

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Elektrochemické leptání v materiálografii

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš ČAPEK**
Osobní číslo: **E13N0101P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Elektrochemické leptání v materiálografii**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou elektrochemického leptání. Zaměřte se především na využití leptání v materiálografii.
2. Navrhněte a sestrojte mikroprocesorem řízený přípravek pro elektrochemické leptání materiálografických výbrusů.
3. Vytvořte materiálografické vzorky a otestujte zkonstruovaný přípravek.
4. Navrhněte a ověřte optimální leptací cyklus pro konkrétní aplikaci.
5. Porovnejte výsledky klasického a elektrochemického leptání.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Jandoš, F., Říman, R., Gemperle, A.: Využití moderních laboratorních metod v metalografii. SNTL Praha 1985
2. Metalog Guide, Struers
3. Elektronické informační zdroje

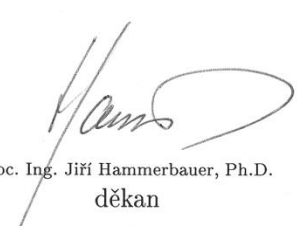
Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Džugan, Ph.D.


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014

Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Tématem práce je elektrolytické leptání materiálografických výbrusů. V první části je popsán celý postup přípravy výbrusu se zaměřením především na elektrolytické leptání.

Druhá část se věnuje návrhu mikropočítačem řízeného přístroje pro elektrolytické leptání. S tímto zařízením je možné provádět leptání při napětí do 20 V nebo při proudu do 4,5 A. Přístroj umožňuje míchání, chlazení a měření teploty elektrolytu.

V závěru je uveden výsledek selektivního leptání dvou druhů pájek připájených na desku pro plošné spoje. Tímto pokusem byla ověřena funkčnost zařízení, zároveň ukázal některé možnosti využití elektrolytického leptání v materiálografii.

Klíčová slova

Materiálografie, metalografie, elektrolytické leptání, elektrolytické leštění, elektrochemické leptání, elektrochemické leštění, selektivní leptání, leptací zařízení, výbrusy, mikrostruktura, pájené spoje, pájky, Sn60Pb40, Sn96,5Ag3Cu0,5

Abstract

The subject of this thesis is the electrolytic etching of metallographic specimens. The procedure of specimen preparation, especially its electrolytic etching, is described in the first part of the thesis.

The second part is about the design of a microcomputer controlled device for electrolytic etching. This device can be used as a voltage supply with output from 0 V to 20 V and 0.5 V step or a current supply with output from 0 A to 4.5 A and 0.1 A step. It contains parts for a mixing of an electrolyte, its cooling and temperature measuring during the etching.

In the last part of the thesis, there are presented the results of the selective electrolytic etching of two types of solders soldered on a printed circuit board. This experiment proved the function of the designed device and demonstrated some possibilities of electrolytic etching in the metallography.

Key words

Materialography, metallography, electrolytic etching, electrolytic polishing, electrochemical etching, electrochemical polishing, selective etching, etching devices, microstructure, solders, solder joints, Sn60Pb40, Sn96.5Ag3Cu0.5

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 4.5.2015

Lukáš Čapek

.....

Obsah

1 ÚVOD	9
2 MATERIÁLOGRAFIE	10
2.1 VÝZNAM MATERIÁLOGRAFIE	10
2.2 PŘÍPRAVA VZORKU	11
2.2.1 Odebrání vzorku	12
2.2.2 Preparace vzorku.....	12
2.2.3 Broušení vzorku	14
2.2.4 Leštění vzorku	15
2.2.5 Elektrolytické leptání vzorku	16
3 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO ELEKTROLYTICKÉ LEPTÁNÍ	20
3.1 VÝSTUPNÍ MĚNIČ	20
3.1.1 Spínací tranzistor.....	21
3.1.2 Budič spínacího tranzistoru	21
3.1.3 Dioda	22
3.1.4 Cívka	23
3.1.5 Kondenzátory.....	25
3.1.6 Měření výstupního napětí a proudu	27
3.2 NAPÁJENÍ	29
3.3 MIKROKONTROLÉR.....	30
3.4 MĚŘENÍ TEPLoty	32
3.5 UŽIVATELSKÉ ROZHRAŇÍ.....	34
3.6 MÍCHÁNÍ ELEKTROLYTU	34
3.7 NÁVRH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ.....	35
3.8 PROGRAM MIKROKONTROLÉRU	36
3.8.1 Hlavní část programu (funkce Main).....	36
3.8.2 Přerušování A/D převodníku	39
3.8.3 Regulační smyčka - přerušování časovače 1	39
3.9 LEPTACÍ NÁDOBA	43
4 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI PŘÍSTROJE	46

5 ZÁVĚR	53
POUŽITÁ LITERATURA	55
PŘÍLOHY	I
A. NÁVOD K OBSLUZE PŘÍSTROJE PRO ELEKTROLYTICKÉ LEPTÁNÍ MATERIÁLOGRAFICKÝCH VÝBRUSŮ	II
B. SCHÉMA ZAPOJENÍ	III
C. SEZNAM SOUČÁSTEK	IV
D. NÁVRH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ	VI
Řídící DESKA – SPODNÍ STRANA	VI
Řídící DESKA – VRCHNÍ STRANA	VII
VÝKONOVÁ DESKA – SPODNÍ STRANA	VII
VÝKONOVÁ DESKA – VRCHNÍ STRANA.....	VIII
DESKA OVLÁDÁNÍ	IX
E. ŠROUBY A MATICE PRO LEPTACÍ NÁDOBU	IX
F. DÍLY LEPTACÍ NÁDOBY	X

1 Úvod

Materiálografie je vědní obor pojednávající o vnitřní stavbě materiálů. Výzkum se provádí na materiálografických vzorcích zkoumaných materiálů. Tyto vzorky musí před samotným zkoumáním projít několika procesy, které mají za úkol zviditelnit jednotlivé strukturální prvky. Zároveň je potřeba dbát na to, aby původní struktura materiálu nebyla narušena. Při přípravě vzorků určených pro pozorování mikrostrukturálních prvků materiálu je obvykle posledním krokem přípravy leptání. V praxi se používají různé metody leptání, které se od sebe v některých svých vlastnostech odlišují. Nejčastějším způsobem je leptání chemické, méně časté jsou leptání tepelné nebo leptání elektrolytické, které je tématem této práce.[1], [2]

V úvodu první části je v krátkosti popsáno využití materiálografie a nejčastěji sledované strukturální rysy materiálů. Dále se tato kapitola věnuje postupu přípravy materiálografického výbrusu se zaměřením především na jeho elektrolytické leptání.

Druhá část se věnuje návrhu zařízení pro elektrolytické leptání materiálografických výbrusů. Zde navržený přístroj může pracovat jako napěťový zdroj s rozsahem 0 V až 20 V a krokem nastavení 0,5 V nebo jako proudový zdroj s rozsahem 0 A až 4,5 A s krokem nastavení 0,1 A. To je výhodné, jelikož pro leptání některými elektrolyty je uváděno doporučené elektrické napětí a pro jiné proud. Během leptání je elektrolyt promícháván a chlazen. Zároveň je kontrolována teplota elektrolytu, při překročení nastavené teploty se leptání automaticky zastaví. Parametry leptání, tedy velikost elektrického napětí nebo proudu, dobu leptání a nejvyšší povolenou teplotu elektrolytu, je možné jednoduše nastavit pomocí pěti ovládacích tlačítek a displeje. Funkce jednotlivých částí přístroje je podrobně popsána, podklady k výrobě přístroje i návod k jeho obsluze jsou obsaženy v přílohách.

Třetí část této práce popisuje praktické využití navrženého přístroje. Pro otestování funkčnosti bylo zvoleno selektivní odleptání cínu z pájek Sn60Pb40 a Sn96,5Ag3Cu0,5. Výsledky jsou porovnávány se vzorkem před vyleptáním a se vzorkem leptaným chemicky.

2 Materiálografie

2.1 Význam materiálografie

Materiálografie je věda zabývající se zkoumáním struktury materiálů. Při zkoumání kovových materiálů se tento vědní obor nazývá také metalografie. Na jeho základě je možné určit vlastnosti materiálu a jeho vhodnost pro určitou aplikaci nebo průběžně kontrolovat vlastnosti materiálu při jeho výrobě a zpracování. Struktura se zkoumá pomocí mikroskopu na materiálografickém vzorku. Jedná se o malý kousek zkoumaného materiálu, který musí nejprve projít několika kroky úprav. Ty mají za úkol zviditelnit strukturu, která není na materiálu běžně viditelná. [1], [2]

Mezi vlastnosti materiálu, které materiálografie zkoumá, patří například velikost zrn, pórovitost, koroze nebo praskliny. Dále se věnuje analýze pájených a svárových spojů i kompozitních materiálů. [1]

Velikost zrn polykrystalického materiálu se pohybuje v rozsahu od jednotek mikrometrů do jednotek milimetrů. Při zkoumání materiálu je tento údaj většinou nejdůležitější, protože na něm v největší míře závisí mechanické vlastnosti materiálu. Při zkoumání vzorku se zjišťuje počet zrn na jednotku délky nebo plochy, z této hodnoty se pak průměrná velikost zrna nechá dopočítat nebo vyhledat ve standardizovaných tabulkách. Kromě velikosti zrn se také sleduje orientace zrn v materiálu, která je obvykle náhodná. Stav, kdy tomu tak není a zrna jsou orientována v jednom směru, se nazývá textura materiálu. Ta vzniká například při válcování plechů nebo tažení drátů. [1], [3]

Mezi jednotlivými zrny materiálu se mohou vyskytovat i póry. Typicky vznikají při spékání práškových materiálů nebo jako důsledek vzduchových bublinek, které se dostanou do roztaveného materiálu. Pórovitost materiálu, tedy poměr objemu pórů k celkovému objemu materiálu, i rozměry a rozdělení pórů jsou také významnými faktory, které ovlivňují výsledné vlastnosti materiálu. [1], [3]

Materiálografická analýza dále slouží ke zkoumání koroze materiálu i nalezení její příčiny. Je možné odhalit i tzv. mezikrystalovou korozi. Tento druh koroze se objevuje zejména u nerezových ocelí po tepelném zpracování, kdy dochází na hranicích krystalů (zrn) ke vzniku oblastí s nižším obsahem chromu. Ke korozi pak dochází pouze v oblastech mezi jednotlivými krystaly. Působením této koroze se zhoršují mechanické vlastnosti oceli, přičemž na povrchu materiálu není změna viditelná. [1], [4]

Materiálografie se neuplatňuje jen při vývoji nebo výrobě materiálů, ale i při

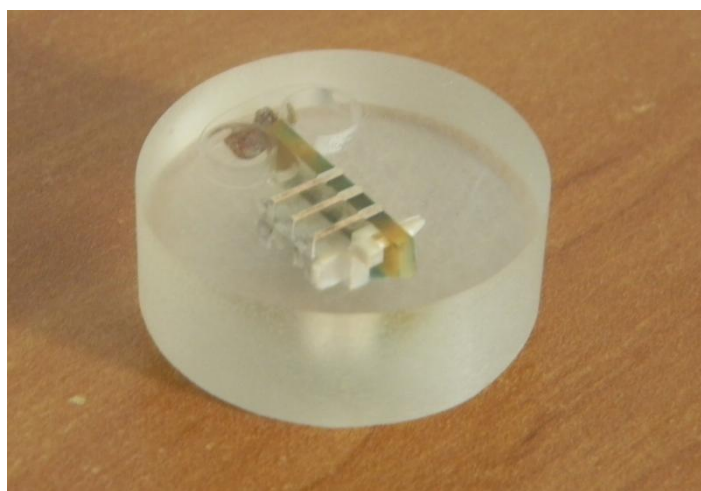
vyšetřování příčin různých závad nebo nehod. Umožňuje odhalit i nejmenší praskliny a trhliny materiálu a tím odhalit příčinu jeho selhání. [1]

Dalším velmi častým využitím materiálografie je zkoumání kvality svárových a pájených spojů. Při svařování dvou materiálů vzniká v místě sváru oblast s mikrostrukturou odlišnou od původních materiálů a tedy s jinými mechanickými i fyzikálními vlastnostmi. Dále se sledují i vady sváru, například póry a trhliny. U pájených spojů se zjišťuje mimo jiné tloušťka intermetalické vrstvy, která je důležitým parametrem určujícím kvalitu spoje. [1], [6]

Kromě výše uvedených se na materiálografickém vzorku sledují mnohé další vlastnosti závislé od konkrétního druhu testovaného materiálu i účelu zkoušky. Uplatňuje se nejen při zkoumání kovů, ale i mnoha dalších druhů materiálů, jako jsou například keramiky, kompozitní materiály nebo plasty. [1]

2.2 Příprava vzorku

Materiálografický vzorek se nečastěji připravuje ve formě výbrusu. Je to kus zkoumaného materiálu, u kterého je jedna plocha upravena k materiálografické analýze. Zkoumá se pomocí optického mikroskopu pro pozorování v odraženém světle nebo rastrovacím elektronovým mikroskopem. Druhým, méně častým, druhem vzorku jsou tenké řezy, které je na rozdíl od výbrusů možné zkoumat i optickými mikroskopy pro průchod světla nebo transmisními elektronovými mikroskopy. Zařízení pro leptání vzorků, jehož návrh je popsán ve druhé části práce, je určené pouze pro přípravu výbrusů, proto se tato kapitola nevěnuje způsobu přípravy materiálografických řezů, ale jen přípravě materiálografických výbrusů. [1], [2]



Obrázek 1: Materiálografický výbrus

2.2.1 Odebrání vzorku

Prvním krokem při přípravě výbrusu je vhodný výběr místa, odkud bude vzorek odebrán. To je nutné zvolit v závislosti na druhu zkoumaného materiálu nebo výrobku. Povrch některých materiálů bývá velmi často pozměněn povrchovou úpravou (např. kalení oceli) a struktura materiálu je pak v jeho různých částech odlišná. Proto se někdy odebírá několik vzorků v různých místech nebo rovinách zkoumaného materiálu. [1] , [2]

Při odběru vzorku je nutné postupovat tak, aby nedošlo k narušení jeho struktury. Vzorek nesmí být plasticky deformován, nesmí se zahřát na tak vysokou teplotu, při které by docházelo ke změnám jeho struktury a u křehkých materiálů je potřeba zabránit jejich popraskání. Přitom by se měl řez provádět co nejbližší zkoumané ploše. [1]

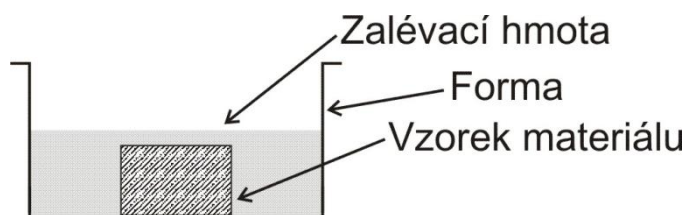
Existují speciální rezačky určené k přípravě kovových vzorků. Pro tato zařízení je k dispozici velký výběr řezných kotoučů odlišujících se druhem řezného materiálu, pojivem a tvrdostí. Výběr kotouče pak závisí na materiálu vzorku a jeho tvrdosti. Místo řezu je promazáváno řezací kapalinou, která ochlazuje řezaný materiál a odnáší pryč třísky, čímž je minimalizováno poškození vzorku. [1]

2.2.2 Preparace vzorku

Preparaci vzorku je míněno jeho zalití za studena nebo zalívání za zvýšené teploty a tlaku do plastického materiálu. U velmi malých vzorků je preparace nutná téměř vždy, u větších vzorků v závislosti na požadavcích na výsledný výbrus a způsob jeho další přípravy může být někdy tento krok vynechán. Důvodem preparace je snadnější uchycení vzorku při jeho broušení a leštění, zajištění ostrosti hran a dosažení jednotného tvaru vzorků, který může být požadován pro upevnění v některých zařízeních používaných v materiálografii (to platí i pro přístroj popsany ve druhé části této práce). [1]

Zalévací hmoty pro zalévání vzorků za studena se skládají ze dvou složek, pryskyřice a tvrdidla, které je nutné promíchat v předepsaném poměru. Nejčastěji se používají zalévací hmoty založené na epoxidových pryskyřicích. Mezi jejich přednosti patří velmi dobrá přilnavost a chemická odolnost, relativně velká tvrdost a nízká cena. Doba polymerace závisí na konkrétním druhu zalévací hmoty, jejím množství, vlastnostech zalévaného vzorku i odlévací formy, teplotě a vlhkosti okolí. Obecně se pohybuje mezi třiceti minutami a dvěma hodinami pro rychle polymerující zalévací hmoty, a až dvaceti čtyřmi hodinami pro hmoty pomalu polymerující. Dále se používají akrylátové a polyesterové pryskyřice. Největší výhodou akrylátových zalévacích hmot je krátká doba polymerace, typicky osm až patnáct minut. Polyesterové zalévací hmoty mají ze všech druhů nejlepší průhlednost (srovnatelnou

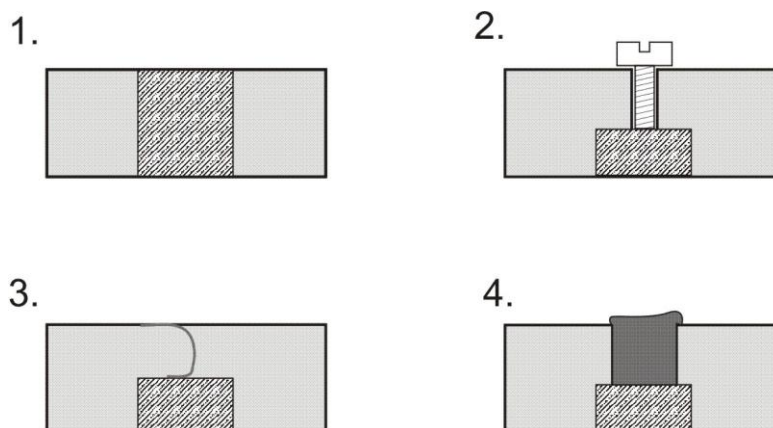
s průhledností vody). [1], [2]



Obrázek 2: Zalévání za studena

Formy pro zalévání se vyrábějí z různých materiálů, například silikonu, polypropylenu, hliníku nebo skla. Vzorek se umísťuje testovanou plochou ke dnu nádoby. Na vzorky, které při postavení na testovanou plochu nejsou stabilní, se nasazují ještě kovové nebo plastové svorky, které zajišťují polohu vzorku. Pokud má být vzorek následně elektrolyticky leštěn anebo leptán, musí na horní straně existovat elektricky vodivé spojení se zkoumanou plochou (viz obrázek 3). Jestliže tohoto propojení není možné dosáhnout jinak, lze pro preparaci vzorku použít vodivou zalévací hmotu. [1], [2], [5]

Vlastnosti preparovaného vzorku je možné zlepšit zaléváním vzorku ve vakuu nebo naopak za zvýšeného tlaku. Při použití této metody se sníží množství bublin v zalévací hmotě a lépe se vyplní všechny póry a praskliny vzorku. [1], [2]



Obrázek 3: Různé možnosti elektrického spojení zkoumané plochy se zadní stranou výbrusu – 1. Vzorek materiálu přímo tvoří část zadní strany výbrusu. 2. Skrze zalévací hmotu je vyvrtán otvor až ke vzorku. Do něj je pak zašroubován kovový šroub. 3. K testovanému vzorku je připájen, přivařen nebo jinak připevněn drát, který může končit na zadní straně výbrusu a vytvářet kontaktní plošku nebo může být z výbrusu vyveden. 4. Skrze zalévací hmotu je k testovanému vzorku vyvrtán otvor, který je následně zalit roztaveným vodivým materiálem, například pájkou. Průměr otvoru musí být dostatečně velký, aby do něj mohl vodivý materiál snadno zatéct.

Druhou používanou metodou preparace vzorku je jeho zalisování za zvýšené teploty a tlaku. Pryskyřice je ve formě prášku, opět je možné vybrat z velkého množství druhů s odlišnými vlastnostmi (např. fenolové, akrylátové, epoxidové pryskyřice). Do komory lisu se vzorek vloží zkoumanou plochou dolů, přidá se pryskyřice a vše se za vysokého tlaku a teploty 100°C až 300°C slisuje. Výhodami oproti zalévání za studena jsou lepší uchování hran vzorku a krátká doba preparace. Lisování ale nemůže být použito pro vzorky z materiálů, které by mohly vlivem zvýšené teploty nebo tlaku měnit svoji strukturu. Další nevýhodou je potřeba speciálního lisu. [1], [2]

2.2.3 Broušení vzorku

Účelem broušení je odstranění povrchové vrstvy vzorku s poškozenou strukturou. Toto poškození vzniká při odběru vzorku a jeho hloubka je závislá především na způsobu, jakým byl vzorek odříznut. Při nevhodném postupu broušení, zejména při použití příliš hrubého brusiva, však může být vzorek poškozen ještě více, než během řezání. Je proto lepší odřezávat vzorek co nejblíže zkoumané plochy takovým způsobem, aby bylo poškození co nejmenší, a jen jemně dobrousit, než ubrušovat velké tloušťky materiálu. [1]

Vzorky se brousí buď ručně brusnými papíry nebo mechanizovaně na materiálografických bruskách. V obou případech se nejprve používá hrubší brusivo, postupně se mění až k nejjemnějšímu. Mezi výměnou brusného materiálu za jemnější je vždy nutné vzorky omýt, aby na nich nemohla zůstat zrnka z hrubšího brusiva, která by jemnější brusivo znehodnotila. Nejčastějšími brusivy jsou karbid křemíku (SiC), oxid zirkoničitý (zirkonia, ZrO₂), oxid hlinitý (alumina, Al₂O₃) a diamant. Obecně se používají brusiva se zrnitostí od 60 do P4000 (průměr brusných částic od 250 μm do 2,5 μm). [1], [2]

Kromě klasického brusiva, kde jsou brusné částice pevně vázány pojivem, se pro nejjemnější broušení občas používá volné brusivo na hladké podložce. Tento proces se nazývá lapování. Během broušení se brusivo volně pohybuje mezi broušeným vzorkem a podložkou a je možné dosáhnout velmi hladkého povrchu. Jakýmsi mezistupněm mezi pevně vázaným a volným brusivem je brusivo částečně vázané. Princip je velmi podobný jako u lapování, místo hladké podložky je ale použita podložka hrbolatá, například z kovové tkaniny. Brusivo je opět volné, může se ale dočasně zachytávat v prohlubních podložky. Broušení je tak rychlejší než při použití hladké podložky, ale agresivnější k broušenému vzorku. [1]

Z pohledu reprodukovatelnosti přípravy vzorku je vhodnější broušení na materiálografické brusce než broušení ruční. Vyrábějí se různé typy brusek, u těch složitějších lze kromě zrnitosti brusiva zvolit také přítlačnou sílu, rychlost pohybu vzorku proti brusivu a

směr broušení, u jednodušších například pouze rychlost pohybu. [1]

Materiálografické brusky jsou obvykle konstruovány tak, že se broušené vzorky upevňují do rotujícího držáku a přitlačují na brusný kotouč, který se rovněž otáčí. Výsledná rychlost pohybu vzorku proti brusivu je pak určena rychlostmi a směry otáčení držáku a brusného kotouče. [1]

Přítlačná síla vzorku se obvykle pohybuje v rozmezí od 1 N do 100 N. S větší přítlačnou silou je odbrušování rychlejší, zároveň ale může docházet k poškozování povrchu vzorku. [2]

Během mechanizovaného broušení je nutné vzorek chladit vodou nebo jinou chladicí kapalinou, aby nedocházelo vlivem zvýšené teploty ke změnám struktury zkoumaného materiálu. [1], [2]

2.2.4 Leštění vzorku

Účelem leštění není odstranění povrchového poškození, které by zabraňovalo zkoumání struktury materiálu. Zkoumaný povrch materiálu by měl být už před začátkem leštění (tj. po vybroušení) bez těchto vad. Leštění vzorku má za úkol vyhladit zkoumanou plochu a, pokud je požadováno, připravit vzorek na leptání. Na rozdíl od broušení, při leštění ze vzorku materiál ubývá pouze v nepatrném množství. Materiálografické vzorky je možné leštit buď mechanicky, nebo elektrolyticky. [1], [2]

Častější metodou je mechanické leštění. Je v principu podobné jako broušení popsané v předchozí kapitole. Provádí se i na stejných zařízeních, pouze brusný kotouč je vyměněn za leštící kotouč. Tento kotouč je potažen textilií, například flanelem nebo sametem, případně je možné použít speciální leštící kotouč přímo podle použitého druhu brusiva. Na tento kotouč je dále nanášeno velmi jemné brusivo, obvykle ve formě suspenze. Pro leštění kovových výbrusů se nejčastěji používají brusiva založená na oxidu hlinitém. Dále se využívají například oxid ceritý (CeO_2), oxid železitý (Fe_2O_3) nebo diamant. Kromě těchto brusných složek brusivo obsahuje další látky, zejména smáčedlo a chladicí médium. Stejně jako u broušení, výsledek je dán nejen typem použitého brusného materiálu, ale také rychlostí otáčení a přítlačnou silou. [1], [2]

Proces elektrolytického leštění je téměř shodný s elektrolytickým leptáním, popsaným v následující kapitole, pouze probíhá při větším napětí (viz obrázek 5). Jedná se vlastně o opak elektrolytického pokovování, materiál je odebírán z leštěného vzorku. Během elektrolytického leštění dochází k největší proudové hustotě právě na výstupcích vzorku a materiál z těchto míst ubývá mnohem rychleji než z hladkých částí vzorku. Množství

odebraného materiálu je závislé především na vlastnostech leštěného vzorku, velikosti procházejícího elektrického proudu, druhu elektrolytu a času leštění. V literatuře (např. [1]) je možné najít tabulky, které uvádějí doporučená nastavení podle leštěného materiálu a použitého elektrolytu. [1], [2], [5], [10]

Využití elektrolytického leštění je omezeno na elektricky vodivé vzorky. Používá se hlavně u měkkých materiálů, jako jsou hliník, měď a jejich slitiny, které jsou náchylné k poškrábání a změnám struktury vlivem zvýšené teploty při mechanickém leštění. Nevýhodou elektrolytického leštění je současné naleptání vzorku. [1]

Po vyleštění je materiálografický výbrus připraven ke zkoumání makrostruktury. Je možné pozorovat póry, trhliny a další nečistosti materiálu. Dále se v tomto stavu zkoumají nekovové fáze v kovovém materiálu.

