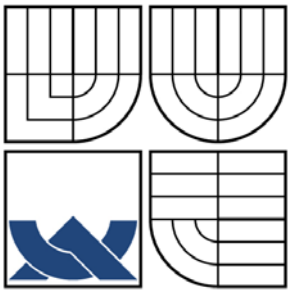
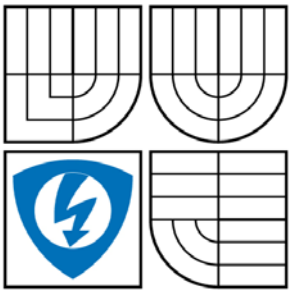


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

DETEKCE PŘÍTOMNOSTI OLOVA V PÁJKÁCH POUŽÍVANÝCH V ELEKTROTECHNICE

THE LEAD DETECTION IN SOLDERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

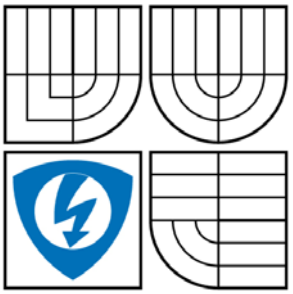
AUTOR PRÁCE — Bc. LADISLAV MACHÁŇ

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. MARTIN ADÁMEK, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student:	Macháň Ladislav Bc.	***ID:***	88506
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Detekce přítomnosti olova v pájkách používaných v elektrotechnice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se zakladními principy detekce těžkých kovů v roztocích a se základními druhy pájek. Ověřte základní princip kvalitativního stanovení olova pomocí tlustovrstvého elektrochemického senzoru. Použijte elektrochemickou metodu detekce zadanou vedoucím práce. Vytvořte jednoduchý přípravek pro stanovení olova v pájkách.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1) HASKARD, M.; PITT, K. Thick-film Technology and Applications. England: Electrochemical Publications LDT, 1997. ISBN 0 901150355.
2) SZENDIUCH, I. a kolektiv. Technologie elektronických obvodů a systémů. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2002. 239 stran. ISBN 80-214-2072-3.
3) RIEGER, P.H. Electrochemistry. New Persey: Prentice-Hall, Inc., 1987. ISBN 0 132 48907-4.
4] TOCKSTEIN, A. Elektrochemie (vybrané kapitoly). Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n.p., 1984. 120 s.

Termín zadání:	5.10.2007	***Termín odevzdání:***	26.5.2008

Vedoucí práce: Ing. Martin Adámek, Ph.D.

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práve 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Ladislav Macháň
Bytem: Kollárova 2030, 54701, Náchod
Narozen/a (datum a místo): 5.7.1984, Náchod

(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
Prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

(dále jen "nabyvatel")

Článek 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: Detekce přítomnosti olova v pájkách používaných v elektrotechnice
Vedoucí/školitel VŠKP: Ing. Martin Adámek, Ph.D.
Ústav: Ústav mikroelektroniky
Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☑ tištěné formě - počet exemplářů 1
- ☑ elektronické formě - počet exemplářů 1

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: .....

....

Nabyvatel Autor

Abstrakt:

Práce se zabývá problematikou detekce přítomnosti olova v pájkách používaných v elektrotechnice. Základním zaměřením práce je nastudování a ověření základních principů kvantitativního stanovení těžkých kovů pomocí elektrochemických metod, zvolení nejvhodnější metody pro detekci olova a konstrukce přístroje, který detekci umožní.

Abstract:

This work deals with issues of lead detection in solder irons used in electrotechnics. The general aim is to study principles of quantitative heavy metal detection by the electrochemical methods, optimal method selection and construction of detecting instrument.

Klíčová slova:

Elektrochemie, pájka, olovo, potenciostat, detekce.

Keywords:

Electrochemistry, solder iron, lead, potentiostat, detection.

Bibliografická citace díla:

MACHÁŇ, L. *Detekce přítomnosti olova v pájkách používaných v elektrotechnice.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Adámek, 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

…….

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Adámkovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci. Dále děkuji své rodině, která mě podporovala při realizaci práce a přítelkyni, která mě motivovala k lepším výsledkům a měla se mnou velikou trpělivost.

Vysoké učení technické v Brně | Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Autor:	Bc. Ladislav Macháň
Název závěrečné práce:	Detekce přítomnosti olova v pájkách používaných v elektrotechnice
Název závěrečné práce ENG:	The lead detection in solders
Anotace závěrečné práce:	Práce se zabývá problematikou detekce přítomnosti olova v pájkách používaných v elektrotechnice. Základním zaměřením práce je nastudování a ověření základních principů kvantitativního stanovení těžkých kovů pomocí elektrochemických metod, zvolení nejvhodnější metody pro detekci olova a konstrukce přístroje, který detekci umožní.
Anotace závěrečné práce ENG:	This work deals with issues of lead detection in solder irons used in electrotechnics. The general aim is to study principles of quantitative heavy metal detection by the electrochemical methods, optimal method selection and construction of detecting instrument.
Klíčová slova:	elektrochemie, pájka, olovo, potenciostat, detekce
Klíčová slova ENG:	electrochemistry, solder iron, lead, potentiostat, detection
Typ závěrečné práce:	diplomová práce
Datový formát elektronické verze:	pdf
Jazyk závěrečné práce:	čeština
Přidělovaný titul:	Ing.
Vedoucí závěrečné práce:	Ing. Martin Adámek, Ph.D.
Škola:	Vysoké učení technické v Brně
Fakulta:	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav / ateliér:	Ústav mikroelektroniky
Studijní program:	Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika
Studijní obor:	Mikroelektronika

OBSAH

1 ÚVOD 9
2 TEORETICKÁ ČÁST 10
2.1 Základní rozdělení elektrochemických metod 10
2.2 Vybrané elektrochemické metody 15
2.3 Princip funkce potenciostatu 16
2.4 Senzor 16
2.5 Vlastnosti pájek 17
3 KONSTRUKCE PŘÍSTROJE 20
3.1 Digitální část 21
3.1.1 Mikroprocesor ATmega32 22
3.1.2 Převodník A/D - ADS1211 firmy Texas Instruments 24
3.1.3 Převodník D/A – DAC7634 firmy Texas Instruments 25
3.1.4 Displej LCD EA DOGM 163 W - A 26
3.1.5 Externí paměť dat AT24C256 27
3.1.6 Sériové rozhraní USB (převodník FT232R) 28
3.1.7 Klávesnice 28
3.1.8 Relé 29
3.2 Analogová část 31
3.2.1 Butterworthův filtr 32
3.2.2 Výstupní zesilovač 33
3.2.3 Sledovač 34
3.2.4 Dolnofrekvenční propust 35
3.2.5 Úprava úrovně signálu 35
3.2.6 Převodník proudu na napětí 36
3.2.7 Zdroj referenčního napětí 37
3.3 Napájecí zdroj 37
3.4 Stínění 39
3.5 Mechanické provedení 40
3.6 Programové vybavení 41
4 LABORATORNÍ PRÁCE 43
4.1 Rozpouštěcí test 43
4.2 Měření vzorků pájek na komerčně vyráběné analytické stanici 45
4.3 Měření vzorků pájek na zkonstruovaném přístroji 51

5 ZÁVĚR 55
6 LITERATURA 56
7 SEZNAM OBRÁZKŮ 58
8 SEZNAM PŘÍLOH 60

1 ÚVOD

Detekce olova v pájkách je v současné době aktuálním tématem. Od 1. 7. 2006 platí zákaz používání pájek obsahující olovo. Zákaz vyplývá ze zákona o ochraně životního prostředí který projednala Evropská unie v únoru 2003 [5]. Analýze složení pájky se věnují akreditované zkušební laboratoře. Analýza ve zkušebních laboratořích je však mnohdy neúměrně drahá a malé firmy si ji buď nemohou dovolit, nebo tvoří nezanedbatelnou položku v jejich výrobních nákladech. Zajímavá je myšlenka navrhnout a zkonstruovat jednoúčelový přístroj, který umožní jednoznačnou detekci olova za zlomek ceny profesionální analýzy.

Cílem práce je prostudovat elektrochemické metody se zaměřením na možnost detekce přítomnosti olova v pájkách, pomocí vybraných metod provést měření a zkonstruovat jednoúčelový přístroj, který detekci umožní.

Řešení práce lze rozfázovat do několika dílčích kroků, které vedou k jejímu úspěšnému splnění. V první řadě je třeba analyzovat jednotlivé elektrochemické metody a rozhodnout o jejich vhodnosti pro dané měření. Rozhodujícími aspekty, které ovlivňují výběr metody jsou: možnost detekce olova danou metodou, citlivost detekce a složitost aplikace metody do konstruovaného přístroje. Výběru vhodné metody se věnuje kapitola 2, která obsahuje ucelený přehled elektrochemických metod a přehled základních druhů pájek používaných v elektrotechnice.

S výběrem elektrochemické metody úzce souvisí příprava detekčního roztoku a laboratorní měření. Vzorek pájky je před měřením třeba rozpustit ve vhodné kapalině, která detekci umožní. Přípravě detekčního roztoku se věnuje kapitola 3.1. Posouzení vhodnosti vybrané metody je prováděno na základě výsledků měření základního pracovního roztoku – „pufru“ a pracovního roztoku obsahujícím definované množství pájky. Elektrochemická metoda je pro detekci olova vhodná, pokud umožňuje jednoznačné rozlišení vzorku olovnaté pájky od vzorku pájky bezolovnaté. Důležitou roli zde hraje požadavek na dobrou opakovatelnost naměřených výsledků při konstantních měřících podmínkách. Směrodatná data jsou získána pomocí měření na komerčně vyráběné analytické stanici, kterému se věnuje kapitola 3.2.

Výsledkem předchozích kroků řešení je nalezení vhodného pracovního roztoku a měřící metody. Na základě naměřených hodnot a zvolené měřicí metody lze navrhnout a zkonstruovat jednoúčelový přístroj umožňující jednoznačnou detekci. Návrhu a konstrukci přístroje se věnuje kapitola 2. Výsledky naměřené pomocí přístroje jsou shrnuty v kapitole 3.3.

2 TEORETICKÁ ČÁST

Elektrochemie je jedním z odvětví fyzikální chemie. Elektrochemické metody sledují chování pracovního roztoku v závislosti na jeho složení a koncentraci. Elektrochemická aparatura se skládá z elektrodového systému - senzoru (dvouelektrodový, tříelektrodový), elektrochemického analytického přístroje a nádobky s pracovním roztokem (pufrem). Senzor je napojen na analytický přístroj. Aktivní část senzoru je ponořena do pracovního roztoku.

2.1 Základní rozdělení elektrochemických metod

Elektrochemické analytické metody dělíme na:

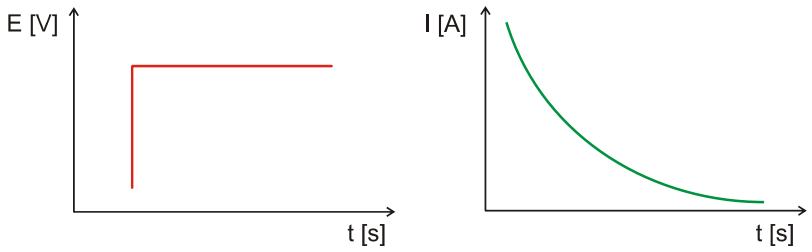
A. metody založené na elektrických vlastnostech roztoků:
   a) měření vodivosti – **konduktometrie**,
   b) měření kapacity – **dielektrimetrie**,

B. metody založené na elektrodovém ději:
   a) metody s nulovým elektrolytickým proudem – **potenciometrie**,
   b) metody s nenulovým elektrolytickým proudem:
      - koncentrace analytu se elektrolýzou téměř nemění – **voltametrie** (**polarografie**), **amperometrie**,
      - analyt je elektrolýzou kvantitativně přeměněn – **elektrogravimetrie**, **coulometrie**

Z hlediska kontrolované (vnucované) měřící veličiny lze metody rozdělit na:

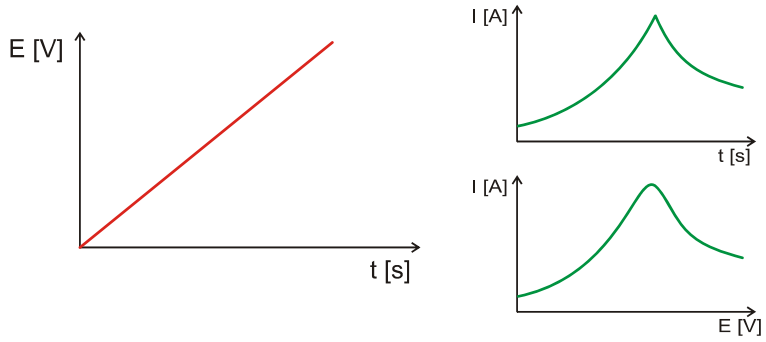
A. metody s vnucovaným napětím – na elektrody je připojeno definované napětí (potenciál) a je zaznamenáván proud procházející pracovní elektrodou:

   a) sledování proudové odezvy systému na skokovou změnu potenciálu – **chronoamperometrie**,



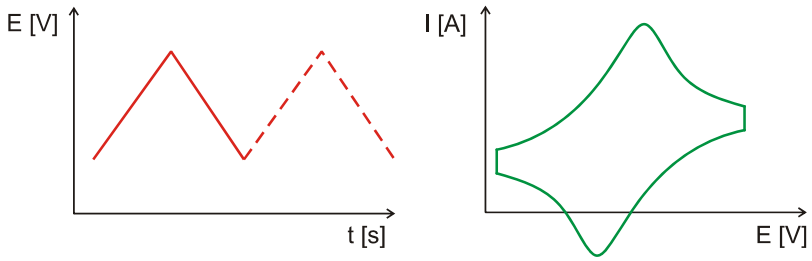
Obr. 1: *Chronoamperometrie*

b) sledování proudové odezvy systému na lineární změnu potenciálu – **potenciodynamická metoda** (**voltametrie**),



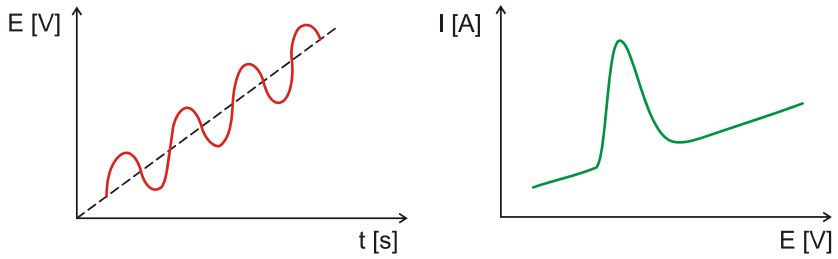
Obr. 2: *Potenciodynamická metoda*

c) sledování proudové odezvy systému na periodické opakování lineárního zvětšování a zmenšování potenciálu (pilový průběh) – **cyklická voltametrie**,



Obr. 3: *Cyklická voltametrie*

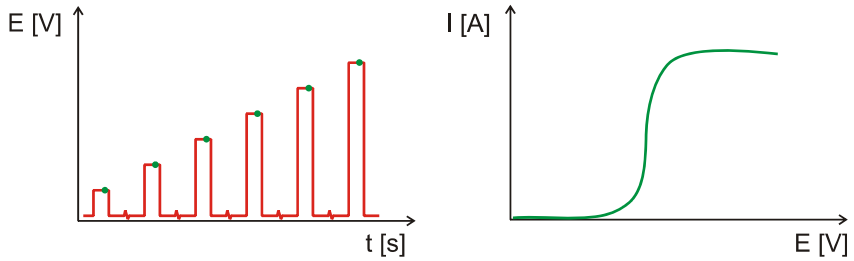
d) sledování proudové odezvy systému na lineární změnu potenciálu, na kterém je superponováno střídavé harmonické napětí s malou amplitudou – **A.C. polarografie**,



Obr. 4: *A.C. polarografie*

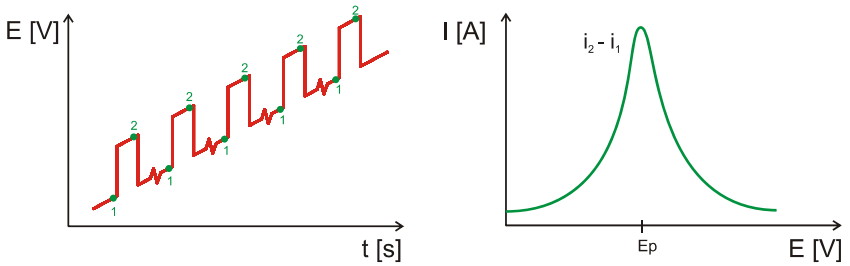
Pulzní metody [6],[7]:

e) sledování proudové odezvy systému na obdélníkové impulzy s lineárně rostoucí amplitudou (proud je měřen v zeleně označených bodech průběhu) – **pulzní polarografie**,



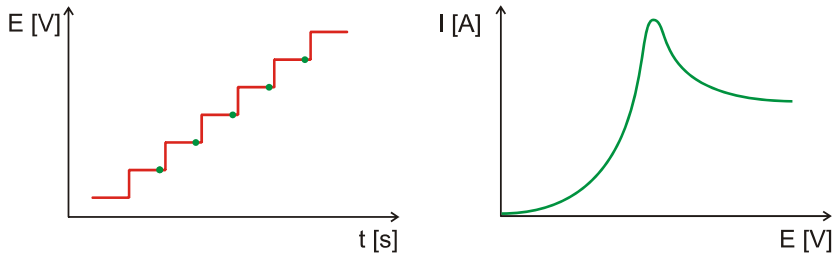
Obr. 5: *Pulzní polarografie (Normal pulse polarography)*

f) sledování proudové odezvy systému na obdélníkové impulsy superponované na lineárně rostoucí potenciál (proud je měřen v zeleně označených bodech průběhu) – **diferenciální pulzní polarografie**,



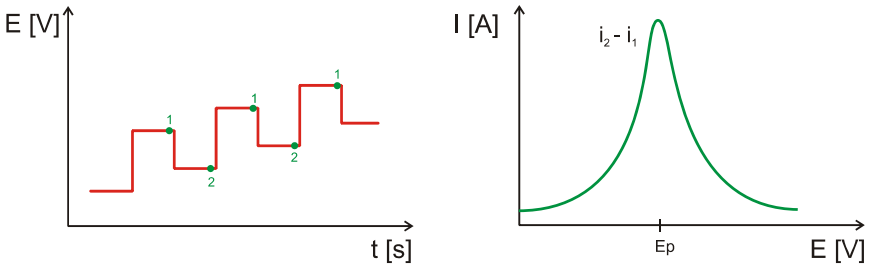
Obr. 6: *Diferenciální pulzní polarografie (Differential pulse polarography)*

g) sledování proudové odezvy systému na schodovitě rostoucí potenciál (proud je měřen v zeleně označených bodech průběhu) – **schodovitá voltametrie („staircase voltammetry“)**,



Obr. 7: *Schodovitá voltametrie (Staircase voltametry)*

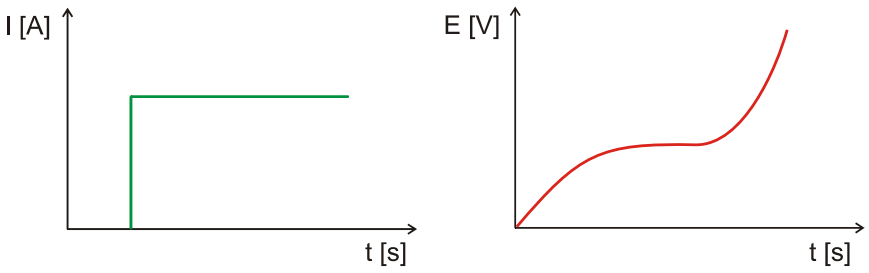
h) sledování proudové odezvy na lineárně rostoucí obdélníkový signál se stálou amplitudou (proud je měřen v zeleně označených bodech průběhu) – **„square-wave voltametrie“**,



Obr. 8: *„Square-wave“ voltametrie*

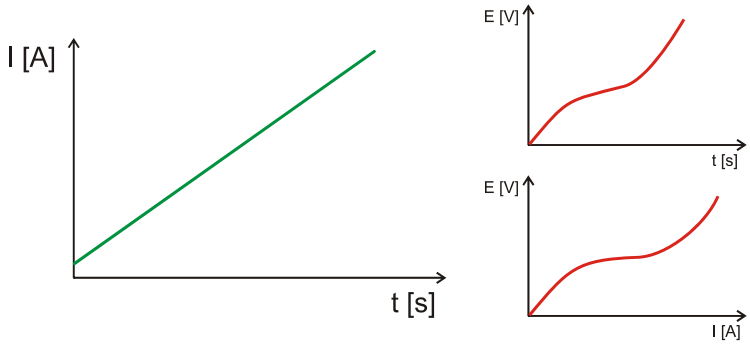
B. metody s vnucovaným proudem – elektrodami prochází definovaný proud, zaznamenáváme napětí (potenciál) mezi pracovní a referenční elektrodou:

a) sledování potenciálové odezvy na skokovou změnu proudu – **galvanostatická chronopotenciometrie**,



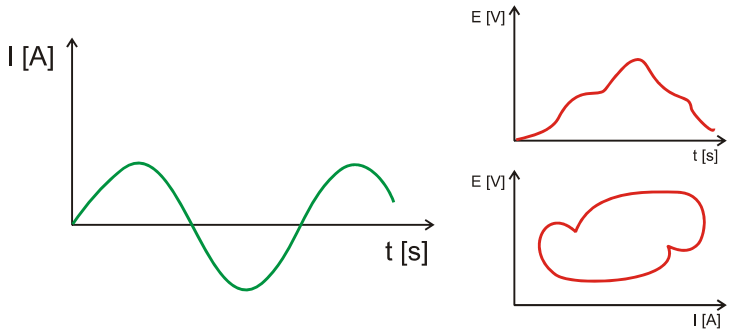
Obr. 9: *Galvanostatická chronopotenciometrie*

b) sledování potenciálové odezvy na lineární změnu proudu – **lineární (dynamická) chronopotenciometrie**,



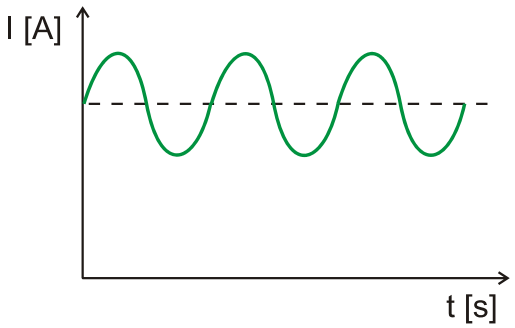
Obr. 10: *Lineární (dynamická) chronopotenciometrie*

c) sledování potenciálové odezvy na periodickou změnu proudu – **oscilografická polarografie**,



Obr. 11: *Oscilografická polarografie*

d) sledování potenciálové odezvy systému na střídavý harmonický signál s malou amplitudou a konstantním offsetem – **A.C. chronopotenciometrie**.



Obr. 12: *A.C. chronopotenciometrie*

2.2 Vybrané elektrochemické metody

Pro měření vzorků olovnatých a bezolovnatých pájek byly vybrány metody: cyklická voltametrie, „square-wave“ voltametrie a diferenciální pulzní voltametrie. U jmenovaných metod lze předpokládat dobrou citlivost a snadnou realizovatelnost v analogově – digitálním systému.

Cyklická voltametrie

Metoda cyklické voltametrie využívá cyklického zvyšování a snižování potenciálu viz obr. 3. Sledována je proudová odezva roztoku na změnu potenciálu. Cyklická voltametrie patří mezi základní měřící metody a je velmi snadné ji aplikovat. Její nevýhodou je menší citlivost. Citlivost je možné zvýšit použitím tzv. „akumulace“, kdy je nejprve po určitou dobu na elektrody senzoru přivedena konstantní velikost potenciálu a dochází k přitahování iontů kovů k elektrodě. Po uplynutí nastavené doby se spustí měření s pohybem potenciálu. Zvýšená koncentrace iontů u elektrody způsobí zesílení proudové vlny daného kovu. Pozice proudové vlny udává tzv. „půlvlnný potenciál“. Pozice těchto potenciálů jsou specifické pro každý obsažený prvek. Velikost vlny je úměrná koncentraci prvku. S rostoucí koncentrací prvku roste velikost vlny.

