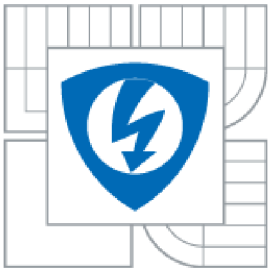
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

VÍCEKANÁLOVÉ ZAŘÍZENÍ PRO ELEKTROCHEMICKÉ MĚŘENÍ ZE SENZOROVÉHO POLE

MULTICHANNEL INSTRUMENTATION FOR ELECTROCHEMICAL MEASUREMENT FROM SENSOR ARRAY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. JAROMÍR ŽÁK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. JAROMÍR HUBÁLEK, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2010

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Jaromír Žák ***ID:*** 78403
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Vícekanálové zařízení pro elektrochemické měření ze senzorového pole

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V poslední době se v oblasti chemických a biochemických analýz požaduje analyzovat velké množství vzorků, tzv. "mass screening". Velmi populární je stále využití elektrochemických metod, které mají řadu nesporných výhod. V této práci bude nutné nastudovat problematiku měření chemických roztoků elektrochemickými metodami, hlavně voltametrickými. Pro potřeby analyzovat velké množství vzorků v krátkém čase bude nutné navrhnout senzorové pole, kde každá citlivá část (převodník) musí obsahovat 3-elektrodový systém. Velikost pole by měla odpovídat standardní titrační destičce pro 8x12 vzorků. Dále bude nutné navrhnout obvody pro jejich přepínání a vícekanálový potenciostat včetně programového vybavení pro měření běžnými voltametrickými metodami. V rámci práce bude celý systém realizován a otestovány jeho parametry na standardním vzorku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010 ***Termín odevzdání:*** 27.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D.

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Licenční smlouva
poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení:	Bc. Jaromír Žák
Bytem:	Rouchovany, Rouchovany 404, 675 57
Narozen/a (datum a místo):	10. 6. 1986, Ivančice

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

Prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1
Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

   ☐ disertační práce

   ☒ diplomová práce

   ☐ bakalářská práce

   ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
   (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Vícekanálové zařízení pro elektrochemické měření ze senzorového pole
Vedoucí/ školitel VŠKP:	doc. Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D.
Ústav:	Ústav mikroelektroniky
Datum obhajoby VŠKP:	

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

☒ tištěné formě – počet exemplářů 2

☒ elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2
Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
   - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
   - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
   - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
   - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
   - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy

   (z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3
Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 27. 5. 2010

…….. ……
Nabyvatel Autor

Abstrakt:

Práce se zabývá vývojem n-kanálového systému, který umožní provádět hromadnou analýzu několika vzorků pomocí elektrochemických měřicích metod. Senzorové pole obsahující 8x12 standardních tříelektrodových senzorů vytvořených na DPS může být použito pro detekci těžkých kovů, toxických látek a jiných sloučenin. Senzorový multiplexor připojuje jednotlivé senzory pole k osmikanálovému přesnému potenciostatu navrženému pro elektrochemickou analýzu s limitem detekce pod 10 pA. Senzorový multiplexor lze automaticky ovládat potenciostatem. Vyvinutý systém je schopný měřit až osmi kanály najednou a lze jej snadno upravit pro měření jiných (nechemických) veličin. Data jsou zasílána do obslužné aplikace v počítači, kde je lze posléze zpracovávat a vyhodnocovat.

Abstract:

The work deals with n-channel system enabling many sample analysis at sort time from sensor array using electrochemical methods. The 8x12 sensor arrays are formed from 3-electrodes system created on PCB which can be used for heavy metal analysis and toxic substances determination. The control unit switches each 3-electrode sensor to 8-channel precise potentiostat which was designed for electrochemical analysis with current sensitivity below 10 pA. The potentiostat can synchronize with control unit. Developed system is able to measure up to eight single inputs and may be simply converted to measure other nonchemical values. Measured data will be sent to user-friendly application in computer and analyzed or saved consequently.

Klíčová slova:

Potenciostat, senzorové pole, senzorový multiplexor, elektrochemie, voltametrie, mass screening.

Keywords:

Potentiostat, sensor array, sensor multiplexor, electrochemistry, voltammetry, mass screening.

Bibliografická citace díla:

ŽÁK, J. *Vícekanálové zařízení pro elektrochemické měření ze senzorového pole*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 103 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. 5. 2010

.....

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Jaromírovi Hubálkovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v průběhu zpracovávání diplomové práce. Dále děkuji pracovníkům Masarykovy univerzity a Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně, jmenovitě pak Prof. RNDr. Libuši Trnkové, CSc., doc. Ing. René Kizkovi, Ph.D. a jejich týmům, bez jejichž pomoci by nebylo možné systém dokončit a otestovat.

Projekt byl realizován za pomoci projektu KAN208130801 a projektu GAČR 102/08/1546.

Obsah

Úvod 11
1 Rozbor možností řešení 12
1.1 Možnosti převodu chemických veličin na elektrické 12
1.1.1 Elektrochemické převodníky 12
1.1.2 Gravimetrické, teplotní, optické a fluorescenční převodníky 14
1.2 Nejvhodnější metody převodu a principu zapojení 17
2 Vlastní konstrukce 18
2.1 Možná zapojení a konstrukční uspořádání 18
2.2 Výběr použitých součástek 24
2.3 Získané výsledky na testovaných zapojeních 26
2.4 Senzorové pole 27
2.5 Senzorový multiplexor 28
2.6 Potenciostat 30
2.6.1 Vstupní analogové moduly 30
2.6.2 Řídící digitální část 33
2.6.3 Komunikace s počítačem 36
2.6.4 Napájecí obvody 37
2.7 Alternativní možnosti využití zařízení 39
3 Programové vybavení 41
3.1 Firmware senzorového multiplexoru 41
3.2 Firmware mikrokontroléru potenciostatu 44
3.3 VHDL popis programovatelného obvodu CPLD 46
3.4 Komunikace mezi počítačem a zařízením 50
3.5 Ovládací software v počítači 52
3.5.1 Hlavní okno aplikace a připojení zařízení 52
3.5.2 Kalibrace zařízení 54
3.5.3 Měření a tvorba měřicích profilů 55
3.5.4 Import dat pro vyhodnocení získaných výsledků 59
3.5.5 Práce s prohlížečem výsledků a jejich vyhodnocení 60
3.5.6 Doplňkové funkce programu 64
4 Zjištěné parametry přístroje a výsledky měření 65
4.1 Charakteristika napěťového výstupu 65
4.2 Charakteristika proudového převodníku 67
4.3 Testovací měření a vyhodnocení výsledků 70
4.4 Testovací měření nechemických veličin 73
5 Závěr 76
6 Použitá literatura 77
7 Seznam použitých zkratek 79
8 Přílohy 80

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Principy iontově selektivních senzorů A) standardních a B) ISFETů (viz. [1]) .. 13
Obrázek 2 – Uspořádání standardního gravimetrického převodníku [1] 15
Obrázek 3 – Řez teplotním chemosenzorem metanu se semistorem [1] 15
Obrázek 4 – Konstrukční uspořádání všech komponent přístroje 18
Obrázek 5 – Blokové schéma vnitřního uspořádání potenciostatu 19
Obrázek 6 – Návrh prostorového uspořádání vnitřních obvodů potenciostatu 19
Obrázek 7 – Znázornění sběrnicového propojení vstupních modulů s řídícím modulem 20
Obrázek 8 – Varianty zapojení vstupů potenciostatu a náhradní schéma senzoru 21
Obrázek 9 – Převodník proudu na napětí s A) invertujícím zapojením OZ, B) T-článkem 22
Obrázek 10 – Zapojení použitého převodníku I na U 23
Obrázek 11 – Fotografie senzorového pole - galvanická Pt na společných, polymerní uhlíková pasta (Dupont) na pracovních a Ag/AgCl polymerní pasta na referenčních elektrodách 27
Obrázek 12 – Nákres propojení senzorového pole s multiplexorem a jeho výstupy 29
Obrázek 13 – Zapojení A) DA a B) AD převodníků vstupních modulů 31
Obrázek 14 – Schéma zapojení A) generátoru napětí a B) převodníku I/U 31
Obrázek 15 – Schéma zapojení A) napájecích obvodů a B) generátoru virtuální země 32
Obrázek 16 – Výsledné rozmístění bloků první verze vstupního modulu na DPS 32
Obrázek 17 – Vnitřní blokové zapojení obvodu CPLD XC95144XL [17] 33
Obrázek 18 – Kompletní propojení řídících obvodů potenciostatu 34
Obrázek 19 – Příklady druhů krystalových oscilátorů 35
Obrázek 20 – Zapojení obvodu pro komunikace s počítačem přes USB 36
Obrázek 21 – Zjednodušené vnitřní schéma převodníku USB/UART FT232R [20] 36
Obrázek 22 – Detail napájecích obvodů 37
Obrázek 23 - Alternativní zapojení jako A) zdroje napětí, B) proudu a C) voltmetru 39
Obrázek 24 - Alternativní zapojení pro měření A) VA charakteristik, B) kapacit, proudů a napětí diodou a C) nabíjecích a vybíjecích charakteristik kondenzátorů a izolantů 40
Obrázek 25 - Alternativní zapojení pro analýzu přenosových charakteristik A) neznámých systémů, nebo B) optických prostředí 40
Obrázek 26 – Znázornění signálů IRC čidla pro oba směry točení (Levý a Pravý) 42
Obrázek 27 – Znázornění tří možných softwarových metod vyhodnocení signálů IRC čidla (L a P jsou směry otáčení): A) Bez potlačení zákmitů, B) S časovým potlačením zákmitů, C) S potlačením zákmitů pomocí příznaků 43
Obrázek 28 – Struktura dat A) uložených v RAM a B) posílaných do PC 45
Obrázek 29 – Struktura vnitřního zapojení obvodu CPLD popsaného jazykem VHDL 47
Obrázek 30 – Časování řízení DA převodníku [23] 48
Obrázek 31 – Časování řízení AD převodníku [24] 49
Obrázek 32 – Hlavní okno (okno projektu) programu v počítači 53
Obrázek 33 – Dialog pro připojení zařízení přes USB 54
Obrázek 34 – Okno kalibrace vstupních kanálů potenciostatu 54
Obrázek 35 – Okno jedné z měřicích metod – vytváření měřicího profilu 56
Obrázek 36 – Náhled na generovaný signál v okně měření 57
Obrázek 37 – Okno s daty získanými při samotném měření 57
Obrázek 38 – Import dat: A) Výběr cílového formuláře, B) Nastavení parametrů importu 59
Obrázek 39 – Okno pro vyhodnocení měření a zobrazení grafů 60

Obrázek 40 – Některé dialogy pro nastavení grafu: A) Výběr barvy a B) Ikony 61
Obrázek 41 – Okno zobrazení vlastností a souhrnných informací souboru grafů 63
Obrázek 42 – Formulář pro manuální úpravu nebo přidávání dat do grafů 63
Obrázek 43 – Okno pro úpravu textových poznámek 64
Obrázek 44 – Fotografie vytvořeného prototypu osmikanálového potenciostatu 76

Seznam grafů

Graf 1 – Příklad charakteristiky naměřené impedanční spektroskopií [1] 12
Graf 2 – Příklady průběhů na A) voltametrickém a B) polarografickém senzoru 14
Graf 3 – Převodní charakteristika napěťového výstupu 65
Graf 4 – Detail převodní charakteristiky napěťového výstupu v okolí 0 V 66
Graf 5 – Naměřená charakteristika proudového převodníku (±100 pA, Rz = 20 GΩ) 67
Graf 6 – Vypočtená korekční křivka pro nejnižší rozsah přístroje 68
Graf 7 – Znázorněná pracovní oblast potenciostatu 70
Graf 8 – Testovací měření cyklickou voltametrií přídavků olova v acetátovém pufru 70
Graf 9 – Testovací měření diferenciálně pulzní voltametrií Pt a TLV senzorem 71
Graf 10 – Porovnání profesionálního a vytvářeného přístroje 72
Graf 11 – Testovací měření na RC článku 73
Graf 12 – Změřené výstupní charakteristiky tranzistoru BC546B 74
Graf 13 – Změřená vstupní a výstupní charakteristika optočlenu 4N26 74
Graf 14 – Převodní charakteristika naměřená na optočlenu 4N26 75
Graf 15 – Příklad časové závislosti proudu náhodně buzeného fototranzistoru 75

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Přehled proudových rozsahů 23
Tabulka 2 – Seznam nalezených vhodných operačních zesilovačů (stav k únoru 2009) 24
Tabulka 3 – Režimy činnosti zařízení a popis stavů indikační LED 44
Tabulka 4 – Seznam příkazů přenášených mezi PC a zařízením včetně vracených hodnot 51
Tabulka 5 – Struktura paketů vracejících data z potenciostatu do zařízení 52
Tabulka 6 – Naměřené vlastnosti převodníku proudu na napětí 69

Seznam příloh

Příloha 1 – Schéma testovacích zapojení převodníků proudu na napětí 80
Příloha 2 - Deska plošných spojů s testovacími zapojeními, pohled shora (70,2 mm × 46,1mm) A) Rozmístění součástek M 2:1, B) Horní strana M 1:1, C) Spodní strana M 1:1 81
Příloha 3 – Naměřená data na zkušebním zapojení s T-článkem 83
Příloha 4 – Schéma zapojení senzorového pole 84
Příloha 5 – Schéma zapojení senzorového multiplexoru 85
Příloha 6 – Schéma zapojení analogových vstupních modulů (napájení a konektory) 86
Příloha 7 – Schéma zapojení analogových vstupních modulů (analogová část) 87
Příloha 8 – Schéma zapojení napěťových obvodů potenciostatu 88
Příloha 9 – Schéma zapojení řídícího mikrokontroléru potenciostatu 89
Příloha 10 – Schéma zapojení řídícího CPLD a RAM potenciostatu 90
Příloha 11 – Schéma připojení vstupních modulů do hlavní desky potenciostatu 91
Příloha 12 – A) Horní a B) spodní strana DPS testovacího zapojení, pohled shora M1:1 (70 mm × 46 mm) 92
Příloha 13 – Rozmístění součástek na testovací DPS, pohled shora M2:1 92
Příloha 14 - Horní strana DPS senzorového pole, pohled shora M1:1 (134 mm × 102,5 mm) 93
Příloha 15 - Horní vnitřní vrstva DPS senzorového pole, pohled shora M1:1 93
Příloha 16 - Dolní vnitřní vrstva DPS senzorového pole, pohled shora M1:1 94
Příloha 17 – Spodní strana DPS senzorového pole, pohled shora M1:1 94
Příloha 18 - A) Horní a B) spodní strana DPS vstupního modulu, pohled shora M1:1 (66,5 mm × 60 mm) 95
Příloha 19 – Rozmístění součástek na DPS vstupního modulu, pohled shora M2:1 95
Příloha 20 – Horní strana DPS řídící části potenciostatu, pohled shora M1:1 (105 mm × 241 mm) 96
Příloha 21 – Spodní strana DPS řídící části potenciostatu, pohled shora M1:1 97
Příloha 22 – Rozmístění součástek DPS řídící části potenciostatu, horní strana shora M1:1 98
Příloha 23 – Rozmístění součástek DPS řídící části potenciostatu, spodní strana zdola M1:1 99
Příloha 24 – Seznam použitých součástek řídícího i analogového modulu 100
Příloha 25 – Fotografie vstupního modulu s A) otevřeným a B) zavřeným stínícím krytem 101
Příloha 26 – Fotografie vnitřního uspořádání osmikanálového potenciostatu 101
Příloha 27 – Fotografie zadní strany osmikanálového potenciostatu 102
Příloha 28 – Fotografie osazených digitálních obvodů jednokanálového potenciostatu 102
Příloha 29 – Fotografie jednokanálového potenciostatu s analogovým modulem 103
Příloha 30 – Fotografie vnitřního uspořádání jednokanálového potrenciostatu 103

Úvod

Chemické analýzy látek a rozbor jejich chemického složení jsou v dnešní době velmi žádanou činností. Nejčastěji jsou chemické rozbory látek vyhledávány například v potravinářském průmyslu, ekologii, při zjišťování stavu vodních toků, přítomnosti těžkých kovů nebo karcinogenních látek v přírodě nebo prodávaných výrobcích a při nespočtu dalších činností, takřka na každém kroku [1]. Vzhledem k potřebnosti snazšího a rychlejšího získávání, archivování a následného rozboru získaných dat se stále častěji přechází na provádění rozborů za pomoci inteligentních elektronických zařízení a systémů. V rámci tohoto projektu bude popsán vývoj přístroje, který splňuje požadavky kladené právě na takovýto typ zařízení.

Pro maximální zvýšení efektivity analýzy chemických veličin je zařízení vyvíjeno jako vícekanálové, k tomu ještě spolupracující s vícerozměrnými senzorovými poli. Pro propojení s těmito poli byl také v rámci projektu vyvinut multiplexor senzorového pole a navržena i zrealizována topologie senzorového pole samotného. Navíc, protože bude zařízení použito v laboratorních podmínkách, je taktéž kladen důraz na maximální flexibilitu vyvíjeného systému a ne jen jednoúčelovou funkčnost zařízení.

1 Rozbor možností řešení

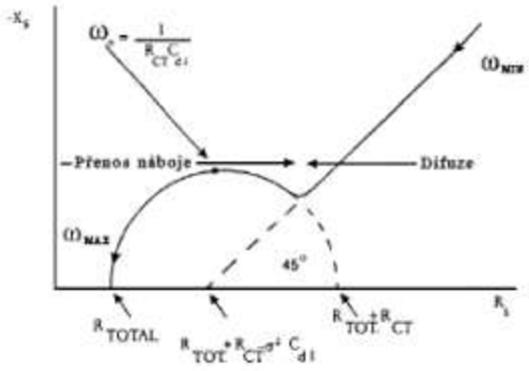
1.1 Možnosti převodu chemických veličin na elektrické

Pro převod chemických veličin na elektrické existuje několik všeobecně známých metod, které jsou běžně v praxi používané. Snímání veličin může být prováděno buď přímo, převodem rovnou na elektrickou veličinu, nebo nepřímo s mezipřevodem na jinou, snadněji měřitelnou veličinu (hustotu, teplo, záření, apod.). Kromě standardních převodů na měřitelné veličiny se pro maximální zvýšení citlivosti na požadovanou veličinu využívá například selektivních senzorů, senzorů s chemicky upravenými nanočásticemi, nebo dokonce biologicky aktivních senzorů.

1.1.1 Elektrochemické převodníky

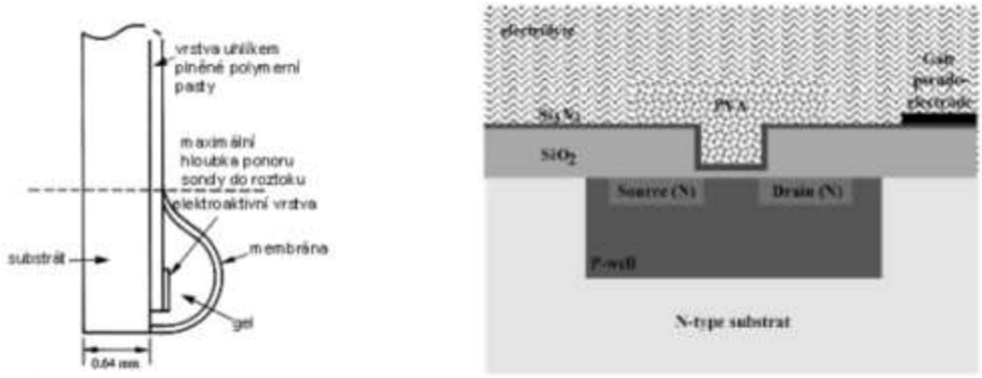
Elektrochemickým převodníkem se rozumí snímač, převádějící chemickou veličinu přímo na veličinu elektrickou, nejčastěji za pomoci oxidačních a redukčních reakcí pouze za příspěvku elektronů. Všeobecně se ale používá hned několik druhů principů a systémů elektrod. Základní podskupiny elektrochemických senzorů tvoří převodníky impedanční, potenciometrické, voltametrické, amperometrické a polarografické [2].

Impedanční senzory používané v impedanční spektroskopii s rozmítanými střídavými signály slouží k určování elektrické vodivosti (odporu) látky v komplexní rovině (viz. graf 1). Pro tyto systémy se používají pouze dvouelektrodové snímače, nejčastěji ve formě hřebínků (pro zvýšení citlivosti). Na tyto, nejčastěji kovové elektrody je přiváděn střídavý signál o různých frekvencích, přičemž se určuje impedance látky v každé měřené frekvenci ω. Velkou nevýhodou těchto senzorů, i přes jejich jednoduchost a levnou výrobu, je značně malá flexibilita, jelikož měří pouze vodivost chemické látky.



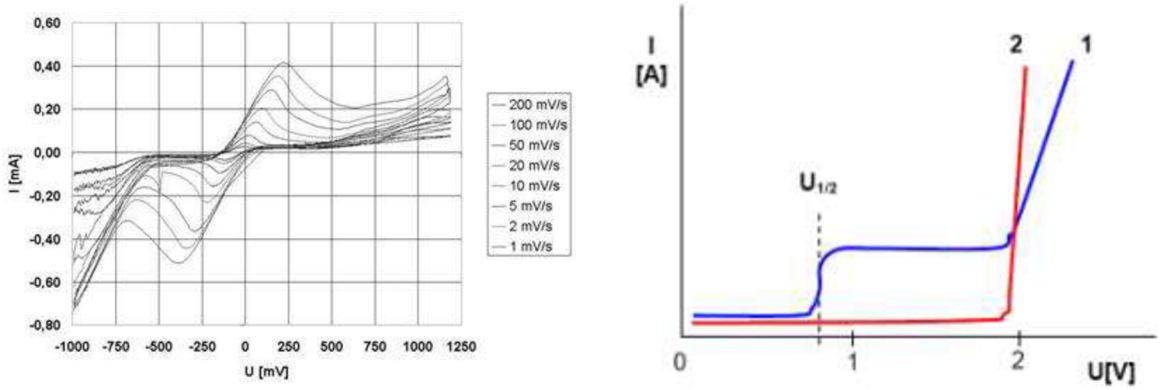
Graf 1 – Příklad charakteristiky naměřené impedanční spektroskopií [1]

Dalšími senzory jsou senzory potenciometrické, a jak už je z názvu patrné, měřenou veličinou je elektrický potenciál. Je jimi měřena velikost potenciálu fázového rozhraní, vůči referenční elektrodě a to vždy za nulového odebíraného proudu. Patří mezi ně i takzvané iontově selektivní senzory (viz. obrázek 1). Nejčastěji jsou používané pro měření pH, tzn. že jsou citlivé převážně na H+ ionty, jejichž koncentrace přímo udává kyselost a zásaditost látky. Nejmodernější variantou těchto senzorů jsou tzv. ISFET senzory. V principu se vlastně jedná o unipolární tranzistory kde je místo hradlové elektrody aktivní iontově selektivní látka, jež propustí pouze náboj otevírající tranzistor.



Obrázek 1 – Principy iontově selektivních senzorů A) standardních a B) ISFETů (viz. [1])

Kromě senzorů potenciometrických existují i senzory měřící proud, tzv. amperometrické. Ty měří proud látkou v čase při konstantním napětí na elektrodách. Častěji je ale využíváno tzv. voltametrické metody, kdy je toto napětí časově závislé s definovaným průběhem. Tento průběh může mít různý charakter. Nejběžněji používanou variantou, která ovšem vykazuje i nejmenší citlivost, je lineární resp. cyklická voltametrie, kdy napětí v určitých mezích lineárně narůstá, resp. klesá. V případě cyklické voltametrie pak napětí provádí oba pohyby v cyklech. Míra citlivosti metody je závislá na náběhové rychlosti, avšak příliš velká rychlost náběhu napětí zapříčiňuje kromě citlivosti i nárůst chyb měření. Další často používanou variantou je diferenciálně pulzní voltametrie, kdy jsou na lineárním nárůstu napěťové složky superponované napěťové pulzy definované výšky. Proud se již nevzorkuje lineárně, ale vždy před příchodem a před skončením pulzu (jasně definovaný časový okamžik v rámci pulzu), přičemž se vyhodnocuje rozdíl těchto dvou naměřených proudů. Tato metoda má díky diferenciálnímu vyhodnocení výrazně vyšší citlivost měření. Kromě těchto dvou standardně používaných metod existují i další, méně používané metody jako například schodovitá, sqare-wave, střídavá voltametrie, apod., které se opět liší tvarem generovaných napětí, avšak v praxi již nejsou tak často používané jako dvě hlavní jmenované metody.



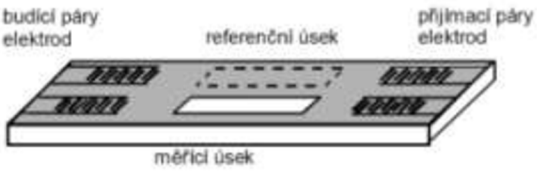
Graf 2 – Příklady průběhů na A) voltametrickém a B) polarografickém senzoru

Obdobou voltametrické měřicí metody je tzv. polarografie, kde aktivní elektrodu tvoří rtuťová kapka, jež má řadu specifických vlastností oproti jiným senzorům. Obě metody mohou kromě koncentrace látky určit i její složení, což je jejich nesporná výhoda. Na grafu (viz. graf 2) je vidět příklady získaných průběhů obou metod. U standardní voltametrické metody (v tomto případě cyklické voltametrie) je druh látky dán pozicí oxidačního, resp. redukčního maxima na napěťové ose a koncentrace látky je dána velikostí maxima proudové špičky (velikost špičky je kromě samotné koncentrace závislá také na náběhové rychlosti napětí). Obdobný průběh vykazuje i polarografická metoda, u níž však nejsou důležité špičky, ale proudové schodky, tzv. půlvlnné potenciály.

U všech elektrochemických převodníků je kontakt s látkou zprostředkován elektrodovým systémem, buď čistým (z chemicky odolného kovu, např. platiny nebo zlata) nebo pokrytým speciální látkou. Běžně se používají dvouelektrodové, tříelektrodové, ale i víceelektrodové systémy. Jejich výběr je dán požadavky na měřicí metodu i charakter chemické veličiny a je blíže popsán v kapitole 2.4.

1.1.2 Gravimetrické, teplotní, optické a fluorescenční převodníky

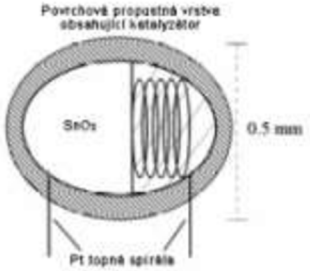
Kromě elektrochemických převodníků, které jsou nejčastěji používané převodníky, v měření chemických veličin existují i další převodníky, a to nejčastěji gravimetrické, teplotní, optické, nebo fluorescenční. Princip těchto převodníků není přímo tématem této diplomové práce, avšak k problematice měření chemických veličin dozajista patří, a proto zde budou i tyto převodníky v krátkosti zmíněny. Princip gravimetrických převodníků spočívá v ovlivňování tuhosti pevného roztoku (aktivní vrstvy) a následným měřením změny této tuhosti. Nejčastěji se takovýto senzor skládá ze dvou piezorezonátorů na podkladové destičce (viz. [3]), mezi kterými je umístěna aktivní vrstva, jak ukazuje obrázek 2.



Obrázek 2 – Uspořádání standardního gravimetrického převodníku [1]

Jeden rezonátor je vysílací (generátor, piezoelektrický jev) a druhý přijímací (detektor, elektrostrikce). Kmitáním se tvoří tzv. povrchová akustická vlna (SAW), pohybuje se aktivním materiálem k přijímači. Vlivem rozdílné tuhosti aktivní vrstvy dochází k deformaci tvaru případně změně rychlosti šíření vlny, která je detekováno přijímačem. Senzor se v praxi uplatní tam, kde je tuhost ovlivněna měřenou veličinou (chemickou nebo fyzikální).

Teplotní převodníky, jak již z názvu vyplývá, určují chemické vlastnosti látek pomocí jejich vztahu k tepelné energii. Jsou rozeznávány dva základní druhy převodníků, a to pasivní, měřící teplo vytvářené reakcí měřené látky při exotermní nebo endotermní reakci (termochemické analyzátory), nebo snímače aktivní (s topným elementem), které měří například tepelnou vodivost látky. Někdy je topný element použitý na vyhřívání zároveň využit i na měření velikosti odvodu tepla materiálem a bývá pak označován jako semistor [4]. Při konstantním vyhřívacím proudu elementem totiž při vyšším odběru tepla dochází k ochlazení vlákna a tím i poklesu jeho odporu a následně zmenšení úbytku napětí na něm. Příklad takovéhoto senzoru určeného pro detekci metanu je vidět na nákresu (viz. obrázek 3).



Obrázek 3 – Řez teplotním chemosenzorem metanu se semistorem [1]

Další, optické převodníky využívají všech dostupných jevů spojených se šířením světla a jeho interakcemi s chemickými látkami. Mezi nejjednodušší optické převodníky lze zařadit detektory měřící útlum světla po průchodu prostředím využívané například pro zjišťování přítomnosti vodní páry, kouře apod. (viz. [5]). Jelikož světlo není tlumeno na všech vlnových délkách stejně, existují dokonalejší převodníky měřící útlum jednotlivých vlnových délek samostatně, avšak ty jsou drahé s konstrukčně složité. Jelikož každá látka pohlcuje jiné vlnové délky, lze z naměřených dat s jistou tolerancí určit i složení vzorku.

Z dalších principů užívaných v optických snímačích chemických veličin lze vyjmenovat například vyzařování fotonů zkoumanou látkou, odraz, lom světla, interference, nebo posun spektrálních čar buď vlivem chemických vlastností látky, nebo i fyzikálních vlastností (pohyb, Dopplerův jev) a nespočtu dalších. Ve většině případů je třeba mít světlo definovaných parametrů, k čemuž se výborně hodí lasery, nejčastěji polovodičové, ale i jiné (plynné, pevnolátkové, atd.) vyzařující vysoce koherentní světlo s velmi velkou směrovostí a definovanou vlnovou délkou.

Velkou výhodou optických převodníků je jejich naprostá izolace od elektrických částí obvodů, čehož se používá převážně v agresivních prostředích (ochrana elektroniky), nebo v prostorách s hořlavinami (např. měření plnosti palivových nádrží). Na rozdíl od ryze elektrických snímačů jsou optické převodníky velmi málo (ne-li vůbec) náchylné na okolní rušení. Poslední skupinou optických převodníků jsou převodníky využívající přenosu světla optickým vláknem, případně na rozhranní optického vlákna s okolním prostředím (snímanou látkou), případně za vzniku povrchového plazmonu na rozhraní kov dielektrikum (SPW, viz. [1]). Tyto senzory se začínají používat čím dál častěji ve všech oblastech senzoriky, včetně moderních bioaktivních senzorů.

Za jistou podskupinu optických převodníků by se daly chápat převodníky fluorescenční. Oproti nim však nevyužívají všech optických jevů, ale pouze procesů spojených s vybuzeným vyzařováním chemických látek. Fluorescence je stav, kdy po předchozí stimulaci (excitaci) látky externím světlem dochází po krátký čas (řádově mikrosekundy) po odstranění externího záření k emisi vlastních fotonů z látky (viz. [6]). Tato emise může probíhat na stejné vlnové délce, na které probíhalo buzení, ale velmi často se emitovaná vlnová délka od budicí liší. Pokud je míra této emise závislá na hledané chemické veličině, lze ji jednoduše měřičem velikosti generovaného záření charakterizovat [7]. Stejně tak lze detekovat i vlnovou délku vybuzeného záření, je-li na měřeném podnětu závislá (náročné na koncepci detektoru).

Měřiče míry fluorescence (optické detektory) musí mít značně vysokou citlivost (velikost fluorescence je malá) a velkou rychlost (krátké časy trvání fluorescence). Těmto požadavkům nejvíce vyhovují fotonové násobiče, které se v různých modifikacích v používaných zařízeních opravdu vyskytují. Jako příklad existujícího fluorescenčního biosenzoru lze uvést například měřič míry fotosyntézy (zdraví) rostlin, kdy chlorofyl obsažený v částech rostliny vykazuje různou míru fluorescence vlivem aktuální změny stavu rostliny [8].

1.2 Nejvhodnější metody převodu a principu zapojení

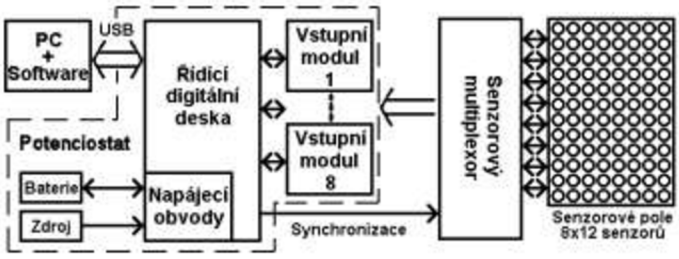
Základním požadavkem na zařízení je vícekanálové měření koncentrací chemických látek v roztocích, včetně možnosti určování chemického složení látky. Dále by bylo výhodné, aby zařízení nebylo zaměřené pouze na jeden účel, ale v rámci laboratorních podmínek (kde bude využíváno) bylo ne příliš složitým způsobem (např. jen programově) upravitelné pro měření jiných, i nechemických veličin. Díky těmto nárokům lze vzhledem k vlastnostem jednotlivých druhů převodníků popsaných výše vyloučit převodníky gravimetrické, fluorescenční a teplotní Oproti nim lze jen optickými a elektrochemickými převodníky měřit kromě koncentrace i druh obsažené látky, avšak optické jsou oproti elektrochemickým převodníkům dražší, rozměrnější, nehodí se tolik pro vícekanálové snímání. Taktéž možnost jejich úpravy pro měření dalších veličin je mizivá. Navíc byl i v zadání práce kladen požadavek na přímé (elektrochemické) měření a proto byly pro následnou realizaci určeny převodníky elektrochemické. Principy ostatních převodníků byly v předchozí kapitole popsány především z důvodu dokreslení kompletního rozboru problematiky možností chemických měření.

Elektrochemické převodníky, oproti dalším principům nevyužívají mezipřevodu na jinou veličinu, díky čemuž jsou konstrukčně jednodušší. Dají se taktéž snadno upravit pro následné měření jiných elektrických veličin. Z elektrochemických metod je nejlepší voltametrická nebo polarografická. Polarografické senzory však obsahují rtuťovou elektrodu a dosahují větších rozměrů, proto je výhodnější použít voltametrickou metodu snímání, čímž se eliminuje také potřeba rtuťové elektrody, ovšem za cenu nižší citlivosti. S výběrem této metody měření se úzce váže i výběr vhodných elektrodových systémů. Nejjednodušší, dvouelektrodové systémy se používají v konduktometrii a potenciometrii. Senzory s převodníky tříelektrodovými, se využívají u voltametrie a amperometrie a nabízejí kvantitativní i kvalitativní analýzu. Čtyřelektrodové systémy se využívají převážně v konduktometrii při měření nízkých vodivostí. Víceelektrodové systémy využívají kombinace výše zmíněných systémů v závislosti na použité metodě měření.

Budou tedy použity tři elektrody (pracovní, společná a referenční), které vyžadují použití tzv. potenciostatu. To je zařízení, udržující konstantní potenciál mezi roztokem a pracovní elektrodou. Toho je dosaženo za použití referenční elektrody, která má kontakt s roztokem jako společná elektroda, ale oproti ní jí protéká zanedbatelný proud. Jejím vhodným zapojením do zpětné vazby lze udržet přesné napětí mezi roztokem a pracovní elektrodou, tj. polarizovat elektrodu na známou hodnotu potenciálu.

2 Vlastní konstrukce

Vlastní konstrukce se týká jak hardwarové, tak i softwarové části, do které spadá vhodná volba měřicích algoritmů, tvarů generování napěťových průběhů na měřeném vzorku, komunikace s počítačem, atd. V rámci tohoto projektu byl vyvíjen komplexní přístroj pro měření elektrochemických veličin – potenciostat (složený z řídící digitální, vstupní analogové a zdrojové části), včetně periferních zařízení (senzorového pole a senzorového multiplexoru), viz. obrázek 4. V následujících kapitolách budou jednotlivé bloky popsány blíže.

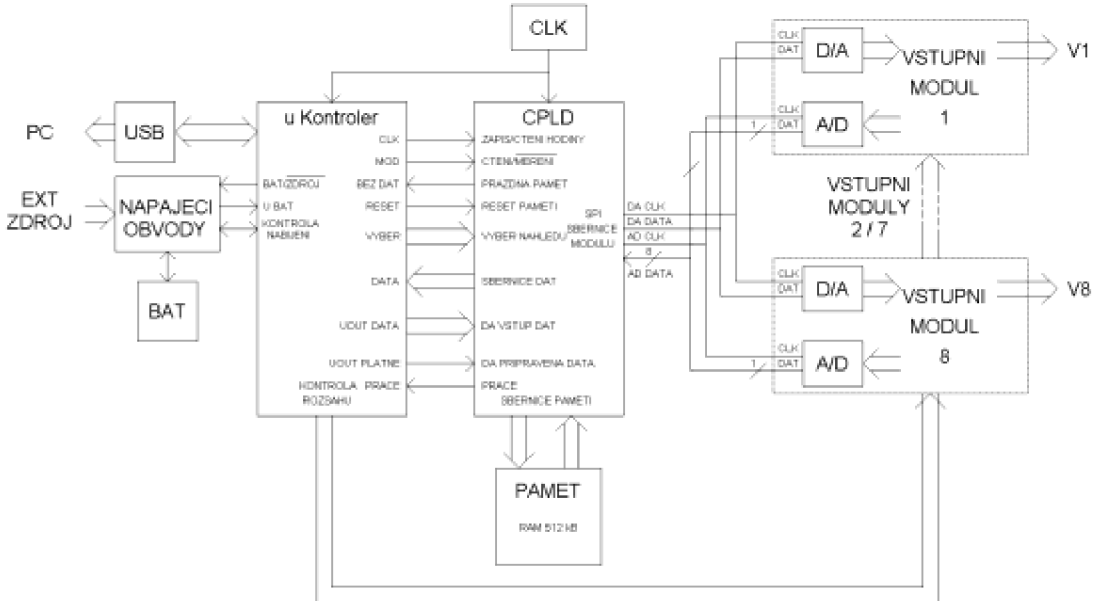


Obrázek 4 – Konstrukční uspořádání všech komponent přístroje

2.1 Možná zapojení a konstrukční uspořádání

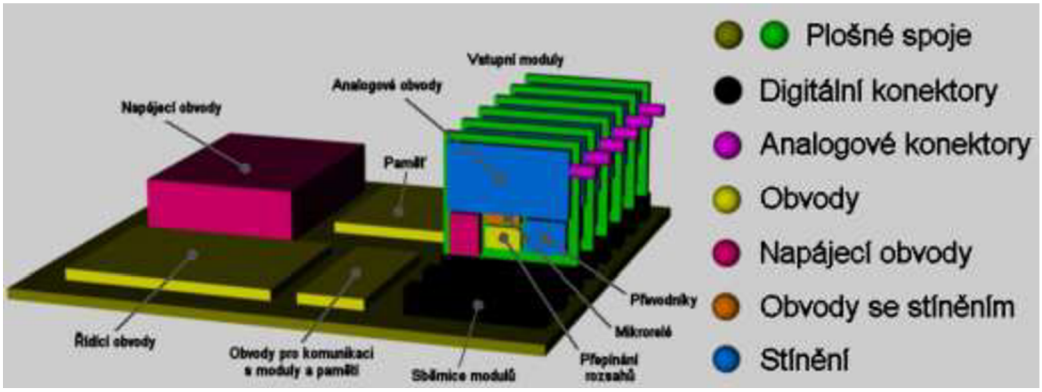
Uspořádání hlavních částí zařízení (viz. obrázek 4) plyne ze samotného funkčního principu jednotlivých bloků a proto není mnoho možností jejich rozmístění. Potenciostat musí komunikovat se softwarem spuštěným v PC, a pomocí vstupních kanálů sledovat elektrické chování elektrod (minichemické články - elektrochemické převodníky) na senzorovém poli. Koncepce pole musí vycházet ze standardních senzorových polí (počet převodníků, jejich rozmístění a tvar pole), aby bylo kompatibilní se stávajícími automatickými manipulátory a dávkovači. Jelikož standardní pole obsahuje 8×12 převodníků, nepůjde připojit přímo na vstupy potenciostatu (musel by mít 96 vstupů, což je nereálné). Proto je třeba vytvořit vhodný senzorový multiplexor a vložit jej mezi senzorové pole a vstupy potenciostatu, přičemž výběr převodníku na senzorovém poli by měl být možný automatický, manuální a případně i z PC.

Jak již bylo nastíněno, bude se potenciostat skládat z analogových vstupních bloků (jejich počet je dán počtem měřicích kanálů), paměti pro ukládání dat aktuálního měření a digitálních obvodů, které mohou být dále rozděleny na obvody pro komunikaci se vstupními moduly a s pamětí a na obvody řídící celé zařízení (viz. blokové schéma, obrázek 5). Oba dva druhy digitálních obvodů mohou být buď samostatné (řídící mikrokontrolér a programovatelný logický obvod [9]), nebo lze obě funkce spojit, aby byly zastoupeny jedním řídícím mikrokontrolérem s dostatečně krátkým strojovým cyklem, nebo jedním výkonnějším logickým obvodem typu FPGA s mikrokontrolérem implementovaným v jeho struktuře.