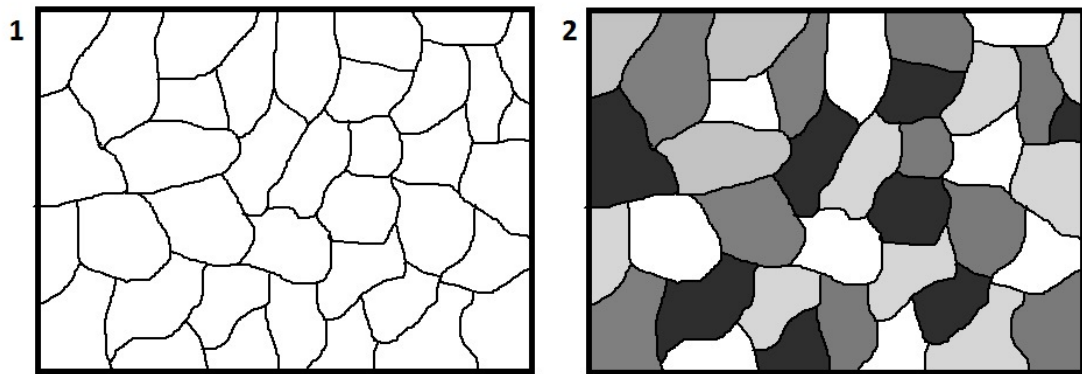
2.2.5 Elektrolytické leptání vzorku

Leptání je posledním krokem při přípravě materiálografického výbrusu. Jeho účelem je zviditelnění mikrostruktury vzorku. Jako mikrostruktura se označuje struktura materiálu, která není viditelná pouhým okem a k jejímu pozorování je nutné použít mikroskop, zahrnuje například jednotlivá zrna materiálu. V praxi se využívají tři základní principy pro vyvolání mikrostruktury, jsou to leptání na hranice zrn, plošné leptání a selektivní leptání. [2]

Leptání na hranici zrn se používá především při přípravě vzorků tuhých roztoků. Atomy materiálu mají největší volnou energii na hranicích zrn, a proto se materiál z těchto oblastí odleptává nejrychleji. Při pozorování mikroskopem pak jsou dobře viditelné hranice jednotlivých zrn. [2]

Plošné leptání je založeno na různé leptatelnosti jinak krystalograficky orientovaných zrn. Z jednotlivých zrn jsou odleptány nestejně tloušťky materiálu a zrna tak na povrchu vzorku vytvoří prohlubně. Při zkoumání vzorku se světelné paprsky od zrn odrážejí s různou intenzitou a v objektivu mikroskopu se zrna jeví různě zbarvená. Rozdíl mezi plošným leptáním a leptáním na hranici zrn je znázorněn na obrázku 4. [2]

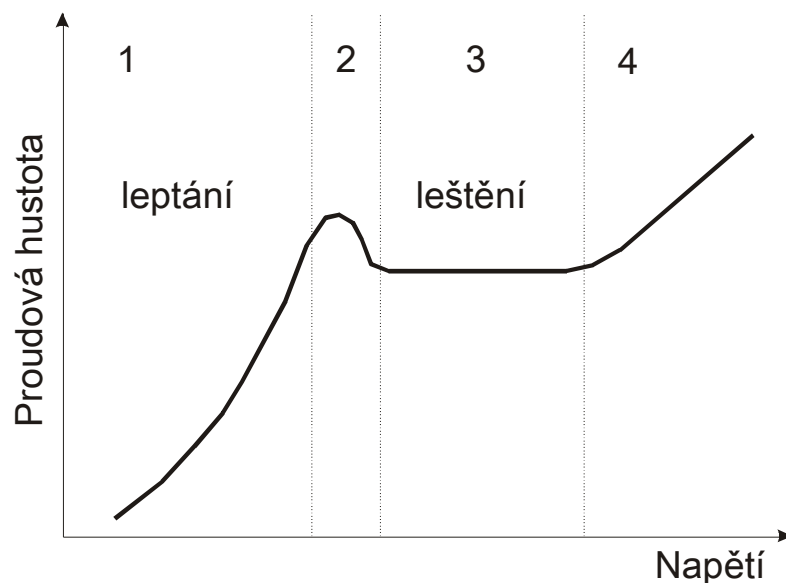
Selektivní leptání je vlastně plošné leptání heterogenních slitin. Struktura materiálu je zviditelněna z důvodu odlišné leptatelnosti jednotlivých složek slitiny. Po vyleptání je možné mikroskopem snadno odlišit jednotlivé fáze materiálu, které se, stejně jako zrna při plošném leptání, odlišují svou barvou. [2]



Obrázek 4: Rozdíl mezi leptáním na hranici zrn (1) a plošným leptáním (2)

Během elektrolytického leptání i leštění tvoří materiálografický vzorek kladnou elektrodu a leptanou plochou musí být ponořen v elektrolytu. V nádobě s elektrolytem je umístěna záporná elektroda. Ta bývá nejčastěji vyrobena z nerezové oceli, pro některé speciální aplikace jsou ale doporučovány i elektrody z jiných materiálů, například měděné. Obě elektrody jsou připojeny k stejnosměrnému elektrickému zdroji. Obrázek 5 znázorňuje závislost proudové hustoty na elektrickém napětí během elektrolytického leptání a leštění. V první části charakteristiky (1) dochází k rozpouštění kovů na leptané ploše a je to oblast využívaná při leptání vzorku. Při zvyšování napětí (2) se na povrchu vzorku začne vytvářet tzv. anodický film, což je velmi tenká viskózní vrstva s velkým elektrickým odporem. Oblast se stabilním anodickým filmem (3) je vhodná pro leštění vzorku. Anodický film má nejmenší tloušťku nad výstupky vzorku, nejtlustší je naopak v oblastech prohlubní. Při průchodu proudem vzorkem je proto v oblasti výstupků proudová hustota největší, materiál z těchto míst ubývá mnohem rychleji než z ostatních částí vzorku a dochází k vyhlazování plochy. Pokud je napětí dále zvyšováno (4), na povrchu vzorku se začne vyvíjet kyslík a anodický film se naruší. Do této části charakteristiky by se vzorek při přípravě materiálografického vzorku neměl nikdy dostat, protože by se na povrchu vzorku vytvořily důlky. Číselné hodnoty napětí i proudové hustoty vždy závisí na konkrétní situaci, zejména na elektrolytu, tvar průběhu je ale vždy obdobný. Leptání probíhá při napětí obvykle do 10 V. Pro elektrolytické leštění je potřeba napětí větší, v závislosti na druhu elektrolytu i přes 50 V. Elektrický zdroj může být řešen buď jako zdroj napěťový, nebo proudový. Výrobci těchto zařízení dávají většinou přednost napěťovému zdroji, protože napětí není závislé na ploše vzorku tak jako proud a, jak je vidět na obrázku 5, podle napětí je možné vždy určit, ve které části charakteristiky se zařízení nachází, zatímco při určitých stejných hodnotách elektrického proudu může být zařízení jak v části charakteristiky pro leptání, tak i pro leštění. V tabulkách s popisem

elektrolytů je možné se setkat s oběma možnostmi, u některých bývá udáváno doporučené napětí, pro jiné zase proudová hustota, výjimečně i obě tyto hodnoty. [1], [2], [5]



Obrázek 5: Závislost proudové hustoty na napětí při elektrolytickém leptání a leštění

Postupem času byl vynalezen velký počet různých elektrolytů. Některé elektrolyty jsou vhodné pouze pro leptání jednoho druhu materiálu, jiné jsou více univerzální a vhodné pro přípravu vzorků z různých materiálů. V odborné literatuře zabývající se tímto tématem lze najít rozsáhlé seznamy elektrolytů i s popsány vlastnostmi a složením, podle kterých je možné elektrolyty namíchat. Další možností je zakoupení už hotových elektrolytů. Například firma Struers nabízí celou řadu elektrolytů určených pro leptání i leštění, ze které je možné vybrat vhodný elektrolyt pro přípravu vzorku z většiny kovových materiálů. Obecně jsou všechny elektrolyty roztoky kyselin (např. kyselina chloristá, kyselina fosforečná) s vodou nebo jinou látkou způsobující disociaci kyseliny. Někdy bývají přidávány další látky (glycerol, 2-Butoxyethanol, močovina, ...) pro zvětšení viskozity elektrolytu. [1], [5]

Zvýšené pozornosti je nutné dbát zejména při práci s elektrolyty s obsahem kyseliny chloristé (HClO_4). V koncentrovaném stavu a za vyšších teplot totiž může tato velmi silná kyselina samovolně explodovat. Aby k výbuchu nemohlo dojít, neměla by teplota elektrolytu přesáhnout 38°C . Dále by pro preparaci vzorků určených pro leptání těmito elektrolyty neměly být použity akrylové nebo fenolové pryskyřice, jejichž kontakt s kyselinou chloristou také může vyvolat explozi. Bezpečná je například preparace pomocí epoxidových pryskyřic. [1]

Během leptání může elektrolytem procházet relativně velký elektrický proud v řádu

jednotek ampér, jehož vlivem se elektrolyt ohřívá. Při zvýšení teploty přes určitou mez nevzniká pouze riziko exploze některých druhů elektrolytů, ale také se snižuje odolnost materiálů proti kyselinám a může tak dojít k poškození nádoby, ve které se leptání provádí. Z tohoto důvodu mívají zařízení určená k elektrolytickému leptání zabudovaný teploměr měřící teplotu elektrolytu a většinou také chlazení elektrolytu. Chlazení bývá obvykle řešeno spirálou ponořenou v elektrolytu, kterou protéká chladicí kapalina. Některá zařízení mají spuštěné chlazení v celém průběhu leptání a kontrolují, zda je teplota v určených mezích. V případě překročení povolené teploty elektrolytu se leptání zastaví. Složitější zařízení umožňují i regulaci teploty elektrolytu na určitou zadanou hodnotu střídavým zapínáním a vypínáním chlazení. Tato funkce je užitečná, jelikož se změnou teploty se mírně mění i účinnost elektrolytu, a reprodukovatelnost přípravy vzorků je s ní tedy lepší. [1], [5], [8], [9]

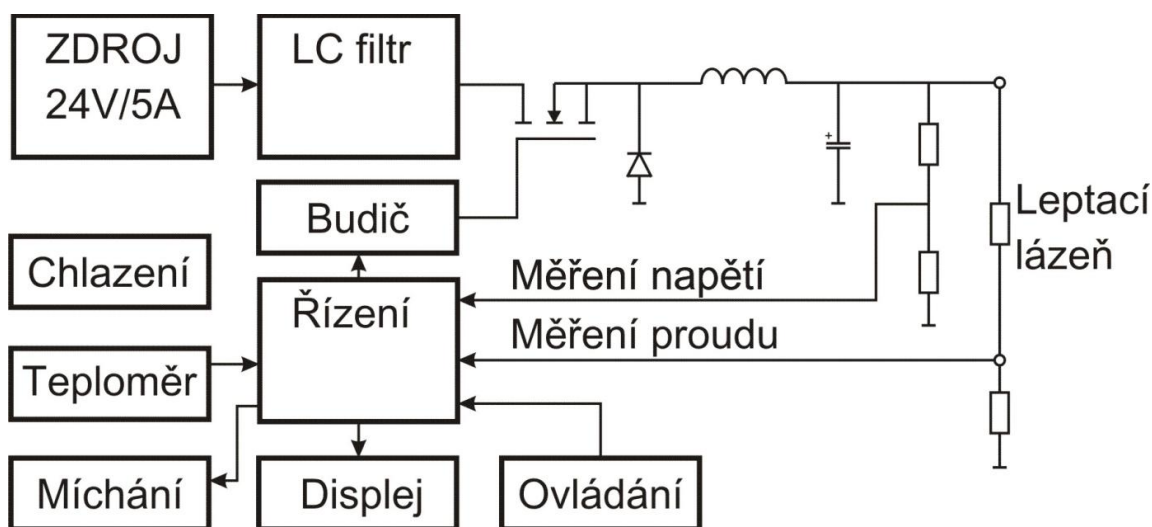
Pro kvalitu výsledného materiálografického vzorku je vhodné elektrolyt během leptání promíchávat. Možností, jak míchání docílit, je více. Často se používá například malé čerpadlo, které zajišťuje proudění elektrolytu uvnitř leptací nádoby. [8], [9]

Výsledek elektrolytického leptání závisí zejména na složení elektrolytu, elektrickém napětí nebo proudu a času leptání, dále pak na teplotě elektrolytu, jeho promíchávání a vzdálenosti elektrod. Jeho hlavními výhodami oproti leptání chemickému, tj. působení chemického leptadla bez elektrického zdroje, je zejména krátký čas potřebný k vyleptání (většinou v řádu desítek sekund) a použitelnost i pro leptání chemicky odolných nerezových ocelí, které by bylo leptat jinak obtížné. Je ale omezeno pouze pro přípravu vzorků z elektricky vodivých materiálů. [1], [2]

3 Návrh zařízení pro elektrolytické leptání

Tato část práce pojednává o návrhu zařízení pro elektrolytické leptání materiálografických výbrusů. Podobná laboratorní zařízení už existují a je možné je zakoupit. Jejich vývojem a výrobou se zabývají například firmy Struers nebo Buehler, ceny těchto výrobků se ale pohybují v řádu desítek nebo spíše stovek tisíc korun. Cílem této práce je navrhnout a sestavit zařízení s podobnou funkcí, které by bylo za cenu určitého zjednodušení a omezení některých funkcí mnohem méně nákladné.

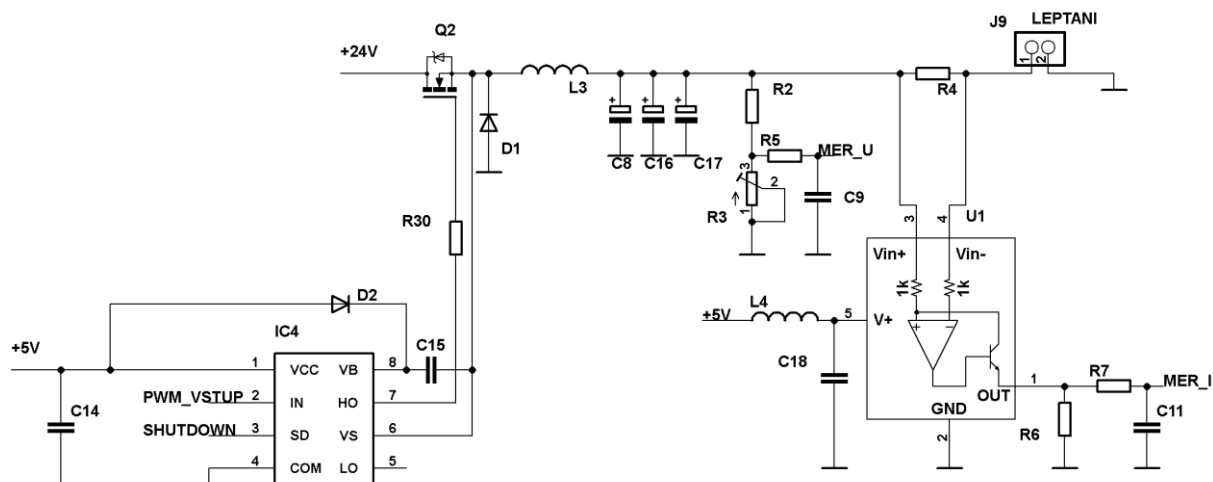
Toto zařízení je napájeno z externího spínaného napájecího zdroje 24 V/ 5 A. Přístroj obsahuje výstupní měnič pro regulaci leptacího napětí v rozsahu 0 V až 20 V nebo proudu od 0 A do 4,5 A, míchání a chlazení elektrolytu, měření teploty elektrolytu, znakový displej pro zobrazení informací uživateli během nastavování parametrů i v průběhu leptání a tlačítka sloužící k ovládání přístroje. Celé zařízení je řízeno mikrokontrolérem Atmel ATmega16A. Samotné leptání probíhá ve speciální nádobě z chemicky odolného plastu. Všechny tyto části zařízení budou následně podrobně popsány.



Obrázek 6 : Blokové schéma přístroje

3.1 Výstupní měnič

Napěťový nebo proudový výstup (podle nastavení přístroje) zajišťuje snižující měnič s klasickým uspořádáním skládající se ze spínacího tranzistoru Q2, LC filtru (L3, C8, C16, C17) a diody D1. Tranzistor je prostřednictvím budiče IC4 spínán PWM signálem z mikrokontroléru IC3. [13]



Obrázek 7: Zapojení výstupního snižujícího měniče

3.1.1 Spínací tranzistor

Počítá se s maximálním výstupem pro leptání 20 V a 4,5 A, napájení budiče je z 24 V. Při výběru spínacího tranzistoru Q2 byly proto hlavními požadavky nízký odpor kanálu tranzistoru v sepnutém stavu $R_{DS(on)}$ a dostatečně vysoké průrazné napětí mezi drain a source $V_{(BR)DSS}$. Zvolen byl výkonový NMOS tranzistor AUIRF3205. Výrobce tranzistoru uvádí napětí $V_{(BR)DSS}$ 55 V, rezerva oproti napájecímu napětí 24 V je tedy dostatečně vysoká. Odpor kanálu tranzistoru je podle katalogového listu 8 m Ω při spínání napětím U_{GS} 10 V. V tomto zapojení je tranzistor spínán pouze napětím kolem 4 V a odpor kanálu je tak přibližně 80 m Ω . I to je přijatelně nízký odpor, tranzistor je ale nutné opatřit chladičem. Při maximálním výstupním proudu 4,5 A a trvalém sepnutí je ztrátový výkon tranzistoru 1,6 W. Protože zařízení není určeno pro trvalý provoz, ale pouze pro krátkodobá leptání jednotlivých vzorků, je tato ztráta přijatelnou cenou za to, že není potřeba do obvodu zavádět další hladinu napětí pro napájení budiče.

3.1.2 Budič spínacího tranzistoru

Tranzistor je spínán budičem IRS2302 (IC4) od výrobce International Rectifier. Oproti některým jiným typům tento budič umožňuje napájení napětím 5 V, může tak mít společné napájení s ostatní elektronikou zařízení. Obvod je určen pro zapojení v půlmůstku a kromě výstupu pro spínání tranzistoru proti napájecímu napětí má i výstup pro spínání proti zemi, který není v tomto zapojení využit.

Budič funguje na principu nábojové pumpy. Když je tranzistor Q2 rozeprtý, nabíjí se kondenzátor C15 přes diodu D2 a výstupní filtr snižujícího měniče z napájení budiče 5 V. Nabíjený kondenzátor C15 pak slouží jako izolovaný napěťový zdroj pro spínání tranzistoru Q2.

Pro správnou funkci musí být vhodně zvolené součástky D2 a zejména C15.

V tomto případě je u diody D2 nejdůležitější vlastností úbytek napětí v propustném směru, který by měl být co nejmenší. V zapojeních, kde výkonový tranzistor spíná proti napětí v řádu stovek voltů je také důležité maximální závěrné napětí diody.

Kapacita kondenzátoru C15 závisí na několika parametrech a je možné jí spočítat podle následujícího vzorce [17]:

$$C_{15} \geq \frac{2 \cdot \left(2 \cdot Q_g + \frac{I_{QBSmax}}{f} + Q_{Is} + \frac{I_{CBSleak}}{f} \right)}{V_{CC} - V_f - V_{min}} \quad (1)$$

Kde	Q_G	je náboj hradla tranzistoru Q2	... 20 nC
	I_{QBSmax}	je proud mezi vývody budiče VB a VS	... 100 μ A
	Q_{Is}	je náboj požadovaný budičem pro posun budícího napětí	... 5 nC
	$I_{CBSleak}$	je prosakující proud kondenzátorem. S tímto parametrem je vhodné počítat pouze při použití elektrolytického kondenzátoru, jinak je zanedbatelný.	... 0 A
	f	je kmitočet řídicího PWM signálu	... 62,5 kHz
	V_{cc}	je napájecí napětí budiče	... 5 V
	V_{min}	je minimální požadované napětí U_{GS} tranzistoru Q2	... 3,9 V
	V_f	je součet úbytků napětí na diodách D1 a D2	... 1 V

Po dosazení:

$$C_{15} \geq \frac{2 \cdot \left(2 \cdot 20 \cdot 10^{-9} + \frac{100 \cdot 10^{-6}}{62500} + 5 \cdot 10^{-9} \right)}{5 - 1 - 3,9} \quad (2)$$

$$C_{15} \geq 932 \text{ nF}$$

V praxi se doporučuje hodnota kapacity alespoň pětkrát větší, proto byla zvolena kapacita 10 μ F.

Aby nemohlo dojít ke zničení budiče příliš velkým proudem, je mezi výstup budiče a gate tranzistoru vložen rezistor R30 s odporem 6,8 Ω .

3.1.3 Dioda

Přes diodu D1 prochází v době, kdy je tranzistor Q2 rozepnutý, stejný proud jako cívkou L3.

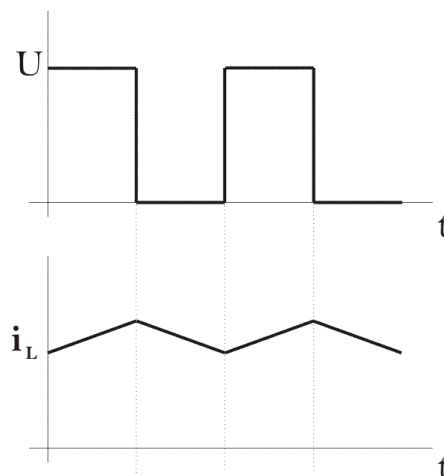
Tato dioda tedy musí být dostatečně proudově dimenzována, aby tento proud vydržela. Pro co nejnižší ztráty je vhodné, aby měla dioda co nejmenší napětí v propustném směru a co nejkratší dobu zotavení. Na základě těchto požadavků byla vybrána rychlá Schottkyho dioda MBR760. Tato dioda je použitelná pro trvalý proud do 7,5 A, maximální povolené napětí v závěrném směru je 60 V.