Square-wave voltametrie

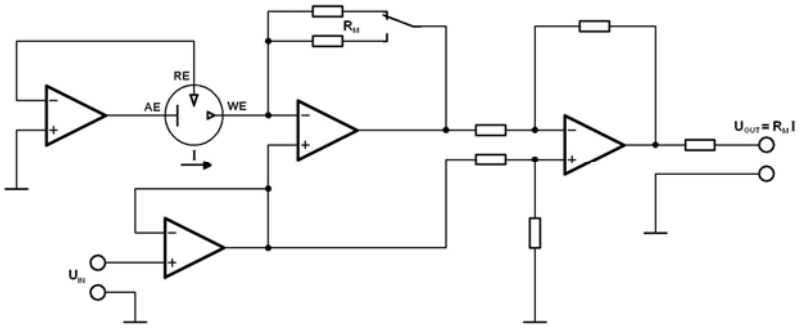
Square-wave voltametrie patří k pulzním metodám. Pulzní metody obecně mají vyšší citlivost než metody s plynulou změnou potenciálu. Výhodou pulzních metod je jejich snadná realizace pomocí digitálně řízeného systému. Při square-wave voltametrii je potenciál měněn skokově, jak je naznačeno na obr. 8. Princip detekce proudové odezvy spočívá v určení rozdílu hodnot proudů i_1 a i_2. Proudy jsou vždy měřeny v ustáleném stavu těsně před skokovou změnou potenciálu. Výsledná závislost je sestavena jako závislost rozdílu jmenovaných proudů na odpovídající velikost potenciálu.

Diferenciální pulzní voltametrie (polarografie)

Diferenciální pulzní voltametrie patří rovněž k pulzním metodám. Citlivost metody je obecně vyšší, než u square-wave voltametrie. Cenou za zvýšení citlivosti je problematičtější generování potenciálového průběhu pomocí digitálně řízeného systému – skokové impulsy potenciálu jsou namodulovány na lineárně rostoucí potenciál viz obr. 6. Princip detekce využívá rozdílu hodnot proudů i_1 a i_2, které jsou měřeny za ustáleného stavu. Výsledná závislost zobrazuje závislost rozdílu proudů na odpovídající velikosti potenciálu.

2.3 Princip funkce potenciostatu

Potenciostat je zařízení, které řídí potenciál pomocné elektrody – AE dle zvolené měřící metody. Potenciál, který je prostřednictvím zpětné vazby z referenční elektrody – RE nezávislý na proudu protékajícím roztokem způsobí změny, které jsou detekovány prostřednictvím pracovní elektrody – WE. Pracovní elektroda snímá proud protékající roztokem, aniž by ovlivnila jeho velikost. Na obr. 13 je schéma zapojení jednoduchého potenciostatu.



Obr. 13: *Schéma zapojení jednoduchého potenciostatu*

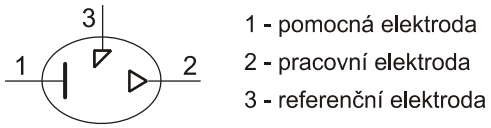
Potenciál pracovní a referenční elektrody je udržován na stejné úrovni pomocí záporné zpětné vazby operačního zesilovače. Změny proudu snímané pracovní elektrodou jsou převáděny na změnu napětí pomocí převodníku I/U s přepínatelným ziskem, který je realizován rovněž pomocí operačního zesilovače. Výstupní napětí převodníku je porovnáno se vstupním řídicím napětím a jejich rozdíl je zesílen pomocí rozdílového zesilovače.

2.4 Senzor

Senzor je vyroben pomocí technologie tlustých vrstev [1], [5]. Technologie tlustých vrstev spočívá v nevakuovém nanášení funkčních vrstev na keramický nosný substrát a následném vysokoteplotním nevakuovém výpalu. Funkční vrstvy jsou nanášeny v podobě pasty nejčastěji pomocí sítotisku. Pro nanášení jednodušších motivů lze použít i šablonový tisk. Nosný substrát je vyroben z korundové keramiky (Al_2O_3). Použitý materiál vyniká svými dielektrickými vlastnostmi a velice dobrou tepelnou vodivostí. Zároveň zajišťuje dobré navázání vypalovaných vrstev. Tím je zajištěna dlouhodobá stabilita elektrických a mechanických parametrů funkčních vrstev. Pasty pro technologii tlustých vrstev jsou složeny ze tří složek. Jsou to složka funkční, tavivová a pojivová. Funkční složka určuje elektrické vlastnosti pasty. Tavivová složka v sobě váže částice funkční složky a je tvořena skleněnou fritou. Jsou použita nízkotavná skla s teplotou měknutí již od 600°C. Pojivová složka zajišťuje

tiskové vlastnosti pasty, především její viskozitu. Je tvořena organickými látkami (terpineol). V průběhu výpalu pasty se pojivová složka odpaří a nepodílí se na funkčnosti vypálené vrstvy.

Použitý senzor lze zařadit do kategorie pevných senzorů. Obsahuje tři elektrody – pracovní, referenční a pomocnou. Schematické znázornění senzoru je na obr. 14, jeho reálná podoba je zobrazena na obr. 15.



Obr. 14: *Schematické znázornění senzoru*

Obr. 15: *Reálná podoba senzoru*

2.5 Vlastnosti pájek

Během procesu pájení dochází k metalurgickému spojení kovových částí pomocí roztavené pájky. V elektrotechnice se používají výhradně pájecí slitiny pro tzv. „měkké“ pájení (teplota pájení do 450°C). Při pájení probíhá difúze atomů pájky a spojovaného materiálu. Atomy kovů se dostávají do velmi malých vzdáleností vlivem působení soudržných a přilnavých sil. Při pájení součástek je třeba dosáhnout mechanicky pevné a dlouhodobě spolehlivé spojení vývodů součástky s povrchem pájecí plošky desky plošných spojů (DPS). Pájený spoj zajišťuje mechanickou fixaci, vodivé propojení vývodů součástky s povrchem pájecí plošky, odvod ztrátového tepla a plní funkci povrchové úpravy [22].

Při detekci výskytu olova v neznámé slitině je důležité znát složení vyráběných pájecích slitin. Každý kov obsažený ve slitině bude svým způsobem ovlivňovat výsledek měření. Základním prvkem tvořícím pájku je cín (Sn) nebo bismut (Bi), další prvky obsažené ve slitině se nazývají příměsi. Příměsi lze rozdělit na žádoucí a nežádoucí. Žádoucí příměsi ovlivňují požadovaným způsobem vlastnosti pájecí slitiny a jsou přidávány záměrně. Lze jimi ovlivňovat teplotu tavení, smáčecí charakteristiky, mechanickou pevnost, atd. [22]. Nežádoucí příměsi se nazývají nečistoty. Ty se do pájky dostanou během jejího výrobního procesu nebo při samotném pájení. Znečištění je způsobené nedokonalou čistotou výchozích surovin a kontaktem roztavené slitiny s kovovými povrchy.

Vyráběné slitiny pájek lze rozdělit na pájky obsahující olovo – „olovnaté“ a pájky, které olovo neobsahují – „bezolovnaté“. Standardní typy pájecích slitin jsou shrnuty v tabulce 1, [22], [1], [8].

Tab. 1: *Standardní typy pájecích slitin*

Olovnaté pájky

Slitina	Poměr prvků (hmotnostní %)	Teplota tavení
Sn-Pb	Sn 63%, Pb 37%	183°C
Sn-Pb-Cu	Sn 62%, Pb 37%, Cu 1%	183°C
Sn-Pb-Ag	Sn 62,5%, Pb 36%, Ag 1,5%	179°C

Bezolovnaté pájky

Slitina	Poměr prvků (hmotnostní %)	Teplota tavení
Sn-Bi	Sn 42%, Bi 58%	138°C
Sn-In	Sn 48%, In 52%	118°C
Bi-In	Bi 66%, In 33%	109°C
Sn-Zn	Sn 91%, Zn 9%	199°C
Sn-Ag	Sn 96,5%, Ag 3,5%	221°C
Sn-Cu	Sn 99,3%, Cu 0,7%	227°C
Sn-Ag-Bi	Sn 3,5%, Ag 3%, Bi 93,5%	206 - 213°C
Sn-Ag-Cu (SAC)	Sn 95,5%, Ag 3,8%, Cu 0,7%	217°C
Sn-Ag-Cu-Sb	Sn 96,7%, Ag 2%, Cu 0,8%, Sb 0,5%	216 - 222°C

Ve standardních slitinách se vyskytuje v největším zastoupení cín (Sn), olovo (Pb), bismut (Bi), stříbro (Ag), měď (Cu) a antimon (Sb), ve speciálních pájkách zinek (Zn), indium (In), nikl (Ni) a další. Pájecí slitinu znečišťují (kontaminují) nejčastěji tyto nežádoucí příměsi:

- **arsen** (As) – nerozpustný v tuhé fázi Sn nebo Pb, v mikrostruktuře tvoří dlouhé jehlice a způsobuje nesmáčivost,
- **kadmium** (Cd) – zanedbatelná rozpustnost v tuhé fázi Sn nebo Pb, toxické, podporuje oxidaci povrchu pájky,
- **železo** (Fe) – nerozpustné v tuhé fázi Sn nebo Pb, způsobuje křehkost, zrnitost,
- **hliník** (Al) – zhoršení adheze pájky, větší viskozita pájky, křehkost, podporuje oxidaci povrchu pájky,
- **mangan** (Mg) – zhoršení adheze pájky, větší viskozita pájky, křehkost, podporuje oxidaci povrchu pájky,
- **zlato** (Au) – nerozpustné v tuhé fázi Sn nebo Pb, způsobuje zrnitost a důlky v povrchu, křehkost,
- **síra** (S) – vytváří ve slitině nežádoucí sulfidy, škodí i ve velmi malém množství,
- **fosfor** (P) – způsobuje nesmáčivost.

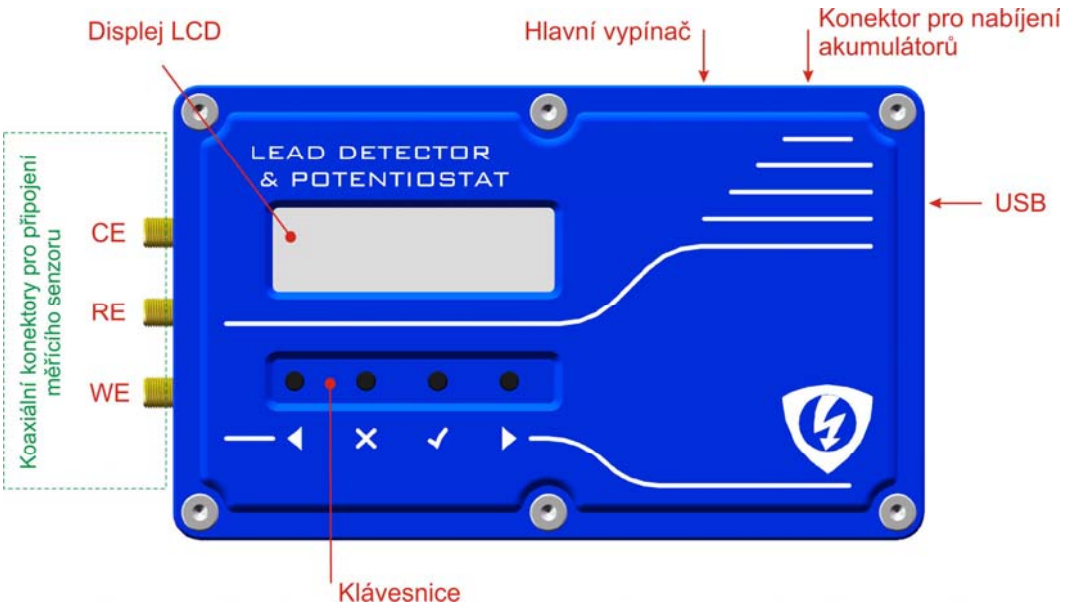
Tab. 2: *Vybrané vlastnosti prvků obsažených v pájecích slitinách (zelená –žádoucí, červená – nežádoucí)*

Prvek	Název	Atomové č.	Atomová hmotnost [g·mol$^{?1}$]	Hustota [g·cm^{-3}]	Teplota tání [°C]	Teplota varu [°C]	Tepelná vodivost [W·m$^{?1}$·K$^{?1}$] při 300K	Tvrdost (Mohs)
Cu	Měď	29	63,546	8,96	1084,62	2562	401	3
Zn	Zinek	30	65,409	7,14	419,53	907	116	2,5
Ag	Stříbro	47	107,8682	10,49	961,78	2162	429	2,5
In	Indium	49	114,818	7,31	156,6	2072	81,8	1,2
Sn	Cín	50	118,71	7,26	231,93	2602	66,8	1,5
Sb	Antimon	51	121,76	6,697	630,63	1587	24,4	3
Pb	Olovo	82	207,2	11,34	327,5	1749	35,3	1,5
Bi	Bismut	83	208,9804	9,78	271,5	1564	7,97	2,25
Al	Hliník	13	26,9815	2,7	660,32	2519	237	2,75
Fe	Železo	26	55,845	7,86	1538	2862	80,4	4
P	Fosfor	15	30,97376	1,823	44,2	227	0,236	5
S	Síra	16	32,065	2,07	115,21	444,6	0,205	2
Mn	Mangan	25	54,938	7,21	1246	2061	7,81	6
As	Arsen	33	74,9216	5,727	817 (2,8 MPa)	614	50,2	3,5
Pd	Paládium	46	106,42	12,023	1554,9	2963	71,8	4,75
Cd	Kadmium	48	112,411	8,65	321,07	767	96,6	2
Au	Zlato	79	196,9665	19,3	1064,18	2856	318	2,5

3 KONSTRUKCE PŘÍSTROJE

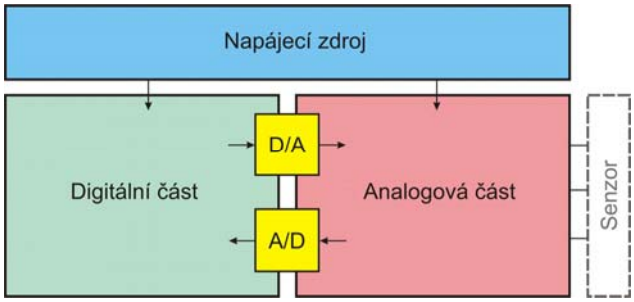
Jedním z cílů práce je navrhnout a sestavit přístroj umožňující detekci olova v pracovním roztoku pomocí vybrané elektrochemické metody. Za tímto účelem byl navržen a sestaven jednoduchý potenciostat. Potenciostat je přístroj, který řídí potenciál v elektrodovém systému nezávisle na protékajícím proudu viz. kap. 2.3.

Přístroj je řešený jako přenosný s vlastním akumulátorovým napájením. Vzhledem k nárokům na mechanickou odolnost přenosných přístrojů byl potenciostat opatřen duralovým konstrukčním rámem. Rám chrání přístroj proti mechanickému poškození a proti pronikání prachu, nečistot a vlhkosti k elektronice. Je spojen s elektrickou zemí a zajišťuje elektromagnetické stínění proti pronikání rušení do citlivých obvodů analogové části přístroje viz. kap. 3.4.



Obr. 16: *Rozmístění prvků*

Blokové schéma přístroje lze rozdělit na tři základní části – digitální část, analogovou část a napájecí zdroj (obr. 17). Digitální část obstarává interakci přístroje s obsluhou, řízení analogové části dle nastavených parametrů měření a sběr naměřených dat. Analogová část upravuje úrovně signálů tak, aby je bylo možné zpracovávat pomocí převodníků, které jsou řízeny digitální částí. Napájecí zdroj upravuje napětí z napájecích akumulátorů na požadované úrovně. Pro napájení přístroje byly zvoleny akumulátory Li – Ion, které vynikají výborným poměrem kapacita / velikost. Díky tomu může mít přístroj kompaktní rozměry.

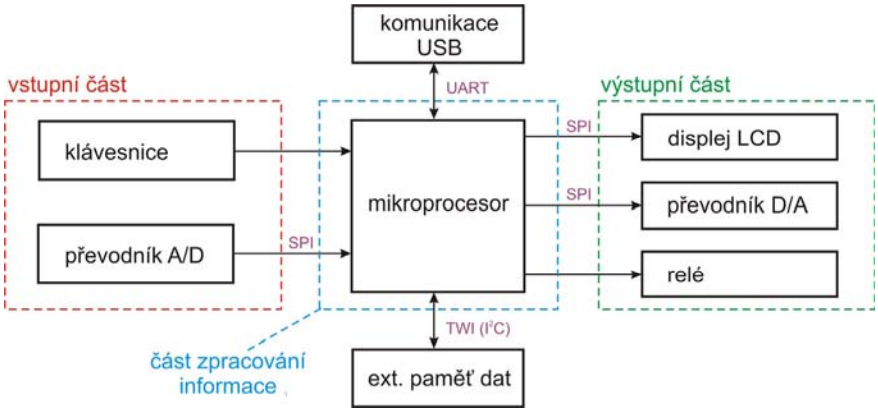


Obr. 17: *Blokové schéma přístroje*

3.1 Digitální část

Funkci digitální části ilustruje její blokové schéma, viz. obr. 18. Blokové schéma lze rozdělit na tři hlavní části. Jsou to část vstupní, část zpracování informace a část výstupní. Rozdělení sleduje tok informace zařízením. Vstupní část sdružuje bloky, které jsou zdroji informace. Informace přechází do druhé části, kde je zpracována mikroprocesorem. Výstupní část na základě povelů druhé části nastaví požadované úrovně. Pomocí popsané topologie lze realizovat regulační smyčku, která pomocí programu reaguje na změny sledované veličiny v měřeném systému a nastavuje pomocí výstupních komponent parametry akčních členů, které zpětně ovlivňují měřený systém. Prostřednictvím této smyčky je možno například u dynamického děje nastavovat velikost vstupního napětí a sledovat odezvu proudu.

Blokové schéma dále obsahuje blok komunikační a externí paměť dat. Komunikační blok slouží k přenosu informace mezi řídící částí a nadřazeným systémem (PC). V počítači mohou být data pohodlně zpracována nebo sdílena s dalšími uživateli. Externí paměť dat slouží k uložení naměřených hodnot.



Obr. 18: *Blokové schéma digitální části přístroje*

3.1.1 Mikroprocesor ATmega32

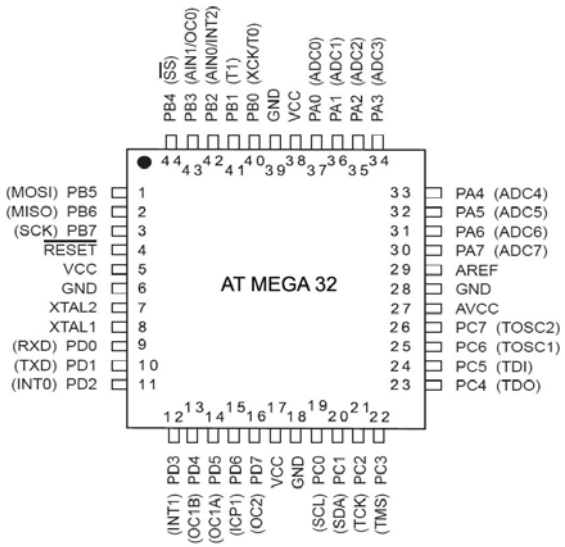
Pro navrhovaný přístroj byl jako řídicí procesor vybrán mikroprocesor ATmega 32 firmy ATMEL [9]. ATmega32 je osmibitový procesor s architekturou RISC, která je optimalizována pro programování ve vyšším programovacím jazyku. Instrukční sada mikroprocesoru obsahuje 131 instrukcí. Většinu těchto instrukcí je mikroprocesor schopen vykonat během jediného strojového cyklu. V ideálním případě tak lze dosáhnout při maximální frekvenci oscilátoru 16 MHz výpočetního výkonu 16 MIPS (*million instructions per second*).

Mikroprocesor je vybaven 32kB pamětí programu. Paměť je typu Flash a je programovatelná nejen pomocí programátoru, ale lze ji programovat přímo prostřednictvím programu samotného mikroprocesoru (*in-system self-programmable flash*). Velikost paměti poskytuje velkou rezervu při vývoji řídícího programu.

Paměť dat je typu EEPROM (*electrically erasable programmable read-only memory*) a má velikost 1kB. Pro efektivní práci s registry při početních operacích je mikroprocesor vybaven pamětí SRAM o velikosti 2kB.

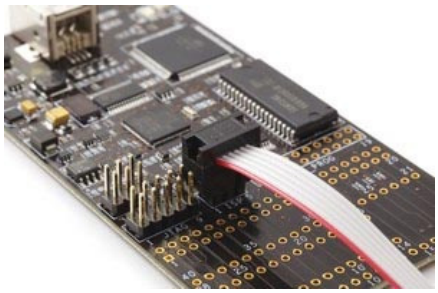
Mikroprocesor v sobě integruje tyto periferie:

a) dva osmibitové časovače / čítače
b) jeden šestnáctibitový časovač / čítač
c) zdroj reálného času s odděleným oscilátorem
d) čtyři kanály pulzně šířkové modulace PWM (*pulse width modulation*)
e) osmikanálový desetibitový převodník A / D
f) analogový komparátor
g) sériové rozhraní TWI (I^2C)
h) sériové rozhraní SPI (*master mode, slave mode*)
i) sériové rozhraní USART
j) programovatelný časovač *„Watchdog“*



Obr. 19: *Mikroprocesor ATmega 32 firmy Atmel [9]*

Velkou výhodou použitého typu mikroprocesoru je možnost jeho programování a ladění v koncové aplikaci (*in-system programming, debugging*) prostřednictvím rozhraní JTAG. Na programování a ladění řídícího programu je použit vývojový nástroj AVR Dragon firmy Atmel. Lze jej připojit k počítači prostřednictvím sériové sběrnice USB, ze které je zároveň napájen. AVR Dragon spolupracuje s vývojovým prostředím AVR Studio 4. V tomto prostředí lze vyvíjet řídící program od psaní zdrojového kódu přes jeho odladění až po přenesení programu do mikroprocesoru. AVR Studio představuje komplexní vývojový nástroj.



Obr. 20: *AVR Dragon – připojení sběrnice JTAG [9]*

Převodník A/D

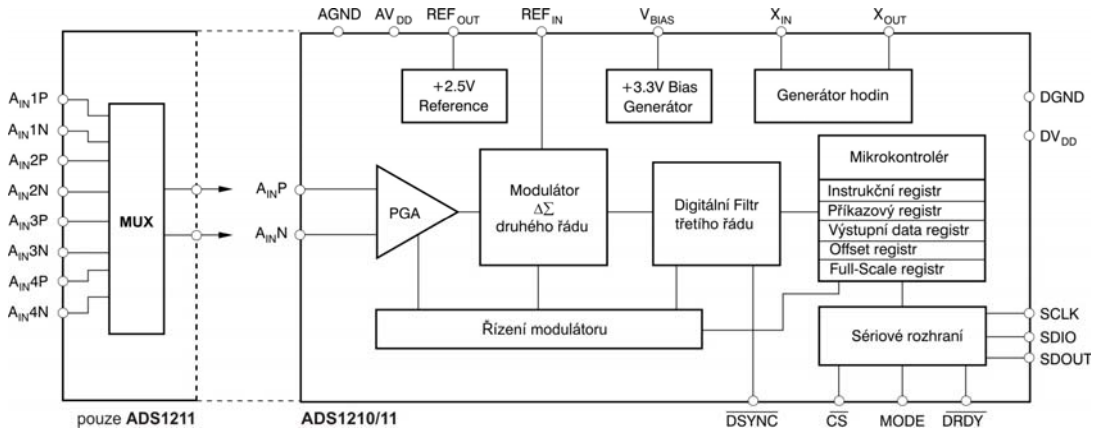
Převodník A/D nabízí rozlišení 10 bitů. Pomocí 10-ti bitů lze rozlišit 1024 (2^{10}) hodnot. Pro přivedení měřeného napětí na vstup převodníku slouží 8 vstupních kanálů, které jsou multiplexovány. To znamená, že v jednom okamžiku převodník měří hodnotu jednoho vstupu. Výběr konkrétního vstupu se provádí zápisem do registru ADMUX. Při použití tohoto režimu je dolní měřená úroveň určena napětím GND (0V). Lze využít i režimu, ve kterém jsou vstupní kanály diferenciální. V tomto případě lze použít 7 vstupních kanálů. Pro některé aplikace, kde je úroveň měřeného napětí nízká, lze použít režimu s nastavitelným vstupním zesílením. Zesílení se dá volit buď 10x nebo 200x. V tomto režimu lze využít pouze dva vstupní diferenciální kanály. Rozsah dovolených vstupních napětí je od 0 V do napájecího napětí mikroprocesoru (Vcc).