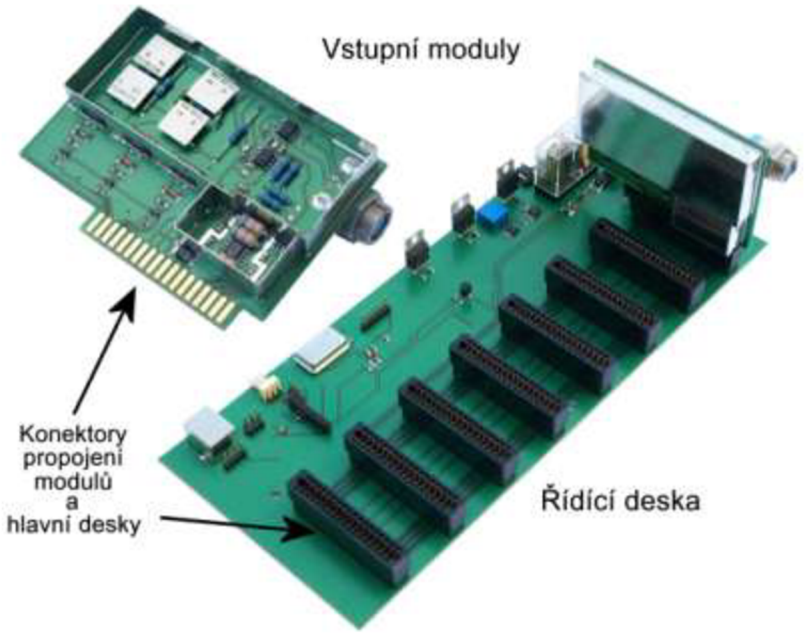
Obrázek 5 – Blokové schéma vnitřního uspořádání potenciostatu

Použití samostatného mikrokontroléru by vyžadovalo velmi vysoký výpočetní výkon, neboť by bylo třeba během jednoho měřicího cyklu vypočítat nové napětí, nastavit DA převodníky, načíst hodnoty z AD převodníků, uložit je do paměti RAM a to vše v časovém rozmezí desítek až stovek µs (bylo by třeba minimálně 100·1 MIPS). Z toho je vidět, že toto řešení nebude to nejvhodnější. Pokud by byl použit složitější obvod FPGA, bylo by zařízení neúměrně dražší, neboť tyto obvody nepatří k nejlevnějším (cca 5-10x vyšší cena než CPLD). Nejvýhodnější metodou tedy bude využít kombinaci CPLD (pro automatické nastavování výstupních hodnot DA převodníků, načítání dat z AD převodníků, řízení paměti a ukládání dat) a mikrokontroléru (pro komunikaci s PC, výpočet výstupního napětí AD převodníků a kontrolování periody ukládání dat), jak je blokově vidět na schematickém znázornění (viz. obrázek 5).



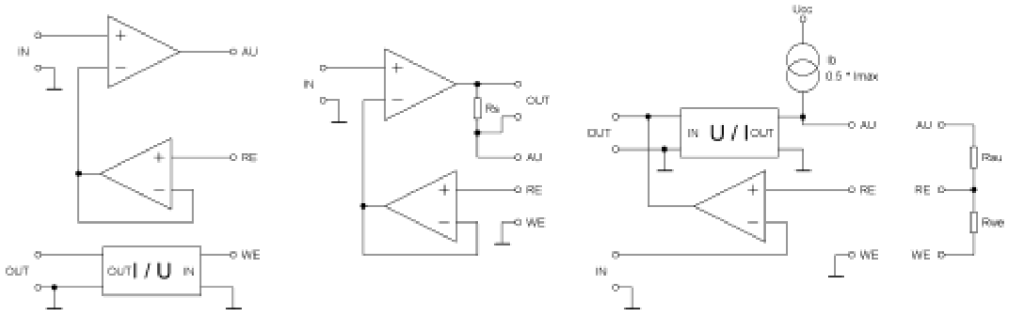
Obrázek 6 – Návrh prostorového uspořádání vnitřních obvodů potenciostatu

Jestliže jsou řídící obvody nejdůležitější digitální částí (viz. obrázek 6), pak nejdůležitější analogovou částí jsou vstupní bloky. Jelikož totožných vstupních bloků je několik, je vhodné je propojit sběrnicově pomocí konektorů v základní desce zařízení. Pokud budou navíc vytvořeny samostatné desky vstupních modulů kolmých vůči základní desce (viz. obrázek 7), značně se tím ušetří plocha celého zařízení, byť na úkor jeho výšky. Výhodnou volbou pro zvýšení odolnosti vůči rušení je sdružení všech analogových obvodů zpracovávajících vstupní signál dohromady a jejich uzavření do stíněného prostoru. Jestliže se pak umístí na každý vstupní modul zvlášť i DA a AD převodníky (každý vstupní modul se tak stane samostatným plnohodnotným měřicím zařízením), bude stačit moduly ve sběrnici propojit jen digitálně a tím se podaří maximálně eliminovat průnik rušení po cestách propojujících tyto moduly. Jedinou společnou cestou pak bude napájení, které lze dodatečně zajistit proti průniku rušení přidáním napájecích obvodů včetně vhodně navržené filtrace na každém modulu zvlášť. Tak se zcela oddělí digitální a analogová část v zařízení. Jelikož všechny vstupní moduly budou pracovat synchronně (nezbytnost pro měření senzorových polí), je možné všechny řídící linky SPI sběrnice pro AD i DA převodníky sdružit (kromě výstupů DA), čímž se zjednoduší propojování modulů. Pro potlačení rušení z externího napájecího zdroje bude navíc zařízení obsahovat baterie, které budou v době měření fungovat jako zdroj napětí bez rušení a v čase mezi měřeními se budou automaticky dobíjet. Tím lze také dosáhnout možnosti měření „v terénu“, jestliže bude zařízení uzpůsobeno i pro provoz pouze z baterií.



Obrázek 7 – Znázornění sběrnicového propojení vstupních modulů s řídícím modulem

Zapojení analogových obvodů se odvíjí od principu potenciostatu [1]. Na schématu jsou dvě běžná zapojení, jeden možný způsob řešení a pro úplnost zobrazuje obrázek 8 i náhradní schéma elektrodového systému ponořeného v měřeném roztoku. První zapojení je nejčastěji používaným zapojením. Funguje za předpokladu, že úbytek napětí na vstupu převodníku proud/napětí je nulový. Pokud tomu tak je, napětí mezi referenční a pracovní elektrodou je stejné jako vstupní napětí. To je vytvořeno zápornou zpětnou vazbou přes napěťový sledovač, který zajišťuje minimální odebíraný proud z referenční elektrody. Toto zapojení má velmi dobré vlastnosti, avšak jeho jedinou nevýhodou je plovoucí pracovní elektroda (pro správné měření by měla být dokonale uzemněna), jelikož u reálných součástek se velmi těžko zajišťuje nulový rozdíl napětí (ofset).



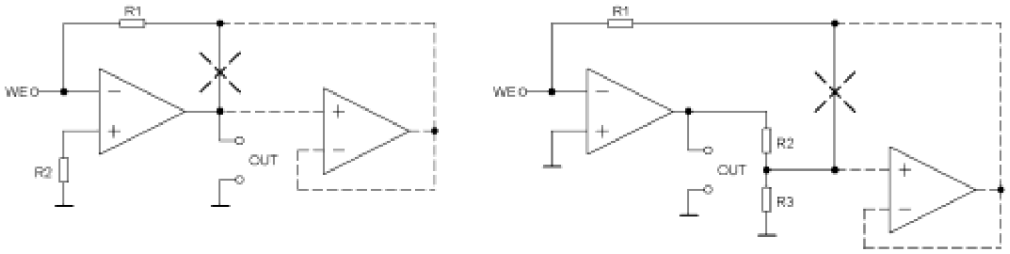
Obrázek 8 – Varianty zapojení vstupů potenciostatu a náhradní schéma senzoru

Druhé zapojení již uzemněnou pracovní elektrodu má. Proud je měřen na snímacím rezistoru zapojeném před společnou elektrodou. Jelikož proud referenční elektrodou je zanedbatelný, proud snímacím rezistorem (taktéž i úbytek napětí na něm) odpovídá měřenému proudu pracovní elektrodou. Úbytek napětí na snímacím rezistoru nehraje při samotném měření roli, neboť je kompenzován vyvedením zpětné vazby až z referenční elektrody. Tento úbytek pouze zmenšuje napěťový rozsah měření. Nevýhoda této varianty zapojení spočívá v nutnosti použít přístrojový zesilovač pro určení rozdílového napětí na snímacím rezistoru. Tento další vložený obvod značně zvyšuje chybu měření, neboť i to nejjednodušší zapojení přístrojového zesilovače obsahuje minimálně tři operační zesilovače.

Poslední obvod, jehož jsem autorem (nebyl nalezen v žádné prostudované literatuře), na první pohled vůbec jako potenciostat nepracuje. Základní myšlenkou u tohoto zapojení je možnost nastavení požadovaného napětí na elektrodách za pomoci protékajícího proudu (jakoby proudová zpětná vazba). O to se postará operační zesilovač zapojený ve zpětné vazbě. Je-li napětí na referenční elektrodě oproti vstupnímu napětí příliš malé, klesne napětí na výstupu operačního zesilovače, což se projeví na poklesu proudu na výstupu převodníku napětí/proud, větší část proudu z proudového zdroje poteče do senzoru, tím se na něm zvýší úbytek napětí a napětí referenční elektrody se tak stabilizuje. Na první pohled má toto

zapojení mnoho výhod (jednodušší konstrukci, uzemněnou pracovní elektrodu, menší chybu měření), avšak potíže nastanou, jakmile se má obvod zkompletovat z diskrétních součástek. Hlavním problémem je konstrukce převodníku napětí na proud. Ten funguje bezchybně pro vyšší proudy, řádově miliampéry (v simulacích i reálných podmínkách), ovšem pro velmi malé proudy vykazuje značnou nelinearitu (použitelnost klesá od desítek μA). Toto zapojení je tedy pro diskrétní potenciostat nevyhovující, avšak dalo by se o něm uvažovat při konstrukci potenciostatu jako integrovaného obvodu, kde by bylo snadnější vyřešit souběh parametrů (matching) všech součástek a konstrukci přesněji doladit (i když i zde jsou například u ASIC obvodů minimální proudy kolem desítek nA, což je vzhledem k měřeným velikostem proudů také hodně).

Pro nejjednodušší konstrukci s minimálními chybami měření tedy bylo zvoleno první zapojení. Jeho nedostatek plovoucí referenční elektrody je možné minimalizovat vhodným zapojením proudového převodníku a výběru operačních zesilovačů v něm použitých. Převodníky proudu na napětí lze sestavit podle dvou základních schémat (viz. obrázek 9), jež bývají dále rozšířeny o obvody na přepínání rozsahů a součástkami pro potlačení ofsetů či zvýšení stability obvodu. Pořád však vychází z těchto jednoduchých zapojení.

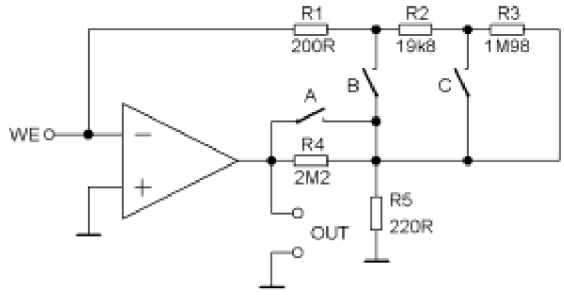


Obrázek 9 – Převodník proudu na napětí s A) invertujícím zapojením OZ, B) T-článkem

Oba dva převodníky vychází z invertujícího zapojení operačního zesilovače [10], které pomocí virtuální nuly na invertujícím vstupu udrží téměř nulové napětí pracovní elektrody. Odchylka od absolutní nuly je dána vstupním ofsetem zesilovače, který navíc bývá teplotně závislý. Proto je jeden z kritických parametrů výběru vhodného operačního zesilovače ofsetové napětí. U prvního zapojení je ofset i proudová nesymetrie částečně kompenzována přidáním rezistoru R2 do neinvertujícího vstupu zesilovače. Hodnota tohoto rezistoru je však závislá na vstupním odporu celého zapojení, který však nelze určit, neboť je dán měřeným roztokem a je tedy u každého měření jiný. Proto je nejvýhodnějším řešením tento rezistor vůbec do zapojení nevkládat. Vstupní ofset by se dal ještě kompenzovat připojením neinvertujícího vstupu ne na zemní spoj, ale na zdroj napětí, jehož velikost by byla shodná s ofsetovým napětím zesilovače. To bohužel vkládá do měření další chyby, a proto se vyplatí vybrat spíše zesilovač s dobrými parametry namísto pozdější kompenzace.

Princip převodu vždy vychází z předpokladu, že vstupní proud operačního zesilovače je nulový. Potom veškerý měřený proud teče přes rezistor R1, na kterém vyvolá úbytek napětí a ten přímo koresponduje s výstupním napětím převodníku. Protože měřené proudy se na některých rozsazích pohybují na velmi malých hodnotách, musí být převodní rezistor relativně velký (na rozsahu 100 pA je to až 20 GΩ). Jelikož takové odpory není jednoduché v zapojení použít (zejména kvůli jejich velkému šumu), využívá se jednoduchého T-článku, jak je vidět schématech (viz. obrázek 9B). Ten je zapojen jako odporový dělič, na jehož výstupu je oproti reálnému výstupu zesilovače N krát menší napětí. Díky tomu se jakoby hodnota rezistoru R1 zvětší N krát, neboť malá změna proudu musí být kompenzována mnohem větší výchylkou napětí na výstupu převodníku, protože toto napětí se na děliči sníží. Jelikož se jedná o zatížený dělič napětí, lze jej modifikovat přidáním napěťového sledovače. Obdobně lze upravit i první obvod, avšak u něj již nemá tato modifikace téměř žádný význam. Přidáním sledovače zapojeného z reálných součástek však narůstá i chyba měření, která je navíc u druhého zapojení násobena koeficientem N, stejně jako je násobena velikost odporu R1.

Po srovnání kladů a záporů všech čtyř zapojení a jejich proměření na testovacím zapojení (viz. kapitola 2.3) bylo pro následnou realizaci vybráno zapojení s T-článkem bez druhého operačního zesilovače. Tento výběr však musí být proveden pouze za předpokladu použití nízkošumového rezistoru R1 (šum by se opět N krát násobil) a takové volby rezistorů, aby byla vždy zaručena podmínka několikanásobně nižšího měřeného proudu, než proudu tekoucího odporovým děličem (minimálně 100×). Je-li tato podmínka splněna, lze dělič i v tomto případě považovat za nezatížený. Pro zadané rozsahy vstupních měřených proudů (zadáno vedoucím projektu, viz. tabulka 1) byly stanoveny hodnoty rezistorů tak, jak je vidět na schématu převodníku (viz. obrázek 10).



Obrázek 10 – Zapojení použitého převodníku I na U

Tabulka 1 – Přehled proudových rozsahů

Rozsah	R_{ZV}	Sepnuto
10 mA	1 · 200 Ω	A+B
100 μA	1 · 20 kΩ	A+C
1 μA	1 · 2 MΩ	A
10 nA	10^4 · 20 kΩ	C
100 pA	10^4 · 2 MΩ	---

2.2 Výběr použitých součástek

Nejkritičtější částí na návrh je vstupní část zpracovávající analogové signály. Jelikož jde o zapojení snímající velmi malé proudy na několika rozsazích, je bezpodmínečně nutné zvolit součástky tak, aby vykazovaly minimální šum, ofset a vstupní i napájecí proud. To se týká dvojnásob analogových obvodů (operačních zesilovačů) zpracovávajících měřený signál. U několika různých výrobců elektronických součástek byly nalezeny operační zesilovače odpovídající požadovaným vlastnostem (viz. tabulka 2) a po jejich porovnání byl pro samotnou realizaci vybrán operační zesilovač firmy Microchip MCP6V02 (viz. [11]), který vyhovoval zároveň i typem svého pouzdra (2×OZ, SOIC 8).

Tabulka 2 – Seznam nalezených vhodných operačních zesilovačů (stav k únoru 2009)

Výrobce	Obvod	I_B [pA]	U_{OS} [μV]	U_{CC} [V]	$U_{§}$ [nV/√Hz]
Analog Devices + Texas Instruments [12]	OP 227E	10000	80	±22	40
	OP 297	50	80	±20	20
	OP 7C	1800	150	44	80
	OPA 111	50	1000	±18	8
	OPA 129	0,2	7	±18	15
	LF 411	50	500	±18	25
	LF 412	50	1000	±18	18
Linear Technology	LTC 1052	30	5	16	100
	LTC 6078	0,2	7	16	16
Analog Devices [13]	AD 85xx	10	1	6	42
	AD 549	0,15	500	±18	60
	AD 8603	0,2	12	6	22
Microchip [14]	TC 913	90	0,15	±8	650
	MCP 6V0x	1	2	5,5	120

Ideální hodnota | Téměř ideální hodnota
Použitelná hodnota | Nevhodná hodnota

Tento vybraný obvod nemá ani nejmenší vstupní ofsetové napětí ani vstupní proud (viz. [11]), avšak obě tyto hodnoty má natolik malé, že je nejlepším kompromisem mezi ostatními obvody, které jsou specializované buď na minimální ofset, nebo na minimální vstupní proud, avšak druhá veličina je vždy o několik řádů vyšší. Mírnou nevýhodou je to, že obvod nemá symetrické napájecí napětí a má malý rozsah napájecího napětí (je představitelem skupiny single supply operačních zesilovačů), tzn. že zapojení bude muset obsahovat i generátor virtuální nuly. Protože se jedná o Rail-To-Rail operační zesilovač, napájecí napětí +5 V (pro signál ±2,5 V) bude plně postačovat, neboť běžný pohyb napětí na senzoru se očekává maximálně v rozsahu do ±2 V.

Kromě operačních zesilovačů musí být taktéž voleny přesné a hlavně nízkošumové odpory ve zpětných vazbách a obvody pro přepínání rozsahů včetně vodičů je nutné vybírat s přihlédnutím na následné stínění proti vnějšímu rušení. Kromě analogových obvodů jsou kladeny nároky i na obvody digitální, které řídí celý cyklus měření a posílání dat z/do PC. Řídící kontrolér musí mít dostatečně vysokou pracovní frekvenci (počet instrukčních cyklů za vteřinu) pro zvládnutí výpočtu a generování napětí. Proto je vhodné volit mikrokontroléry s více než 25 MIPS, například rychlé AVR mikrokontroléry řady XMega (32 MIPS) fy Atmel s RISC architekturou (viz. [15]). Vzhledem k tomu, že samotné časově náročné rutiny měření a ukládání dat bude provádět obvod CPLD, není přechod do takto vysokých frekvencí nutný a mikrokontrolér postačí i pomalejší, například v obvyklém provedení s rychlostí 16 MIPS. Jelikož hlavní řídící mikrokontrolér bude vyžadovat relativně mnoho vývodů pro rychlou komunikaci s CPLD, byla zvolena větší varianta základního procesoru firmy Atmel s RISC architekturou, a sice ATmega128 (viz. [16]). Při výběru CPLD ovládajícího proces měření nehraje maximální frekvence až takovou roli, neboť maximální frekvence se kterou jsou schopny pracovat AD převodníky, se pohybuje v řádech jednotek MHz a i ty nejpomalejší obvody CPLD pracují od frekvencí desítek MHz výše. Jejich hlavní výhodou je, že vnitřní procesy běží paralelně, a tím oproti mikrokontroléru neklesá rychlost zpracování s počtem běžících operací. Vzhledem k potřebnému počtu vývodů byl zvolen obvod XC95144XL (viz. [17]), který i počtem svých vnitřních programovatelných buněk plně postačuje a navíc je snadno dostupný přímo na naší fakultě. Oproti již zmíněným výhodám má také tento obvod napěťově přizpůsobené vstupně/výstupní porty pro 5 V i 3 V logiku (viz. [17]).

Poslední kritickou součástkou v potenciostatu je paměť na ukládání hodnot aktuálního měření. Ta musí být dostatečně velká pro zpracování záznamu až osmi senzorů v relativně velkém množství vzorků (vzorkování řádově po ms). Navíc musí mít malou dobu zápisu a čtení. Nejvhodnější volbou je tedy paměť typu RAM (architektury FIFO nebo i LIFO). Proto byla zvolena běžně dostupná plně statická paměť RAM 628512 (viz. [18]) s co největší velikostí paměťového prostoru (512 kB, což odpovídá osmi modulům se třinácti bity na záznam pro 37000 vzorků) a minimální přístupovou dobou (50 – 70 ns, dle provedení obvodu). Nevýhodou paměti je nezaimplementovaná část řízení (FIFO/LIFO) a tudíž i velký počet adresových vývodů, ovšem při implementaci řídících rutin do CPLD, které není ani zdaleka využito na 100%, to nezpůsobí žádné větší problémy.

Mimo potenciostat samotný obsahují kritické součástky i periferní bloky, především senzorový multiplexor. Jedná se hlavně o prvky ležící na analogových vodičích (analogové spínače) a o prvky pro komunikaci s uživatelem. Vzhledem k velkému počtu analogových vodičů, které musí být spínány, byly pro spínání vybrány analogové CMOS multiplexory

4067 a 4051 [19]. Těmi je možné spínat společnou a referenční elektrodu senzorů, ovšem pro spínání pracovních elektrod vykazují příliš velký odpor v sepnutém stavu (řádově desítky až stovky Ω). Proto byly pracovní elektrody ve všech řadách pospojovány (vždy bude v jeden čas připojen maximálně jeden sloupec senzorů, proto pospojování řad nehraje žádnou roli) a tyto propojené pracovní elektrody byly následně spínány osmi jazýčkovými relé, jejichž odpor v sepnutém stavu je o několik řádů nižší (desetiny Ω).

Obdobně jako v potenciostatu je třeba i v senzorovém multiplexoru vybrat řídící obvod. Zde není oproti potenciostatu nutné mít rychlý obvod, avšak v počtu potřebných vývodů se řídící obvod mikrokontroléru potenciostatu vyrovná. Proto byl vybrán stejný mikrokontrolér ATmega128 [16], zejména proto, že pak bude kompatibilní i programovací rozhraní firmwaru. Poslední dva prvky, které je třeba zvolit, jsou prvky pro komunikaci s uživatelem. Jednak jde o displej a jednak o vstupní rozhraní. Protože displej signalizuje pouze dvě informace (aktuální pozici vybraného senzoru a režim výběru senzoru), byl vybrán jednoduchý dvoumístný alfanumerický LED displej (obyčejný sedmisegmentový zobrazovač by nepokryl čísla 1-12 pro signalizaci 12ti sloupců senzorů). Pro manuální ovládání pak bylo vybráno IRC čidlo s tlačítkem, které umožní nejjednodušší ovládání uživatelem, kdy se bude otáčením posouvat aktuální pozice a tlačítkem ovládat doplňkové funkce. Druhou variantou bylo použití klávesnice, což vzhledem k jednoduchosti celého systému není příliš vhodné.

2.3 Získané výsledky na testovaných zapojeních

Jak již bylo řečeno v kapitole 2.1, pro výběr nejefektivnějšího zapojení převodníku proudu na napětí bylo sestaveno testovací zapojení všech možných kombinací obvodů pro tento účel popsaných výše. Všechna zapojení byla testována ve stíněném prostoru s bateriovým napájením, aby nebyla rušena z jakéhokoliv externího zdroje (schéma zapojení a desky plošných spojů testovacího zapojení jsou přiloženy na konci dokumentu, viz. příloha 1 a příloha 2). Byl proměřován ofset a maximální šum (lze dodatečně kompenzovat průměrováním) jednotlivých zapojení a díky získaným parametrům pak bylo rozhodnuto pro výběr zapojení, které bude realizováno.

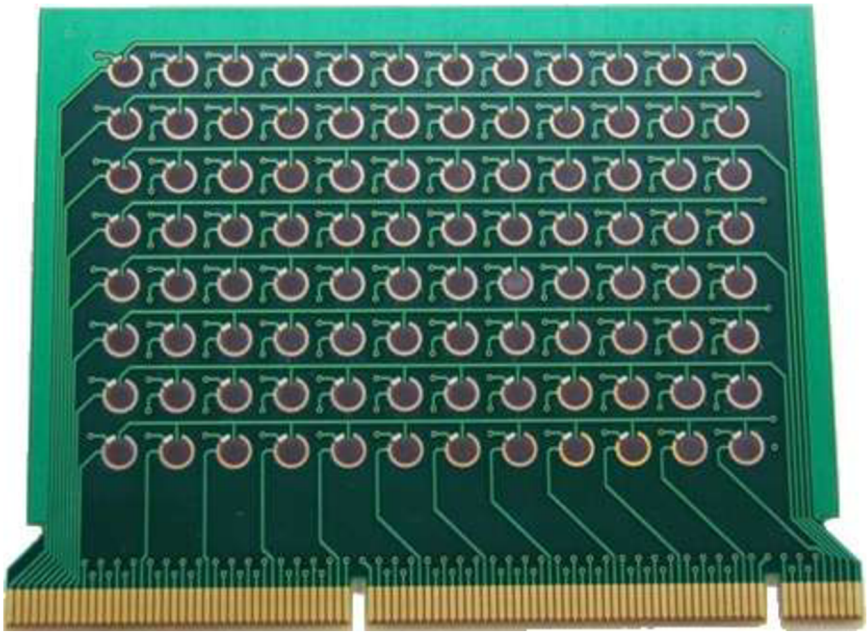
Z hrubého proměření a analýzy všech zapojení byly vybrány dvě nejperspektivnější zapojení pro podrobnější testovací měření. K těmto zapojením patřilo jednoduché invertující zapojení s jedním operačním zesilovačem a zapojení s T-článkem s oddělovacím operačním zesilovačem. U jednoduchého zapojení byl zjištěn výstupní ofset (zesílený vstupní ofset) menší než 200 μV a šum maximálně 500 μV. Oproti tomu zapojení s T-článkem mělo horší parametry, ofset činil 6 mV a šum 60 mV, jak bylo již v teoretickém rozboru očekáváno (příloha 3 obsahuje kompletní výpis všech hodnot měření).

Jednoznačně nejlepším řešením je tedy jednoduché zapojení, ovšem pro malé rozsahy proudů, kdy by bylo nutné využít velmi velké hodnoty rezistoru ve zpětné vazbě, je lepší použít zapojení s T-článkem (viz. kapitola 2.1). To bylo posléze ověřeno testovacím měřením, které vykazovalo horší hodnoty než jednoduchý převodník (šum i ofset přidaného OZ jsou zesíleny), ale požadované vlastnosti zapojení se o několik řádů zlepšily.

Nejvýhodnější je tedy zapojení s T-článkem pro malé proudy a pro větší proudy s T-článkem přemostěným (viz. obrázek 10). Hodnoty rezistorů uvedené ve schématu, odpovídají řadě E192, která má kromě vyšší hustoty hodnot i větší přesnost. Pokud se však nepodaří sehnat odpory této řady, lze je nahradit nejbližšími vyššími hodnotami z nižší řady (hodnotu 2,0 nahradit 2,2), díky čemuž klesne rozpětí napětí výstupu převodníku, avšak vzhledem k velkému rozlišení následných AD převodníků (13 bitů) je rozdíl zanedbatelný.

2.4 Senzorové pole

Aby bylo možné chemické veličiny převést na elektrické, je třeba vytvořit elektrochemický převodník, resp. pole senzorů. Pole s více senzory umožňuje značně zrychlit zpracování většího množství vzorků a také přibližuje možnost celkové automatizace měření. Samotné převodníky v elektrochemických analytických metodách tvoří elektrody II. a III. druhu (např. Au, Pt – III. druhu, nebo Ag/AgCl – II. druhu). Nejčastěji jsou používány tříelektrodové senzorové systémy [1], viz. kapitola 1.2. Tříelektrodové senzory budou tedy použity i v tomto zařízení.



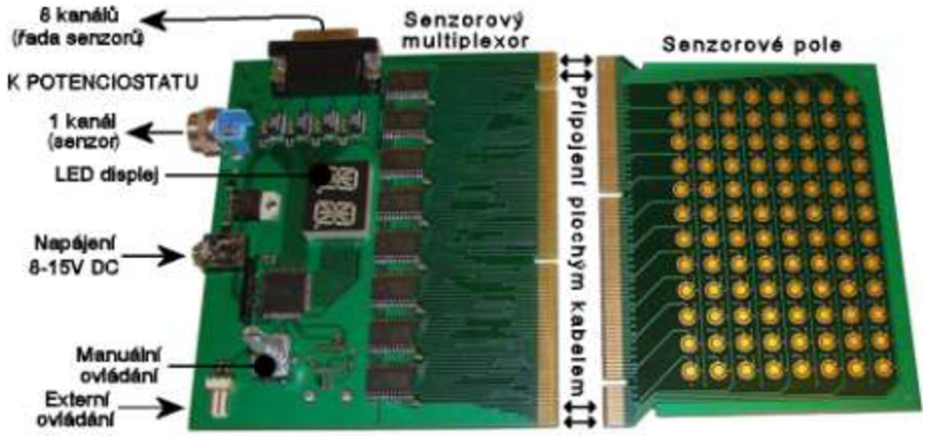
Obrázek 11 – Fotografie senzorového pole - galvanická Pt na společných, polymerní uhlíková pasta (Dupont) na pracovních a Ag/AgCl polymerní pasta na referenčních elektrodách

Koncept jednotlivých elektrod (jejich tvaru a materiálu) nebyl v rámci této práce vyvíjen, ale byl převzat z řešení jiného projektu Laboratoře mikrosenzorů a nanotechnologií (LabSensNano). Hlavním přínosem inovované konstrukce bylo vytvoření recyklovatelné (omyvatelné) matice senzorových převodníků na čtyřvrstvý plátovaný organický materiál FR4 s krycí maskou a galvanicky zlacenými kontakty, na které se následně nanese (například sítotiskem, nebo chemicky) vhodný materiál (viz. obrázek 11). V našem případě bylo vytvořeno pole o 12×8 senzorových převodnících, plně kompatibilní s existujícími přístroji pro automatickou manipulaci s poli a chemickými látkami, aby bylo možné jeho použití v laboratořích bez větších úprav stávajícího zařízení. Pole je realizováno na čtyřvrstvé DPS, přičemž horní vrstva slouží jako samotné senzorové pole a jsou na ní rozvedeny vodiče pracovních elektrod. Druhá (vnitřní) vrstva je celá vylitá měděnou vrstvou (mimo oblastí prokovů) a tato vrstva je připojena na zemní spoj, čímž slouží jako hlavní stínění citlivých senzorů a pracovních elektrod. Třetí a čtvrtá vrstva pak slouží k rozvodu společných a referenčních elektrod. Obě strany DPS jsou pokryty nepájivou lakovou maskou, která kromě dlouhodobé pasivace povrchu zajistí i neroztékavost vzorků nanesených přímo na elektrody (na senzor lze kápnout kapku o velikosti 25 až 30 µl, aniž by se roztékala). Všechny elektrody jsou vyvedeny na plochý konektor vytvořený přímo na hraně DPS, odkud jsou plochým kabelem o šířce 202 žil odvedeny k multiplexoru, kde dojde k předzpracování jejich signálů.

2.5 Senzorový multiplexor

Mimo senzorové pole byl pro základní zpracování signálů elektrod vyvinut senzorový multiplexor. Kromě nutnosti výběru senzorových převodníků je druhým závažným důvodem, proč multiplexor vytvořit, potřeba zmenšit počet vodičů vedených od převodníků, neboť propojovací plochý kabel vedený od senzorového pole je již tak široký, že je obtížné jej stínit, proto musí být co nejkratší. Vzhledem k malým měřicím rozsahům přístroje se projeví rušení pronikající z okolí (hlavně 50 Hz) již od velmi krátkých vzdáleností nestíněných vodičů.

Z těchto důvodů byl vytvořen senzorový multiplexor (viz. příloha 5), jehož hlavním úkolem je podle aktuální pozice vybraného senzoru přivést na jednokanálový, resp. osmikanálový výstup signály aktuálního senzoru resp. řady osmi senzorů najednou (viz. obrázek 12). Méně citlivé elektrody (společná a referenční) jsou spínány CMOS analogovými multiplexory standardního provedení 74HCT4067 [19]. Tyto 16ti vstupové multiplexory umožní jednoduchým způsobem propojit množství vodičů do několika málo společných vodičů. Na spínání citlivých (pracovních) elektrod jsou použita SMD stíněná relé, která mají lepší vlastnosti, ovšem na úkor velikosti (viz. kapitola 2.2), což je akceptovatelné vzhledem k použití maximálně osmi relé (sdružení pracovních elektrod po řádcích).



Obrázek 12 – Nákres propojení senzorového pole s multiplexorem a jeho výstupy

Senzorový multiplexor je ovládán mikrokontrolérem, k němuž jsou připojeny další periferie jako například displej pro zobrazení aktuální pozice vybraného senzoru, manuální ovládací prvky pro ruční výběr senzorového převodníku, obvody pro komunikaci s počítačem a vstup externího řízení. Aby bylo možné zobrazit jednoduše všechny možné pozice senzoru, je použit dvoumístný alfanumerický displej v LED provedení, které díky svému aktivnímu charakteru zlepšuje čitelnost údajů. K manuálnímu ovládání je použito inkrementační rotační čidlo, které zjednodušuje pohyb po poli, neboť pouhým otočením vlevo či vpravo lze aktivní pozici posouvat. Kromě manuálního ovládání je možné ovládat multiplexor i z počítače (prozatím nepotřebná varianta, pouze DPS je do budoucna na tuto variantu připravena, avšak součástky nejsou osazeny), nebo z externího zařízení pomocí synchronizační linky zpracovávající signál z výstupu typu otevřený kolektor (vstupní porty jsou přímo vstupy mikrokontroléru, pouze s připojenými Pull-Up rezistory). Výhody tohoto druhu sběrnice jsou popsány dále v kapitolách 2.6.3 a 3.4, věnovaných komunikaci mezi periferiemi.

Poslední částí multiplexoru jsou napájecí obvody realizované standardním stabilizátorem 7805, který umožňuje připojení vstupního napětí v širokém rozsahu hodnot, od 8 V až do 15 V (nebo i více, ale pak musí být stabilizátor opatřen chladičem). DPS je ve čtyřvrstvém provedení, stejně jako senzorové pole, protože před samotným napojením multiplexorů je třeba seřadit vodiče od elektrod do správného pořadí (cca 100 vodičů na obou stranách DPS), což by bylo na dvouvrstvé DPS značně složité. Prázdné oblasti plošného spoje jsou opět využity pro stínící plochy, přičemž je zároveň oddělena tato stínící plocha (zem) od uzemnění digitálních a analogových obvodů. Všechny tři země jsou spojeny v jednom jediném bodu, u výstupu stabilizátoru napětí. Tím se dosáhne zlepšení šumové odolnosti multiplexoru i samotného měření.

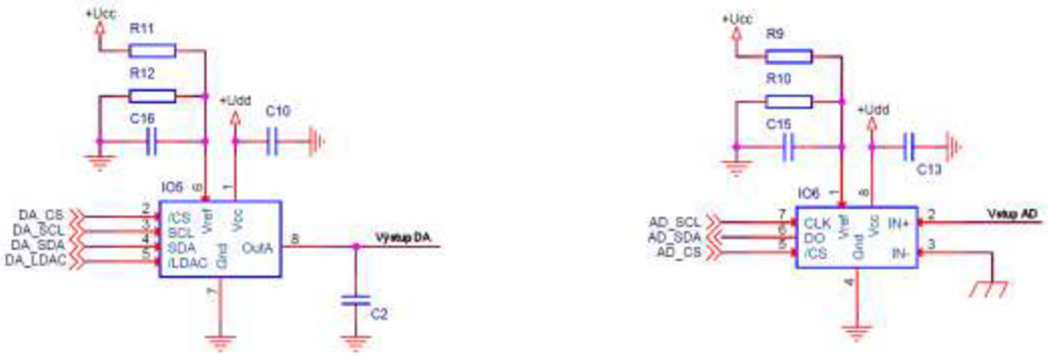
2.6 Potenciostat

Hlavní část zařízení – potenciostat je rozdělen na několik dílčích částí, jak již bylo ostatně nastíněno v předchozích kapitolách. Důvodem rozdělení je jednak zvýšení šumové odolnosti (oddělení analogových částí do samostatných vstupních modulů), dále pak zlepšení teplotní stability (oddělení výkonových prvků napájecích obvodů) a rozdělení řídících obvodů na hlavní obvody a obvody pro komunikaci s počítačem.

2.6.1 Vstupní analogové moduly

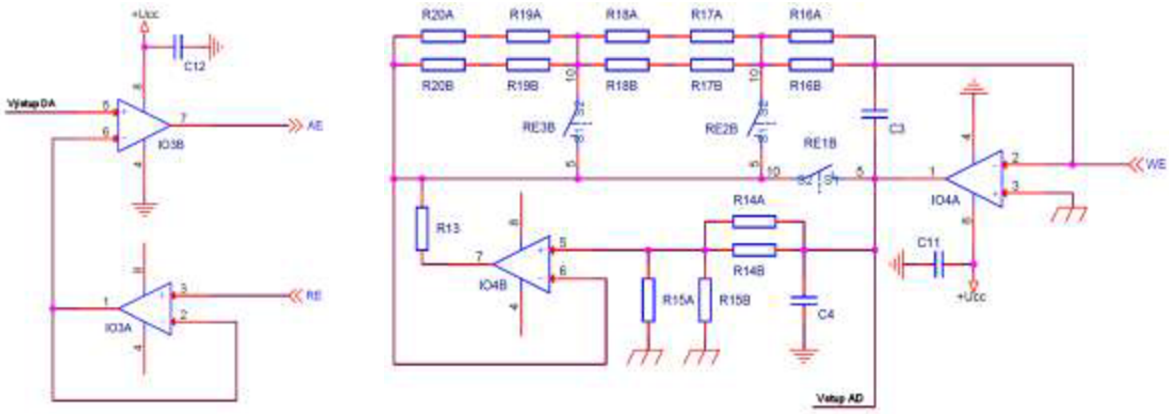
V kapitole 2.2 a následně i 2.3 byly zvoleny typy konkrétních součástek, na jejichž výběru a kvalitě jsou vstupní moduly přímo závislé, a byly ověřeny jednotlivé varianty zapojení analogových částí. Pro bezchybnou činnost těchto zapojení je zapotřebí je doplnit o podpůrné obvody a bezezbytku definovat jejich připojení do kompletního přístroje. Všechny napájecí vývody integrovaných obvodů byly opatřeny filtračními kondenzátory pro potlačení zákmitů na napájecí sběrnici, které vznikají překlápěním (prudkými krátkodobými nárůsty odběru) vnitřních bloků v digitálních obvodech. Tyto kondenzátory jsou pak při návrhu DPS umístěny co nejblíže vývodům daných obvodů. Jelikož tyto kondenzátory budou používány i v dalších částech navrhovaného zařízení, nebude již jejich princip znovu popisován, protože je totožný s principem těchto kondenzátorů na vstupních modulech.

Na kompletním schématu vstupního modulu (viz. příloha 6 a příloha 7) jsou vidět tři již výše popsané bloky, a sice blok zdroje virtuální země všech analogových obvodů, nastavovací napěťové obvody s připojeným DA převodníkem jako zdrojem signálu a blok převodníku měřeného proudu na napětí s přepínatelnými rozsahy a vlastním AD převodníkem. AD i DA převodníky mají jako zdroj referenčního napětí použit odporový dělič, což ničemu nevadí, neboť použité převodníky mají zabudovaný interní sledovač napětí, čímž omezí zatížení děliče na minimum. Ve výsledném zapojení se stejně uvažuje o připojení referenčních vstupů přímo na napájecí napětí, čímž se maximálně eliminuje chyba a rušení na referenčním vstupu. Z důvodu zachování větší flexibility zapojení (nastavitelnosti výstupních rozsahů) byla v zapojení možnost připojení i druhého odporu v děliči ponechána. Ve výsledku bude rezistor R11 s kondenzátorem C16, resp. R9 a C15 tvořit jednoduchý filtr typu dolní propust, čímž ještě více potlačí možné rušení šířené z napájecí sběrnice, jak ukazuje obrázek 13. Zvolený AD převodník má navíc ještě tu výhodu, že přímo obsahuje diferenciální napěťový vstup, takže lze přímo měřit napětí vztažené k virtuální zemi a není nutný následný digitální přepočet a kompenzace odchylek.