3.1.4 Cívka

Pro výsledné vlastnosti snižujícího měniče je velmi důležitá vhodná volba cívky výstupního filtru. V době, kdy je spínací tranzistor rozepnutý, slouží cívka jako zdroj energie. Po sepnutí tranzistoru cívka omezuje proud odebíraný ze zdroje. Na velikosti indukčnosti cívky tedy závisí zejména zvlnění proudu cívkou. Dále je toto zvlnění ovlivněno dalšími parametry, jako například velikostí vstupního a výstupního napětí, ty jsou ale obvykle předem dány požadavky na zařízení. Hodnota indukčnosti také ovlivňuje zvlnění výstupního napětí měniče.

Pro udržení konstantního výstupu není nutné, aby bylo zvlnění proudu protékajícího cívkou velmi malé, obvykle se počítá s hodnotou 30%. Malé zvlnění proudu je ale důležité pro možnost dosáhnout vyššího výstupního proudu. Napájecí adaptér může poskytnout nejvýše proud 5 A, což je přibližně (po odečtení proudu do dalších částí zařízení) maximální proud cívkou měniče. Protože tuto hodnotu nelze zvýšit, je jedinou možností, jak zvětšit střední hodnotu proudu cívkou, snížení zvlnění tohoto proudu. Indukčnost byla zvolena tak, aby zvlnění bylo relativně malé, ale zároveň měla cívka přijatelné rozměry a nebyl problém s její dostupností.

Pro následující výpočet indukčnosti cívky se zanedbávají její parazitní vlastnosti a předpokládá se nepřerušovaný režim měniče. To znamená, že proud cívkou nikdy neklesá k nule (viz obrázek 8). [14], [18]



Obrázek 8: Proud cívkou snižujícího měniče

Pro proud cívku platí následující vztah:

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t u_L \cdot dt + i_0 \quad (3)$$

Kde	i_L [A]	je celkový elektrický proud cívku
	L [H]	je indukčnost cívky
	u_L [V]	je elektrické napětí cívky
	i_0 [A]	je počáteční elektrický proud cívku
	t [s]	je čas

Pro konstantní obdélníkové pulsy napětí se vztah zjednoduší:

$$i_L = \frac{u_L \cdot \Delta t}{L} + i_0 \quad (4)$$

Pro snižující měnič je změna proudu cívku při sepnutém tranzistoru následující:

$$\Delta i_L = \frac{U_{vst} - U_{tran} - U_{výst}}{L} \cdot t_{zap} \quad (5)$$

Kde	U_{vst} [V]	je napájecí napětí měniče
	U_{tran} [V]	je úbytek napětí na spínacím tranzistoru
	$U_{výst}$ [V]	je výstupní napětí měniče
	t_{zap} [s]	je čas, po který je tranzistor sepnut

Doba sepnutí tranzistoru je závislá na kmitočtu řídicího PWM signálu a poměru vstupního a výstupního napětí. Při zanedbání úbytků napětí na diodě a tranzistoru platí:

$$t_{zap} = \frac{U_{výst}}{U_{vst} \cdot f} \quad (6)$$

Kde	f [Hz]	je kmitočet řídicího PWM signálu
-----	----------	----------------------------------

Z výše uvedených vztahů vyplývá tento vzorec pro výpočet indukčnosti:

$$L = \frac{(U_{vst} - U_{tran} - U_{výst}) \cdot \frac{U_{výst}}{U_{vst} \cdot f}}{\Delta i} \quad (7)$$

Tabulka 1 uvádí výpočet cívky pro výstupní napětí v rozsahu 1 V až 20 V a zvlnění proudu 150 mA. Dále se počítá se vstupním napětím 24 V, úbytkem napětí na tranzistoru 0,3 V a kmitočtem spínání 62,5 kHz.

Tabulka 1: Výpočet indukčnosti tlumivky snižujícího měniče

$U_{\text{výst}} [\text{V}]$	$t_{\text{zap}} [\mu\text{s}]$	$L [\mu\text{H}]$
1	0,67	101
2	1,33	193
3	2,00	276
4	2,67	350
5	3,33	416
6	4,00	472
7	4,67	520
8	5,33	558
9	6,00	588
10	6,67	609
11	7,33	621
12	8,00	624
13	8,67	618
14	9,33	604
15	10,00	580
16	10,67	548
17	11,33	506
18	12,00	456
19	12,67	397
20	13,33	329

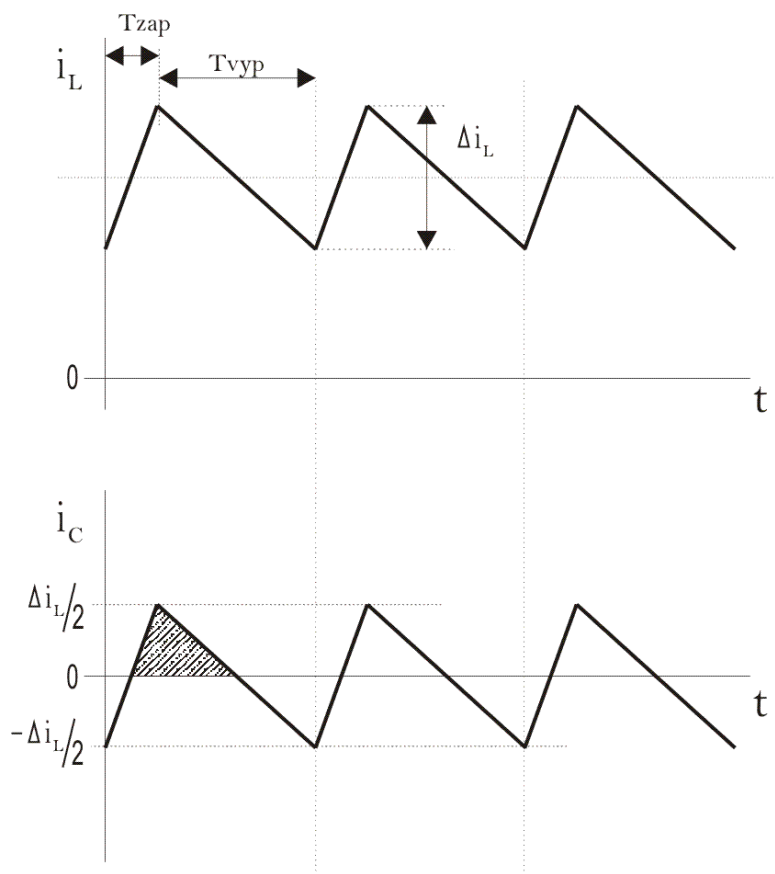
Pro měnič byla vybrána toroidní cívka MCAP115018077A-561LU od výrobce Multicomp. Cívka má indukčnost 560 μH a maximální proud 10 A. Je navinutá na železoprachovém jádře z materiálu 26 o průměru 43 mm.

3.1.5 Kondenzátory

Kondenzátory na výstupu snižujícího měniče udržují konstantní napětí, na jejich kapacitě a ekvivalentním sériovém odporu (ESR) je závislé zvlnění výstupního napětí. Větší kapacita ale zároveň zpomaluje odezvu měniče na změnu impedance zátěže, proto je nutné při volbě kapacity zvážit vlastnosti, které jsou od výsledného zařízení požadovány.

Obrázek 9 znázorňuje průběh proudu kondenzátorem. Pro udržení konstantního výstupu musí kondenzátor kompenzovat zvlnění proudu protékajícího indukčností. To znamená, že v době, kdy proud i_L překračuje střední hodnotu, se kondenzátor nabíjí a omezuje

proud tekoucí do zátěže. Naopak po poklesu proudu i_L pod střední hodnotu nahromaděnou energii uvolňuje a působí jako zdroj napětí. Střední hodnota proudu tekoucího kondenzátorem je tak nulová.



Obrázek 9: Proudy cívkou a kondenzátorem filtru snižujícího měniče

Pro dodržení povoleného zvlnění výstupního napětí je nutné určit minimální kapacitu. Pro výpočet proudu kondenzátorem platí následující vztah:

$$i_C = C \cdot \frac{\Delta u_C}{\Delta t} \quad (8)$$

Kde	i_C [A]	je proud kondenzátoru
	C [F]	je kapacita kondenzátoru
	Δu_C [V]	je změna napětí kondenzátoru
	Δt [s]	je změna času

Předchozí vztah lze přepsat do podoby:

$$i_C \cdot \Delta t = C \cdot \Delta u_C = \Delta Q_C \quad (9)$$

Kde ΔQ_C [C] je změna náboje kondenzátoru

Změna náboje kondenzátoru ΔQ_C je znázorněna na obrázku 9 šrafováním. Pro velikost tohoto náboje platí:

$$\Delta Q_C = \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot \Delta i_C = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2 \cdot f} \cdot \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{\Delta i_L}{8 \cdot f} \quad (10)$$

Kde f [Hz] je kmitočet spínacího PWM signálu

Δi_L [A] je zvlnění proudu protékajícího indukčností

Z předcházejících závislostí už vyplývá vztah pro výpočet kapacity kondenzátoru:

$$C = \frac{\Delta i_L}{8 \cdot f \cdot \Delta U_{\text{výst}}} \quad (11)$$

Při plánovaném použití k elektrolytickému leptání se neočekává, že bude docházet k rychlým změnám impedance zátěže, a proto pomalejší reakce na změnu zatížení nevadí. Pro výstupní filtr měniče byly vybrány tři paralelní kondenzátory s nízkým ekvivalentním sériovým odporem (low ESR) s celkovou kapacitou 3000 μF . Podle vzorce 11 je v tom případě zvlnění výstupního napětí menší než 1 mV. Ve skutečnosti je zvlnění větší, protože závisí nejen na kapacitě, ale i na ESR kondenzátoru. I přesto je zanedbatelné v porovnání s kvantizační chybou A/D převodníku mikrokontroléru, který měří velikost výstupního napětí. [14], [15]

3.1.6 Měření výstupního napětí a proudu

Pro možnost regulace výstupu měniče je nutné měřit regulovanou veličinu. Navržený přístroj pro elektrolytické leptání měří na svém výstupu elektrický proud i napětí a může tedy fungovat jako proudový nebo napěťový zdroj.

Proud je měřen jako úbytek napětí na rezistoru R_4 s odporem 10 m Ω , který je zapojen do série se zátěží měniče. Napětí rezistoru R_4 je dále zesíleno zesilovačem INA169 (U1), který je přímo určen pro měření proudu. Obvod převádí diferenční vstupní napětí na proudový výstup. Výstupní proud zesilovače je pak vnějším rezistorem R_6 opět převeden na napětí. Velikost tohoto odporu určuje celkové napěťové zesílení. Pro výstupní napětí zesilovače U1 platí:

$$U_{\text{výst}U1} = \frac{I_{R_4} \cdot R_4 \cdot R_6}{1000} \quad (12)$$

Maximální výstupní proud měniče má být 4,5 A, přístroj by měl proto měřit s jistou rezervou alespoň do 5 A. Výstup zesilovače je dále zpracováván A/D převodníkem, který pracuje s referenčním napětím 2,56 V. Pro rezistor R6 byla proto vybrána hodnota odporu 47 k Ω . S tímto odporem odpovídá výstupní napětí zesilovače 2,56 V výstupnímu proudu měniče 5,4 A a je tedy využit téměř celý napěťový rozsah A/D převodníku.

Malou nevýhodou tohoto zesilovače, která by ale při použití pro elektrolytické leptání neměla příliš vadit, je požadavek určitého minimálního souhlasného napětí na jeho diferenčních vstupech. Měřicí rezistor musí být zapojen mezi napájením a zátěží a souhlasné napětí na vstupech zesilovače by podle výrobce mělo být v rozsahu od 2,7 V do 60 V. Při testování přístroje bylo zjištěno, že zesilovač funguje už při souhlasném napětí 1,7 V, i když v tom případě není zaručeno, že nedochází ke zhoršení některých parametrů zesilovače.

Výstupní napětí je před měřením A/D převodníkem nutné snížit. K tomu slouží odporový dělič z rezistorů R2 a R3. Rezistor R2 má pevnou hodnotu odporu 10 k Ω , R3 je víceotáčkový odporový trimr s hodnotou 2 k Ω . Pomocí trimru je možné přesně nastavit požadovaný dělicí poměr. Nejvyšší nastavitelné napětí výstupu měniče je 20 V, z důvodu určité rezervy se počítá s měřitelným napětím do 25 V a dělicím poměrem děliče 1/10.

Před vstupy A/D převodníku pro měření napětí a proudu jsou ještě zapojeny RC filtry typu dolní propust. Jejich hlavním účelem je odstranění vysokofrekvenčního rušení, které by mohlo měřicí vstupy ovlivnit. Frekvence čtení těchto vstupů je v řádu jednotek kHz, mezní kmitočet filtrů f_0 byl proto zvolen 10 kHz.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (13)$$

Při volbě $C = 100$ nF :

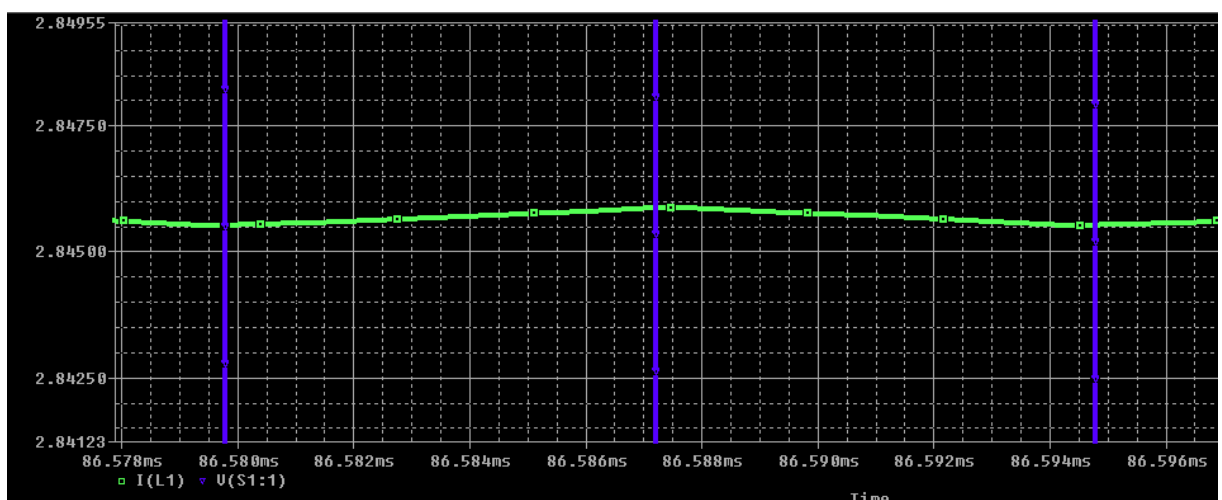
$$R = \frac{1}{2\pi f_0 C} = \frac{1}{2\pi \cdot 10000 \cdot 10^{-7}} = 159,2 \Omega \quad (14)$$

Filtry se tedy skládají z kapacity 100 nF a odporu 160 Ω . Pro napěťový vstup jsou to rezistor R5 a kondenzátor C9, pro proudový vstup R7 a C11.

3.2 Napájení

Zařízení je napájeno ze síťového spínaného adaptéru s výstupem 24 V a maximálním výstupním proudem 5 A. Tento zdroj dodává energii pro výkonový výstup i veškerou elektroniku přístroje.

Hned za svorkami napájení je v obvodu zapojen LC filtr, který má za úkol vyhladit pulzní odběr ze síťového adaptéru. Všechny části přístroje mají pulzní napájení a v případě, že by tento vyhlazovací filtr chyběl, by pravděpodobně napájecí adaptér špatně fungoval. Filtr se skládá ze stejných součástek, jako filtr ve výstupním snižujícím měniči, tedy tlumivky o indukčnosti 560 μH (L2) a tří paralelně spojených kondenzátorů (C7, C10, C13) s nízkým ekvivalentním sériovým odporem o celkové kapacitě 3000 μF . Tyto hodnoty byly zvoleny na základě simulací v programu PSpice. Nejprve byly určeny hodnoty pro filtr měniče, simulací bylo dále ověřeno, že stejné součástky jsou vhodné i pro vyhlazovací filtr. Pro simulaci byl uvažován pouze odběr výstupního měniče pro leptání, odběry ostatních částí zařízení jsou výrazně menší a byly v tomto případě zanedbány. Zvlnění filtru závisí na jeho zatížení, tedy na střídě řídicího PWM signálu a na zátěži výstupního měniče. Protože nebylo jisté, při jakém zvlnění by mohlo docházet k chybám adaptéru, byly parametry filtru zvoleny tak, aby bylo zvlnění přes celý rozsah uvažovaného zatížení filtru malé, v řádu jednotek mA. Obrázek 10 ukazuje výsledek simulace v programu PSpice, kde zelená čára představuje proudový odběr z adaptéru při spínání výstupního měniče (modrá čára) s frekvencí 62,5 kHz, střídou $\frac{1}{2}$ a při zatížení měniče odporem 2 Ω . Zvlnění je v tomto případě přibližně 0,5 mA.



Obrázek 10: Simulace zvlnění odebíraného proudu

Napájení výstupního měniče a motoru pro míchání elektrolytu jsou připojena přímo

k napětí 24 V za vyhlazovací filtr. Řídící elektronika je napájena napětím 5 V ze spínaného stabilizátoru napětí IL2405S (IC1) od firmy XP Power. Maximální odebíraný proud z tohoto stabilizátoru je 400 mA, což je pro potřeby zařízení plně dostatečné. Výhodou je, že tento stabilizátor ke své funkci nepotřebuje žádné vnější součástky. Napájení analogových částí obvodu je dále odděleno filtry L_1C_5 a L_4C_{18} .

3.3 Mikrokontrolér

Přístroj je řízen osmibitovým mikrokontrolérem Atmel ATmega16A (IC3). Tento mikrokontrolér s RISC architekturou je dostatečně výkonný a obsahuje všechny potřebné periferie. Obvod má celkem třicet dva obecných vstupů/výstupů rozdělených do čtyř portů PA, PB, PC a PD. Většina těchto vývodů má navíc alternativní funkci spojenou s některým z periferních obvodů mikrokontroléru. Pro funkci navrhovaného zařízení jsou nejdůležitější periferie A/D převodník a časovače. [11], [12]

Mikrokontrolér obsahuje desetibitový A/D převodník. Při rozlišení deseti bitů může být signál vzorkován rychlostí až 15 kSPS, při nižším rozlišení může být rychlost vzorkování i vyšší. Převodník má osm multiplexovaných vstupů na portu PA pro měření napětí proti zemi. V tomto zapojení jsou využity tři vstupy – měření výstupního napětí, výstupního proudu a teploty elektrolytu. Pro měření se zde využívá vnitřní napěťová reference 2,56 V, obvod má i možnost připojení vnějšího referenčního napětí. Napájení analogové části je odděleno od napájení zbytku mikrokontroléru, aby nebyla přesnost převodu ovlivněna kolísáním napájecího napětí způsobeným rychlými změnami v číslicové části obvodu. [12]

Součástí mikrokontroléru jsou i tři čítače/časovače. Jsou to osmibitové čítače 0 a 2 a šestnáctibitový čítač 1. Tyto obvody se v určitých parametrech liší, pro navrhovaný přístroj jsou ale důležité zejména možnosti generovat PWM signál a vyvolávat přerušení v definovaných intervalech. To umožňují všechny tři čítače. [12]

Napájecí napětí mikrokontroléru je 5 V, napájení analogové části je odděleno přes filtr L_1C_5 . Zdrojem hodinového signálu je 16 MHz krystalový rezonátor. Pro připojení programátoru USBASP slouží konektor WSL10. Konektor je připojen k napájení, zemi, vývodu RESET a signálům rozhraní SPI (MISO, MOSI, SCK). Po odpojení programátoru jsou vývody SPI použitelné jako běžné vstupy/výstupy.

Tabulka 2 uvádí využití všech vstupů/výstupů mikrokontroléru.

Tabulka 2: Využití vývodů mikrokontroléru

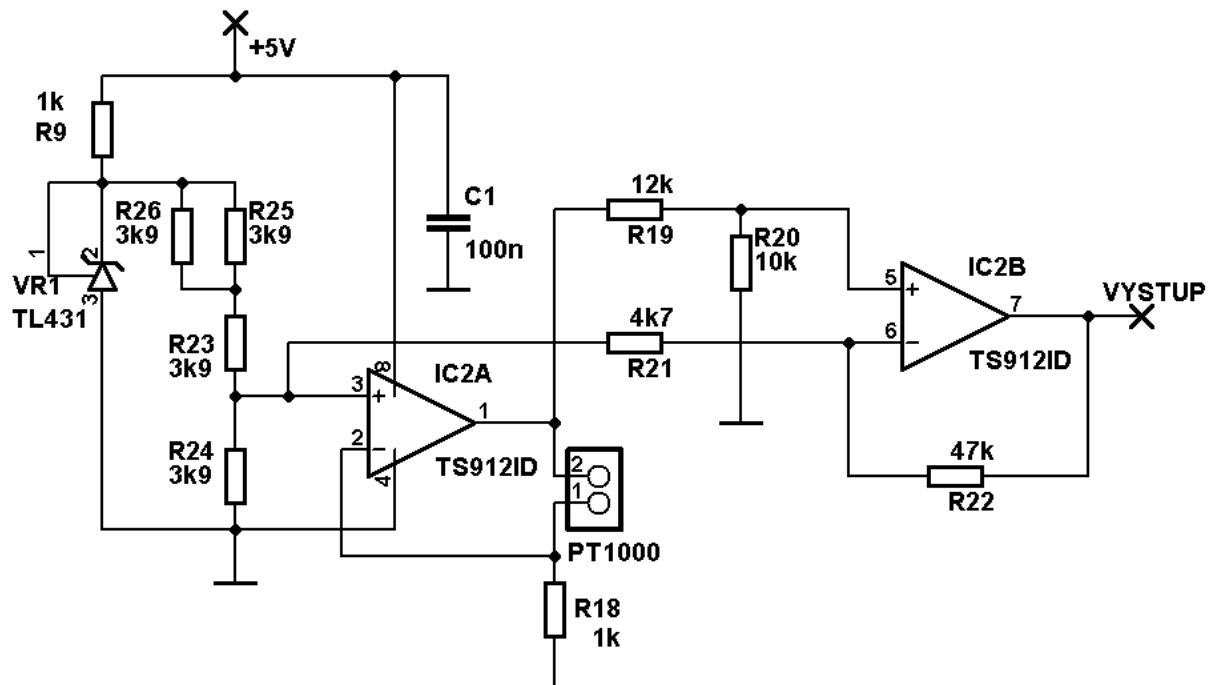
Vývod	Funkce	Vstup/výstup/alternativní funkce
PA0	měření výstupního napětí	A/D převodník
PA1	měření výstupního proudu	A/D převodník
PA2	měření teploty elektrolytu	A/D převodník
PA3	nevyužito	-
PA4	nevyužito	-
PA5	nevyužito	-
PA6	LED - leptání	výstup
PA7	LED - zapnuto	výstup
PB0	nevyužito	-
PB1	LED - chlazení	výstup
PB2	tlačítko OK	vstup
PB3	PWM spínání výstupního měniče	čítač/časovač 0 - OC0
PB4	tlačítko Dolu	vstup
PB5	tlačítko Doleva	vstup
PB6	tlačítko Nahoru	vstup
PB7	tlačítko Doprava	vstup
PC0	displej DATA0	vstup/výstup
PC1	displej DATA1	vstup/výstup
PC2	displej DATA2	vstup/výstup
PC3	displej DATA3	vstup/výstup
PC4	displej DATA4	vstup/výstup
PC5	displej DATA5	vstup/výstup
PC6	displej DATA6	vstup/výstup
PC7	displej DATA7	vstup/výstup
PD0	nevyužito	-
PD1	nevyužito	-
PD2	nevyužito	-
PD3	budič výst. tran. - SHUTDOWN	výstup
PD4	displej ENABLE	výstup
PD5	displej R/W	výstup
PD6	displej RS	výstup
PD7	PWM míchání	čítač/časovač 2 - OC2

3.4 Měření teploty

Při průchodu proudem v řádu jednotek ampér se elektrolyt často výrazně ohřívá. Při různých teplotách se mohou měnit parametry leptání, zejména jeho rychlost, a pokud by docházelo k velkým výkyvům teploty elektrolytu, mělo by to pravděpodobně špatný vliv na opakovatelnost experimentů. Ještě důležitější je fakt, že při zvyšování teploty se snižuje chemická odolnost materiálů a hrozí riziko poškození leptací nádoby. Teplota elektrolytu by proto nikdy neměla být vyšší než asi 55°C, u některých druhů elektrolytů ještě méně. Elektrolyt je tedy během leptání nutné chladit. Zároveň je pro zajištění větší bezpečnosti vhodné teplotu elektrolytu i měřit a kontrolovat tak funkci chlazení. [1], [5]

Pro měření teploty je využit snímač Pt1000 Honeywell HEL-705-U-1-12-00. Tento snímač je vhodný pro použití v chemicky agresivním prostředí. Má malé rozměry (průměr 2 mm, délka 5 mm), pouzdro z chemicky odolného keramického materiálu a teflonovou izolaci přívodních vodičů. V leptací nádobě je umístěn v blízkosti oblasti mezi oběma elektrodami, kde se předpokládá nejrychlejší ohřev elektrolytu. [19]

Výstup tohoto snímače je zpracováván pomocí zapojení s obvodem TS912ID (IC2) [19]. Tento obvod obsahuje dva rail-to-rail CMOS operační zesilovače. Obvod je napájen nesymetrickým napětím 5 V.