Převodník nabízí několik režimů převodu. Jedním je volně běžící režim (*free running mode*), ve kterém je hodnota vstupního napětí měřena v periodických intervalech. Výsledek měření vždy aktualizuje obsah registrů ADCH a ADCL, jejichž složením vznikne výsledná hodnota. Dalším režimem je režim jednorázového převodu (*single conversion mode*). Počátek převodu může být vyvolán automaticky pomocí nastavitelného zdroje přerušení (externí, časovač/čítač, analogový komparátor). Přerušení lze vyvolat i dokončením převodu. Čas potřebný k převodu leží v rozmezí 13 až 260 μs. Závisí na frekvenci oscilátoru mikroprocesoru a nastavené hodnotě děličky převodníku. Pomocí děličky lze nastavit kompromis mezi rychlostí převodu a požadovanou přesností výsledku.

Absolutní přesnost měření je ±2 LSB (*low significant bit*). Integrální nelinearita dosahuje velikosti maximálně 0,5 LSB. Jako zdroj referenčního napětí pro převodník lze použít vnitřní napěťovou referenci o velikosti 2,56 V. Na vstup mikroprocesoru AREF lze přivést napětí z vnější reference.

3.1.2 Převodník A/D - ADS1211 firmy Texas Instruments

Převodník ADS1211 je typu „sigma – delta“ (Σ - Δ) [13]. Sigma – delta převodníky na svém vstupu obsahují modulátor, který měřený signál diskretizuje. Výstupem modulátoru je datový tok (např. jednobitový), který vstupuje do digitálního filtru a decimátoru. Ten z datového toku vybere užitečný signál a převede ho do digitálního slova. Velkou výhodou tohoto převodu je odstranění šumových složek signálu. Díky odstranění šumu lze dosáhnout vysokých rozlišení převodníku. Použitý typ převodníku má maximální rozlišení 23 bitů (8388608 hodnot).



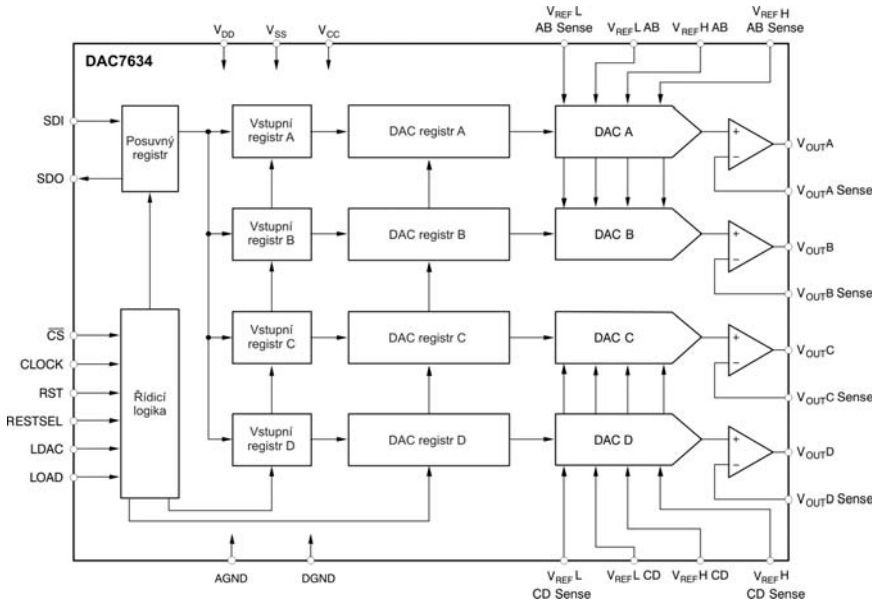
Obr. 21: *Blokové schéma převodníku A/D - ADS1211*

Nevýhodou tohoto převodníku je relativně pomalý převod. Rychlost převodu závisí na efektivním rozlišení převodníku. Pokud je potřeba použít větší vzorkovací kmitočet, je nutné snížit rozlišení. Při maximálním rozlišení 23 bitů zvládne převodník max. vzorkovací kmitočet 10 Hz. Pokud je rozlišení sníženo na 20 bitů, vzorkovací kmitočet stoupne na 1 kHz. Použitý převodník má čtyři nezávislé vstupy, které jsou řídící jednotkou přepínány (multiplexovány). V jeden okamžik tedy lze měřit pouze na jednom vstupu. Chyba převodu způsobená nelinearitou převodníku dosahuje max. 0,0015 % z měřícího rozsahu. Chyba způsobená teplotním driftem a teplotním posunem převodní charakteristiky činí max. 1 μV / °C.

Převodník je vybaven sériovým rozhraním, které obsahuje vodiče SCLK, SDIO, CS a DRDY. Vodič SCLK slouží k synchronizaci přenosu (hodinový signál). Pomocí vodiče SDIO (*serial data intput - output*) probíhá vzájemná datová výměna. Signálem CS (*chip select*) se vybírá příslušný obvod na sériové sběrnici (v případě připojení více obvodů). Pomocí signálu DRDY (*data ready*) dává převodník mikroprocesoru informaci o tom, že dokončil převod a má připravena data k přenosu.

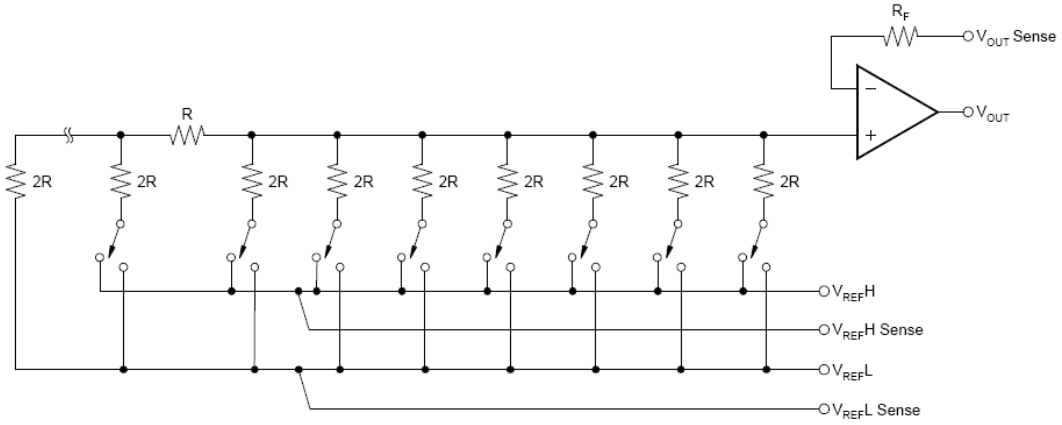
3.1.3 Převodník D/A – DAC7634 firmy Texas Instruments

DAC7634 je šestnáctibitový převodník D/A [12]. Pracuje na základě spínání rezistorové sítě R-2R, viz. obr. 23. Výhodou tohoto řešení je velmi krátká doba nastavení (typ. 10 μs). Převodník má čtyři na sobě nezávislé výstupy, které mohou pracovat v unipolárním nebo bipolárním režimu a má velmi malý příkon (10 mW). Díky této vlastnosti je vhodný pro použití v přenosných zařízeních napájených z baterií.



Obr. 22: *Blokové schéma převodníku D/A – DAC7634*

Maximální chyba převodu způsobená nelinearitou převodníku je ±3 LSB. Chyba vzniklá diferenciální nelinearitou je max. ±2 LSB. Chyba nastavení nuly v bipolárním režimu je max. ±2 mV. Chyba přes celý rozsah převodníku je max. ±2 mV.

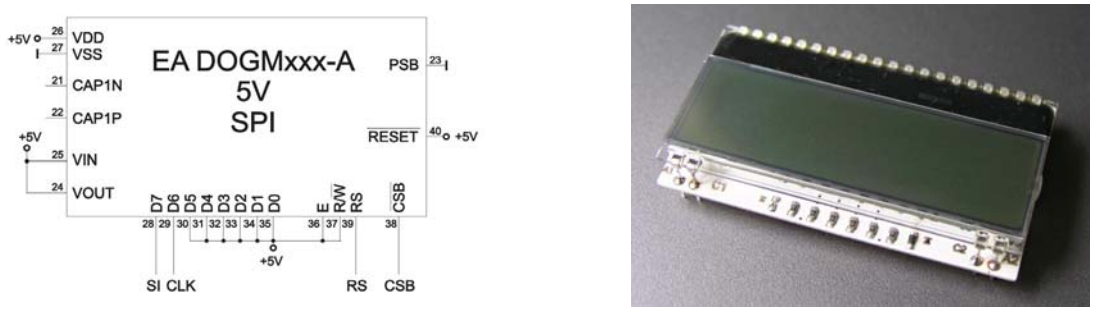


Obr. 23: *Principiální schéma funkce převodníku D/A (váhová síť R-2R)*

3.1.4 Displej LCD EA DOGM 163 W - A

Použitý modul displeje LCD disponuje třemi řádky o šestnácti znacích [18]. Tento zobrazovací prostor dává dostatečný potenciál k zobrazení všech potřebných údajů. Displej je vybaven integrovaným řadičem ST7036, který dovoluje více způsobů komunikace. Standardním způsobem komunikace s modulem je osmibitová datová sběrnice + dva řídící

signály. Výhodou této komunikace je její snadné programové řízení, nevýhodou je velký počet potřebných vstupně – výstupních bran. Vylepšenou verzí komunikace je přenos po sběrnici o čtyřech bitech + dva řídící signály. Komunikace zde probíhá podobně jako u osmibitové sběrnice. Rozdíl je v tom, že je osmibitové slovo rozděleno na dvě části po čtyřech bitech (LSB, MSB), které jsou přenášeny odděleně bezprostředně po sobě. U tohoto způsobu komunikace dochází k úspoře čtyř vstupně – výstupních bran mikroprocesoru. Výhodou použitého modulu je možnost sériové komunikace s mikroprocesorem. Při tomto způsobu komunikace je modul s mikroprocesorem propojen pouze prostřednictvím rozhraní SPI (*serial peripheral interface*). Rozhraní je součástí vnitřních periferií použitého mikroprocesoru. Obsahuje čtyři vodiče. Vodič SCK (*serial clock*) slouží k synchronizaci přenosu. Po vodiči je přenášen hodinový signál. Vodič SS (*slave select*) slouží k povolení přenosu do podřízeného (*slave*) zařízení. Komunikace probíhá po vodičích MOSI (*master out slave in*) a MISO (*master in slave out*). Po vodiči MOSI probíhají přenášená data z nadřízeného (*master*) zařízení do podřízeného (*slave*), po vodiči MISO naopak z podřízeného (slave) do nadřízeného (*master*). Použitý modul je s mikroprocesorem propojen tak, že mikroprocesor je nadřízené zařízení a modul displeje podřízené. Řadič modulu při sériové komunikaci neumožňuje zpětný přenos zobrazených dat. Ke komunikaci jsou tak zapotřebí pouze tři vodiče (MOSI, SCK a SS). Sériovým připojením displeje dochází k velké úspoře komunikačních vstupně – výstupních bran. Nevýhodou této komunikace je její složitější protokol. Mezi další výhody modulu patří jeho malá spotřeba, vysoký kontrast, účinné podsvícení a malá velikost.

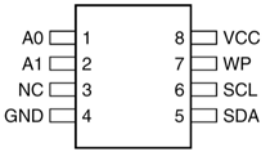


Obr. 24: *Modul displeje LCD*

3.1.5 Externí paměť dat AT24C256

Paměť AT24C256 je typu EEPROM [10]. Lze ji elektricky programovat a mazat. Uložená data v paměti zůstávají i při přerušení napájecího napětí. Paměťové buňky jsou organizovány ve skupinách po 8-mi bitech (1 Byte). Celkový počet buněk je 32768. Velikost

paměti je 256 kb (32 kB). Výrobce zaručuje životnost 10^6 zápisů a uchování dat po dobu 40-ti let. Výhodou je široké rozmezí napájecích napětí 2,7 až 5,5 V.



Obr. 25: *Paměť AT24C256*

Pro komunikaci s mikroprocesorem je paměť vybavena sériovým rozhraním I^2C (TWI – *two wire interface*). Komunikace probíhá pomocí dvou vodičů SCL a SDA. Vodič SCL (*serial clock*) slouží k synchronizaci sériového přenosu. Po vodiči SDA (*serial data*) probíhá datová výměna. Pomocí vstupů A0 a A1 lze nastavit jedinečnou adresu zařízení. Díky tomu lze na jednu sběrnici připojit až čtyři. Vstup WP (*write protect*) slouží k ochraně obsahu paměti proti přepsání. Signál je aktivní v log. 1. Pokud není v aplikaci tuto ochranu nutné používat je tento vstup možné trvale připojit na log. 0 propojením s GND.

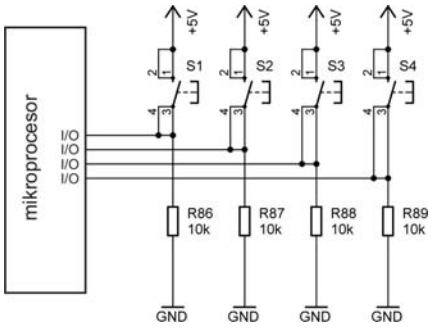
3.1.6 Sériové rozhraní USB (převodník FT232R)

V současné době se na nových počítačích (především noteboocích) klasické sériové rozhraní RS232 téměř nevyskytuje. Je nahrazováno sériovým rozhraním USB (*universal serial bus*). Výhodami USB jsou především velká přenosová rychlost (až 480 Mb/s) a velký počet zařízení, která mohou být na sběrnici připojena pomocí tzv. „hubů“. Nevýhodou je značná složitost topologie sběrnice a komunikačního protokolu. Elegantním řešením je použití převodníku UART – USB, FT232R firmy FTDI [11]. Veškerá obsluha sběrnice USB je řešena tímto převodníkem. Navenek se obvod chová jako klasické sériové rozhraní. Na straně přístroje obvod disponuje klasickým sériovým rozhraním UART (sériový port), na straně PC jsou ovladače, které v operačním systému vytváří virtuální sériový port (COM). Konfigurace obvodu se provádí jednoduše připojením ke sběrnici USB pomocí konfiguračního programu dodávaného výrobcem.

3.1.7 Klávesnice

Klávesnice slouží k ovládání přístroje (nastavování hodnot, pohyb v menu,...). Jednotlivá tlačítka jsou realizována pomocí mikrospínačů osazených v plošném spoji desky ovládacího panelu. Problémem při připojování mechanických spínacích prvků k digitálnímu systému jsou tzv. „zákmity“. Jsou to nechtěné, rychlé změny úrovně vznikající vlivem dosedání nebo rozepínání kontaktu. Vzhledem k tomu, že jsou digitální obvody několikanásobně rychlejší,

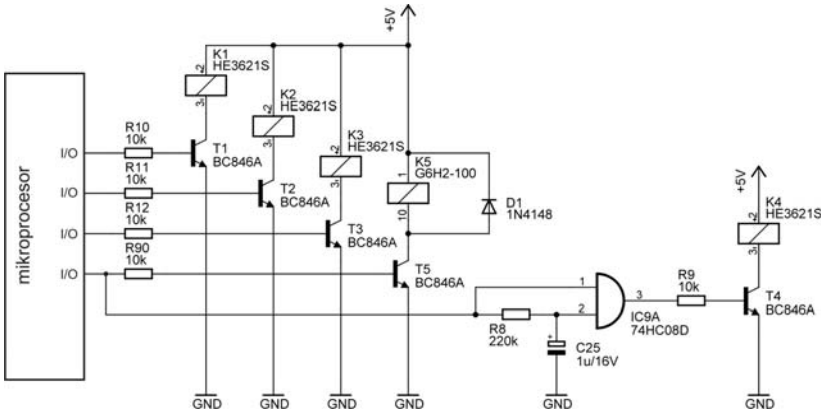
než tyto změny, dochází k ovlivňování funkce přístroje. Zákmity tlačítek jsou ošetřeny pomocí programu mikroprocesoru. Spínače jsou zapojeny tak, že pokud je kontakt rozepnutý je na vstupně / výstupní bráně mikroprocesoru log. úroveň 0. Pokud se kontakt sepne, tak je na bráně log. úroveň 1 (obr. 26). Velikost rezistoru je volena tak, aby v sepnutém stavu spínače netekl zbytečně velký proud, který by vybíjel napájecí akumulátor.



Obr. 26: *Schéma zapojení klávesnice*

3.1.8 Relé

Relé K1, K2 a K3 slouží k přepínání rozsahů měření v analogové části. Přepínání rozsahu je realizováno pomocí připínání paralelních rezistorů. Výstupní brána mikroprocesoru je proudově posílena pomocí NPN tranzistoru, který má v bázi připojen ochranný rezistor a v kolektoru cívku elektromagnetu relé. Při spínání indukční zátěže je důležité připojit paralelně s cívkou ochrannou diodu, která odstraňuje napěťové špičky vznikající při rozpínání indukčnosti. Použitý typ relé má tuto diodu integrovanou. Relé K5 slouží k programovému spínání napájení analogové části. Pokud je přístroj zapnutý a neprobíhá měření, je z důvodu úspory energie napájecího akumulátoru napájení analogové části vypnuté. Vzhledem ke speciálním požadavkům na připojení napájecího napětí převodníku A/D ADS1211 bylo nutné zajistit, aby digitální napájení nebylo připojeno dříve, než analogové. Vzhledem k tomu, že je analogové napájení řízeno digitální částí pomocí relé K5 bylo nutné digitální napájení převodníku připojit přes kontakty relé K4, které je řízeno stejnou vstupně/výstupní branou mikroprocesoru jako relé K5. Aby se vyloučila možná chyba připojení vlivem různé rychlosti sepnutí kontaktů relé K4 a K5 je před spínací tranzistor T4 vložen zpožďovací obvod, který zajistí sepnutí K4 cca 100 ms po sepnutí K5. Zpožďovací obvod je realizován pomocí logického hradla AND a RC článku s časovou konstantou 220 ms.



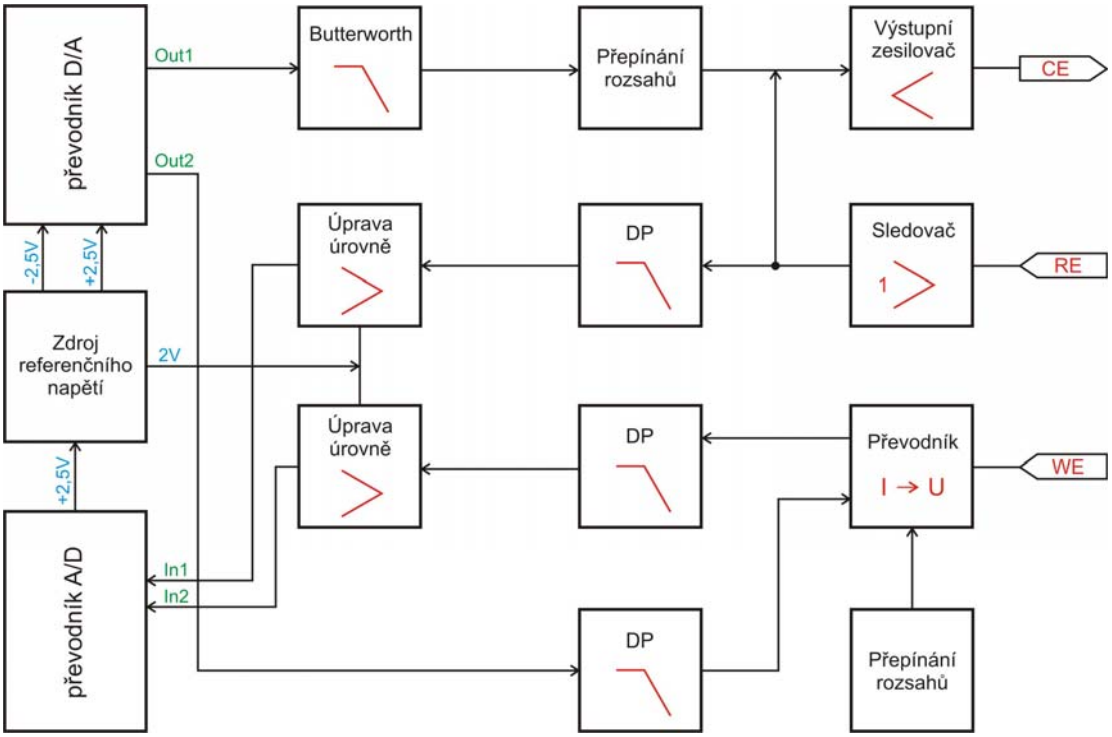
Obr. 27: *Schéma zapojení relé*

3.2 Analogová část

Analogová část upravuje signály z digitální části do podoby vhodné pro výstup na připojený senzor a signály získané ze senzoru do podoby, která je vhodná ke zpracování digitální částí. Tok signálu analogovou částí začíná u převodníku D/A. Pomocí programu mikroprocesoru je na výstupu převodníku D/A generován signál. Rozlišení výstupní úrovně signálu je závislé na rozlišení převodníku. Typ signálu je závislý na použité měřící metodě. Průběh signálu má díky konečnému počtu napěťových úrovní (dané rozlišením převodníku) schodovitý tvar. K vyhlazení signálu slouží dolnofrekvenční propust (Butterworthův filtr). Pro výstup na pomocnou (AE) elektrodu senzoru musí být signál úrovňově upraven a proudově posílen výstupním zesilovačem. Pro realizaci různých měřících rozsahů je výstupnímu zesilovači předřazen obvod pro přepínání rozsahů. Signál způsobí prostřednictvím senzoru změny v měřeném systému. Tyto změny jsou zpracovávány pomocí obvodů referenční elektrody (RE) a pracovní elektrody (WE).

Obvod referenční elektrody zajišťuje prostřednictvím zpětné vazby do výstupního zesilovače nezávislost výstupního napětí referenční elektrody na proudu protékajícím senzorem. Aby nebyly ovlivněny fyzikální a chemické děje v měřeném systému je nutné zajistit, aby připojené obvody systém nezatěžovaly. To lze provést použitím obvodu s velkým vstupním odporem – sledovače. Výstupní napětí sledovače je kromě zpětné vazby do výstupního zesilovače přivedeno na dolnofrekvenční propust, která ze signálu odstraní šum a případné vysokofrekvenční rušení. Toto napětí je dále přivedeno do obvodu úpravy úrovně, který převede vstupní signál do podoby vhodné ke zpracování převodníkem A/D. Signál převedený do digitální podoby je zpracován mikroprocesorem a reprezentuje skutečnou velikost napětí (potenciálu) na elektrodách senzoru.

