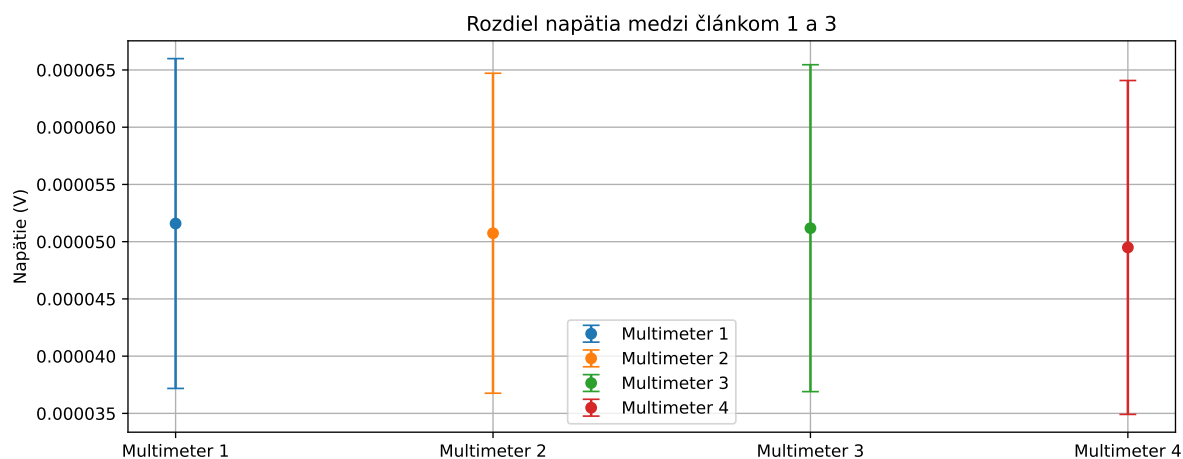
Výsledná hodnota termoelektrického napätia

$$u_{EMF} = -5,93 \mu V \quad (63)$$

Rozdiel napätia medzi článkom 1 a 3

Tabuľka 20: Výsledky meraní napäťových rozdielov medzi Westonovými článkami W1 a W3 pomocou jednotlivých multimetrov.

Multimeter	Stredná hodnota [μV]	u_A [μV]	Rozšírená neistota (k=2) [μV]
1	51,6	4,9	14,4
2	50,7	4,5	14,0
3	51,2	4,8	14,3
4	49,5	5,0	14,6



Obr. 83: Rozdiel napätia medzi článkom 1 a 3.

Celková stredná hodnota zo všetkých multimetrov a rozdiel napätia medzi článkom W1 a W3 je:

$$u_{W13} = 50,75 \mu V \quad (64)$$

Výsledná hodnota termoelektrického napätia

$$u_{EMF} = -4,32 \mu V \quad (65)$$

Záver

Cieľom našej práce bolo navrhnúť a zostrojiť prepínaciu maticu s nízkym termoelektrickým napätím, ktorá sa bude používať pre 4-vodičové merania odporu a pre vysoko presné merania napätia. V práci sa zaoberáme testovaním a výberom vhodného relé v závislosti od našich požiadaviek a následne procesom návrhu a výroby finálneho zariadenia. V úvode práce sme analyzovali rôzne topológie prepínacích matíc a druhy spínacích prvkov. Pozornosť sme obzvlášť venovali problematike termoelektrického napätia, ktoré predstavuje významný zdroj chýb v presných meracích aplikáciách. Okrem nepriaznivých účinkov termoelektrického napätia sme uviedli aj aplikácie, v ktorých sa práve vznik termoelektrického napätia využíva - napríklad termočlánky a termogenerátory.

V praktickej časti práce sme navrhli metódu pre meranie termoelektrického napätia na kontaktoch vybraných relé. Keďže sa toto napätie pohybuje v rozsahu niekoľkých mikrovoltov, meranie bolo možné vykonať použitím nanovoltmetra. Aby sme však dokázali sledovať priebeh termoelektrického napätia na osciloskope, rozhodli sme sa navrhnúť a zrealizovať nízkošumový zosilňovač. Týmto spôsobom sme mali možnosť sledovať dynamiku napätia pri prepínaní ale aj zmeny spôsobené vonkajšími vplyvmi. Použitím tejto metódy sme získali cenné informácie o správaní sa relé pri rôznych prevádzkových stavoch. Okrem zosilňovača bolo potrebné navrhnúť aj univerzálny prípravok, ktorý slúžil na testovanie všetkých vybraných relé. Avšak pri meraní s týmto prípravkom bolo merané napätie zašumené, preto sme relé pripojili na zosilňovač prostredníctvom skrútených vodičov a testovací prípravok sme využili len na riadenie relé. Na základe získaných údajov sme vybrali najvhodnejšie relé z hľadiska termoelektrického napätia, ktoré sme použili pri návrhu zariadenia.

Následne sme si definovali požiadavky pre našu prepínaciu maticu, na základe ktorých sme navrhli vhodné konštrukčné riešenie. Dôležitým aspektom v tejto časti bolo privedenie signálov zo vstupných konektorov zariadenia na dosku s relé. Keďže použitie káblov medzi jednotlivými konektormi a doskou by mohlo viesť ku zvýšeniu termoelektrického napätia na spojoch materiálov, rozhodli sme sa zariadenie navrhnúť tak, aby sa doska s relé priamo namontovala na predný panel zariadenia. Tým sa vytvorilo vodivé spojenie medzi konektormi a doskou bez potreby pridávania ďalších materiálov.

Zariadenie sme použili na stanovenie presných hodnôt napätia Westonových článkov, kde sme vykonali porovnávanie jednotlivých článkov voči známej napäťovej referencii. Pri meraniach sme vykonali reverzáciu polarity, aby sme eliminovali vplyv termoelektrického napätia

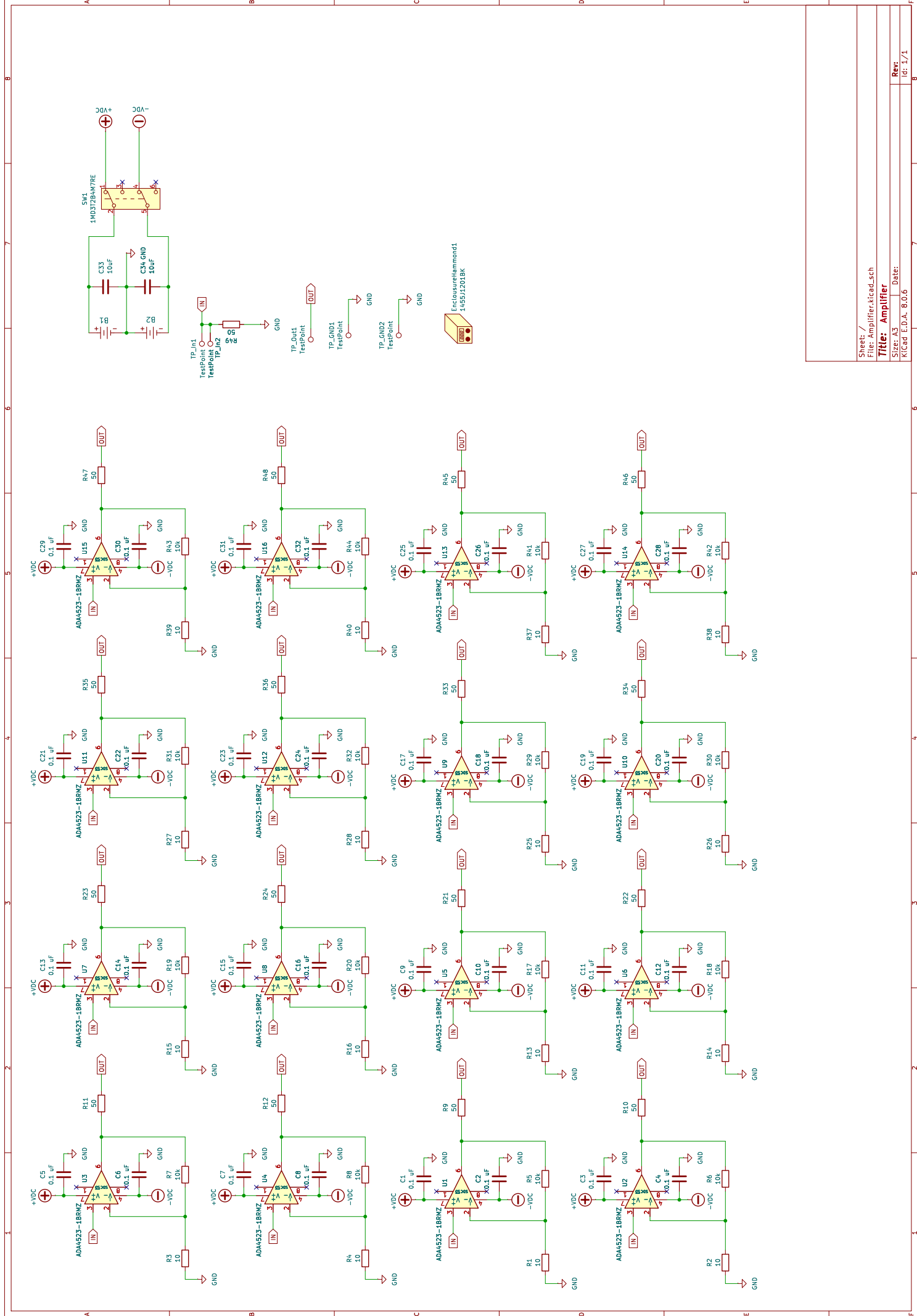
(sekcia 1.3.1). Súčasťou merania bol aj výpočet neistôt jednotlivých meraní. Ďalej sme vykonali meranie napäťových rozdielov medzi jednotlivými Westonovými článkami. Pri meraniach sme opäť využili reverzáciu polarít a následným výpočtom uvedeným v kapitole 4.2 určili hodnotu termoelektrického napätia pri všetkých meraniach. Hodnoty sa pohybovali v rozsahu jednotiek mikrovoltov.

Zoznam použitej literatúry

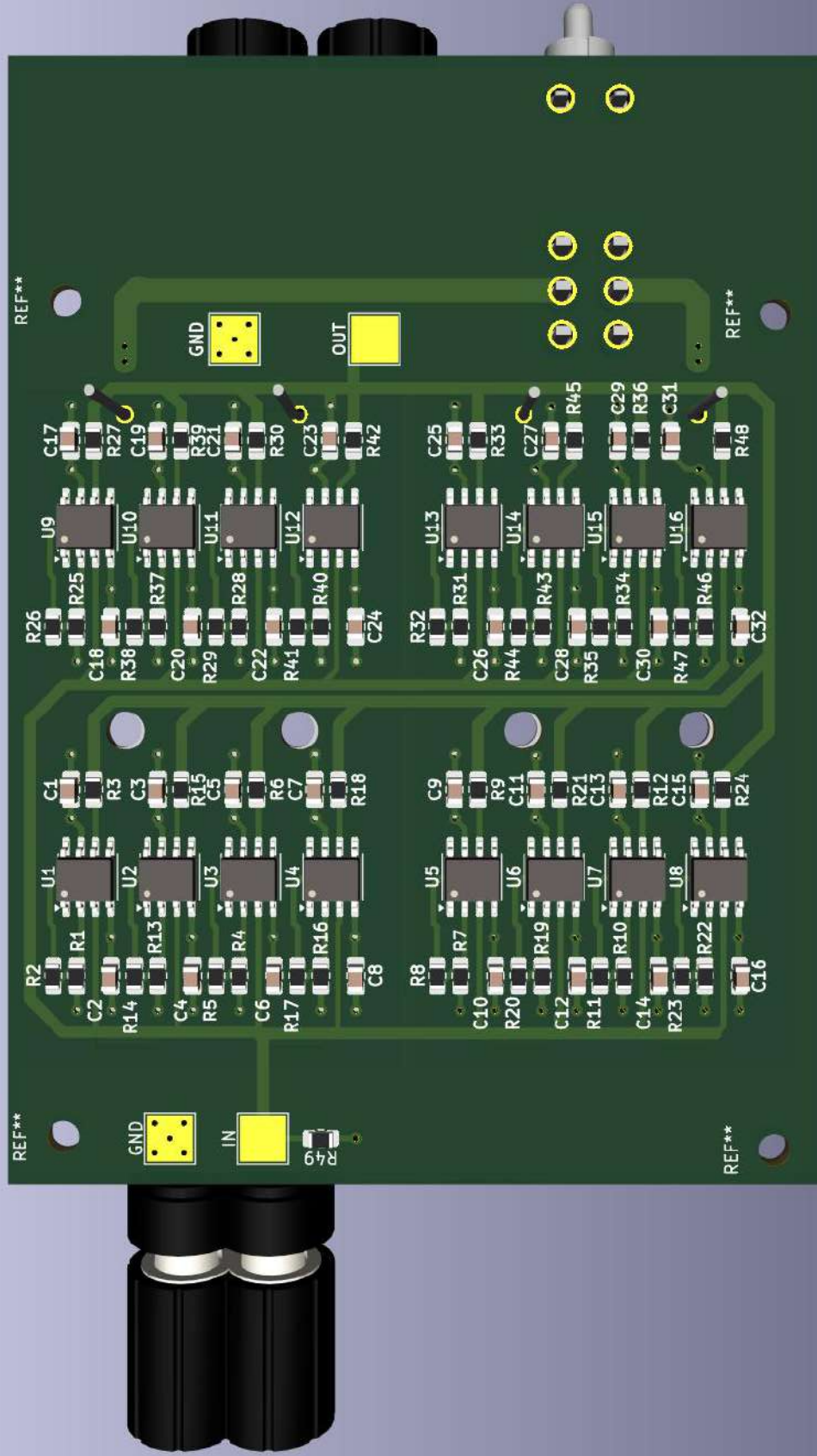
- [1] Keysight Technologies, *34980A Multifunction Switch/Measure Unit – Data Sheet*. Keysight Technologies.
- [2] Ankur, “Everything you need to know about rotary switches,” 2022.
- [3] M. International, *4210, 4216 & 4220 AUTOMATED LOW THERMAL MATRIX SCANNERS*. MINTL, 2023.
- [4] M. Li, S. Xu, Q. Chen, and L.-R. Zheng, “Thermoelectric-generator-based dc-dc conversion networks for automotive applications,” *Journal of Electronic Materials*, 2011.
- [5] OMRON Corporation, *G6K Surface Mounting Relay: Surface Mount Relay with a Small Size and Low Profile for Space Saving on Circuit Board*, 2024.
- [6] J. J., “Two-wire vs. four-wire resistance measurements: Which configuration makes sense for your application?,” 06. 2022.
- [7] T. F. T. Corp., “Understanding the kelvin method of measuring resistance.” <https://www.thin-film.com/wp-content/uploads/2024/02/Understanding-the-Kelvin-Method-of-Measuring-Resistance.pdf>.
- [8] I. Keithley Instruments, *Switching Handbook*, 6 ed., 2008.
- [9] M. T. Solutions, “Understanding switching used in automated test equipment,” 2023.
- [10] Keysight Technologies, *Keysight 34921A–34925A Low Frequency Multiplexer Modules User’s Guide*. Keysight Technologies, 5 ed., Aug. 2022.
- [11] I. Littelfuse, *RELAYS: Definition, Specifications and Applications*, 2021.
- [12] R. S.A., *Relays Basic Information*, Feb 2018.
- [13] RS Components, “A complete guide to rotary switches,” 2023.
- [14] R. Chayramy and S. Solve, “A very low thermal emf computer-controlled scanner,” *Measurement Science and Technology*, 2013.
- [15] EAO Holding AG, “Benefits of gold-plated vs. silver contacts in electrical pushbuttons, lever switches, keylock switches, emergency- and stop switches,” tech. rep.

- [16] A. Książkiewicz, "Contact materials used in low voltage electrical relays," *Computer Applications in Electrical Engineering*, vol. 13, pp. 300–308, 2015.
- [17] Tyco Electronics AXICOM, *Telecom and Signal Relays*. Farnell.
- [18] TE Connectivity, *Relay Contact Life*. TE Connectivity.
- [19] A. C. Iyasara, L. U. Grema, N. O. Osonwa, I. O. Odewale, and O. B. Abe, "Seebeck coefficient, electrical conductivity and thermal conductivity as veritable tools for measuring the thermoelectric performance of engineering materials," *International Academic Journal of Advanced Pure & Applied Science Research*, vol. 8, pp. 1–9, Mar. 2023.
- [20] H. J. Goldsmid, *Introduction to Thermoelectricity*, vol. 121. Springer, second edition ed., 2012.
- [21] R. M. Park, *Thermocouple Fundamentals*. Marlin Manufacturing Corporation.
- [22] N. Jaziri, A. Boughamoura, J. Müller, B. Mezghani, and F. Tounsi, "A comprehensive review of thermoelectric generators: Technologies and common applications," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 264–275, 2020.
- [23] M. L. Kidd, "Watch out for those thermoelectric voltages," *CAL LAB: The International Journal of Metrology*, 2012.
- [24] A. C. Iyasara, L. U. Grema, O. N. Okechinyere, and I. O. Odewale, "Seebeck coefficient, electrical conductivity, and thermal conductivity as veritable tools for measuring the thermoelectric performance of engineering materials," *AccexGate Journals*, 2023.
- [25] A. T. C. KEITHLEY, *Making Precision Low Voltage and Low Resistance Measurements*, 2013. Tektronix Application Note 91113.
- [26] J. Krchnák, "Spracovanie meraní a metódy vyhodnocovania - neistoty merania." 2024.