Obrázek 11: Obvod pro měření teploty

První zesilovač IC2A má na neinvertující vstup připojené referenční napětí 1V odvozené z reference 2,5 V TL431 děličem napětí z rezistorů R23, R24, R25 a R26.

Z principu nulového napětí mezi vstupy zesilovače v důsledku zpětné vazby plyne, že napětí 1 V je i na rezistoru R18. Tím je zajištěno, že snímačem teploty, který je s rezistorem R18 v sérii, poteče konstantní proud 1 mA. Na výstupu zesilovače IC2A je napětí:

$$U_{IC2A} = 1 + R_{PT1000} \cdot (1/R_{18}) \quad [V] \quad (15)$$

Zesilovač IC2B upravuje toto napětí tak, aby byla jeho velikost vhodná pro zpracování A/D převodníkem mikrokontroléru, který měří v rozsahu 0 V až 2,56 V. Při odporu snímače 1000 Ω (teplota 0°C) je na výstupu zesilovače napětí 0 V, při odporu 1500 Ω (teplota 130°C) napětí 2,5 V.

Napětí U_{IC2A} je vyděleno děličem R19, R20 a přivedeno na neinvertující vstup zesilovače IC2B. Toto napětí je vlivem záporné zpětné vazby i na invertujícím vstupu zesilovače.

$$U_{IC2B+} = U_{IC2B-} = U_{IC2A} \cdot \frac{R_{20}}{R_{19} + R_{20}} \quad (16)$$

Rezistor R21 je zapojen mezi invertujícím vstupem zesilovače IC2B a 1 V referenčním napětím. Je na něm tedy napětí U_{R21} a teče přes něj proud I_{R21} :

$$U_{R21} = U_{IC2B-} - 1 \quad [V] \quad (17)$$

$$I_{R21} = U_{R21}/R_{21} \quad (18)$$

Na výstupu zesilovače IC2B je napětí:

$$U_{IC2Bvýst} = I_{R21} \cdot (R_{21} + R_{22}) + 1 \quad [V] \quad (19)$$

$$U_{IC2Bvýst} = \left(\left[\left(1 + R_{PT1000} \cdot (1/R_{18}) \right) \cdot \frac{R_{20}}{R_{19} + R_{20}} - 1 \right] / R_{21} \right) \cdot (R_{21} + R_{22}) + 1 \quad [V] \quad (20)$$

S dosazenými hodnotami odporů:

$$U_{IC2Bvýst} = \left(\left[\left(1 + R_{PT1000} \cdot (1/1k) \right) \cdot \frac{10k}{12k + 10k} - 1 \right] / 4,7k \right) \cdot (4,7k + 47k) + 1 \quad [V] \quad (21)$$

Pro hodnotu $R_{PT1000} = 1000 \Omega$ vychází $U_{IC2výst} = 0 V$ a pro $R_{PT1000} = 1500 \Omega$ je $U_{IC2výst} = 2,5 V$. Mezi těmito dvěma hodnotami odporu snímače je výstup zesilovače lineární.

3.5 Uživatelské rozhraní

Ke komunikaci zařízení s uživatelem slouží displej, pět tlačítek a tři kontrolní LED.

Informace jsou zobrazována na alfanumerickém displeji MIDAS MC41605B6W-SPR se čtyřmi řádky po šestnácti znacích. Displej je řízen řadičem SUNPLUS SPLC780D, který je ekvivalentní k nejčastěji používanému řadiči znakových displejů HD44780. K vstupně výstupním portům mikrokontroléru je displej připojen třemi řídicími a osmi datovými signály. Napájecí napětí displeje je 5 V. K nastavení kontrastu slouží odporový trimr R10.

Kromě displeje poskytují informace o funkci zařízení také tři LED na panelu přístroje. Tyto kontrolky signalizují zapnuté zařízení (LED5), spuštění leptání (LED4) a chyba výstupu (LED3).

Obsluha přístroje může zadávat parametry pomocí pěti tlačítek. Jsou to tlačítka pro pohyb v menu nahoru (TL5) a dolů (TL2), doleva (TL3), doprava (TL1) a potvrzovací tlačítko (TL4).

3.6 Míchání elektrolytu

Během průběhu leptání je potřeba elektrolyt promíchávat, aby na elektrodách nedocházelo k usazování drobných částic a nečistot, které se mohou v elektrolytu vyskytovat. Z toho důvodu je na dno leptací nádoby volně vložené magnetické míchátko skládající se z permanentního magnetu a pouzdra z chemicky odolného plastu. Leptací nádoba se při používání přístroje staví na podstavec, který obsahuje další permanentní magnet připojený k elektromotoru. Při otáčení tohoto magnetu vzniká otáčivé magnetické pole, které otáčí míchátkem uvnitř nádoby. Jinou možností, jak míchat elektrolyt, by bylo například využití malého čerpadla. Výhoda použitého řešení je v tom, že nádoba nemusí být mechanicky spojená s pohonem míchání, a návrh i výroba zařízení jsou tak jednodušší.

Napájení míchacího elektromotoru je připojeno na napětí 24 V za vstupním LC filtrem. Z důvodu špatné dostupnosti vhodných stejnosměrných 24 V elektromotorů s malým příkonem je využit ventilátor SUNON KDE2406PHS2 o rozměrech 15 x 60 x 60 mm. Příkon ventilátoru je 1,3 W. K ventilátoru je připevněn neodymový magnet z vyřazeného počítačového pevného disku. Napájecí vodiče ventilátoru jsou zapojené do svorkovnice označené jako MICHANI. Paralelně s ventilátorem je připojena zpětná dioda D3.

Míchání elektrolytu se zapíná pomocí NMOS tranzistoru Q3 (IRF520). Aby bylo možné nastavit rychlost míchání, je řídicí elektroda tranzistoru připojena k PWM výstupu OC2 řídicího mikrokontroléru IC3.

3.7 Návrh desek plošných spojů

Zařízení je rozděleno do dvou krabic. Větší krabice KM85 slouží zároveň i jako podstavec pro leptací nádobu a obsahuje jednu desku s míchací a výkonovou částí přístroje (výkonová deska). Druhá menší krabice KP3B má uvnitř desku s řídicími obvody (řídící deska) a desku s ovládáním zařízení (deska panelu). Rozdělení zařízení do dvou krabic je požadováno, aby při jeho ovládání nebylo nutné manipulovat s částí, na které bude stát nádoba s elektrolytem a snížilo se tak riziko náhodného rozlití elektrolytu.

Deska panelu je jednoduchá jednostranná deska s tlačítky a kontrolními LED. S řídicí deskou se propojuje pomocí dvouřadého konektoru pro šestnáctižilový plochý kabel WSL16.

Výkonová deska byla navržena jako oboustranná s tloušťkou mědi 35 μm . Jsou na ní umístěny všechny výkonové části zařízení, tedy vstupní filtr napájení, míchání a obvody výstupního měniče včetně budiče tranzistoru IC4. Budič má z řídicí desky přivedené řídicí signály i 5 V napájení. Pro jednoduchost zapojení by bylo lepší, kdyby byl budič umístěn na řídicí desce a mezi oběma částmi zařízení se přenášel pouze výstup budiče. V tom případě by ale způsoboval přenášený signál větší rušení, protože při spínání a rozepínání tranzistoru poteče mezi tranzistorem a výstupem budiče větší proud než proud mezi vstupem budiče a výstupem mikrokontroléru. Velká vzdálenost mezi budičem a spínaným tranzistorem by navíc měla negativní vliv i na kvalitu samotného spínání tranzistoru.

Na výkonové desce je připojen také zesilovač pro měření výstupního proudu U1. Na měřicím odporu R4 se předpokládá úbytek napětí do 50 mV. Pokud by takto nízké napětí bylo přenášeno kabelem, i když ne příliš dlouhým, do řídicí části, velmi pravděpodobně by byla ve výsledku měření z důvodu nedokonalosti kabelu a okolního rušení velká chyba. Proto musí být zesilovač U1 umístěn na výkonové desce a do řídicí části se přenáší jeho výstupní napětí. I v tomto případě může k určitým nepřesnostem měření dojít, vliv chyby je ale jistě mnohem menší.

Napětí na výstupu výkonové části je naopak před měřením A/D převodníkem potřeba snížit. Aby byla chyba vzniklá přenosem napětí z výkonové do řídicí části co nejmenší, je do řídicí části přivedeno celé výstupní napětí a teprve zde odporovým děličem sníženo na požadovanou úroveň.

Řídící deska je také dvouvrstvá. Nejdůležitějšími obvody na této desce jsou stabilizátor napětí IC1, mikrokontrolér IC3, operační zesilovač IC2 pro zpracování výstupu teplotního snímače a konektory pro propojení všech částí zařízení. LCD displej a deska panelu se připojují ke dvěma konektorům WSL16 označeným jako DISPLEJ a OVLADANI.

Pro propojení řídicí a výkonové desky jsou na každé z nich dva konektory WSL6 nazvané PWM a MERENI. Vodiče z těchto konektorů vedou ke konektorům CANON 9 na stěnách krabic. Krabice řídicí a výkonové části přístroje jsou pak propojeny dvěma kabely typu DB9. Dva oddělené propojovací kabely místo jednoho s větším množstvím signálů byly zvoleny, aby se omezilo rušení mezi rychlými číslicovými signály a analogovými signály, které je potřeba současně přenášet. Konektor PWM přenáší řídicí signály pro budič IC4, signál pro spínání míchání, 24 V napájení řídicí části a zem napájení. Konektor MERENI přenáší analogové signály měření výstupního napětí a proudu měniče, napájení 5 V pro obvody na výkonové desce a zem.

Všechny desky jsou s rozlitym zemním potenciálem. Při návrhu byla snaha, aby většina spojů vedla po horní straně desek. Spodní strana by měla být zejména pro zemnění, i když toho se nepodařilo zcela dosáhnout při návrhu složitější řídicí desky s velkým množstvím malých SMD součástek, kde bylo potřeba vést poměrně hodně spojů i na spodní straně. Na řídicí i výkonové desce jsou analogové části umístěné na krajích a od ostatních obvodů oddělené. Rozlití mědi je na rozhraní analogové části přerušeno, zem analogové části je zde připojena pouze na krátkém úseku spodní strany desky. Tímto opatřením se zabrání tomu, aby impulsní proud z číslicových obvodů procházel přes zem analogových obvodů a měnil tak její potenciál. Signály mezi analogovou a číslicovou částí procházejí v místě propojení zemí, aby na desce nevznikaly velké proudové smyčky.

3.8 Program mikrokontroléru

Řídicí program přístroje pro mikrokontrolér Atmel ATmega16A je napsaný v programovacím jazyce C. Při vývoji programu byl využit nástroj AVR studio, který firma Atmel poskytuje zdarma.

Program je rozdělen do několika částí. V hlavní části programu se provádí zejména obsluha displeje a tlačítek. Dále program využívá přerušeni konce převodu A/D převodníku a periodické přerušeni od časovače 1 každých 200 μ s. Při přerušeni A/D převodníku se ukládají do paměti naměřená data a převodník se nastavuje pro následující měření. Přerušeni od čítače 1 slouží pro měření času i jako regulační smyčka výstupního napětí nebo proudu. Z periférií mikrokontroléru je ještě využit časovač 0 pro generaci PWM signálu řízení výstupního měniče a časovač 2 pro PWM signál ovládající míchání elektrolytu.

3.8.1 Hlavní část programu (funkce Main)

Na úplném začátku programu se nastavuje, které z vývodů budou sloužit jako vstupy a které

jako výstupy (viz Tabulka 2). Hned poté se rozsvítí LED signalizující zapnuté zařízení. Dále se nastaví časovač 1 tak, aby vyvolával přerušení každých 200 μ s. Časovač je v režimu CTC (Clear Time on Compare match), ve kterém se vynuluje a vyvolá přerušení, když jeho stav dosáhne hodnoty nastavené v registru OCR1A. Čítaný signál je odvozený od kmitočtu mikrokontroléru, předděličkou vydělený šedesáti čtyřmi.

Posledním krokem, než se program dostane do hlavní smyčky programu, je inicializace LCD displeje. Její provedení je předepsáno v katalogovém listu displeje. Pro měření doby čekání mezi jednotlivými kroky inicializace se využívá přerušení od časovače 1.

Poté se program dostane do nekonečné smyčky. Tato smyčka je dále rozdělena na několik menších částí pro různé stavy zařízení. O aktuálním stavu rozhoduje hodnota uložená v proměnné *rezim*. Podle této proměnné se program může nacházet v deseti různých stavech. Stavy 0 až 6 slouží pro nastavení leptacího procesu, podle stavu se mění zejména funkce jednotlivých tlačítek. Do stavů 253 až 255 se pak program dostane během samotného leptání (viz Tabulka 3).

Tabulka 3: Stavy zařízení

Hodnota proměnné <i>rezim</i>	Popis stavu
0	Pohyb v hlavním menu
1	Nastavení výstupu měniče v řádu jednotek
2	Nastavení výstupu měniče v řádu desetin
3	Nastavení regulované výstupní veličiny napětí/proud
4	Nastavení času leptání v řádu minut
5	Nastavení času leptání v řádu sekund
6	Nastavení maximální povolené teploty elektrolytu
253	Ukončování leptání
254	Průběh leptání
255	Spouštění leptání

Požadované výstupní napětí se ukládá do proměnné *NastU* v desetinách voltu, proud do proměnné *NastI* jako setiny ampéru. Čas leptání je v proměnné *sekundy* vyjádřen jako počet sekund. Všechny tyto proměnné jsou typu unsigned int. Maximální povolená teplota je ve stupních Celsia uložena v proměnné *MaxT* typu unsigned char. Po zapnutí je maximální teplota nastavena na 50°C, je možné ji měnit v rozsahu 0°C až 60°C. Výstupní napětí lze

nastavovat s krokem 0,5 V, proud pak po 0,1 A.

Po pokynu ke spuštění leptání se nejprve provedou nutná nastavení jednotlivých periférií mikrokontroléru. A/D převodník se uvede do režimu volného běhu s hodinovým kmitočtem 125 kHz, což odpovídá 9600 vzorkům za sekundu. Zadaná výstupní hodnota měniče se přepočte na požadovaný výstup A/D převodníku. Dále se nastavují časovače 0 a 2 pro generaci PWM signálů. Časovač 0 slouží pro řízení spínání výstupního měniče, čítá přímo hodinový signál mikrokontroléru a kmitočet výsledného PWM signálu s osmibitovým rozlišením je 62,5 kHz. Časovač 2 vytváří signál pro spínání míchání, jeho vstupní signál je oproti hodinovému signálu osmkrát vydělen. Pro snadný rozběh motůrku je střída tohoto signálu nejprve nastavena maximální, po jedné sekundě se sníží tak, aby byla rychlost míchání optimální. Proměnné využívané regulátorem se nastaví do svých počátečních hodnot a rozsvítí se LED4. Pak už se leptání spustí. Regulace výstupu podle proudu nemůže být nastavena hned od počátku, protože zesilovač pro měření proudu U1 (INA 169) začne dávat správný výsledek až při napětí na zátěži kolem 2 V (viz str. 27). Proto je při regulaci proudu nejprve nastaveno řízení podle napětí s požadovaným výstupem 4,0 V a na proudovou regulaci se přejde, až když toto napětí překročí hodnotu 3,8 V.

Během samotného leptání probíhá program ve smyčce vnořené do hlavní smyčky funkce main. Regulace výstupu měniče i odpočet času se provádí při přerušení časovače 1, funkce main mezitím obsluhuje displej a tlačítka a na konci smyčky vždy kontroluje, jestli má leptání pokračovat, nebo má být ukončeno. Na displeji se zobrazuje změřené napětí a proud výstupu, teplota elektrolytu a zbývající čas do konce leptání. Aby se předešlo zobrazení chybných hodnot výstupních parametrů napětí nebo proudu způsobených rušivými pulsy na vstupu A/D převodníku, které se občas vyskytují, jsou zobrazovány průměrné hodnoty za posledních šedesát čtyři měření. Změřený proud se vypisuje pouze tehdy, když je výstupní napětí alespoň 1,7 V. Při nižším výstupním napětí zesilovač měření proudu U1 nefunguje správně. V případě, že měnič pracuje jako proudový zdroj, je toto navíc vyhodnoceno jako chyba výstupu měniče a na displeji se objeví blikající nápis „!CHYBA VYSTUPU!“, zároveň se rozbliká i LED3. Druhou možností, při které přístroj hlásí chybný výstup, je situace, kdy je na výstupu připojena příliš velká zátěž a není možné dosáhnout nastaveného výstupního napětí nebo proudu.

Leptání může být ukončeno ze tří různých příčin. První z nich je vypršení nastaveného času. Zbývající čas do konce leptání se aktualizuje během obsluhy přerušení časovače 1 a kontroluje při každém průchodu smyčkou ve funkci main. Další možností, kdy dojde k zastavení leptání, je překročení povolené teploty elektrolytu. Aby nemohlo dojít k

předčasnému ukončení leptání z důvodu náhodné napět'ové špičky na vstupu A/D převodníku, pro zastavení leptání musí alespoň deset posledních měření teploty překročit stanovenou mez. Na displeji se pak objeví nápis „PREKROCENA TEPLOTA ELEKTROLYTU“ a po návratu do nastavovací obrazovky zůstane nastaven čas leptání, který zbýval do konce v čase ukončení. Po vychladnutí elektrolytu je možné leptání dokončit. Leptání může předčasně ukončit také sám uživatel stiskem prostředního tlačítka.

Po ukončení leptání se postupně zastaví A/D převodník a časovače 0 a 2. Zhasne LED4 signalizující leptání. Nakonec se na displeji objeví informace „LEPTANI UKONCENO“, stiskem prostředního tlačítka se zařízení dostane opět do nabídky nastavení a je možné začít nové leptání.

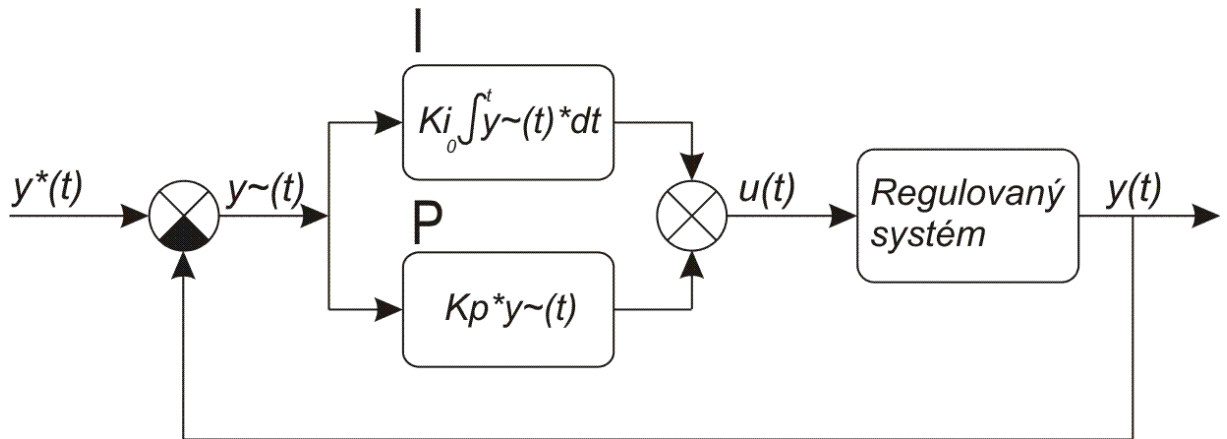
3.8.2 Přerušení A/D převodníku

Přerušení od A/D převodníku se vyvolává po konci každého převodu. Během obsluhy přerušení se ukládají změřené hodnoty a převodník se připravuje k dalším měření. V průběhu leptání se vždy měří všechny tři měřitelné veličiny, tedy elektrické napětí a proud na výstupu snižujícího měniče a teplota elektrolytu. Nejčastěji se měří ta veličina, podle které se reguluje výstup měniče. Druhá výstupní veličina, která se na funkci regulace nepodílí a pouze se zobrazuje na displeji přístroje, je měřena při každém stém převodu kromě každého tisícího, během kterého se měří teplota elektrolytu.

3.8.3 Regulační smyčka - přerušení časovače 1

Přerušení časovače 1 se vyvolává periodicky každých 200 μs . Využívá se pro krátká čekání při práci s displejem a tlačítky, odpočet času leptání a jako smyčka PI (proporcionálně integračního) regulátoru pro řízení výstupního měniče. Výstupem regulátoru je číslo v rozsahu 0 až 245, což odpovídá střídě řídicího PWM signálu v rozsahu 1/256 až 246/255. Spínací tranzistor nemůže být z důvodu principu funkce budiče IC4 sepnut trvale, proto je maximální střída omezena.

PI regulátor je jedním z nejčastějších způsobů regulace v technice. Důvodem je jeho relativní jednoduchost, spolehlivost a pro většinu běžných aplikací dostatečná kvalita regulace. Obrázek 12 znázorňuje základní schéma PI regulátoru pro spojitý čas. Vlastnosti regulátoru jsou dány velikostí proporcionální konstanty K_p a integrační konstanty K_i .