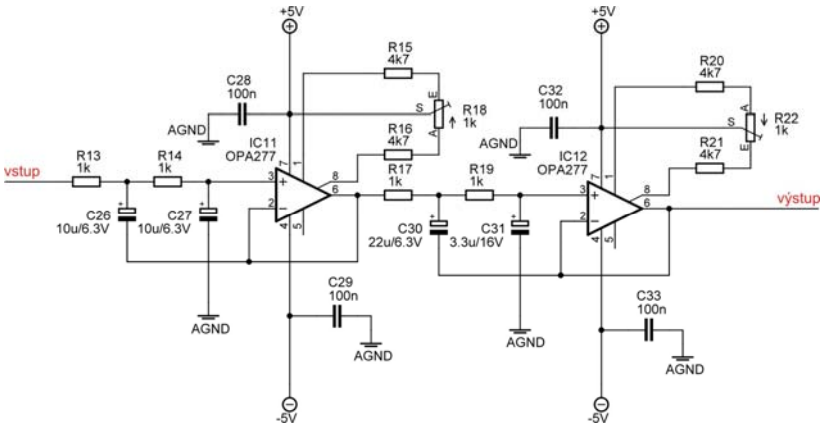
Obvod pracovní elektrody slouží k detekci proudu protékajícím měřeným systémem. Proudový signál z pracovní elektrody je přiveden na vstup převodníku I/U. Obvod pro přepínání rozsahů umožňuje měnit měřící rozsahy převodníku. Napěťový signál vystupující z převodníku je upraven dolnofrekvenční propustí a obvodem pro úpravu úrovně signálu. Upravený signál je přiveden na vstup převodníku A/D, kde je převeden do digitální podoby. Signál reprezentuje proud, který protéká měřeným systémem. U převodníku I/U je kritickým parametrem velikost vstupního napěťového posunu (*offsetu*). Převodníky a obvody úpravy úrovně signálu potřebují ke správné funkci přesné referenční napětí. K tomuto účelu slouží v analogové části přístroje zdroj referenčního napětí, který vytváří napětí ±2,5 V a -2 V.



Obr. 28: *Blokové schéma analogové části přístroje*

3.2.1 Butterworthův filtr

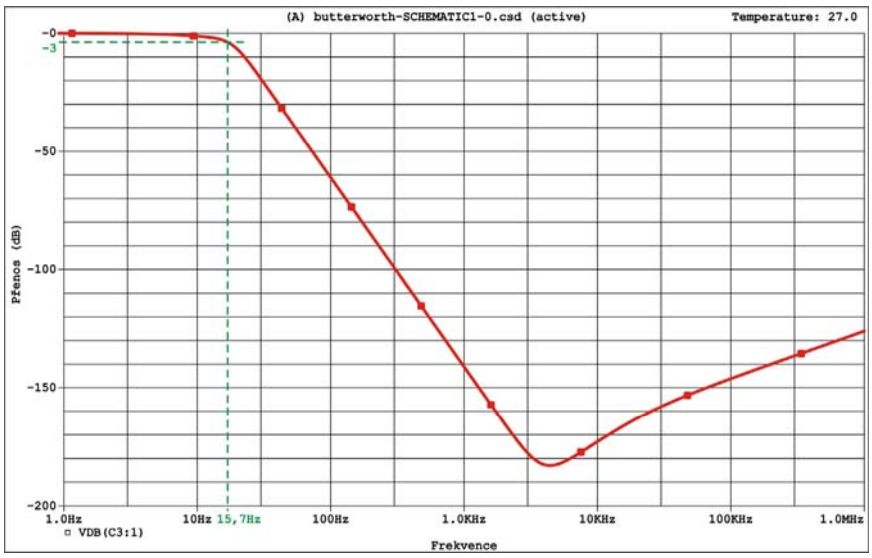
Schodovitý signál vystupující z převodníku D/A obsahuje velký počet harmonických složek na vyšších frekvencích. Strmé hrany signálu mohou nepříznivě ovlivnit chemické procesy probíhající v měřeném systému. Za účelem vyhlazení signálu je do signálové cesty zařazen Butterworthův filtr 4. řádu. Jedná se o dolnofrekvenční propust s velkou strmostí.



Obr. 29: *Schéma zapojení Butterworthova filtru*

Filtr obsahuje dva operační zesilovače. Byl vybrán typ OPA27 (resp. OPA227), který má vhodné vlastnosti. Důležitou vlastností je nízká úroveň šumu výstupního napětí a malý napěťový posun. Vlastnosti operačního zesilovače jsou přehledně shrnuty v jeho katalogovém listu [14]. Operační zesilovač má vyvedeny vstupy pro kompenzaci offsetu. K nim je připojen odporový trimr, jehož nastavením lze hodnotu offsetu kompenzovat. Hodnoty odporů vycházejí z doporučení výrobce [14].

Frekvenční charakteristika propusti byla simulována pro konkrétní hodnoty součástek v programu PSpice. Při simulaci byly použity odpovídající modely operačních zesilovačů. Šířka pásma (pokles o 3dB) propusti je 15,7 Hz. Od této frekvence přenos klesá se strmostí 80 dB/dek viz. obr. 30.



Obr. 30: *Simulace frekvenční charakteristiky Butterworthova filtru*

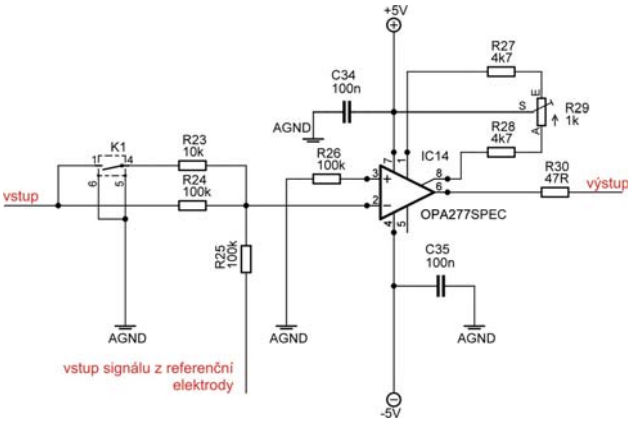
3.2.2 Výstupní zesilovač

Výstupní signál z dolnofrekvenční propusti je třeba před připojením na senzor úrovňově upravit a proudově posílit. K tomu slouží výstupní zesilovač s přepínačem rozsahů. Operační zesilovač je zapojen v invertujícím zapojení. V záporné zpětné vazbě zesilovače je zapojen obvod sledovače z referenční elektrody (RE) s výstupním rezistorem R25, který společně s odpory přepínače rozsahů R23 a R24 určuje zesílení výstupního zesilovače. Zesílení pro rozepnutý kontakt relé K1 lze spočítat ze vzorce (1).

$$U_{výst} = U_{vst} \cdot \left(-\frac{R_{25}}{R_{24}} \right) = U_{vst} \cdot \left(-\frac{100 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3} \right) = U_{vst} \cdot (-1) \qquad (1)$$

Zesílení pro sepnutý kontakt relé K1 lze spočítat podle vzorce (2).

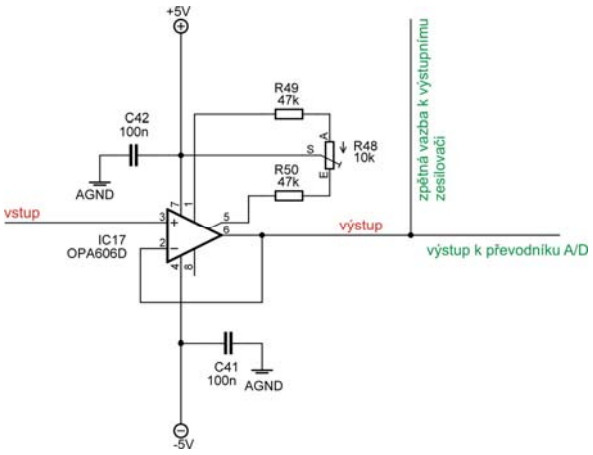
$$U_{výst} = U_{vst} \cdot \left(-\frac{R_{25}}{\frac{R_{23} \cdot R_{24}}{R_{23} + R_{24}}} \right) = U_{vst} \cdot \left(-\frac{100 \cdot 10^3}{\frac{10 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3}} \right) = U_{vst} \cdot (-11) \qquad (2)$$



Obr. 31: *Schéma zapojení výstupního zesilovače*

3.2.3 Sledovač

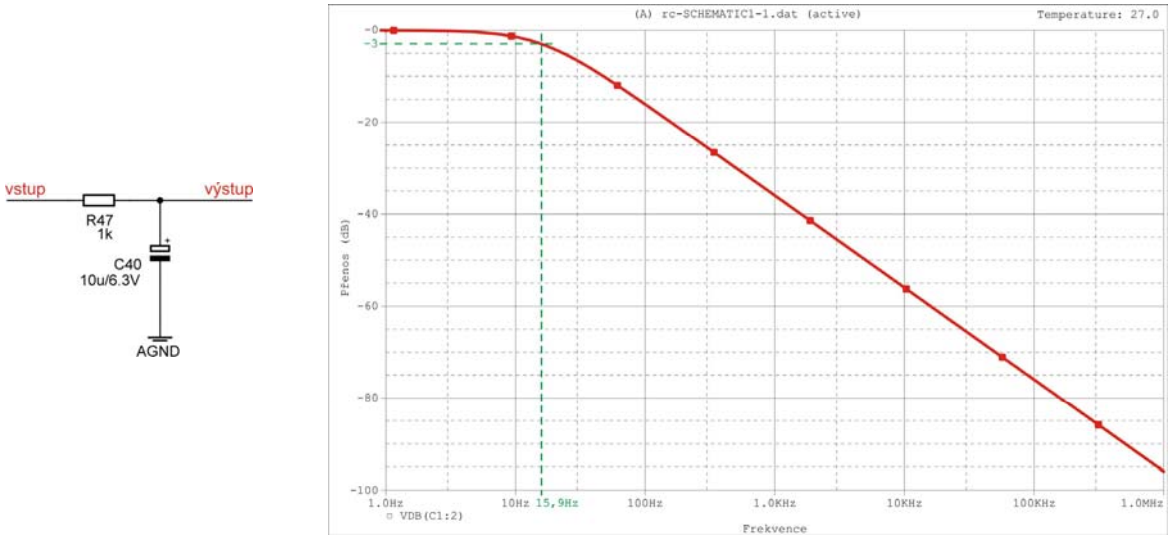
Pomocí referenční elektrody je snímáno skutečné napětí v měřeném systému. Aby nebylo měření ovlivněno vlivem zatížení systému obvodem referenční elektrody musí být vstupní odpor obvodu co největší. K tomu slouží napěťový sledovač. Sledovač je realizován pomocí operačního zesilovače s jednotkovou zápornou zpětnou vazbou. Přenos napěťového sledovače je roven jedné. Aby bylo možné rychle reagovat na změny vzniklé v měřeném systému musí mít operační zesilovač velkou šířku pásma a velkou rychlost přeběhu [16],[19].



Obr. 32: *Schéma zapojení sledovače*

3.2.4 Dolnofrekvenční propust

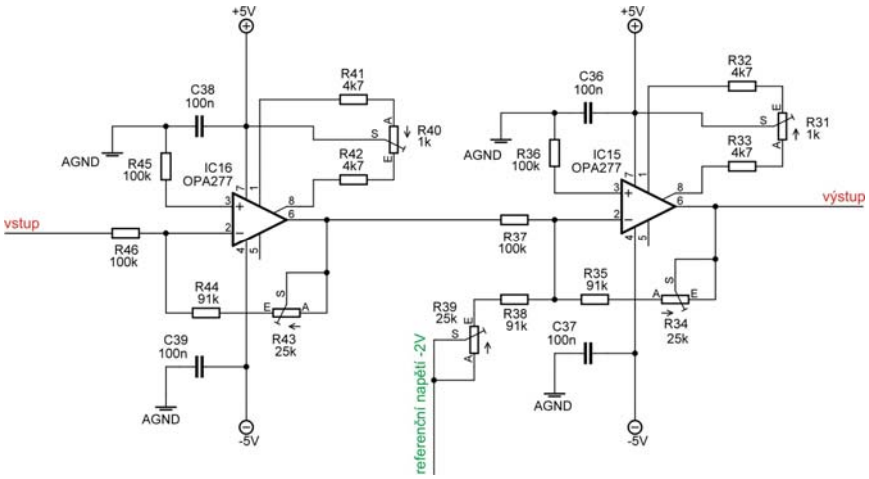
Dolnofrekvenční propust odstraňuje z užitečného signálu rušivé vysoké frekvence. Vlivem těchto frekvencí by vzrostla chyba měření. Schéma zapojení a přenos dolnofrekvenční propusti je znázorněn na obr. 33. Frekvenční charakteristika byla získána pomocí simulace v programu PSpice. Šířka pásma propusti je 15,9 Hz. Po dosažení mezní frekvence klesá přenos se strmostí 20 dB/dek.



Obr. 33: *Schéma zapojení dolnofrekvenční propusti a jeho frekvenční charakteristika*

3.2.5 Úprava úrovně signálu

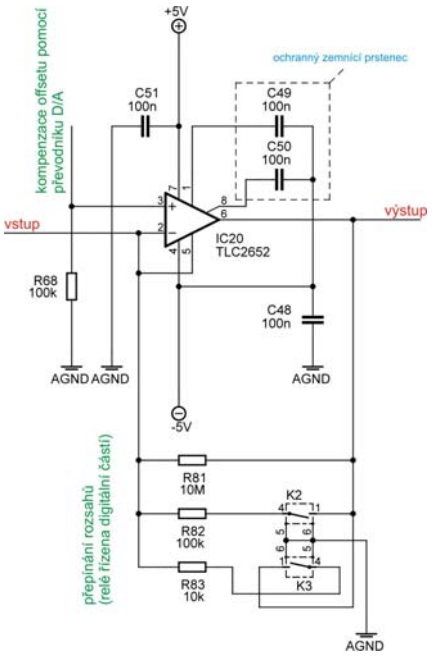
Signály z napěťového sledovače a převodníku I/U mají rozsah -2 V až 2 V. Pro připojení na vstup převodníku A/D je třeba rozsah upravit na hodnoty 0V až 4V. Úprava je realizována pomocí obvodu úpravy úrovně signálu. Obvod obsahuje dva operační zesilovače. První je zapojen jako invertující zesilovač se ziskem 1, druhý jako sčítačka. Na sčítačku je přivedeno výstupní napětí z invertujícího zesilovače, které je sečteno s referenčním napětím -2V, které je přivedeno ze zdroje referenčního napětí. Takto upravený signál je vhodný ke zpracování převodníkem A/D. Více o funkci a zapojení operačních zesilovačů v [19].



Obr. 34: *Schéma zapojení obvodu pro úpravu úrovně signálu*

3.2.6 Převodník proudu na napětí

Převodník proudu na napětí (I/U) převádí proud protékající senzorem na napětí. Obvod je realizován pomocí operačního zesilovače zapojeného jako převodník I/U viz. [19]. Zisk převodníku je dán velikostí rezistoru zapojeného v záporné zpětné vazbě zesilovače. Převodník obsahuje obvod pro přepínání rozsahů. Ten je realizován pomocí připínání paralelních rezistorů ve zpětné vazbě.

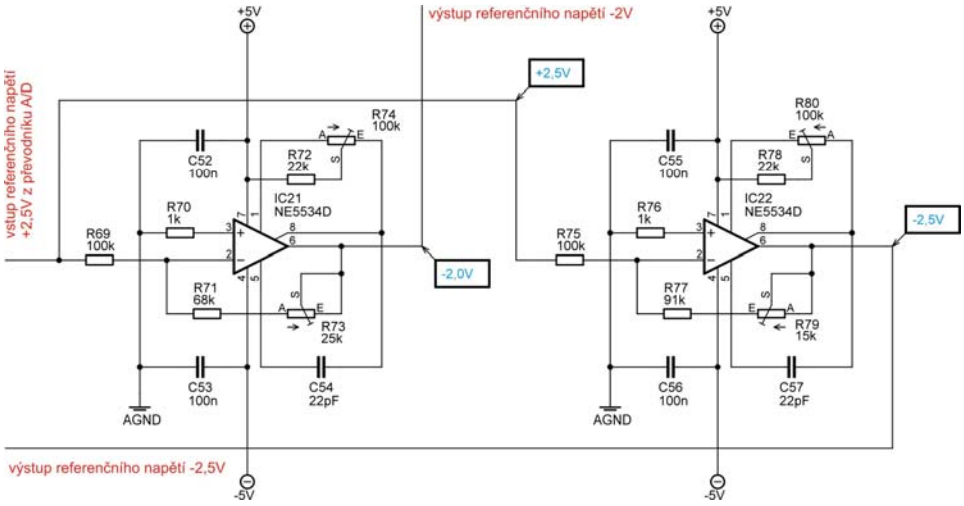


Obr. 35: *Schéma zapojení převodníku proudu na napětí*

Převodník pracuje s velmi malými proudy, které protékají měřeným systémem. Proto jsou na něj kladeny extrémní nároky z hlediska vstupního napěťového posunu (*offsetu*) a provedení stínění. Operační zesilovač TLC2652 má velice malý offset [15] a nízkou úroveň výstupního šumu.

3.2.7 Zdroj referenčního napětí

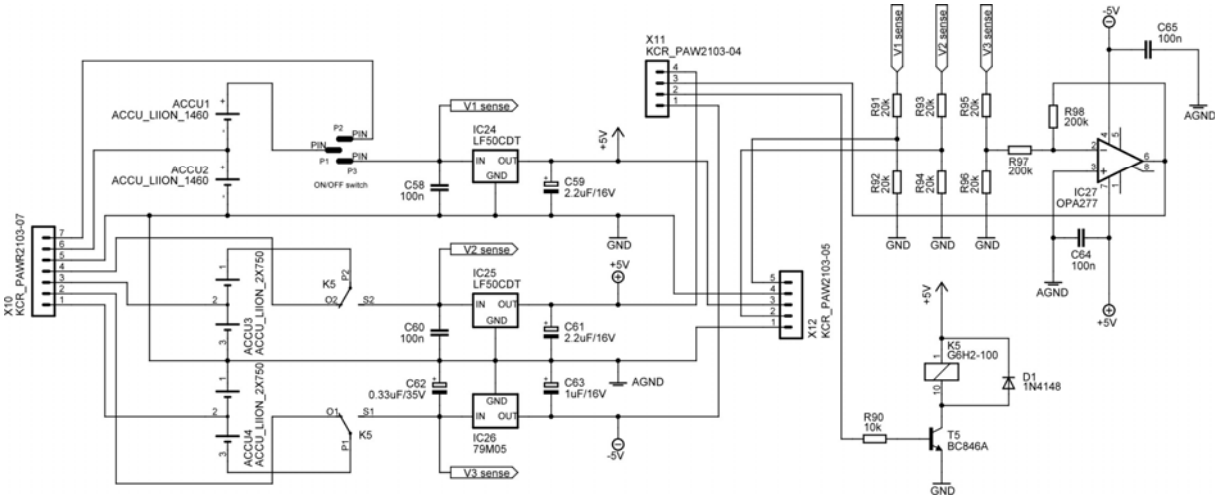
Pro správnou a přesnou funkci obou převodníků a obvodů analogové části přístroje je nezbytný zdroj referenčního napětí. Použitý převodník A/D v sobě obsahuje napěťovou referenci typu „Band-gap“. Velikost referenčního napětí je 2,5 V. Výrobcem udávaná změna referenčního napětí s teplotou je typ. 25 p.p.m./°C, viz. [13]. Referenční napětí A/D převodníku je použito jako vstupní napětí. Pomocí dvou operačních zesilovačů NE5534 [17] v invertujícím zapojení jsou vytvářena napětí -2 V a -2,5 V. Referenční napětí -2,5 V je spolu s napětím 2,5 V přivedeno na převodník D/A. Napětí 2,5 V slouží jako referenční napětí pro převodník A/D a napětí -2 V je přivedeno do bloků úpravy úrovně signálu.



Obr. 36: *Schéma zapojení zdroje referenčního napětí*

3.3 Napájecí zdroj

Napájecí zdroj zajišťuje napájení všech elektrických obvodů v zařízení. Napájení je realizováno prostřednictvím akumulátorů Li – Ion, které mají při velké kapacitě malou velikost a malou hmotnost. Jednotlivé články mají jmenovité napětí 3,7 V. Pro napájení o napětí 5 V je nutné použít články dva.



Obr. 37: *Schéma zapojení napájecího zdroje*

Zdroj má oddělené napájení analogové a digitální části. Digitální část napájí dva akumulátory zapojené v sérii, každý o kapacitě 1460 mAh. Do cesty mezi akumulátory a stabilizátor napětí LF50CDT je zařazen hlavní vypínač, který v poloze „vypnuto“ připojí akumulátory k nabíjecímu konektoru a v poloze „zapnuto“ ke stabilizátoru napětí. Velikosti blokovacích kapacit připojených ke stabilizátoru vychází z doporučení výrobce [20]. Stabilizované napětí z výstupu stabilizátoru je rozvedeno po základní desce přístroje a napájí všechny digitální obvody.

Analogová část přístroje vyžaduje symetrické napájecí napětí ± 5 V. Vzhledem ke jmenovitému napětí 3,7 V na článek bylo nutné k realizaci napájení požít články čtyři. Dva články napájí stabilizátor kladného napětí LF50CDT a dva stabilizátor záporného napětí LM79M05. Kapacita použitých akumulátorů je 750 mAh. Do cesty mezi akumulátory a stabilizátory jsou zapojeny přepínací kontakty relé K5, které je programově ovládáno digitální částí prostřednictvím tranzistoru T5. Toto řešení umožňuje zapínat analogovou část přístroje bezprostředně před měřením. Pokud není analogová část využívána, je odpojena od napájecích akumulátorů a nedochází k jejich zbytečnému vybíjení. V odpojeném stavu jsou kontakty relé překlopeny do polohy, kdy jsou akumulátory připojeny ke konektoru určenému k jejich nabíjení. Výstupní napětí stabilizátorů jsou rozvedeny po základní desce přístroje a napájí všechny analogové obvody.

Li–Pol články vyžadují poměrně specifické zacházení. Při jejich nabíjení nesmí být překročena velikost napětí 4,2 V na článek. Při nabíjení baterie těchto článků zapojených do série by vlivem rozdílného vnitřního odporu článků docházelo k tomu, že některé články nebudou zcela nabity a některé se budou přebíjet. Přebíjením dochází k ničení článku. Pro eliminaci tohoto jevu je používán tzv. „balancer“. Je to zařízení. které v průběhu nabíjení

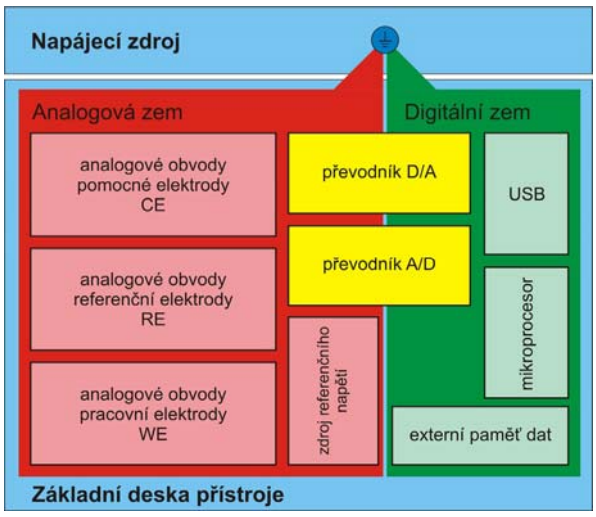
vyrovnává napětí na jednotlivých článcích. Konstrukce balanceru nebyla předmětem této práce. Proto není balancer součástí přístroje, ale prostřednictvím nabíjecího konektoru lze připojit ke článkům komerčně vyráběný balancer. Články lze prostřednictvím konektoru nabíjet pouze v případě, že je přístroj vypnutý.

Dalším problémem provozu těchto akumulátorů je skutečnost, že jim škodí přílišné vybití. Napětí na článek by při vybíjení nemělo klesnout pod hranici 3V, jinak hrozí poškození článku. Napětí na článcích je měřeno pomocí převodníku A/D integrovaného v mikroprocesoru. Napěťové úrovně kladných napájecích větví jsou upraveny na vhodnou velikost pomocí odporových děličů. Napětí záporné napájecí větve je nejdříve pomocí operačního zesilovače invertováno na kladné a teprve poté upraveno na vhodnou velikost pomocí odporového děliče. Napětí na článcích jsou programem mikroprocesoru monitorována a v případě přílišného vybití některého článku je přístroj vypnut.