Obrázek 13 – Zapojení A) DA a B) AD převodníků vstupních modulů

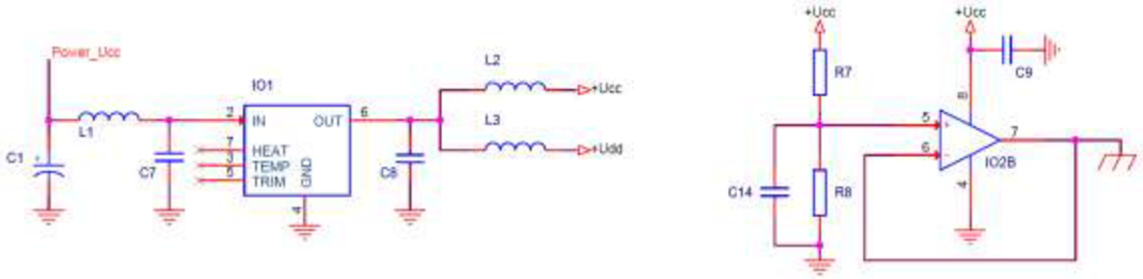
Převodník proud/napětí je mírně modifikován tak, aby bylo možné jeho rozsah volit pomocí SMD stíněných relé. Ty mají oproti CMOS spínačům při spínání malých proudů a napětí mnoho výhod (přímý spoj, minimální rušení, lineární AV charakteristika, nízký odpor v sepnutém stavu, atd.), proto budou v zapojení využity namísto zmíněných polovodičových spínačů. Spínací obvody všech relé jsou uzpůsobeny pro připojení na samostatné napájecí napětí, opět kvůli minimalizaci rušení oddělením napájecích sběrnic, ale navíc také kvůli možnosti spínání relátek vyšším (případně i nižším) napětím. Spínaný proud každé cívky je posilován bipolárním tranzistorem a případné upravení pracovního bodu je též možné provést dodatečně připojením omezovacího sériového rezistoru R1 až R3. Diody D1 až D3 zapojené standardně v závěrném směru mají za úkol odvést proudové špičky vzniklé při odpojení cívky vinutí od napájení a chránit tak tranzistor proti průrazu (ve chvílích, kdy se cívka chová jako zdroj, viz. příloha 6).



Obrázek 14 – Schéma zapojení A) generátoru napětí a B) převodníku I/U

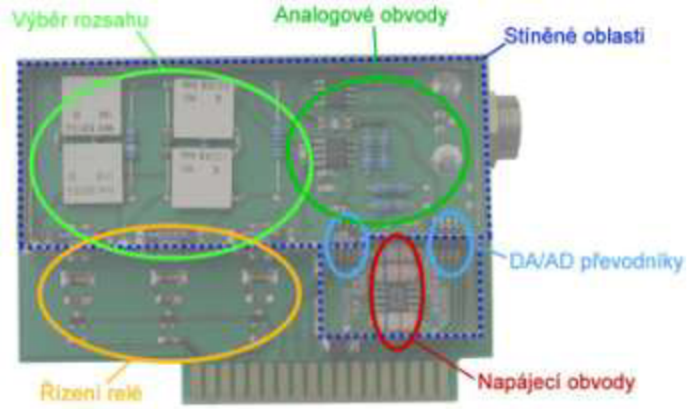
Oproti výsledkům naměřených na testovacích zařízeních se na prototypu vstupních modulů ukázalo, že při měření nejnižšího rozsahu (±100 pA) přestává fungovat zpětná vazba operačního zesilovače IO4A vlivem zařazeného velkého zpětnovazebního rezistoru. Proto byl do zapojení přidán ještě oddělovací operační zesilovač, jak ukazuje obrázek 14, který sice

mírně zhoršil parametry na ostatních rozsazích, avšak měření na nejmenším rozsahu již bylo realizovatelné. Na dodatečnou kompenzaci vložené chyby na vyšších rozsazích byl vložen do obvodu rezistor R13, který je pro nízké rozsahy vstupních proudů zanedbatelný, ale umožňuje odstranit celou větev se sledovačem při měření vyšších rozsahů. Díky odporu nedojde k přetížení výstupu operačního zesilovače zapojeného jako sledovač ve chvíli, kdy je sepnuto relé RE1B eliminující velké zesílení na rozsazích velkých proudů. Všechny odpory ve zpětné vazbě jsou taktéž zakresleny jakoby dvojité (paralelní) rezistory, což je pouze kvůli umožnění zapojení součástek buď v SMD, nebo vývodovém provedení (druhý prvek zůstane nezapojen). Tím je možné dodatečně korigovat šum použitím rezistorů s vyšší přesností a stabilitou, avšak nedojde ke zvětšení prostoru na DPS, neboť jsou pájecí plošky paralelních prvků umístěny pod sebou.



Obrázek 15 – Schéma zapojení A) napájecích obvodů a B) generátoru virtuální země

Poslední částí zapojení (mimo konektorů) je zdroj napájecího napětí vstupních modulů tvořený nízkošumovým precizním regulátorem napětí, který je doplněn o filtrační tlumivku na vstupu i výstupu, přičemž napájecí linka pro analogové i digitální obvody je z důvodu lepšího oddělení odváděna samostatně, přes vlastní tlumivku (viz. obrázek 15). Do napájecích obvodů lze zařadit také obvod pro vytvoření virtuální země potřebné pro správnou činnost analogových obvodů. Pokud budou použity stejné rezistory na vstupním děliči R7 a R8, bude navíc zaručena minimální teplotní závislost (pohyb) napětí virtuální země.

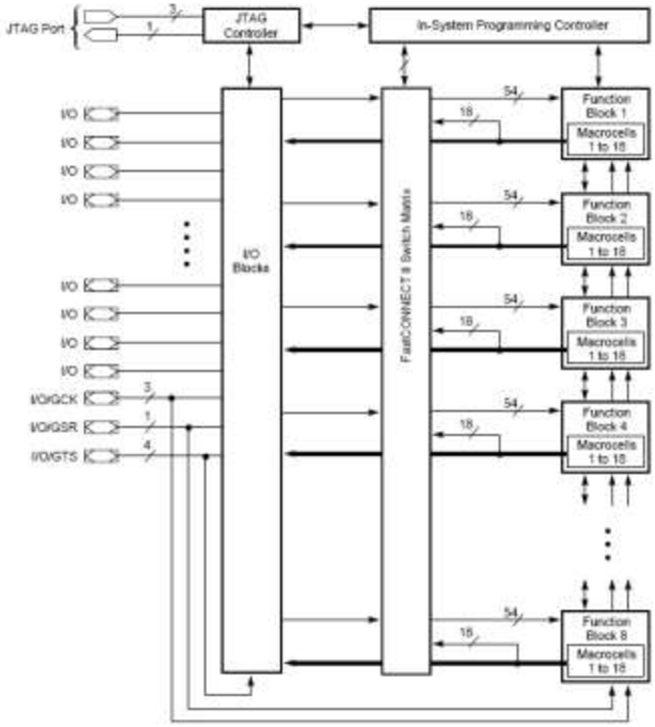


Obrázek 16 – Výsledné rozmístění bloků první verze vstupního modulu na DPS

Při návrhu konkrétní desky plošných spojů vstupních modulů bylo také počítáno s vhodným rozmístěním součástek po celém povrchu tak, aby bylo zabráněno šíření nežádoucích vlivů, jako je rušení a parazitní signály. Obrázek 16 zachycuje koncepci rozmístění prvků na DPS s přísným dodržením rozdělení na analogovou část, část AD a DA převodníků, napájecí část a silovou část (obvody spínání relé). Kritické oblasti byly navíc umístěny tak, aby bylo možné jejich následné odstínění umístěním do kovové uzavřené krabičky. Celá spodní strana je jako stínění vylitá mědí spojenou se zemním spojem (kromě jedné krátké napájecí cesty). Na obrázku je zachycena prototypová verze vstupního modulu, přičemž druhá verze s přidaným napěťovým sledovačem zachovává obdobnou topologii, jen tvar stínící krabičky je jednodušší (bez zbytečných ohybů) a celá DPS je navržena o cca 5 mm kratší. Kompletní návrh DPS modulů je zobrazen v přílohách (viz. příloha 18 a příloha 19).

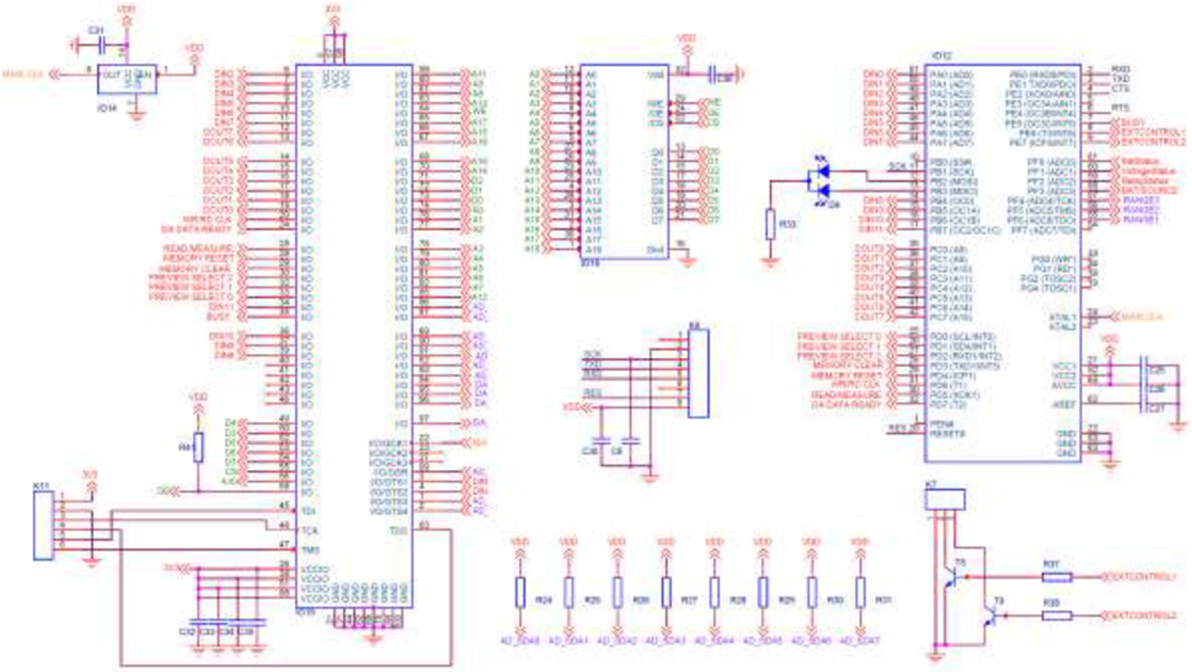
2.6.2 Řídící digitální část

Jak již bylo dříve zmíněno, řídící obvody jsou tvořeny řídícím mikrokontrolérem koordinujícím činnost celého zařízení a vytvářejícím hodnoty výstupního napětí v digitální podobě, programovatelným logickým obvodem CPLD obsluhujícím samotné vstupní moduly a průběh měření včetně zápisu paměti RAM, která je poslední základní částí řídících obvodů. Jen tyto tři prvky tvoří základní celek řídících obvodů a jejich podrobnější princip digitálního propojení byl diskutován v kapitole 2.1 a znázorněn na blokovém schématu (viz. obrázek 5).



Obrázek 17 – Vnitřní blokové zapojení obvodu CPLD XC95144XL [17]

Ve výsledku lze jen dodat, že obvod CPLD obsahuje vnitřní propojovací matici fyzických vývodů pouzdra na interní signály a díky tomu je zcela jedno, na které vývody obvodu je připojen daný signál (viz. obrázek 17). Pozor je třeba dát pouze na připojení hlavního řídícího hodinového signálu, pro nějž je vyhrazeno několik linek s minimálními parazitními kapacitami a lepšími vlastnostmi pro přenos vyšších kmitočtů. Tato vlastnost programovatelných obvodů výrazně ulehčuje konečný návrh DPS, kdy lze spoje maximálně zkrátit a zjednodušit (viz. schéma, obrázek 18).



Obrázek 18 – Kompletní propojení řídících obvodů potenciostatu

Pro názornost jsou jednotlivé druhy digitálních signálů na schématu barevně odděleny. Zelená barva jsou signály komunikace s pamětí RAM, fialová se vstupními moduly, červená s řídícím mikrokontrolérem a oranžová jsou hlavní časovací signály. Pro generování hodinového signálu je použit precizní oscilátor IO14 znázorněný na ilustračním nákresu (viz. obrázek 19). Ten má navíc vyveden výstup OE pro potlačení oscilací, přičemž tento vývod bude v konečném zapojení neaktivní (funkce nebude využita). Kromě zmíněných prvků obsahuje schéma řídících obvodů i konektory K8 a K11 sloužící k nahrávání firmwarů přímo v aplikaci (pomocí rozhraní ISP pro mikrokontrolér [16] a JTAG pro CPLD [17]).

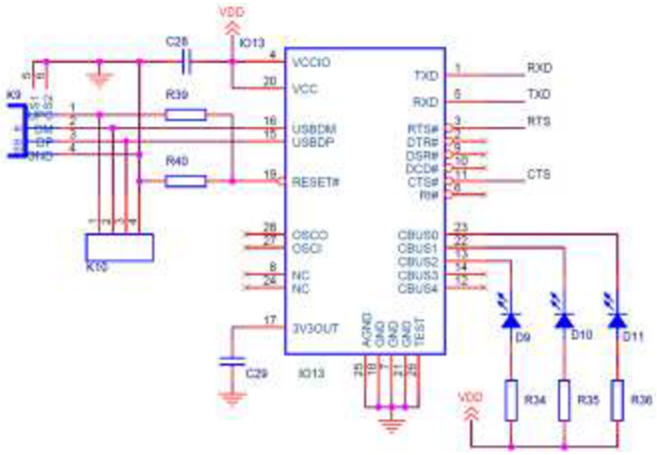
Kromě samotného měření je plánována spolupráce přístroje s dalšími externími prvky, například senzorovým multiplexorem. Pro tento účel bylo nutné vytvořit komunikační rozhraní, které bude maximálně přizpůsobitelné. Opominou-li se specializovaná rozhraní jako je například průmyslová sběrnice RS485, nebo sběrnice CAN a další, neboť není předem jasné, zda bude připojené externí zařízení (mimo senzorový multiplexor) tyto sběrnice podporovat, pak je nejvýhodnějším zapojením výstupů univerzální zapojení s otevřeným kolektorem. To umožňuje jak velkou flexibilitu komunikace (lze libovolně řídit ovládacím mikrokontrolérem jako přímé výstupy), tak i jednoduchost zapojení a snadné přizpůsobení jiným napěťovým úrovním (pouhým připojením externích Pull-Up rezistorů). Pro jeho realizaci v přístroji stačí využít jednoho tranzistoru pro každou linku (T8 a T9) s omezovacím rezistorem (R37 a R38). Ve výsledku pak tento tranzistor bude mít v případě rozepnutého stavu na výstupu vysokou impedanci, anebo bude výstup připojen na 0 V při sepnutém stavu tranzistoru. Pak stačí kromě všech datových linek vyvést na konektor jen jeden referenční vodič 0 V, aby byla komunikační linka kompletní.

V poslední řadě se na schématu nachází informativní dvoubarevná LED dioda D8 indikující stav zařízení a Pull-Up rezistory R24 až R31 zajišťující připojení definované logické úrovně na vstupy CPLD, pokud není do hlavní desky vložen některý ze vstupních modulů (díky tomu lze nepřipojený modul automaticky snadno identifikovat).

Obrázek 19 – Příklady druhů krystalových oscilátorů

Posledním drobným problémem při propojování obvodů je přizpůsobení napěťových úrovní. Jelikož obvod CPLD pracuje pouze s napájecím napětím 3,3 V, ale má vstupy uzpůsobené na komunikaci se signály o úrovních 5 V (viz. [17]), měly by všechny řídící obvody (kromě CPLD) bezproblémově pracovat s napájecím napětím 5 V. Z tohoto důvodu jsou na kritických místech umístěny Pull-Up rezistory, zabraňující hardwarové chybě (například R41 pro stoprocentní zajištění správného nastavení výstupních třístavových budičů RAM). Kompletní schéma řídících obvodů je uvedeno na konci dokumentu (viz. příloha 9).

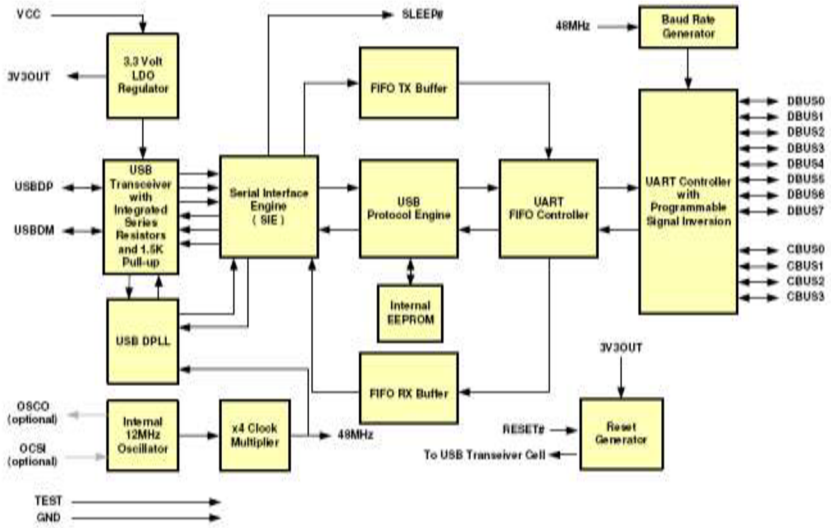
2.6.3 Komunikace s počítačem



Obrázek 20 – Zapojení obvodu pro komunikace s počítačem přes USB

Pro komunikaci s počítačem z důvodu přenosu naměřených dat a obsluhu přístroje bylo pro svou jednoduchost, rychlost, univerzálnost a přítomnost na téměř každém PC zvoleno rozhraní USB. Pro jeho připojení na standardní porty kontroléru je nejvýhodnější použít specializovaný převodník, například FT232R [20], jako v tomto případě. Ten zvládne s minimálním počtem externích součástek jak převod rozhraní USB na standardní UART tak i zobrazování stavu aktuální komunikace na LED diodách D9 až D11 (viz. obrázek 20).

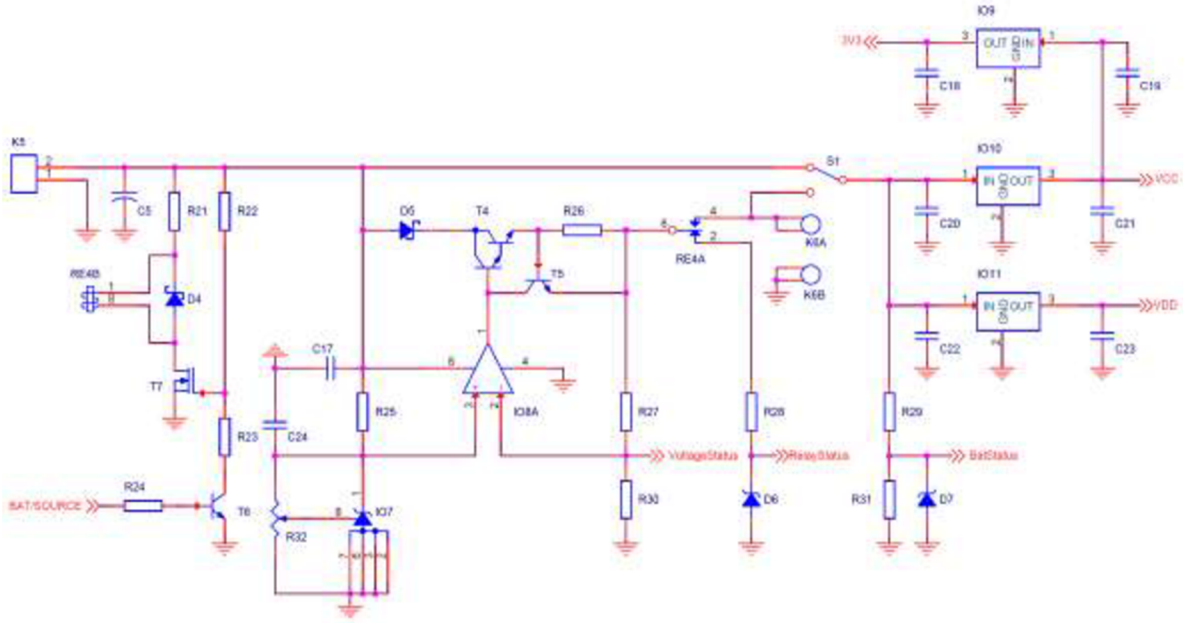
Převodník je v počítači obsluhován pomocí ovladače D2XX, který je rychlejší, i když na implementaci složitější než druhá varianta, kterou obvod nabízí, a sice emulaci sériového COM portu. Obvod je k samotné sběrnici USB připojen buď pomocí servisního interního konektoru K9, který je umístěn přímo na DPS, nebo pomocí externího konektoru K10 umístěného zvenku na zadní straně přístrojové krabičky.



Obrázek 21 – Zjednodušené vnitřní schéma převodníku USB/UART FT232R [20]

2.6.4 Napájecí obvody

Jestliže se dají řídící obvody považovat za mozek přístroje a vstupní moduly za jeho smysly, pak lze bezesporu napájecí obvody označit jako srdce celého zařízení. Ty na první pohled vypadají složitě (viz. obrázek 22), avšak po rozdělení na menší celky jsou snadno přehledné. Na úplném výstupu se nacházejí tři stabilizátory dílčích napětí. IO11 tvoří napětí 5 V pro napájení digitálních obvodů, IO10 tvoří hlavní analogové napájení a IO9 snížené napětí 3,3 V pro ostatní obvody, které toto napětí vyžadují. Vstupní, nestabilizované napětí je přivedeno do dílčích stabilizátorů přes hlavní vypínač. Pro snížení úbytku na stabilizátoru nejnižšího napětí a tím i snížení jeho ztrátového výkonu je vstup tohoto stabilizátoru brán až z nižšího napětí na výstupu stabilizátoru IO10.



Obrázek 22 – Detail napájecích obvodů

Hlavním vypínačem se vybírá režim činnosti, kdy je zařízení vypnuto, případně pracuje s připojeným externím zdrojem v režimu dobíjení baterie (spínač S1 v horní poloze přivádí napětí k interním obvodům ze vstupního zdroje), nebo režim normálního provozu, kdy je napájecí proud odebírán z baterie (během měření) nebo ze zdroje při současném dobíjení baterie (v čase mezi měřeními). Samotné automatické přepínání mezi časem měření a klidem realizuje spínací relé RE4, které bylo zvoleno z důvodu zaručení absolutního odpojení baterie, pokud není připojen externí zdroj napětí, případně v době měření. O aktuálním stavu relé je řídící mikrokontrolér informován pomocí sekundárního vývodu spínacích kontaktů, přes které se v době odpojení od baterie dostane přes 4,7 V omezovač napětí (R28 a D6) na vývod mikrokontroléru logická úroveň 1. Relé je naopak mikrokontrolérem řízeno přes dvojici

tranzistorů T6 a T7. Toto zapojení by šlo realizovat i jednodušším způsobem, avšak nebylo by možné uskutečnit zároveň automatické odpojení baterie v případě poklesu napětí externího zdroje a zároveň ovládání řídícím mikrokontrolérem. Za normálního stavu je relé sepnuto externím napětím přes tranzistor T7, který je otevírán přivedeným napětím přes R22. Pokud je externí napětí nízké, není z čeho odebírat proud pro cívku relé a to je automaticky odpojeno. Naopak pokud je třeba relé vypnout (při měření), stačí mikrokontrolérem otevřít tranzistor T6, snížit napětí na hradle MOS tranzistoru a ten tímto způsobem uzavřít, čímž se relé taktéž odpojí (viz. obrázek 22).

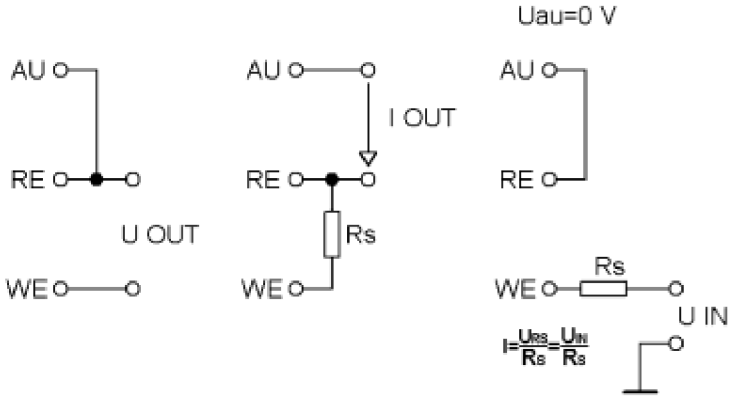
Poslední částí napájecích obvodů je kontrolováno dobíjení baterie. To probíhá metodou konstantního napětí s omezením maximálního nabíjecího proudu. Proudové omezení je realizováno tranzistorem T5 se snímacím rezistorem R25. Jakmile stoupne proud tímto rezistorem nad kritickou mez, vzroste úbytek na něm natolik, že otevře omezovací tranzistor. Ten svým otevřením sníží napětí na přechodu BE výkonového darlingtonova tranzistoru T4, který tím přivře a ten následně nedovolí další zvyšování proudu baterií. Velikost maximálního proudu je tedy dána podílem U_{BE_T2} / R26. Pokud maximální proud není překročen, tranzistor T5 se vůbec neprojeví a dobíjecí napětí na baterii je udržováno pomocí záporné zpětné vazby přes operační zesilovač IO6A, který je zapojen jako neinvertující zesilovač s proudovým posílením na výstupu. Přes zpětnovazební dělič je navíc kontrolováno napětí na baterii i řídícím mikrokontrolérem (linka Voltage status). Tímto principem lze dobíjet většinu druhů baterií, přičemž se vždy nastaví jen maximální dobíjecí proud a maximální napětí nabité baterie. To lze jednoduše nastavit pomocí trimru R32, jímž je řízen referenční zdroj napětí IO7 s omezovacím rezistorem R25. V obvodu je ještě zapojena shottkyho dioda D5, která zajistí, aby relé dobíjení nezůstalo po odpojení externího zdroje napětí sepnuto pomocí zpětného proudu z baterie (T5 má v pouzdře zabudovanou ochrannou diodu v závěrném směru uzavírající tento nežádoucí obvod).

Jediné, dosud nezmíněné součástky tvoří dělič R29, R31 s ochrannou diodou D7. Tímto děličem lze měřit a odečítat přesné aktuální napětí na baterii a tím i její stav nabytí. Na DPS je vhodné napájecí obvody umístit co nejdále od vstupních modulů, aby vlivem zahřívání stabilizátorů nedocházelo k přenosu tepla na vstupní moduly a následně ke zvětšení chyby měření (ofsetu a šumu). Jiná omezení na návrh hlavní DPS (kromě vhodného rozmístění konektorů na analogové moduly a standardního postupu návrhu maximální vzdálenosti digitálních linek a obvodů od analogových částí) není třeba klást. Kompletní návrh řídící DPS je pak zobrazen v přílohách na konci dokumentu (viz. příloha 20 až příloha 23). Poslední zmínku je vhodné věnovat výběru externího zdroje, který by neměl být spínaný, jak je dnes často zvykem, protože by se jeho rušení mohlo snadno přenést do citlivých vstupních modulů.

2.7 Alternativní možnosti využití zařízení

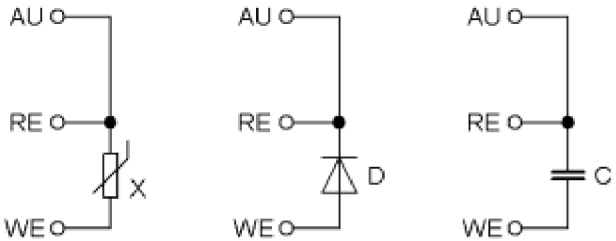
Protože navrhované zařízení je přesný nízkošumový zdroj napětí a zároveň měřič malých, až pikoampérových proudů, je možné jej kromě samotného měření chemických veličin následně upravit, aby mohl měřit i další, nejen chemické hodnoty. Veškeré úpravy, které je třeba vytvořit pro měření jiných veličin, spočívají v upraveném zapojení vstupních analogových konektorů (nepřipojují se snímací elektrody, ale měřící vývody). Druhá nutná úprava spočívá v ovládacím softwaru, který musí generovat jiné průběhy výstupního napětí a zobrazovat jiné jednotky měřeného proudu v závislosti na měřené veličině.

Ve většině upravených zapojení je použito propojení společné a referenční elektrody (až u koncového zapojení), kterým se uzavírá zpětná vazba. V základním principu pak lze využít zařízení jako přesný zdroj napětí nebo proudu (viz. obrázek 23A nebo B), případně voltmetr, jehož rozsah je dán předřadným snímacím rezistorem, který funguje jako převodník napětí/proud a zároveň udává vstupní odpor voltmetru.



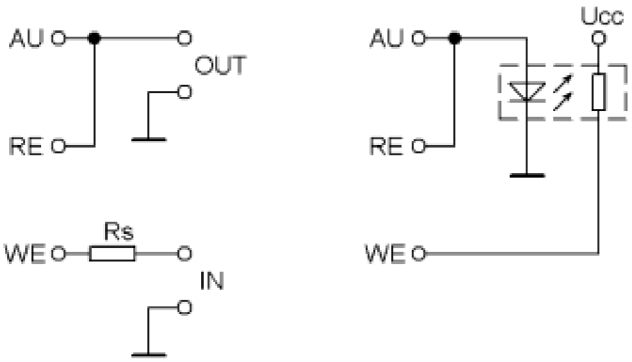
Obrázek 23 - Alternativní zapojení jako A) zdroje napětí, B) proudu a C) voltmetru

Pokud se spojí jak princip napěťového zdroje, tak i přesného proudového měřiče, lze získat přístroj pro měření neznámých A-V charakteristik, případně malých závěrných proudů diodami, Gumelových charakteristik, kapacit přechodu (C-V charakteristik) či kondenzátorů. Dále lze snímat i průběhy nabíjecích a vybíjecích charakteristik (viz. obrázek 24), což se hodí například k zjišťování stavu dielektrik. Pokud bude navíc zapojení rozšířeno přidáním externího systému (viz. obrázek 25), případně optického prostředí mezi zdroj a přijímač optického záření, bude možné analyzovat přenosové charakteristiky neznámých obvodů, útlumy optického prostředí apod.



Obrázek 24 - Alternativní zapojení pro měření A) VA charakteristik, B) kapacit, proudů a napětí diodou a C) nabíjecích a vybíjecích charakteristik kondenzátorů a izolantů

Díky těmto a dalším podobným možnostem rozšíření zařízení (zde byly nastíněny jen základní možnosti rozšíření) se z jednoúčelového přístroje pro měření chemických veličin může stát plnohodnotný přístroj pro analýzu (nejen elektronických systémů) v testovacích laboratořích a dalších odvětvích průmyslu, jako je například výstupní kontrola výrobců polovodičových součástek apod.



Obrázek 25 - Alternativní zapojení pro analýzu přenosových charakteristik A) neznámých systémů, nebo B) optických prostředí

3 Programové vybavení

Stejně jako hardware je nedílnou součástí zařízení i programové vybavení sestávající se ze tří hlavních odvětví. Mezi tato odvětví patří firmwary řídících mikrokontrolérů (mikrokontroléry v senzorovém multiplexoru a v potenciostatu samotném) a popis vnitřního zapojení programovatelného logického obvodu CPLD potenciostatu v jazyku VHDL [9], který by se dal také zařadit do oblasti firmwarů. Poslední oblastí je pak ovládací software v počítači, který je kromě zprostředkování komunikace a ovládání zařízení uživatelem schopen i vyhodnocovat, upravovat a exportovat získaná data.

3.1 Firmware senzorového multiplexoru

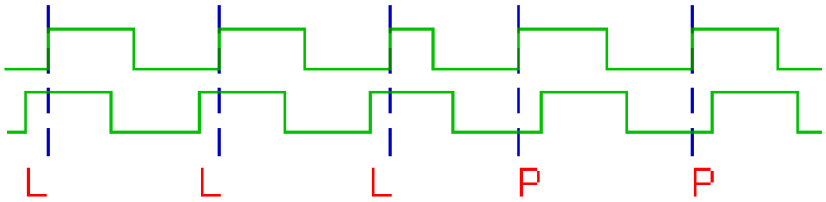
Základním úkolem firmwaru v mikrokontroléru ovládajícím multiplexor senzorového pole je umožnit uživateli manuální ovládání výběru senzorů (režim zcela manuálního výběru senzoru a režim automatického přepínání senzoru po uživatelem nastaveném čase prodlevy) a automatický výběr senzoru pomocí synchronizační linky mezi senzorovým multiplexorem a zařízením potenciostatu. Uživatel je o aktuálně vybraném senzoru informován LED displejem ovládaným přímo mikrokontrolérem [16], na kterém je zobrazena pozice vybraného senzoru / skupiny senzorů (korespondující s označeními na standardním senzorovém poli) a pomocí teček signalizován režim přepínání (u manuálního režimu tečky nesvítí, u automatického svítí a u časového se střídavě rozsvěcí s rychlostí korespondující s časovou prodlevou). Dále může být firmware doplněn o možnost komunikace přímo s počítačem pomocí USB sběrnice, přičemž ale tato možnost není v současné době využita, protože ovládání uživatelem a synchronizační linkou plně dostačuje (návrh DPS s touto variantou počítá a není problém ji v budoucnu doplnit, viz. kapitola 2.5).

V hlavní programové smyčce probíhá pouze inicializace zařízení po spuštění (nastavení periferií mikrokontroléru a zrušení výběru senzoru), a v nekonečné smyčce pak nastavení rozsvícení teček LED displeje v závislosti na aktuálním režimu a času do dalšího přepnutí (v případě automatického časového režimu). Po nastavení se aktivují požadované vodivé cesty od vybraného senzoru na výstup (sepne se příslušné relé pro pracovní elektrody a aktivuje vybraný vstup CMOS multiplexorů pro společné a referenční elektrody), a poté se celá smyčka opakuje. Zobrazování znaků na displeji a nastavování režimů včetně jejich parametrů je pak vyhodnocováno pomocí externích a časových přerušení mikrokontroléru.

Protože displej má značný počet vývodů, je zapojen dynamicky, a proto je ovládán pomocí časového přerušení, které se volá každých 5 ms (frekvence obnovení celého displeje je tedy 100 Hz a blikání tak není viditelné). V přerušení dochází k deaktivaci společných

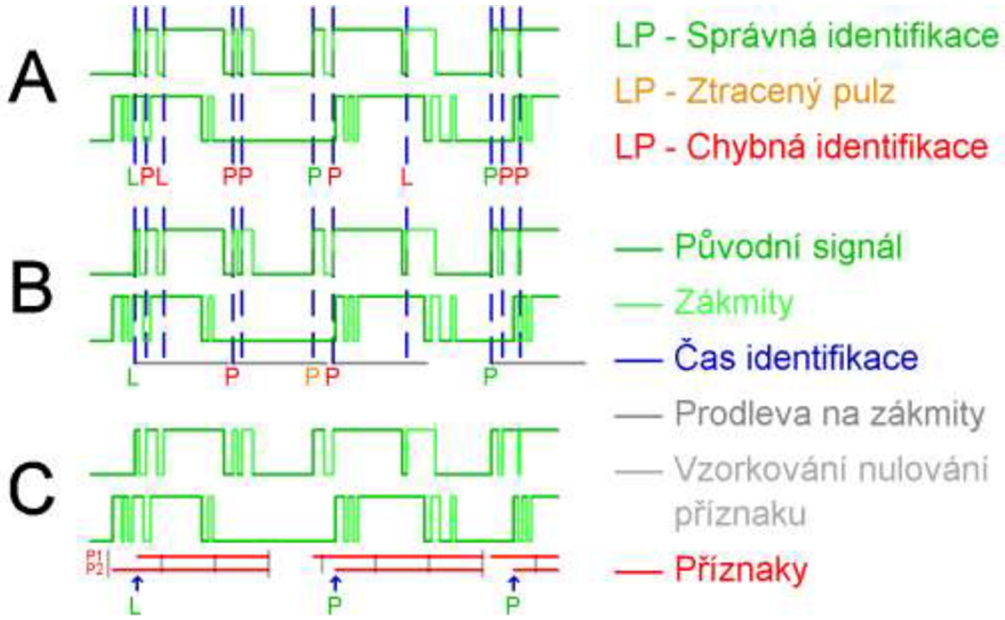
elektrod displeje a výpočtu aktivních segmentů displeje pro jeho levý, resp. pravý znak (vzhledem k poslednímu rozsvícenému) v závislosti na řádku a sloupci umístění aktuálně vybraného senzoru. Vypočtené segmenty jsou včetně bitu pro aktivaci příslušné společné elektrody přeneseny na porty mikrokontroléru [16]. Kombinace segmentů pro každý znak na displeji (mimo teček) je uložena a posléze načtena z paměti programu mikrokontroléru.

Uživatel ovládá zařízení pomocí IRC čidla, jehož signály je potřeba v programu správně dekódovat. V zařízení je použito IRC se zabudovaným tlačítkem, které slouží jednak k přepínání mezi režimy (manuálním a časovým) jeho dlouhým stiskem (delším než 0,5 s) a krátkým stiskem se zruší aktuálně vybraný senzor (nastavení pole do startovací pozice). Pro rozeznání směru a počtu kroků otočení jsou z čidla vyvedeny dva vzájemně fázově posunuté signály (viz. obrázek 26).



Obrázek 26 – Znázornění signálů IRC čidla pro oba směry točení (Levý a Pravý)

Pokud došlo k otočení v jednom směru, zpožďuje se signál č. 1 oproti signálu č. 2 a naopak při otočení v druhém směru [21]. Protože se v reálném prvku jedná o spínače realizované mechanickými kontakty, dochází při přepínání mezi dvěma stavy vlivem pohybu kontaktů k zákmitům, které je třeba potlačit. Částečně může dojít k potlačení již na hardwarové úrovni přidáním RC prvku potlačujícího rychlé změny (filtr typu dolní propust), ale ve většině případů toto nestačí a musí být zákmity potlačeny programově. Je-li algoritmus potlačení zákmitů neefektivní, může docházet ke ztrátě reálných pulzů otočení IRC, ale také k přidání fiktivních přechodů a to jak ve směru otáčení tak i proti němu. Ve výsledku pak při otáčení může dojít k vyhodnocení programem, jakoby se IRC otáčelo pořád na jednom místě střídavě na levou a pravou stranu, což je zcela jistě nežádoucí jev. Nejjednodušším (ale také nejhorším) způsobem vyhodnocení je ten, že se čeká na nástupnou hranu jednoho signálu a podle aktuální úrovně druhého signálu se vyhodnotí směr otáčení (viz. obrázek 27, průběh A). To je použitelné pouze u čidel s vynikajícími vlastnostmi, která mají zaručeno, že se doby zákmitů obou signálů nebudou překrývat. O něco lepší variantou je tento způsob doplnit o dobu nečinnosti programu po vyhodnocení první změny. Zde ovšem nastává problém, jak určit velikost doby nečinnosti, protože musí být větší než maximální délka náhodných zákmitů, ale zároveň kratší než délka pulzu z IRC, která je ovšem závislá na rychlosti otáčení. Pokud není délka vhodně nastavena, dochází k chybám (viz. obrázek 27, průběh B).



Obrázek 27 – Znázornění tří možných softwarových metod vyhodnocení signálů IRC čidla (L a P jsou směry otáčení): A) Bez potlačení zákmitů, B) S časovým potlačením zákmitů, C) S potlačením zákmitů pomocí příznaků

V popisovaném firmwaru je použita nejsložitější varianta detekce, která ovšem vykazuje nejlepší vlastnosti (bez ztracených a falešných impulzů a bez nastavování časových konstant zákmitů). V tomto případě (viz. obrázek 27, průběh C) se provádí detekce pomocí dvou příznaků P1 a P2, které jsou nastaveny při náběžných hranách signálů 1 a 2 získaných z IRC a nulovány ve chvíli, kdy je největší pravděpodobnost, že všechny zákmity již odezněly (když je na obou signálech logická úroveň 0). Přesnost je zvýšena ještě tím, že údaj nulování příznaků není vyhodnocován plynule ale každých 250 µs, což je čas zaručeně kratší než doba pulzů na signálech z IRC, takže činnost čidla zůstane nenarušena. Pravděpodobnost, že je ve stejnou chvíli vlivem zákmitů log. 0 na obou signálech, a zároveň se tak stane v době vzorkování po 250 µs, je značně menší oproti pravděpodobnosti vzniku chyb v předchozích dvou metodách vyhodnocení a je téměř zanedbatelná. Údaj o pohybu a směru je pak vyhodnocen ve chvíli, kdy se některý z příznaků změní a druhý je již změněn.

Mimo manuálního režimu lze ovládat multiplexor i pomocí synchronizační linky. Ta je koncipována jako co možná nejjednodušší, aby ji bylo možné snadno upravit na stávající systémy, pokud by senzorový multiplexor nebyl používán pouze s vyvíjeným potenciostatem. Z tohoto důvodu jsou v synchronizační lince obsaženy dva signály. Řídící signál spouští automatický režim a při jeho aktivaci (logickou úrovní 0) se nuluje pozice aktuálního senzoru. Výběrový signál pak každým pulzem (sestupnou hranou) inkrementuje pozici aktuálního senzoru o 1. Výběrový signál je aktivní pouze v případě aktivního automatického režimu a naopak manuální ovládání pomocí IRC je možné, jen pokud je automatický režim neaktivní.