Obrázek 12: Schéma PI regulátoru pro spojitý čas

Význam jednotlivých signálů v obrázku 12 je následující:

- $y^*(t)$ je požadovaný výstup
- $y(t)$ je změřený výstup
- $y\sim(t)$ je chyba výstupu, $y\sim(t) = y^*(t) - y(t)$
- $u(t)$ je výstup regulátoru, řídicí signál regulovaného systému

Pro řídicí signál $u(t)$ platí vztah:

$$u(t) = K_p \cdot y\sim(t) + K_i \int_0^t y\sim(t) \cdot dt \quad (22)$$

Pro číslicový regulátor lze tuto základní rovnici přepsat do podoby:

$$u[n] = K_p \cdot y\sim[n] + K_i \cdot \Delta t \cdot \sum_{k=0}^n y\sim[k] \quad (23)$$

- Kde: $[n]$ značí číslo kroku regulační smyčky
- Δt je perioda opakování regulační smyčky

V programu mikrokontroléru se tento výpočet rozděluje do dvou kroků. Kvůli zjednodušení výpočtu jsou konstanty K_i a Δt sloučeny do jedné konstanty $K_{i\Delta t}$.

$$\text{sumaChyby}[n] = \text{sumaChyby}[n - 1] + K_{i\Delta t} \cdot y\sim[n] \quad (24)$$

$$u[n] = K_p \cdot y\sim[n] + \text{sumaChyby}[n] \quad (25)$$

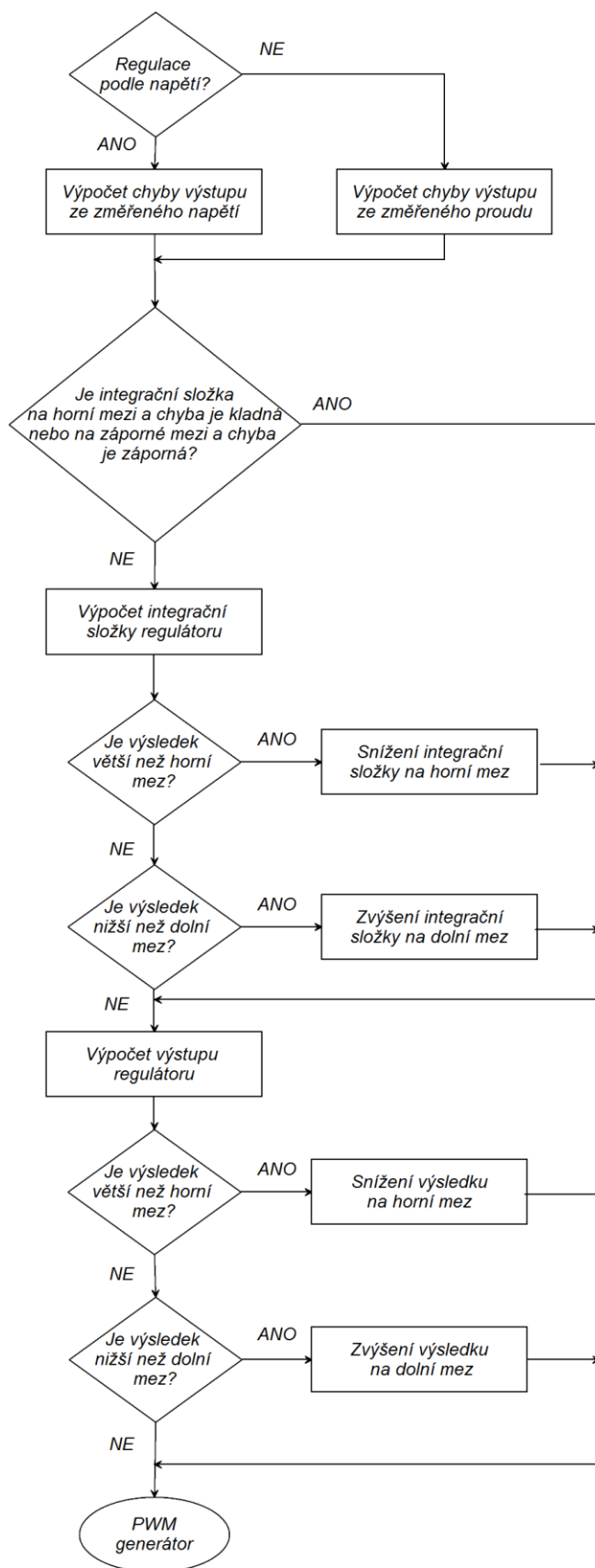
Při převodu regulátoru pracujícího ve spojitém čase na regulátor pracující nespojitě se integrál chyby mění na součet chyb, proto jsou tyto regulátory někdy označovány také jako PS (proporcionálně sumační).

Základní algoritmus regulátoru je dále doplněn několika opatřeními, která zlepšují jeho chování. Prvním z nich je nastavení saturace výstupu, čímž se potlačí jev nazývaný unášení integrační složky nebo také integrator windup. Ten se projevuje v případech, kdy je chyba výstupu y_{\sim} po delší dobu pouze kladná nebo pouze záporná. K tomu by mohlo dojít například při zapojení tak velké zátěže na výstupní svorky měniče, kdy by už měnič nedokázal dodat dostatečný výkon. Bez nastavení saturace by se integrační složka zvyšovala až do přetečení proměnné, pak by se integrační složka vynulovala a opět zvyšovala. Poté, co by se zatížení měniče snížilo a chyba y_{\sim} se stala zápornou, by trvalo dlouhou dobu, než by se integrační složka PI regulátoru ustálila a výstup byl správně regulován. Z tohoto důvodu je rozsah integrační složky regulátoru omezen na 0 až 245, tedy stejně jako je omezen samotný výstup regulátoru.

Proměnná s vypočtenou integrační složkou regulátoru je šestnáct bitů dlouhá, jako hodnota pro výpočet v regulační smyčce se používá pouze osm nejvyšších bitů této proměnné. Maximální hodnota proměnné je tedy $245 \cdot 256$, což se rovná 62 720. Tím je velikost chyby výstupu y_{\sim} průměrována a je odstraněn vliv chyb měření výstupu měniče způsobených šumem měřícího analogového signálu. Zároveň trvá několik cyklů regulační smyčky, než se na řídicím PWM signálu projeví malé chyby výstupu měniče, požadovanou rychlost odezvy je pak možné nastavit velikostí konstanty $K_{i\Delta t}$.

Konstanty K_p a $K_{i\Delta t}$ jsou obecně desetinná čísla. Počítání s desetinnými čísly je pro mikrokontrolér náročné a trvá dlouho, proto jsou tyto výpočty převedeny na celočíselné. Konstanty K_p a $K_{i\Delta t}$ jsou vynásobeny 256 a zaokrouhleny na celá čísla. Po vynásobení konstanty a chyby výstupu y_{\sim} je tento výsledek posunut o osm bitů doprava, tedy vydělen číslem 256. Například konstanta 256 v programu by tak odpovídala hodnotě 1,0 v desetinném vyjádření.

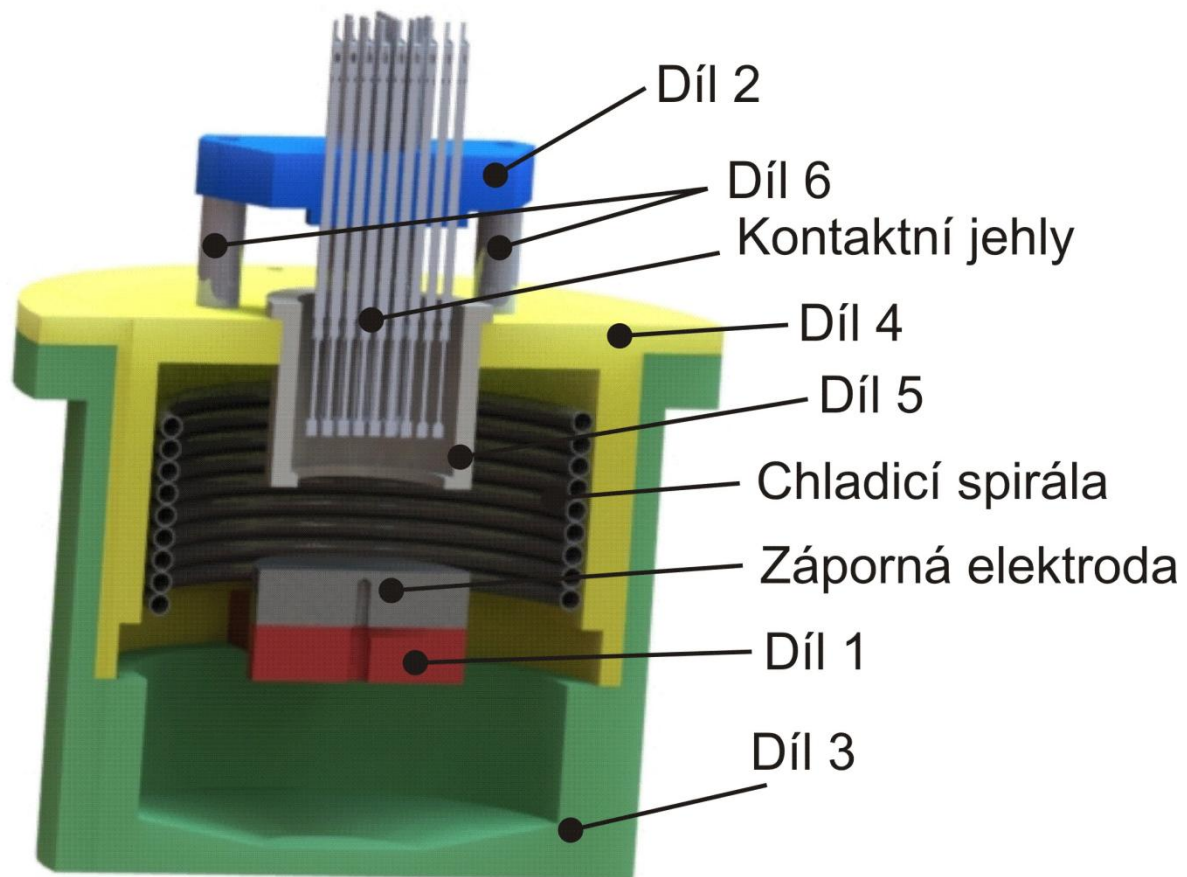
Celý průběh regulační smyčky včetně ošetření saturace regulátoru je znázorněn na obrázku 13. Výpočet střídy výstupního PWM signálu je stejný pro regulaci výstupního napětí i proudu, liší se pouze v tom, ze které hodnoty je počítána chyba výstupu. [21], [22]



Obrázek 13: Průběh regulační smyčky

3.9 Leptací nádoba

Tato kapitola popisuje tu část zařízení, ve které probíhá samotné leptání. Hlavními požadavky na tuto nádobu, z nichž některé už byly zmíněny v předchozích kapitolách, jsou snadná možnost výměny leptaného vzorku, možnost chlazení elektrolytu a měření jeho teploty a promíchávání elektrolytu během leptání. Při jejím návrhu se bylo potřeba zaměřit především na výběr vhodných materiálů s dostatečnou chemickou odolností. Nádoba se skládá z osmi plastových dílů (v dokumentaci označené jako díly 1 až 6, dílu 6 jsou tři kusy, ostatní po jednom kuse) a dvou ocelových dílů (záporná elektroda a chladičí spirála), které byly vyrobeny na zakázku, a dalších běžně dostupných částí, jako je spojovací materiál, vodiče, hadičky. Nádoba byla navržena pro leptání vzorků válcového tvaru o průměru 30 mm a výšce přibližně 10 až 15 mm. Vzorek musí mít vždy na té straně, která se nemá leptat, vyvedené elektrické připojení leptaných částí buď vodivou ploškou, nebo vodičem, na který by bylo možné připojit krokosvorku.



Obrázek 14: Leptací nádoba v řezu

Jako hlavní materiál nádoby byl zvolen plast. Jeho výhodami oproti oceli jsou možnost magnetického míchání elektrolytu (viz str. 34) a elektroizolační vlastnost materiálu. Při výběru konkrétního druhu plastu bylo potřeba zvážit chemickou odolnost materiálů proti látkám, ze kterých se skládají běžně používané elektrolyty, při teplotě alespoň do 50°C. Jednotlivé plastové díly byly vyrobeny z PTFE (teflon), jiným vhodným plastem by byl například také PVDF. [23], [24]

Základem válcové leptací nádoby je díl 3. V jeho spodní části je prostor pro otáčení magnetického míchátko. 30 mm nad dnem dílu se jeho vnitřní průměr rozšiřuje, čímž vzniká opěrná plocha pro díly 1 a 4. V horní části je z vnější strany dílu obruba opatřená dvěma otvory, aby bylo možné vnitřní část nádoby (díl 4) s vnější sešroubovat a vnitřní část tak nemohla vyplavávat nahoru.

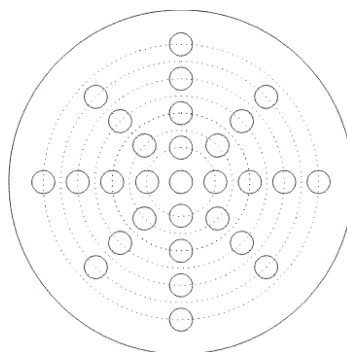
Do dílu 3 je vsunut díl 4, který tvoří horní část nádoby. V jeho horní části je otvor o průměru 38 mm pro vkládání dílu 5 s leptaným vzorkem a tři otvory pro připevnění dílu 2 s kontaktními jehlami. Dále jsou v dílu otvory, skrze které jsou do nádoby zavedeny hadičky chlazení a vodiče k záporné elektrodě a ke snímači měřícímu teplotu elektrolytu. Ve spodní části jsou ve stěně dílu dva otvory pro přišroubování dílu 1.

Díl 1 slouží k upevnění záporné elektrody. Skládá se z válcové střední části a dvou ramen se závity M3 v osách, pomocí kterých je díl spojen s dílem 4. Uprostřed válcové plochy je otvor pro přišroubování elektrody a výřez o rozměrech 2 x 2 mm pro uložení vodiče, který propojuje elektrodu s elektrickým zdrojem.

Leptaný vzorek se vkládá do dílu 5. Díl 5 i se vzorkem se pak vloží do otvoru v horní části nádoby.

Díl 2 přitlačuje k leptanému vzorku kontaktní jehly, které připojují vzorek k elektrickému zdroji. Díl je přišroubován třemi šrouby k dílu 4, rozestup 20 mm mezi oběma díly je zajištěn distančními sloupky – díly 6. Díl 2 je nutné při výměně leptaného vzorku z nádoby sundat, proto jsou k jeho zajištění použity vroubkované matice o průměru 12 mm, které lze jednoduše povolit rukou.

Pro kontaktování vzorku byly vybrány jehly H727LARD od výrobce FEINMETAL. Tyto jehly mohou být umístěny v rastru od 2,54 mm. Průměr jehly je 2 mm a celková délka 75,2 mm. Zdvih jehly je 12 mm, což umožňuje poměrně velký rozsah výšky leptaných vzorků. Udávaný maximální proud jehlou je 5 A, odpor jehly 25 mΩ. Vzorek je přitlačován celkem dvaceti devíti těmito kontaktními jehlami, jejich rozmístění je znázorněno na obrázku 15. Jehlami je pokryta velká část vzorku, kontaktní ploška tedy může být téměř v libovolném místě. [25]



Obrázek 15: Rozmístění kontaktních jehel

Pro chlazení elektrolytu je uvnitř nádoby ocelová spirála, kterou by během leptání měla protékat studená voda nebo jiná kapalina a odvádět z nádoby teplo. Konce spirály jsou pomocí hadičky z materiálu PVDF vyvedeny ven z nádoby. Oběh chladicí kapaliny musí být zajištěn zvnějšku, například připojením jednoho konce spirály na vodovod.

Záporná elektroda je také vyrobena z oceli. Má tvar válce o průměru 40 mm a výšce 10 mm. Uprostřed elektrody je z jedné strany neprůchozí díra o hloubce 8 mm se závitem M3, pomocí které je elektroda spojena s dílem 1.

Spirála i elektroda jsou vyrobeny z nerezové oceli DIN 1.4571. Tento druh oceli má dobrou odolnost proti korozi i v kyselém prostředí a často se používá pro zařízení v chemickém průmyslu. [20]

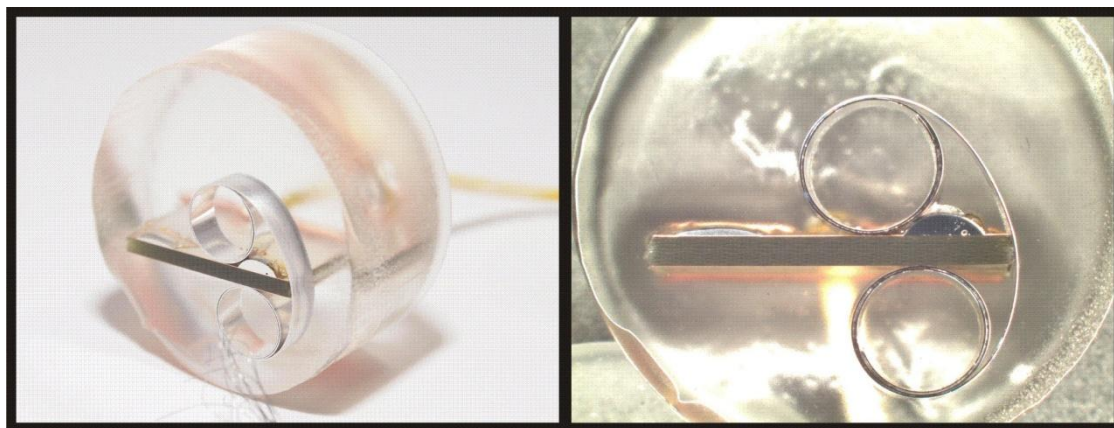
U těch částí nádoby, které se dostávají do styku s elektrolytem, byly pro spojení jednotlivých dílů použity namísto obyčejných kovových šroubů plastové šrouby z polyamidu 66. Tento materiál má relativně dobrou odolnost proti chemikáliím, běžné kovové šrouby by mohly v elektrolytu rychle korodovat.

Záporná elektroda i jehly kontaktující leptaný vzorek jsou připojeny k elektrickému zdroji vodičem o průřezu 1 mm^2 pomocí dvou klasických 4mm jednopólových zástrček. Je tak možnost odpojit připojení vzorku přes kontaktní jehly nahradit ho například vodičem s krokosvorkou. Vodič k záporné elektrodě, který se dostává do kontaktu s elektrolytem, má odolnou teflonovou izolaci, ostatní vodiče mají běžnou izolaci z PVC.

4 Ověření funkčnosti přístroje

Pro otestování navrženého zařízení bylo zvoleno selektivní leptání pájek Sn60Pb40 a Sn96,5Ag3Cu0,5 (SAC). Výsledky tohoto pokusu byly porovnávány se stavem před vyleptáním a se stejným vzorkem leptaným chemickou metodou. Všechny dále popsané experimenty byly provedeny v laboratořích Katedry technologií a měření Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Materiálografický vzorek byl vytvořen napájením pájek Sn60Pb40 a Sn96,5Ag3Cu0,5 do dvou bodů na desku pro plošné spoje typu FR4 s 35 μm silnou měděnou folií. Dále byl na desku připájen vodič pro elektrické připojení vzorku během leptání. Takto připravený vzorek byl zalit za studena ve válcové formě o průměru 30 mm. Po vytvrzení zalévací hmoty byl vzorek postupně vybrušen na materiálografické brusce brusnými kotouči o zrnitosti 80, 220, 600 a 1200. Následně byl vzorek vyleštěn kolejnií silikou s hrubostí zrn 0,05 μm . Obrázek 16 ukazuje celkový pohled na připravený vzorek. Obrázky 17 a 18 zachycují oba druhy pájek po vyleštění při větším zvětšení. Při pohledu na obrázek 17 je patrné, že bez naleptání materiálu je možné pozorovat některé makrostrukturální prvky, jako například bublinky v pájce, mikrostruktura materiálu ale rozeznatelná není. Na obrázku 18 je situace podobná, je však možné rozeznat tmavé fáze olova od světlého cínu.



Obrázek 16: Testovaný materiálografický výbrus. U sponky v pravé části vzorku je pájka Sn96,5Ag3Cu0,5, na levé straně pájka Sn60Pb40

K vyvolání struktury materiálu byl nejprve použit chemický leptací přípravek MasterMet2 od výrobce Buehler k selektivnímu leptání cínu. Výsledky jsou zachyceny na obrázcích 19 a 20. Na obrázcích je vidět odhalení mikrostruktury, zejména na fotografiích z elektronového mikroskopu lze studovat strukturu materiálu velmi detailně.

Po zaznamenání výsledku chemického leptání byl vzorek znovu přeštěn a leptán

elektrolyticky s využitím navrženého přístroje. Opět bylo cílem selektivní odleptání cínu. Pro leptání byl vybrán elektrolyt A2 vyráběný firmou Struers. Tento elektrolyt je podle výrobce vhodný pro leptání hliníku, antimonu, beryllia, niklu, stříbra, oceli, cínu a titanu. Elektrolyt je dodáván v balení o objemu přibližně 1 l. Jeho složení je následující:

- 730 ml etanol
- 100 ml butylglykol
- 90 ml voda
- 78 ml kyselina chloristá 60%

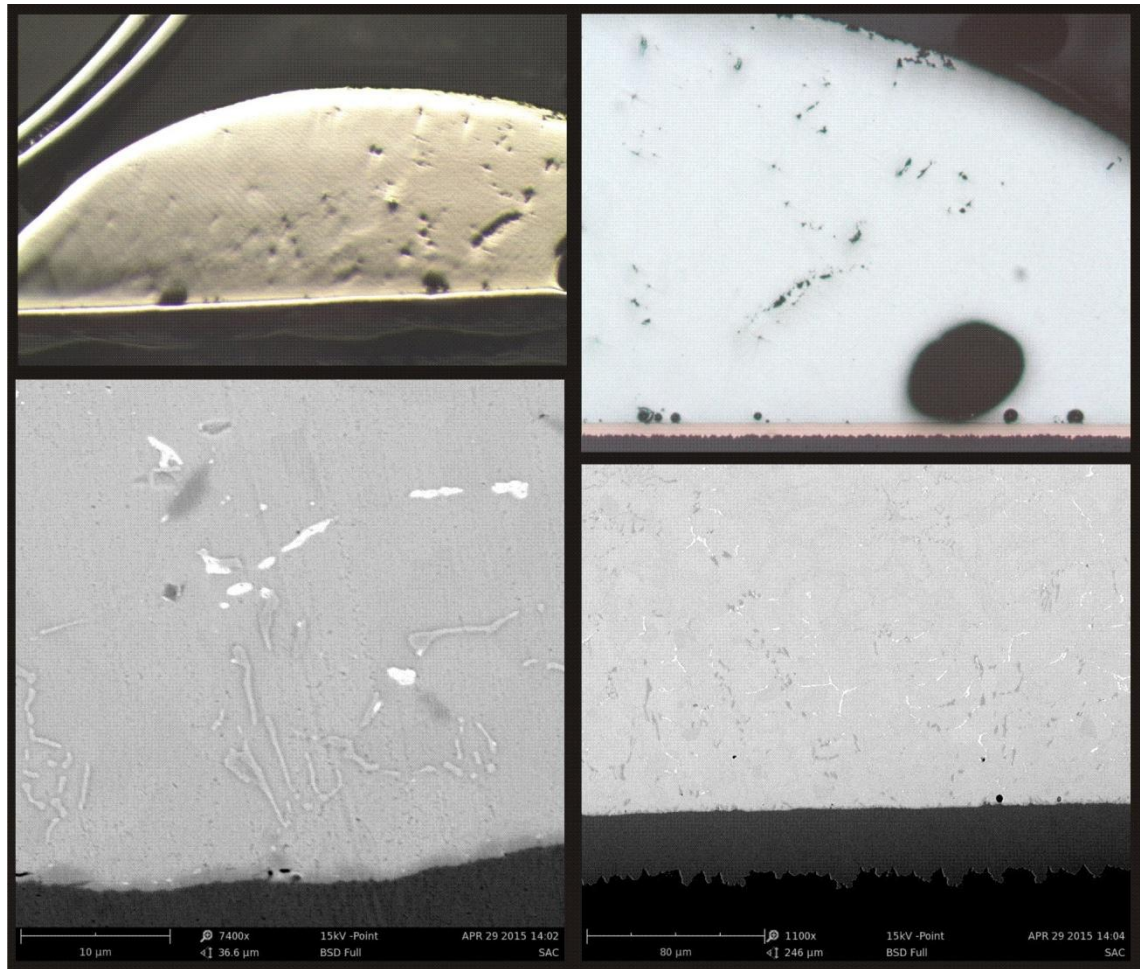
Vzorek byl leptán při napětí 3 V po dobu 10 s. Fotografie vyleptaného vzorku jsou na obrázcích 21 a 22. Při porovnání s výsledky chemického leptání (obrázky 19 a 20) je zajímavé, že na obrázcích z optického mikroskopu je mezi oběma metodami velký rozdíl, zatímco obrázky získané pomocí elektronového mikroskopu jsou velmi podobné.

U pájky Sn_{96,5}Ag₃Cu_{0,5} došlo vlivem elektrolytického leptání k vytvoření velkého množství prohlubní, v některých místech však struktura narušena nebyla. To je dobře vidět na obrázku 21, kde je velký obrázek z optického mikroskopu zaostřen na úroveň mědi (tj. nenaleptané plochy), menší obrázek vpravo nahoře je zaostřen na dno prohlubní vytvořených leptáním. Oproti chemicky vyleptanému vzorku je na těchto snímcích mnohem lépe rozeznatelná intermetalická vrstva vzniklá v místě styku pájky s mědí. Při pohledu elektronovým mikroskopem jsou u vzorku leptaného elektrolyticky lépe patrné některé jemné prvky mikrostruktury.