3.4 Stínění

Oddělené země

Digitální a analogová zem jsou spojeny v jednom bodě na desce plošných spojů zdroje. Odtud jsou obě země vedeny samostatně. Na digitální zem (GND) jsou připojeny digitální obvody (mikroprocesor, paměti, displej LCD, relé, ...) a digitální části signálových převodníků. Na analogovou zem (AGND) jsou připojeny analogové obvody (operační zesilovače) a analogové části signálových převodníků viz. obr. 38. Koncept oddělených zemí byl zvolen, kvůli potlačení rušení přenášených společnou zemí.



Obr. 38: *Prostorové uspořádání bloků přístroje, řešení oddělených zemí*

Prostorové uspořádání přístroje

Princip stínění prostorovým uspořádáním spočívá v umístění obvodů, které jsou citlivé na rušení co nejdále od potenciálních zdrojů rušení. Zdroje rušení jsou digitální obvody, které pracují na vysokých frekvencích.

Nejcitlivějším prvkem zařízení je převodník I/U v obvodu pracovní elektrody (WE), který pracuje s velice nízkou úrovní signálu. Obvod je na základní desce umístěn co nejdále od digitálních obvodů a je stíněn pomocí prstenců analogové země realizovaných na desce plošných spojů.

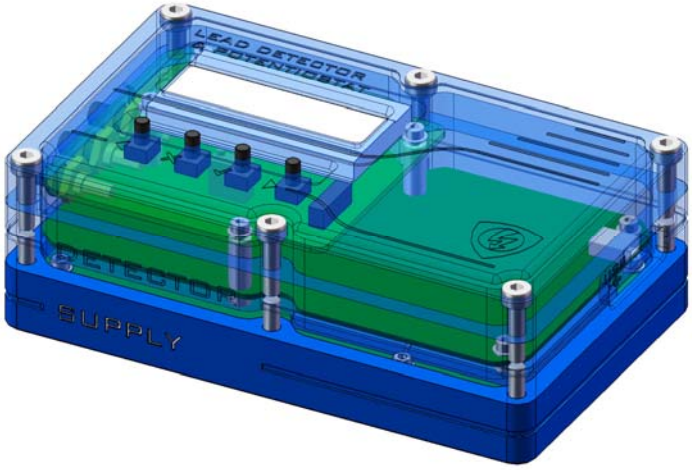
Stínící konstrukční rám přístroje

Konstrukční rám přístroje je vyroben z duralu. Rám je spojen s analogovou zemí přístroje a tvoří ochranné stínění vnitřních obvodů proti vnějšímu rušení.

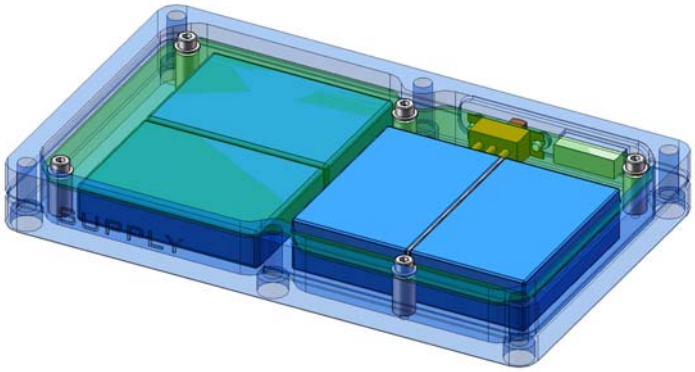
3.5 Mechanické provedení

Rám přístroje je složen ze tří částí. Jednotlivé části jsou vzájemně spojeny pomocí šroubů. Spodní část rámu v sobě ukrývá napájecí akumulátory a obvody zdrojové části. Střední část v sobě ukrývá základní desku přístroje a ovládací panel. Na obrázcích 39, 40 a 41 je znázorněno prostorové řešení konstrukčního rámu.

Obr. 39: *Konstrukční řešení přístroje – konstrukční rám*



Obr. 40: *Konstrukční řešení přístroje – základní deska a ovládací panel*



Obr. 41: *Konstrukční řešení přístroje – zdroj*

3.6 Programové vybavení

Při konstrukci řídicího programu přístroje byl kladen důraz na maximální jednoduchost obsluhy. Po zapnutí přístroje je na displeji zobrazena základní grafika, která uživateli oznamuje, že je přístroj připraven (obr. 42). Po připojení senzoru a jeho vložení do roztoku je možné zahájit detekci stisknutím tlačítka „OK“. Detekce probíhá 20 s a během ní je na displeji zobrazena grafika z obr. 43. Detekci lze kdykoli přerušit stisknutím tlačítka „ESC“. Po dokončení měření je na displeji zobrazen výsledek viz obr. 44 a 45.

Obr. 42: *Základní grafika displeje*

Obr. 43: *Probíhá detekce*

Obr. 44: *Výsledek detekce – bezolovnatá pájka*

Obr. 45: *Výsledek detekce – olovnatá pájka*

Pro vizualizaci naměřených průběhů během ladění algoritmu detekce byla vytvořena sériová komunikace, která na virtuální sériový port prostřednictvím rozhraní USB vysílá naměřené hodnoty. Ty lze odchytávat v programu monitorujícím sériový port (např. program „Hyperterminal“, který je součástí instalace operačního systému Windows). Jednotlivé hodnoty jsou odděleny středníky a na konci každé sekvence následuje odřádkování. Toho lze s výhodou použít k importu hodnot do tabulkového procesoru MS Excel, kde lze pohodlně vytvořit grafy. Nastavení komunikace: rychlost 9600 b/s, 8 datových bitů, jeden stop bit, žádné řízení toku.

4 LABORATORNÍ PRÁCE

Cílem práce v laboratoři bylo nalézt vhodný postup přípravy pracovního roztoku, který umožní detekci olova ze vzorku pájky. Nalezením vhodného pracovního roztoku a použitím vhodné detekční metody lze docílit jednoznačného rozlišení olovnaté pájky od bezolovnaté.

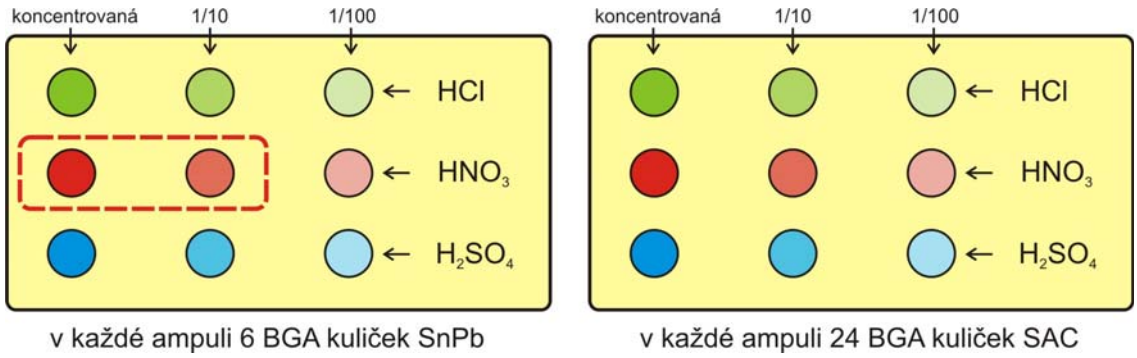
4.1 Rozpouštěcí test

Pájky jsou slitiny kovů – pevné látky (viz. kap. 2.5). Detekce pomocí elektrochemických metod se provádí v roztoku. Proto je nutné vzorky pájky rozpustit pomocí vhodné kyseliny.

Rozpouštěcímu testu byly podrobeny vzorky olovnaté pájky SnPb (Sn – 63%, Pb – 37%) a bezolovnaté pájky SAC (Sn – 95,5%, Ag – 3,8%, Cu – 0,7%) v podobě BGA kuliček. Jsou to dva nejpoužívanější typy pájek pro olovnaté a bezolovnaté pájení. Volba rozpouštěcích kyselin byla provedena s ohledem na údaje v korozních tabulkách [23]. Korozní tabulky udávají váhové úbytky kovů při působení různými kyselinami. Váhový úbytek kovu v kyselině udává míru reaktivity kyseliny s daným kovem. Dalším faktorem ovlivňující výběr kyseliny byla její snadná dostupnost. Použité kyseliny:

- kyselina chlorovodíková (HCl) – technická 32%,
- kyselina dusičná (HNO_3) – koncentrovaná 63%,
- kyselina sírová (H_2SO_4) – koncentrovaná 98%.

Pro přípravu vzorků rozpouštěcího testu byly použity plastové ampule o objemu cca 1,5 ml. Ampule byly rozmístěny ve stojanu tak, že řada udává použitou kyselinu a sloupec její koncentraci viz. obr. 46.



Obr. 46: *Rozpouštěcí test*

Do každé ampule byl odměřen 1 ml kyseliny dané koncentrace a vloženo definované množství vzorku pájky. Použití vzorků pájky v podobě BGA kuliček má výhodu ve snadném

odměření požadovaného množství. Na přesné analytické váze byla zjištěna hmotnost jedné kuličky olovnaté a bezolovnaté pájky. Jedna kulička vzorku olovnaté pájky (SnPb) má hmotnost 0,002 g. Jedna kulička bezolovnaté pájky (SAC) má hmotnost 0,0005 g. Z naměřených hmotností vyplývá, že kulička bezolovnaté pájky má 4x menší hmotnost, než kulička pájky olovnaté. Aby bylo při testu dosaženo porovnatelných výsledků mezi olovnatými a bezolovnatými vzorky, bylo nutné odměřit stejné váhové množství obou vzorků. Na každou olovnatou kuličku připadají 4 kuličky bezolovnaté pájky.

Výsledek rozpouštěcího testu byl vyhodnocen po jedné hodině od vložení vzorků pájek do ampulí. Vyhodnocení probíhalo formou vizuálního posouzení změny barvy roztoku a stavu BGA kuliček. Vliv koncentrované kyseliny chlorovodíkové (HCl) na vzorek olovnaté pájky nebyl pozorovatelný, u bezolovnatého vzorku byl pozorován rozpad kuliček na menší částečky, které se však v kyselině nerozpustily ani za velmi dlouhou dobu (1 měsíc). U vzorků vystavených menším koncentracím kyseliny nebyly po jedné hodině působení pozorovány žádné změny. Vliv koncentrované kyseliny sírové (H_2SO_4) na vzorek olovnaté a bezolovnaté pájky nebyl zpozorován.

Nejlepších výsledků se podařilo dosáhnout s kyselinou dusičnou (HNO_3). Po jedné hodině působení koncentrované kyseliny na vzorek olovnaté pájky došlo k jejímu úplnému rozpuštění. Roztok se silně zabarvil dožluta a na dně ampule byla patrná bílá usazenina. Vliv kyseliny na olovnatou pájku byl pozorován i u nižší koncentrace kyseliny (1/10), kde se roztok zabarvil dožluta, ale kuličky ještě nebyly úplně rozpuštěny. U vzorku bezolovnaté pájky nebyly pozorovány žádné změny. Vzhledem k úplnému rozpuštění vzorku olovnaté pájky však lze předpokládat, že pokud by údajná bezolovnatá pájka obsahovala stopy olova, došlo by k jejímu částečnému rozpuštění a uvolnění iontů olova do roztoku. V literatuře [6], [7] je kyselina dusičná uvedena jako jeden z možných pracovních roztoků pro elektrochemická měření. Vzhledem k dobrým výsledkům v rozpouštěcím testu a dobrým předpokladům pro detekci pomocí elektrochemických metod byla kyselina dusičná zvolena pro rozpuštění vzorků pájek pro laboratorní měření na komerčně vyráběné analytické stanici (potenciostatu).

Výsledkem rozpouštěcího testu je nalezení kyseliny vhodné k rozpouštění vzorků pájek – HNO_3. Zajímavá je skutečnost, že olovnatý vzorek pájky lze předběžně odlišit od bezolovnatého vzorku již v průběhu rozpouštění v kyselině a to tím, že olovnatý vzorek zbarví již za poměrně krátkou dobu roztok kyseliny dožluta (s patrnou bílou usazeninou) a bezolovnatý vzorek nikoli.

4.2 Měření vzorků pájek na komerčně vyráběné analytické stanici

Měření bylo provedeno na analytické stanici firmy PalmSens [21]. Základní parametry analytické stanice jsou:

- napájení: akumulátorové (Ni-MH),
- rozsah výstupního potenciálu: ±2 V,
- rozlišení výstupního potenciálu: 1 mV,
- proudový rozsah: 1 nA až 10 mA,
- maximální výstupní proud: 10 mA,
- rozlišení proudu: 0,1% z rozsahu,
- četnost měření: max. 40 kHz.

Obr. 47: *Analytická stanice firmy PalmSens [21]*

Úkolem měření vzorků na analytické stanici PalmSens bylo nalézt takovou metodu detekce olova, která splňuje podmínku jednoznačnosti detekce (dostatečná citlivost metody pro stanovení olova, necitlivost na ostatní kovy obsažené ve vzorcích pájek) a bude ji možné použít v konstruovaném detekčním přístroji. Na základě studia elektrochemických metod [2], [3], [4] byly zvoleny tři metody, kterými bylo měření provedeno: cyklická voltametrie, „square-wave“ voltametrie a diferenciální pulzní voltametrie. Parametry jednotlivých metod byly experimentálně voleny tak, aby byl výsledek měření co nejlepší.

Jako pracovní roztok byl použit acetátový pufr (CH_3COOH - CH_3COONa) s pH 4,6. Acetátový roztok je připraven jako vodný roztok obsahující 0,2м·CH_3COOH a 0,2м·CH_3COONa. Předpis pro přípravu 200 ml acetátového pufru s pH 4,6:

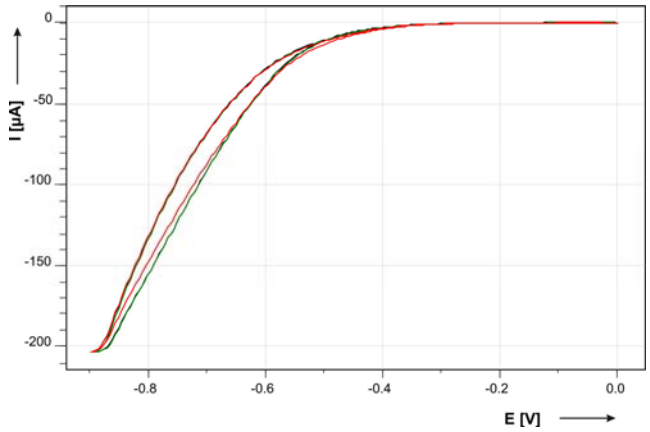
- 102 ml 0,2м roztoku $C_2H_4O_2$ se mísí s 98 ml 0,2м roztoku $C_2H_3O_2Na$ za normální teploty (20°C), pH se mění s teplotou nepatrně

Do skleněné nádoby určené pro elektrochemická měření byly odměřeny 2 ml acetátového pufru. Do pufru bylo odpipetováno 30 µl vzorku pájky rozpuštěného v koncentrované kyselině dusičné (HNO_3). Množství pájky ve vzorku připraveného z olovnaté pájky (SnPb) bylo 6 BGA kuliček (6x 0,002g = 0,012g), ve vzorku bezolovnaté pájky (SAC) bylo 24 BGA kuliček (24x 0,0005g = 0,012g). Hmotnost rozpuštěné pájky v obou vzorcích je tedy shodná.

Do takto připraveného pracovního roztoku byly vloženy elektrody. Pracovní elektroda (WE) byla zvolena uhlíková (C), referenční elektroda (RE) stříbro-chloridová (Ag/AgCl) a pomocná elektroda (AE) platinová (Pt). Při měření bylo využíváno tzv. „tříelektrodového" zapojení.

Metoda cyklické voltametrie (CV)

Pro metodu cyklické voltametrie byly nastaveny následující parametry: změna potenciálu od -0,9 V do 0 V (a zpět). Potenciál jednoho kroku 5 mV a strmost změny potenciálu 50 mV/s. Na obr. 48 je křivka naměřená v pufru bez přidaného vzorku. Počet přeběhů potenciálu = 3.

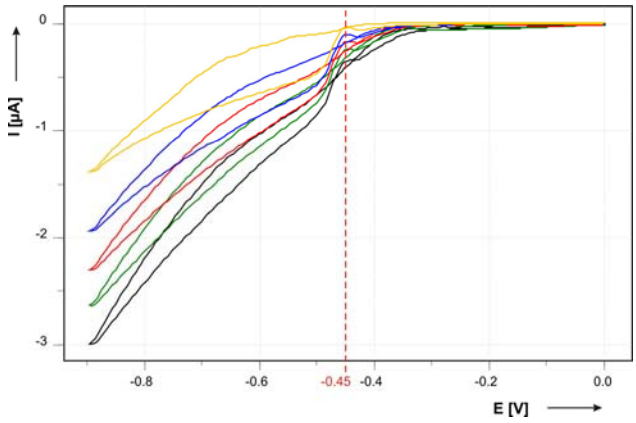


Obr. 48: *Metoda CV - křivka pufru (N=3)*

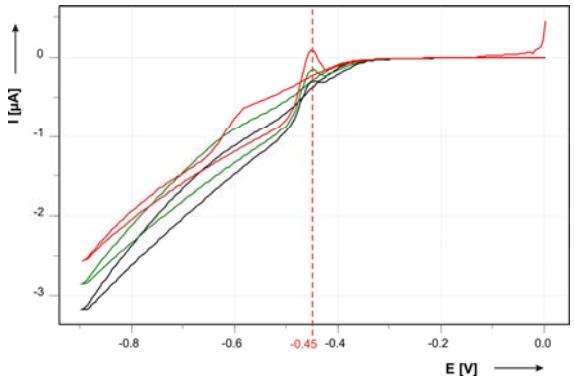
Přidáním 30 µl vzorku olovnaté pájky se základní křivka z obr. 48 změní. Na obr. 49 je průběh naměřený za stejných podmínek jako předchozí, ale s přidáním vzorku olovnaté pájky. Počet průběhů potenciálu = 5. První průběh je znázorněn žlutou barvou, poslední průběh barvou žlutou. To obecně platí pro všechny naměřené průběhy. Od poslední křivky, která je vždy černá se zpětně mění barvy zelená, červená, modrá a žlutá (zde první).

Na křivkách je patrná vlna olova. Půlvlnný potenciál vlny olova je -0,45 V. Nevýhodou je, že velikost vlny je poměrně malá (cca 0,2 µA). Pro zvýšení citlivosti metody cyklické voltametrie lze použít tzv. „akumulaci", která spočívá v zavedení konstantního potenciálu po definovanou dobu před začátkem měření. Po uplynutí doby akumulace je bezprostředně zahájeno měření od jednoho nastaveného potenciálu ke druhému. Na obr. 50 a 51 je

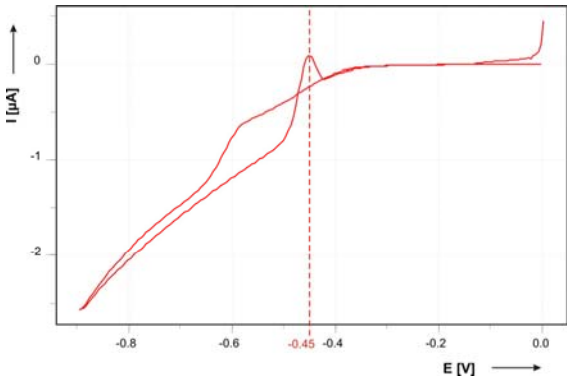
zobrazena křivka naměřená ve stejném roztoku se stejnými parametry měření s použitím akumulace na potenciálu -0,7 V po dobu 120s.



Obr. 49: *Metoda CV - křivka 30µl vzorku olovnaté pájky (N=5)*

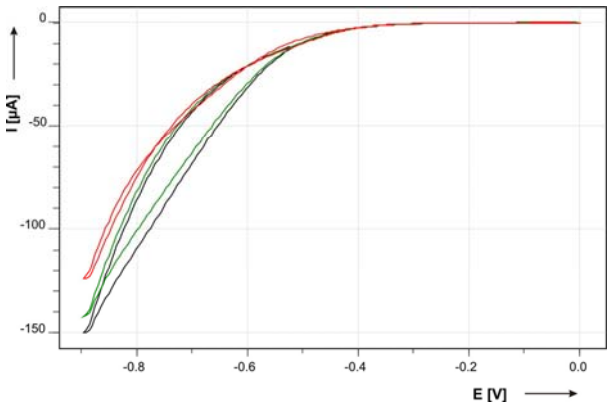


Obr. 50: *Metoda CV - křivka 30µl vzorku olovnaté pájky (N=3) s akumulací na -0,7 V po dobu 120s*



Obr. 51: *Metoda CV - křivka 30µl vzorku olovnaté pájky (N=1) s akumulací na -0,7 V po dobu 120s*

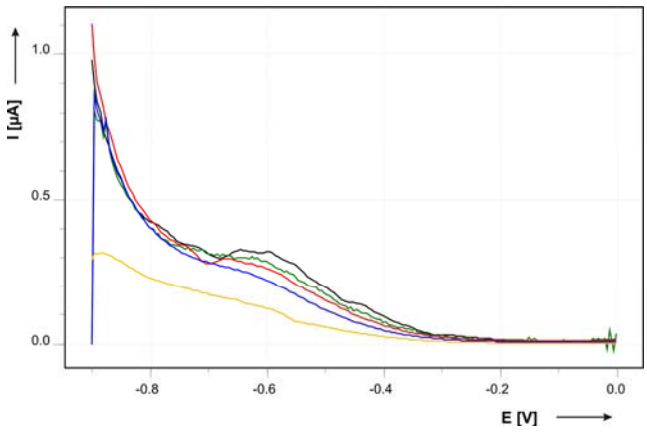
Z naměřených křivek je patrné, že v tomto případě akumulace zvýší citlivost přibližně 2x. Velikost vlny olova je 0,45 µA. Při měření vzorku bezolovnaté pájky (30 µl) je naměřený průběh podobný základní CV křivce pufru. Nejsou zde patrné vlny žádných kovů viz. obr. 52.



Obr. 52: *Metoda CV - křivka 30µl vzorku bezolovnaté pájky (N=3)*

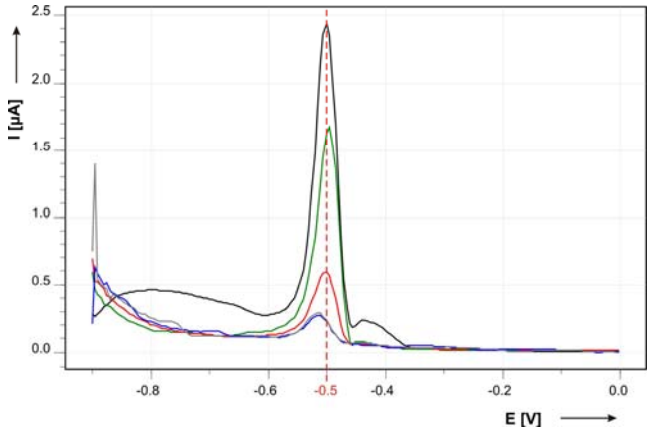
Metoda „square-wave“ voltametrie (SW)

Pro metodu „square-wave“ voltametrie byly nastaveny následující parametry: změna potenciálu od -0,9 V do 0 V, potenciál jednoho kroku 5 mV a potenciál impulzu 25 mV. Na obr. 53 je znázorněna křivka naměřená pro pufr bez přidaného vzorku. Frekvence impulsů jsou nastavovány od 1Hz do 25Hz.