3.2 Firmware mikrokontroléru potenciostatu

Firmware pro hlavní řídící mikrokontrolér (viz. [16]) je vytvořen tak, aby pracoval ve třech režimech. Jednak je to režim pasivní, kdy zařízení vyčkává do spuštění měření, pak je to režim měření, kdy probíhá měření podle nastavené měřící metody. V poslední řadě je to režim odesílání naměřených dat do obslužného programu v počítači. Po spuštění zařízení je nejdříve provedena inicializace periferií mikrokontroléru a všechny vstupní moduly jsou uvedeny do stavu s minimální spotřebou a výstupním napětím senzorů 0 V. Po dokončení inicializace se program dostane do cyklu nekonečné smyčky. Kromě této nekonečné smyčky může být vykonání programu přerušeno příjmem příkazu po sériové lince z počítače (bude popsáno v samostatné kapitole 3.4). V nekonečné smyčce se nejdříve provede změření napětí, jak na baterii, tak i na externím napájecím zdroji a podle aktuálního stavu se rozsvítí indikační dvoubarevná LED dioda na čelním panelu přístroje. Význam jednotlivých signálů je popsán níže (viz. tabulka 3). Pokud je napětí na externím zdroji dostatečné a neprobíhá měření, automaticky se spustí i dobíjení interní baterie.

Tabulka 3 – Režimy činnosti zařízení a popis stavů indikační LED

Stav LED diody	Napětí	Režim činnosti zařízení
Nesvítí	-	Zařízení vypnuto
Dvoubarevné blikání	-	Inicializace zařízení
Svítí zelená	$U_{BAT} > 13.6$ V	Připraveno k měření, nabíjení dokončeno
Bliká zelená	$U_{BAT} \leq 13.6$ V; $U_{EXT} > 14.5$ V	Dobíjení baterie
Svítí červená	$U_{BAT} > 10.2$ V	Probíhá měření
Bliká červená	$U_{BAT} \leq 11.0$ V; $U_{EXT} < 14.5$ V	Nízké napětí baterie

Nebyla-li ze strany PC podána žádost na zaslání naměřených dat, nebo spuštění měření, je měření napětí a ovládání napájecích obvodů jediná činnost, která se v hlavní programové smyčce vykonává. Pokud byl přijat požadavek na zaslání naměřených dat, jsou tato data pomocí CPLD (viz. [17]) načtena a odeslána zpět do řídící aplikace v počítači (bližší struktura přenosu dat je popsána dále v kapitole 3.4). Přenášená data navíc obsahují informaci o počtu dat v paketu a také informaci zda již byla odeslána všechna naměřená data. Pokud je totiž v paměti záznamů více než 250 B dat, pak se zašle jen prvních 250 B a další data si opět aplikace v počítači vyžádá po zpracování celého paketu. Maximální velikost paketu lze nastavit i na vyšší hodnotu, ale vzhledem k velikosti souboru dat běžného měření (řádově jednotky kB) je takto velký zásobník dostatečný a není nutné zbytečně vyhrazovat místo

v paměti (mikrokontroléru i PC) pro více dat. Před odesláním dat z RAM paměti do počítače dojde také ještě k jejich převedení do srozumitelné formy (v RAM jsou data uchovávána ve formátu urychlujícím měření a zasílána do PC jsou ve formátu odpovídajícím daným modulům, viz. obrázek 28). Kromě toho jsou rozpoznány kanály s nepřipojenými moduly a tato data jsou označena za neplatná (číslo je nahrazeno hodnotou 0xEFFF, 32767). Nový formát tak již odpovídá struktuře *signed short int* (celé číslo o velikosti 2 B, viz. [22]), oproti původnímu formátu čísla. To odpovídalo číslu generovanému AD převodníky včetně signálu připojeného převodníku (ACK, pokud ACK = 0 je daný kanál připojen), viz. obrázek 28.

RAM paměť

	CH7	CH6	CH5	CH4	CH3	CH2	CH1	CH0	Adresa
	D0	D0	D0	D0	D0	D0	D0	D0	N-1
ACK Bit	ACK	ACK	ACK	ACK	ACK	ACK	ACK	ACK	N
Data 12	D12	D12	D12	D12	D12	D12	D12	D12	N+1
Data 11	D11	D11	D11	D11	D11	D11	D11	D11	N+2
Data 10	D10	D10	D10	D10	D10	D10	D10	D10	N+3
Data 9	D9	D9	D9	D9	D9	D9	D9	D9	N+4
Data 8	D8	D8	D8	D8	D8	D8	D8	D8	N+5
Data 7	D7	D7	D7	D7	D7	D7	D7	D7	N+6
Data 6	D6	D6	D6	D6	D6	D6	D6	D6	N+7
Data 5	D5	D5	D5	D5	D5	D5	D5	D5	N+8
Data 4	D4	D4	D4	D4	D4	D4	D4	D4	N+9
Data 3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	N+10
Data 2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	N+11
Data 1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	N+12
Data 0	D0	D0	D0	D0	D0	D0	D0	D0	N+13
	ACK	ACK	ACK	ACK	ACK	ACK	ACK	ACK	N+14

Zásobník vysílacího UARTu

									Adresa
CH0	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	N
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	N+1
CH1	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	N+2
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	N+3
CH2	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	N+4
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	N+5
CH3	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	N+6
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	N+7
CH4	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	N+8
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	N+9
CH5	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	N+10
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	N+11
CH6	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	N+12
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	N+13
CH7	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	N+14
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	N+15

Obrázek 28 – Struktura dat A) uložených v RAM a B) posílaných do PC

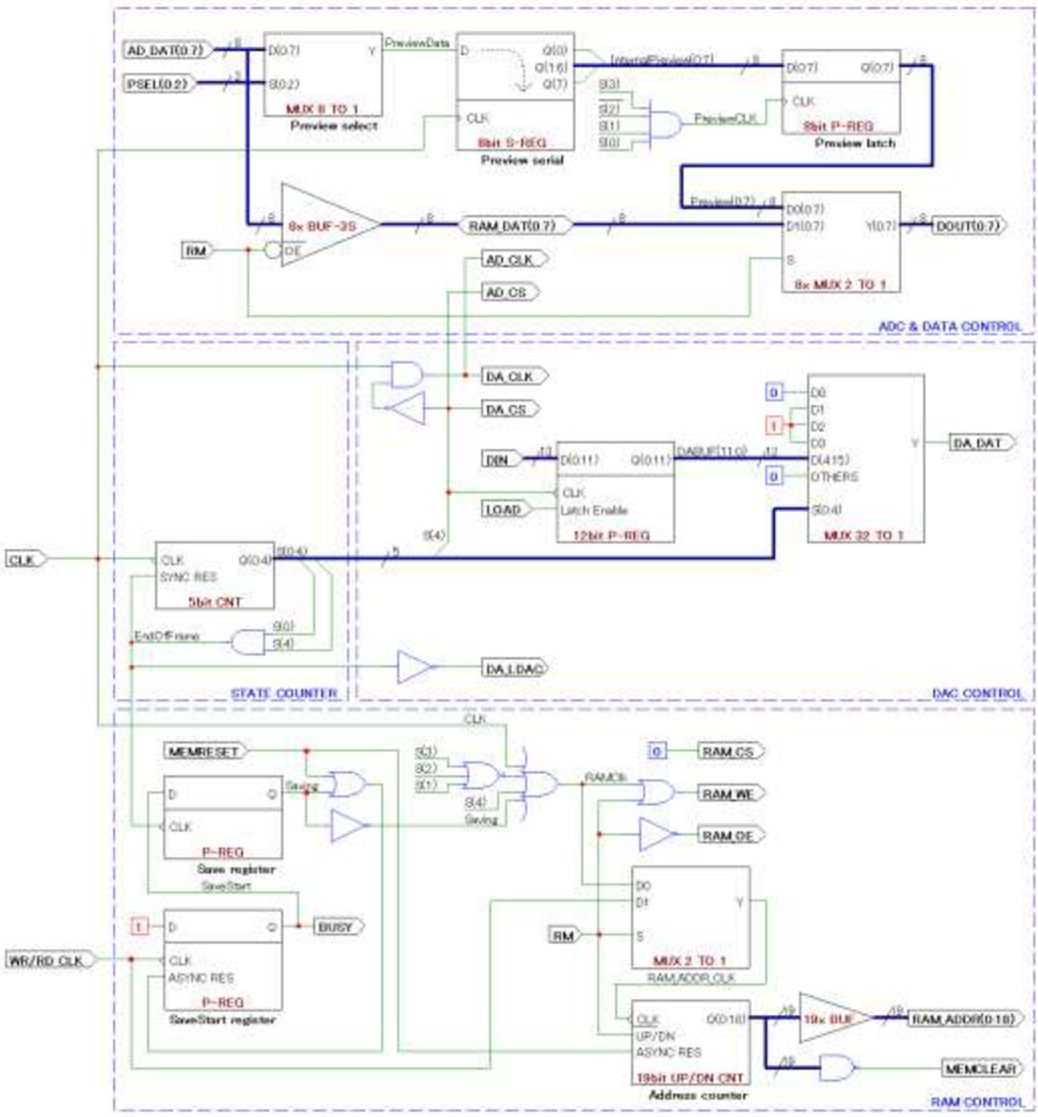
Pokud byla přijata žádost na spuštění měření, nastaví se příznak signalizující tuto skutečnost. V hlavní programové smyčce se jeho nastavení vyhodnotí a provede se test, zda je k dispozici dostatečně nabitá baterie (její napětí nesmí klesnout pod 10,2 V). Pokud ano, pak se přejde na čistě bateriové napájení, odstraní se možná data z RAM paměti, zinicializuje se obvod CPLD v režimu měření, nastaví měřicí rozsahy vstupních modulů a vyčká se ustálení pracovních podmínek (napájecího napětí po přepnutí režimu). Jakmile jsou všechny předešlé kroky dokončeny, vyvolá se podprogram provádějící požadovanou měřicí metodu. Tento podprogram může být ukončen dvěma způsoby, a sice regulérním způsobem (po dokončení všech operací měření), anebo zrušením příznaku probíhajícího měření (z PC přišla žádost na předčasné ukončení měření). Jakmile je podprogram měření ukončen jedním ze zmiňovaných způsobů, následuje nastavení nulového výstupního napětí všech analogových modulů, spotřeba celého zařízení je minimalizována vhodným nastavením pracovních podmínek. CPLD se přepne do režimu čtení záznamů a zařízení přejde na standardní napájecí režim (pokud je připojen externí zdroj napětí, začne se dobíjet baterie). Po této operaci je zařízení opět ve standardní nekonečné programové smyčce a vyčkává dalších pokynů z počítače.

A nyní blíže k popisu samotných měřicích podprogramů a průběhu měření jako takového. Základem každého měření je několik stavových proměnných, které jsou nastavovány uživatelem (druh měřicí metody, perioda ukládání záznamů, počet měřicích cyklů), nebo automaticky v průběhu měření (celková doba probíhajícího měření v milisekundách, čas od posledního význačného bodu měření, čas od posledního uložení záznamu). Všechny tyto stavové proměnné jsou nastavovány nezávisle na měřicí metodě a kromě nich je ještě z počítače přijata zpráva o parametrech konkrétního měření. Údaje a formát dat v této zprávě (v zásobníku o velikosti 32 B) závisí na dané měřicí metodě a musí být identifikován a rozpoznán až v jednotlivých podprogramech měření. V těchto samotných podprogramech dojde nejdříve k nastavení specifických proměnných každé měřicí metody z hodnot vstupních parametrů, nastavení počátečního výstupního napětí analogových modulů, vynulování časů měření a spuštění časovače měření, který pomocí přerušení mikrokontroléru automaticky inkrementuje hodnoty uplynulých časů. Poté následuje programová smyčka samotného měření, která v závislosti na uplynulém času měření a specifických vstupních parametrech nastavuje hodnoty výstupního napětí a podle času od posledního uložení dat vyhodnocuje, zda není třeba uložit další záznam a pokud ano, vyšle signál do obvodu CPLD, který se již o samotné uložení postará nezávisle na řídícím mikrokontroléru. Jakmile dojde k opuštění měřicí smyčky z libovolného důvodu (důvody jsou popsány dříve v této kapitole), zastaví se časovač měření a podprogram měření je ukončen.

3.3 VHDL popis programovatelného obvodu CPLD

Aby mohl obvod CPLD (nebo i kterýkoliv jiný programovatelný logický obvod) plnit svoji funkci, potřebuje vytvořit svou vnitřní logickou strukturu pomocí některého z jazyků popisujících hardware. Nejznámější z nich jsou například Abel (jen na velmi jednoduché obvody, dnes už se téměř nepoužívá), VHDL, nebo Verilog (viz. [9]). Jazyky VHDL (byl použit v tomto projektu) a Verilog mají velmi podobnou vnitřní strukturu, liší se hlavně syntaxí. Jakmile je pomocí některého z jazyků struktura popsána, je vytvořen datový soubor obsahující vnitřní zapojení propojek uvnitř programovatelného obvodu a následně je toto zapojení do obvodu implementováno (viz. [17]).

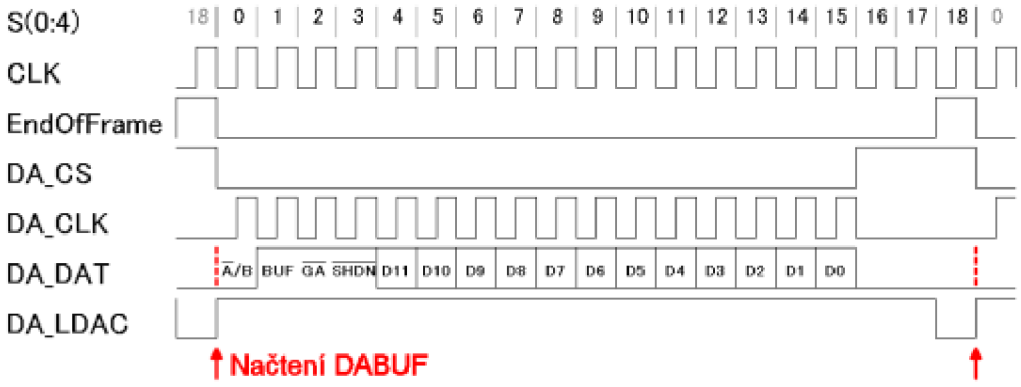
Protože VHDL je jazyk popisující hardwarovou strukturu, je mnohem názornější zobrazit si vnitřní zapojení obvodu CPLD jako blokové schéma, než vypisovat jednotlivé řádky kódu (viz. obrázek 29). Na obrázku je na první pohled patrná struktura rozdělená do čtyř hlavních částí. V první řadě se jedná o nejdůležitější blok, kterým je stavový počítač vytvářející hlavní řídící signály a časování celého obvodu. Dále je to blok řídící činnost DA převodníků, blok AD převodníků a směrování dat a blok řídící adresování, zápis a čtení RAM paměti.



Obrázek 29 – Struktura vnitřního zapojení obvodu CPLD popsaného jazykem VHDL

Hlavní částí stavového počítače je pětibitový čítač, který rozděluje celý jeden cyklus nastavování a ukládání hodnot na několik kratších časových úseků. Aktuální pozice v cyklu (stav S) je následně vyhodnocován dalšími částmi obvodu a podle tohoto stavu se provádí daná akce. Vše je synchronizováno pomocí externího hlavního hodinového signálu CLK. Tento signál je v různých částech zařízení zpracováván různými způsoby (detekce nástupné nebo sestupné hrany a log. 0 nebo log. 1) tak, aby bylo v maximální možné míře zabráněno vzniku hazardních stavů a všude byla zajištěna dostatečná doba na ustálení signálů před jejich vyhodnocením. Protože jeden cyklus netrvá celých 32 (2^5) hodinových pulzů, je cyklus zkrácen za pomoci signálu EndOfFrame generovaného podle aktuální pozice v cyklu. Tento signál jednak synchronně resetuje stavový počítač, a dále je také využit pro aktualizaci hodnot, které jsou platné při přechodu na další cyklus.

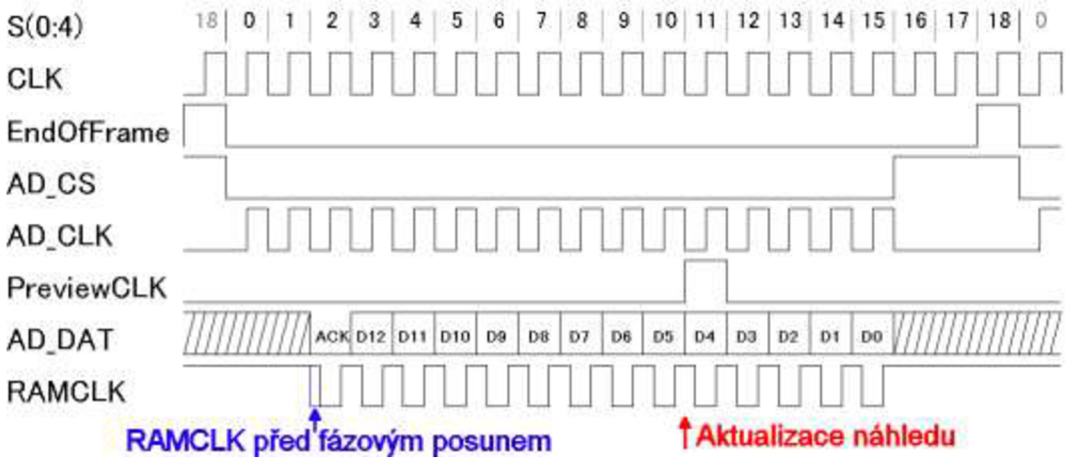
Část DA převodníků je řízena naprosto nezávisle na ostatních částech zapojení (kromě stavového počítače). Časování DA převodníku (vstupy CLK, Chip Select - CS, a Parallel Load - LDAC, viz. [23]) je odvozeno přímo z aktuálního stavu a vstupních hodin (viz. obrázek 30). Samotná data posílaná do převodníku jsou paralelně načítána do paměťového registru vždy v posledním stavu, přičemž data jsou načtena pouze v případě, že jsou platná (signál LOAD generovaný externím zařízením je v log. 1). Takto načtená data jsou uložena v signálu DABUF, kde jsou po celou dobu jednoho cyklu neměnná. Samotný výběr dat včetně řídících příkazů zasílaných do DA převodníku je prováděn pomocí multiplexoru v závislosti na aktuálním stavu. Data jsou vybírána sestupnou hranou hodinového signálu, aby byla při následující nástupné hraně platná. Samotné příkazové bity převodníku (viz. obrázek 30) vyplývají z jeho katalogového listu [23]: A/B vybírá aktivní kanál převodníku (u této verze obvodu vždy v log. 0), BUF povoluje zařazení proudového posilovače na výstup převodníku, GA určuje zesílení výstupního budiče a SHDN zakazuje činnost celého převodníku.



Obrázek 30 – Časování řízení DA převodníku [23]

Řízení činnosti AD převodníků je již komplexnější, než tomu bylo u DA převodníků, protože přijatá data musí být zároveň ukládána do RAM paměti a část dat je během měření zobrazována jako náhled. Datové linky všech kanálů jsou sdruženy na společnou paralelní sběrnici a data jsou sériově načítána z převodníků (v závislosti na aktuálním stavu). Pokud se CPLD nachází ve stavu měření (signál Read/Measure - RM je v log. 0), jsou aktuální data posílána přímo na datové linky paměti RAM pomocí třístavového budiče. Pokud je CPLD v režimu čtení z paměti, je výstup budiče ve stavu vysoké impedance a data jsou naopak z paměti RAM načítána přes multiplexor přímo na výstupní datovou komunikační sběrnici mezi CPLD a mikrokontrolérem. Pokud probíhá měření, nejsou na této sběrnici data z paměti, ale jsou zde náhledová data vybraného kanálu ze signálu Preview (linky pro připojení dat RAM paměti musí být obousměrné, tzn. typu INOUT, viz. [9]). Kanál pro získání dat náhledu je vybírán pomocí multiplexoru (Preview select) a kanál je určen externím výběrovým

signálem PSEL (Preview select). Data vybraného kanálu jsou sériovým posuvným registrem převáděna do paralelní formy na interní náhled (signál InternalPreview). Tento signál je převeden do skutečných náhledových dat pomocí paralelního registru ve chvíli, kdy byl načten poslední bit náhledu (8 horních bitů slova z AD převodníku). Kromě datových vodičů jsou AD převodníky připojeny také řídícími linkami, jejichž nastavení je totožné jako u DA převodníků (viz. obrázek 31).



Obrázek 31 – Časování řízení AD převodníku [24]

Poslední částí je blok pro řízení paměti RAM. Hlavním úkolem tohoto bloku je nastavovat aktuální adresu čtení/zápisu do paměti a signalizovat externímu mikrokontroléru stav zaplnění paměti. To je provedeno pomocí linky signalizující prázdnou paměť (MEMCLEAR) ve chvíli, kdy je aktuální adresa RAM rovna 0. Samotná adresa je vyvedena přes oddělovač, protože výstupní linku nelze použít na vstup hradla AND detekujícího prázdnou paměť (musí být vytvořen signál před oddělovačem). Adresa samotná je generována obousměrným čítačem, který je inkrementován v případě zápisu do paměti a dekrementován v okamžiku čtení z paměti. Oba dva případy jsou signalizovány hodinovým signálem RAM_ADDR_CLK. Ten je generován buď přímo externím signálem (v režimu čtení dat, RM je v log. 1), nebo interně pomocí signálu RAMClk (v režimu měření). Signál RAMClk je generován dvoustupňovou logikou v závislosti na hodinovém signálu a aktuálním stavu (viz. obrázek 31) tak, že propustí hodinový signál pouze ve chvíli, kdy jsou na datové sběrnici RAM_DAT platná data z AD převodníků (určeno aktuálním stavem S) a zároveň se má provádět uložení aktuálního vzorku dat (příznak Saving je v log. 1). Logická hradla jsou zobrazena jako dvoustupňová pouze z důvodu snadnějšího pochopení principu jejich činnosti, ve výsledku jsou ale díky optimalizaci vývojovým prostředím při syntéze (převodu zdrojového textu do programovacího souboru) minimalizována do jiné podoby. V případě že probíhá měření a z externí linky přijde požadavek na uložení příštího vzorku dat (sestupná

hrana na lince WR/RD CLK), je nastaven interní příznak SaveStart signalizující, že příští cyklus má být uložen. Jakmile nastane konec aktuálního cyklu signalizovaný sestupnou hranou příznaku EndOfFrame, dojde k přepsání požadavku na začátek měření do příznaku Saving a data se již v průběhu cyklu budou ukládat. Příznak SaveStart je ihned po přepsání do příznaku Saving vynulován aby mohl být opět externím zdrojem nastaven. Kromě toho může být nulování provedeno i v případě, že má dojít k vymazání paměti RAM. Poslední částí tohoto bloku je přímé řízení příkazových linek RAM paměti (vstupy Chip select – CS, Write enable – WE a Output enable – OE, viz. [24]), které je odvozeno od stavů interních signálů popsaných výše a vyplývá z popisu v katalogovém listu paměti [18].

Samotný popis v jazyce VHDL obsahuje ještě několik částí, které nejsou ve schématu zobrazeny, jelikož plní pouze funkci obsluhy činnosti CPLD a neřídí přímo externí linky ani obvody. Jedná se zejména o děličku hodinového signálu z externích 16 MHz na interní 1,6 MHz vzhledem k dodržení limitu maximálního kmitočtu použitých AD a DA převodníků. Kromě děličky jde ještě o blok zabraňující vzniku hazardních stavů na interním hodinovém signálu RAMClk (tyto stavy vznikají z důvodu buzení signálu z kombinační logiky) a signálu RM (aby nedošlo k přepnutí režimu čtení a měření v průběhu cyklu, ale až mezi cykly). K synchronizaci je využit fakt, že původní hodinový signál prochází děličkou kmitočtu a proto má vyšší frekvenci a lze z něj odvodit synchronizační signál pro převzorkování citlivých signálů, ke kterému dojde až po ustálení hazardních stavů (synchronizační signál je fázově posunut oproti signálu CLK, viz. obrázek 31). Signál RAMClk se tím částečně zpozdí (o čtvrt periody), což ovšem v dané aplikaci nevadí.

3.4 Komunikace mezi počítačem a zařízením

Přenos řídících příkazů a naměřených dat mezi počítačem a zařízením je realizován pomocí převodníku USB↔UART [20]. Samotná komunikace je pak asynchronní, s přenosovou rychlostí 0,5 MBit/s a pomocnou linkou zajišťující handshaking (předávání informací o kompletnosti zaslaných dat a připravenosti zařízení přijmout další data). V mikrokontroléru v zařízení je veškerá obsluha sériové linky řízena pomocí systému přerušení [16]. Příchozí data se ukládají do vyrovnávacího zásobníku přijatých dat včetně údaje o celkové délce přijatých dat. Pokud jsou v mikrokontroléru naopak připravena data k odeslání ve vysílacím zásobníku, dochází díky přerušení k automatickému plnění sériové linky až do doby než jsou všechna data odeslána. Díky tomu není třeba mít vyhrazeny v hlavním programu bloky kódu na obsluhu přenosu dat, ale vše je zajištěno automaticky.

Tabulka 4 – Seznam příkazů přenášených mezi PC a zařízením včetně vracených hodnot

Kód	Příkaz	Výsledek příkazu	Vrácená data
0	GetState	Žádost o zaslání stavu zařízení	Stav zařízení
1	StartMeasure	Spustí měření	
2	StopMeasure	Zastaví běžící měření	
3	RestartMeasure	Restartuje měření	
11	SendData	Žádost o zaslání naměřených dat	Blok měřených dat
12	ClearMemory	Smazání všech dat v paměti RAM	
21	SetOutVoltage	Nastaví aktuální napětí výstupů	
22	SetCycleCount	Nastaví počet měřicích cyklů	
23	SetMeasureType	Nastaví druh měřicí metody	
24	SetSavePeriod	Nastaví časy vzorkování vstupu	
25	SetParameters	Nastaví specifické parametry měření	
26	SetRange	Nastaví rozsah vstupních modulů	
31	GetPreview	Žádost o data náhledu (8 bitů)	Data náhledu
32	SetPreview	Nastavení kanálu pro náhled	
41	AutoSenzorSelect	Nastavení režimu výběru senzorů	
42	MoveToFirstSenzor	Přesun na první senzor	
43	MoveToSenzor	Posun o daný počet senzorů	
XX	Unknown	Neznámý příkaz provede restart	

Jakmile dojde k přenosu celého paketu dat do zařízení, je dokončení přenosu signalizováno mikrokontroléru pomocí linky handshakingu (zařízení se vždy chová jako *Slave* a nemůže tudíž programu v počítači, který se chová jako *Master*, zasílat data bez vyžádání). Po přijetí tohoto signálu je vyvolána rutina pro vyhodnocení došlých dat. Tato data mají pevně danou strukturu. První přenášený byte je číselným označením příchozího paketu a stanovuje druh akce, která má být provedena (seznam příkazů je uveden výše, viz. tabulka 4). Dále následují data přenášená za samotným příkazem, která jsou potřebná k jeho vykonání. Jestliže byl přijat neznámý příkaz, dojde k resetování přenosové linky. Pokud je přijat známý příkaz, vykoná se a následně je pomocí handshakingu signalizováno dokončení provádění příkazu (uvolnění linky pro další komunikaci). Některé příkazy vyžadují zpětné odeslání dat do počítače. Pokud tomu tak je, ihned po provedení příkazu se požadovaná data odešlou v novém paketu z mikrokontroléru. Na rozdíl od příchozích příkazových paketů již nemají pakety datové (odesílané z mikrokontroléru) pevně specifikovaný tvar a jsou popsány pouze délkou paketu a samotnými daty (struktura hlavních datových paketů je přiblížena v tabulce, viz. tabulka 5). Vyhodnocení přijatých dat je plně v režii ovládacího programu v počítači, který zná strukturu přijatých dat v závislosti na vyslaném příkazu. Tento způsob komunikace je umožněn druhem komunikace typu *Master - Slave*, jež je v zařízení použita.

Tabulka 5 – Struktura paketů vracejících data z potenciostatu do zařízení

Zpráva	Pozice [B]	Proměnná	Typ proměnné	Popis
Stav zařízení	1	Status	unsigned char	Čekání/Měření/Posílání dat
	2	Dobíjeni	unsigned char	Stav dobíjení baterie
	3	V_{BAT}	unsigned char	Napětí na baterii (krok 100 mV)
	4	V_{SRC}	unsigned char	Interní napětí zdroje (krok 100 mV)
	5	Metoda	unsigned char	Index vybrané měřicí metody
	6	Cykly	unsigned char	Počet cyklů měření
	7-8	Perioda	unsigned short int	Perioda ukládání záznamů (v ms)
	9-12	Čas	unsigned long int	Čas od spuštění posledního měření (v ms)
Data	1	Příznak	unsigned char	Žádná data/Posláno vše/Poslána část dat
	2-(2·N+1)	Data	N·unsigned short int	N dat měření v plném rozlišení (13 bitů)
Náhled	1	Kanál	unsigned char	Aktuální kanál náhledu
	2	Data	signed char	Hrubá data náhledu (8 bitů)

3.5 Ovládací software v počítači

Ovládací software v PC je hlavním přístupovým bodem uživatele k celému zařízení. Z tohoto důvodu je koncipován jako uživatelsky příjemná aplikace s intuitivním ovládáním, aby ji mohl obsluhovat i běžný uživatel, např. studenti v laboratoři. Aplikace je vytvořena jako multidokumentová, což umožňuje mít najednou otevřeno více oken např. s jedním druhem měření, kde v jednom okně probíhá aktuální, dlouhou dobu trvající měření a v dalších oknech lze nezávisle na něm prohlížet a upravovat výsledky z měření předchozích, nebo si připravovat měření následující. Zároveň jsou všechny položky ve všech formulářích opatřeny kontextovou nápovědou, takže se v nich lze snadněji orientovat.

3.5.1 Hlavní okno aplikace a připojení zařízení

Po spuštění aplikace se provede její inicializace, a je-li k portu USB připojeno vhodné zařízení, automaticky se připojí. Ihned po té se otevře základní okno aplikace, jež ukazuje obrázek 32. V tomto okně se obsluhují jednotlivé úlohy programu a ke všem potřebným souborům lze přistupovat jako k jednomu projektu (usnadnění přehlednosti a manipulace se soubory). Na obrázku si lze všimnout rozdělení okna na bloky. Vlevo nahoře se nachází výběrové pole umožňující spouštět jednotlivé funkce programu (různé měřicí metody, editor výsledků, kalibraci zařízení apod.) a přidávat či vytvářet soubory aktuálního projektu. Projekt sám pak může být načten a uložen pomoci dvou tlačítek na horní straně okna. Samotné soubory patřící do projektu jsou zobrazeny ve středové části formuláře na levé straně a na pravé straně jsou pak zobrazena aktuálně otevřená podokna aplikace. Ta lze

pomocí nabídky přepínat, otevírat, zavírat, nebo uspořádat na ploše a soubory aplikace je možno přidávat, odebírat, nebo otevírat. Na spodní straně se pak nachází informační panel, na kterém se zaznamenávají události, k nimž od posledního smazání panelu došlo, ať už se jedná o informace, varování, nebo popis vzniklých chyb. Samozřejmostí je i možnost log smazat.

Obrázek 32 – Hlavní okno (okno projektu) programu v počítači

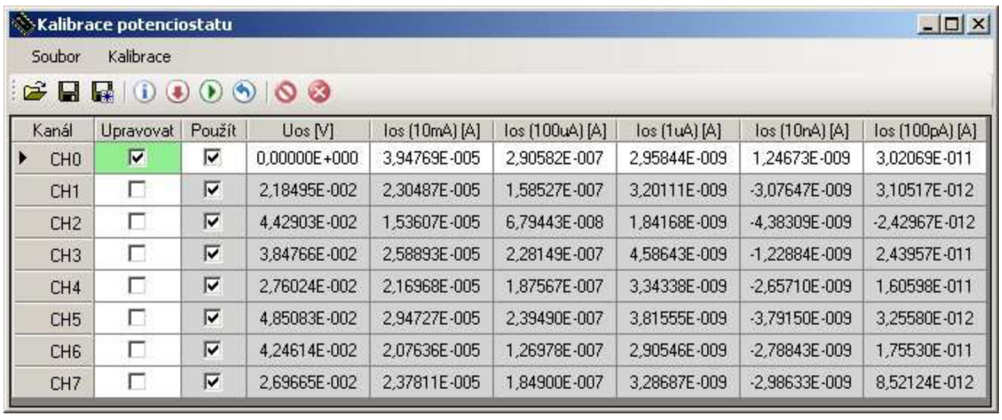
Poslední nepopsanou částí je pravý horní roh. Ten slouží k obsluze a komunikaci s hardwarem potenciostatu pomocí převodníku FTDI [20]. V políčku stav zařízení je základní informace, zda zařízení a komunikace s ním pracuje správně, nebo je z nějakého důvodu přerušena. Režim a akce pak popisují konkrétní činnost, kterou zařízení provádí, ať už se k němu přistupuje z kteréhokoliv okna aplikace. Horní položka obsahuje základní popis činnosti a ukazatel průběhu celé operace, zatímco spodní položka nabízí bližší popis dílčí operace v rámci celého procesu a průběh graficky zobrazuje. Kromě informativního charakteru lze k zařízení i přistupovat, resp. provést jeho inicializaci nebo odpojení, restartovat komunikační kanál, nebo celé zařízení. V neposlední řadě lze zjistit aktuální stav zařízení (napětí externí i na baterii, režim zařízení, čas posledního měření, atd. viz. tabulka 5).

Připojení či odpojení na USB úrovni se provádí ve zvláštním dialogu (viz. obrázek 33). V horní části jsou zobrazena všechna dostupná zařízení, která lze připojit a po jejich výběru je možno zobrazit bližší popis zařízení. Jakmile je vhodné zařízení vybráno, dá se připojit manuálně, pokud nejsou všechna zařízení ještě správně načtena, lze obnovit seznam a pokud uživatel neví, jaký má zařízení vhodné k připojení název, pak lze zkusit zařízení vyhledat a připojit automaticky. Po připojení zařízení je jeho podrobný popis zobrazen ve spodní polovině dialogu (viz. obrázek 33). Zde lze zařízení odpojit, pokud již byla potřebná práce s ním dokončena, nebo pokud je třeba připojit jiné zařízení. Pokud došlo k závažné chybě v komunikaci, lze zařízení znovu připojit (provést kompletní restart komunikace).

Obrázek 33 – Dialog pro připojení zařízení přes USB

3.5.2 Kalibrace zařízení

Jakmile je zařízení v pořádku připojeno a inicializováno, je vhodné před prvním měřením provést kalibraci vstupních modulů potenciostatu. K tomu slouží speciální okno kalibrace (viz. obrázek 34). Stejně jako všechna ostatní okna aplikace, má i toto okno jednak aktivní oblast (největší, středová část určená pro úpravu údajů), hlavní menu (horní část) a nástrojovou lištu pro snadný přístup k nejpoužívanějším funkcím. U kalibračního okna pak lze v aktivní části konkrétně vidět tabulku, popisující napěťový ofset a proudové ofsety všech rozsahů na všech vstupních kanálech (hodnoty zobrazují absolutní posun vstupních údajů oproti reálné hodnotě, nikoliv samotný kalibrační koeficient). Navíc jsou zde pro každý kanál ještě dva sloupce, a sice **Použít** (povoluje nebo zakazuje automatickou úpravu měřených hodnot daného kanálu podle nastavených kalibračních hodnot) a sloupec **Upravovat** (vybírá kanály, které budou upraveny při automatické kalibraci (bude blíže popsána dále).



Kanál	Upravovat	Použít	Uos [V]	Ios (10mA) [A]	Ios (100uA) [A]	Ios (1uA) [A]	Ios (10nA) [A]	Ios (100pA) [A]
CH0	☑	☑	0,00000E+000	3,94769E-005	2,90582E-007	2,95844E-009	1,24673E-009	3,02069E-011
CH1	☐	☑	2,18495E-002	2,30487E-005	1,58527E-007	3,20111E-009	-3,07647E-009	3,10517E-012
CH2	☐	☑	4,42903E-002	1,53607E-005	6,79443E-008	1,84168E-009	-4,38309E-009	-2,42967E-012
CH3	☐	☑	3,84766E-002	2,58893E-005	2,28149E-007	4,58643E-009	-1,22884E-009	2,43957E-011
CH4	☐	☑	2,76024E-002	2,16968E-005	1,87567E-007	3,34338E-009	-2,65710E-009	1,60598E-011
CH5	☐	☑	4,85083E-002	2,94727E-005	2,39490E-007	3,81555E-009	-3,79150E-009	3,25580E-012
CH6	☐	☑	4,24614E-002	2,07636E-005	1,26978E-007	2,90546E-009	-2,78843E-009	1,75530E-011
CH7	☐	☑	2,69665E-002	2,37811E-005	1,84900E-007	3,28687E-009	-2,98633E-009	8,52124E-012

Obrázek 34 – Okno kalibrace vstupních kanálů potenciostatu

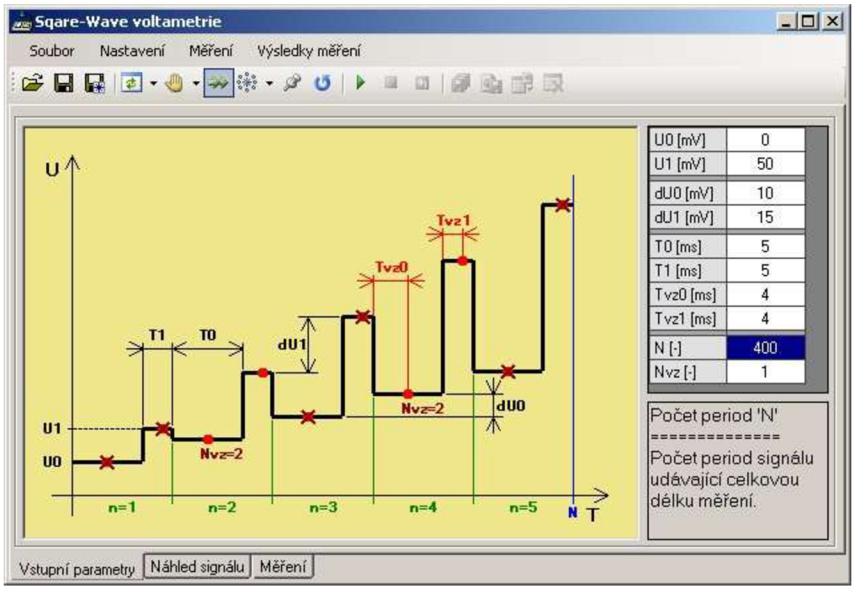
Všechny hodnoty lze samozřejmě upravovat manuálně (dvojklikem na dané pole, přímou úpravou hodnoty, nebo stiskem F2 sloužícím ve všech oknech aplikace k přechodu do editačního režimu buněk v tabulkách). Nejsnazším způsobem kalibrace je režim automatické kalibrace, který provede načtení hodnot pomocí měření aktuálních parametrů přístroje. Hodnoty lze do tabulky také načítat z aktuálních kalibračních dat používaných programem, nebo naopak použít pro kalibraci hodnoty do tabulky vložené. Obsah tabulky je možno uložit do samostatného souboru kalibračních dat, případně tento soubor načíst. Dále lze nezávisle na sobě vynulovat hodnoty v tabulce i aktuálně uložené kalibrační údaje.

Pokud se uživatel rozhodne, že provede automatickou kalibraci, stačí mu k tomu pouze základní znalost práce se zařízením (operace nevyžaduje zkušenosti s ovládáním jiných měřicích přístrojů, které by byly nutné pro kalibraci). Po stisku tlačítka automatické kalibrace je uživatel krok po kroku vyzván ke splnění jednotlivých kalibračních podmínek. Nejdříve se odpojí všechny vstupy a na všech rozsazích je provedeno časosběrné měření základních hodnot. Z nich se statistickou analýzou vyhodnotí ofset všech požadovaných rozsahů a kanálů. Následně je uživatel vyzván, aby připojil na sběrnicový vstup kalibrační konektor s definovanými hodnotami kalibračních odporů. Jakmile se tak stane, přístroj provede kalibraci napěťových výstupů každého kanálu a automatická kalibrace je tím dokončena.