Príloha č.1 - Výrobné podklady zosilňovača

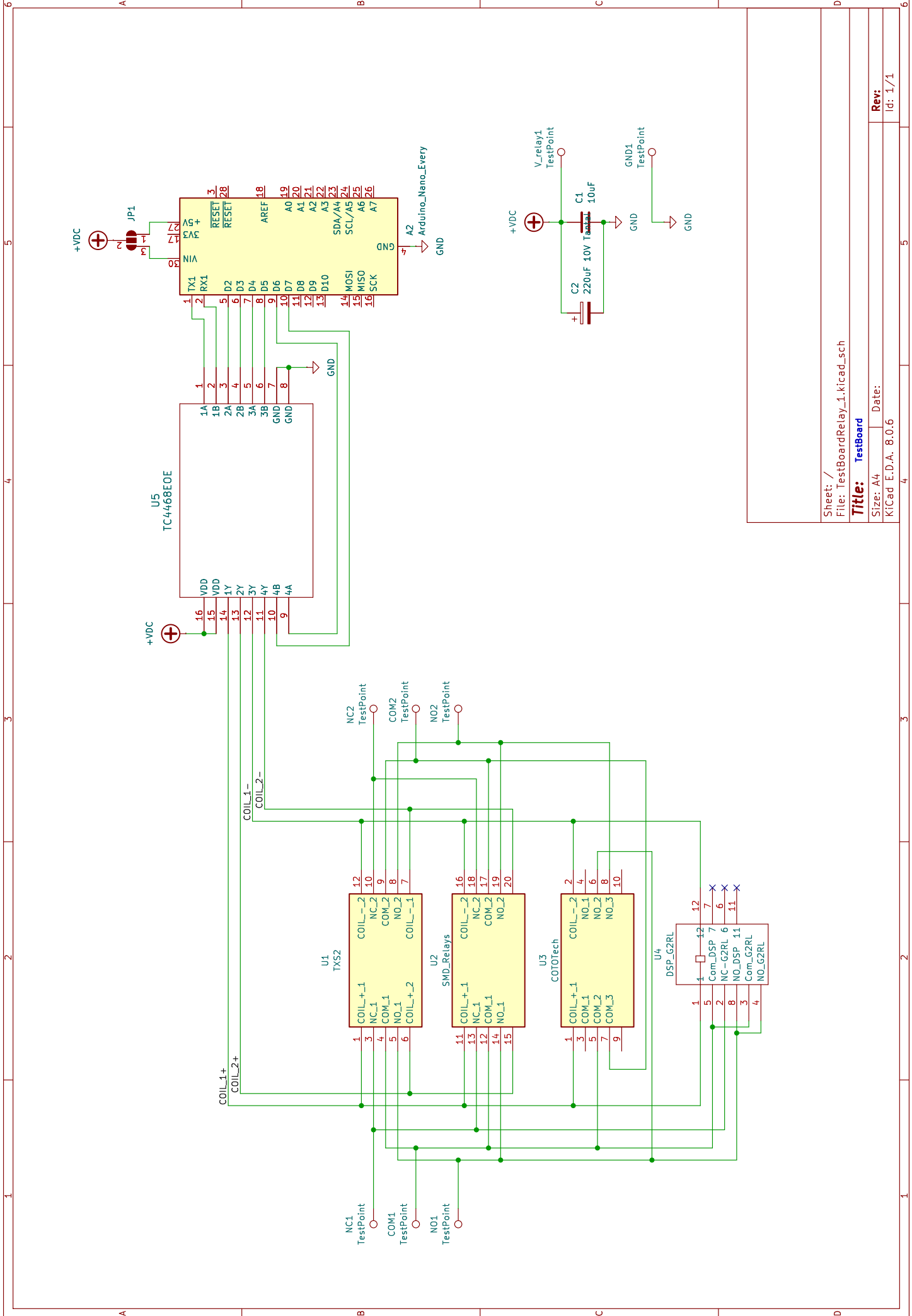






Reference	Comment	Quantity	Footprint
C1-C32	0.1uF	32	C_0805
C33, C34	10uF	2	C_0805
B1, B2	2462 KEYSTONE	2	BatteryHolder:2462
R1-R4,R13-R16,R25-R28,R37-R40	10 ohm	16	R_0805
R5-R8,R17-R20,R29-R32,R41-R44	10 Kohm	16	R_0805
R9-R12,R21-R24,R33-R36,R45-R49	50 ohm	17	R_0805
SW1	1MD3T2B4M7RE	1	1MD3T2B4M7RE
U1-U16	ADA4523-1BRMZ	16	Package_SO:SOIC-8_3.9x4.9mm_P1.27mm

Príloha č.2 - Výrobné podklady meracieho prípravku



Sheet: /
File: TestBoardRelay_1.kicad_sch

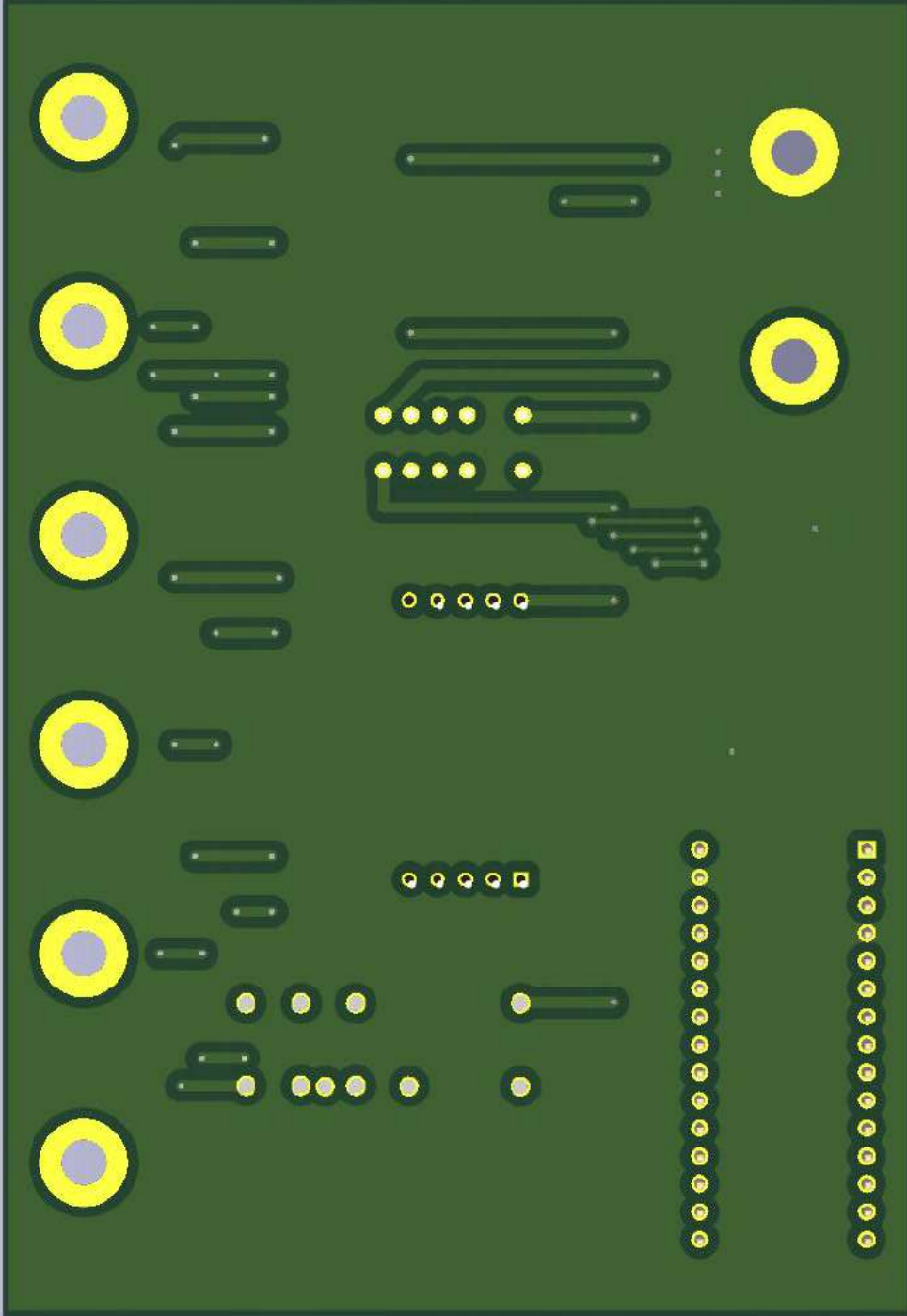
Title: TestBoard

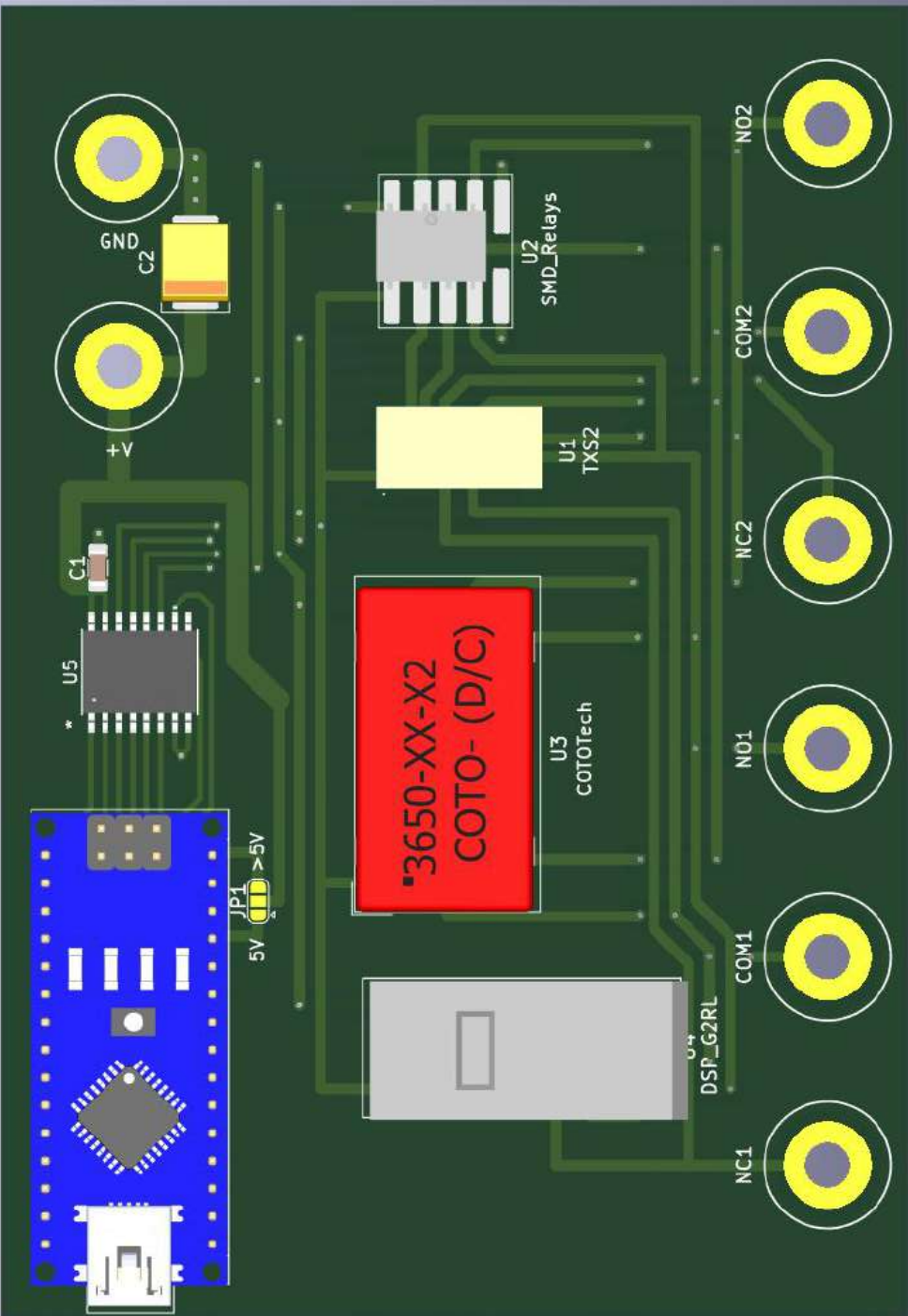
Size: A4 Date:

KiCad E.D.A. 8.0.6

Rev:

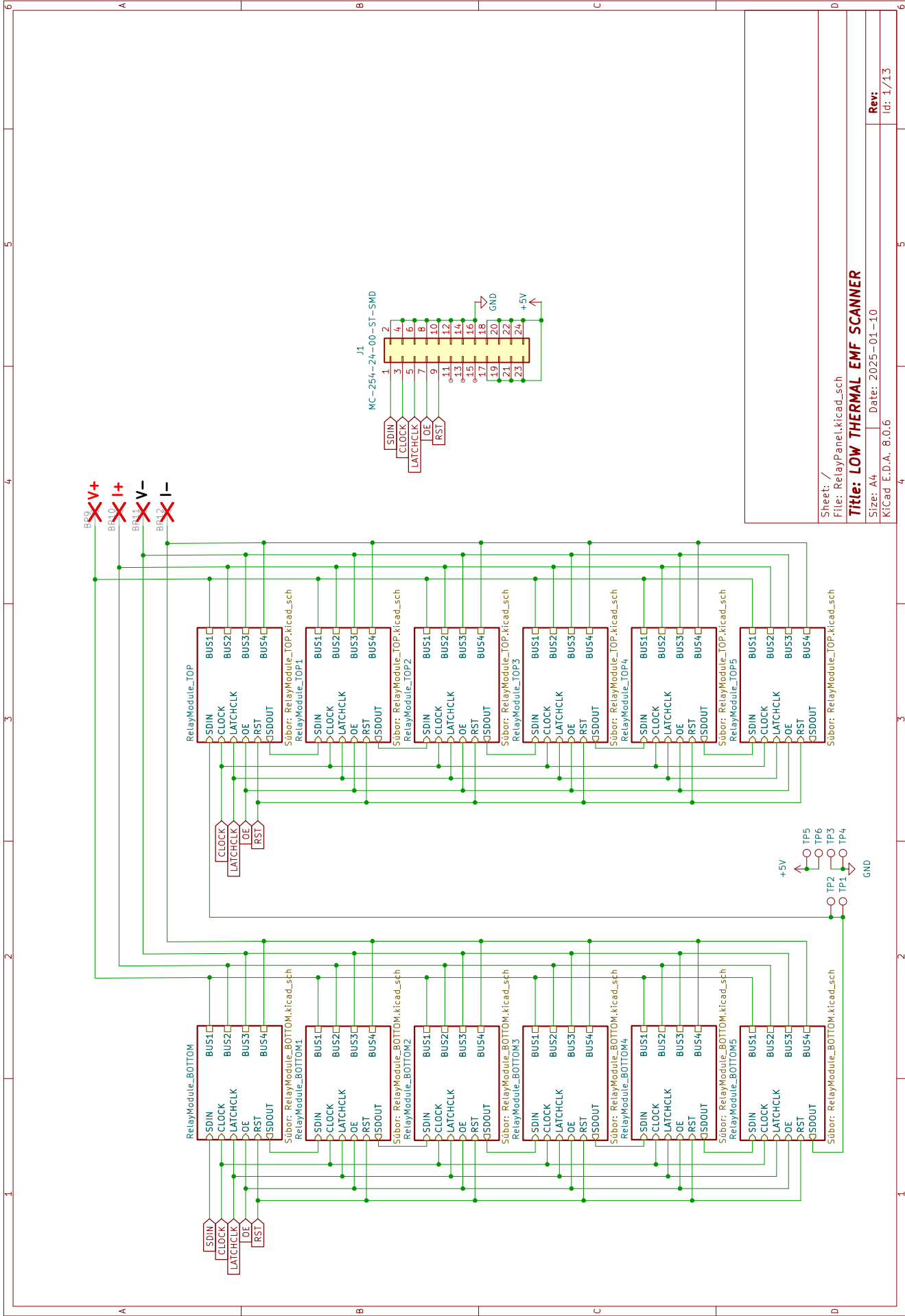
Id: 1/1





Reference	Comment	Quantity	Footprint
C1	10uF	1	Capacitor_SMD:C_1206_3216Metric_Pad1.33x1.80mm_HandSolder
C2	220uF 10V Tantal	1	Capacitor_Tantalum_SMD:CP_EIA-7360-38_Kemet-E_Pad2.25x4.25mm_HandSolder
U5	TC4468EOE	1	SOIC16-W_MC_MCH
A2	Arduino_Nano	1	Module:Arduino_Nano