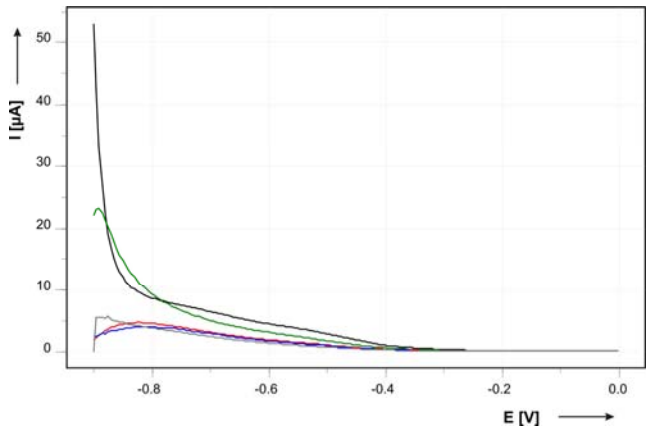
Obr. 53: *Metoda SW – křivka pufru*

Přidáním 30 µl vzorku olovnaté pájky se základní křivka z obr. 53 změní. Frekvence impulsů jsou nastavovány od 1Hz do 25Hz. Z obr. 54 je dobře patrná vlna olova na potenciálu 0,5 V. Výška vlny olova se vzrůstající frekvencí klesá. Při frekvenci 1 Hz má vlna výšku 2,416 µA, při frekvenci 5 Hz má výšku 1,614 µA a při frekvenci 15 Hz má výšku už jen 0,523 µA.



Obr. 54: *Metoda SW – křivka 30µl vzorku olovnaté pájky pro frekvence pulsů 1 Hz až 25 Hz*

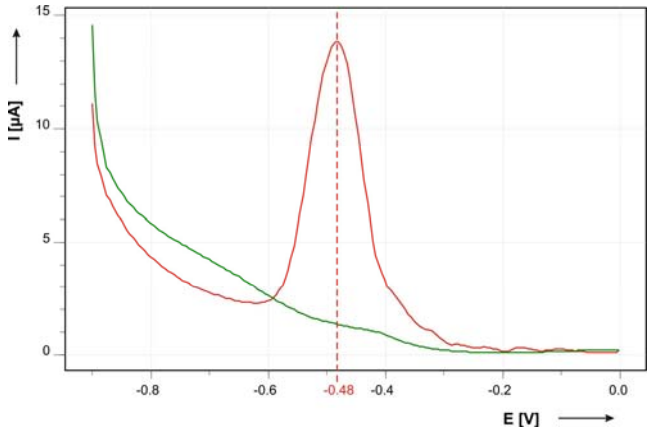
Při měření vzorku bezolovnaté pájky (30 µl) je naměřený průběh podobný základní SW křivce pufru. Nejsou zde patrné vlny žádných kovů viz. obr. 55. Křivky jsou opět měřeny pro uvedený rozsah frekvencí.



Obr. 55: *Metoda SW – křivka 30µl vzorku bezolovnaté pájky pro frekvence pulsů 1 Hz až 25 Hz*

Metoda diferenciální pulzní voltametrie (DP)

Pro metodu diferenciální pulzní voltametrie byly nastaveny následující parametry: změna potenciálu od -0,9 V do 0 V, potenciál jednoho kroku 5 mV a potenciál impulzu 25 mV. Pomocí této metody se podařilo dosáhnout nejlepších výsledků. Na obr. 56 jsou zobrazeny průběhy pro měření olovnatého (červená) a bezolovnatého vzorku (zelená).



Obr. 56: *Metoda DP – křivka 30µl vzorku bezolovnaté pájky (zeleně) a 30 µl olovnaté pájky (červeně)*

Křivka pro olovnatý vzorek vykazuje jednoznačně detekovatelnou vlnu olova na potenciálu -0,48 V. Velikost vlny je 11,2 µA, což je nejvíce ze všech použitých metod. Křivka pro pufr bez přidaných vzorků je téměř shodná s průběhem pro vzorek bezolovnaté pájky.

Shrnutí výsledků měření vzorků pájek pomocí analytické stanice fy PalmSens

Metoda cyklické voltametrie umožňuje rozeznat vzorek olovnaté pájky od vzorku pájky bezolovnaté. Velikost vlny olova je 0,2 µA. Je to hodnota příliš malá k jednoznačnému určení. Použitím akumulace se citlivost metody zvýší cca 2x (obr. 50 a 51). Metodu cyklické voltametrie lze vzhledem k její nedostatečné citlivosti označit za nevhodnou pro použití ve vyhodnocovacím algoritmu přístroje.

Lepších výsledků bylo dosaženo pomocí metody „square-wave“ voltametrie. Při vhodné volbě měřících podmínek bylo dosaženo velikosti vlny olova 2,4 µA. Výhodou metody je (z hlediska aplikace v přístroji) relativně jednoduché generování měřícího průběhu potenciálu viz. kap. 2.2.

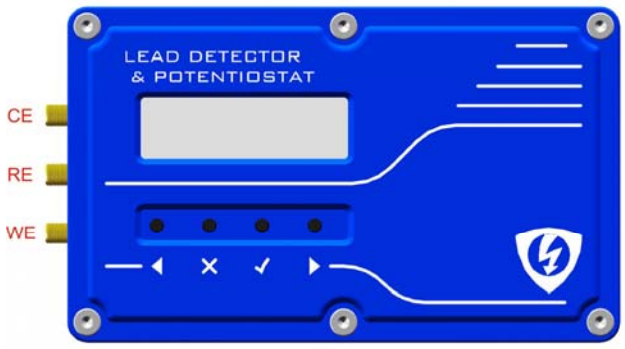
Nejlepších výsledků se podařilo dosáhnout pomocí metody diferenciálně pulzní voltametrie. Její citlivost je pro dané vzorky 56x vyšší než u metody cyklické voltametrie a 12x vyšší než u metody square-wave“ voltametrie. Velikost vlny olova byla naměřena 11,2 µA. Průběh naměřený pro vzorek bezolovnaté pájky nevykazuje žádné vlny a je téměř totožný s vlnou pufru bez vzorku.

Vzhledem k nejvyšší citlivosti byla zvolena pro vyhodnocovací algoritmus přístroje metoda diferenciálně pulzní voltametrie, i za cenu složitějšího generování měřícího průběhu potenciálu viz. kap. 4.3.

4.3 Měření vzorků pájek na zkonstruovaném přístroji

Při měření vzorků na analytické stanici firmy PalmSens byla určena nejvhodnější měřící metoda. Metoda byla implementována do zkonstruovaného přístroje viz. kap. 3. Základní parametry přístroje:

- napájení: akumulátorové (Li-Ion),
- rozsah výstupního potenciálu: ±2 V,
- rozlišení výstupního potenciálu: 0,1 mV,
- proudový rozsah: pevně nastavený na ±20 μA,
- maximální výstupní proud: 30 mA,
- rozlišení proudu: 0,1% z rozsahu.

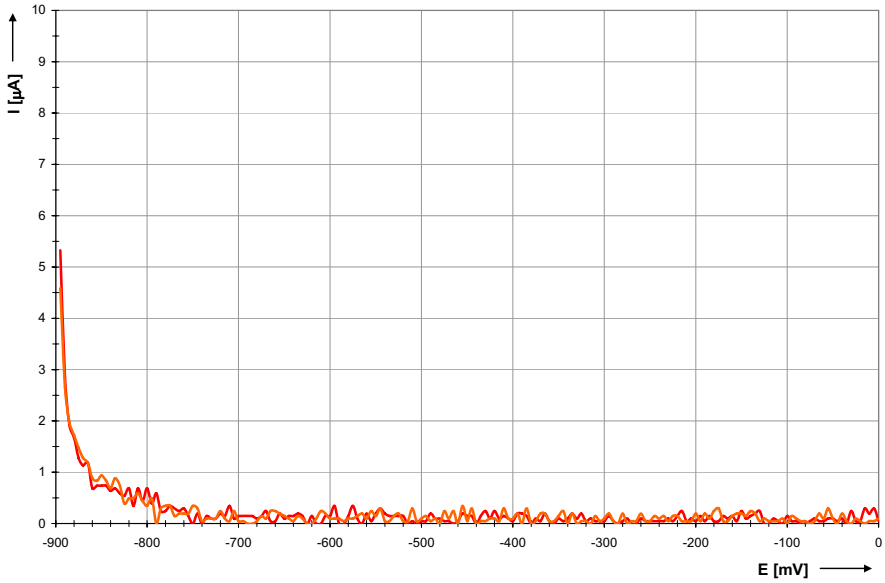


Obr. 57: *Zkonstruovaný přístroj*

Naměřené výsledky

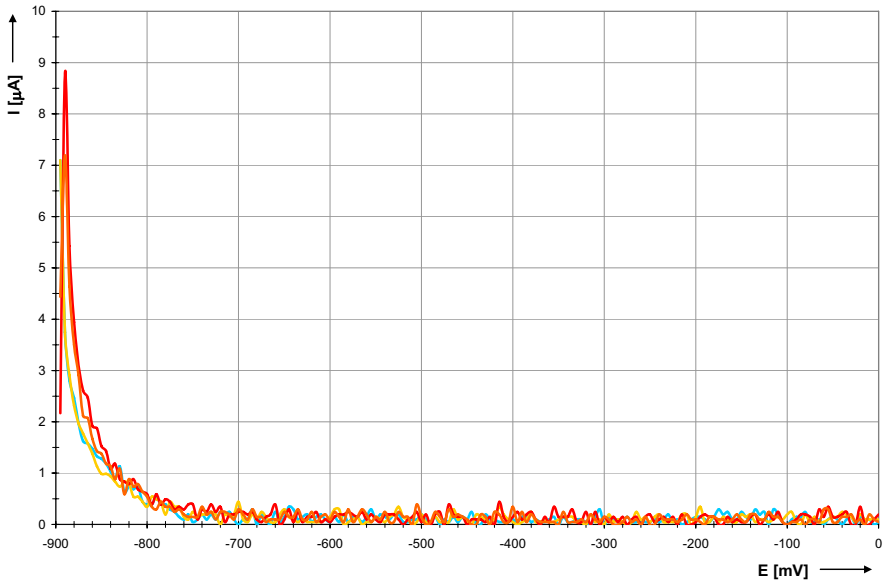
Cílem měření pomocí zkonstruovaného přístroje bylo ověřit jeho parametry a úspěšnost detekce olova ve vzorcích. Pro měření byla použita metoda diferenciálně pulzní voltametrie, která byla v kap. 4.2 vyhodnocena jako nejvhodnější. Měřící metoda byla implementována do řídicího programu. Parametry metody jsou shodné, jako u měření na analytické stanici PalmSens, tj.: změna potenciálu od -0,9 V do 0 V, potenciál jednoho kroku 5 mV a potenciál impulzu 25 mV. Řídicí program přístroje zaznamenává hodnoty proudové odezvy během měření. V oblasti výskytu potenciálové vlny olova (cca -550 mV až -450 mV) program analyzuje velikost proudové odezvy. Pokud program v této oblasti detekuje proudovou vlnu, vyhodnotí měřený vzorek jako olovnatou pájku. Pokud v oblasti proudová vlna detekována není, program vyhodnotí vzorek jako pájku bezolovnatou. Aby byla měření pomocí analytické stanice a měření pomocí zkonstruovaného přístroje porovnatelná, probíhala obě měření za stejných podmínek (shodný pufr, shodné vzorky pájky, elektrody, koncentrace, přibližně

shodná teplota v laboratoři 23°C, ...). Na obr. 58 jsou zobrazeny naměřené křivky pro základní pufr bez přidaného vzorku pájky.



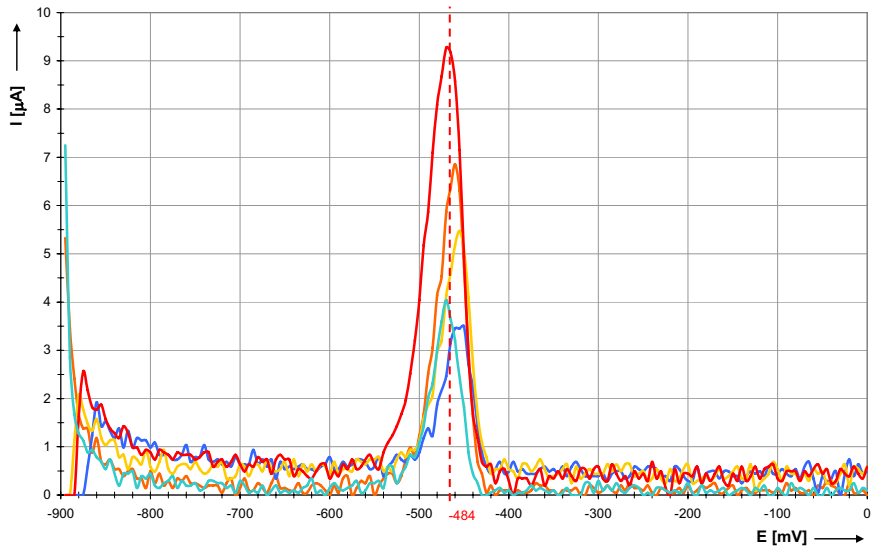
Obr. 58: *Průběh proudové odezvy základního pufru bez přidaného vzorku pájky (měřeno 2x)*

Přidáním 30 µl vzorku bezolovnaté pájky se průběh od křivky základního pufru téměř nezmění obr. 59. Měření roztoku bylo provedeno 4x bezprostředně za sebou (různé barvy křivek). Z naměřených průběhů je patrné, že opakovatelnost měření je vysoká.



Obr. 59: *Průběh proudové odezvy pufru se 30 µl vzorku bezolovnaté pájky (měřeno 4x)*

Přidáním vzorku olovnaté pájky se průběh křivky značně odlišuje od průběhu základního pufru, či průběhu bezolovnatého vzorku. V rozmezí potenciálů -550 mV až -450 mV je dobře patrná vlna olova. Postupně bylo přidáváno množství vzorku od 30-ti do 60-ti µl. Výška vlny je úměrná množství vzorku (koncentraci olova). Čím je vyšší koncentrace olova, tím je vlna vyšší. Pro množství vzorku 30 µl je výška vlny 3,5 µA, pro množství 60 µl je výška vlny 9,3 µA. Jako spodní limit pro úspěšnou detekci bylo stanoveno množství 30 µl vzorku.

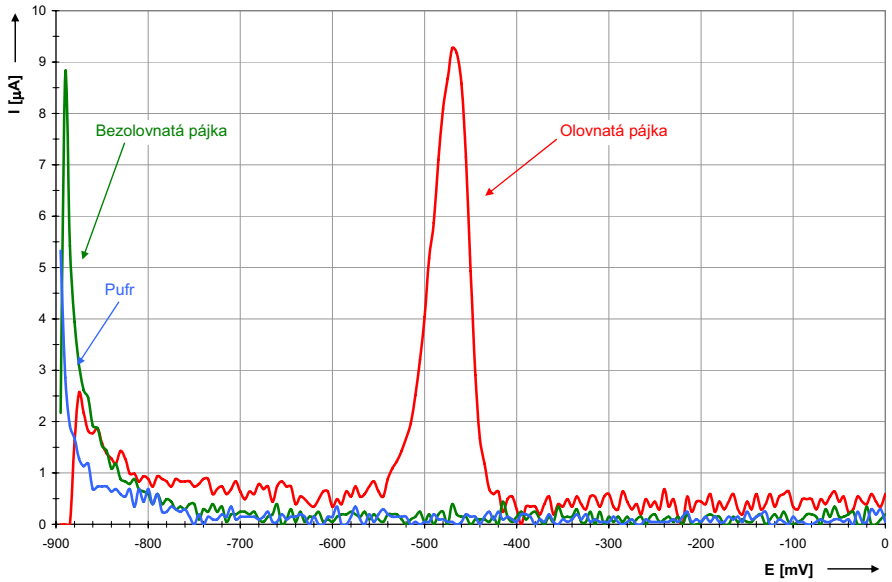


Obr. 60: *Průběh proudové odezvy pufru se vzorkem olovnaté pájky – množství vzorku 30 až 60 µl*

Pro srovnání naměřených výsledků byl sestaven graf, který je uveden na obr. 61. V grafu je velice dobře patrný rozdíl mezi základním pufrem bez přidaného vzorku, pufrem se vzorkem bezolovnaté pájky a pufrem se vzorkem olovnaté pájky.

Shrnutí výsledků měření vzorků pájek pomocí zkonstruovaného přístroje

Srovnáním naměřených výsledků pomocí analytické stanice firmy PalmSens a výsledků naměřených pomocí zkonstruovaného přístroje lze usoudit, že zkonstruovaný přístroj pracuje správně a s dostatečnou citlivostí. Jediným rozdílem oproti průběhům z analytické stanice je vyšší šum, který se promítá do naměřených křivek. Obslužný program analytické stanice obsahuje algoritmus, který výsledné průběhy vyhlazuje a tím tento šum odstraní.



Obr. 61: *Průběhy proudových odezev pro pufr, vzorek bezolovnaté a vzorek olovnaté pájky*

5 ZÁVĚR

Během řešení diplomové práce byly prozkoumány různé elektrochemické metody. Z nich byly vybrány tři nejvhodnější, pomocí kterých bylo provedeno měření. Pomocí experimentu s rozpouštěním pájky a pracovním roztokem byl stanoven předpis pro přípravu pracovního roztoku umožňujícího jednoznačnou detekci olova v pájkách.

Jako výstup práce byl zkonstruován jednoúčelový přístroj umožňující pomocí jednoduchého postupu provést detekci přítomnosti olova v pájce. Potěšující skutečností je, že náklady na výrobu zařízení nepřesáhly 10000 Kč (cena prototypu). Při porovnání ceny zařízení s cenou komerčně vyráběné analytické stanice, vychází zkonstruovaný přístroj minimálně 20x levněji. Analytická stanice sice umožňuje použití rozličných metod měření, ale práce s přístrojem vyžaduje profesionální obsluhu, která má znalosti z oboru analytické chemie. Zkonstruovaný přístroj dosáhne při detekci olova srovnatelných výsledků, navíc k jeho obsluze stačí zaškolená osoba, která bude postupovat podle návodu.

Jako návrh na zlepšení lze uvést například zdokonalení řídicího programu. Pokud by byl řídicí program upraven a zdokonalen, bylo by možné využít plného potenciálu přístroje a využít ho mimo detekci olova k jiným analytickým měřením. Prostřednictvím komunikačního rozhraní USB lze připojit přístroj k počítači a pokud by byl napsán obslužný program pro PC, bylo by možné naměřené průběhy zobrazovat v reálném čase tak, jak bývá obvyklé u profesionálních analytických stanic. Tím by se zvýšila užitná hodnota zařízení bez nutnosti zásahu do zapojení přístroje – pouze změnou programu.

Realizací výše uvedených výstupů práce se podařilo v plné míře splnit její zadání.

6 LITERATURA

[1] SZENDIUCH, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně – VUTIUM, 2006. 379 stran. ISBN 80-214-3292-6.

[2] TOCKSTEIN, A. *Elektrochemie (vybrané kapitoly)*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984. 120 stran. Číslo publikace 450 – 33529.

[3] VYDRA F., ŠTULÍK K., JULÁKOVÁ E. *Rozpouštěcí polarografie a voltametrie*. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1977. 256 stran.

[4] MAJER,V. *Technické rozbory – Polarografické rozbory (2. rozšířené vydání)*. Praha: Technicko – vědecké nakladatelství, 1952. 196 stran.

[5] SZENDIUCH, I. a kolektiv. *Technologie elektronických obvodů a systémů.* Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2002. 238 stran. ISBN 80-214-2072-3.

[6] MONK, P. *Fundamentals of Electroanalytical Chemistry. Systems under Diffusion Control.* USA: John Wiley & Sons Inc., 2001. 361 stran. ISBN 0-471-88140-6.

[7] DIAMOND, D. *Principles of chemical and biological sensors. Amperometric methods of detection.* New York, Chichester, Weinheim, Singapore, Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 1998. 320 stan. ISBN 0-471-54619-4.

[8] Kovohutě Příbram: *Sortiment měkkých pájek*. [cit. 2008-05-19]. Dostupné z: http://www.kovopb.cz/cz/pajky_p.html

[9] ATMEL Corporation: *Katalogový list mikroprocesoru ATmega32*. [cit. 2008-05-19]. Dostupné z: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2503.pdf

[10] ATMEL Corporation: *Katalogový list paměti AT24C256*. [cit. 2008-05-19]. Dostupné z: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc5279.pdf

[11] Future Technology Devices International Ltd.: *Katalogový list obvodu FTDI232R*. [cit. 2008-05-19]. Dostupné z: http://www.ftdichip.com/Documents/DataSheets/DS_FT232R.pdf

[12] Texas Instruments Inc.: *Katalogový list převodníku DAC7634.* [cit. 2008-05-19]. Dostupné z: http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/dac7634.pdf

[13] Texas Instruments Inc.: *Katalogový list převodníku ADS1211.* [cit. 2008-05-19]. Dostupné z: http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ads1211.pdf

[14] Texas Instruments Inc.: *Katalogový list OZ OPA277.* [cit. 2008-05-19]. Dostupné z: http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa277.pdf

[15] Texas Instruments Inc.: *Katalogový list OZ TLC2652.* [cit. 2008-05-19]. Dostupné z: http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tlc2652am.pdf

[16] Texas Instruments Inc.: *Katalogový list OZ OPA606.* [cit. 2008-05-19]. Dostupné z: http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa606.pdf

[17] Texas Instruments Inc.: *Katalogový list OZ NE5534.* [cit. 2008-05-19]. Dostupné z: http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ne5534.pdf

[18] Electronic Assembly G.M.B.H.: *Katalogový list displeje DOGM16.* [cit. 2008-05-19]. Dostupné z: http://www.lcd-module.de/deu/pdf/doma/dog-m.pdf

[19] DOSTÁL, J. *Operační zesilovače (1. inovované vydání).* Praha: BEN – technická literatura, 2005. 536 stran. ISBN 80-7300-049-0.

[20] STMicroelectronics: *Katalogový list stabilizátoru LF50CDT.* [cit. 2008-05-19]. Dostupné z: http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/2574.pdf

[21] PalmSens: *Internetové stránky firmy.* [cit. 2008-05-19]. Dostupné z: http://www.palmsens.com

[22] STARÝ, J. *Montážní a propojovací technologie.* Brno: Skriptum VUT, 2006.

[23] Kolektiv pracovníků Výzkumného ústavu ochrany materiálu, Uhříněves. *Korosní sborník.* Praha: Průmyslové nakladatelství, 1952. 536 stran.