3.5.3 Měření a tvorba měřicích profilů

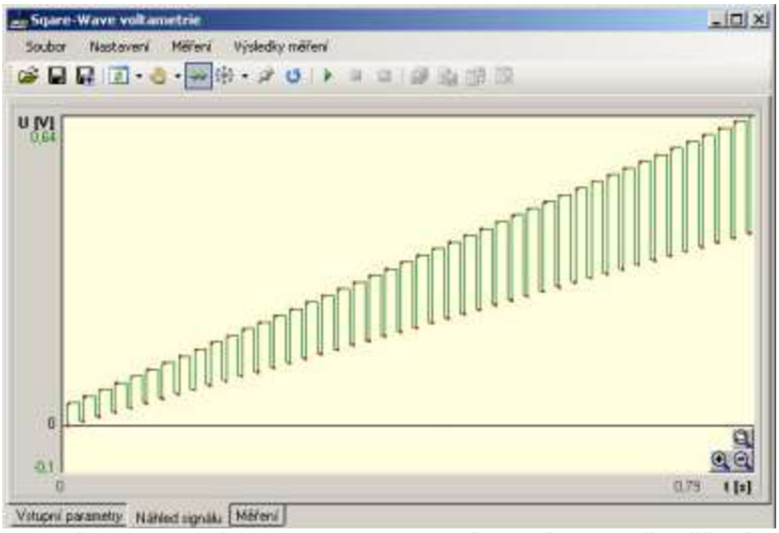
Měření jednotlivými metodami jsou v programu implementována do samostatných oken. Tato okna si jsou velice podobná, takže bude stačit popsat jedno okno vybrané měřicí metody, liší se ovšem zpracováním vstupních dat a obsluhou měření v zařízení potenciostatu, což uživatel téměř nepozná, pokud zná základní principy jednotlivých měřicích metod a ví jejich specifika (viz. např. [1]). V základní sestavě jsou do programu implementována okna pro měření metodou chromamperometrie, stejnosměrné, cyklické, střídavé, pulzní, diferenciálně pulzní, schodovité a sqare-wave voltametrie a měření volitelného průběhu až se sedmi uživatelem definovanými body. Tyto metody jsou si z programového hlediska obsluhy velice podobné. Větší odlišnosti vykazují až specifické metody měření, které jsou do zařízení postupně implementovány, ať už se jedná o eliminační cyklickou voltametrii (implementace prováděna ve spolupráci s Masarykovou univerzitou, na které je metoda vyvíjena, viz. [25]), nebo pak o nechemické měřicí metody (měření elektrických charakteristik, např. A-V, C-V charakteristik, přenosových funkcí neznámých systémů, měření nízkých proudů, generování malých napěťových průběhů apod.). Tyto metody navíc vyžadují drobný zásah do zapojení hardwaru, což je blíže popsáno v kapitole 2.7.

Okno měření je pomocí záložek rozděleno do tří bloků. V první řadě se jedná o nastavení měřicího profilu (viz. obrázek 35). Zde je v aktivní části okna vidět tři prvky. Největší z nich zabírá levou část formuláře a slouží k přesnému vymezení pojmů parametrů měření. Uživatel má jasně definovány a graficky znázorněny nastavované proměnné měřicího procesu. Jejich nastavení pak probíhá za pomoci tabulky na pravé straně formuláře. Zde je manuálně nastavena číselná hodnota každému parametru měření. V případě chybného zadání je uživatel informován o číselném rozsahu, ve kterém se musí zadaná hodnota pohybovat a položka je označena červenou barvou. Pokud by v tuto chvíli bylo spuštěno měření, bude jako parametr tohoto měření použita naposledy platná hodnota. Úpravy parametrů se provádějí stejným postupem, který byl popsán u okna kalibrace. Pokud existuje více možností nastavení daného parametru (např. náběžnou hranu lze definovat rozdílem napětí a časem jejího trvání nebo náběhovou rychlostí), mění se běžnou editací pouze základní parametr (čas trvání), ale klávesou F3 lze programově nastavit požadovanou veličinu i pomoci druhého parametru (zadá se náběhová rychlost a základní parametr je z ní automaticky dopočítán). Pokud by ani z nákresu na levé straně, ani z kontextové nápovědy v tabulce nebyl zcela jasný význam daného parametru, případně možnosti jeho nastavení, je ještě vpravo dole po výběru daného parametru zobrazen přesný textový popis parametru a možností jeho editace (viz. obrázek 35).



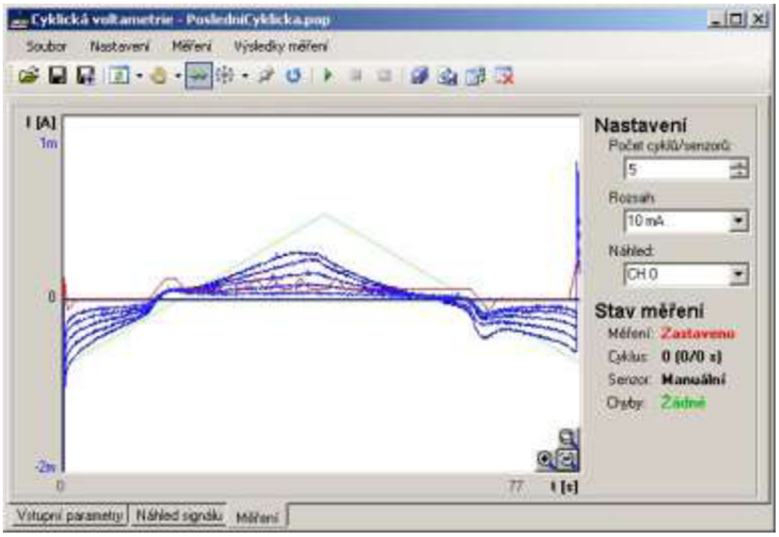
Obrázek 35 – Okno jedné z měřicích metod – vytváření měřicího profilu

Jakmile jsou požadované parametry zadány, je možné měřicí profil včetně naměřených dat (pokud již byla nějaká data v rámci profilu naměřena) v menu **Soubor** uložit. Uložené profily lze zpětně samozřejmě načíst. Po dokončení operací před měřením lze generovaný signál a časy vzorkování zkontrolovat v náhledu v druhé části formuláře (viz. obrázek 36). Náhled signálu si lze zvětšit a samozřejmostí je i vypsání aktuální pozice kurzoru myši.



Obrázek 36 – Náhled na generovaný signál v okně měření

Chce-li uživatel po kontrole připraveného profilu měření samotné měření spustit, může tak učinit ve třetí části okna měření (viz. obrázek 37). Pro samotný proces měření má ještě uživatel možnost zvolit si pomocí menu nebo nástrojové lišty další volby, které přímo nesouvisí se samotnou použitou metodou měření. V menu **Nastavení** to je konkrétně volba časové prodlevy mezi aktualizacemi náhledových dat, nastavení prodlevy mezi jednotlivými měřicími cykly (až do délky 30 s), případně manuální prodlevu (lze potlačit, pokud se přechází na další senzor), nebo možnost automatického přepínání senzoru v případě kooperace se senzorovým multiplexorem (možnost bez přepínání, přepínání po senzoru nebo po skupině osmi senzorů, nastavení prvního měřeného senzoru a počtu cyklů měření na jeden senzor). Možnost měřit více cyklů na jednom senzoru umožňuje provést následnou eliminaci šumu pomocí průměrování jednotlivých cyklů vykazujících stejný průběh střední hodnoty.



Obrázek 37 – Okno s daty získanými při samotném měření

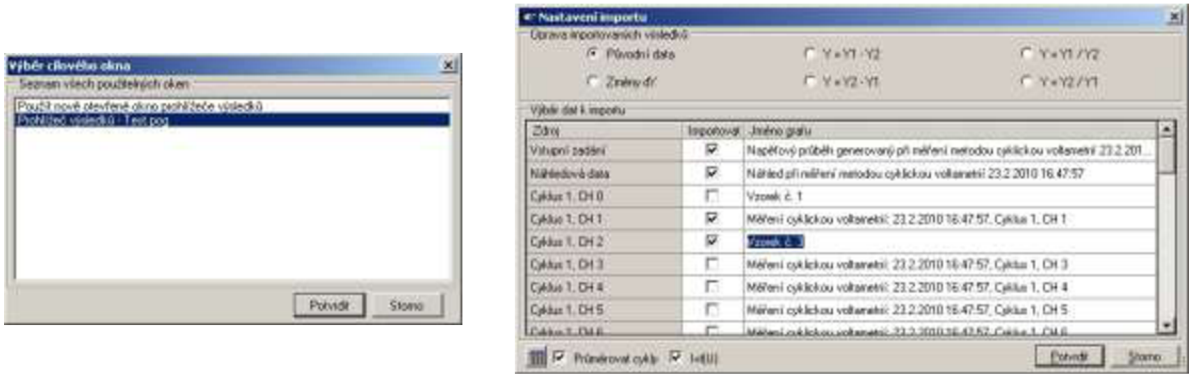
V aktivní oblasti okna je možné nastavit celkový počet měřicích cyklů, resp. počet proměřených senzorů, je-li zapnuto automatické přecházení na další senzor. Dále se zde nastavuje měřicí rozsah vstupních modulů a vybírá se kanál pro načítání náhledových dat (tento parametr lze měnit i při probíhajícím měření). Pod nastavovacími prvky je ještě zobrazen popis stavu měření. Jednak to je jeho aktuální průběh (měření, čekání, načítání dat, apod.) včetně procentuální pozice v celkové době měření, a dále pak aktuální cyklus měření včetně časových informací o daném cyklu, zvolený režim přepínání senzorů včetně aktuálně zvoleného senzoru. Poslední řádek patří chybovým a varovným hláškám (měření mimo rozsah, špatný výběr senzoru, hardwarová porucha, apod.), zobrazující naposledy vzniklou nestandardní situaci. Všechny události jsou samozřejmě opět zaznamenávány i do stavové lišty v hlavním okně aplikace a mohou být zpětně analyzovány.

Měření se spouští, zastavuje nebo restartuje pomocí menu **Měření** nebo položkami nástrojové lišty. Před spuštěním měření se automaticky provede kontrola, zda jsou vůči sobě všechny parametry korektně zadány a pokud ne, pak se měření nespustí a uživatel je o chybě informován. Hodnoty se automaticky zobrazují v náhledu grafu (viz. obrázek 37), a to po intervalech nastavených dříve v menu **Nastavení**. Generovaný napěťový průběh je zobrazován světle zelenou barvou a má pouze informativní charakter (nelze mu měnit rozsah měřítka v ose Y). Náhledová data jsou zobrazena červeně a stejně jako již načtená měřená data zobrazená odstíny modré barvy (v závislosti na cyklu, ve kterém byla data naměřena) mají nastavitelné měřítko jak na ose X tak i na ose Y. Přesná data z měření se aktualizují vždy po dokončení jejich načítání po skončení každého měřicího cyklu. Data zobrazená v náhledovém grafu je možno zvětšovat a posouvat stejně jako v předešlém případě při zobrazení náhledu generovaného signálu popsaném dříve v této kapitole.

Po dokončení měření (pokud byl uložen alespoň jeden vzorek dat) lze s daty samotnými pracovat. Tato data lze buď smazat, uložit (i bez profilu měření, soubor pouze čistých dat měření), nebo exportovat do textového souboru (včetně popisu podmínek měření a dané měřicí metody), nebo do středníky oddělených hodnot v textovém souboru (pouze jeden řádek s popisem sloupečků dat včetně jednotek a následně jen měřená data), který je vhodný pro následný import do jiných programů jako je například MS Excel. Poslední možností exportu do souboru je export do HTML formátu včetně grafického náhledu dat (po otevření v internetovém prohlížeči jsou data přehledně zobrazena v tabulkách). Mimo externích souborů lze data (pokud je s nimi uživatel po měření spokojen) exportovat do interního okna pro vyhodnocování výsledků měření a zobrazování grafů. Tomu se blíže věnuje následující kapitola 3.5.4.

3.5.4 Import dat pro vyhodnocení získaných výsledků

Protože data náhledu v okně měření jsou zobrazována pouze jako informativní (pro kontrolu správnosti probíhajícího měření), je nutné následně importovat data do přehlednějšího zobrazení – okna prohlížeče výsledků. Tato možnost navíc umožňuje prohlížet surová data a také přidávat data do grafů v rámci dříve uložených výsledků jiných měření. Jakmile uživatel spustí export do okna prohlížeče výsledků, je mu nejdříve nabídnuto na výběr cílové okno z aktuálně otevřených prohlížečů výsledků včetně možnosti vložit data do nově otevřeného okna prohlížeče (viz. obrázek 38A). Tento krok je automaticky zvolen (nabídka se ani neotevře), pokud v aplikaci není otevřeno ani jedno okno prohlížeče výsledků.



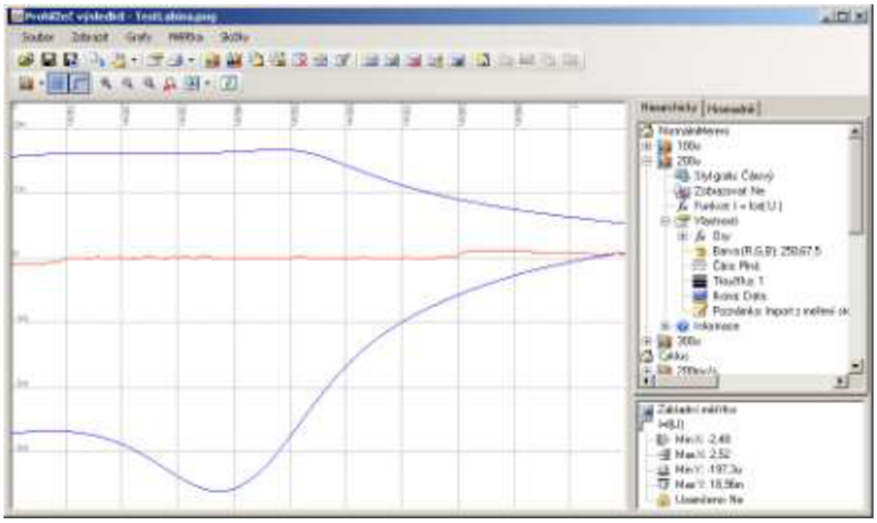
Obrázek 38 – Import dat: A) Výběr cílového formuláře, B) Nastavení parametrů importu

Po volbě cílového okna se otevře samotné okno převodu dat (viz. obrázek 38B). Zde si uživatel vybere, jak chce data při importu upravit. V horní nabídce si zvolí způsob úpravy měřených dat, vzhledem k účelu použití a druhu použité měřicí metody. Některé metody vycházejí z jiného zpracování dat (např. diferenciální metody vyhodnocují rozdíl sudých a lichých vzorků) a proto je volba specifická pro danou měřicí metodu použita automaticky jako defaultní. Ve střední části formuláře si pak uživatel vybere, které průběhy (ze všech naměřených cyklů a kanálů, včetně náhledových dat a napěťového průběhu vycházejícího ze zadání profilu měření) chce do okna prohlížeče výsledků exportovat. Zároveň může provést jejich přejmenování (základní jméno se nastavuje vzhledem k parametrům daného průběhu).

Ve spodní části okna lze (pro usnadnění) využít tlačítko pro hromadné označení, resp. odznačení všech řádků tabulky. Také zde lze vybrat možnost průměrování, která slouží k potlačení šumu (viz. kapitola 3.5.3). Pokud je tato možnost zvolena, jsou automaticky exportovaná data výsledkem průměrování průběhů se stejnými vlastnostmi (průběhy od jednoho senzoru z jednoho kanálu lišící se pouze cyklem měření). Další volba na spodní straně formuláře je standardně vybrána a upravuje převáděná data v závislosti na druhu použité měřicí metody (převážně mění charakter osy X, kdy většina výsledků měření nemá být zobrazena v závislosti na čase měření, ale na vstupním napětí na senzoru, viz. [1]).

Pokud jsou všechny předešlé kroky splněny, je import dokončen stiskem tlačítka **Potvrdit**. V okně prohlížeče výsledků je následně vytvořena nová složka importu dat (nazvaná podle času a druhu importu) a do ní jsou všechny přenášené průběhy vloženy. Zároveň je každému průběhu přiřazeno vhodné měřítko obou os a další popisné parametry (vzhledem ke zdrojovým datům použitým k exportu dat do okna prohlížeče).

3.5.5 Práce s prohlížečem výsledků a jejich vyhodnocení



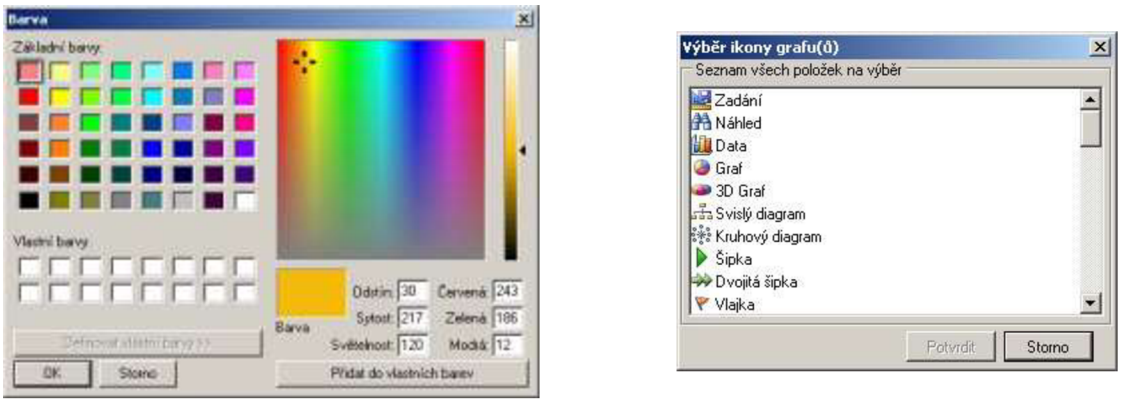
Obrázek 39 – Okno pro vyhodnocení měření a zobrazení grafů

Pro prohlížení naměřených průběhů a vyhodnocování získaných grafů slouží okno prohlížeče výsledků. To se používá pro všechny metody měření dohromady, a proto jsou zde kromě samotných dat uloženy a zobrazeny další informace o daných křivkách (oproti dříve popsaným oknům měřicích profilů). Největší část okna zabírá pracovní plocha, na které jsou zobrazeny samotné průběhy (viz. obrázek 39). Na pravé straně jsou potom seznamy uložených průběhů a měřítek os. Jelikož soubor může obsahovat mnoho různých typů grafů, je použití samostatných měřítek nevyhnutelné. V souboru výsledků je uloženo minimálně jedno měřítko, které je základní, a k němu jsou přiřazovány nově tvořené grafy. Jsou-li grafy importovány, je pro ně použito měřítko odpovídající povaze grafu, a to buď existující (pokud již soubor obsahuje požadované měřítko), nebo nově vytvořené. Každému měřítku lze nastavit počáteční a koncový bod výřezu grafu, druh veličin a jednotek na obou osách a parametr zamčení. Tento parametr umožňuje uzamknout změny měřítka pro zvětšování a posouvání grafu, pokud chce uživatel manipulovat jen s vybranými grafy. Zároveň budou zůstávat stejná i měřítka, která nejsou použita v žádném zobrazeném grafu. Měřítka lze kromě automatického vytvoření a přiřazení upravovat i uživatelem. Jedno z měřítek je vždy vybráno jako základní, tzn. že se všechny mřížky, popisky os a pozice kurzoru budou zobrazovat v jeho veličinách a rozsahu (toto je nezbytné v případě použití více měřítek s různými osami).

Pro větší přehlednost a snadnější orientaci v naměřených výsledcích jsou získané průběhy v rámci jednoho souboru rozděleny do uživatelských složek. Každý projekt obsahuje jeden či více kořenových adresářů, které mohou obsahovat rovnou grafy, anebo další podsložky. Každá složka může mít vlastní jméno a mohou být uživatelem libovolně vytvářeny či přesouvány. Pokud jsou v souboru pomocí importu dat vytvářeny nové grafy, je pro ně automaticky vytvořen nový kořenový adresář s označením odpovídajícím druhu, datu a času importu. Grafy jsou ukládány do zvolených složek a opět mohou být přesouvány, kopírovány a mazány, stejně jako složky samotné. Grafy i složky se v seznamu zobrazují podle jejich rozdělení v nadřazených složkách a v rámci jedné složky jsou tříděny podle času vytvoření.

Stromová struktura, grafy a jejich vlastnosti jsou zobrazeny na pravé straně formuláře, hned nad seznamem měřítek (obrázek 39). Program umožňuje dvojí zobrazení, a sice hierarchické (zobrazení grafů ve stromové struktuře, kde jsou v rámci každého grafu zobrazeny všechny jeho parametry) a hromadné (stromová struktura samotných složek a grafů, ale již bez podrobně vypsaných vlastností). Pokud uživatel přistupuje k jednotlivým grafům a jejich vlastnostem, je výhodnější použít hierarchické zobrazení, pokud ovšem soubor obsahuje velké množství průběhů, kterým je potřeba hromadně změnit některý parametr, je lepší druhé zobrazení (hierarchické zobrazení umožňuje v daném čase pracovat pouze s jedním grafem). Mezi jednotlivými zobrazeními lze procházet pomocí záložek.

Nyní blíže k jednotlivým nastavitelným vlastnostem grafů (všechny vlastnosti lze měnit jak jednotlivě, tak i hromadně). Základními parametry každého grafu jsou jeho jméno a adresa složky, ve které je daný graf umístěn. Tyto parametry jsou ovlivňovány nepřímo, pomocí manipulace s grafy v adresářové struktuře. Každý graf obsahuje údaje o datech v něm použitých (veličiny a jednotky obou os, měřítko os vybrané odkazem na jedno z existujících měřítek a informace zda má být graf zobrazen s osamostatněnými měřítky jednotlivých os, nebo mají mít některou osu společnou s ostatními grafy).



Obrázek 40 – Některé dialogy pro nastavení grafu: A) Výběr barvy a B) Ikony

Dalšími vlastnostmi grafu jsou údaje o jeho grafickém zobrazení (jestli se má zobrazovat či nikoliv, jestli je bodový, čárový nebo sloupcový, jakou má barvu, tloušťku a druh čáry, a s jakou ikonou je zobrazen v adresářové struktuře). Uživatel má na výběr z cca padesáti přednastavených ikon. Všechna nastavení probíhají buď textovým zadáním, nebo pomocí standardních a specializovaných dialogů, z nichž některé jsou zobrazeny na obrázku (viz. obrázek 40).

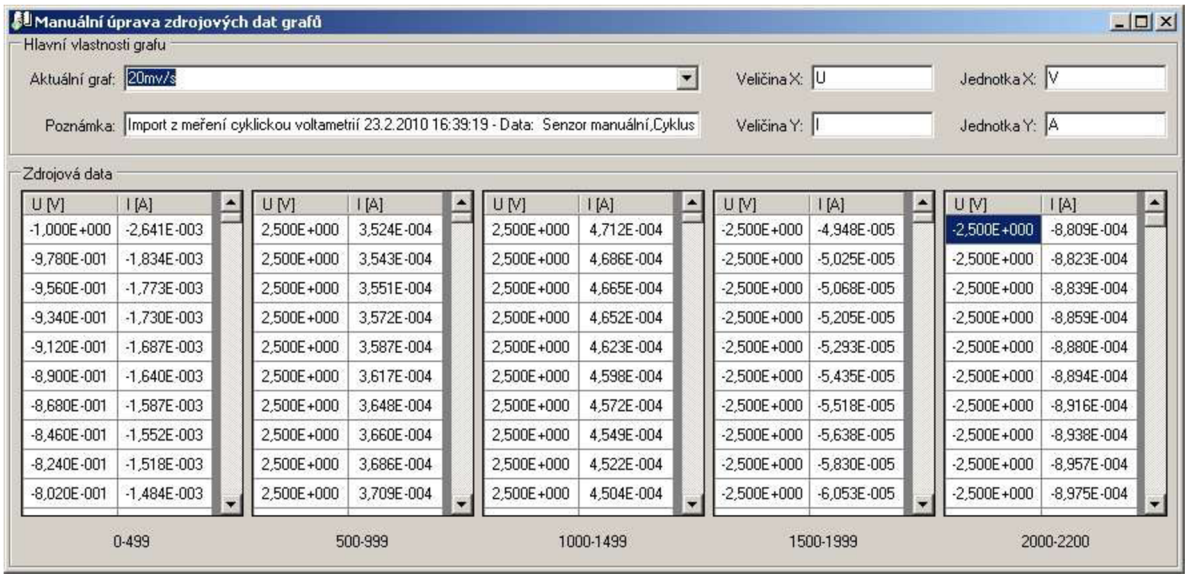
Posledním nastavitelným parametrem je textová poznámka, kterou může uživatel použít k libovolným účelům, nejčastěji k bližší identifikaci grafu (do poznámky je při importu automaticky vložen text popisující vlastnosti daného grafu a okolnosti jeho vzniku). Kromě zmíněných upravitelných vlastností obsahuje každý graf informace o jeho vlastnostech, které jsou pouze informativní a nelze je upravovat. Jedná se zejména o velikosti záznamu (počet bodů), datu a času vytvoření (změření hodnot) a druhu metody včetně měřicího cyklu, ve kterém byl graf změřen, pokud nebyl vytvořen manuálně.

Pro manipulaci s vlastnostmi měřítek, složek, grafů a jejich zobrazením jsou obsaženy v menu a nástrojové liště samostatné skupiny ovládacích prvků. V příslušných skupinách jsou k dispozici dříve popsané změny vlastností. Společné vlastnosti týkající se zobrazení jednotlivých grafů pak lze ovládat z lišty a menu **Zobrazení**. V této skupině ovládacích prvků lze všem grafům (nezávisle na jejich individuálním nastavení) změnit druh zobrazení na čárový, bodový nebo sloupcový, případně ponechat styl na automatický, při kterém se vychází z individuálního nastavení každého grafu. Kromě toho lze zapnout nebo vypnout zobrazení mřížky, nebo popisků os, napevno přinutit grafy aby sdílely společné měřítko v ose X nebo Y, případně provést překreslení (obnovení) grafů a stromové struktury. Navíc jsou zde obsažena tlačítka pro přibližování, oddalování grafů, zobrazení celých grafů, anebo zapnutí použití automatického měřítka, kdy je nastaveno měřítko osy Y tak, aby pro zobrazení grafů byla maximálně využita plocha oblasti vykreslování. Se zvětšením grafů lze manipulovat přímo pomocí myši, která při pohybu nad plochou ukazuje aktuální pozici ukazatele, při tažení levým tlačítkem přesouvá graf a při tažení pravým tlačítkem se vybírá plocha, která bude po uvolnění tlačítka roztažena (zvětšena) na celou kreslící plochu.

U okna prohlížeče výsledků je stejně jako u ostatních oken aplikace samozřejmostí ukládání, načítání a export průběhů do všech dříve zmíněných formátů (i obrázek do schránky Windows) a je z něj možné spustit import dat ze souborů výsledků i profilů měření. Navíc je možné zobrazené průběhy tisknout včetně zobrazení náhledu před tiskem. Tisknout lze buď celý graf, aktuálně zobrazené grafy, tabulkové hodnoty, nebo aktuální obrázek. Stejně tak jako má každý graf své parametry, je tomu tak i u celého souboru výsledků dohromady. V menu Soubor lze zobrazit vlastnosti aktuálního souboru (viz. obrázek 41).

Obrázek 41 – Okno zobrazení vlastností a souhrnných informací souboru grafů

V tomto okně je zobrazen jednak celý název a přístupová cesta k souboru a jednak informace, zda je soubor aktuální, nebo kdy byl naposledy uložen. Po této základní informaci následují souhrnné údaje popisující počet a datovou velikost složek i grafů, přičemž u údajů grafů je kromě celkových velikostí zobrazena i informace o aktuálně zobrazených grafech. V poslední řadě obsahuje okno textové pole, do kterého může uživatel vložit libovolný text specifikující celý soubor výsledků.

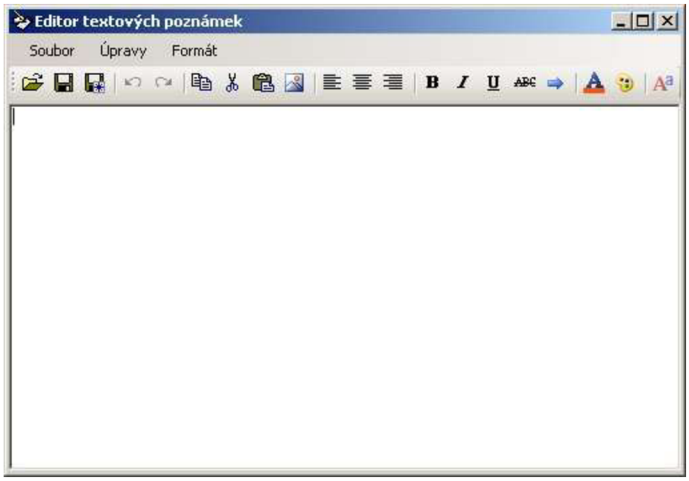


Obrázek 42 – Formulář pro manuální úpravu nebo přidávání dat do grafů

Poslední možností, kterou okno prohlížeče výsledků nabízí, je manuální editace zdrojových dat grafů. Na obrázku okna editace dat (viz. obrázek 42) je vidět oblast obsahující základní informace, kde lze po zvolení konkrétního grafu změnit veličiny a jednotky obou os grafu, nebo textovou poznámku. Ve spodní polovině formuláře jsou již samotná data rozdělená do tabulek. Počet tabulek je úměrný počtu dat v grafech, aby byl zachován optimální poměr mezi počtem dat a velikostí a počtem tabulek (zlepšení přehlednosti). Pod každou tabulkou je vypsáno konkrétní rozmezí vzorků, které se v dané tabulce nachází. Úprava dat probíhá editací polí v tabulkách a okamžitě se projevuje změnou hodnot dat grafů. Pomocí kontextového menu je možné do tabulek přidávat řádky (nad, pod aktuálně vybraný řádek nebo na konec dokumentu) případně vybrané řádky mazat. Okno editace dat je modální, tzn. že dokud není okno uzavřeno, nemůže být prováděna jiná operace v aplikaci, čímž nedojde k nepředpokládaným operacím v programu vlivem neočekávané změny hodnot.

3.5.6 Doplňkové funkce programu

Pro lepší organizaci a přehlednost souborů projektu, případně evidenci parametrů měření je do programu implementováno jednoduché okno pro editaci a vytváření textových poznámek (viz. obrázek 43) v RTF formátu umožňujícím formátování textu (ne jen uchování strohé textové informace). Tento způsob evidence poznámek k měření ve spojení s organizací souborů do jednoho projektu umožňuje zpřehlednit strukturu souborů k daným měřením a uživateli usnadňuje dostupnost souborů týkajících se jednoho měření, případně projektu.



Obrázek 43 – Okno pro úpravu textových poznámek

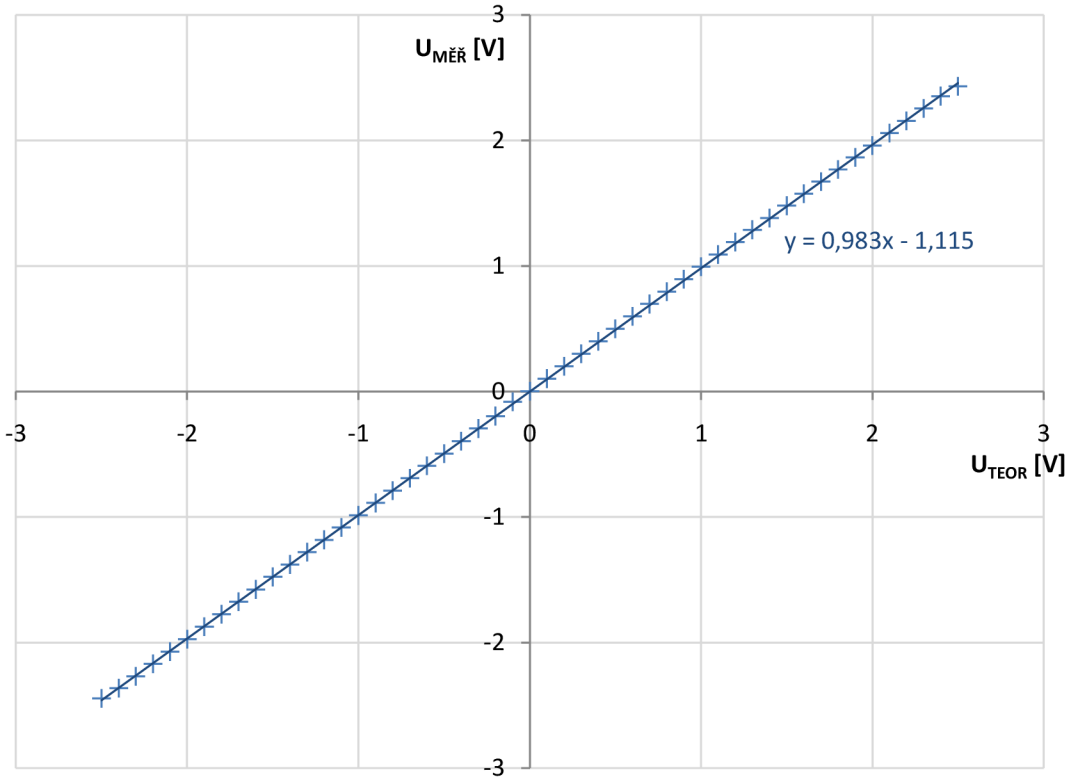
V budoucnosti mohou být do programu přidány další doplňkové funkce (např. nějaký druh specializovaného kalkulátoru, apod.). Tyto funkce ovšem v základní verzi programu implementovány nejsou a bude možné je do aplikace přidat až v závislosti na požadavcích obsluhy měření pracující na vytvářeném přístroji.

4 Zjištěné parametry přístroje a výsledky měření

Po dokončení testovacího prototypu přístroje bylo nutné provést měření na bližší určení specifických parametrů vytvořeného přístroje. Jeho charakteristiky lze popsat především pomocí charakteristiky výstupního napěťového zdroje, vstupního proudového převodníku a následně charakteristik naměřených přímo při měření chemických veličin, pro něž je přístroj primárně určen. Tyto získané výsledky jsou popsány v následujících podkapitolách.

4.1 Charakteristika napěťového výstupu

Výstupní přístrojem nastavitelný napěťový zdroj má vlastnosti dané především samotnými DA převodníky, které byly ve vstupních modulech použity. Z naměřených hodnot lze určit převodní konstantu, ofset a linearitu převodníku. První dvě hodnoty lze jednoduše určit z rovnice regresní přímky proložené naměřenými hodnotami, kde teoretické napětí U_{TEOR} je požadované napětí, které by mělo být po vhodném nastavení digitálních dat zobrazeno na výstupních svorkách zdroje (viz. graf 3).

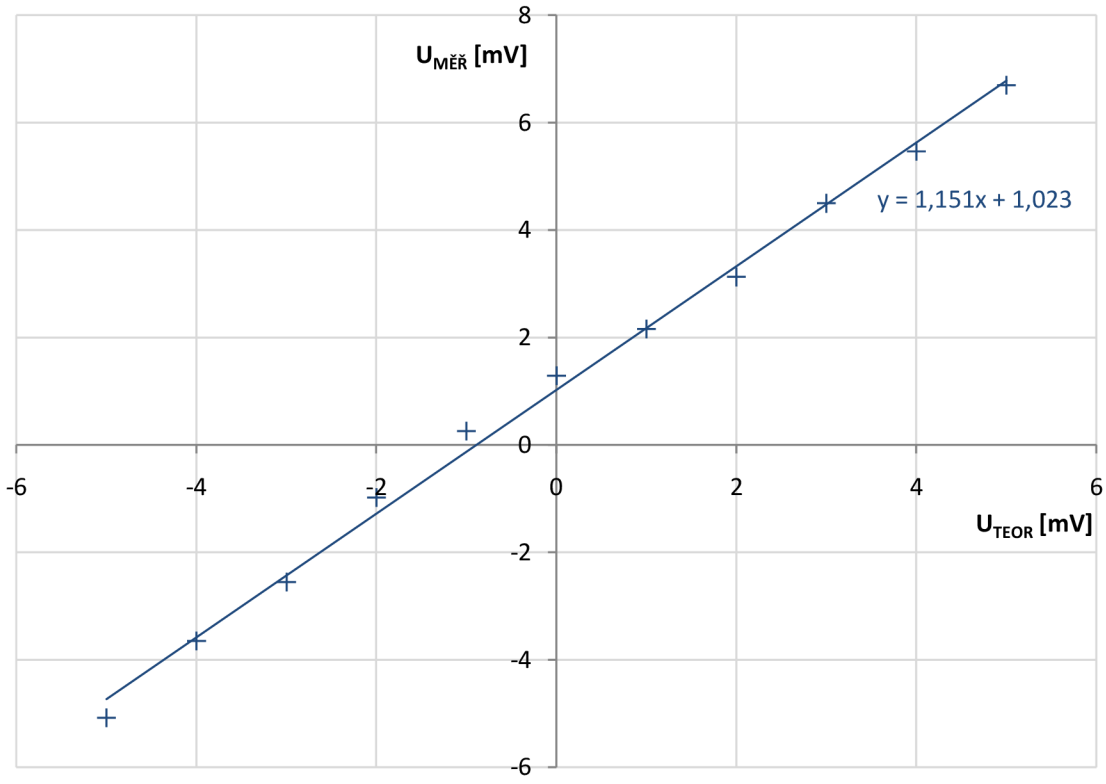


Graf 3 – Převodní charakteristika napěťového výstupu

Směrnice přímky ukazuje, že při požadovaném výstupním napětí 1 V bude fyzicky na výstupu naměřeno napětí pouhých 0,983 V. Tato chyba je ovšem jednoduše redukovatelná následnou kalibrací přístroje. Napěťový ofset výstupu udává hodnota napětí v bodu $U_{TEOR} = 0$ V, resp. 1,115 mV pro konkrétní měření. Tato hodnota je ovšem přijatelná v rámci použitých převodníků, kdy jeden krok převodníku činí:

$$U_{LSB} = \frac{U_{MAX} - U_{MIN}}{2^N} = \frac{2{,}5 - (-2{,}5)}{2^{12}} = \frac{5}{4096} = \underline{1{,}22\ mV}$$

Je patrné, že hodnota chyby ofsetu je téměř shodná s chybou 1 U_{LSB}, což je pro převodníky naprosto běžná hodnota a vzhledem k úpravě o pouhý jeden bit je téměř neopravitelná. Detail grafu v oblasti nulového bodu je zobrazen na následujícím grafu (viz. graf 4). V oblasti okolo počátku je jasně patrný ofsetový posun napětí a mírně vyšší sklon proložené převodní přímky. Navíc je při větším měřítku vidět nelinearity (lokální odchylky od proložené přímky), které ovšem nikdy nedosahují hodnoty vyšší, než 0,5 U_{LSB}.