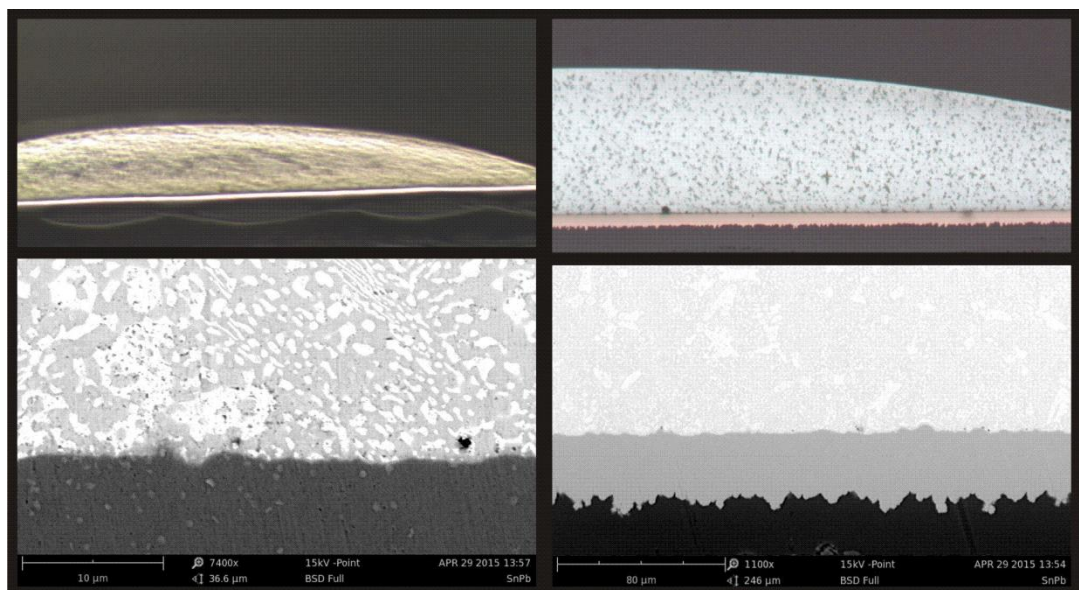
I na pájce Sn₆₀Pb₄₀ bylo odleptáno znatelně více materiálu než při leptání chemickém. Na rozdíl od bezolovnaté pájky však byl materiál odebrán z celé plochy. Při pozorování vzorku elektronovým mikroskopem jsou výsledky elektrolytického i chemického leptání velmi podobné.

Provedený experiment prokázal funkčnost navrženého zařízení pro elektrolytické leptání. Při porovnání s chemickým leptáním vzorku byly objeveny některé odlišnosti obou metod. Během elektrolytického leptání bylo ze vzorků odebráno podstatně větší množství materiálu, než leptáním chemickým. Množství odleptaného materiálu by bylo možné snížit nebo naopak zvětšit změnou doby leptání. To, že je možné v krátkém čase odleptat poměrně velkou vrstvu materiálu vzorku, je velká odlišnost elektrolytického leptání oproti leptání chemickému. Vzorek navíc může být před elektrolytickým leptáním i elektrolyticky vyleštěn, což ještě více snižuje čas potřebný k přípravě vzorku. Velká rychlost leptání ovšem může být v některých případech i na škodu a nejvhodnější metoda leptání vždy závisí na konkrétním případě. Elektrolytické leptání výbrusů je tak k tradičnějšímu leptání chemickému jistě

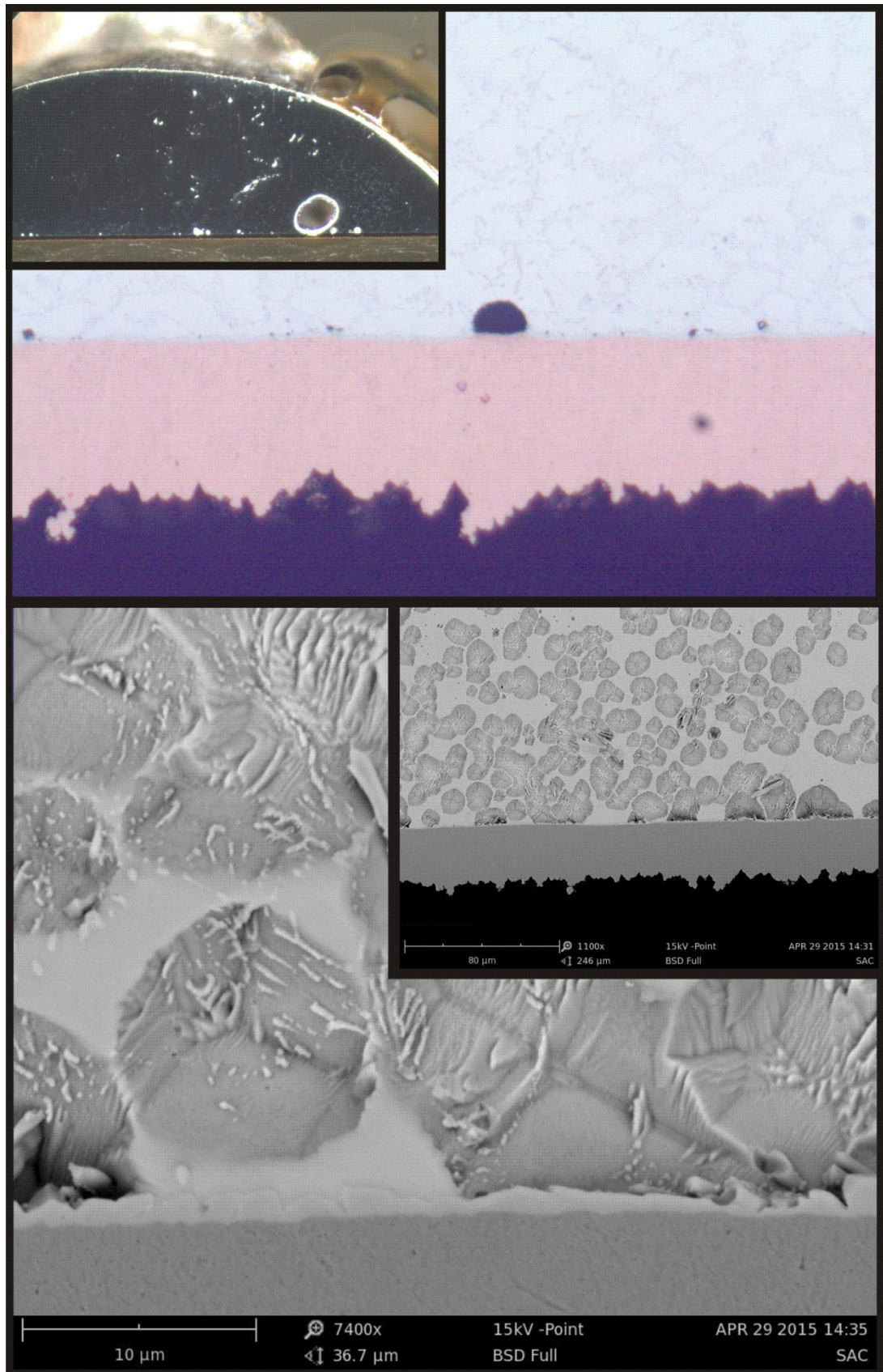
užitečnou alternativou.



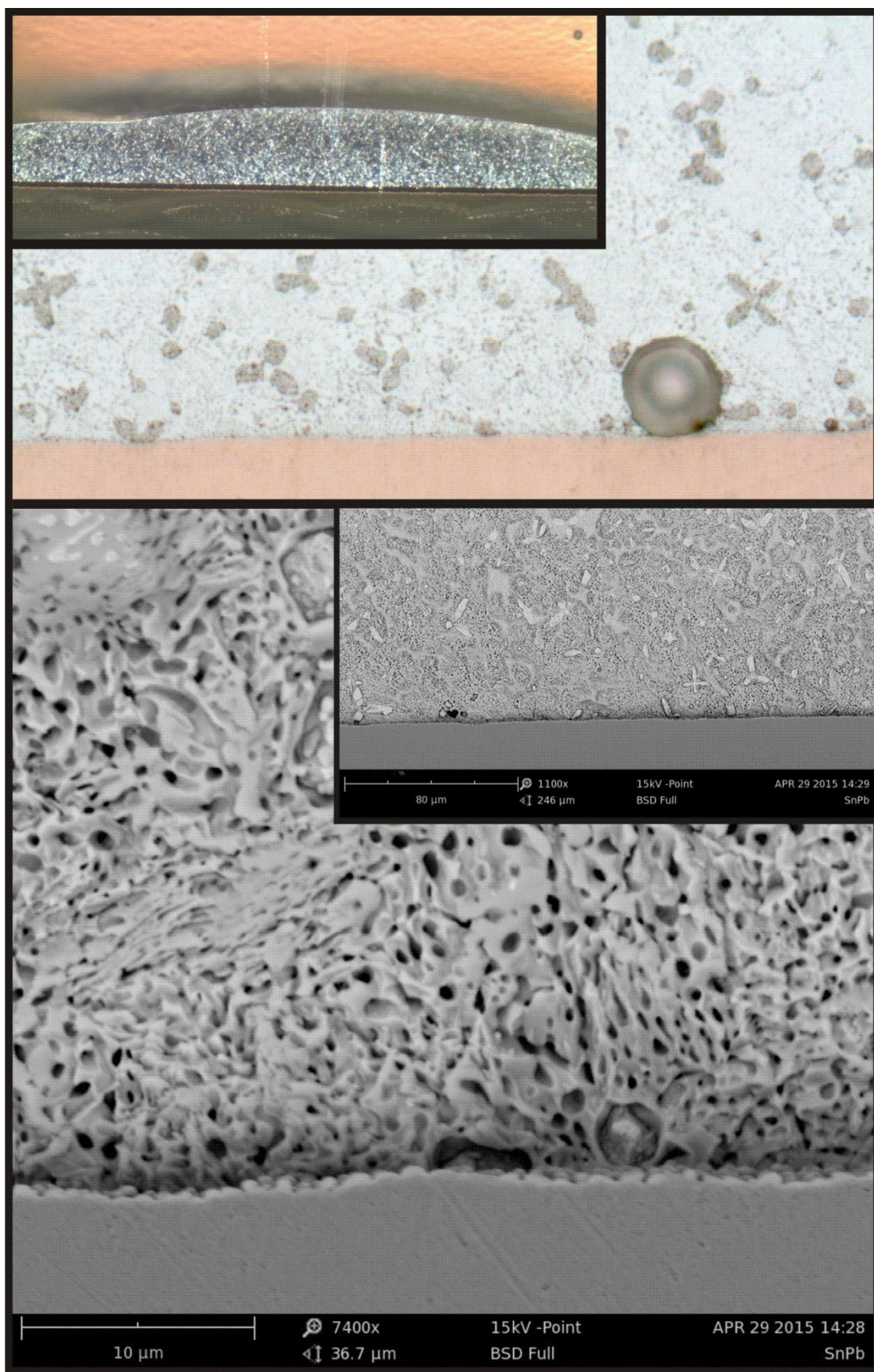
Obrázek 17: Pájka Sn96,5Ag3Cu0,5 po vyleštění při pozorování optickým (horní dva obrázky) a elektronovým (spodní dva obrázky) mikroskopem



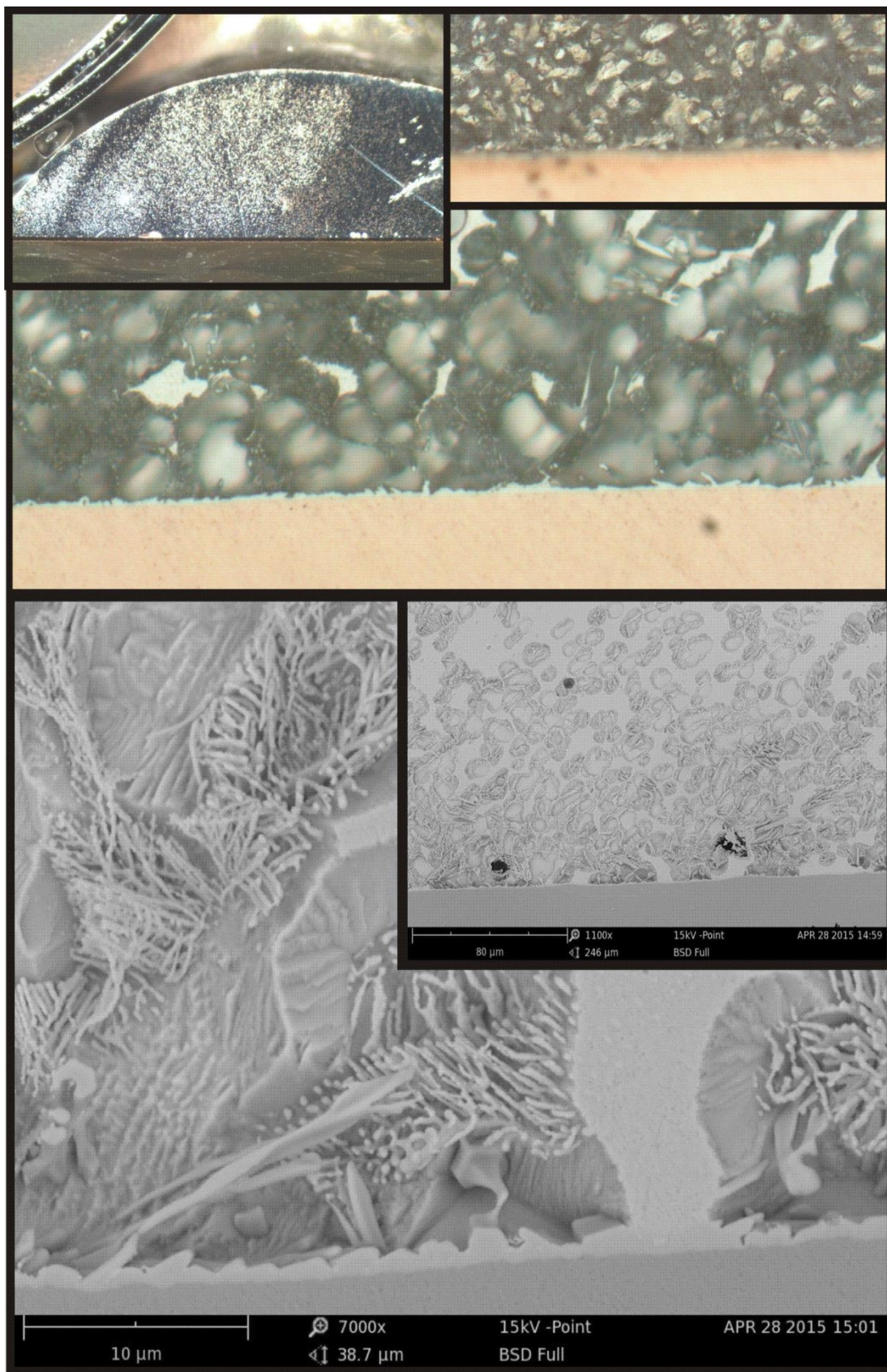
Obrázek 18: Pájka Sn60Pb40 po vyleštění při pozorování optickým (horní dva obrázky) a elektronovým (spodní dva obrázky) mikroskopem



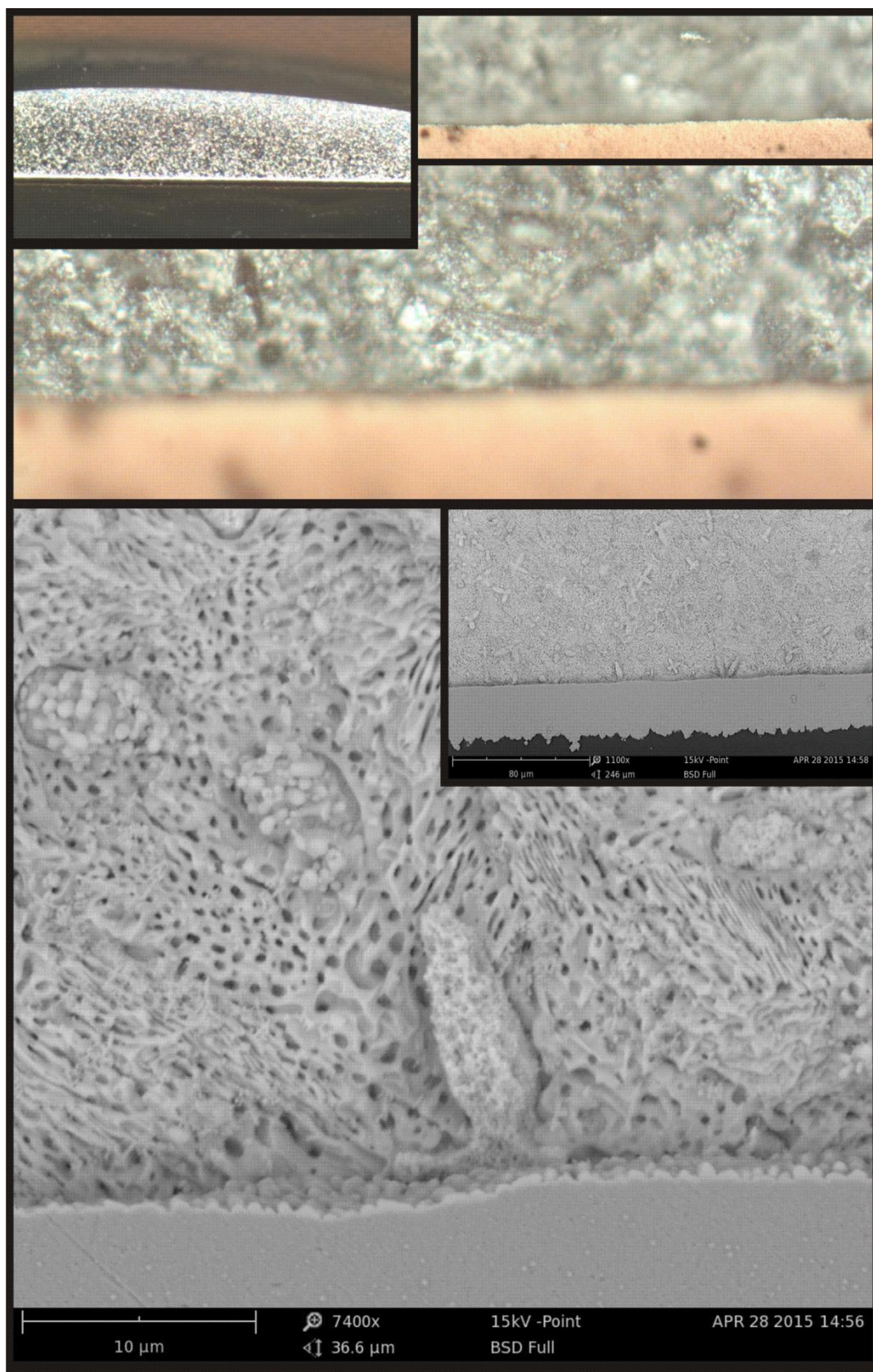
Obrázek 19: Pájka Sn96,5Ag3Cu0,5 po vyleptání přípravkem MasterMet2 při pozorování optickým (horní dva obrázky) a elektronovým (spodní dva obrázky) mikroskopem



Obrázek 20: Pájka Sn60Pb40 po vyleptání přípravkem MasterMet2 při pozorování optickým (horní dva obrázky) a elektronovým (spodní dva obrázky) mikroskopem



Obrázek 21: Pájka Sn96,5Ag3Cu0,5 po elektrolytickém vyleptání elektrolytem Struers A2 (napětí 3 V po dobu 10 s) při pozorování optickým (horní tři obrázky) a elektronovým (spodní dva obrázky) mikroskopem



Obrázek 22: Pájka Sn60Pb40 po elektrolytickém vyleptání elektrolytem Struers A2 (napětí 3 V po dobu 10 s) při pozorování optickým (horní tři obrázky) a elektronovým (spodní dva obrázky) mikroskopem

5 Závěr

Úvodní část práce se věnovala problematice elektrolytického leptání materiálografických vzorků i dalších souvisejících kroků nutných pro přípravu vzorku. Druhou a nejrozsáhlejší částí této práce byl návrh zařízení pro elektrolytické leptání vzorků. Nakonec bylo toto zařízení otestováno při selektivním leptání cínu dvou různých druhů pájek. Pro zvolený elektrolyt Struers A2 se podařilo určit vhodné nastavení přístroje. Výsledky pozorování vyleptaného vzorku byly porovnány s pozorováním stejného vzorku připraveného pomocí chemického leptání.

I přes úspěšné řešení práce byly v průběhu testování navrhnutého zařízení zjištěny některé jeho nepříznivé vlastnosti, které by bylo vhodné při stavbě dalšího přístroje napravit. Jako nepříliš vhodné se ukázalo snímání výstupního napětí před rezistorem pro měření proudu (R_4 , 10 m Ω). Při regulaci výstupního napětí a větším zatížení měniče, kdy jeho výstupem tečou proudy kolem 4 A, je vlivem tohoto odporu a dalších odporů mezi výstupem měniče a leptací nádobou (zejména přechodové odpory konektorů) na zátěži napětí zhruba o dvě desetiny voltu nižší. Tato chyba by neměla mít pro výsledek leptání velký význam, přesto by jí bylo jednoduché alespoň snížit umístěním snímače napětí až za rezistor R_4 . Při požadavku na úplné odstranění této chyby by bylo nutné měřit napětí přímo na přívodech u leptací nádoby. Případně by bylo možné chybu korigovat výpočtem podle protékajícího proudu, tento způsob by ale přestal být přesný například po výměně konektorů. Dále by bylo dobré nahradit zesilovač snímání proudu U1 (INA169) jiným typem, který by umožňoval správné měření proudu i při nulovém výstupním napětí. V navrženém řešení přístroje je nutné, aby v režimu proudového zdroje bylo po dosažení nastaveného proudu na zátěži alespoň 1,7 V. To by v naprosté většině případů nemělo činit žádné potíže, není ale možné absolutně vyloučit, že pro některý elektrolyt bude potřeba právě takovýchto hodnot.

Celkově však dosažené výsledky splnily očekávání. Při použití selektivního elektrolytického leptání bylo možné zejména u pájky SAC detailněji zkoumat její mikrostrukturu než při chemickém leptání přípravkem Buehler MasterMet2, který se pro výzkum pájených spojů na Katedře technologií a měření FEL ZČU běžně používá. Dále došlo i k většímu zviditelnění intermetalické vrstvy. Využití přístroje ale není omezeno pouze na leptání pájených spojů. Z velkého množství elektrolytů popsanych v literatuře (např. [1] nebo [5]) lze zvolit správné řešení pro leptání prakticky jakéhokoli elektricky vodivého materiálu.

I když je navržený přístroj určen zejména pro elektrolytické leptání, může v některých případech posloužit i pro elektrolytické leštění materiálografických výbrusů. Toto použití je

ale omezeno maximálním napětím 20 V, elektrolytické leštění je tedy možné pouze s některými materiály vzorků a druhy elektrolytů.