Príloha č.3 - Výrobné podklady - Relay Panel



Sheet: /
File: RelayPanel.kicad_sch

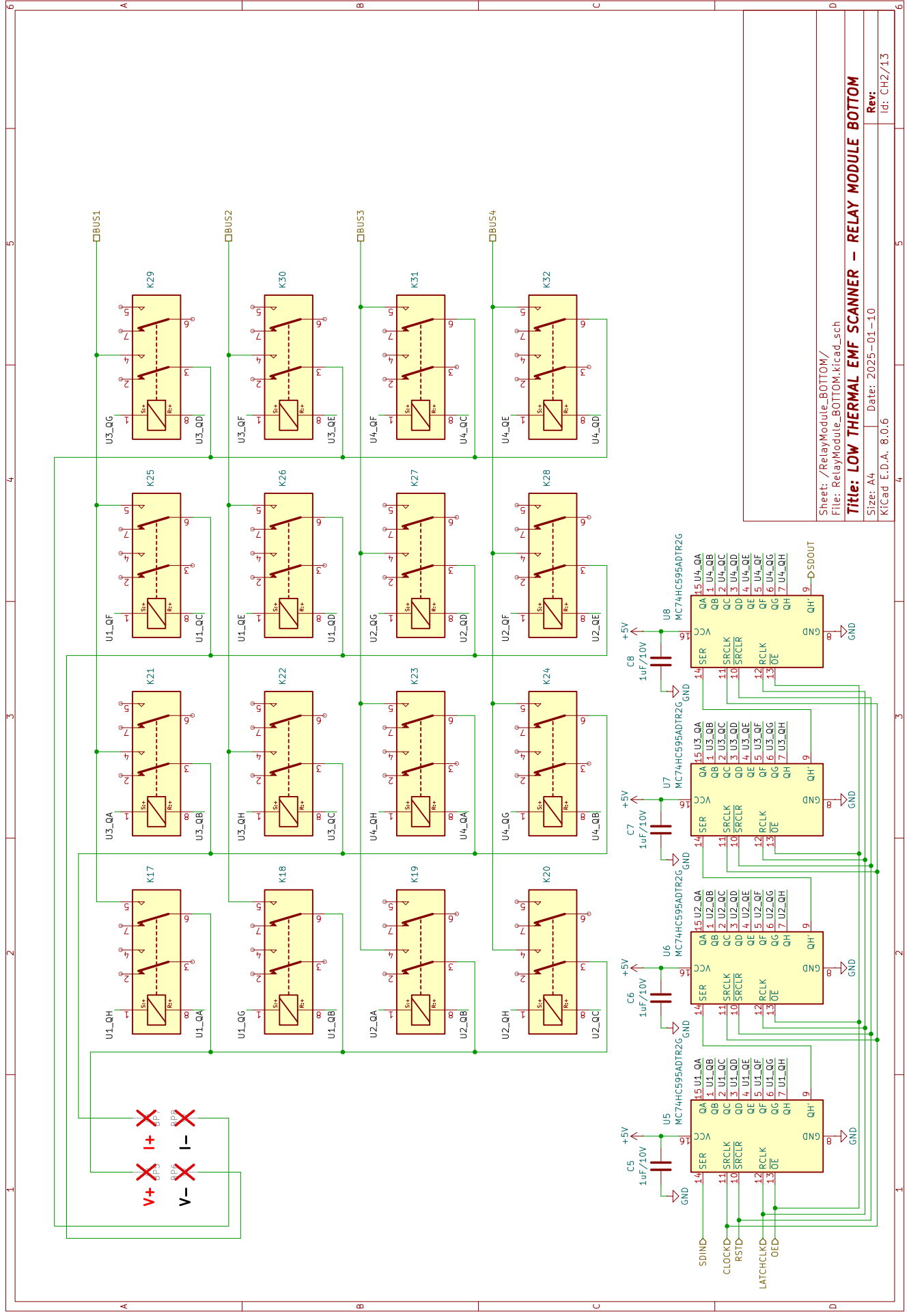
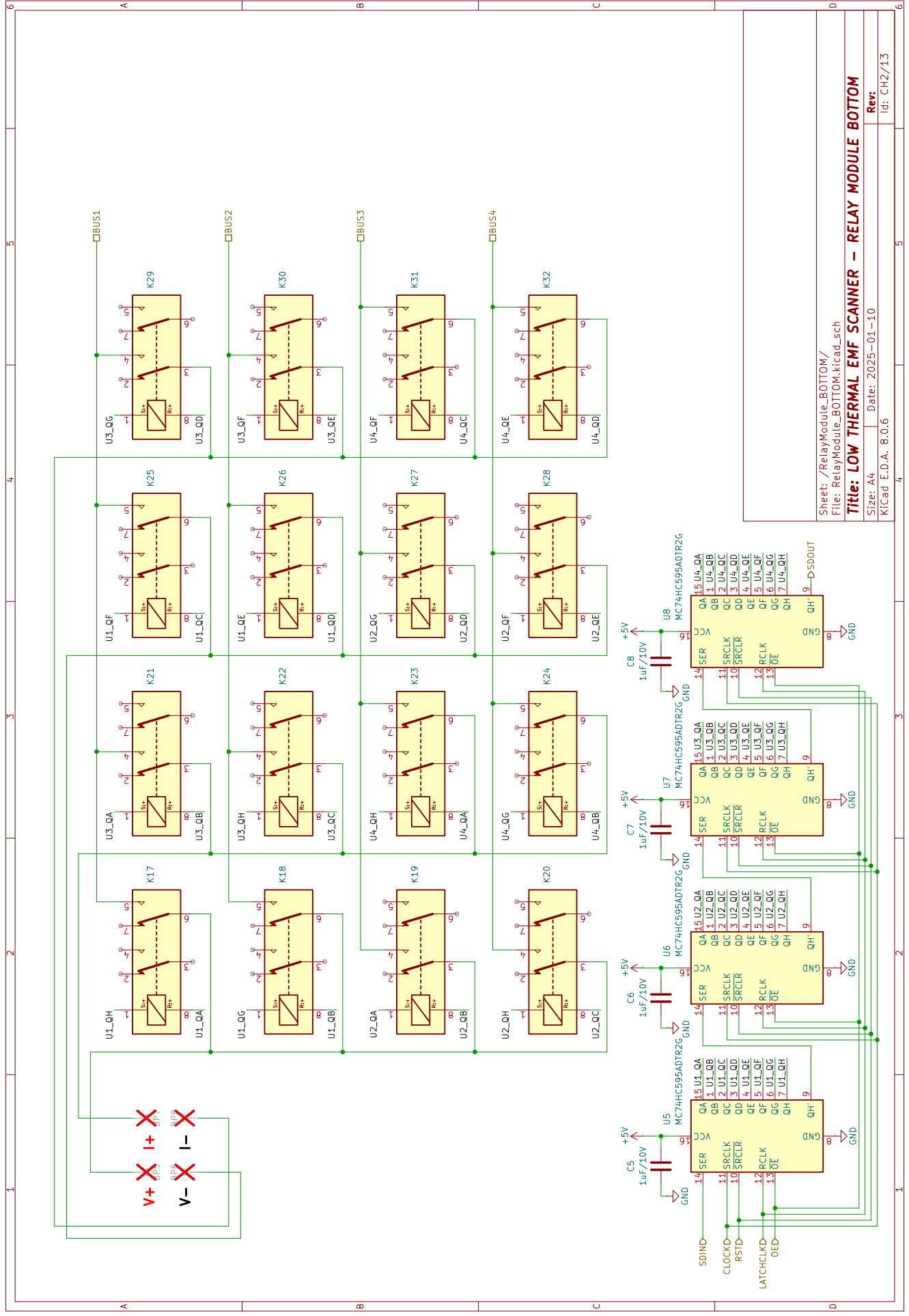
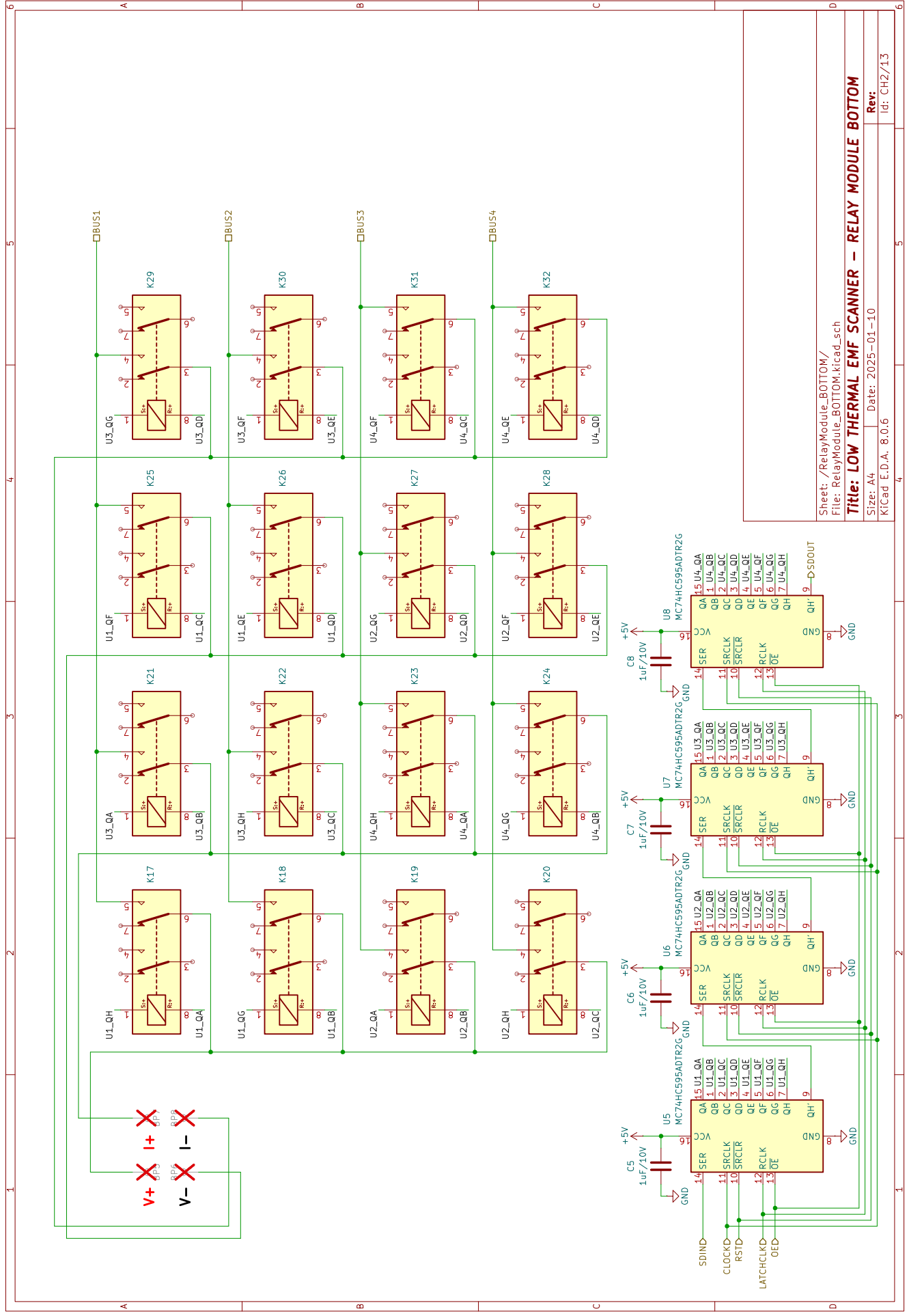
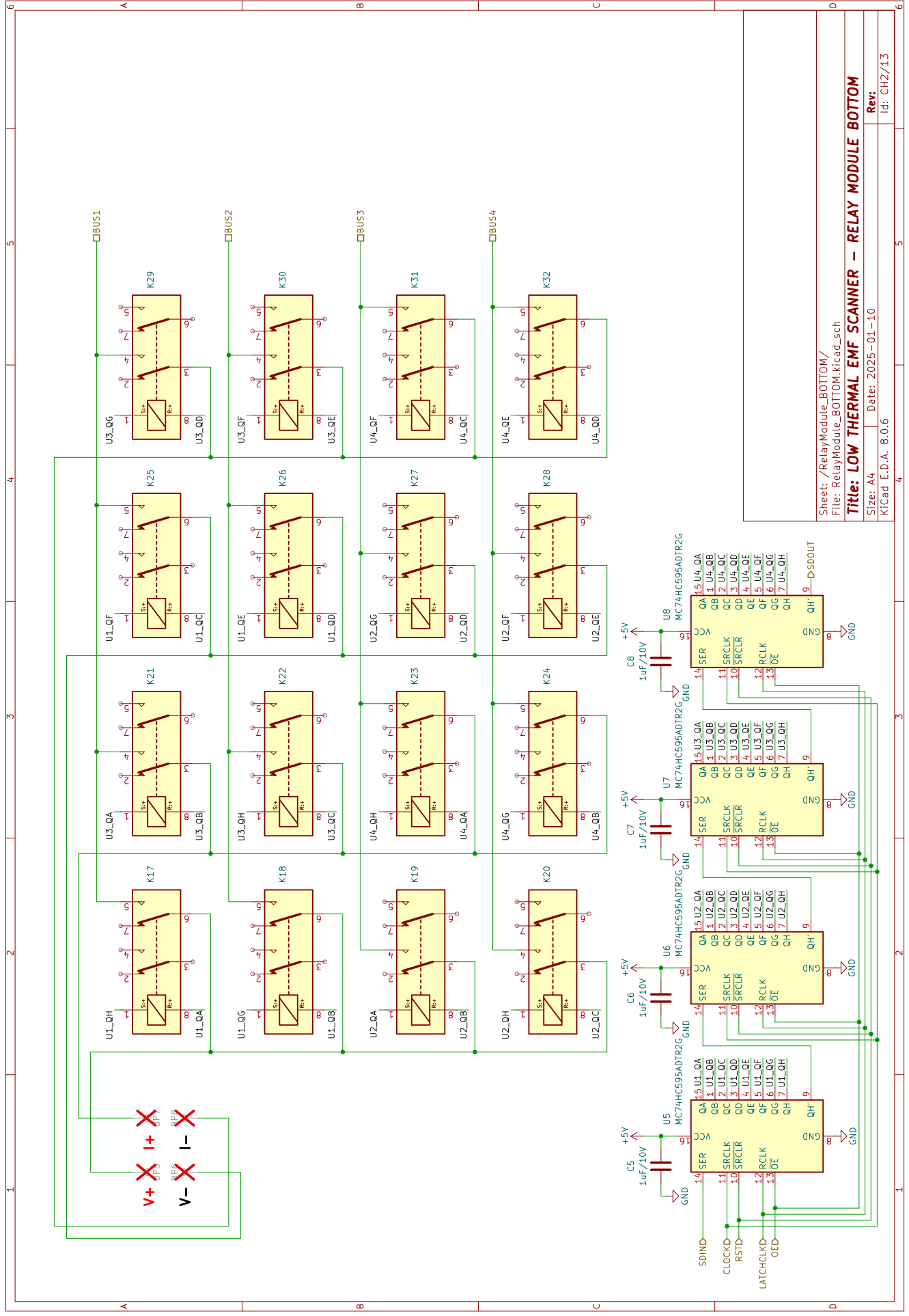
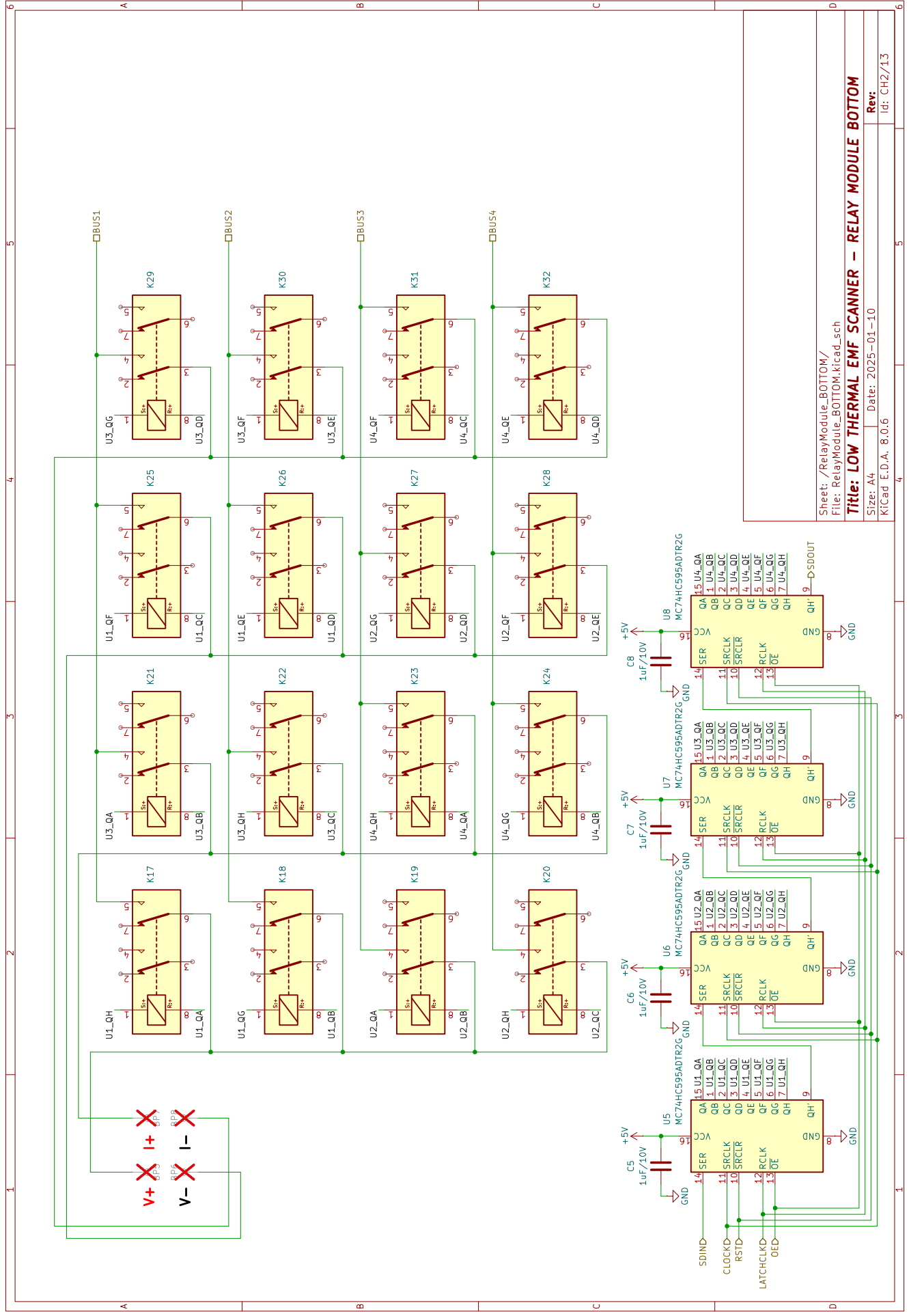
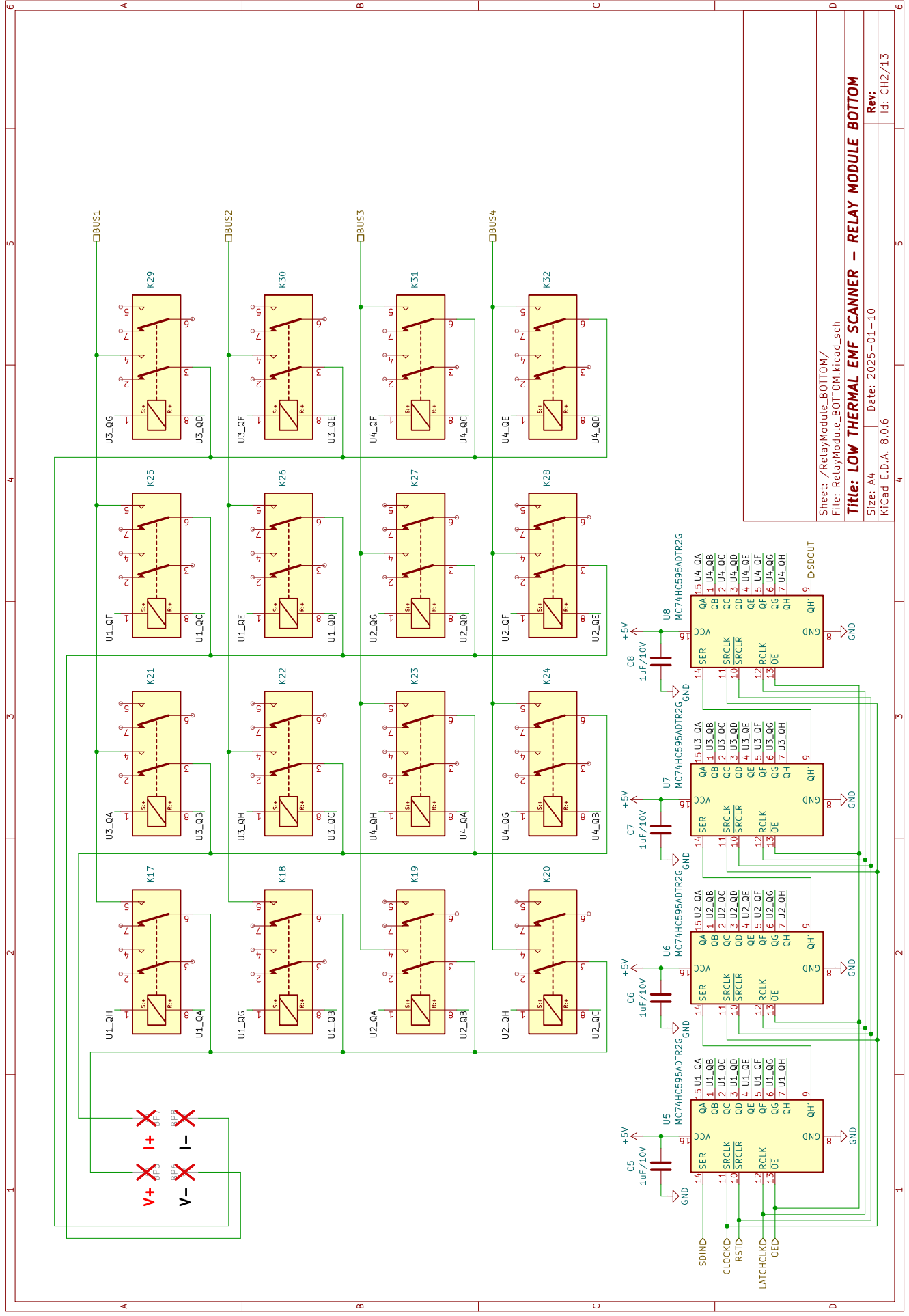
Title: LOW THERMAL EMF SCANNER