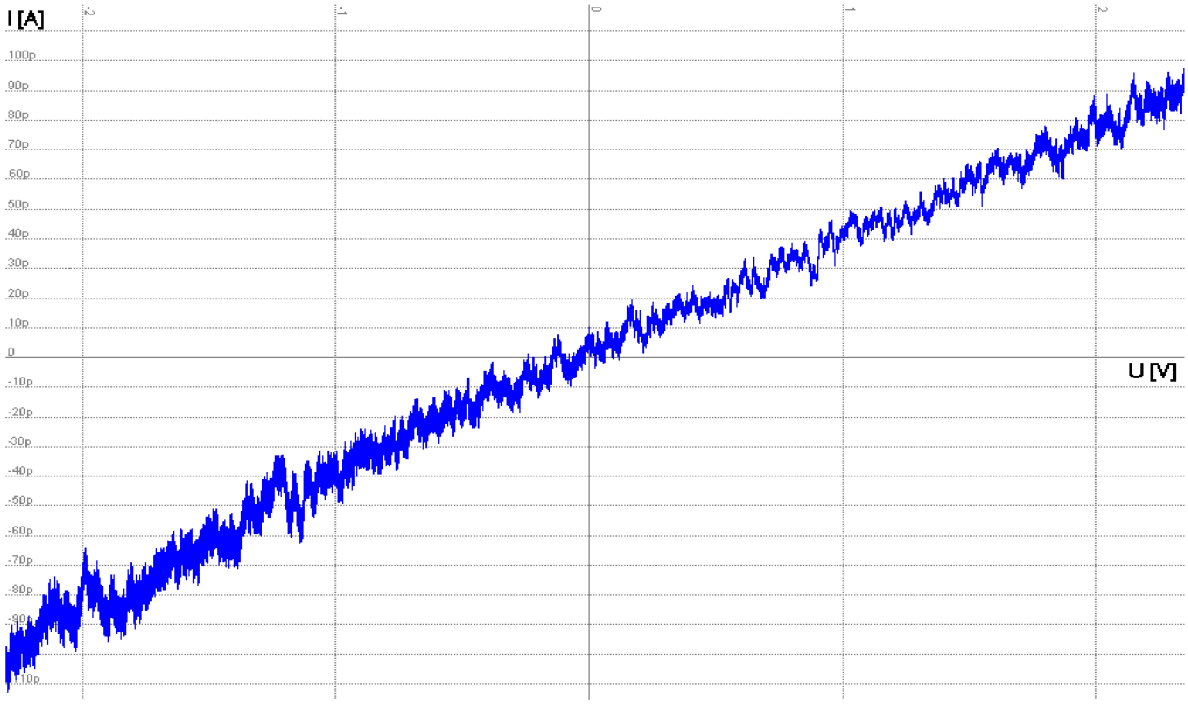


Graf 4 – Detail převodní charakteristiky napěťového výstupu v okolí 0 V

4.2 Charakteristika proudového převodníku

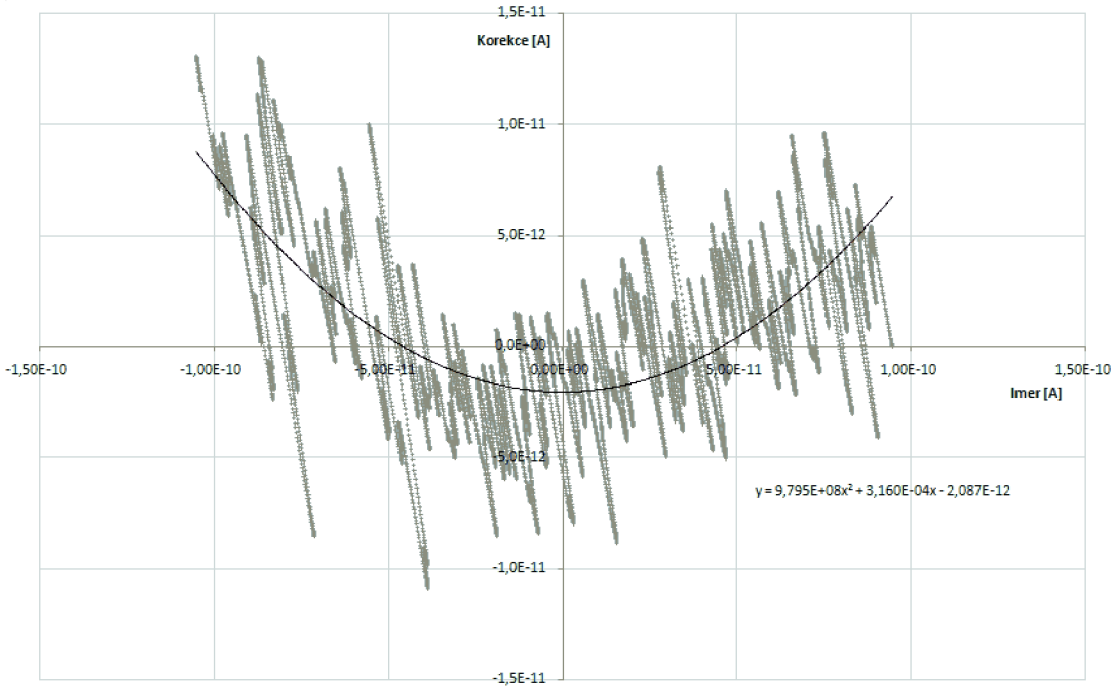
Mnohem důležitější charakteristiky než charakteristiky napěťového výstupu, které je třeba u zařízení proměřit, jsou charakteristiky proudového převodníku. Na rozdíl od napěťového výstupu pracuje proudový převodník s několikanásobně nižšími hodnotami proudů, a proto je mnohem citlivější na svody, šumy, ofsety a rušení. Navíc přímo na jeho výstupu závisí kvalita získaných dat a tím i celého přístroje. Pro zjištění základních parametrů převodníku bylo provedeno měření definovaného zatěžovacího rezistoru lineární voltametrií v plném rozsahu výstupního napětí pro každý vstupní rozsah zvlášť. Velikosti zatěžovacích rezistorů byly voleny s ohledem na plné využití rozsahu převodníku.

Na následujícím grafu (viz. graf 5) je vidět naměřená závislost na nejnižším rozsahu přístroje (±100 pA). Na této závislosti si lze všimnout všech základních zdrojů chyb měření, které se v proudovém převodníku vyskytují. Jedním z hlavních zdrojů chyb jsou ofsety operačních zesilovačů použitých v zapojení převodníku. Díky nim je celá křivka rovnoměrně posunuta v ose Y. Na tomto grafu je ofset téměř zanedbatelný (pouhé 2 pA, což je 1 % rozsahu), avšak to bylo dáno pouze aktuálním teplotním a časovým driftem ofsetu, který zapříčinil vykompenzování v době měření. Ve skutečnosti jsou ofsety způsobeny především tolerancí součástek, a proto se pohybují u každého modulu a rozsahu v jiných hodnotách (viz. tabulka 6), nicméně pokud není ofset zcela mimo rozsah převodníku, jedná se o nejsnáze kompenzovatelnou chybu (odečtení konstanty od naměřené hodnoty proudu).



Graf 5 – Naměřená charakteristika proudového převodníku (±100 pA, Rz = 20 GΩ)

Druhou, nejpatrnější chybou je šum a rušení. Je velmi důležité rozlišit a umět rozdělit tyto dva druhy chyb od sebe, i když se ve výsledku projevují téměř stejně, avšak na jejich odstranění je zapotřebí použít zcela jiných metod. V tomto případě je externí rušení reprezentováno především síťovým kmitočtem 50 Hz (pravidelné kmitání, vyšší ze dvou kmitočtů, na obrázku způsobuje zvětšení tloušťky naměřené křivky). Toto rušení není způsobeno samotným přístrojem a lze ho potlačit jen za pomoci odstínění všech aktivních analogových částí přístroje včetně měřicích vodičů. Druhou složku tvoří vlastní šum přístroje (posun křivky s nižší frekvencí). Tomu lze zabránit jen těžko, neboť vzniká přímo na součástkách obsažených v zapojení a lze ho tedy minimalizovat pouze použitím vhodných součástek s minimální generací šumu (nízkošumové rezistory a operační zesilovače). Z maximální velikosti šumu i rušení zjistíme, že přístroj vykazuje velice dobré parametry, neboť rušení dosahuje rozkmitu pouze okolo 10 pA a šum je menší než 30 pA. Poslední možností generace šumu je rozlišení AD převodníků použitých za proudovým převodníkem, avšak tento šum se projeví až na vyšších rozsazích, neboť na malých rozsazích je vysoce převýšen šumem analogovým.



Graf 6 – Vypočtená korekční křivka pro nejnižší rozsah přístroje

Poslední, nejméně patrnou chybou je nelinearita měření. Ta se projeví pouze na velmi malých rozsazích (v našem případě pouze na dvou nejnižších rozsazích) a je dána svody substrátu a vodičů a vnitřními nelinearitami samotných použitých součástek, především operačních zesilovačů. Na tomto grafu se tato chyba projevila slabou parabolickou závislostí

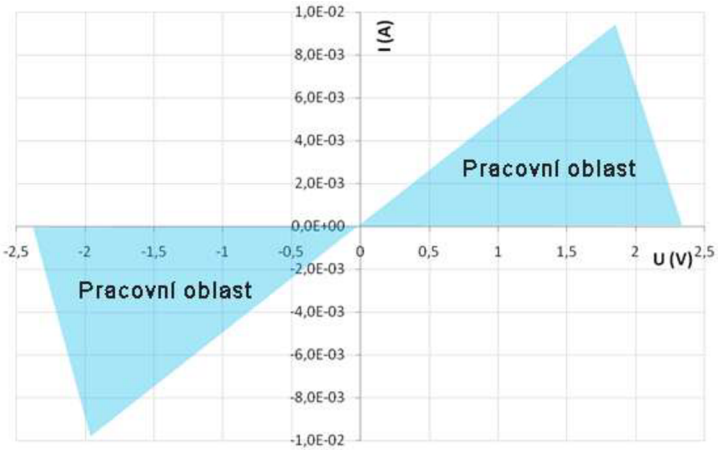
střední hodnoty proudu (proud bez superponovaného rušení a šumů). Nejnižší rozsah tohoto přístroje se dostává na hranici použitelnosti z hlediska použitých materiálů. Pro nižší rozsahy by již muselo být použito jednak základního materiálu s menšími svody a navlhavostí než má použitý FR4 a přesnějších operačních zesilovačů. Částečně lze tuto chybu nelinearity kompenzovat přičtením korekční křivky, která je odvozena z průběhu kalibrační křivky (vypočtenou korekční křivku pro nejnižší rozsah přístroje včetně jejího matematického vyjádření zobrazuje graf 6).

Tabulka 6 – Naměřené vlastnosti převodníku proudu na napětí

Rozsah [A]	U_{OS} [mV]	I_{OS} [A]	$I_{Š_P\text{-}P}$ [A]	ΔI_{MAX} [A]	δI_{MAX} [%]	U_{OS_RE} [mV]
±10 mA	-0,873	8,66 µA	46 µA	4,04E-05	0,4	< 2,3
±100 µA	-0,729	68,0 nA	700 nA	6,50E-07	0,7	
±1 µA	0,518	-481 pA	7 nA	3,45E-08	3,5	
±10 nA	-518	3,78 nA	200 pA	4,22E-09	42,2	520
±100 pA	-22,2	1,99 pA	25 pA	2,08E-11	20,8	24

Graf 5 zobrazuje průběh na nejnižším rozsahu přístroje, na kterém jsou nejvíce patrné chyby měření, avšak obdobné průběhy byly naměřeny i pro všechny ostatní rozsahy. Jejich číselné hodnoty byly vyneseny do souhrnné tabulky (viz. tabulka 6). V ní je vidět, že všechny ofsety (vstupní napěťový ofset U_{OS} i ofset měřeného proudu na vstupu I_{OS}) prudce narůstají na nejnižších dvou rozsazích, kdy dochází k připojení přídavného zesilovacího stupně (odporový dělič s druhým operačním zesilovačem zapojeným jako napěťový sledovač, viz. kapitola 2.6.1). Markantní nárůst je patrný především u rozsahu ±10 nA, přičemž se jednalo právě o modul a rozsah vykazující maximální (hraniční) ofset ze všech vyrobených modulů, jak již bylo popsáno výše v této kapitole. Výstupní ofsety jsou patrné z grafů A-V charakteristik. Dále si lze povšimnout naměřeného šumu i rušení ($I_{Š_P\text{-}P}$), který se pohybuje na vyšších rozsazích o několik řádů níže než je příslušný rozsah (dáno rozlišením převodníků) a na nižších rozsazích mírně narůstá vůči samotnému proudovému rozsahu (převládá vlastní šum a rušení nad chybou AD převodníku). Obdobně reaguje i maximální chyba měření (ΔI_{MAX} a δI_{MAX}) a ofset referenční elektrody U_{OS_RE}, do kterého se kromě vstupního ofsetu operačního zesilovače připočítává i chyba ofsetu napěťového zdroje popsaná v předešlé kapitole 4.1).

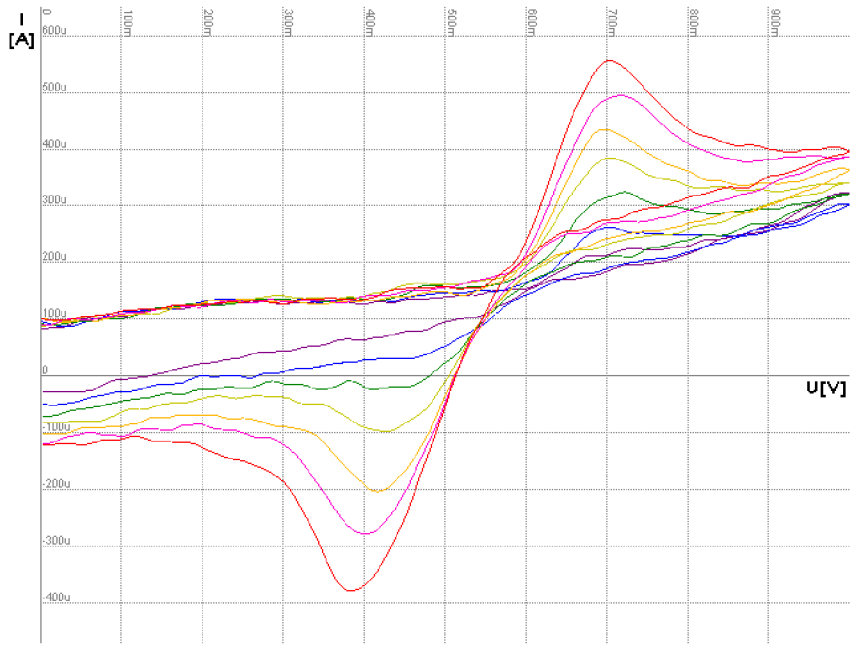
Sloučí-li se naměřené charakteristiky jak napěťového zdroje, tak i proudového převodníku, získá se maximální oblast použitelnosti celého měřicího zařízení (viz. graf 7). Ta je omezena maximálním výstupním napětím napěťového zdroje (osa X) a maximálním měřeným proudem na nejvyšším rozsahu přístroje (osa Y). Napětí je zobrazeno s přihlédnutím na maximální lineární pracovní oblast, přičemž s akceptováním mírné nelinearity by bylo možné pracovní oblast roztáhnout až téměř k napětí 2,5 V.



Graf 7 – Znázorněná pracovní oblast potenciostatu

4.3 Testovací měření a vyhodnocení výsledků

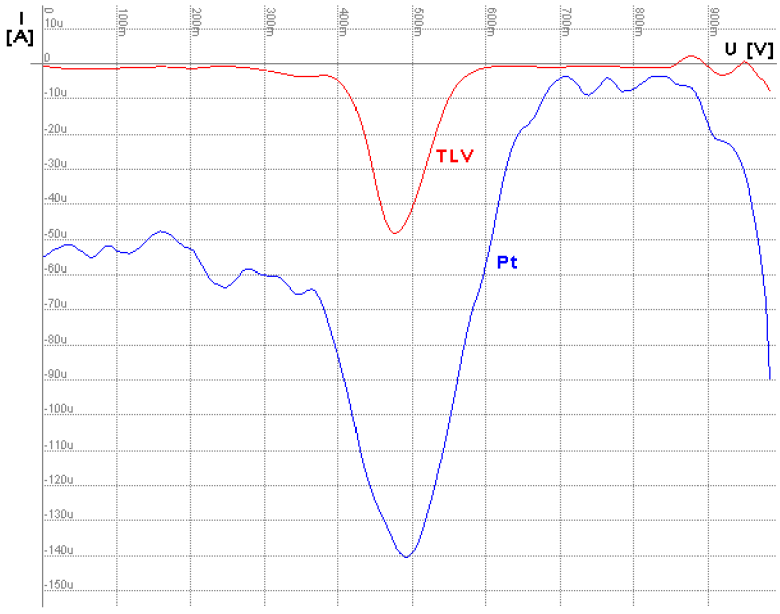
Zařízení bylo primárně konstruováno pro měření chemických veličin, od čehož se odvíjí i postup testování prototypu přístroje. Toto testování probíhalo v několika krocích. Nejdříve byla proměřena základní odezva s použitím standardních elektrod na nejméně kritickou, ale také nejméně citlivou metodu – cyklickou voltametrii [1]. Testování probíhalo v základním roztoku (acetátovém pufru) o koncentraci 100 mMol a objemu 4 ml do kterého se v jednotlivých krocích vkládaly přídavky 20 µl roztoku obsahujícího těžké kovy (olovo) o koncentraci 100 mMol (viz. graf 8). Roztok nebyl probubláván dusíkem, pouze byl po každém přídavku promíchán.



Graf 8 – Testovací měření cyklickou voltametrií přídavků olova v acetátovém pufru

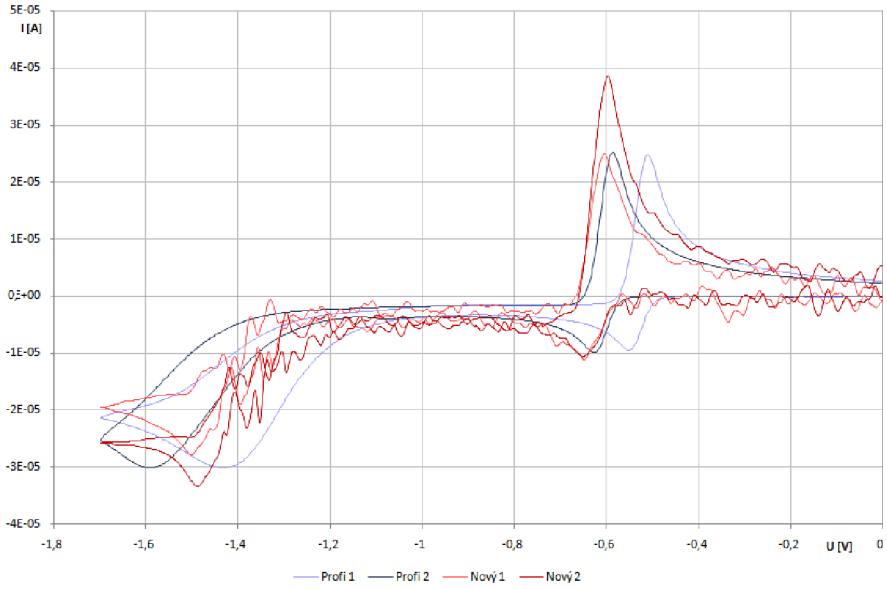
Měření probíhalo v rozsahu napětí 0 V až -1 V náběhovou rychlostí 100 mV/s na standardních platinových elektrodách. Proběhly vždy dva cykly měření pro každou koncentraci na rozsahu 10 mA, kdy výsledné hodnoty byly zpracovány klouzavým průměrem. Při měření bylo zjištěno, že standardní přístroje mají napětí elektrod vztaženo k referenční elektrodě jakožto nulovému bodu, což se projevilo otočením polarity proudové i napěťové osy (viz. graf 8). V zájmu zachování kompatibility se stávajícími principy měření i přístroji byl následně upraven firmware potenciostatu a všechna další měření již probíhala podle standardních podmínek (napětí pracovní elektrody pohyblivé, referenční elektrody nulové).

Po dokončení testovacího měření cyklickou voltametrií proběhlo odzkoušení složitější metody, diferenciálně pulzní voltametrie. To probíhalo za obdobných podmínek jako předchozí měření cyklickou voltametrií. Koncentrace vzorku byla ponechána maximální, poslední použitá (poslední přídavek 70 µl 100 mMol Pb). Náběhová rychlost byla pomalejší (50 mV/s), pulzy o amplitudě 25 mV měly střídu 1:1 o délce půlperiody 50 ms s vzorkováním 45 ms po čase poslední změny (začátku a konce pulzu). Měření proběhlo na dvou druzích senzorů (zapojených jako pracovní elektroda), jednak standardním platinovém a pak na testovacím tlustovrstvém (nově vytvořený laboratoří LabSensNano). Byly proměřeny celkem tři cykly pro každý senzor a tyto byly opět následně zpracovány klouzavým průměrem. Graf 9 zobrazuje výsledky získané na tomto testovacím měření. Lze si na něm povšimnout především nižší odezvy tlustovrstvého senzoru oproti platinovému, což bylo dáno menší kontaktní plochou senzoru. Z hlediska testu potenciostatu je možné prohlásit, že měření metodou diferenciálně pulzní voltametrií odpovídalo očekávaným hodnotám.



Graf 9 – Testovací měření diferenciálně pulzní voltametrií Pt a TLV senzorem

Poslední, třetí část testovacího měření chemických veličin probíhala v laboratořích Masarykovy univerzity. Nejdříve byla proměřena dummy cela (náhradní elektrický obvod simulující chování měřeného roztoku a jeho parazitních vlastností). Poté se přešlo k testování reálného roztoku (neznámá koncentrace Cd v základním pufru), a to jak nově vytvářeným potenciostatem tak profesionálním přístrojem běžně používaným k měření a výsledky byly následně porovnány (viz. graf 10). Do roztoku byly postupně přidány dva přídavky o stejném objemu neznámé koncentrace zjišťované látky a před každým měřením byl z roztoku odstraněn kyslík probubláním dusíkem. Měření proběhlo za stejných parametrů nejdříve na profesionálním přístroji a posléze na nově vytvořeném potenciostatu za použití platinových elektrod (referenční a společné) a kapkové rtuťové elektrody (pracovní elektroda). Rozsah napětí cyklické voltametrie byl 0 V až -1,7 V s náběhovou rychlostí 400 mV/s. Potenciostat byl přepnut na rozsah 100 µA a bylo na něm pro každou koncentraci průměrováno 5 naměřených cyklů.

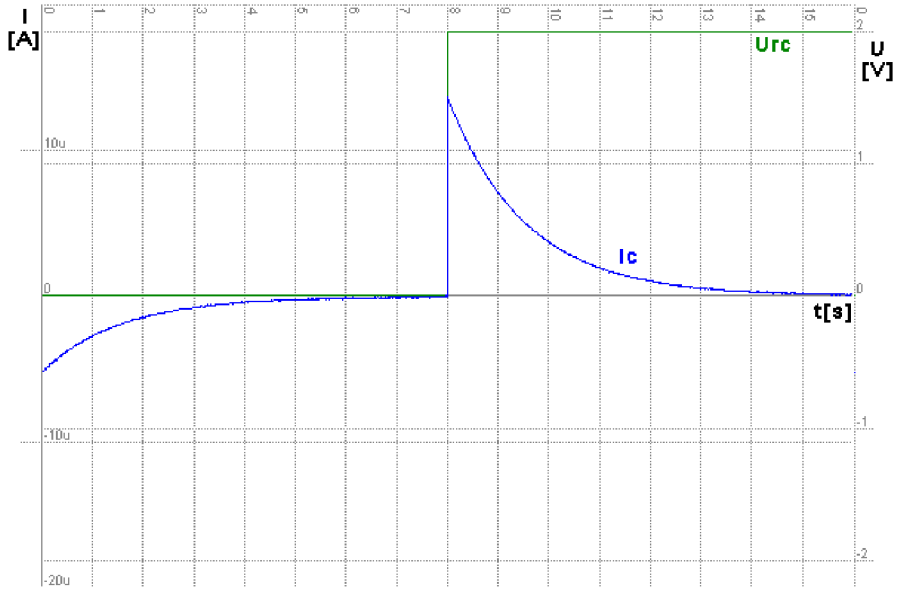


Graf 10 – Porovnání profesionálního a vytvářeného přístroje

Z grafu je patrné, že profesionální a nově vytvářený přístroj vykazuje velmi podobné charakteristiky (kromě druhého přídavku měřeného profesionálním přístrojem, kdy zřejmě nedošlo k promíchání roztoku před měřením). Dále si lze povšimnout, že profesionální zařízení nevykazuje při měření šum způsobený chováním měřeného roztoku (na testovacích rezistorech nebyl naměřen). Dle informací odborníků pracujících s polarografickými a voltametrickými metodami, obsahuje profesionální zařízení zcela jistě speciální kompenzace (přídavné obvody v napěťové části analogových modulů) pro potlačení těchto šumů a vývoj nového zapojení vstupního modulu pro nově vytvářený potenciostat bude hlavním bodem nejbližšího výzkumu nad rámec diplomové práce.

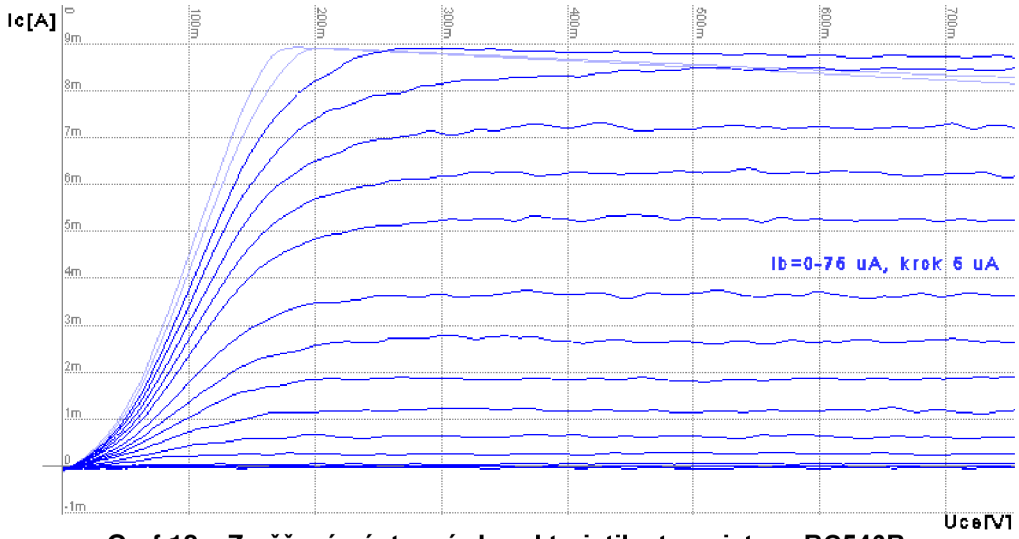
4.4 Testovací měření nechemických veličin

Kromě měření chemických veličin bylo zařízení konstruováno jako víceúčelový laboratorní měřicí přípravek, a proto bylo vytvořeno několik testovacích měření s vhodně uzpůsobenými vstupy přístroje. Za základní alternativní měření lze považovat zjišťování odezev jednoduchých elektronických systémů na definovaný impulz generovaný zařízením. Příklad takovéto odezvy je zobrazen na obrázku níže (viz. graf 11). Jedná se o odezvu RC článku (sériová kombinace rezistoru o odporu 150 Ω a kondenzátoru o kapacitě 10 µF) na skokovou změnu napětí o 2 V. Z grafu lze kromě špičkové hodnoty proudu (I_{MAX} = 13,7 µA) odečíst také velikost časové konstanty. Obdobně, pouze za použití jiných měřicích metod (generovaný definovaný střídavý signál) lze měřit například i C-V charakteristiky MOS struktur používané pro definování jejich parametrů.



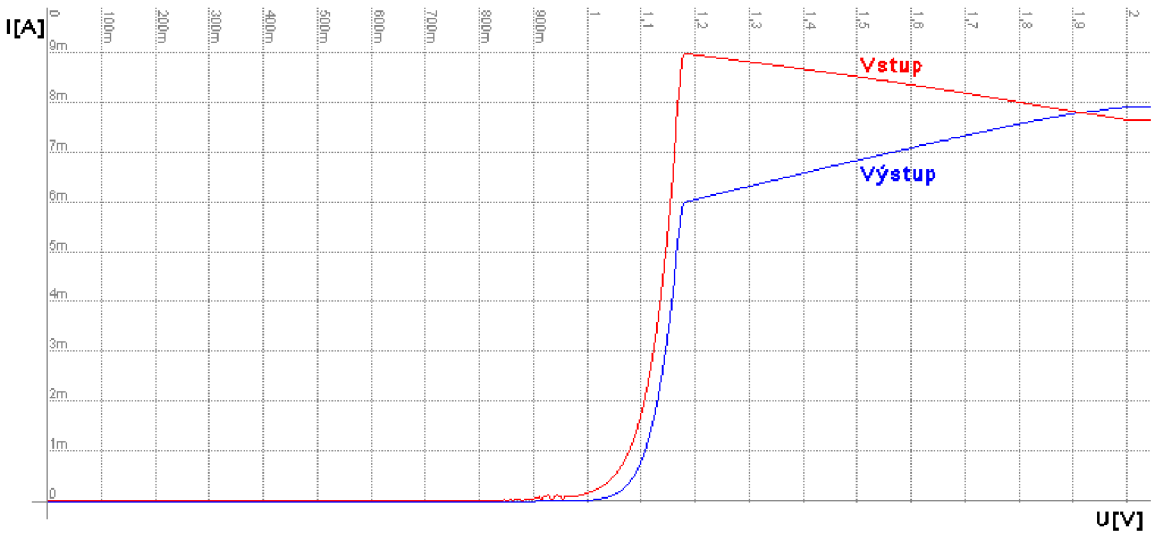
Graf 11 – Testovací měření na RC článku

Dalším měřením, které lze provést, je měření závislých charakteristik, např. výstupní charakteristiky bipolárního tranzistoru na velikosti bázového proudu (viz. graf 12). Takové měření je již náročnější a vyžaduje buď použití externího proudového zdroje pro definování bázového proudu tranzistoru, nebo úpravu vstupních analogových modulů přístroje. Na obrázku si lze povšimnout dvou podstatnějších jevů. Jednak se jedná o zvlnění výstupních charakteristik v oblasti saturace, které bylo dáno rušením indukovaným na nestíněných spojích na rozhraní kabel/tranzistor. Druhým, podstatnějším jevem je pokles měřeného proudu, dostane-li se vstup přístroje nad hranici měřitelného rozsahu (zmíněné charakteristiky pro Ib = 70 µA a 75 µA znázorněny světle modrou barvou). Z tohoto grafu lze samozřejmě určit i další vlastnosti tranzistoru, jako například U_{CE_SAT}, nebo proudový zesilovací činitel β.



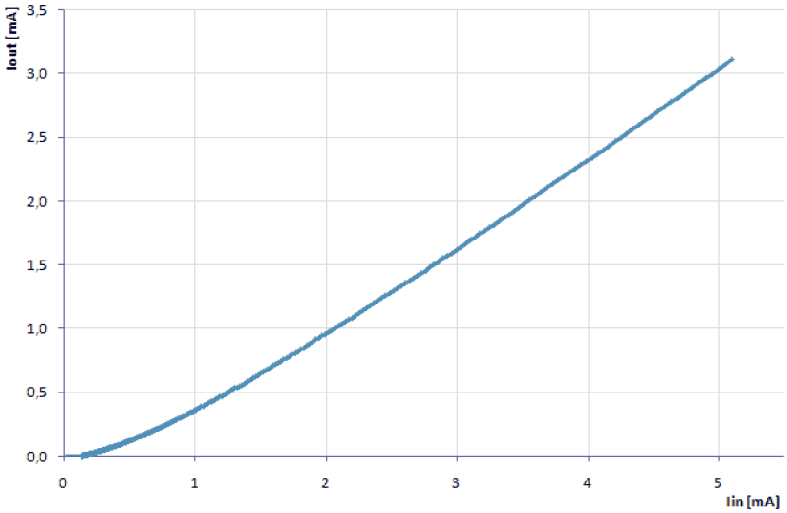
Graf 12 – Změřené výstupní charakteristiky tranzistoru BC546B

Stejný jev, který byl pozorován při měření tranzistoru (pokles proudu za hranicí rozsahu přístroje) byl pozorován i u dalšího příkladu měření, a sice vstupní a výstupní charakteristiky optočlenu 4N26 (viz. graf 13). Toto měření již vyžadovalo vzájemné propojení dvou kanálů měřicího přístroje. Oproti předchozímu měření, které ukazovalo pouze závislost měřené hodnoty proudu za hranicí rozsahu přístroje, nám toto měření poskytuje dodatečnou informaci o tom, jak se ve skutečnosti projeví překročení rozsahu do připojeného (proměřovaného) obvodu. Průběh nás informuje o tom, že vstupní proud do pracovní elektrody přístroje neklesá, jak by mohl naznačovat naměřený vstupní průběh, ale s omezenou strmostí dále narůstá (viz. výstupní průběh - není za hranicí rozsahu, tzn. podává nezkreslené výsledky). Z toho lze usoudit, že mimo proudový rozsah přístroje roste vstupní odpor pracovní elektrody, nebo se projevuje nekompenzované napětí v podobě vstupního ofsetu operačního zesilovače.



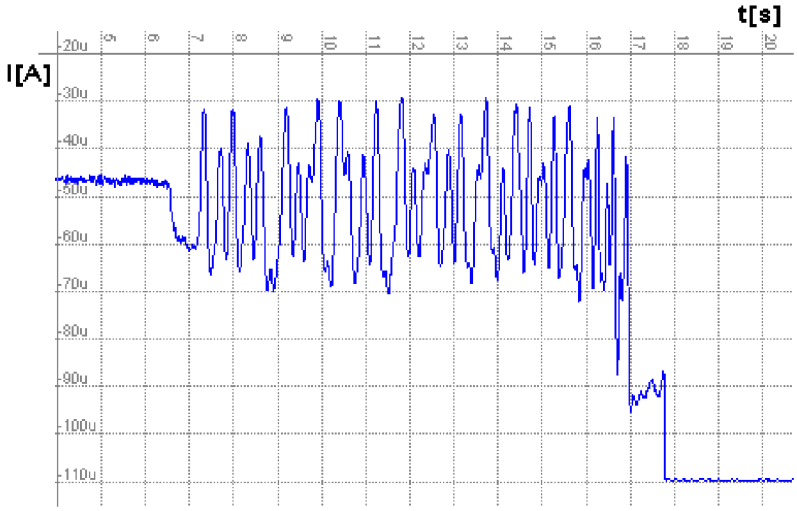
Graf 13 – Změřená vstupní a výstupní charakteristika optočlenu 4N26

Vzájemným porovnáním obou charakteristik lze získat převodní charakteristiku neznámého systému (dvojbranu). Z této charakteristiky lze kromě jednoznačného popisu systému určit například i linearitu systému (viz. graf 14). Výsledný graf převodní charakteristiky není vytvořen přímo obslužným programem (toto zobrazení bude možné, pokud bude program v budoucnosti rozšířen o specifické nechemické měřicí metody), ale je vytvořen pomocí zabudovaného exportu hodnot do externího programu MS Excel.



Graf 14 – Převodní charakteristika naměřená na optočlenu 4N26

Mimo popsané alternativní metody existuje nepřeberné množství dalších možností měření, nejen z oblasti elektroniky, pokud bude pomoci vhodného převodníku měřená veličina převedena na elektrickou (například měření optického záření pomocí fototranzistoru, viz. graf 15, nebo i jiných fyzikálních veličin). Jednoduchou úpravou programu, případně (i hardwaru) lze tedy potenciostat upravit na měření téměř libovolných požadovaných veličin.



Graf 15 – Příklad časové závislosti proudu náhodně buzeného fototranzistoru

5 Závěr

V rámci tohoto projektu byl vyvinut plnohodnotný vícekanálový systém pro měření chemických veličin v reálném čase, který byl navíc navržen tak, aby byl lehce upravitelný pro měření jiných (nechemických) veličin v laboratorních podmínkách, čímž byly splněny všechny požadavky obsažené v zadání diplomové práce. Přístroj je navíc doplněn baterií o dostatečné kapacitě na to, aby byl schopen bez připojení externího napájení měřit až po dobu 16 hodin mimo laboratoř. Kromě vytvoření samotného systému sestávajícího se z přesného diskrétního potenciostatu (viz. obrázek 44), senzorového multiplexoru a senzorového pole bylo provedeno kompletní proměření charakteristik systému pomocí testovacích měření v několika laboratořích (na VUT, Masarykově univerzitě a Mendlově zemědělské a lesnické univerzitě). Naměřené výsledky jsou přiloženy i v přílohách elektronické verze této práce. Navíc byla pro laboratorní a výukové účely vytvořena i jednokanálová verze potenciostatu.

V současné době probíhá testovací provoz prototypu zařízení ve spolupráci s výše zmíněnými univerzitami na běžně používaných chemických vzorcích a zároveň probíhá práce na vytvoření vhodného filtračního obvodu pro potlačení šumu při měření na reálných roztocích. Dále je také v současné době implementována do ovládacího softwaru speciální elektrochemická měřicí metoda – eliminační voltametrie (EVLS), která je vyvíjena na Masarykově univerzitě v Brně.

Dalším možným postupem v projektu (kromě zmíněného rozšíření o filtrační obvody a implementaci speciálních elektrochemických metod) je doplnění o další nechemické aplikace, především z oblasti elektroniky a jiných měřicích systémů. V závislosti na požadavcích obsluhy zařízení může být ovládací software rozšířen o doplňkové funkce, například speciální kalkulačku, statistické nástroje, elektrochemické tabulky apod.

Obrázek 44 – Fotografie vytvořeného prototypu osmikanálového potenciostatu

6 Použitá literatura

[1] **HUBÁLEK, Jaromír a ADÁMEK, Martin.** *Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy : skripta.* Brno : Fakulta etektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2003. 123 s.

[2] **HEJTMÁNKOVÁ, Alena.** *Instrumentální metody : skripta.* Praha : Katedra chemie AF, 2003. Dostupné z WWW: <http://max.af.czu.cz/kch/Analyticka_chemie/1>.

[3] **RINALDI, Matteo a autorů, kolektiv.** *Gravimetric chemical sensor based on the direct integration of SWNTS on ALN Contour-Mode MEMS resonators : Journal Article.* Philadelphia : University of Pensylvania, 2008. Dostupné z WWW: <http://repository.upenn.edu/ese_papers/457/>.

[4] **WILLIAMS, Geraint a COLES, Gary S.V.** *Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 57, Issues 1-3.* 1999. 108 s.

[5] **VOJÁČEK, Antonín.** *Měření koncentrace prachu a senzory prachu.* [Online] 2006. Dostupný z WWW: <http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART287-mereni-koncentrace-prachu-a-senzory-prachu.html>.

[6] **SKLÁDAL, Petr.** *Biosenzory : Skripta.* Brno : Přírodovědecká fakulta Masarykovy Univerzity, 2002. 149 s.

[7] **SEDLÁČEK, Jiří, MIKEL a HUBÁLEK, Jaromír.** *Device for Fluorescent Analyse of Pesticides.* Brno : NOVPRESS s.r.o, 2009. stránky 50-53. ISBN 978-80-214-3933-7.

[8] **GLOSER, Jan.** Fluorescence chlorofylu jako indikátor stresu. [Online] 2010. Dostupný z WWW: <http://www.sci.muni.cz/~fyzrost/fluorometrie.pdf>.

[9] **BEČVÁŘ, Daniel, FUJCIK, Lukáš a MUSIL, Vladislav.** *Návrh digitálních integrovaných obvodů a jazyk VHDL : skripta.* Brno : Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2007. 283 s.

[10] **DOSTÁL, Jiří.** *Operační zesilovače.* 1. inovované české vydání. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 536 s. ISBN 80-7300-049-0.

[11] **Microchip.** *MCP6V02 datasheet.* [Online] Chandler, 2008. Dostupné z WWW: <http://www.microchip.com>.

[12] **Texas Instruments.** *Datasheety OZ Texas Instruments.* [Online] Dalas, 2008. Dostupné z WWW: <http://www.ti.com>.

[13] **Analog Devices.** *Datasheety OZ Analog Devices.* [Online] 2008. Dostupné z WWW: <http://www.analog.com>.

[14] **Microchip.** *Datasheety OZ Microchip.* [Online] Chandler, 2008. Dostupné z WWW: <http://www.microchip.com>.

[15] **Atmel.** *Product overview XMega.* [Online] San Jose, 2008. Dostupné z WWW: <http://www.atmel.com>.

[16] **Atmel**. *ATmega128 datasheet.* [Online] San Jose, 2007. Dostupné z WWW: <http://www.atmel.com>.

[17] **Xilinx.** *XC95144XL datasheet.* [Online] San Jose, 2007. Dostupné z WWW: <http://www.xilinx.com>.

[18] *RAM 628512LP datasheet.* [Online] 2003. Dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/939/939-010/dsh.939-010.1.pdf>.

[19] **JEDLIČKA, Petr.** *Přehled obvodů řady CMOS 4000, díl 1.* 1. vydání. Praha : BEN - technická literatura, 1994. 169 s. ISBN 80-7300-167-5.

[20] **FTDI.** *FT232RL datasheet.* [Online] Glasgow, 2008. Dostupné z WWW: <http://www.ftdichip.com>.

[21] **SKALLA, Jan.** *Snímače otáček a polohy.* [Online] 2009. Dostupné z WWW: <http://www.mti.tul.cz/files/svm/Snimace_polohy.pdf>.

[22] **KRČMÁŘ, David.** *Učebnice jazyka C.* 1. vydání. Praha : Computer press, 2001. 272 s. ISBN 80-7232-351-7.

[23] **Microchip.** *MCP4921 datasheet.* [Online] Chandler, 2007. Dostupné z WWW: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21897B.pdf>.

[24] **Microchip**. *MCP3301 datasheet.* [Online] Chandler, 2007. Dostupné z WWW: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21700C.pdf>.

[25] **TRNKOVÁ, Libuše.** Identification of current nature by elimination voltammetry with linear scan. *Journal of Electroanalytical Chemistry 582.* 2005, stránky 258-266. Dostupné z WWW: <http://www.sciencedirect.com>.