Použitá literatura

Metalografie

- [1] ZIPPERIAN, Donald C. *Metallographic Handbook* [online]. Tucson: PACE Technologies, 2011 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.metallographic.com/Brochures/Met-Manual-2b.pdf>
- [2] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
- [3] KRATOCHVÍL, B., V. ŠVORČÍK a D. VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [4] *Návody k laboratorním cvičením: Multimediální výukový projekt* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, [2002], 02.12. 2008 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/>
- [5] *Electromet 4 polisher/etcher: Operation and Maintenance Instructions*. Lake Bluff: Buehler, 1988. Dostupné z: http://engineering.case.edu/groups/metlab/sites/engineering.case.edu.groups.metlab/files/images/buehler_electromet_4.pdf
- [6] TAYLOR, B. a A. GUESNIER. *Metallography of Welds*. Kodaň: Struers. Dostupné z: <http://www.struers.cz/resources/elements/12/97503/Application%20Notes%20Welding%20English.pdf>
- [7] WEIDMANN, E., A. GUESNIER a H. BUNDGAARD. *Metallographic preparation of microelectronics*. Kodaň: Struers [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.struers.cz/resources/elements/12/101828/Application%20Notes%20Microelectronics%20English.pdf>
- [8] *PoliMat 2: Electrolytic polisher/etcher*. Buehler, 2007. Dostupné z: <http://www.tcontrol.ro/Content/prospecte/PoliMat2.pdf>
- [9] *LectroPol-5: Automatic, microprocessor controlled electrolytic polishing and etching of metallographic specimens*. Struers, 2012. Dostupné z: http://www.struers.com/resources/elements/12/231333/LectroPol-5_English.pdf
- [10] *Electropolishing: A User's Guide to Applications, Quality Standards and Specifications* [online]. 9. vyd. Houston: DELSTAR METAL FINISHING, 2003 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.delstar.com/assets/pdf/epusersguide.pdf>

Návrh zařízení

- [11] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMEL. 4. díl, AVR ATmega16*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-174-8.
- [12] *ATmega16A: DATASHEET* [online]. San Jose: Atmel, 2014 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z:

- http://www.atmel.com/Images/Atmel-8154-8-bit-AVR-ATmega16A_Datasheet.pdf
- [13] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1998. ISBN 80-7082-411-5.
- [14] *Application Note AND9135/D: LC Selection Guide for the DC-DC Synchronous Buck Converter* [online]. ON Semiconductor, 2013 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND9135-D.PDF
- [15] *Application Report SLTA055: Input and Output Capacitor Selection* [online]. Texas Instruments, 2006 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slta055/slta055.pdf>
- [16] SCLOCCHI, Michele. *Input Filter Design for Switching Power Supplies* [online]. Texas Instruments, 2011 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snva538/snva538.pdf>
- [17] *Application Note AN-978: HV Floating MOS-Gate Driver ICs* [online]. International Rectifier, 2007 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-978.pdf>
- [18] Buck Switching Converter Design Equations. *Daycounter's Lab Book and Resources* [online]. Daycounter, 2004 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.daycounter.com/LabBook/BuckConverter/Buck-Converter-Equations.phtml>
- [19] *Temperature Sensors: HEL-700 Series* [online]. Honeywell [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=50012
- [20] *Specifikace nerezových materiálů* [online]. Armat [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf>
- [21] SACHS, Jason. How to Build a Fixed-Point PI Controller That Just Works: Part I. *EmbeddedRelated* [online]. 2012 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.embeddedrelated.com/showarticle/121.php>
- [22] SACHS, Jason. How to Build a Fixed-Point PI Controller That Just Works: Part II. *EmbeddedRelated* [online]. 2012 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.embeddedrelated.com/showarticle/123.php>
- [23] *Chemical Resistance Chart* [online]. [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.quickcutgasket.com/pdf/Chemical-Resistance-Chart.pdf>
- [24] *Tribon: Polotovary z technických plastů* [online]. Tribon, 2011 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.technicke-plasty-tribon.cz/>
- [25] *Contact probes* [online]. FEINMETALL, 2015 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.feinmetall.com/product-finder/contact-probes/>

Přílohy

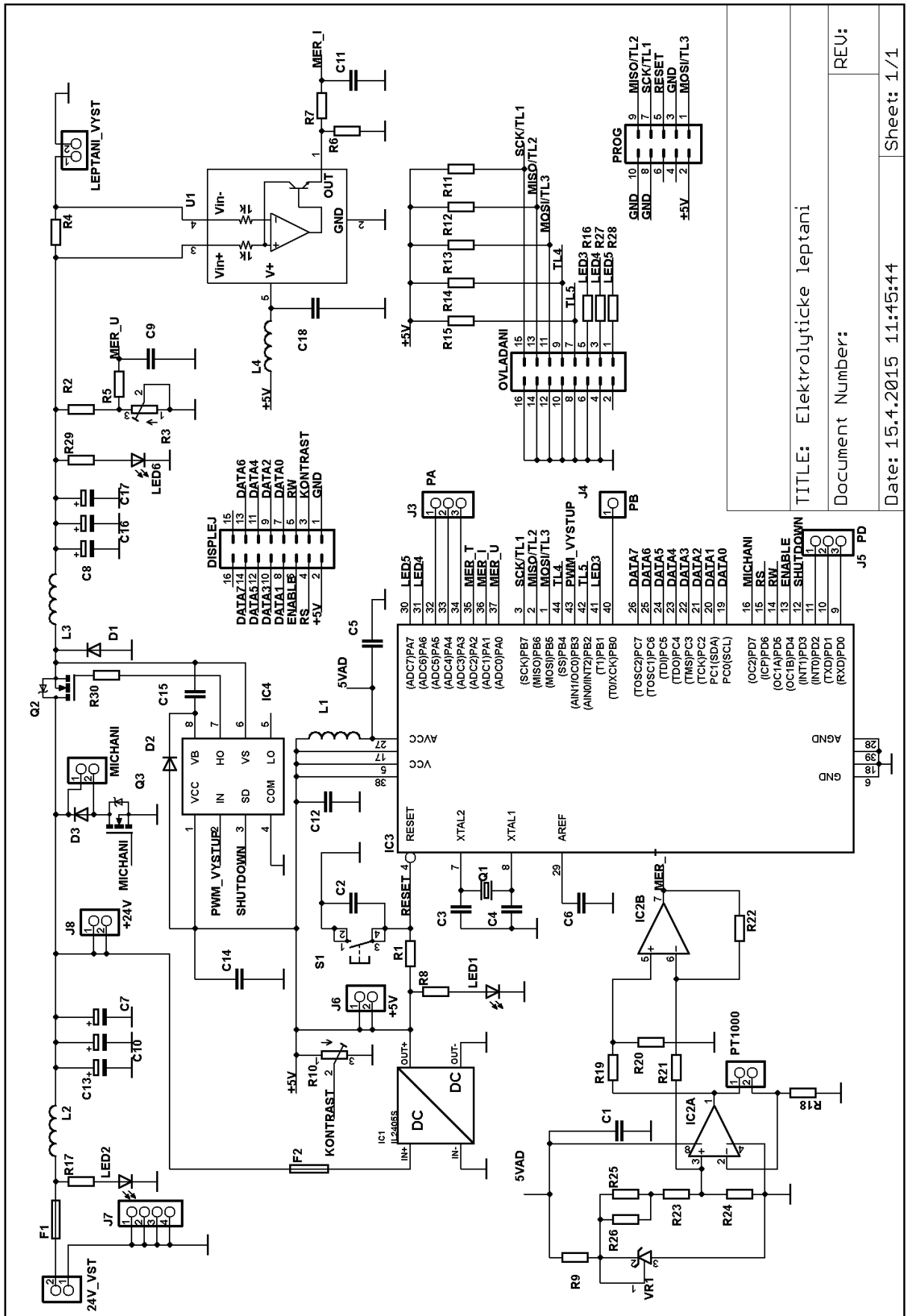
A. Návod k obsluze přístroje pro elektrolytické leptání materiálografických výbrusů

1. Propojte obě elektrické části zařízení pomocí dvou kabelů DB9.
2. Z leptací nádoby vyjměte její vnitřní část a zkontrolujte, zda je do nádoby vloženo magnetické míchátko.
3. Nalijte do nádoby přibližně 370 ml elektrolytu a zasuňte vnitřní část nádoby. Spodní část dílu pro vládání vzorku by měla být ponořena do elektrolytu tak, aby po vložení vzorku byla jeho spodní část v kontaktu s elektrolytem a zároveň se neponořila horní část vzorku. V případě, že tomu tak není, upravte množství elektrolytu v nádobě.
4. Pomocí dvou šroubů spojte vnitřní a vnější část nádoby.
5. Jednu hadičku chlazení připojte na vodovod, druhá hadička slouží k odtoku chladicí vody.
6. Připojte elektrické napájení přístroje a propojte snímač teploty elektrolytu s řídicí částí přístroje (CINCH konektor).
7. Vložte do nádoby leptaný materiálografický vzorek.
8. Nasadíte a přišroubujte díl s kontaktními jehlami.
9. Připojte vodiče od kontaktních jehel i záporné elektrody do výst. zdírek přístroje.
10. Umístěte leptací nádobu na místo vyznačené na přístroji.
11. Nastavte požadované leptací napětí nebo proud, čas leptání a maximální teplotu.
12. Pusťte vodu chlazení.
13. Na ovládání přístroje zvolte SPUSTIT.
14. Po vyleptání odšroubujte díl s kontaktními jehlami a vzorek vyjměte i s dílem, do kterého je vložen.

Poznámky

- Leptání je možné předčasně zastavit stiskem prostředního tlačítka a následnou volbou ANO.
- Pokud z nějakého důvodu není možné dosáhnout nastavených hodnot, začne blikat kontrolka *chyba* a na displeji se objeví nápis „CHYBA VÝSTUPU“.
- Při nastavení leptacího proudu je pro správnou funkci nutné, aby po dosažení zvoleného proudu bylo na výstupu napětí alespoň 1,7 V.
- Pokud je překročena povolená teplota elektrolytu, leptání se zastaví. Přitom zůstane nastaven čas, který zbýval do konce leptání v době jeho ukončení. Po ochlazení elektrolytu je tak možné leptání dokončit.

B. Schéma zapojení



TITLE: Elektrolyticke leptani
 Document Number:
 Date: 15.4.2015 11:45:44
 Sheet: 1/1

C. Seznam součástek

Rezistory

Hodnota	Množství	Označení	Pouzdro/rozteč	Poznámka
10 k Ω	8	R1, R2, R11, R12, R13, R14, R15, R20	1206	
12 k Ω	1	R19	1206	
160 Ω	2	R5, R7	1206	
1 k Ω	2	R9, R18	1206	
1,6 k Ω	2	R17, R29	1206	
1,8 k Ω	3	R16, R27, R28	1206	
220 Ω	1	R8	1206	
3,9 k Ω	4	R23, R24, R25, R26	1206	
47 k Ω	2	R6, R22	1206	
4,7 k Ω	1	R21	1206	
6,8 Ω	1	R30	0603	
2 k Ω	1	R3	1206	
20 k Ω	1	R10	1206	
10 m Ω	1	R4	12 mm	1 W

Kondenzátory

Hodnota	Množství	Označení	Pouzdro/rozteč	Poznámka
100 nF	8	C1, C2, C5, C9, C11, C12, C14, C18	1206	
10 nF	1	C6	1206	
20 pF	2	C3, C4	1206	
10 μ F	1	C15	1206	
1000 μ F	6	C7, C8, C10, C13, C16, C17	5 mm	Low ESR

Indukčnosti

Hodnota	Množství	Označení	Pouzdro/rozteč	Poznámka
10 μ H	2	L1, L4	1812	
560 μ H	2	L2, L3	13 mm, \emptyset jádra 43 mm	10 A

Polovodičové součástky

Typ	Množství	Označení	Pouzdro/rozteč	Poznámka
IL2405S	1	IC1		měníč 24V/5V
TS912ID	1	IC2	SOIC-8	operační zes.
Atmega16A	1	IC3	TQFP-44	mikrokontrolér
IRS2302SPBF	1	IC4	SOIC-8	budič tranzistoru
TL431	1	VR1	SOT-23	napěťová reference
INA169	1	U1	SOT-23-5	zesilovač měření proudu
MC41605B6W	1	SV3 (konektor)		LCD displej 16x4 zn.
MBR760	1	D1	TO-220AC	Schottkyho dioda
EGL1G	1	D2	SOD80	dioda

1N4004	1	D3	10 mm	dioda
AUIRF3205	1	Q2	TO-220AB	NMOS tranzistor
IRF520	1	Q3	TO-220AB	NMOS tranzistor
GL-1206GW	1	LED1	1206	svítivá dioda
L-934IC*G	5	LED2, LED3, LED4, LED5, LED6	3 mm	svítivá dioda

Konektory

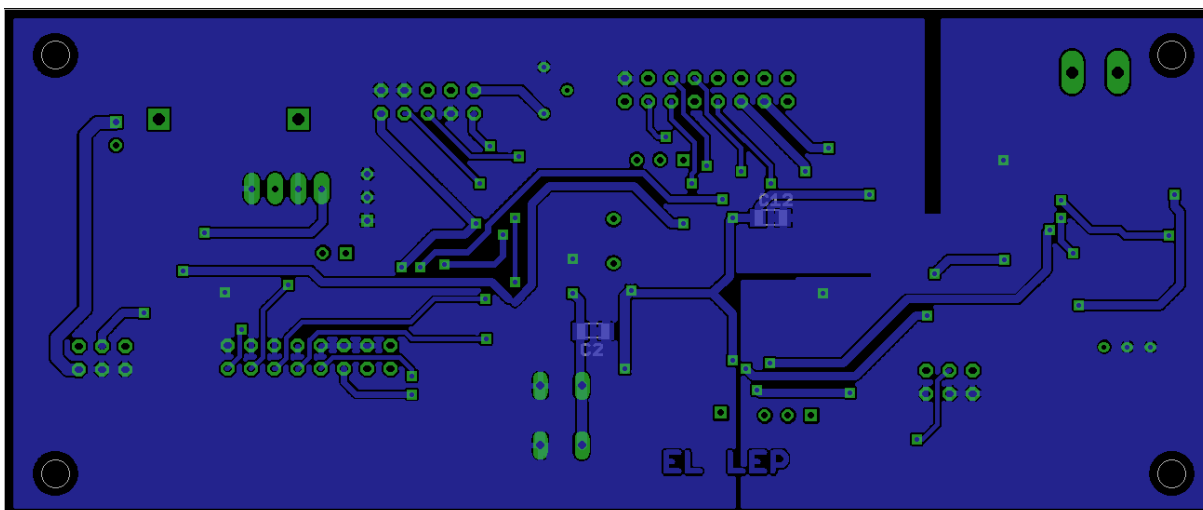
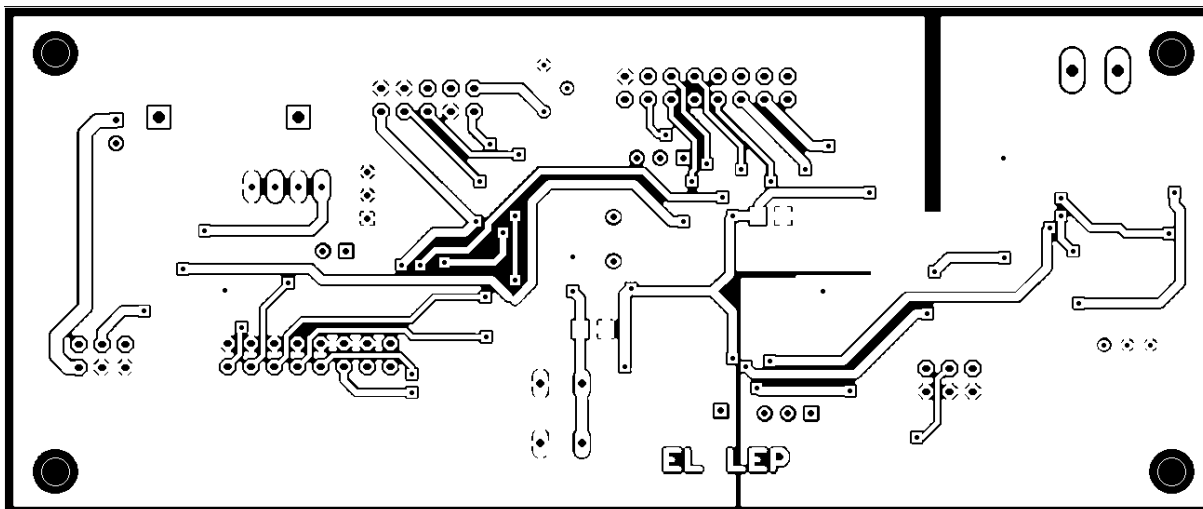
Typ	Množství	Označení	Poznámka
WSL10	1	PROG	nahrávání programu
WSL16	2	DISPLEJ, OVLADANI	
WSL06	4	MERENI (2x), PWM (2x)	propojení desek
D-SUB F09FB	4		propojení desek; prořezávací pro plochý kabel
CMM 5/2BU	4	24V_VST, LEPTANI_VYST, MICHANI, PT1000	svorkovnice 5mm rozteč, 2 kontakty
K3716A	1		konektor napájecí 5,5/2,1mm
PFL06	4		protikus WSL06
PFL16	2		protikus WSL16
banánek 4mm	2		připojení leptací nádoby
zdiřka 4mm	2		připojení leptací nádoby
CINCH na kabel	1		připojení teplotního snímače
CINCH na panel	1		připojení teplotního snímače

Ostatní

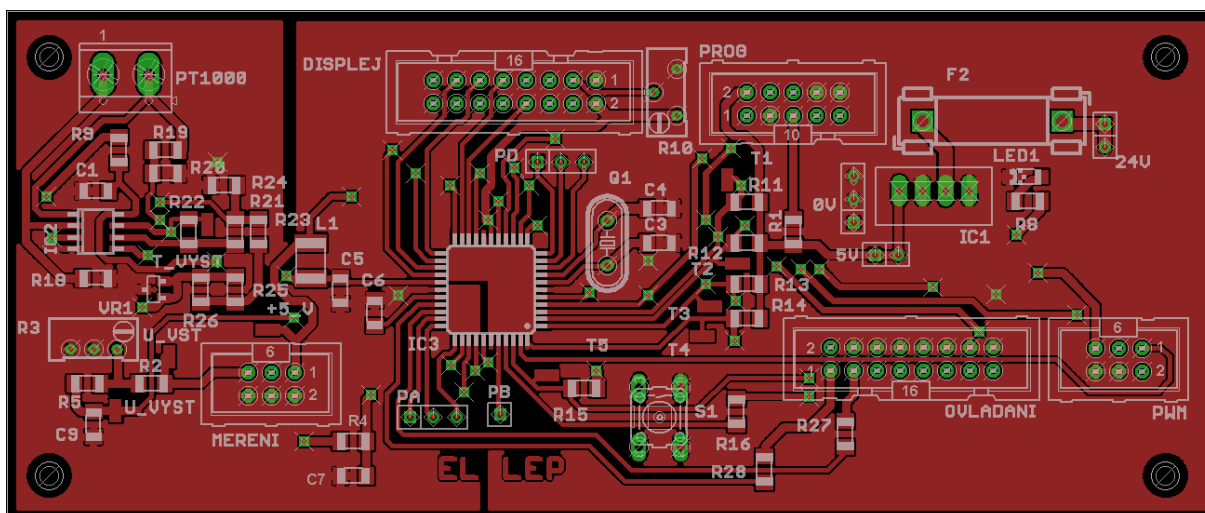
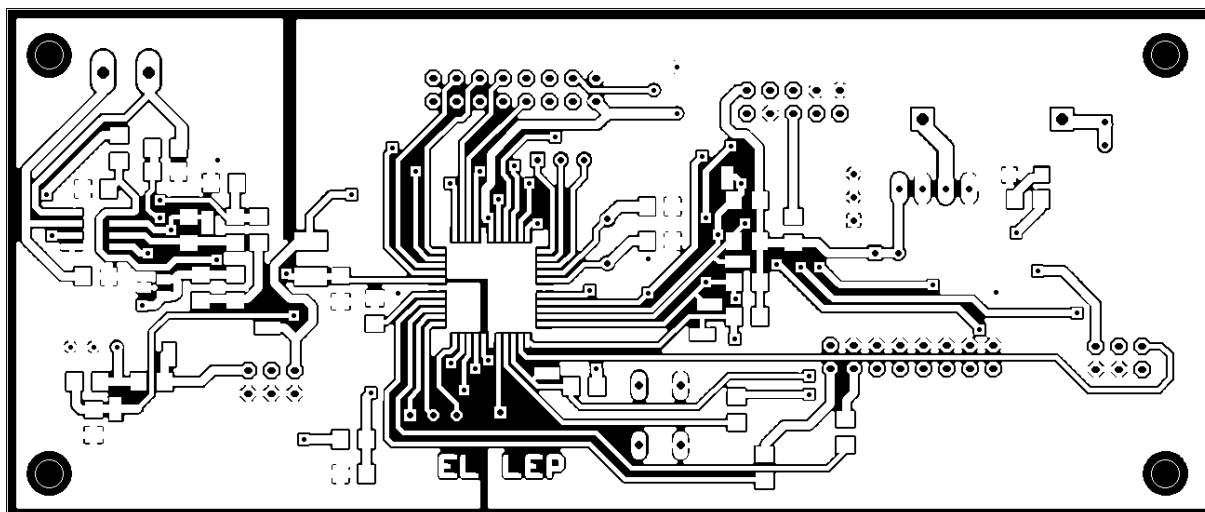
Typ	Množství	Označení	Pouzdro/rozměry	Poznámka
Krystal 16 MHz	1	Q1	HC49S	
Pojistka 5 A	1	F1	5x20 mm	
Pojistka 0,5 A	1	F2	5x20 mm	
B 6815	1	S1		tlacitko reset
B 6819	5	TL1, TL2, TL3, TL4, TL5		tlacitka ovládání
AK 218	2		Kabel propojovací D-SUB 9 M/M 1,8 m	
ventilátor	1		60x60x15 mm	24VDC/1,3W
HEL-705-U-1-12-00	1			PT1000
KM 85	1		178x160x85mm	krabice, výkonová část
KP 3 B	1		90x200x49mm	krabice, řídicí část