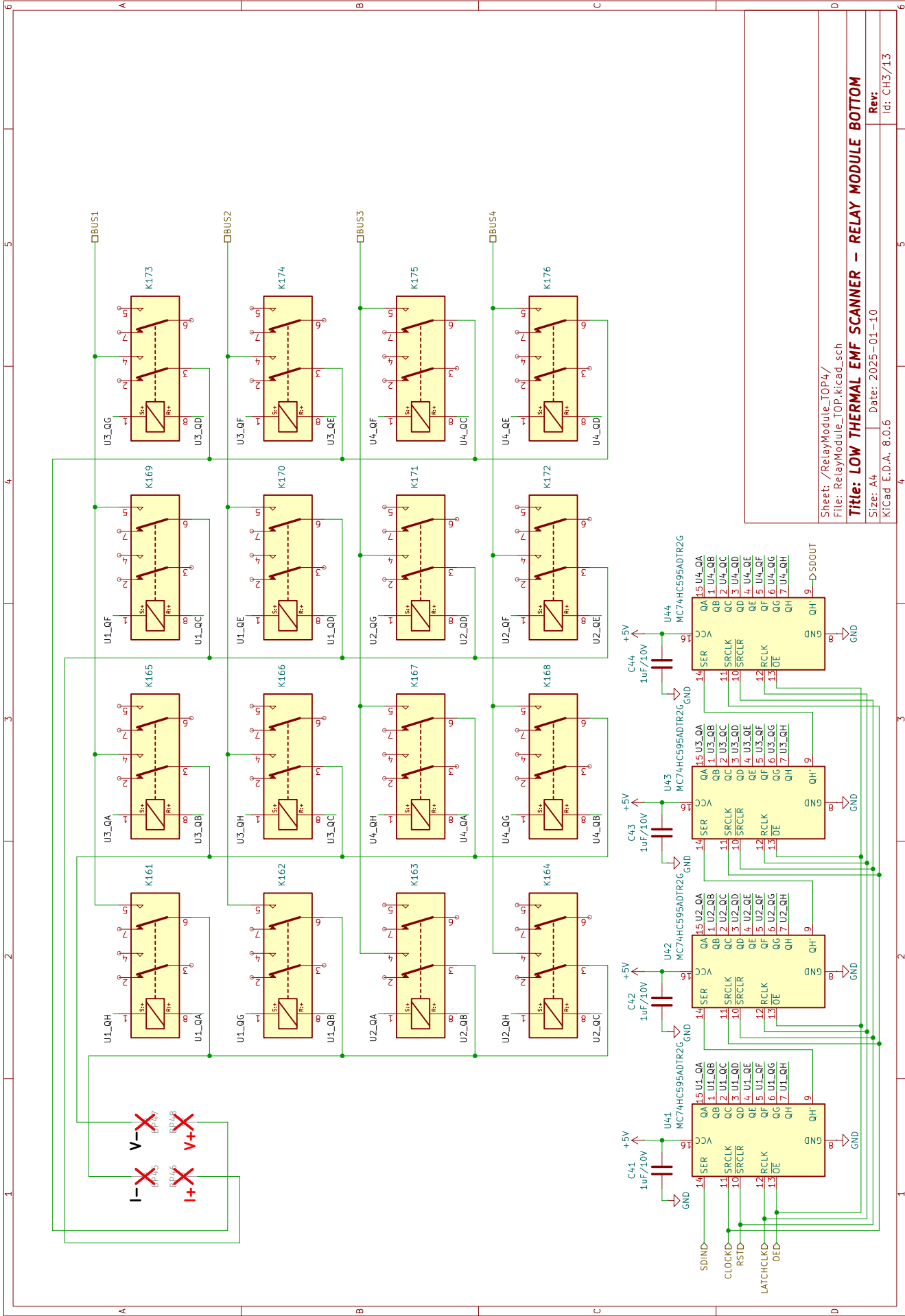
Size: A4 | Date: 2025-01-10

KiCad E.D.A. 8.0.6

Rev:

Id: 1/13



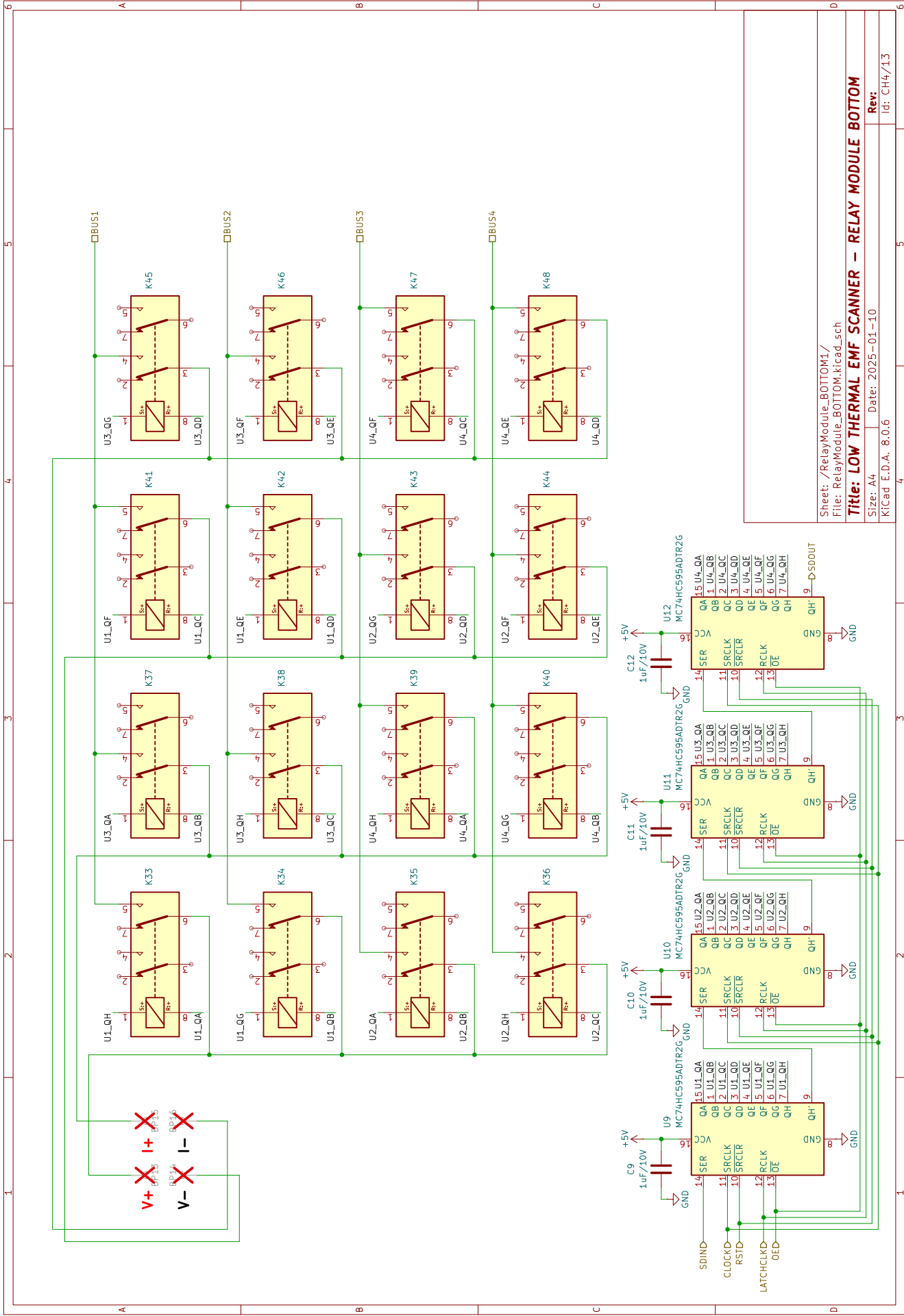


Sheet: /RelayModule_IOP4/
File: RelayModule_IOP.kicad.sch

Title: LOW THERMAL EMF SCANNER – RELAY MODULE BOTTOM

Size: A4
Date: 2025-01-10
KiCad E.D.A. 8.0.6
Id: CH3/13

Rev:

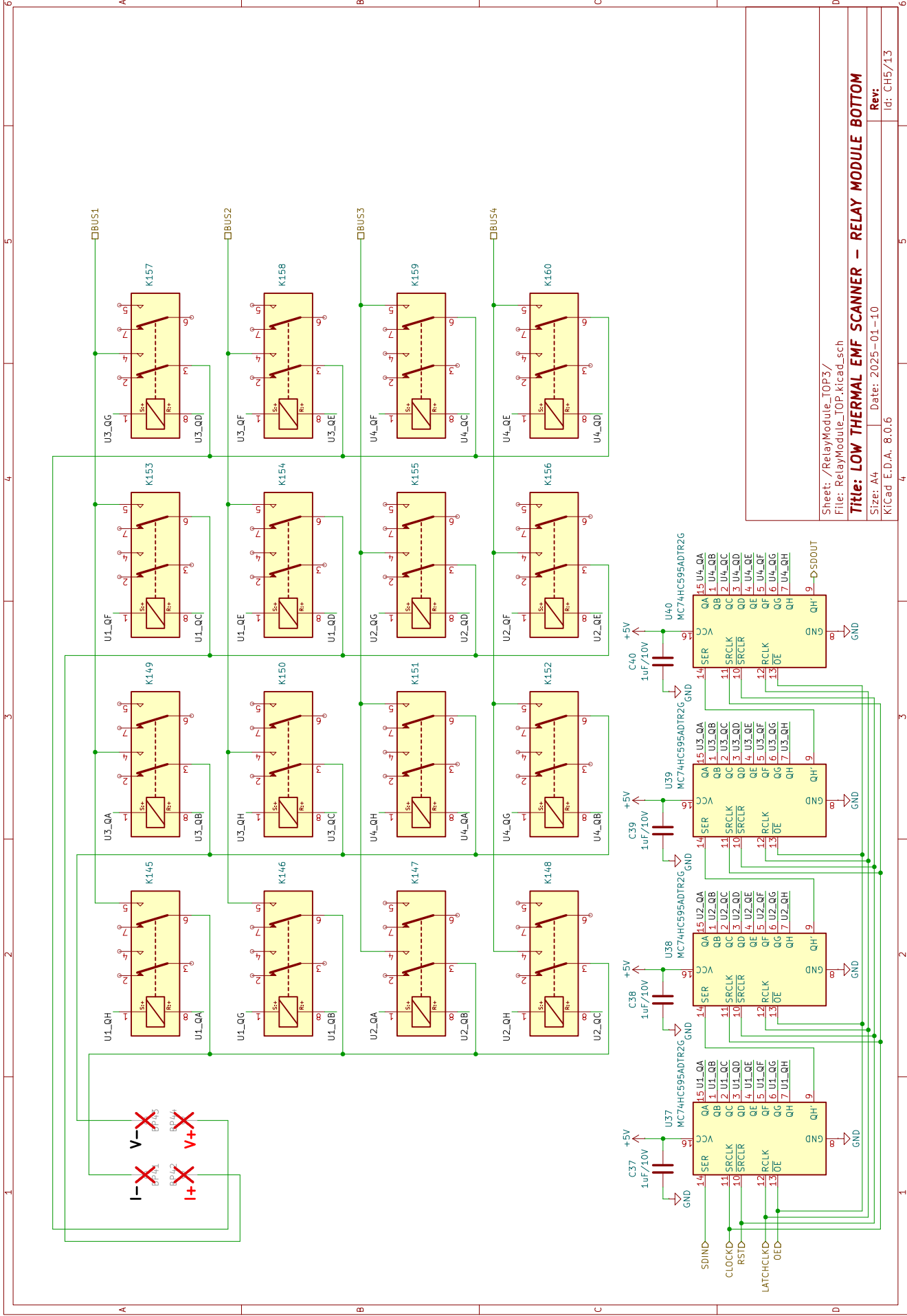


Sheet: /RelayModule_BOTTOM1/
 File: RelayModule_BOTTOM.kicad_sch

Title: LOW THERMAL EMF SCANNER – RELAY MODULE BOTTOM

Size: A4
 Date: 2025-01-10
 Rev: 1
 Id: CH4/13

KiCad E.D.A. 8.0.6

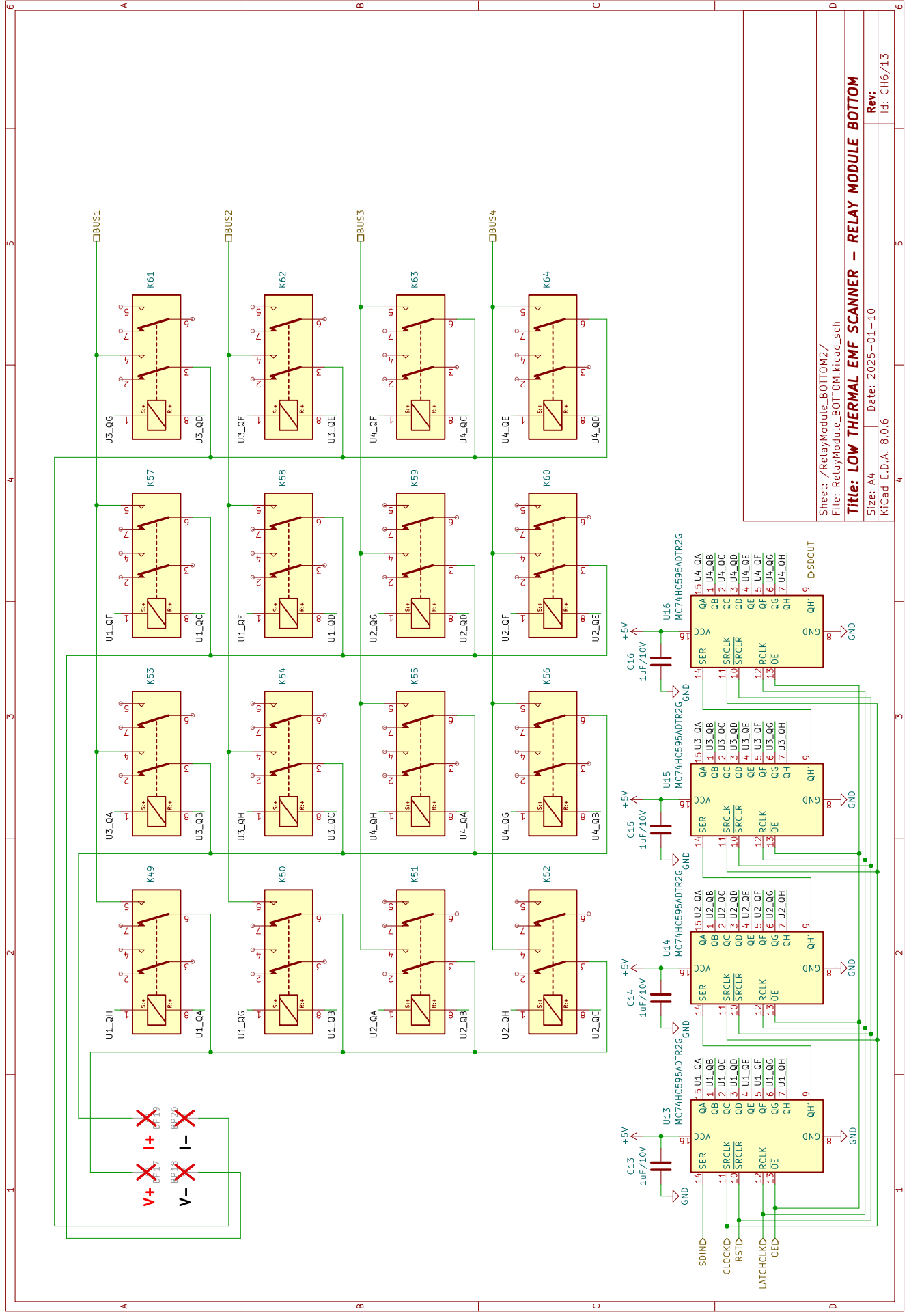
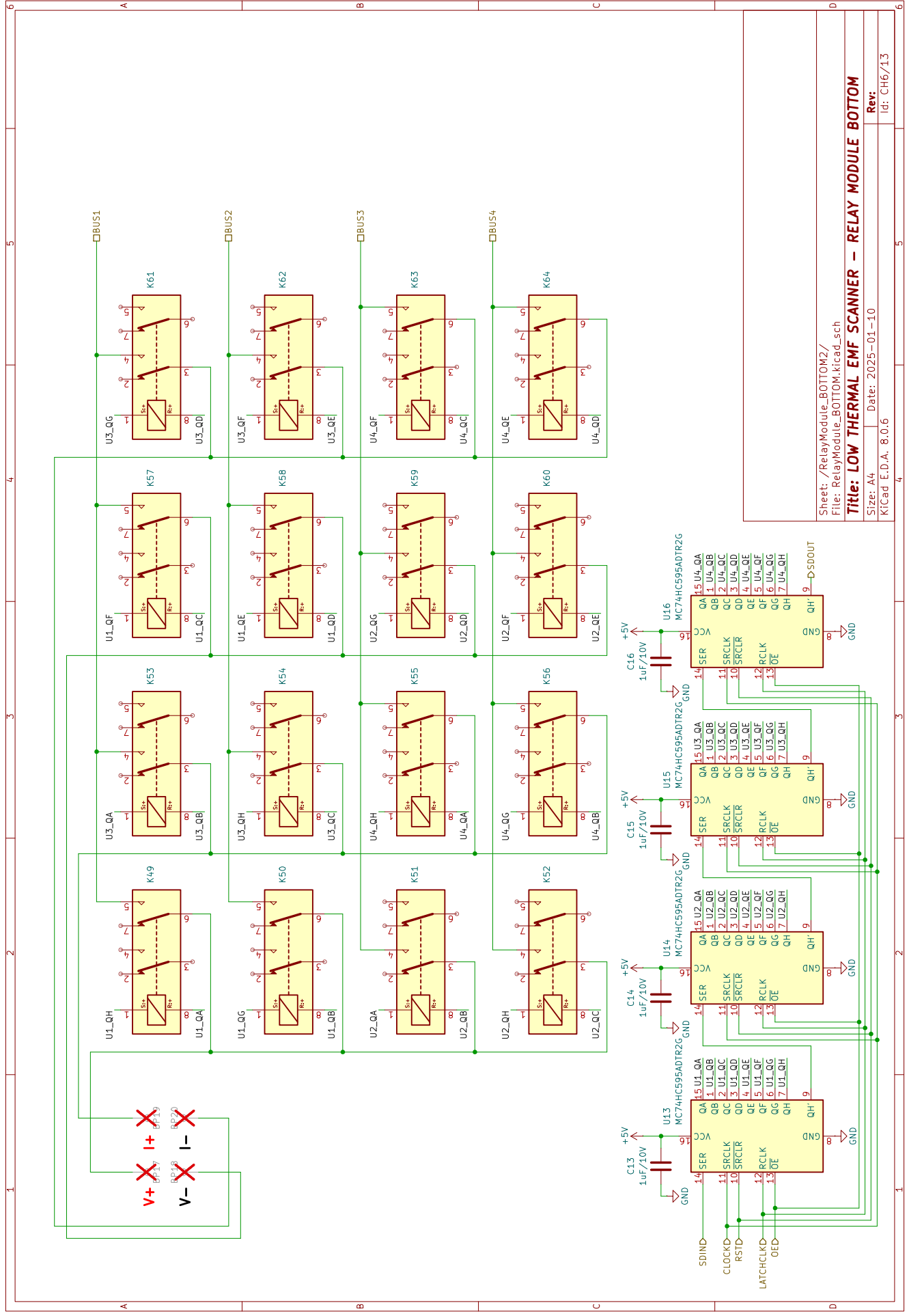
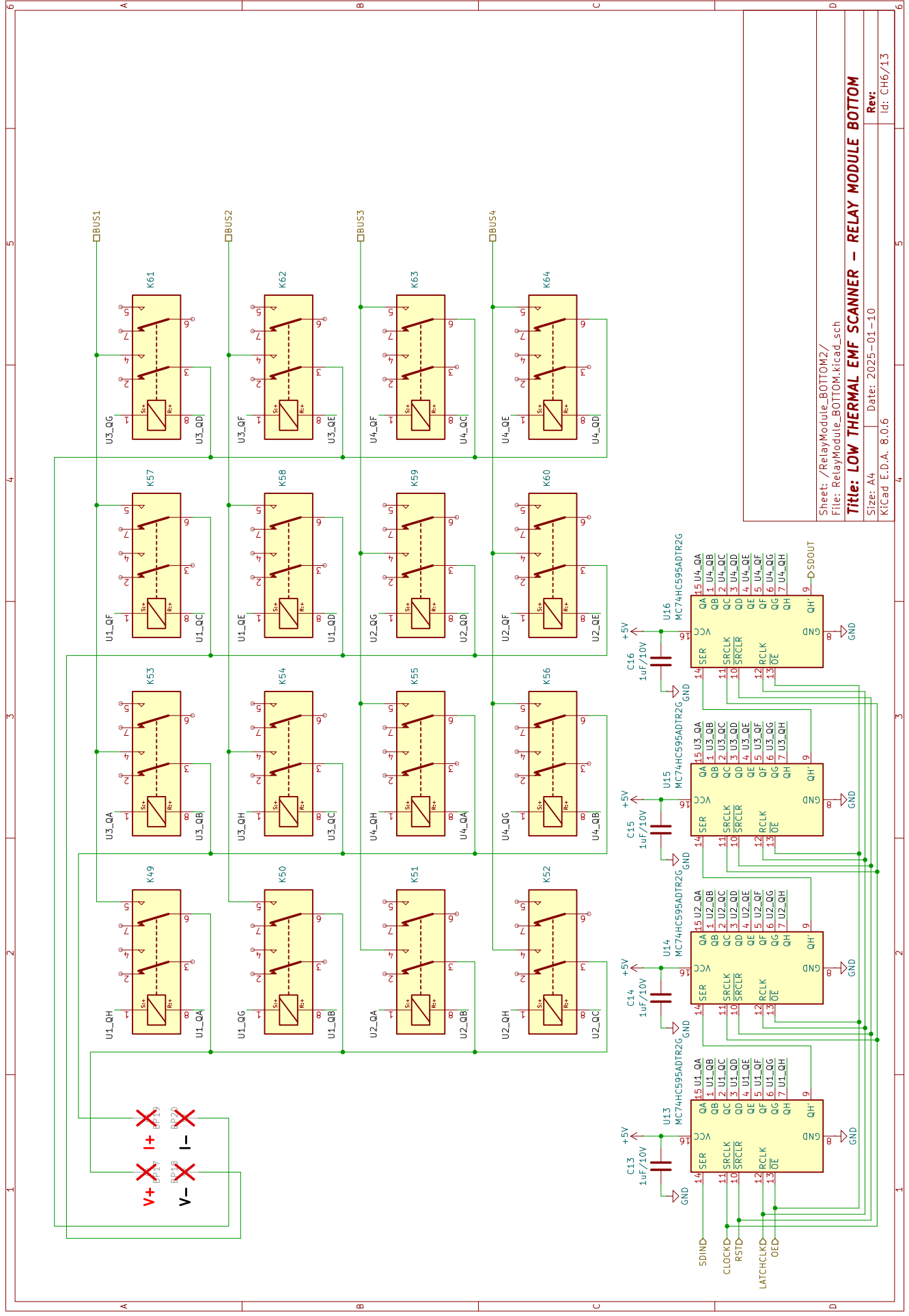
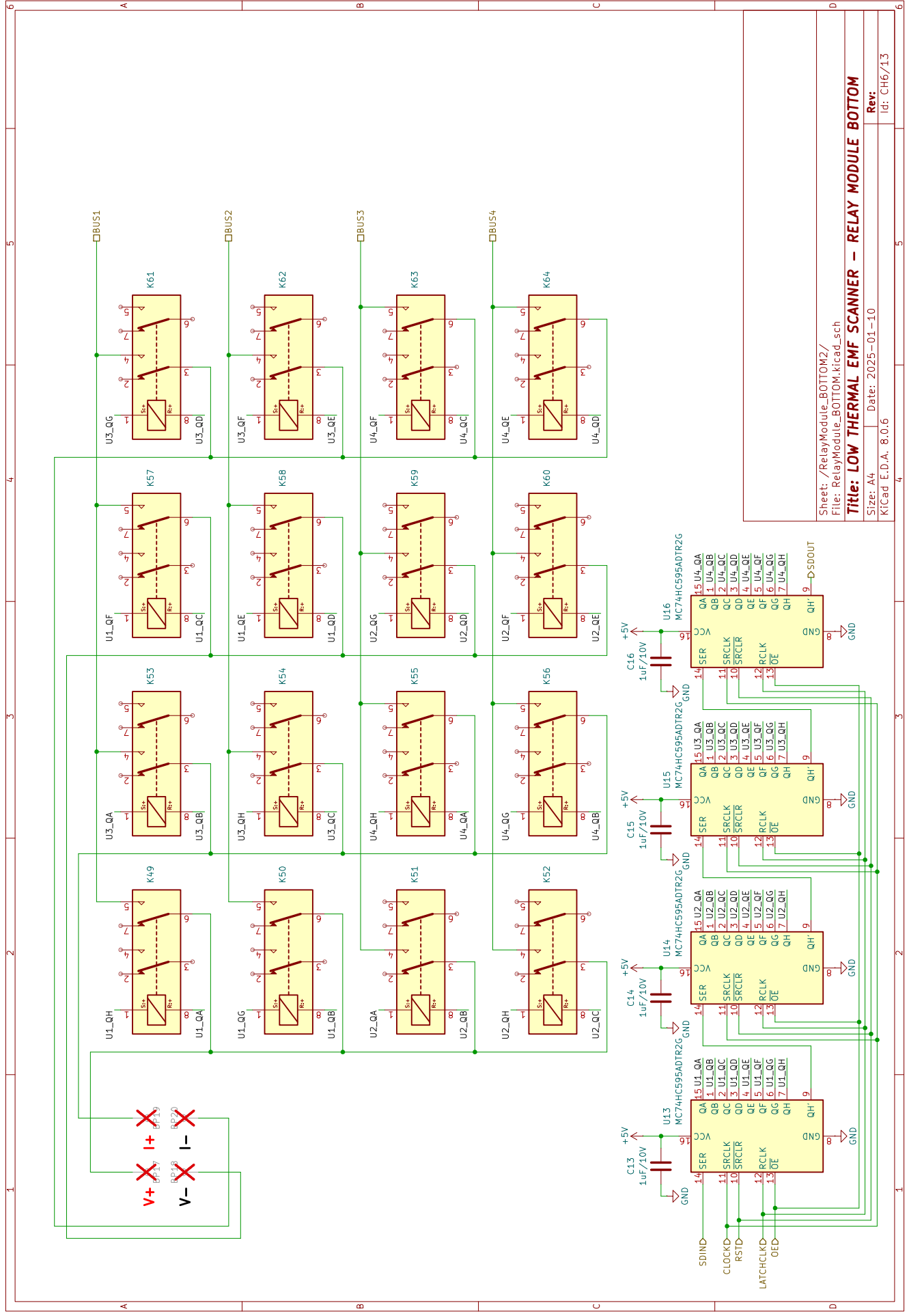
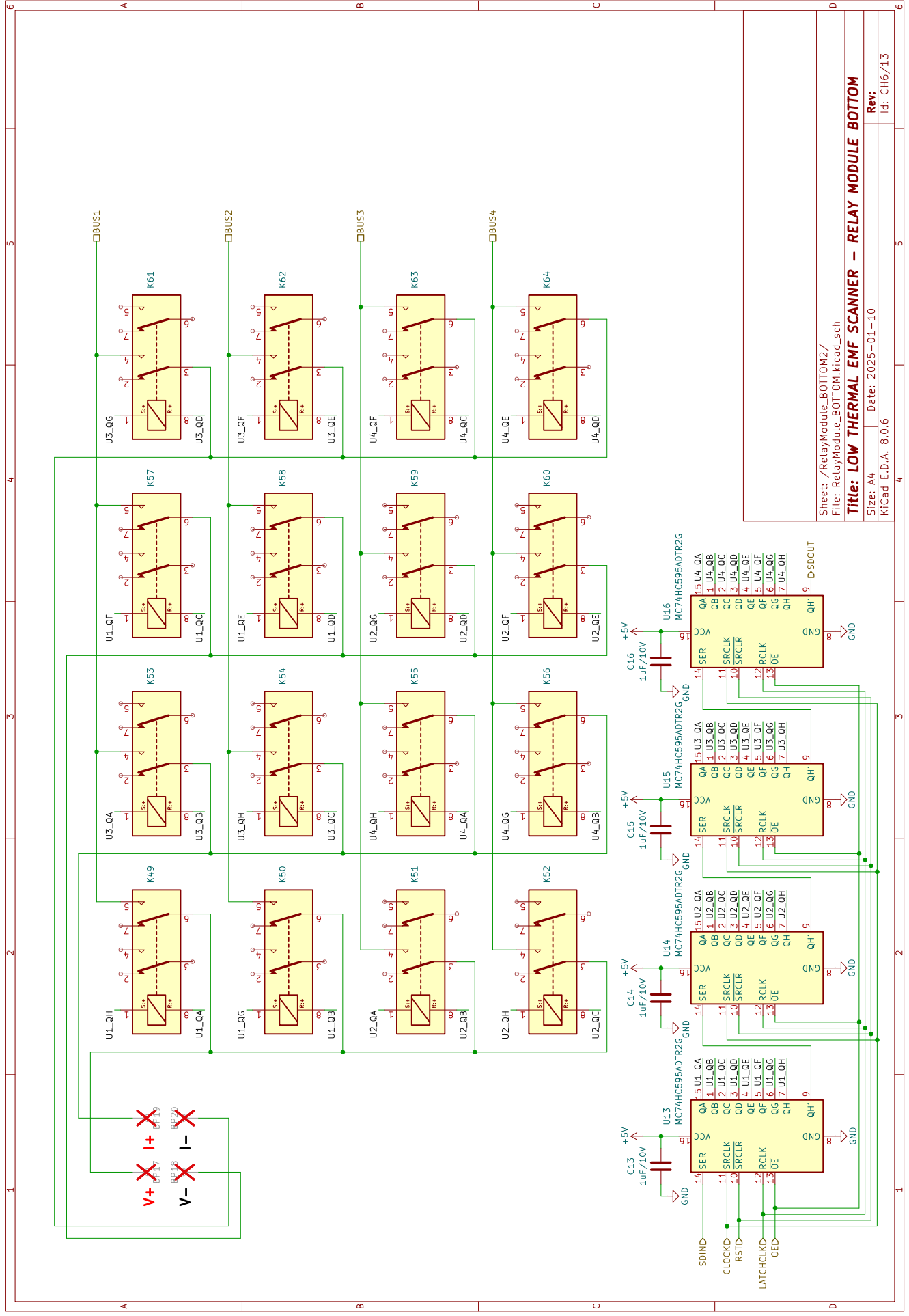
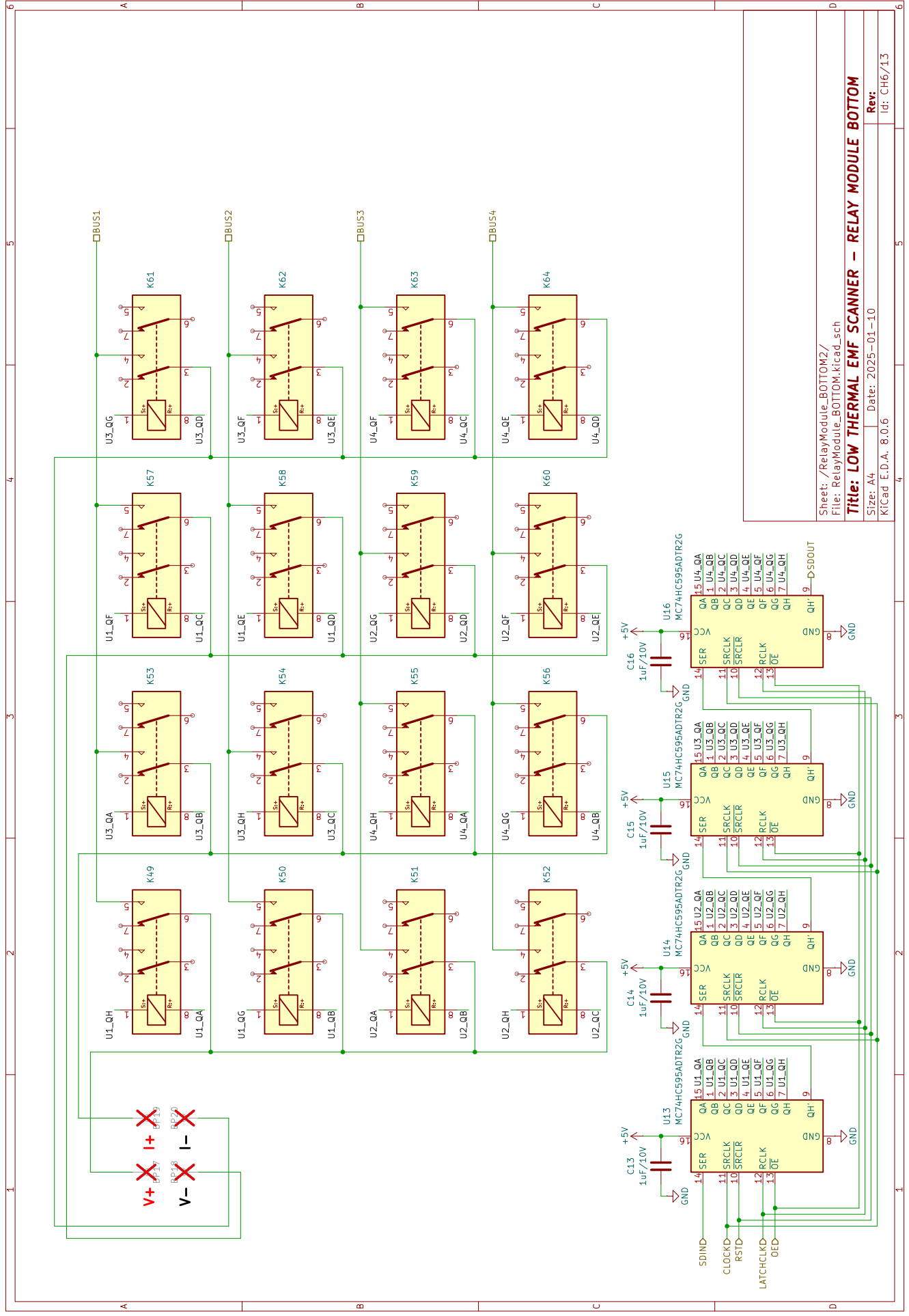


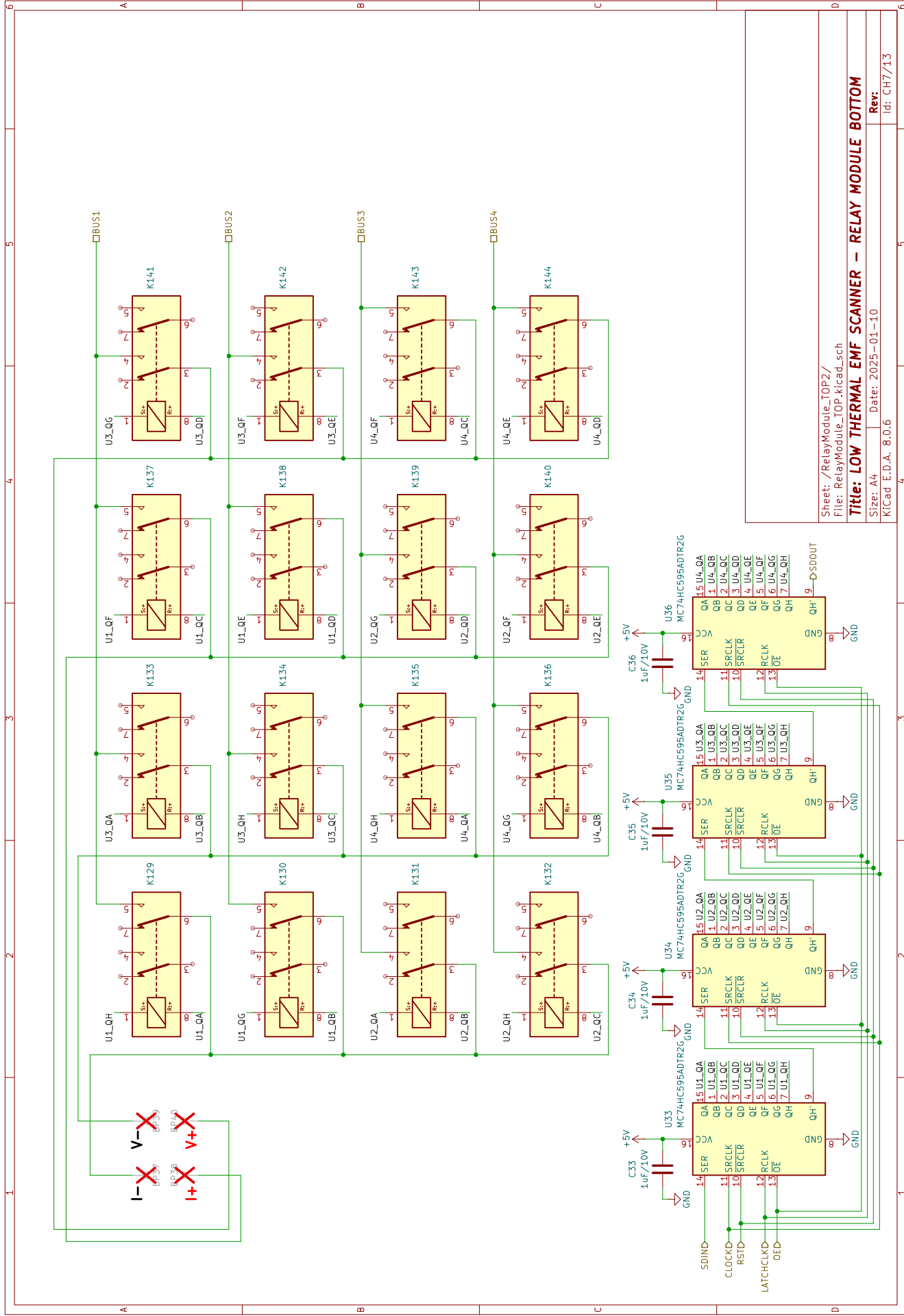
Sheet: /RelayModule_IOP3/
File: RelayModule_IOP.kicad.sch