7 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: *Chronoamperometrie* ... *11*
Obr. 2: *Potenciodynamická metoda* ... *11*
Obr. 3: *Cyklická voltametrie* ... *11*
Obr. 4: *A.C. polarografie* ... *12*
Obr. 5: *Pulzní polarografie (Normal pulse polarography)* ... *12*
Obr. 6: *Diferenciální pulzní polarografie (Differential pulse polarography)* ... *12*
Obr. 7: *Schodovitá voltametrie (Staircase voltametry)* ... *13*
Obr. 8: *„Square-wave" voltametrie* ... *13*
Obr. 9: *Galvanostatická chronopotenciometrie* ... *13*
Obr. 10: *Lineární (dynamická) chronopotenciometrie* ... *14*
Obr. 11: *Oscilografická polarografie* ... *14*
Obr. 12: *A.C. chronopotenciometrie* ... *14*
Obr. 13: *Schéma zapojení jednoduchého potenciostatu* ... *16*
Obr. 14: *Schematické znázornění senzoru* ... *17*
Obr. 15: *Reálná podoba senzoru* ... *17*
Obr. 16: *Rozmístění prvků* ... *20*
Obr. 17: *Blokové schéma přístroje* ... *21*
Obr. 18: *Blokové schéma digitální části přístroje* ... *21*
Obr. 19: *Mikroprocesor ATmega 32 firmy Atmel [9]* ... *23*
Obr. 20: *AVR Dragon – připojení sběrnice JTAG [9]* ... *23*
Obr. 21: *Blokové schéma převodníku A/D - ADS1211* ... *25*
Obr. 22: *Blokové schéma převodníku D/A – DAC7634* ... *26*
Obr. 23: *Principiální schéma funkce převodníku D/A (váhová síť R-2R)* ... *26*
Obr. 24: *Modul displeje LCD* ... *27*
Obr. 25: *Paměť AT24C256* ... *28*
Obr. 26: *Schéma zapojení klávesnice* ... *29*
Obr. 27: *Schéma zapojení relé* ... *30*
Obr. 28: *Blokové schéma analogové části přístroje* ... *32*
Obr. 29: *Schéma zapojení Butterworthova filtru* ... *32*
Obr. 30: *Simulace frekvenční charakteristiky Butterworthova filtru* ... *33*
Obr. 31: *Schéma zapojení výstupního zesilovače* ... *34*
Obr. 32: *Schéma zapojení sledovače* ... *34*
Obr. 33: *Schéma zapojení dolnofrekvenční propusti a jeho frekvenční charakteristika* ... *35*
Obr. 34: *Schéma zapojení obvodu pro úpravu úrovně signálu* ... *36*
Obr. 35: *Schéma zapojení převodníku proudu na napětí* ... *36*
Obr. 36: *Schéma zapojení zdroje referenčního napětí* ... *37*
Obr. 37: *Schéma zapojení napájecího zdroje* ... *38*
Obr. 38: *Prostorové uspořádání bloků přístroje, řešení oddělených zemí* ... *39*
Obr. 39: *Konstrukční řešení přístroje – konstrukční rám* ... *40*
Obr. 40: *Konstrukční řešení přístroje – základní deska a ovládací panel* ... *41*
Obr. 41: *Konstrukční řešení přístroje – zdroj* ... *41*
Obr. 42: *Základní grafika displeje* ... *42*
Obr. 43: *Probíhá detekce* ... *42*
Obr. 44: *Výsledek detekce – bezolovnatá pájka* ... *42*
Obr. 45: *Výsledek detekce – olovnatá pájka* ... *42*
Obr. 46: *Rozpouštěcí test* ... *43*
Obr. 47: *Analytická stanice firmy PalmSens [21]* ... *45*
Obr. 48: *Metoda CV - křivka pufru (N=3)* ... *46*
Obr. 49: *Metoda CV - křivka 30µl vzorku olovnaté pájky (N=5)* ... *47*
Obr. 50: *Metoda CV - křivka 30µl vzorku olovnaté pájky (N=3) s akumulací na -0,7 V po dobu 120s* ... *47*
Obr. 51: *Metoda CV - křivka 30µl vzorku olovnaté pájky (N=1) s akumulací na -0,7 V po dobu 120s* ... *47*
Obr. 52: *Metoda CV - křivka 30µl vzorku bezolovnaté pájky (N=3)* ... *48*

Obr. 53: *Metoda SW – křivka pufru 48*
Obr. 54: *Metoda SW – křivka 30µl vzorku olovnaté pájky pro frekvence pulsů 1 Hz až 25 Hz 49*
Obr. 55: *Metoda SW – křivka 30µl vzorku bezolovnaté pájky pro frekvence pulsů 1 Hz až 25 Hz 49*
Obr. 56: *Metoda DP – křivka 30µl vzorku bezolovnaté pájky (zeleně) a 30 µl olovnaté pájky (červeně) 50*
Obr. 57: *Zkonstruovaný přístroj 51*
Obr. 58: *Průběh proudové odezvy základního pufru bez přidaného vzorku pájky (měřeno 2x) 52*
Obr. 59: *Průběh proudové odezvy pufru se 30 µl vzorku bezolovnaté pájky (měřeno 4x) 52*
Obr. 60: *Průběh proudové odezvy pufru se vzorkem olovnaté pájky – množství vzorku 30 až 60 µl 53*
Obr. 61: *Průběhy proudových odezev pro pufr, vzorek bezolovnaté a vzorek olovnaté pájky 54*

8 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Výkresová dokumentace desky plošných spojů – ZÁKLADNÍ DESKA
Příloha 2 – Výkresová dokumentace desky plošných spojů – OVLÁDACÍ PANEL
Příloha 3 – Výkresová dokumentace desky plošných spojů – ZDROJ

PŘÍLOHA 1

Výkresová dokumentace desky plošných spojů

ZÁKLADNÍ DESKA

Příloha obsahuje:

Schéma zapojení	str. 2
Osazovací výkres – strana součástek (TOP)	str. 3
Osazovací výkres – spodní strana (BOTTOM)	str. 4
Motiv plošného spoje – strana součástek (TOP)	str. 5
Motiv plošného spoje – spodní stana (BOTTOM)	str. 6
Soupiska součástek	str. 7

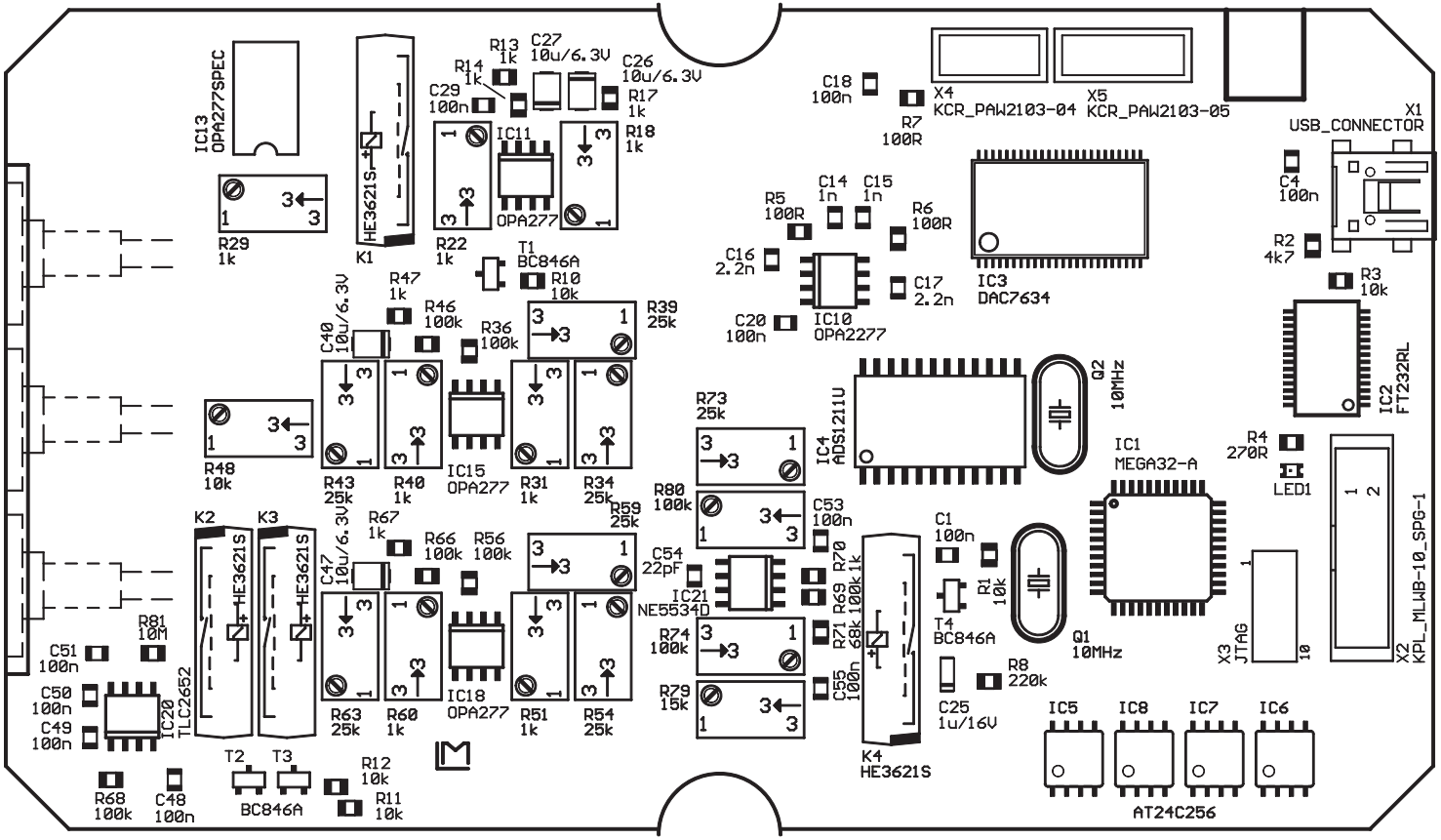
Celkový počet stran: 8

Schéma zapojení základní desky je formátu A3 a je vloženo do samostatné kapsy

Název: Schéma zapojení - Základní deska

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

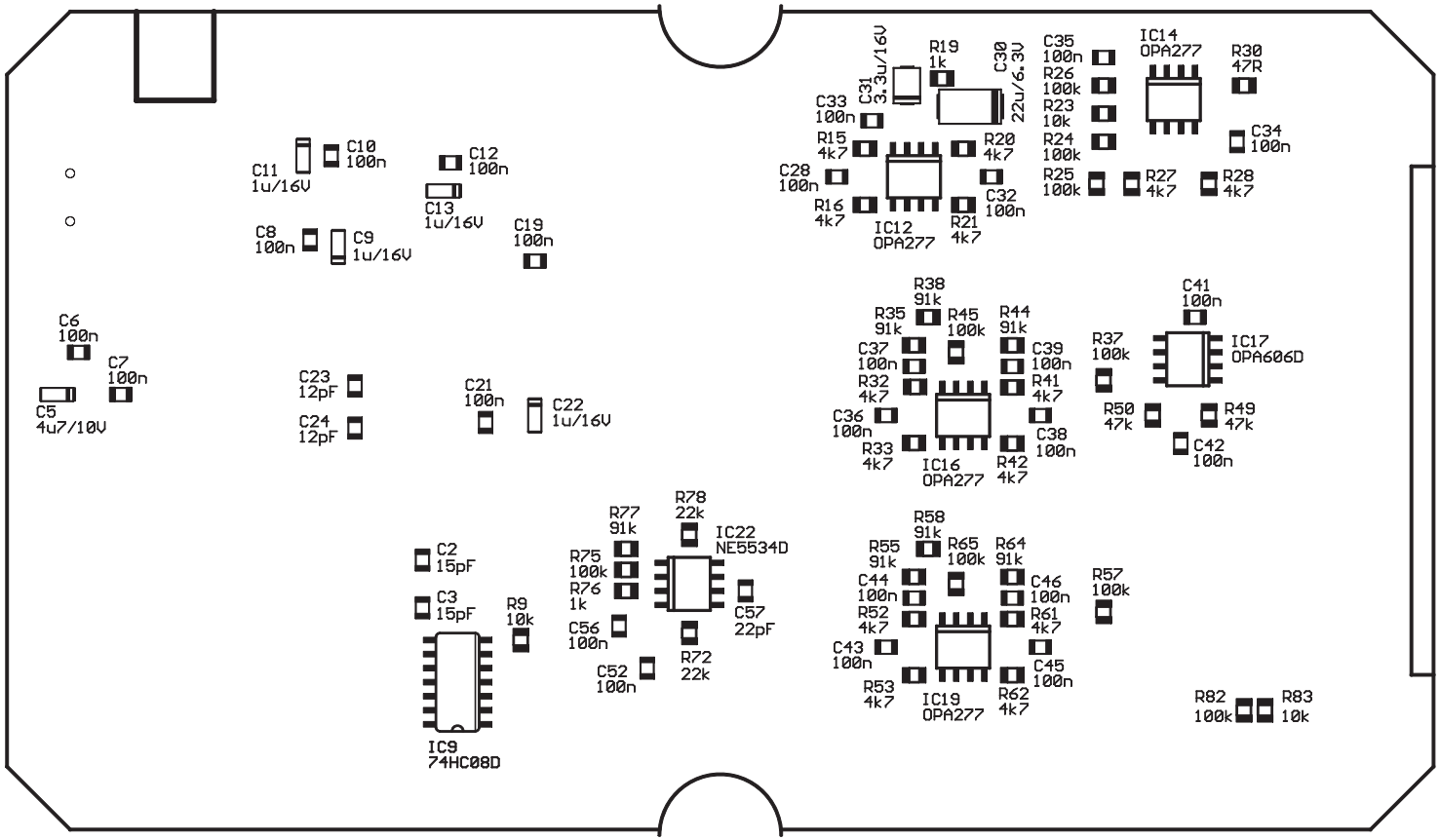
Měřítko:



Název: Osazovací výkres (TOP) - Základní deska

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

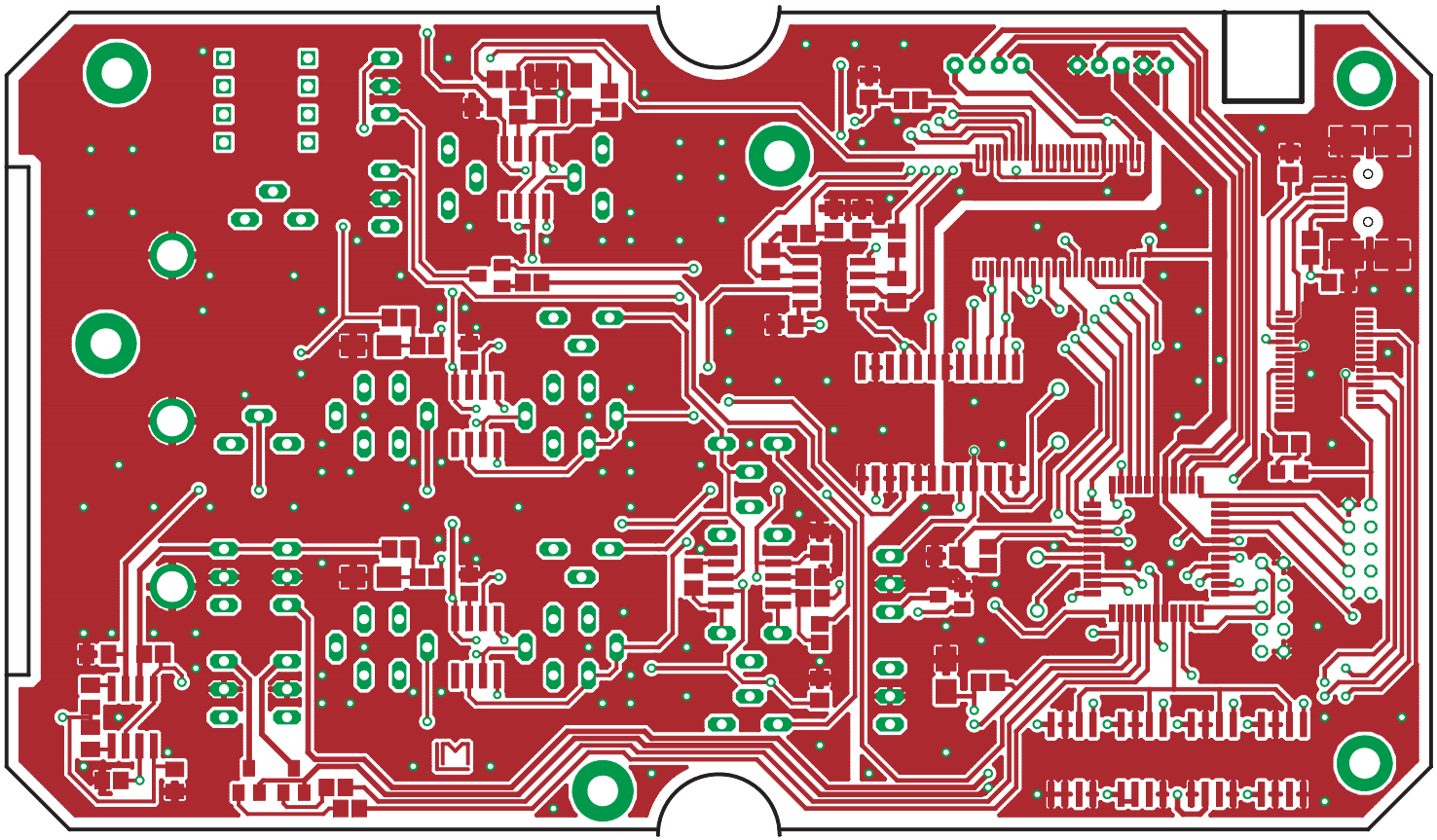
Měřítko: 1,5:1



Název: Osazovací výkres (BOTTOM) - Základní deska

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

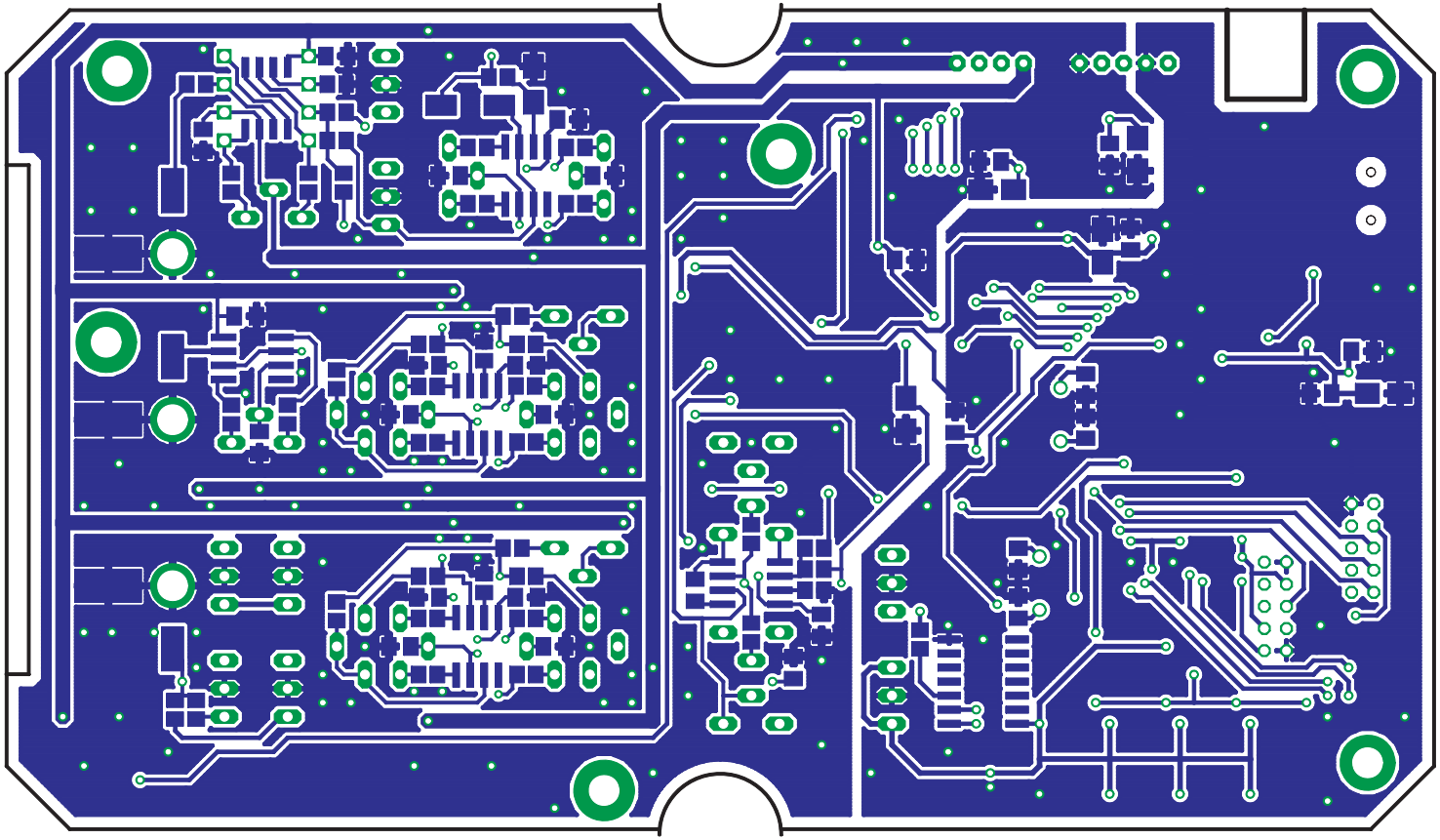
Měřítko: 1,5:1



Název: Motiv plošného spoje (TOP) - Základní deska

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

Měřítko: 1,5:1



Název: Motiv plošného spoje (BOTTOM) - Základní deska

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

Měřítko: 1,5:1

Soupiska součástek

Název	Hodnota	Pouzdro
R1	10k	SMD 0805
R2	4k7	SMD 0805
R3	10k	SMD 0805
R4	270R	SMD 0805
R5	100R	SMD 0805
R6	100R	SMD 0805
R7	100R	SMD 0805
R8	220k	SMD 0805
R9	10k	SMD 0805
R10	10k	SMD 0805
R11	10k	SMD 0805
R12	10k	SMD 0805
R13	1k	SMD 0805
R14	1k	SMD 0805
R15	4k7	SMD 0805
R16	4k7	SMD 0805
R17	1k	SMD 0805
R18	1k	S64Y
R19	1k	SMD 0805
R20	4k7	SMD 0805
R21	4k7	SMD 0805
R22	1k	S64Y
R23	10k	SMD 0805
R24	100k	SMD 0805
R25	100k	SMD 0805
R26	100k	SMD 0805
R27	4k7	SMD 0805
R28	4k7	SMD 0805
R29	1k	S64Y
R30	47R	SMD 0805
R31	1k	S64Y
R32	4k7	SMD 0805
R33	4k7	SMD 0805
R34	25k	S64Y
R35	91k	SMD 0805
R36	100k	SMD 0805
R37	100k	SMD 0805
R38	91k	SMD 0805
R39	25k	S64Y
R40	1k	S64Y
R41	4k7	SMD 0805
R42	4k7	SMD 0805
R43	25k	S64Y
R44	91k	SMD 0805
R45	100k	SMD 0805
R46	100k	SMD 0805
R47	1k	SMD 0805
R48	10k	S64Y
R49	47k	SMD 0805
R50	47k	SMD 0805
R51	1k	S64Y
R52	4k7	SMD 0805
R53	4k7	SMD 0805
R54	25k	S64Y

Název	Hodnota	Pouzdro
R55	91k	SMD 0805
R56	100k	SMD 0805
R57	100k	SMD 0805
R58	91k	SMD 0805
R59	25k	S64Y
R60	1k	S64Y
R61	4k7	SMD 0805
R62	4k7	SMD 0805
R63	25k	S64Y
R64	91k	SMD 0805
R65	100k	SMD 0805
R66	100k	SMD 0805
R67	1k	SMD 0805
R68	100k	SMD 0805
R69	100k	SMD 0805
R70	1k	SMD 0805
R71	68k	SMD 0805
R72	22k	SMD 0805
R73	25k	S64Y
R74	100k	S64Y
R75	100k	SMD 0805
R76	1k	SMD 0805
R77	91k	SMD 0805
R78	22k	SMD 0805
R79	15k	S64Y
R80	100k	S64Y
R81	10M	SMD 0805
R82	100k	SMD 0805
R83	10k	SMD 0805
C1	100n	SMD 0805
C2	15pF	SMD 0805
C3	15pF	SMD 0805
C4	100n	SMD 0805
C5	4u7/10V	A/3216-18W
C6	100n	SMD 0805
C7	100n	SMD 0805
C8	100n	SMD 0805
C9	1u/16V	A/3216-18W
C10	100n	SMD 0805
C11	1u/16V	A/3216-18W
C12	100n	SMD 0805
C13	1u/16V	A/3216-18W
C14	1n	SMD 0805
C15	1n	SMD 0805
C16	2.2n	SMD 0805
C17	2.2n	SMD 0805
C18	100n	SMD 0805
C19	100n	SMD 0805
C20	100n	SMD 0805
C21	100n	SMD 0805
C22	1u/16V	A/3216-18W
C23	12pF	SMD 0805
C24	12pF	SMD 0805
C25	1u/16V	A/3216-18W