7 Seznam použitých zkratek

ASIC - Zakázkový čipový obvod vyrobený standardní polovodičovou technologií

CMOS - Polovodičová technologie využívající unipolárních tranzistorů vodivosti P i N (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*)

CPLD - Programovatelné logické obvody obsahující ve vnitřní struktuře více jednoduchých obvodů PAL (*Complex Programmable Logic Device*)

DPS - Deska plošných spojů, základní materiál s realizovanou vodivou sítí

FIFO - Druh zásobníkové paměti, kde jsou nejdříve uložená data i daty nejdříve čtenými (*First In First Out*)

FPGA - Programovatelné logické obvody realizované pomocí struktury propojování logických buněk (*Field Programmable Gate Array*)

IRC - Otočný digitální prvek pro ovládání uživatelem (*Inkrementální Rotační Čidlo*)

ISFET - Speciální druh iontově selektivního senzoru realizovaný unipolární technologií (*Ion - Sensitive Field - Effect Transistor*)

ISP - Sériové rozhranní pro programování obvodů přímo v cílové aplikaci (*In System Programming*)

JTAG - Sériové hromadné programovací a ladicí rozhranní (*Joint Test Action Group*)

LED - Polovodičový zdroj světla, světlo emitující dioda (*Light Emitting Diode*)

LIFO - Druh zásobníkové paměti, kde jsou nejdříve uložená data daty nejpozději čtenými (*Last In First Out*)

MIPS - Jednotka popisující výpočetní výkon procesoru – miliony instrukcí za vteřinu (*Mega Instructions Per Second*)

PAL - Základní programovatelné logické obvody s konfigurovatelnou maticí logického součinu (*Programmable And Logic*)

SAW - Povrchová akustická vlna (*Surface Acoustic Wave*)

SPI - Druh sériového komunikačního rozhranní (*Serial Peripheral Interface*)

SPW - Povrchový plazmon (*Surface Plazmon Wave*)

TLV - Druh technologie výroby elektronických obvodů a senzorů (*TLustá Vrstva*)

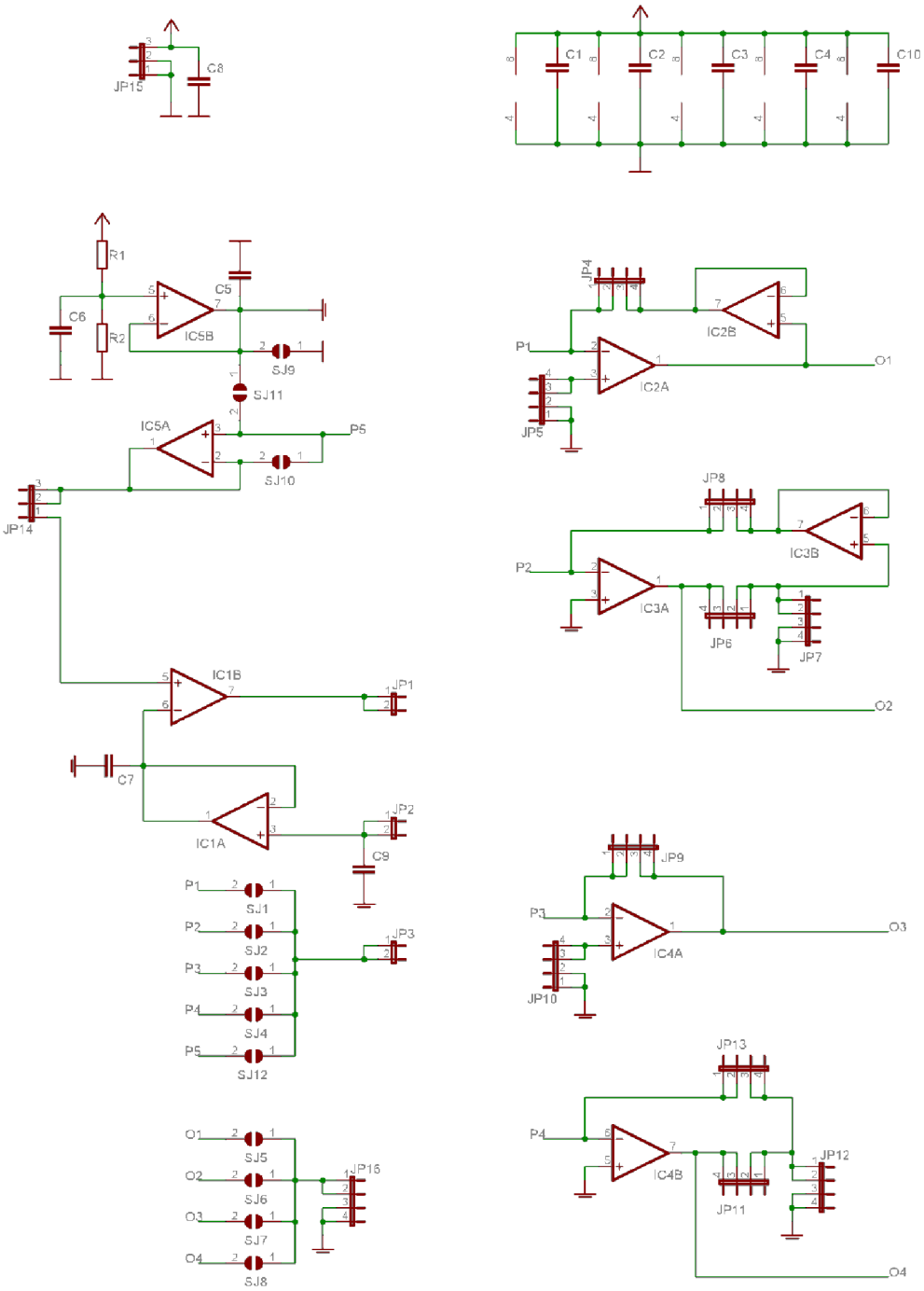
UART - Univerzální asynchronní obousměrná sériová komunikační linka (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*)

USART - Univerzální obousměrná sériová linka podporující synchronní i asynchronní režim (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*)

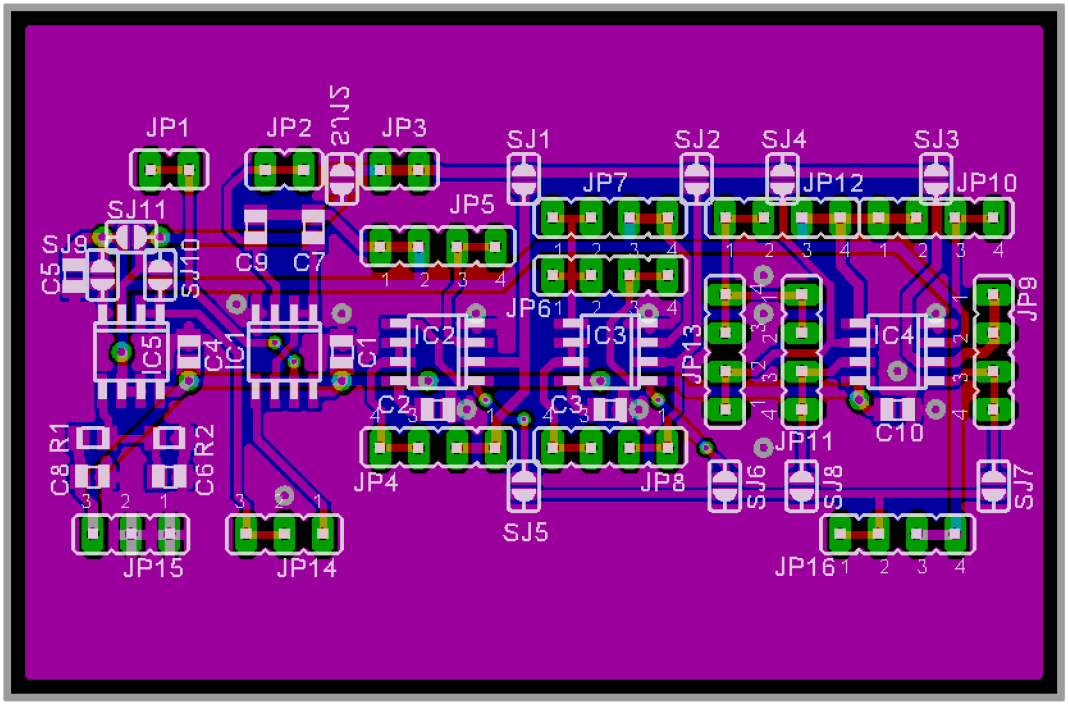
USB - Univerzální sériová komunikační sběrnice (*Universal Serial Bus*)

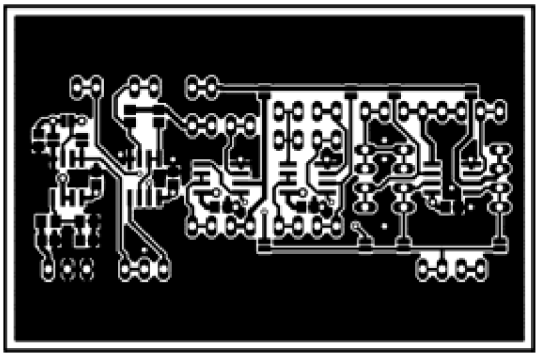
VHDL - Programovací jazyk popisující hardwarovou strukturu programovatelných obvodů (*Very high speed integrated circuits Hardware Description Language*)

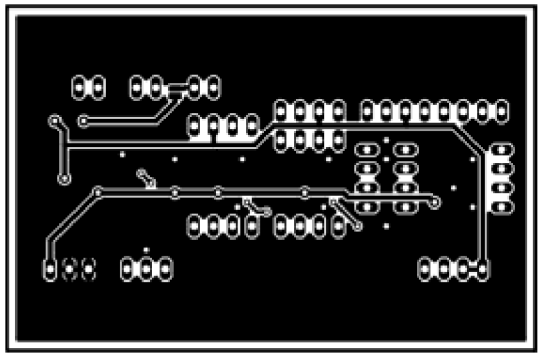
8 Přílohy



Příloha 1 – Schéma testovacích zapojení převodníků proudu na napětí





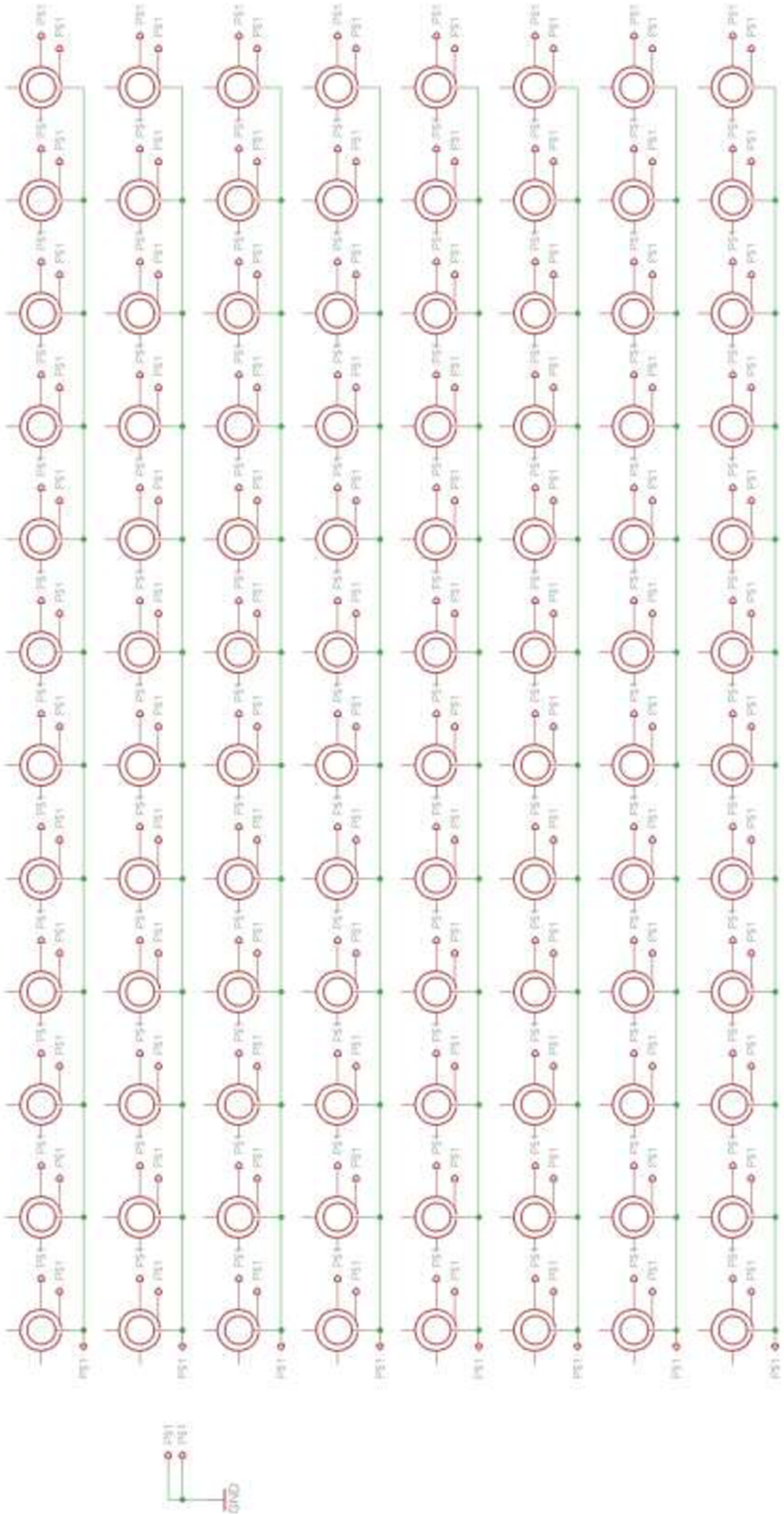


Příloha 2 - Deska plošných spojů s testovacími zapojeními, pohled shora (70,2 mm × 46,1mm)
A) Rozmístění součástek M 2:1, B) Horní strana M 1:1, C) Spodní strana M 1:1

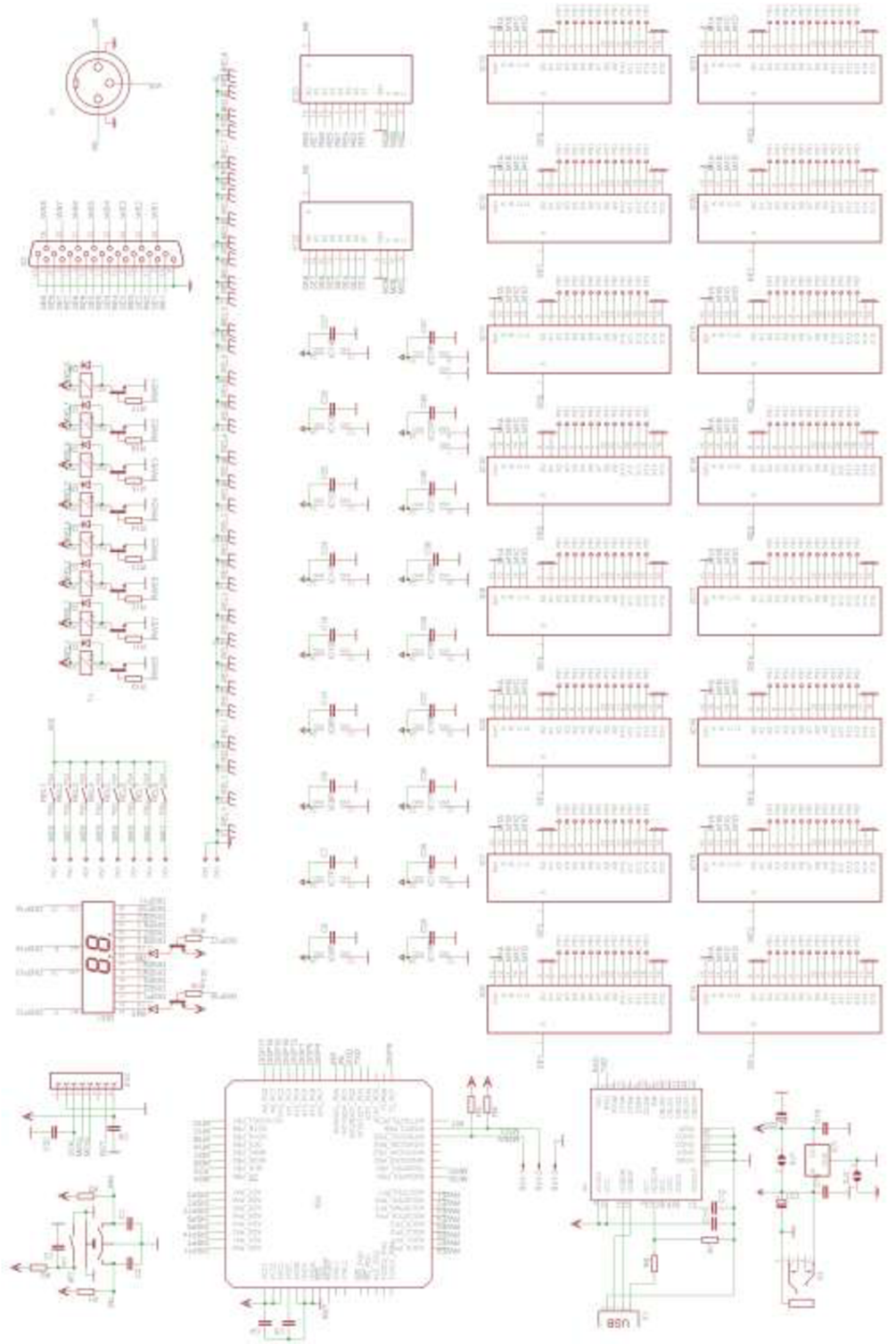
R_S [kΩ]	U_{IN} [mV]	R_{WE} [kΩ]	U_{OUT} [mV]	$U_{ŠP-P}$ [mV]	I_{REALNE} [nA]	I_{MERENE} [nA]	I_{ERR_MERENI} [%]	$I_{ERR_ŠUM}$ [%]
1601	1	10000	-5,00	48,70	0,1	-3,12	3223,0	30418,5
		2000	0,30	49,90	0,5	0,19	62,5	6233,6
		1000	0,90	52,80	1,0	0,56	43,8	3297,9
		200	7,80	50,30	5,0	4,87	2,6	628,4
		100	15,90	44,10	10,0	9,93	0,7	275,5
	10	10000	0,80	49,10	1,0	0,50	50,0	3066,8
		2000	7,50	47,60	5,0	4,68	6,3	594,6
		1000	15,40	47,30	10,0	9,62	3,8	295,4
		200	80,20	18,90	50,0	50,09	-0,2	23,6
		100	161,00	19,10	100,0	100,56	-0,6	11,9
	100	10000	15,40	49,30	10,0	9,62	3,8	307,9
		2000	80,20	17,70	50,0	50,09	-0,2	22,1
		1000	161,00	16,60	100,0	100,56	-0,6	10,4
		200	808,30	0,02	500,0	504,87	-1,0	0,0
		100	1575,50	16,20	1000,0	984,07	1,6	1,0
	1000	10000	159,90	20,49	100,0	99,88	0,1	12,8
		2000	801,40	17,80	500,0	500,56	-0,1	2,2
		1000	1579,40	19,00	1000,0	986,51	1,3	1,2
101	1	1000	0,05	0,67	1,0	0,51	49,4	663,4
		200	0,48	2,79	5,0	4,71	5,8	552,5
		100	1,11	4,07	10,0	10,95	-9,5	403,0
		20	5,11	0,13	50,0	50,59	-1,2	2,6
		10	10,27	2,98	100,0	101,72	-1,7	29,5
	10	1000	0,96	3,95	10,0	9,51	4,9	391,1
		200	5,02	1,64	50,0	49,66	0,7	32,5
		100	10,15	2,51	100,0	100,50	-0,5	24,9
		20	50,91	1,51	500,0	504,06	-0,8	3,0
		10	101,85	1,56	1000,0	1008,42	-0,8	1,5
	100	1000	10,08	3,46	100,0	99,80	0,2	34,3
		200	50,94	1,60	500,0	504,36	-0,9	3,2
		100	101,92	1,59	1000,0	1009,11	-0,9	1,6
		20	509,87	1,73	5000,0	5048,22	-1,0	0,3
		10	1020,52	1,49	10000,0	10104,16	-1,0	0,1
	1000	1000	101,30	1,70	1000,0	1002,97	-0,3	1,7
		200	506,36	1,52	5000,0	5013,47	-0,3	0,3
		100	1012,90	1,72	10000,0	10028,71	-0,3	0,2

R_S [kΩ]	U_{IN} [mV]	R_{WE} [kΩ]	U_{OUT} [mV]	$U_{ŠP-P}$ [mV]	I_{REALNE} [nA]	I_{MERENE} [nA]	I_{ERR_MER} [%]	$I_{ERR_ŠUM}$ [%]
11	1	100	0,09	0,08	10,0	8,25	17,5	70,5
		20	0,54	0,07	50,0	49,46	1,1	12,9
		10	1,11	0,18	100,0	100,55	-0,6	16,8
		2	5,63	0,27	500,0	511,64	-2,3	4,9
		1	11,31	0,45	1000,0	1028,36	-2,8	4,1
	10	100	1,09	0,07	100,0	99,09	0,9	6,8
		20	5,53	0,15	500,0	502,45	-0,5	2,7
		10	11,08	0,17	1000,0	1007,18	-0,7	1,5
		2	55,51	0,28	5000,0	5046,36	-0,9	0,5
		1	111,24	0,57	10000,0	10112,91	-1,1	0,5
	100	100	11,10	0,18	1000,0	1009,09	-0,9	1,7
		20	55,56	0,18	5000,0	5050,91	-1,0	0,3
		10	111,20	0,16	10000,0	10109,09	-1,1	0,1
		2	556,00	0,38	50000,0	50545,45	-1,1	0,1
		1	1112,51	0,57	100000,0	101137,27	-1,1	0,1
	1000	100	110,37	0,17	10000,0	10033,64	-0,3	0,2
		20	551,65	0,22	50000,0	50150,00	-0,3	0,0
		10	1103,67	0,03	100000,0	100333,64	-0,3	0,0

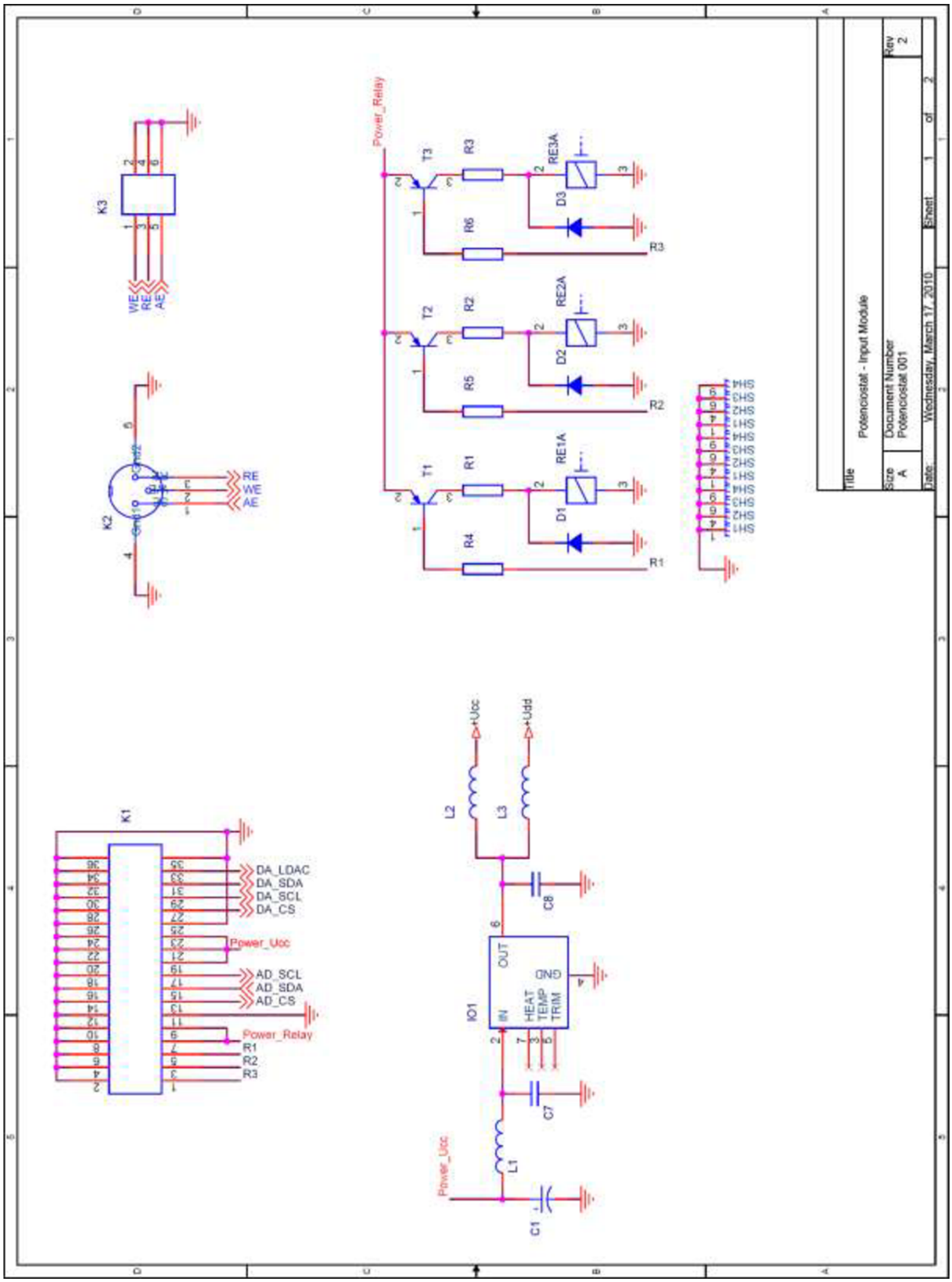
Příloha 3 – Naměřená data na zkušebním zapojení s T-článkem



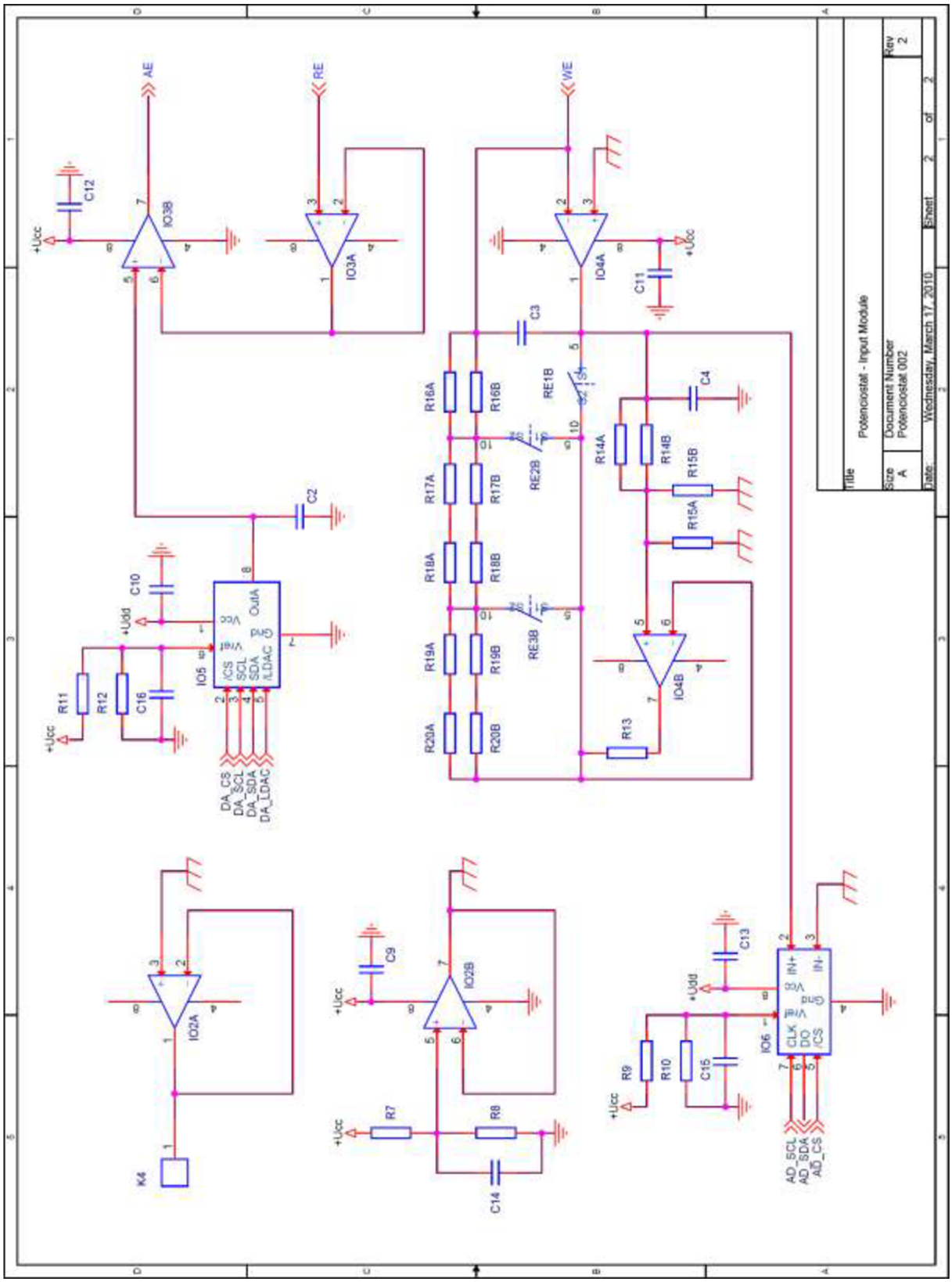
Příloha 4 – Schéma zapojení senzorového pole



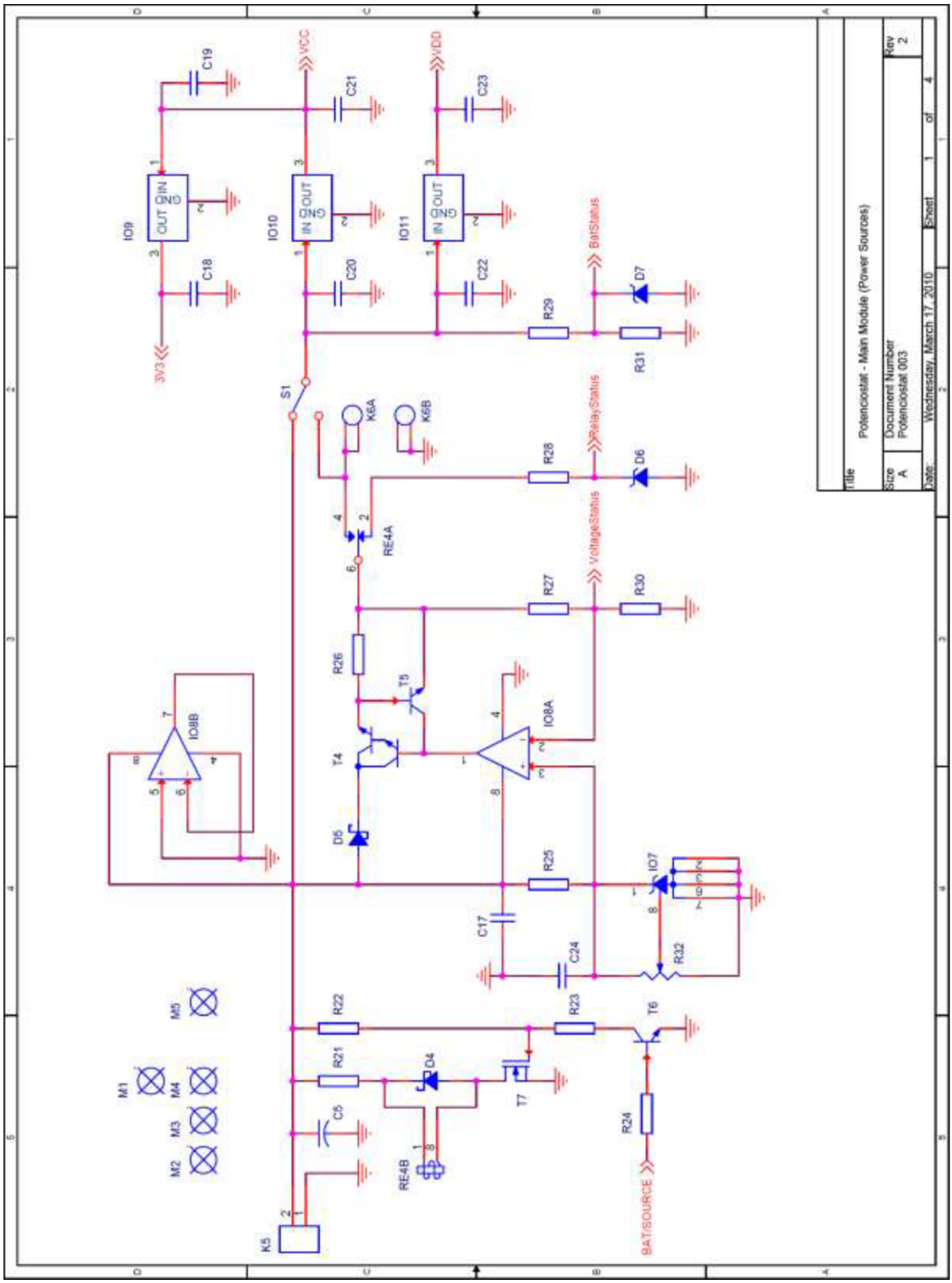
Příloha 5 – Schéma zapojení senzorového multiplexoru



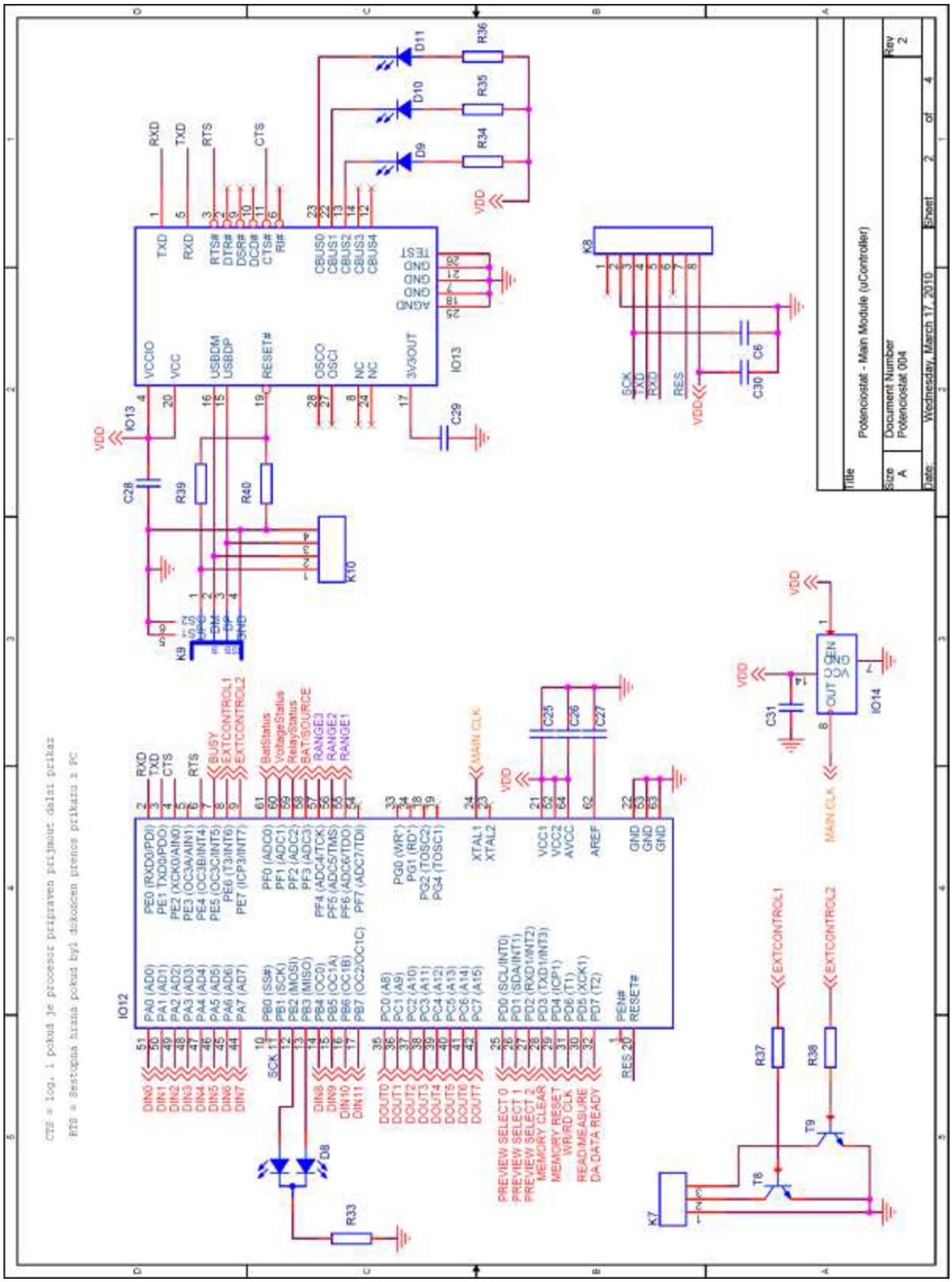
Příloha 6 – Schéma zapojení analogových vstupních modulů (napájení a konektory)



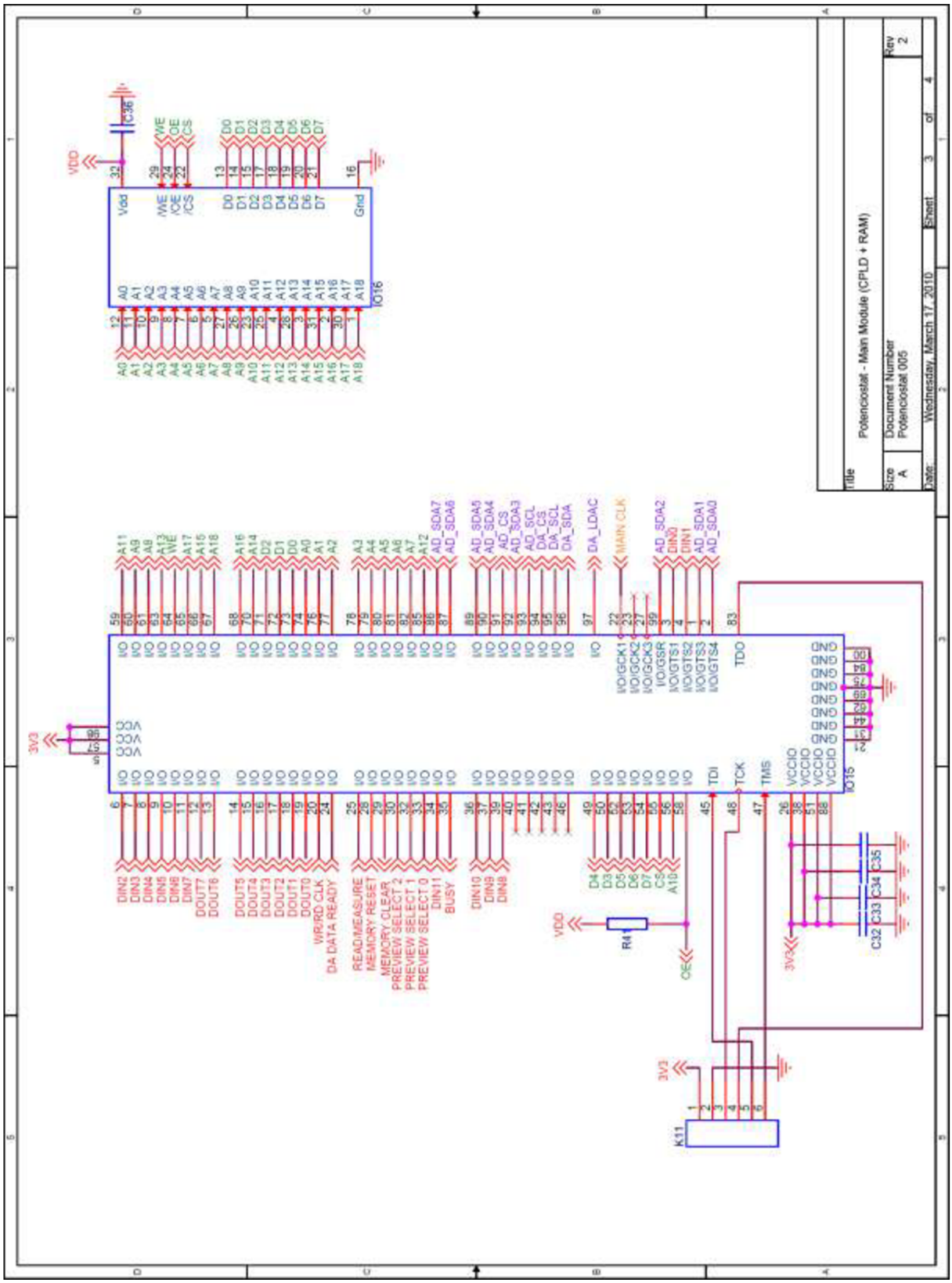
Příloha 7 – Schéma zapojení analogových vstupních modulů (analogová část)