Title: LOW THERMAL EMF SCANNER – RELAY MODULE BOTTOM

Size: A4
Date: 2025-01-10
KiCad E.D.A. 8.0.6
Id: CH5/13

Rev:





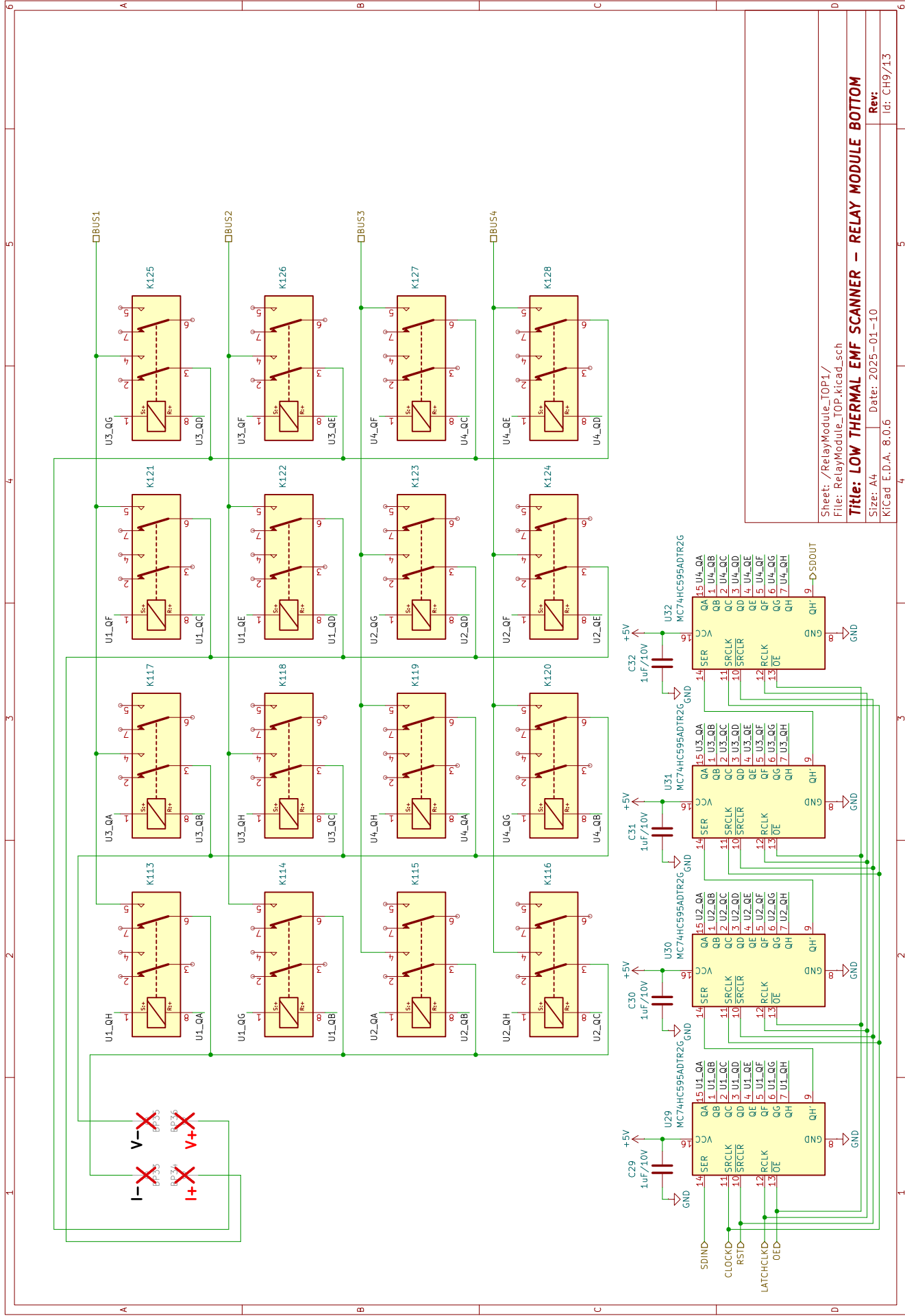
Sheet: /RelayModule_IOP2/
File: RelayModule_IOP.kicad.sch

Title: LOW THERMAL EMF SCANNER – RELAY MODULE BOTTOM

Size: A4
Date: 2025-01-10
KiCad E.D.A. 8.0.6

Rev:

Id: CH7/13



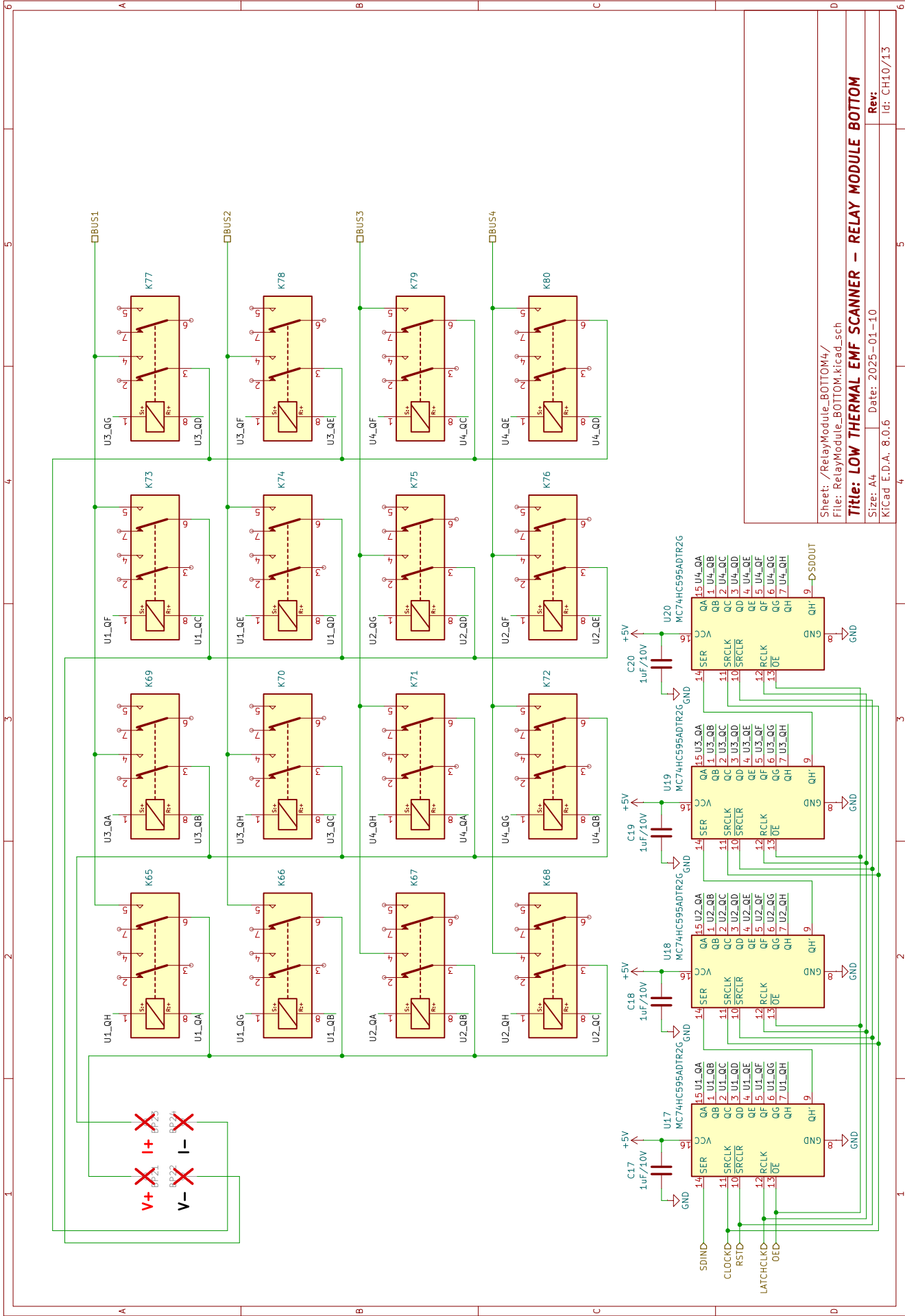
Sheet: /RelayModule_IOP1/
 File: RelayModule_IOP.kicad.sch

Title: LOW THERMAL EMF SCANNER – RELAY MODULE BOTTOM

Size: A4
 Date: 2025-01-10
 KiCad E.D.A. 8.0.6

Rev:

Id: CH9/13



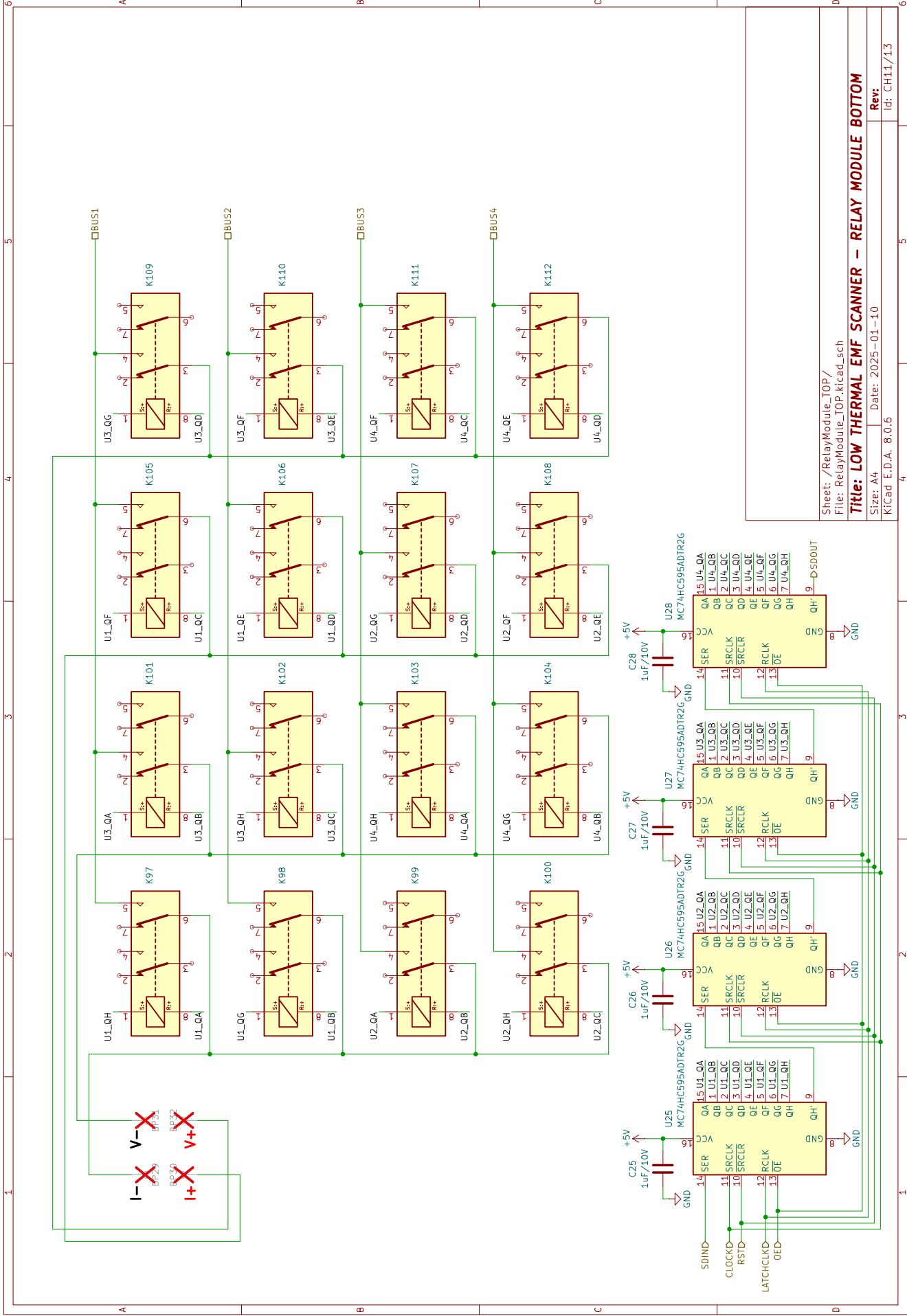
Sheet: /RelayModule_BOTTOM4/
File: RelayModule_BOTTOM.kicad_sch

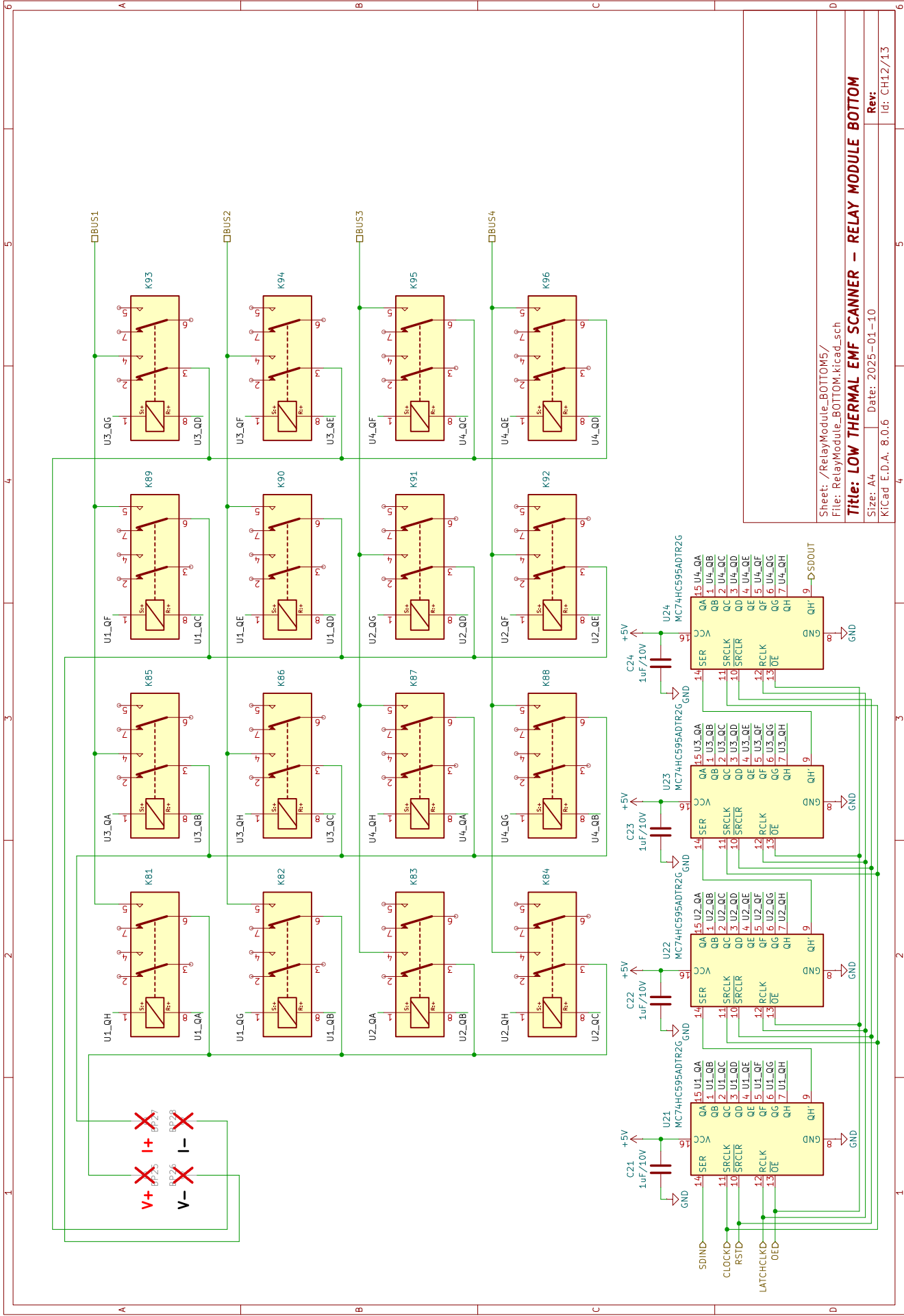
Title: LOW THERMAL EMF SCANNER - RELAY MODULE BOTTOM

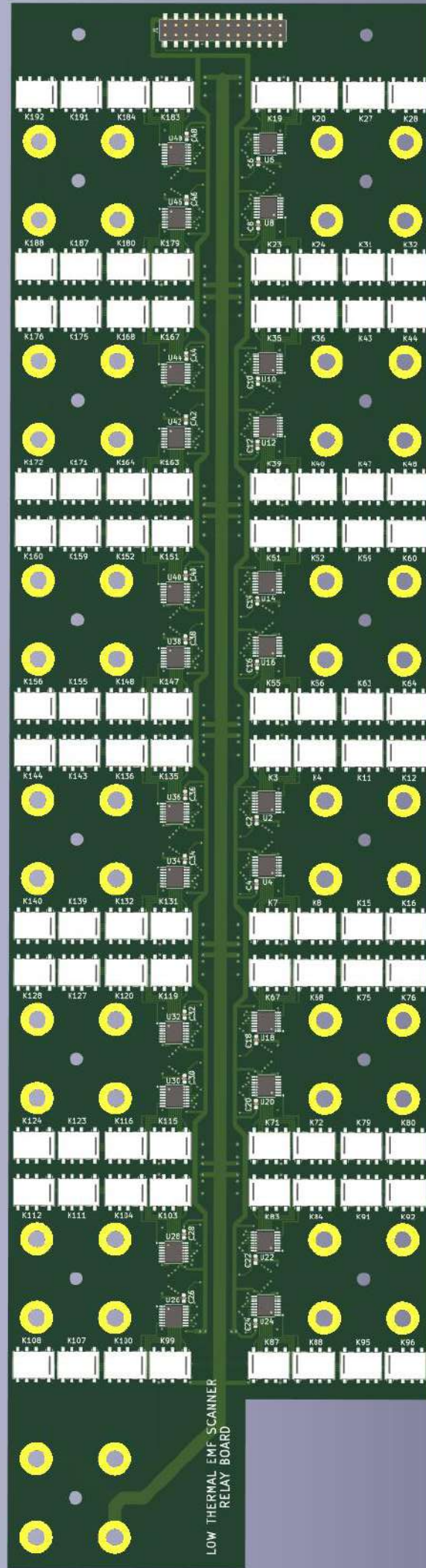
Size: A4
Date: 2025-01-10
KiCad E.D.A. 8.0.6