Název	Hodnota	Pouzdro
C26	10u/6.3V	B/3528-21W
C27	10u/6.3V	B/3528-21W
C28	100n	SMD 0805
C29	100n	SMD 0805
C30	22u/6.3V	C/6032-28W
C31	3.3u/16V	B/3528-21W
C32	100n	SMD 0805
C33	100n	SMD 0805
C34	100n	SMD 0805
C35	100n	SMD 0805
C36	100n	SMD 0805
C37	100n	SMD 0805
C38	100n	SMD 0805
C39	100n	SMD 0805
C40	10u/6.3V	B/3528-21W
C41	100n	SMD 0805
C42	100n	SMD 0805
C43	100n	SMD 0805
C44	100n	SMD 0805
C45	100n	SMD 0805
C46	100n	SMD 0805
C47	10u/6.3V	B/3528-21W
C48	100n	SMD 0805
C49	100n	SMD 0805
C50	100n	SMD 0805
C51	100n	SMD 0805
C52	100n	SMD 0805
C53	100n	SMD 0805
C54	22pF	SMD 0805
C55	100n	SMD 0805
C56	100n	SMD 0805
C57	22pF	SMD 0805
LED1	červená	SMD 0805
T1	BC846A	SOT23
T2	BC846A	SOT23
T3	BC846A	SOT23
T4	BC846A	SOT23
IC1	ATmega32-A	TQFP44
IC2	FT232RL	SSOP28DB
IC3	DAC7634	SSOP48
IC4	ADS1211U	SO24L
IC5	AT24C256	SO08
IC6	AT24C256	SO08
IC7	AT24C256	SO08
IC8	AT24C256	SO08
IC9	74HC08D	SO14
IC10	OPA2277	SO08
IC11	OPA277	SO08
IC12	OPA277	SO08
IC13	OPA277SPEC	DIL8
IC14	OPA277	SO08
IC15	OPA277	SO08
IC16	OPA277	SO08
IC17	OPA606D	SO08

Název	Hodnota	Pouzdro
IC18	OPA277	SO08
IC19	OPA277	SO08
IC20	TLC2652	SO08
IC21	NE5534D	SO08
IC22	NE5534D	SO08
K1	relé	HE3621S
K2	relé	HE3621S
K3	relé	HE3621S
K4	relé	HE3621S
Q1	10MHz	HC49U-V
Q2	10MHz	HC49U-V
X1	USB konektor	USB_MINI
X2	propojit s X9	KPL_MLWB-10_SPG-1
X3	JTAG konektor	KXL2.00#10SG-6200D
X4	propojit s X11	KCR_PAW2103-04SN
X5	propojit s X12	KCR_PAW2103-05SN
X6	AE	KOAX_PIN
X7	RE	KOAX_PIN
X8	WE	KOAX_PIN

PŘÍLOHA 2

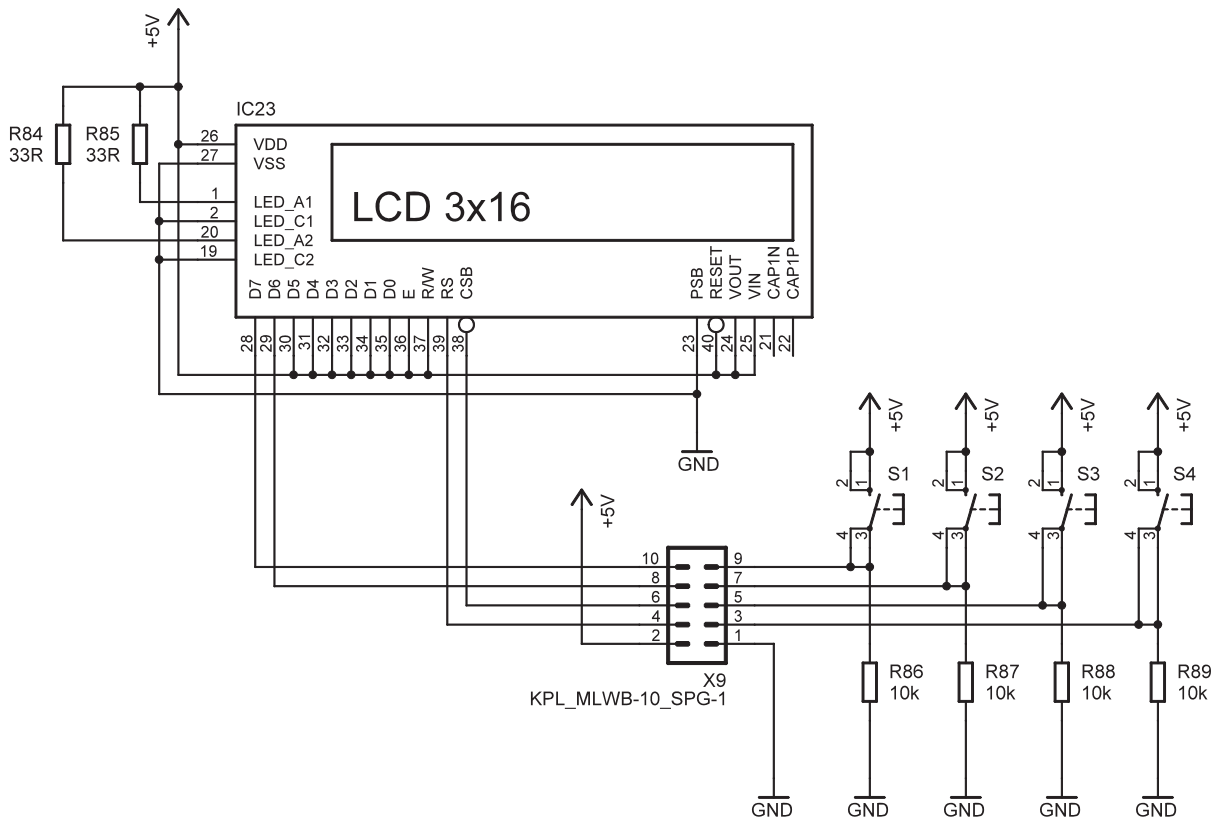
Výkresová dokumentace desky plošných spojů

OVLÁDACÍ PANEL

Příloha obsahuje:

Schéma zapojení	str. 2
Osazovací výkres – strana součástek (TOP)	str. 3
Osazovací výkres – spodní strana (BOTTOM)	str. 4
Motiv plošného spoje – strana součástek (TOP)	str. 5
Motiv plošného spoje – spodní stana (BOTTOM)	str. 6
Soupiska součástek	str. 7

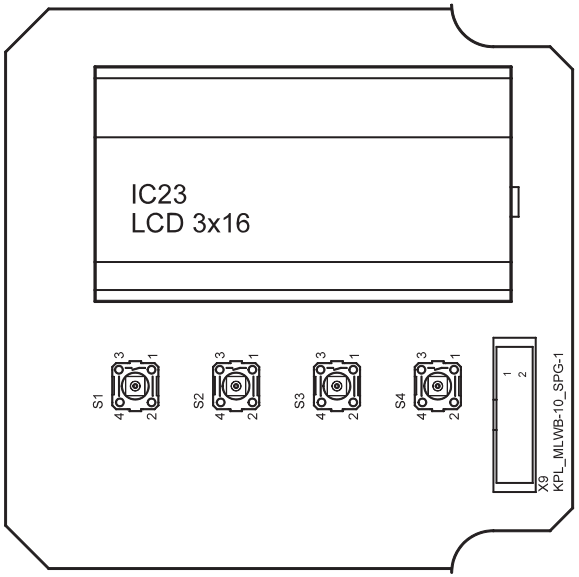
Celkový počet stran: 7



Název: Schéma zapojení - Ovládací panel

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

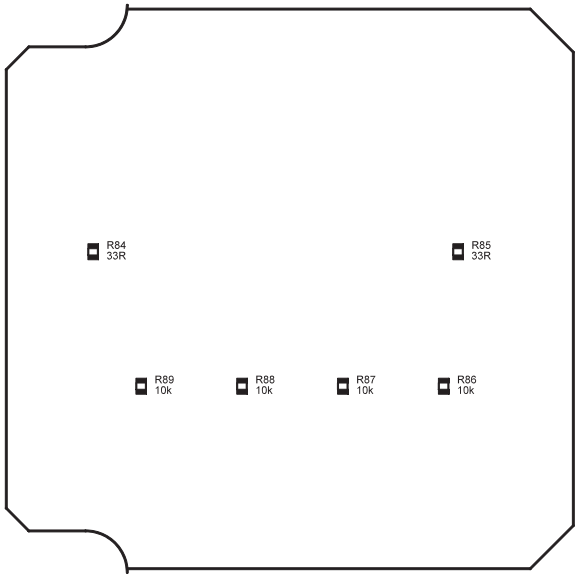
Měřítko: 1:1



Název: Osazovací výkres (TOP) - Ovládací panel

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

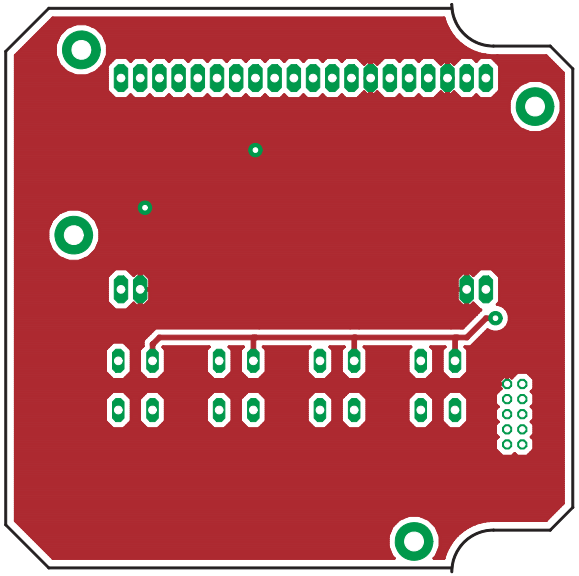
Měřítko: 1:1



Název: Osazovací výkres (BOTTOM) - Ovládací panel

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

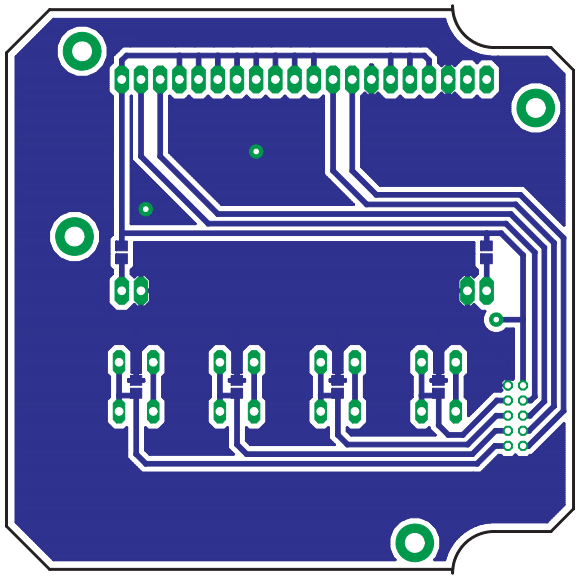
Měřítko: 1:1



Název: Motiv plošného spoje (TOP) - Ovládací panel

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

Měřítko: 1:1



Název: Motiv plošného spoje (BOTTOM) - Ovládací panel

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

Měřítko: 1:1

Soupiska součástek

Název	Hodnota	Pouzdro
R84	33R	SMD 0805
R85	33R	SMD 0805
R86	10k	SMD 0805
R87	10k	SMD 0805
R88	10k	SMD 0805
R89	10k	SMD 0805
S1	LEFT	B3F-10XX
S2	CANCEL	B3F-10XX
S3	OK	B3F-10XX
S4	RIGHT	B3F-10XX
X9	propojit s X2	KPL_MLWB-10_SPG-1
IC23	LCD_3X16	

PŘÍLOHA 3

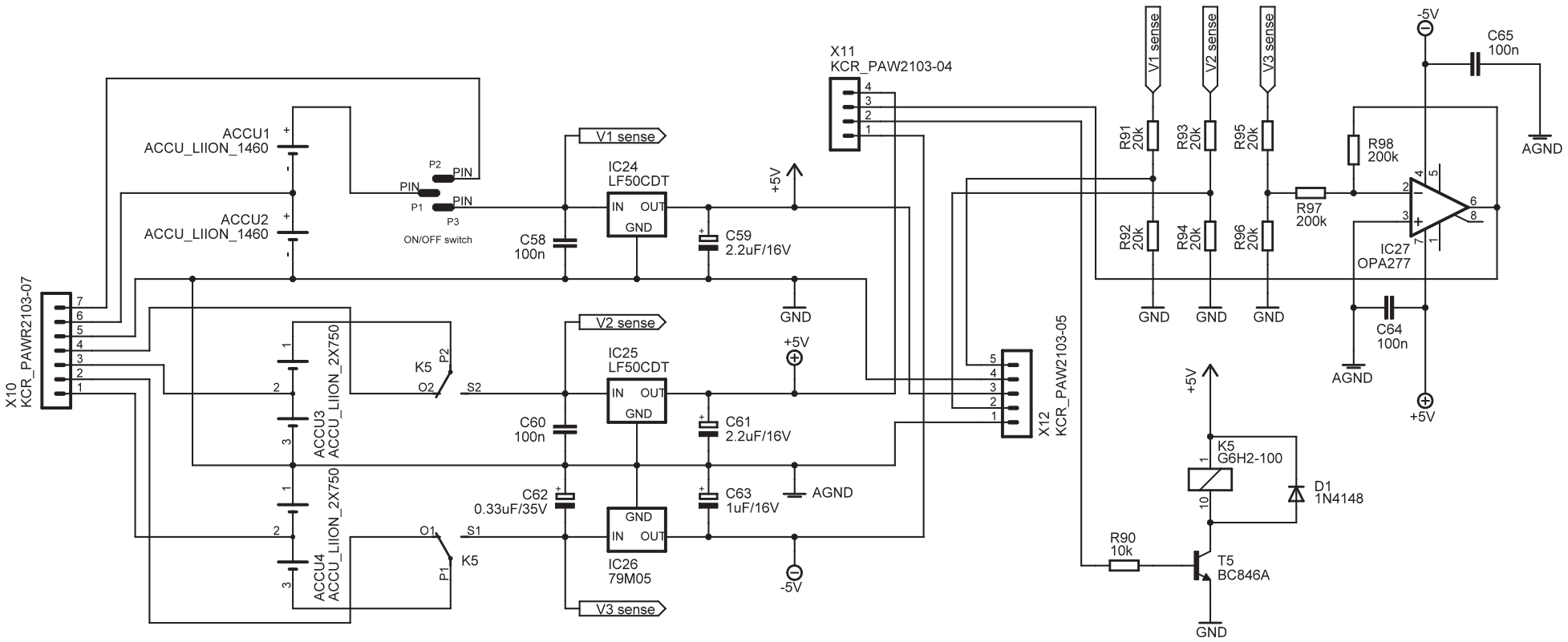
Výkresová dokumentace desky plošných spojů

ZDROJ

Příloha obsahuje:

	Schéma zapojení	str. 2
	Osazovací výkres – strana součástek (TOP)	str. 3
	Osazovací výkres – spodní strana (BOTTOM)	str. 4
	Motiv plošného spoje – strana součástek (TOP)	str. 5
	Motiv plošného spoje – spodní stana (BOTTOM)	str. 6
	Soupiska součástek	str. 7

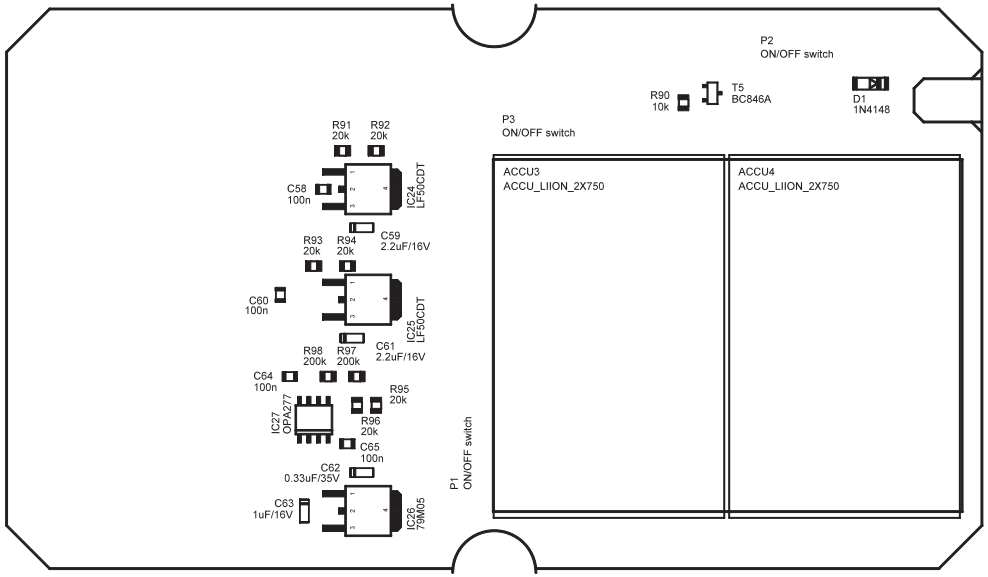
Celkový počet stran: 7



Název: Schéma zapojení - Zdroj

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

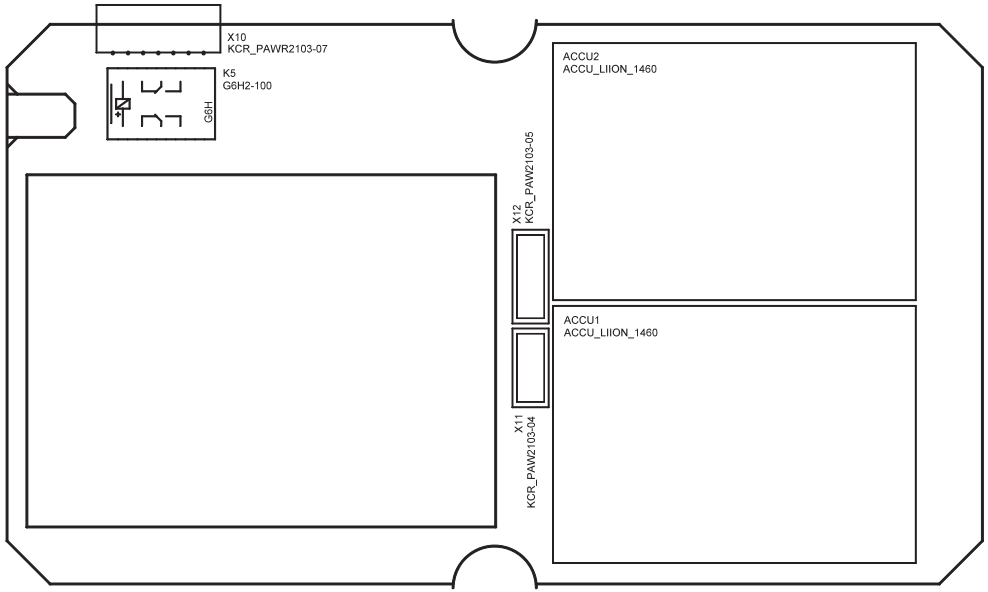
Měřítko: 1:1



Název: Osazovací výkres (TOP) - Zdroj

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

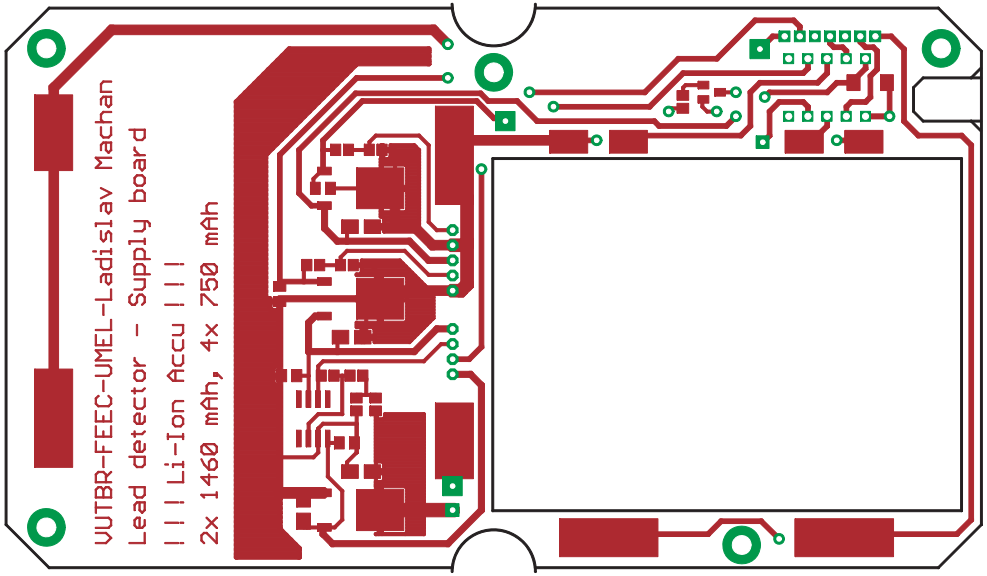
Měřítko: 1:1



Název: Osazovací výkres (BOTTOM) - Zdroj

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

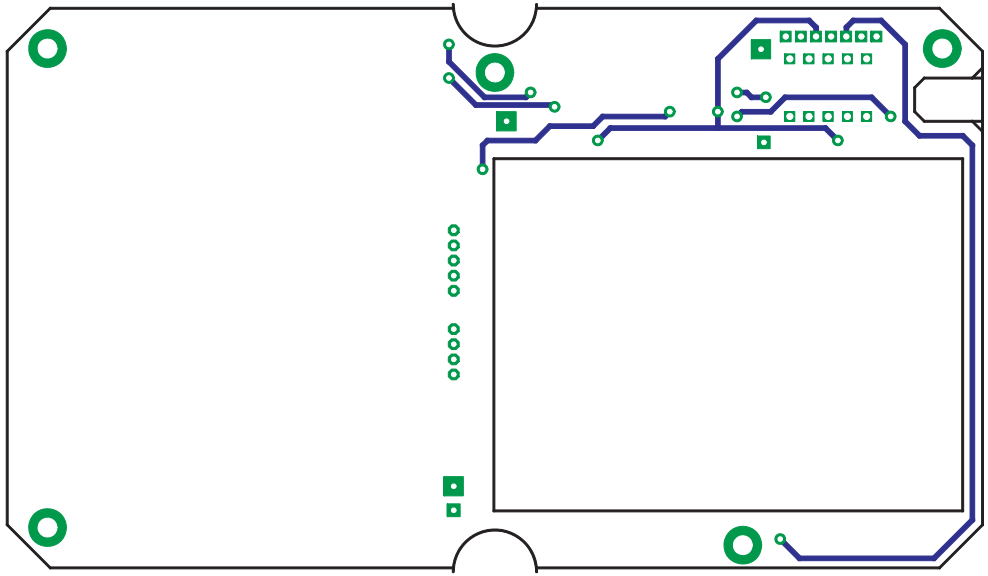
Měřítko: 1:1



Název: Motiv plošného spoje (TOP) - Zdroj

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

Měřítko: 1:1



Název: Motiv plošného spoje (BOTTOM) - Zdroj

Vypracoval: Bc. Ladislav Macháň Datum: 22. 4. 2008

Měřítko: 1:1

Soupiska součástek

Název	Hodnota	Pouzdro
R90	10k	SMD 0805
R91	20k	SMD 0805
R92	20k	SMD 0805
R93	20k	SMD 0805
R94	20k	SMD 0805
R95	20k	SMD 0805
R96	20k	SMD 0805
R97	200k	SMD 0805
R98	200k	SMD 0805
C58	100n	SMD 0805
C59	2.2uF/16V	A/3216-18W
C60	100n	SMD 0805
C61	2.2uF/16V	A/3216-18W
C62	0.33uF/35V	A/3216-18W
C63	1uF/16V	A/3216-18W
C64	100n	SMD 0805
C65	100n	SMD 0805
D1	1N4148	SOD106A-R
T5	BC846A	SOT23
IC24	LF50CDT	DPAK(TO252)
IC25	LF50CDT	DPAK(TO252)
IC26	79M05	DPAK(TO252)
IC27	OPA277	SO08
K5	relé	G6H2-100
P1	hlavní vypínač	
P2	hlavní vypínač	
P3	hlavní vypínač	
ACCU1	Li-Ion 3,7V/1460mAh	
ACCU2	Li-Ion 3,7V/1460mAh	
ACCU3	Li-Ion 3,7V/750mAh	2x
ACCU4	Li-Ion 3,7V/750mAh	2x
X10	nabíjecí konektor	KCR_PAWR2103-07
X11	propojit s X4	KCR_PAW2103-04
X12	propojit s X5	KCR_PAW2103-05