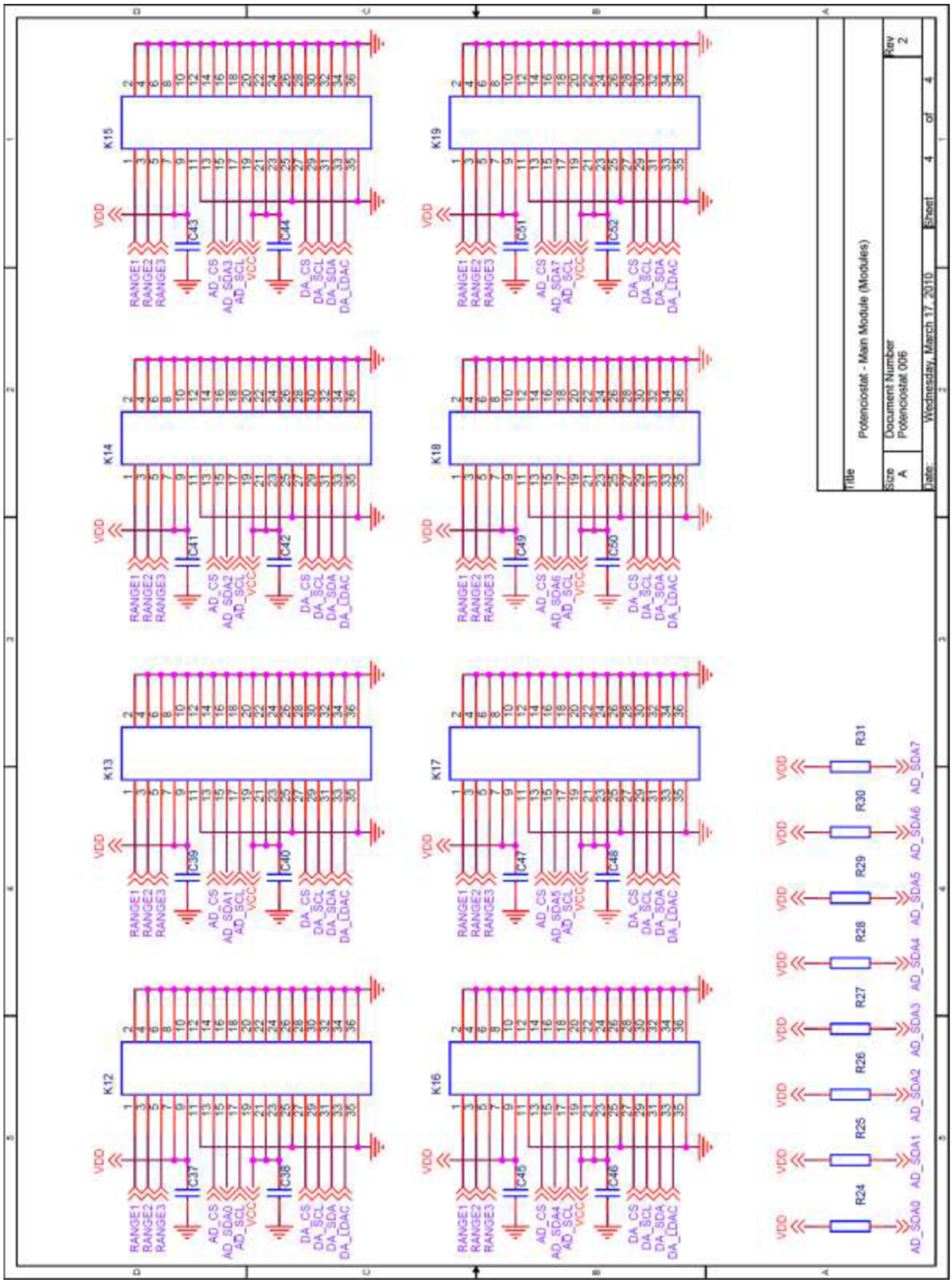
Příloha 8 – Schéma zapojení napěťových obvodů potenciostatu



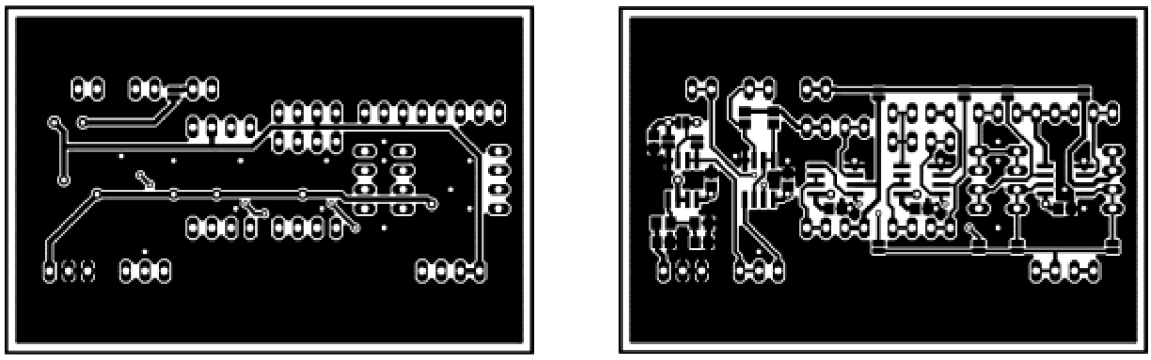
Příloha 9 – Schéma zapojení řídícího mikrokontroléru potenciostatu



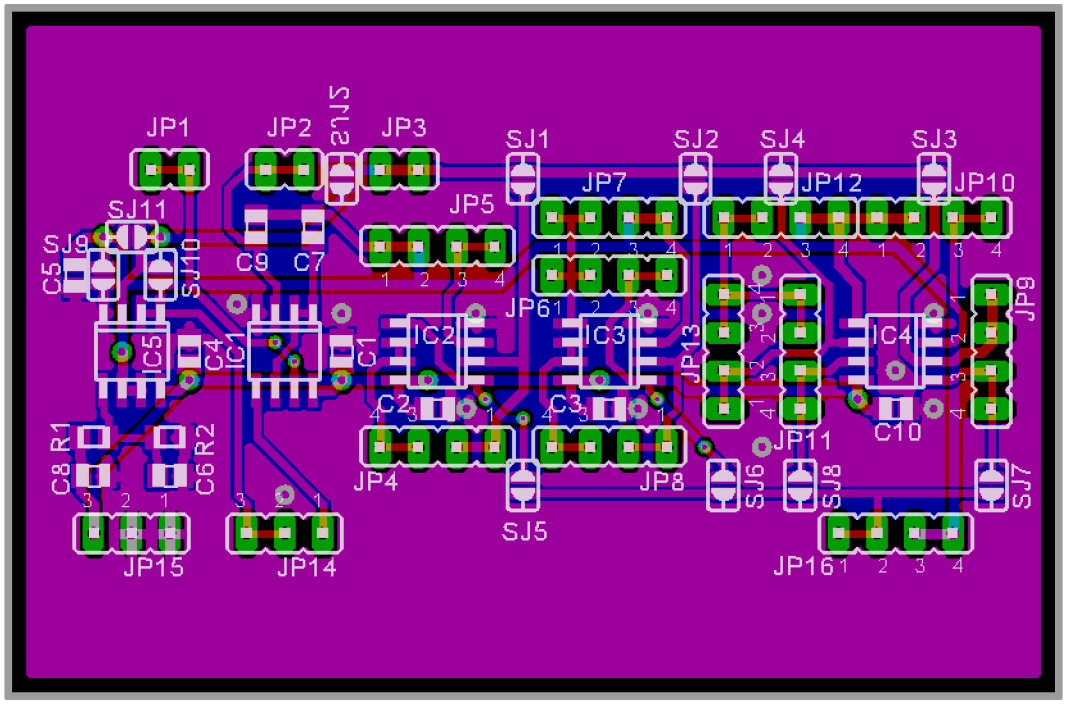
Příloha 10 – Schéma zapojení řídícího CPLD a RAM potenciostatu



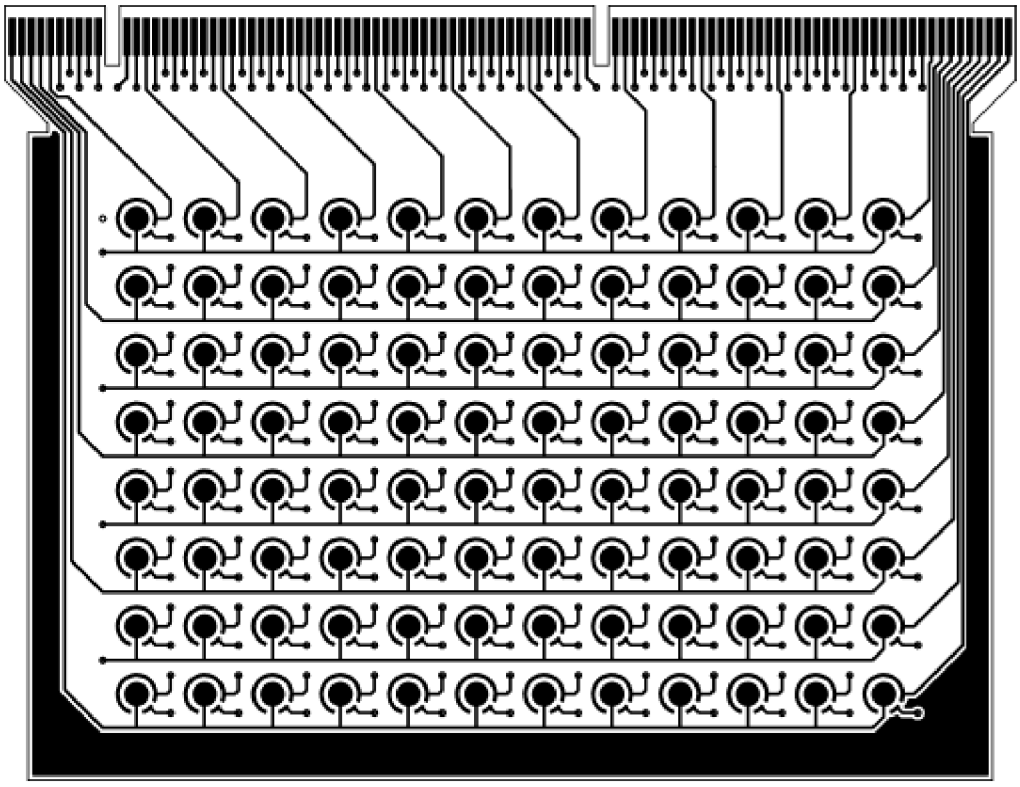
Příloha 11 – Schéma připojení vstupních modulů do hlavní desky potenciostatu



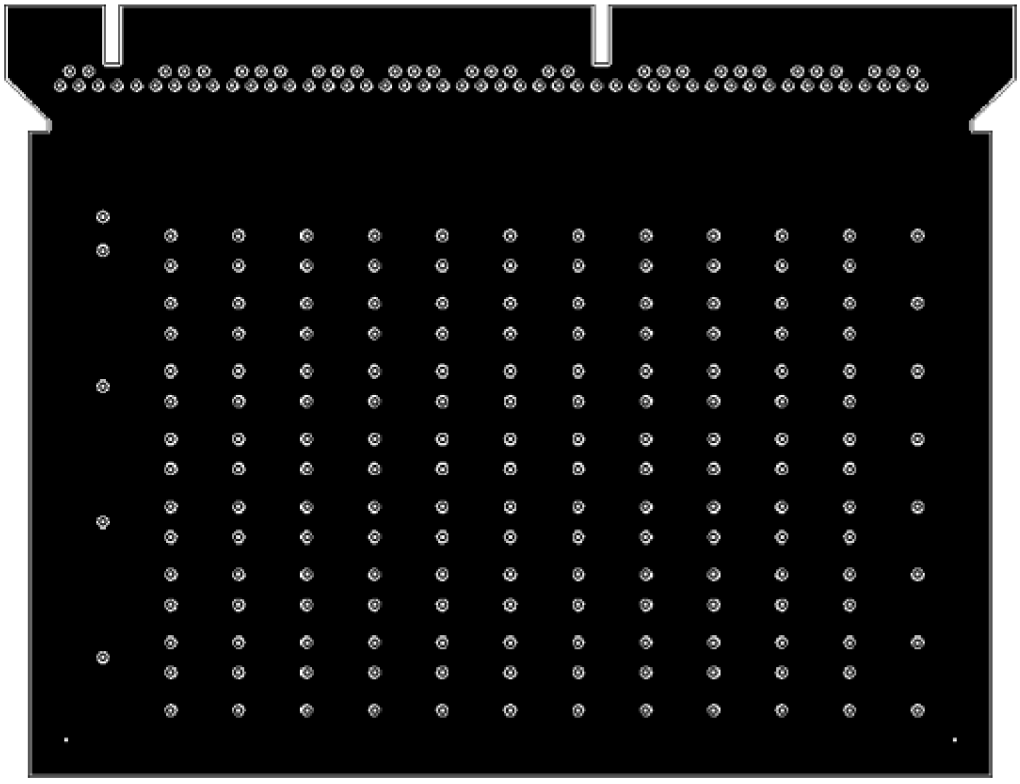
Příloha 12 – A) Horní a B) spodní strana DPS testovacího zapojení, pohled shora M1:1 (70 mm × 46 mm)



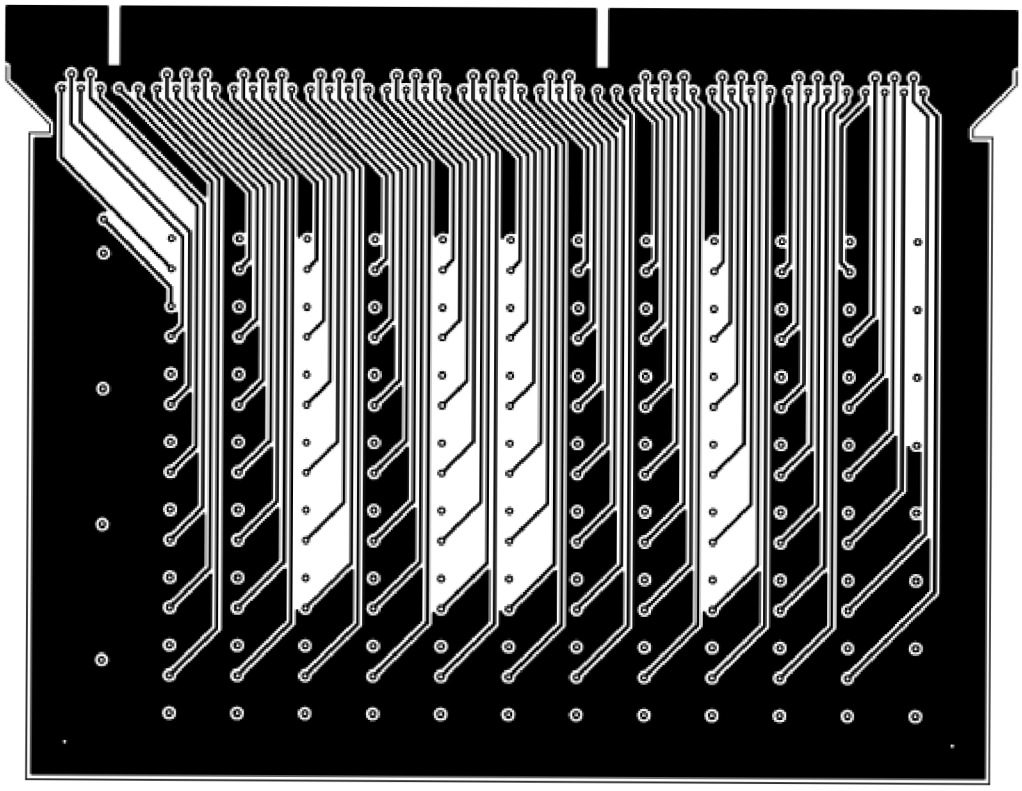
Příloha 13 – Rozmístění součástek na testovací DPS, pohled shora M2:1



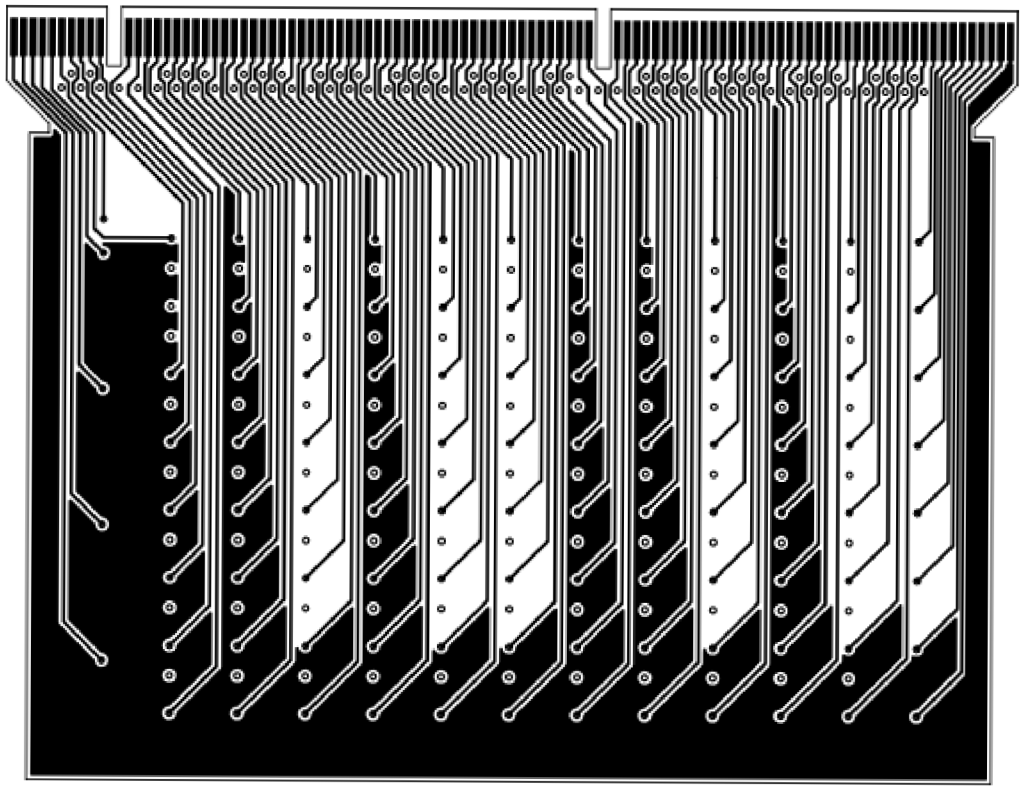
Příloha 14 - Horní strana DPS senzorového pole, pohled shora M1:1 (134 mm × 102,5 mm)



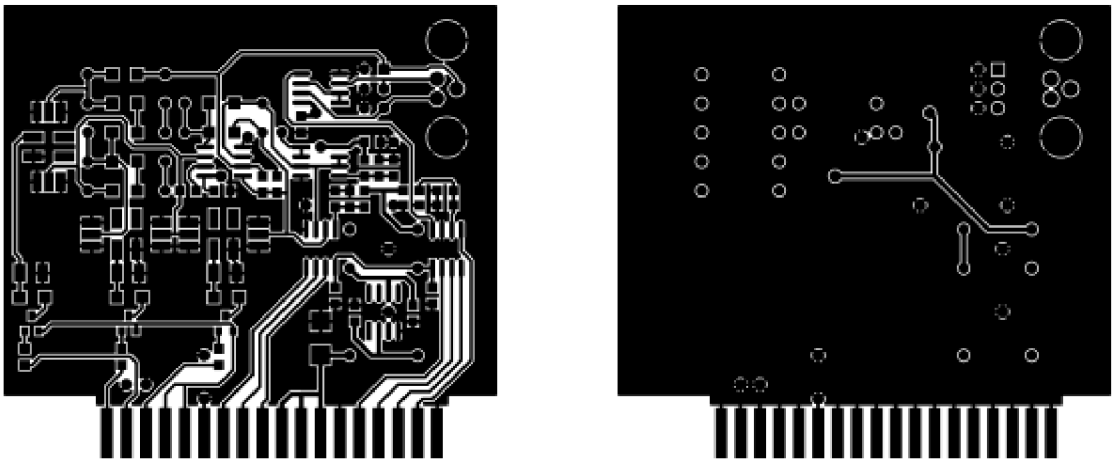
Příloha 15 - Horní vnitřní vrstva DPS senzorového pole, pohled shora M1:1



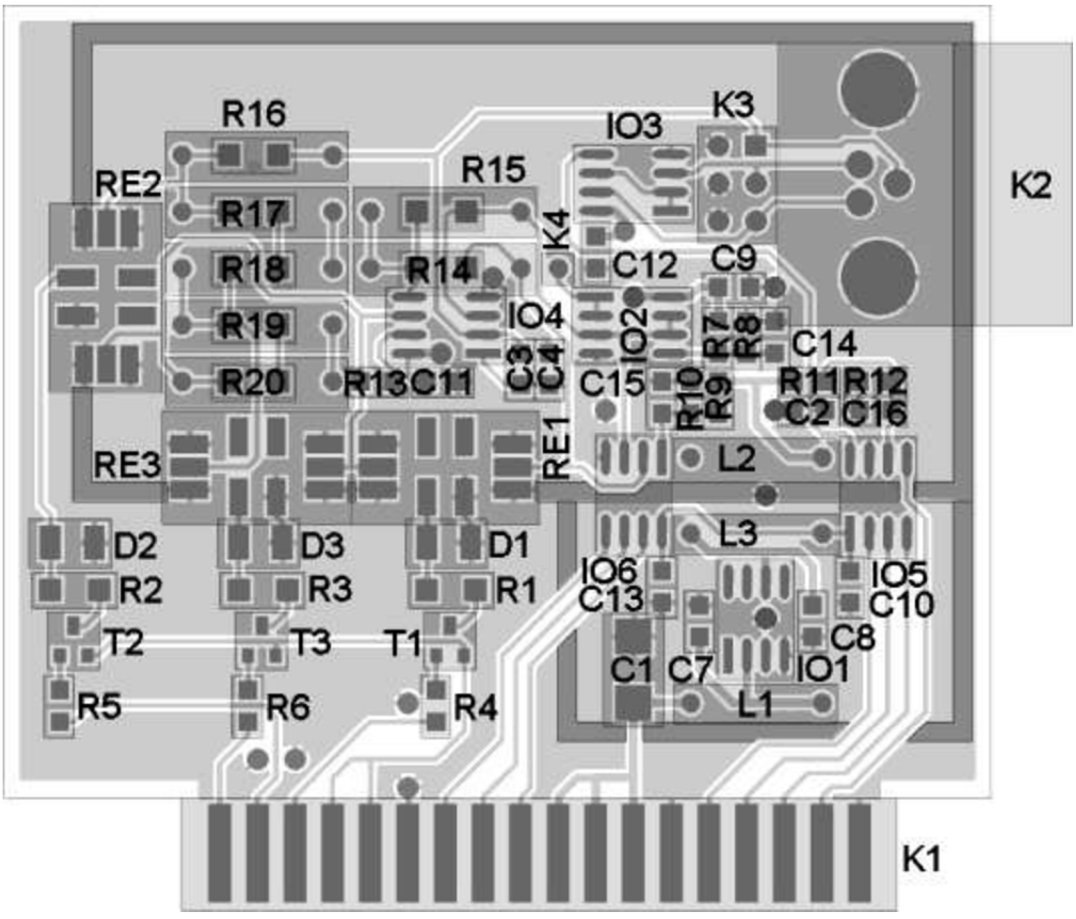
Příloha 16 - Dolní vnitřní vrstva DPS senzorového pole, pohled shora M1:1



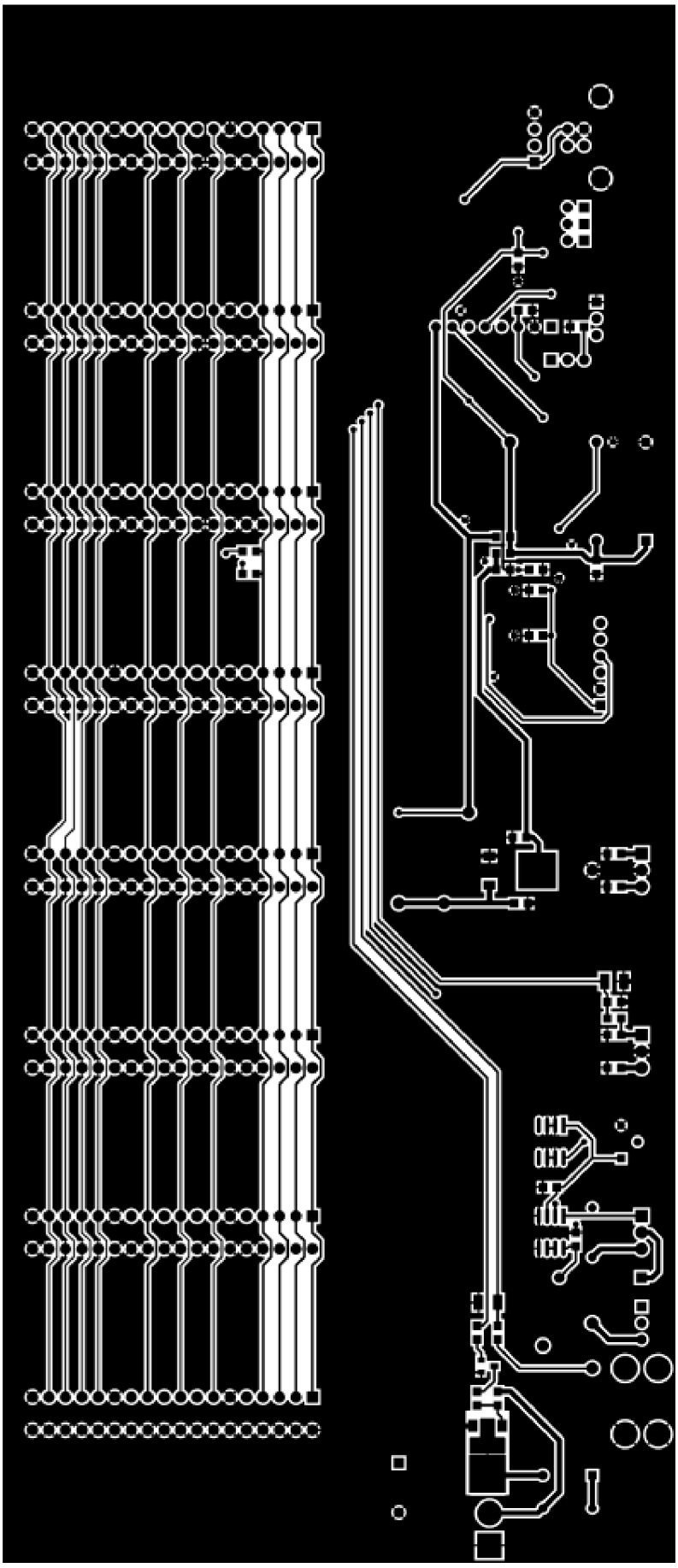
Příloha 17 – Spodní strana DPS senzorového pole, pohled shora M1:1



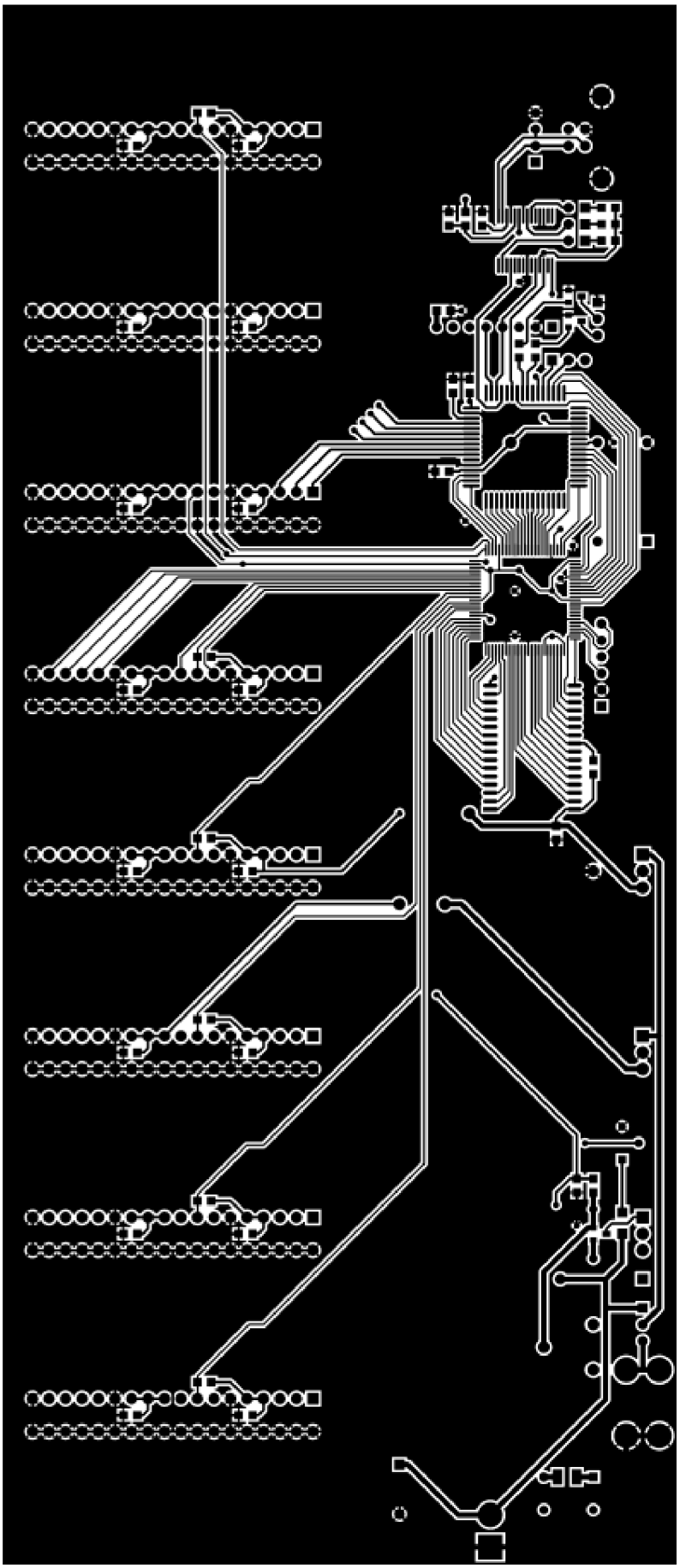
Příloha 18 - A) Horní a B) spodní strana DPS vstupního modulu, pohled shora M1:1 (66,5 mm × 60 mm)



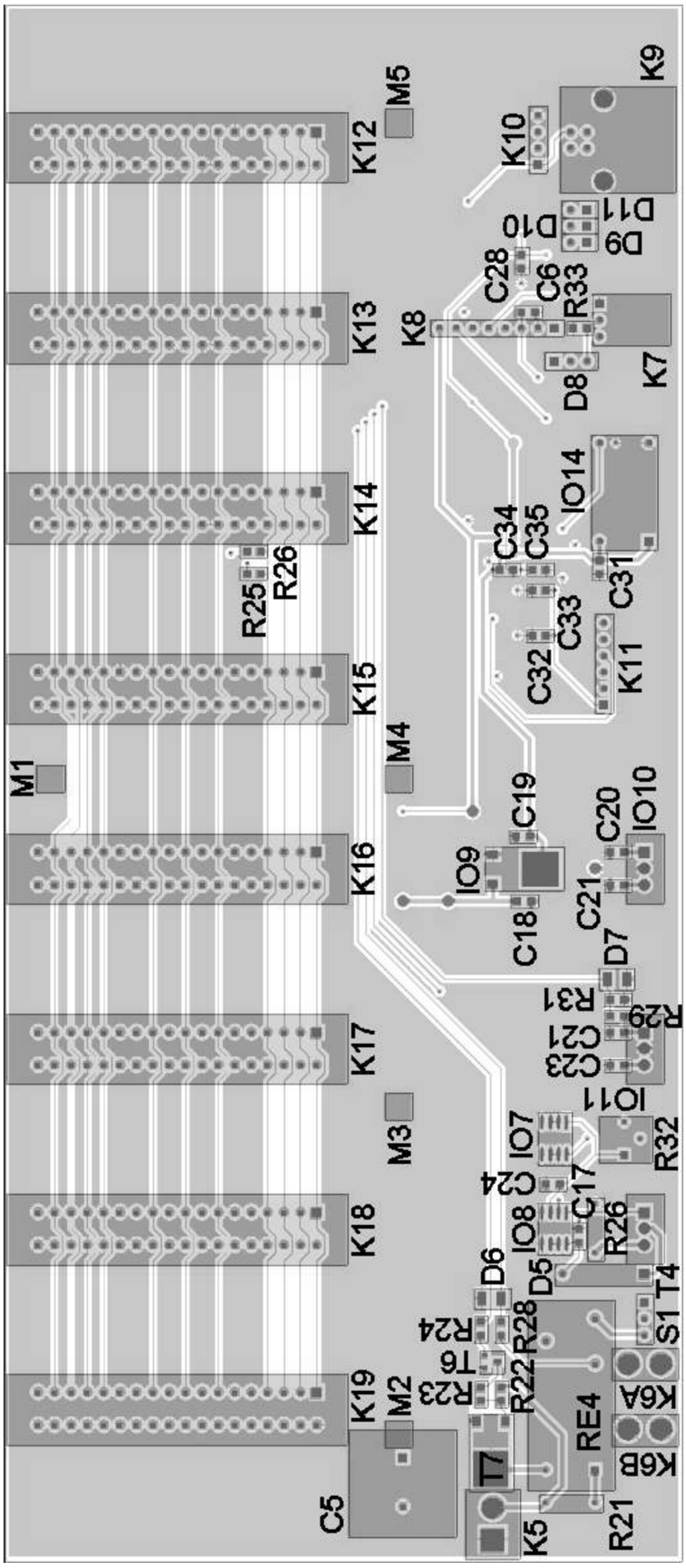
Příloha 19 – Rozmístění součástek na DPS vstupního modulu, pohled shora M2:1



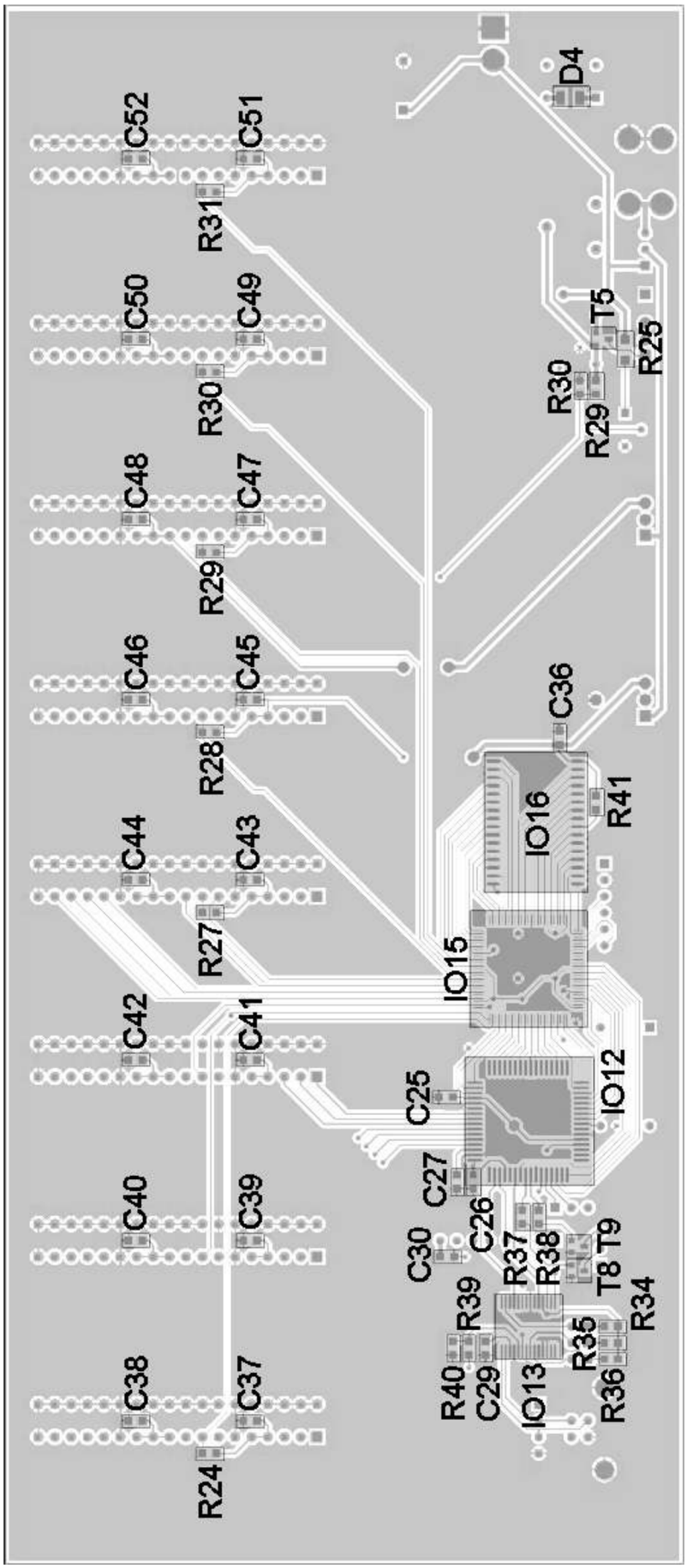
Příloha 20 – Horní strana DPS řídící části potenciostatu, pohled shora M1:1 (105 mm × 241 mm)



Příloha 21 – Spodní strana DPS řídící části potenciostatu, pohled shora M1:1



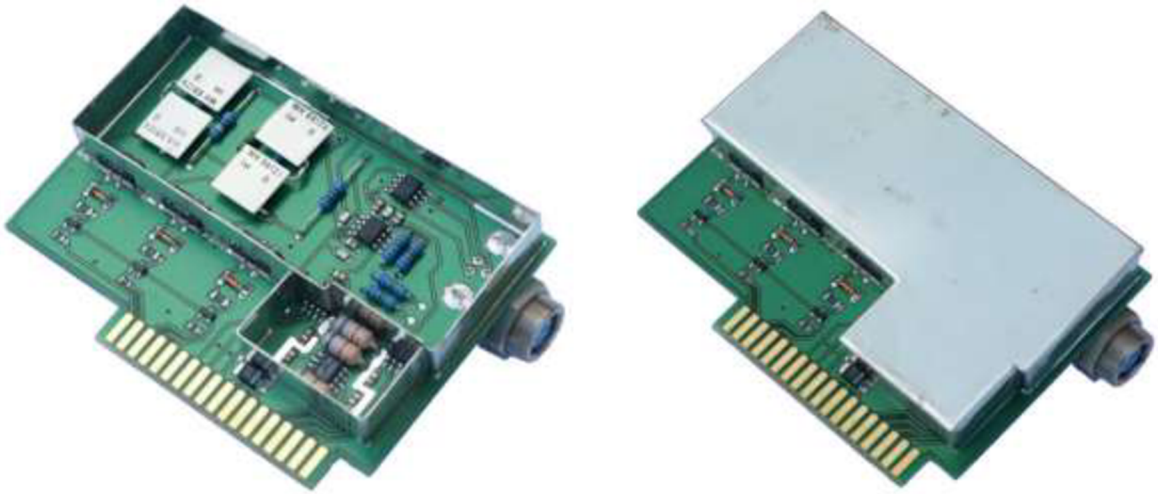
Příloha 22 – Rozmístění součástek DPS řídící části potenciostatu, horní strana shora M1:1



Příloha 23 – Rozmístění součástek DPS řídící části potenciostatu, spodní strana zdola M1:1

Součástka	Hodnota	Ks	Součástka	Hodnota	Ks
R1/R3	33R	3	T4	TIP120	1
R4/R11, R24, R28, R30, R32/R38	1k	18	T5, T6, T8, T9	BC846AL	4
			T7	IRFR220	1
R12	N. C.	1	IO1	LT1019/SO	1
R13	560R	1	IO2/IO4	MCP6V02	3
R14	200k	2	IO5	MCP4921	1
R15	22R	2	IO6	MCP3301	1
R16	200R	2	IO7	TL431/SO	1
R17	1k8	2	IO8	LM358/SO	1
R18	18k	2	IO9	LM1117-3.3/NP	1
R19	180k	2	IO10	7809	1
R20	1M8	2	IO11	7805	1
R21	270R	1	IO12	ATmega128-16AU	1
R22, R29, R31, R39	4k7	4	IO13	FT232RL	1
R23	12R	1	IO14	QO105BIC16MH	1
R40, R42/R49	10k	9	IO15	XC95144XL/FP100	1
R25	330R	1	IO16	628512	1
R26	1R5/0.5W	1	RE1/RE3	MEDER CRF03	3
R27, R41	2k2	2	RE4	RELEG5V2-12T	1
C1	22u/16V	1	K1	PCB CON 18x2	
C2	100p	1	K2	Triad 3p	1
C3, C4	10p	2	K3	Lámací lišta 6x2p	1
C5	1m/50V	1	K4	Test Point	
C6	22p	1	K5	ARK500/2	1
C7/C52	100n	46	K6B, K6A	Faston 6.3	2
L1/L3	3,9mH	3	K7	Dutinková lišta 3p	1
D1/D4	BAS32 SMD	4	K8	Lámací lišta 8p	1
D5	1N5818 SMD	1	K9	USB B, 90°, PCB	1
D6, D7	ZD 4V7 SMD	2	K10	Lámací lišta 4p	1
D8	LED 5mm R+G	1	K11	Lámací lišta 6p	1
D9/D11	LED 3mm	3	K12/K19	PCI SLOT 18x2	8
T1/T3	BC856AL	3	S1	Spínač ON/ON	1

Příloha 24 – Seznam použitých součástek řídícího i analogového modulu



Příloha 25 – Fotografie vstupního modulu s A) otevřeným a B) zavřeným stínícím krytem

Příloha 26 – Fotografie vnitřního uspořádání osmikanálového potenciostatu

Příloha 27 – Fotografie zadní strany osmikanálového potenciostatu

Příloha 28 – Fotografie osazených digitálních obvodů jednokanálového potenciostatu

Příloha 29 – Fotografie jednokanálového potenciostatu s analogovým modulem

Příloha 30 – Fotografie vnitřního uspořádání jednokanálového potenciostatu