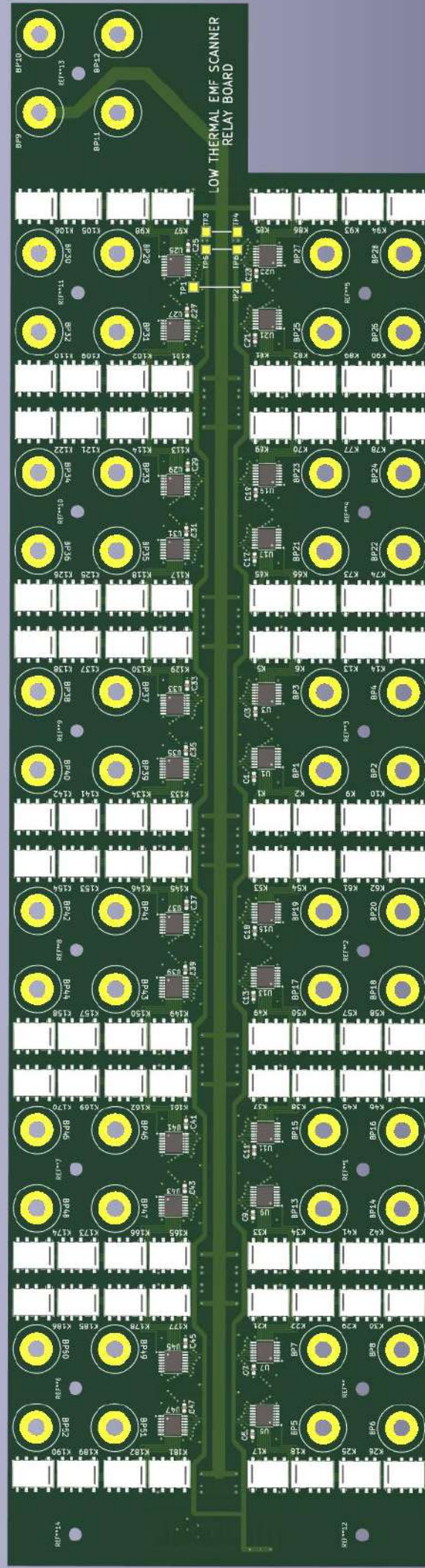
Rev:

Id: CH10/13



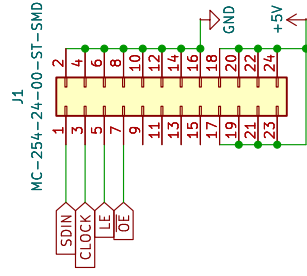
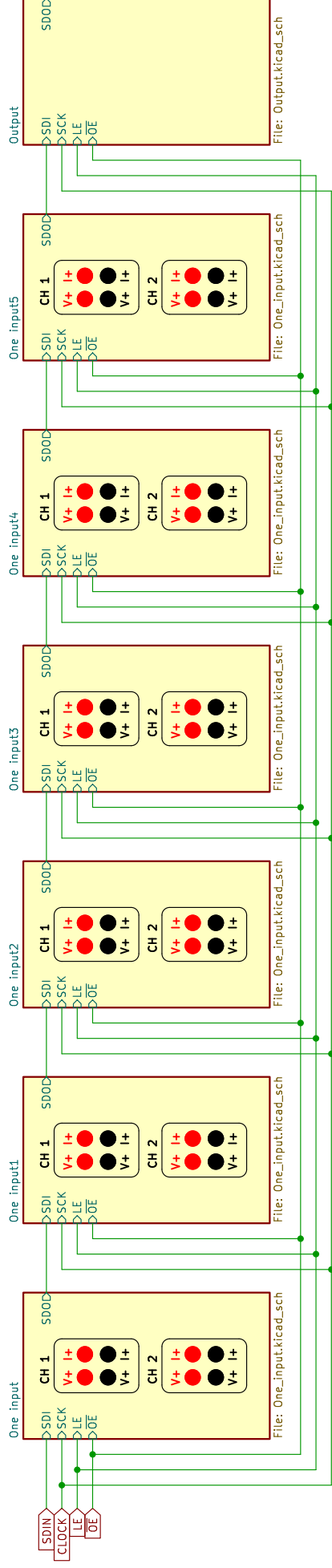


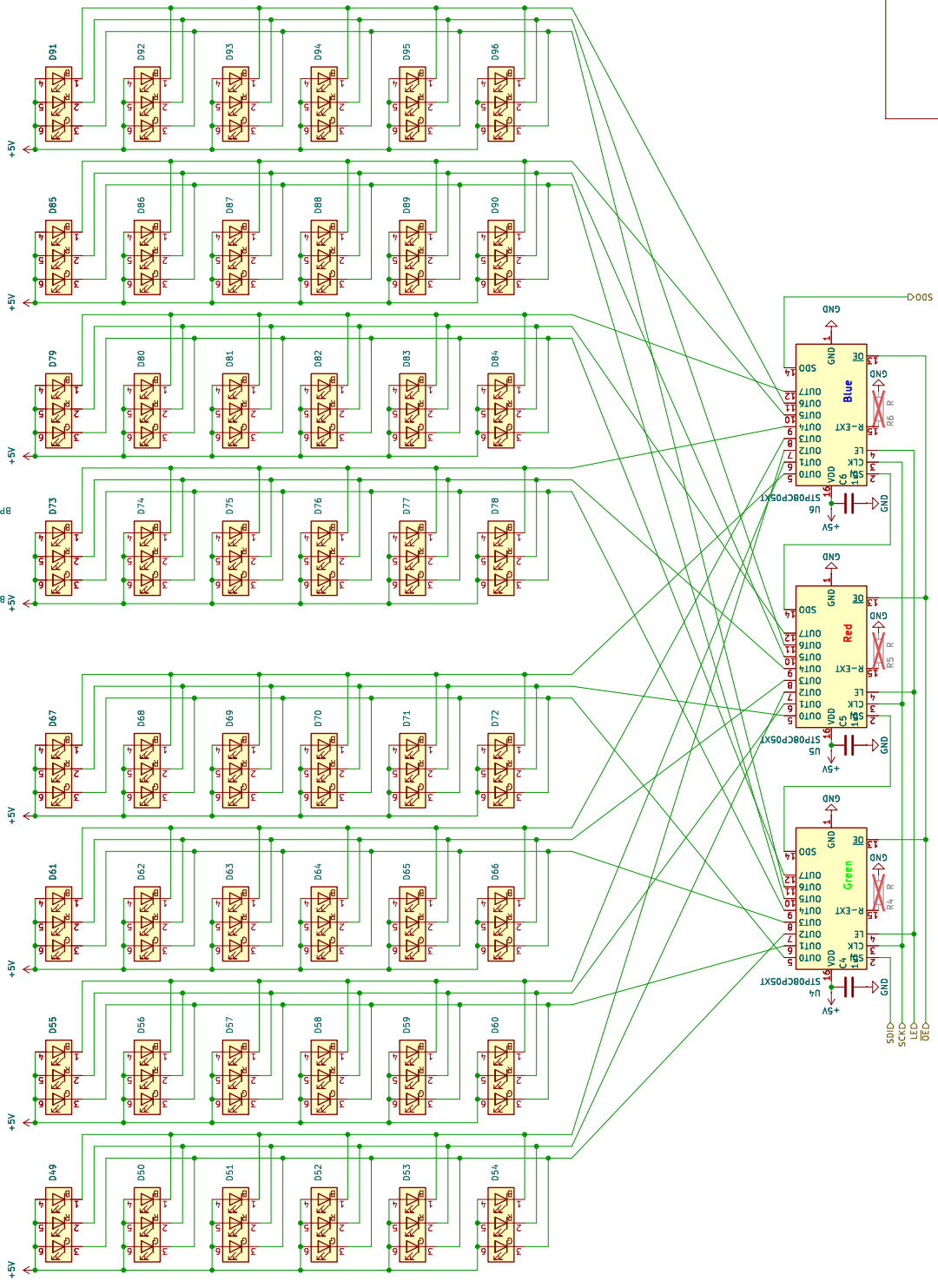
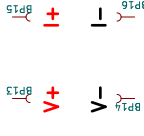
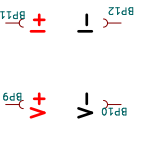


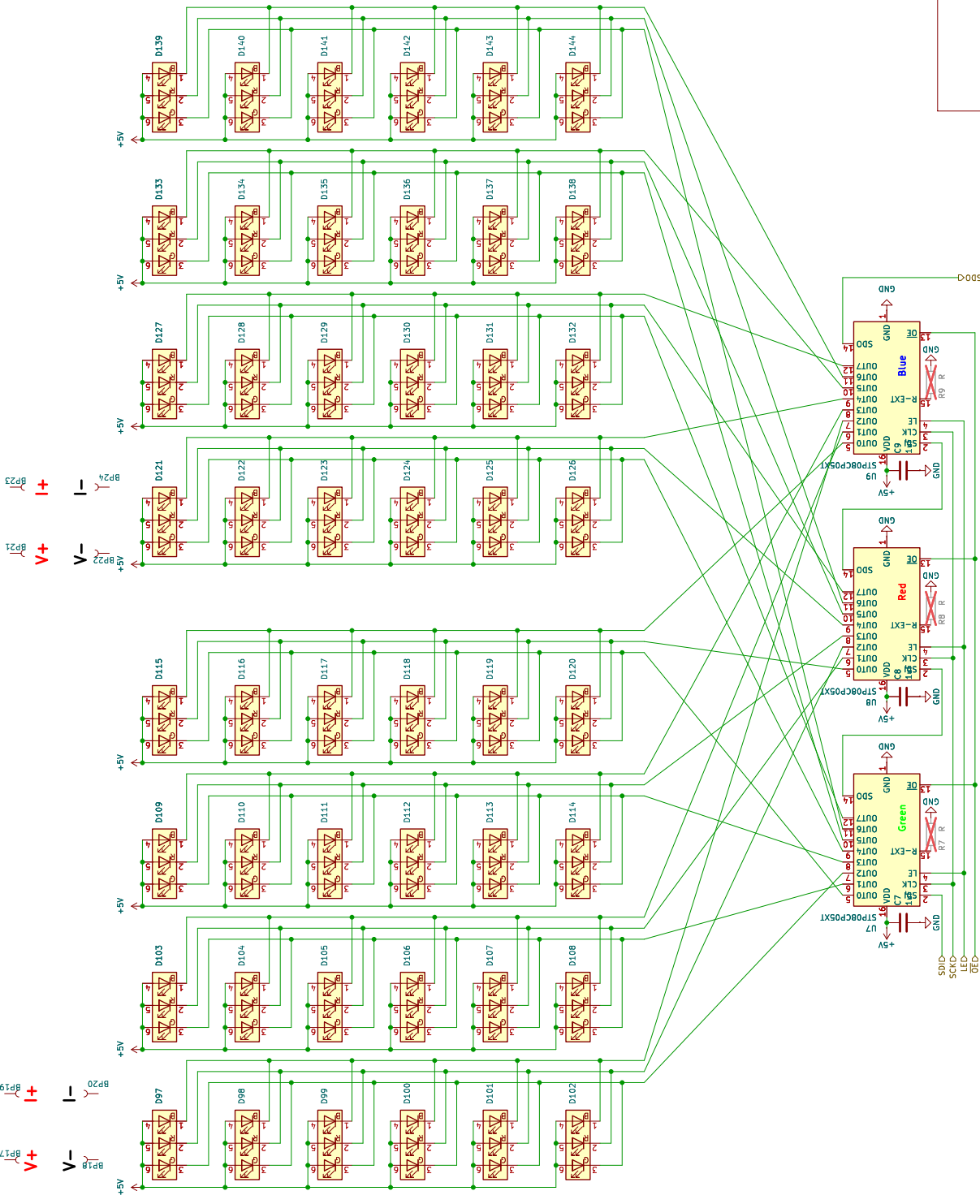


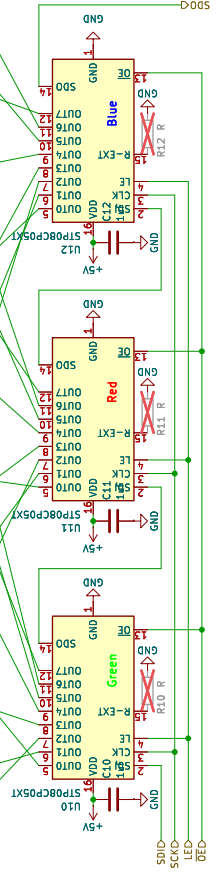
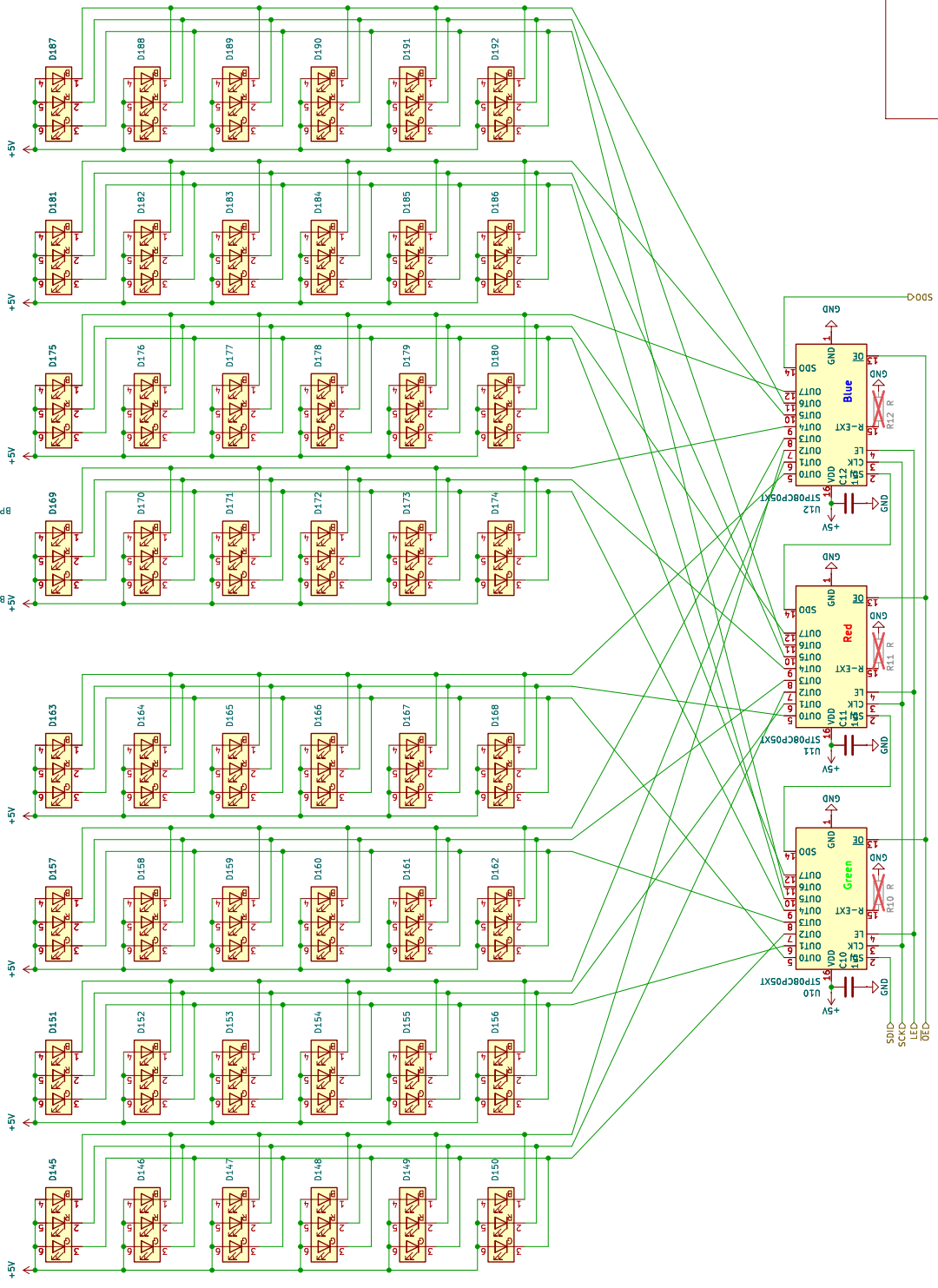
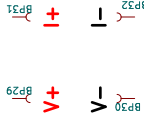
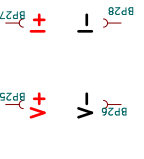
Comment	Quantity	Footprint	Designator Group
1 uF/10V	48	C_0603	C1-C48
G6KU-2F-Y-TR DC5	192	Relay_SMD:Relay_DPDT_Omron_G6K-2F-Y	K1-K192
MC-254-24-00-ST-SMD	1	Connector_PinHeader_2.54mm:PinHeader_2_P2.54mm_Vertical_SMD	J1
MC74HC595ADTR2G	48	Package_SO:TSSOP-16_4.4x5mm_P0.65mm	U1-U48

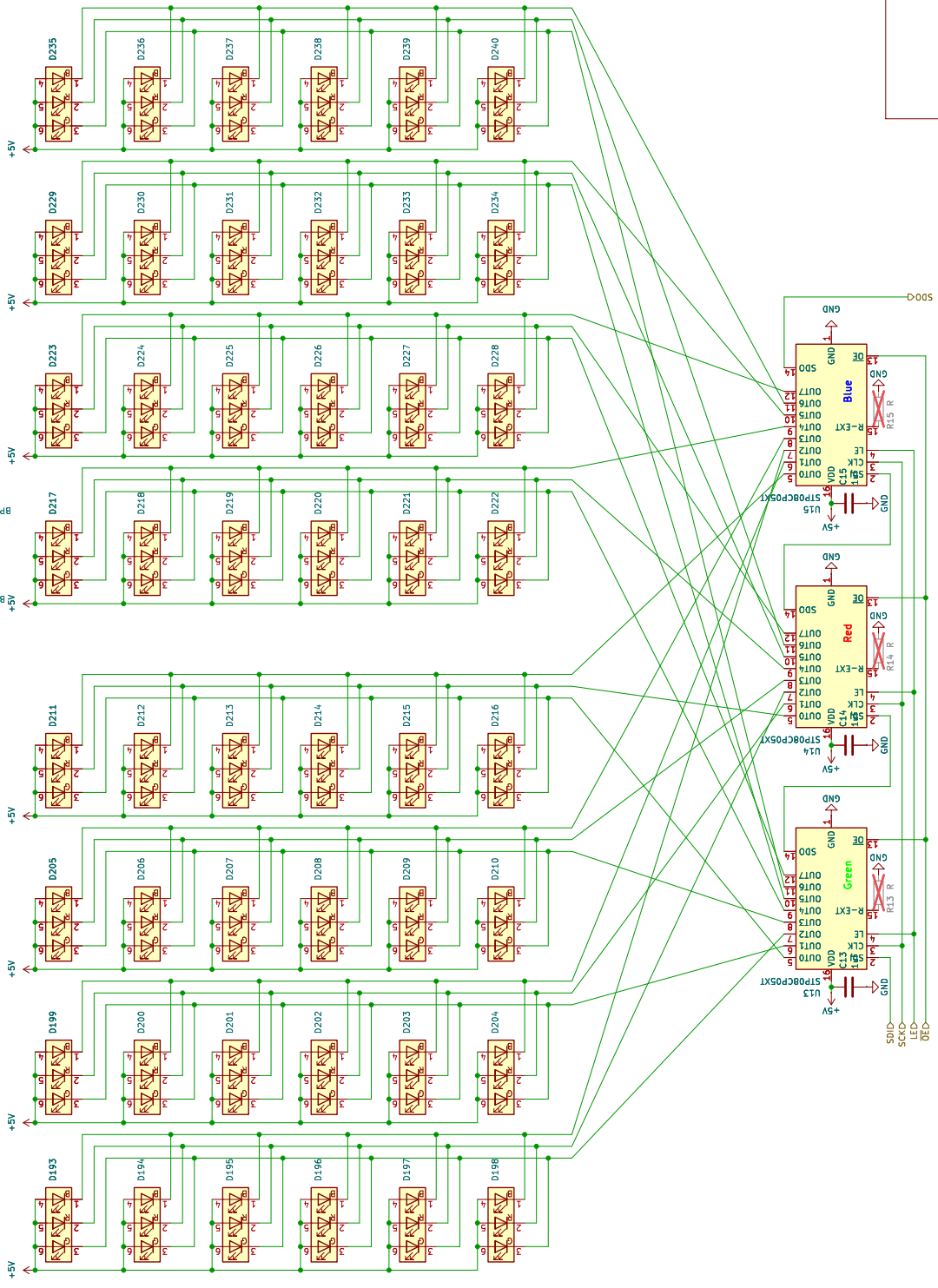
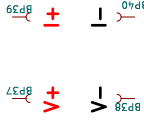
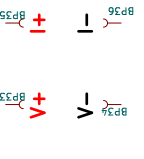
Príloha č.4 - Výrobné podklady - Front Panel

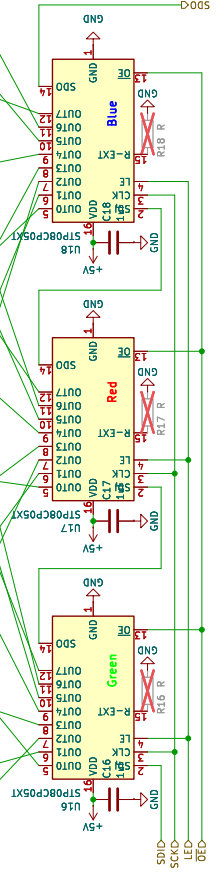
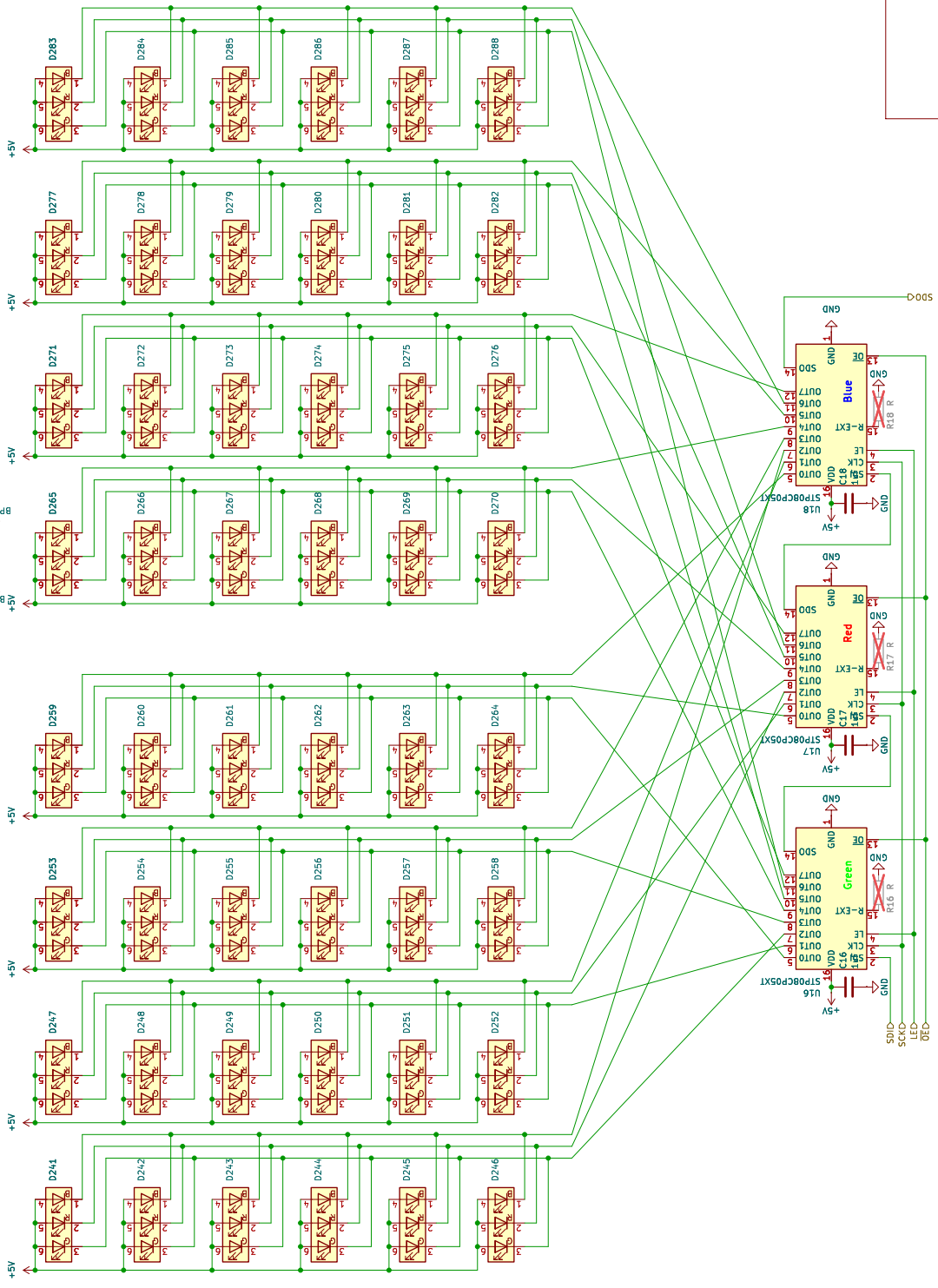
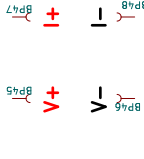
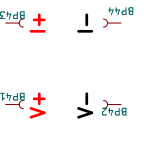


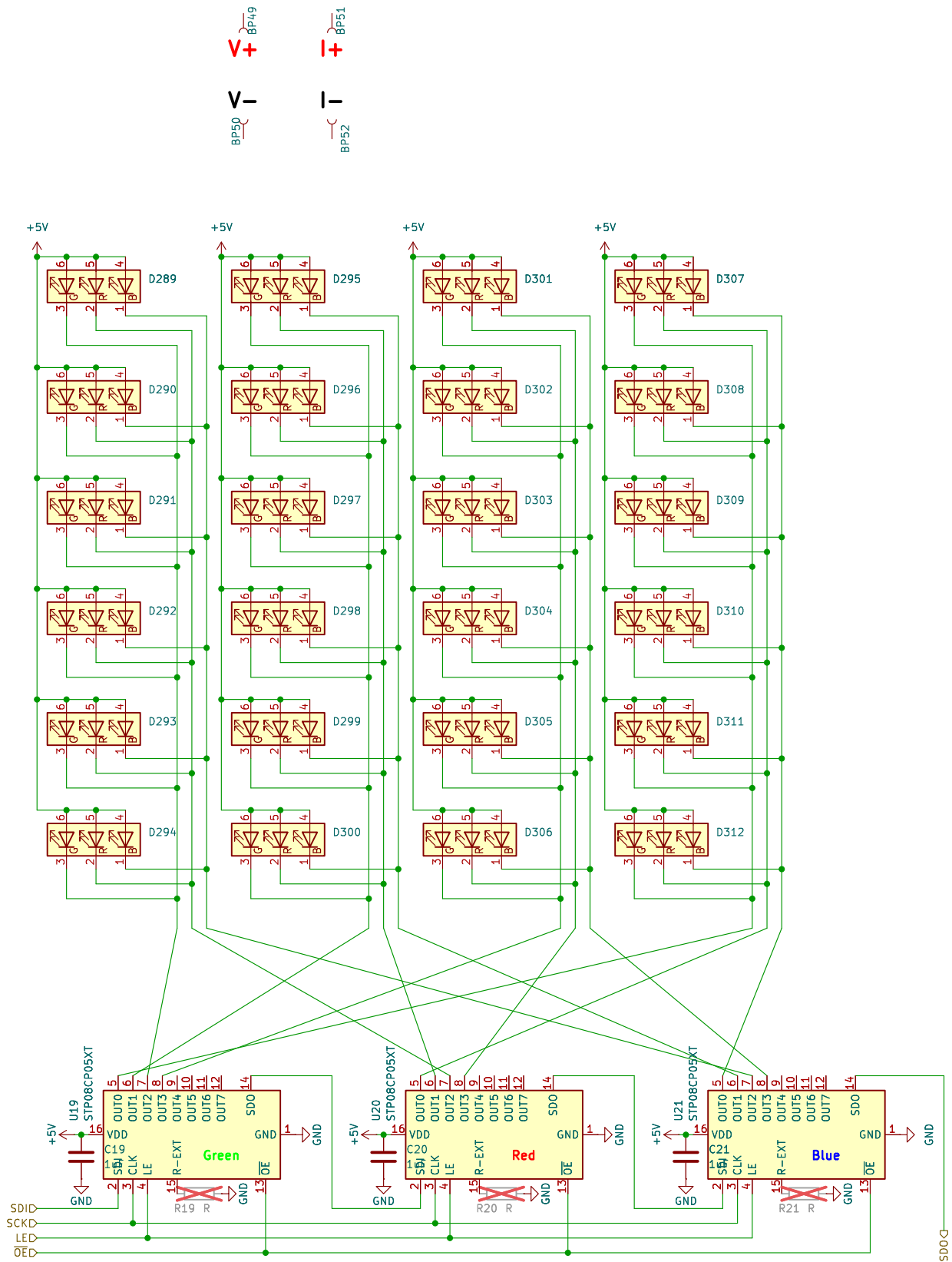


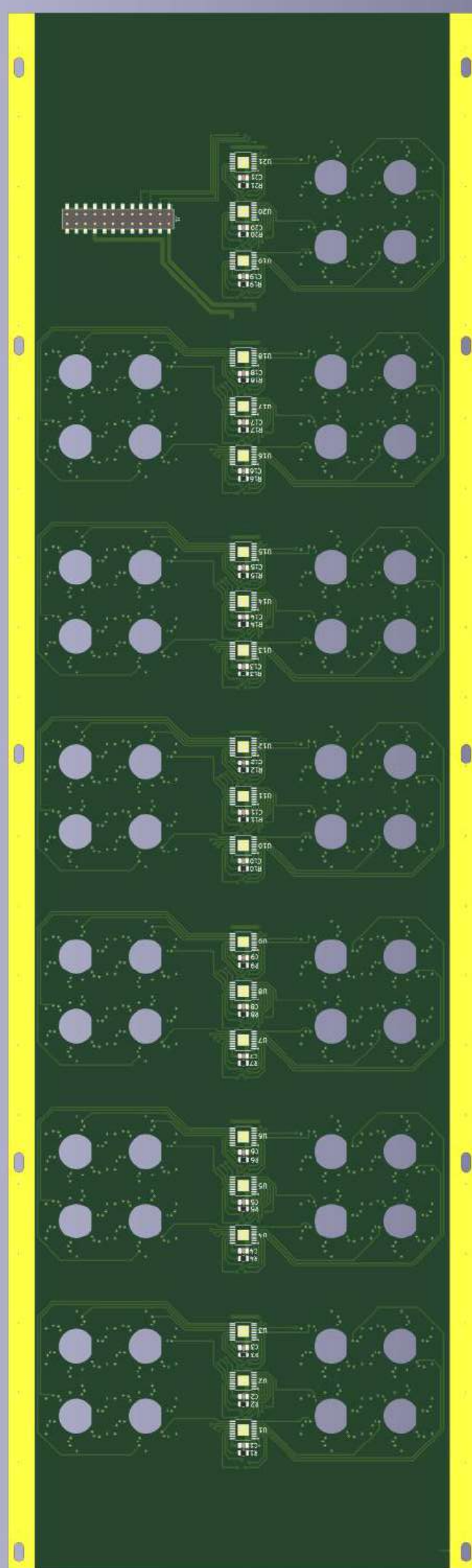




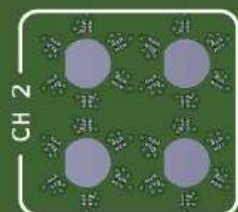
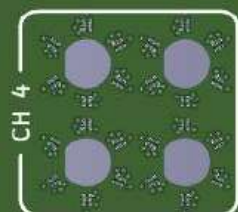
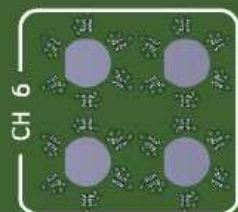
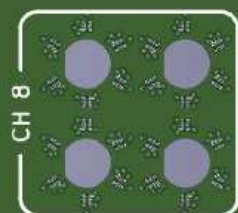
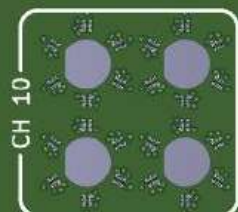
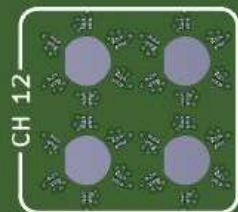
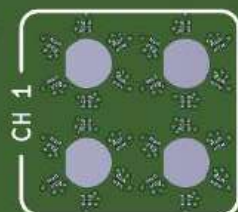
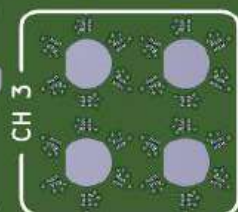
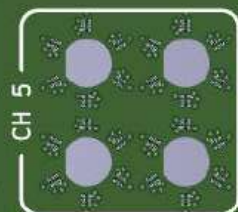
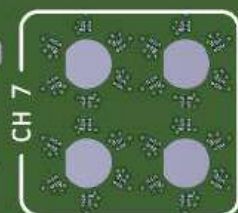
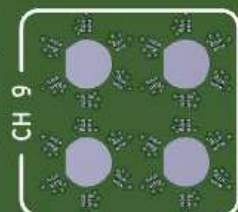
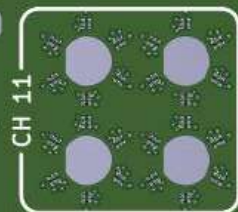
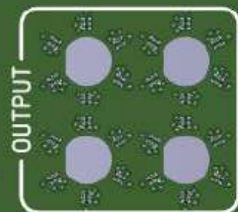






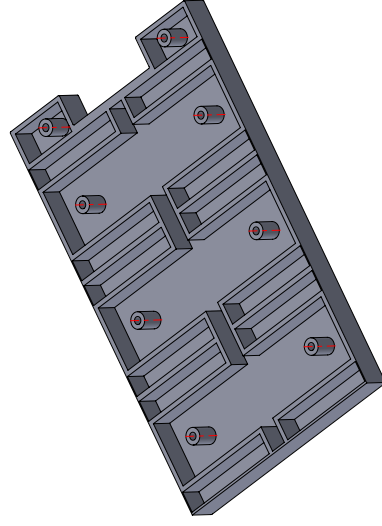
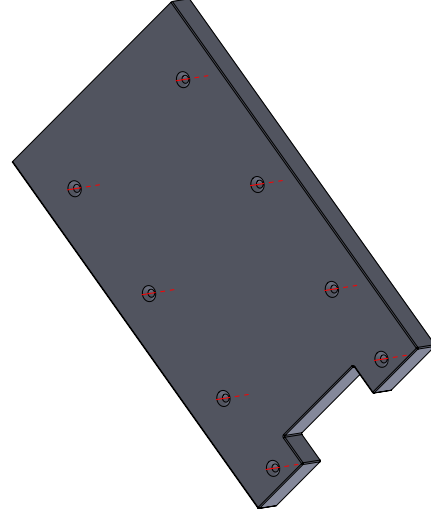
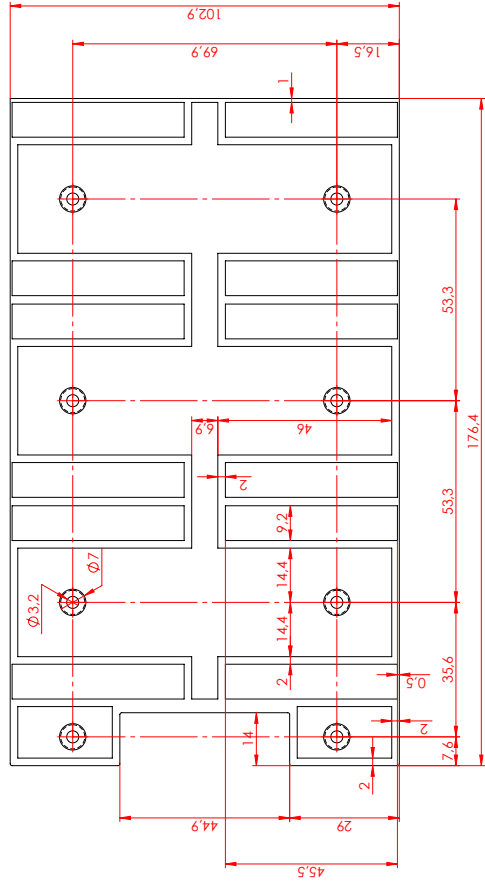


LOW THERMAL EMF SCANNER



Reference	Comment	Quantity	Footprint
C1-C21	1uF	21	C_0805
D1-D312	LED_RGB	312	IN-S66TFT5R5G5B
J1	MC-254-24-00-ST-SMD	1	Connector_PinHeader_2.54mm;Pin Header_2x12_P2.54mm_Vertical_S MD
R1-R21	R	21	R_0805
U1-U21	STP08CP05XT	21	Package_SO:HTSSOP-16- 1EP_4.4x5mm_P0.65mm_EP3x3mm

Príloha č.5 - Výrobné podklady krytu zadnej dosky s relé



									Tolerance ISO 2768-mK	Opracowanie Ra		Merka 1:1
Rev.	Papier	Datum	Zawieślo	Materiał	Cisła normy	PA6						
Výrobcoví	JANIGA	Dátum			Cisla Imhotep (kg)	0.07						
Priskúmal		Dátum			Poznámkas							
Schválil		Dátum										
Názov	KRYT DPS - CAST 2										Číslo dok.	
Typ												
Dok.												
9											Format A2	Lietov 1 List č. 1
										11	A2	

Príloha č.6 - Výrobné podklady uchytenia Arduina