D. Návrh desek plošných spojů

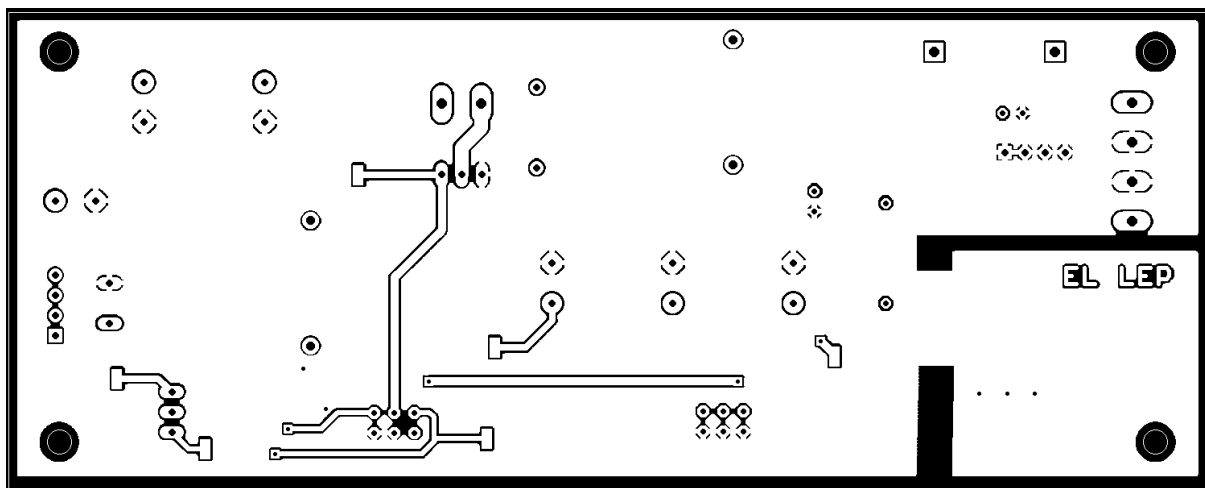
Řídící deska – spodní strana

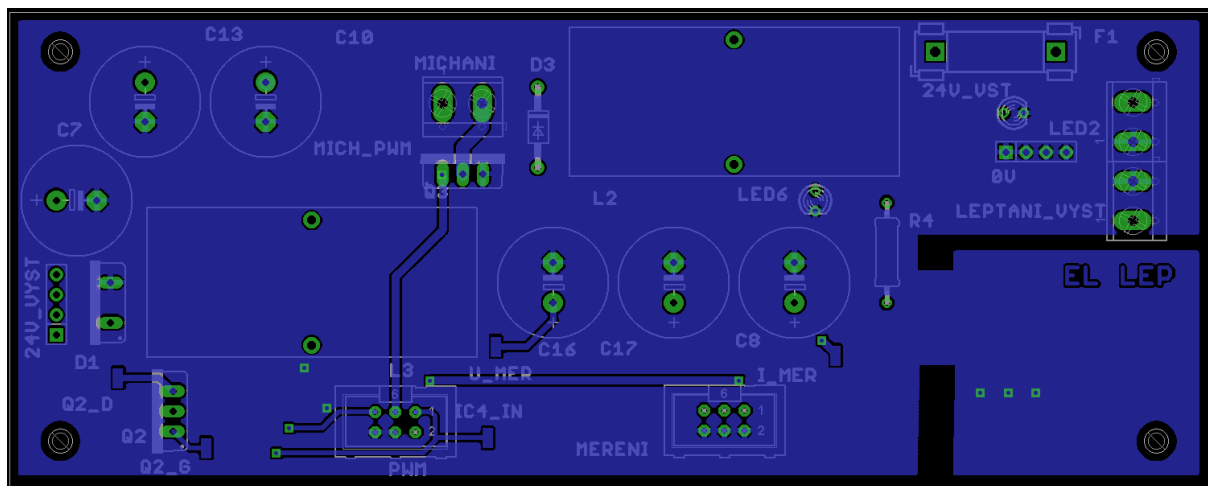


Řídicí deska – vrchní strana

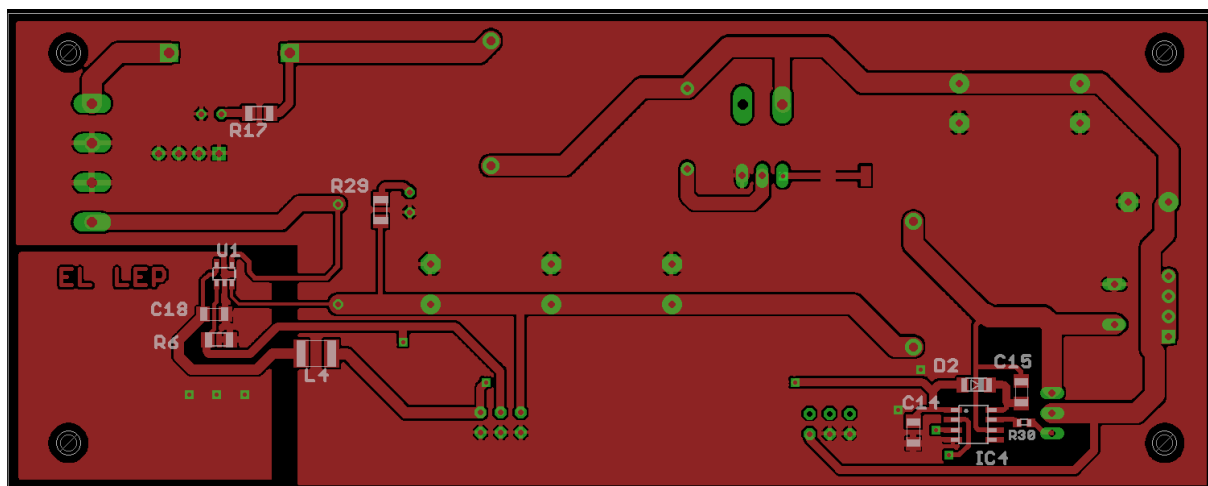
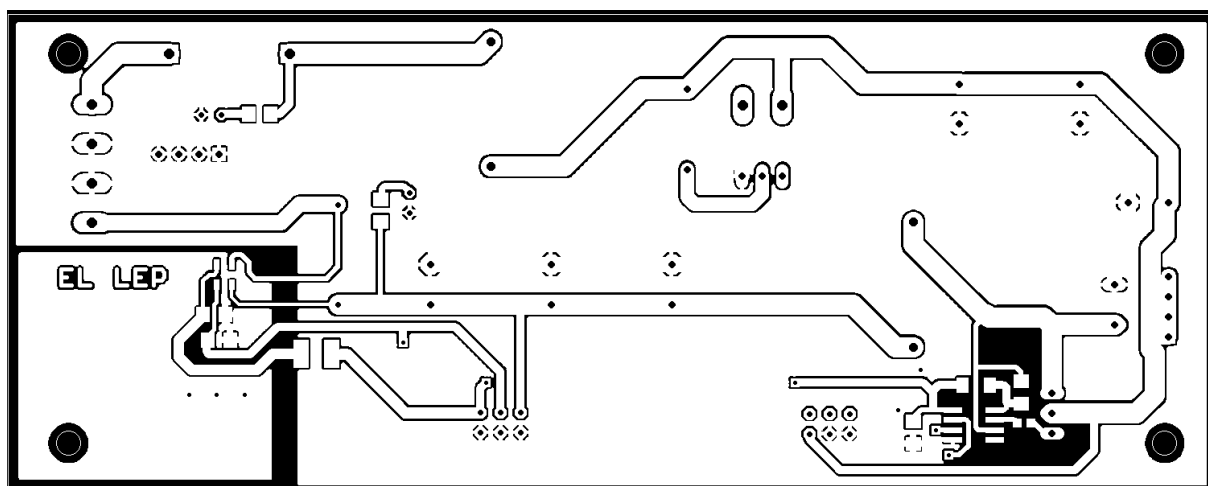


Výkonová deska – spodní strana

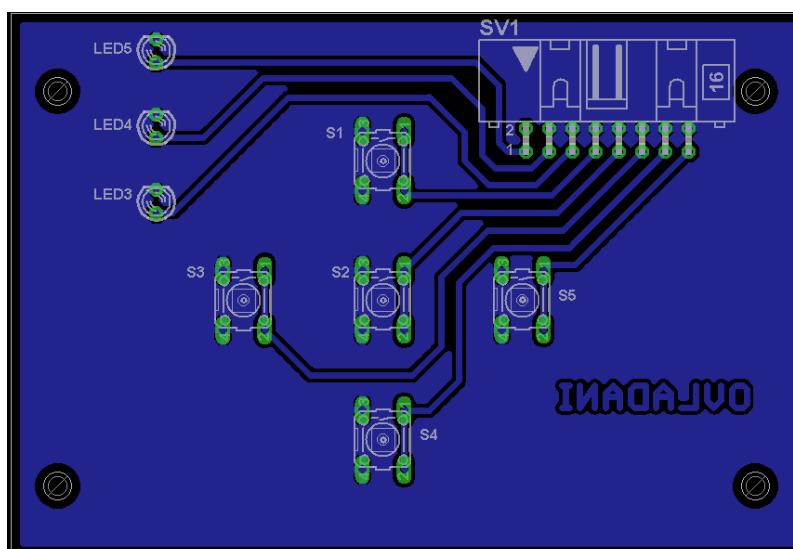
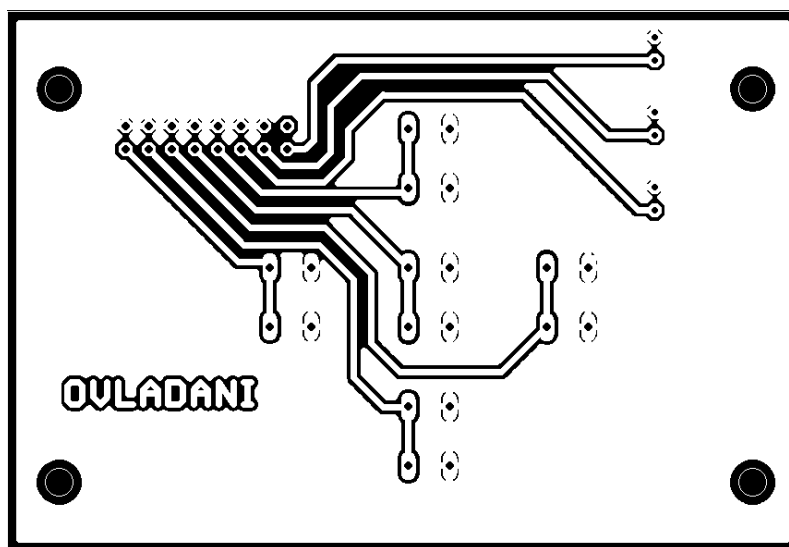




Výkonová deska – vrchní strana



Deska ovládání



E. Šrouby a matice pro leptací nádobu

Spojené díly	Kontakt s elektrolytem	Rozměr šroubu	Hlava	Počet	Matice
1, elektroda	ano	M3x16	válcová	1	žádná
1, 4	ano	M3x20	zápustná	2	žádná
3, 4	ne	M3x25	válcová	2	vroubkovaná
2, 4, 6	ne	M3x50	válcová	3	vroubkovaná + šestihránná

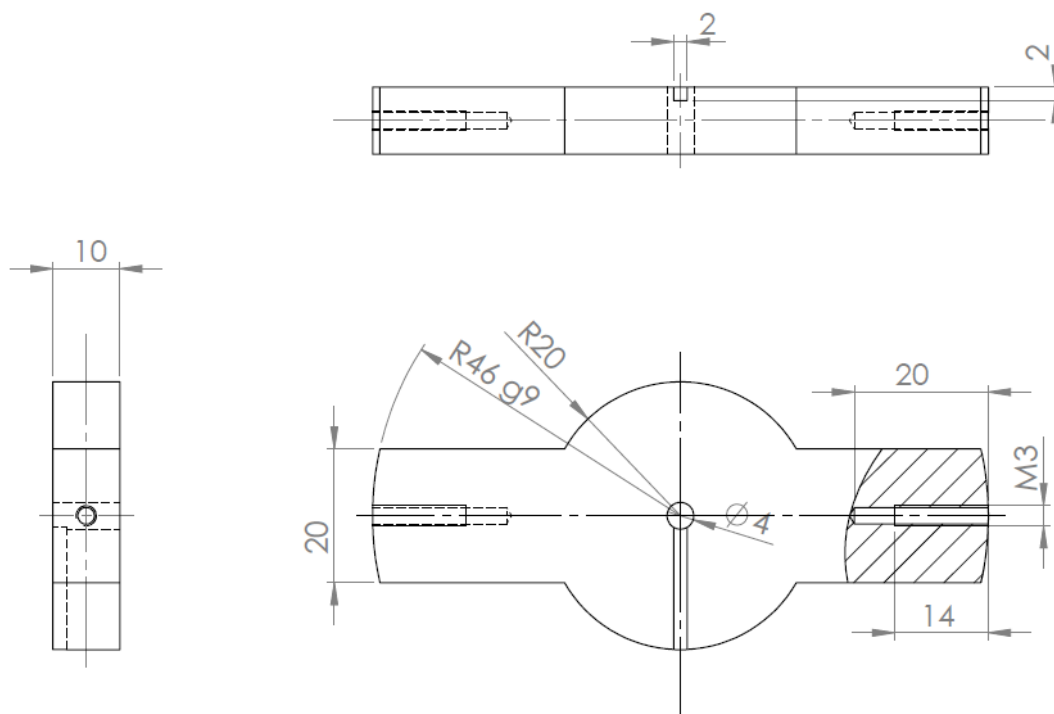
Díly, které jsou v kontaktu s elektrolytem, musí být vyrobeny z chemicky odolného materiálu.

F. Díly leptací nádoby

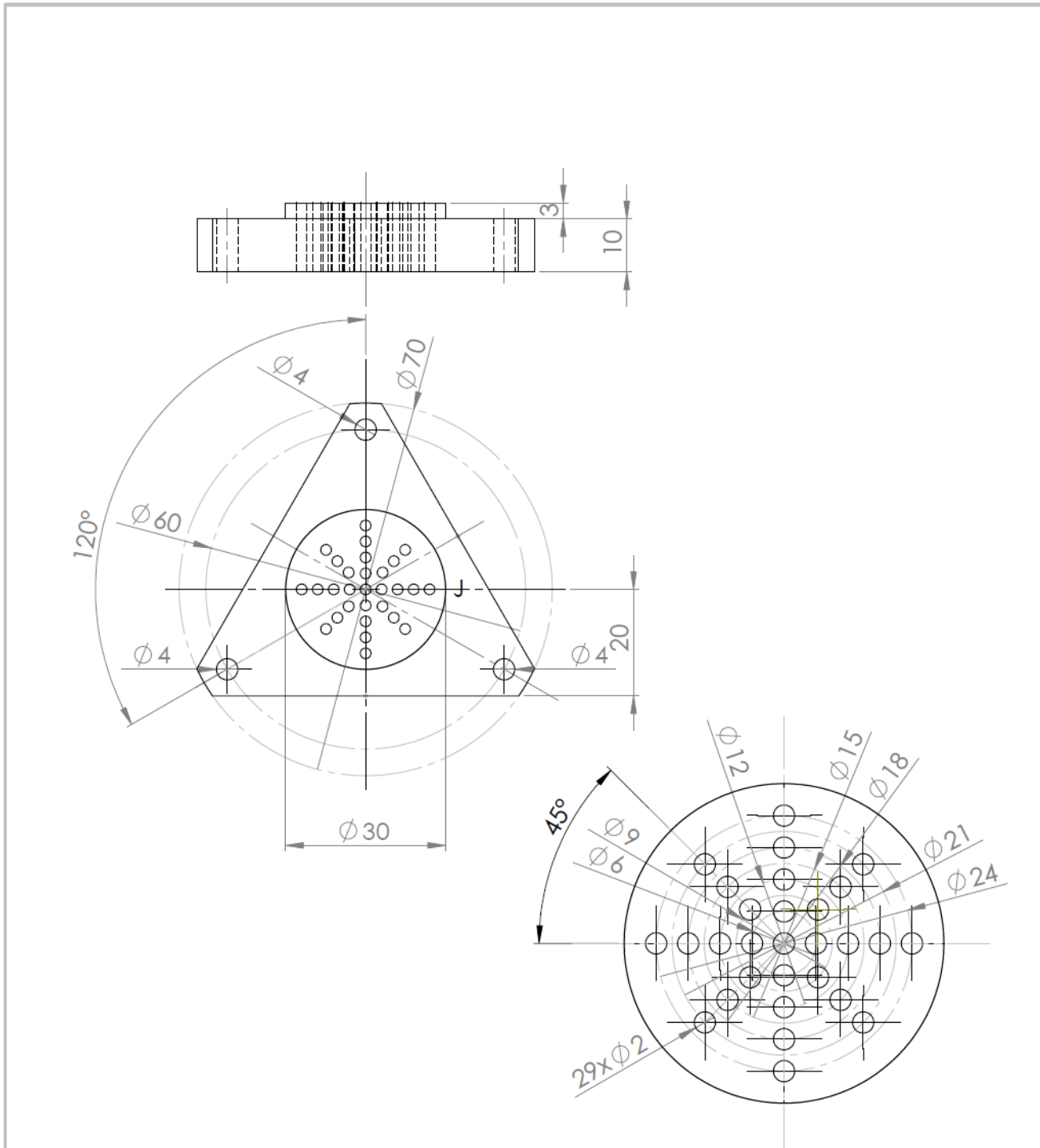
Chladicí spirála

- Vnější průměr 81 mm (max. 82,5 mm)
- 9 závitů (výška 40 mm)
- Trubka 4 x 0,5 mm
- Materiál DIN 1.4571



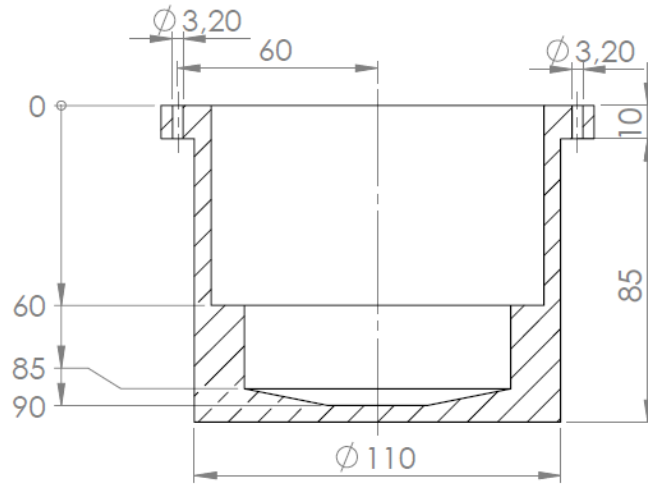


POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:				OPRACOVÁNÍ:		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA			
				NÁZEV:							
NAVRHL PŘEZKOUSEL SCHVÁLIL VÝROBA								DÍL 1 NADOBA			
Z. JAKOSTI				MATERIÁL: PTFE							
				HMOTNOST:				MĚŘÍTKO: 1:1		LIST 1 Z 1 LISTŮ	

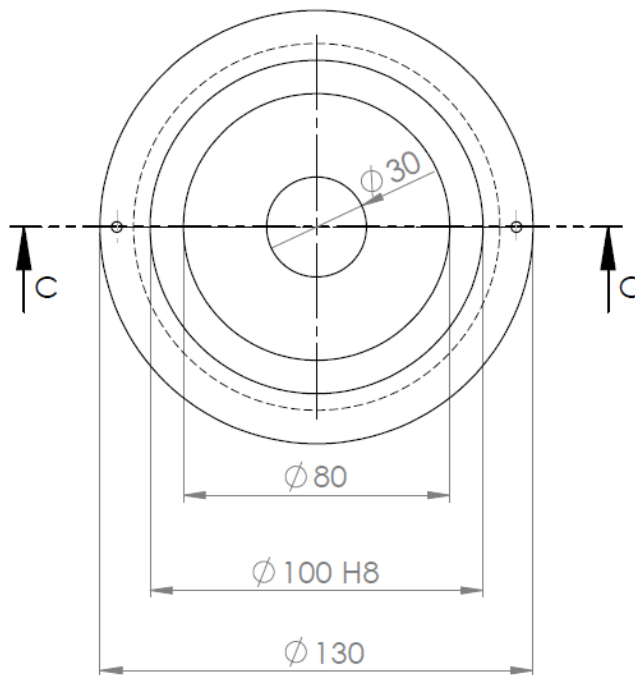


DETAIL J
MĚŘÍTKO 2 : 1

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:				OPRACOVÁNÍ:		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NAVRHL PŘEZKOŮŠEL SCHVÁLIL VÝROBA Z. JAKOSTI				DATUM		NÁZEV: DÍL 2			
				MATERIÁL: PTFE		Č. VÝKRESU NADOBA		A4	
				HMOTNOST:		MĚŘÍTKO: 1:1		LIST 1 Z 1 LISTŮ	



ŘEZ C-C
MĚŘÍTKO 1 : 2



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
DRSNOST:
TOLERANCE:
LINEÁRNÍ:
ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

NÁZEV	PODPIS	DATUM		
NAVRHL				
PŘEZKOŮŠEL				
SCHVÁLIL				
VÝROBA				
Z. JAKOSTI				
			MATERIÁL:	
			PTFE	
			HMOTNOST:	

NÁZEV:

DÍL 3

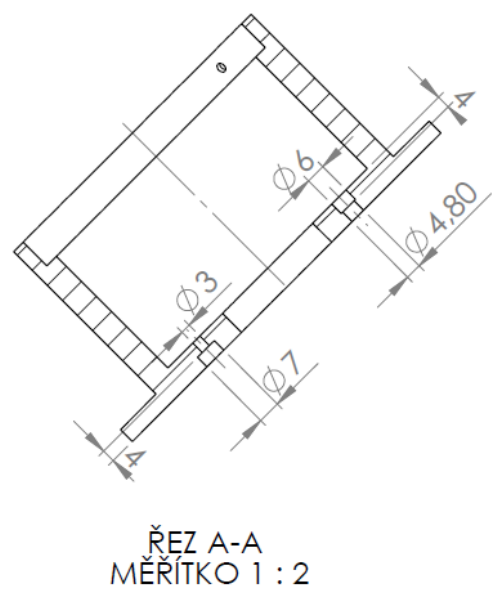
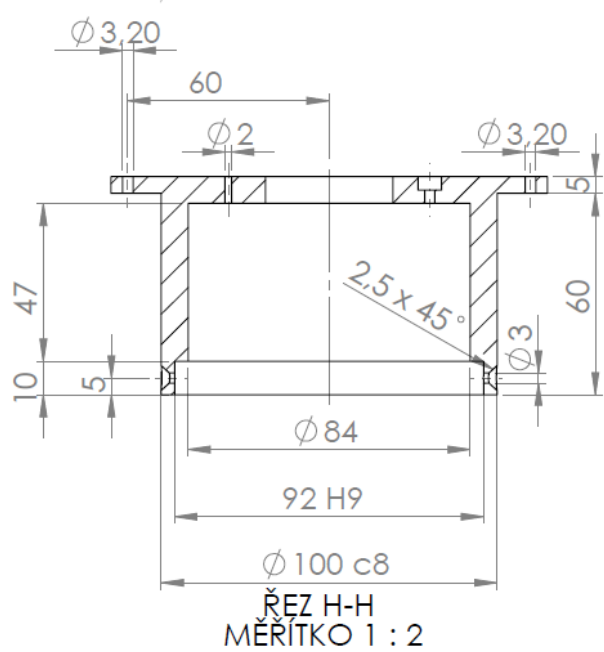
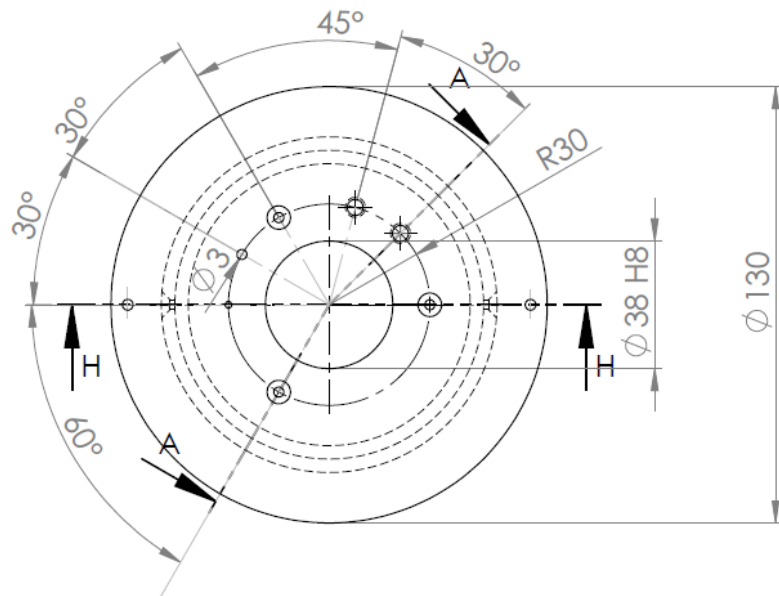
Č. VÝKRESU

NADOBA

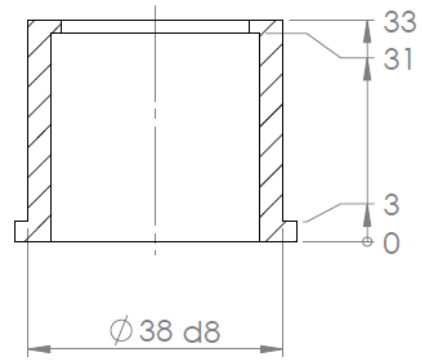
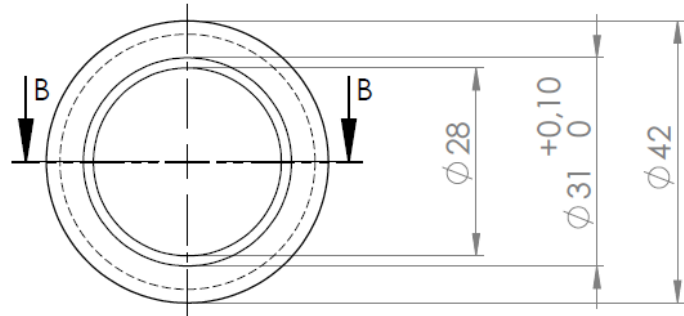
A4

MĚŘÍTKO: 1:2

LIST 1 Z 1 LISTŮ

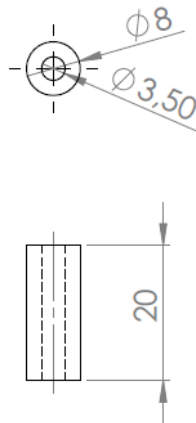


POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:				OPRACOVÁNÍ:		NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU		ZMĚNA
NAVRHL	NÁZEV	PODPIS	DATUM	NÁZEV: DÍL 4				
PŘEZKOUSEL								
SCHVÁLIL								
VÝROBA								
Z. JAKOSTI				MATERIÁL: PTFE	Č. VÝKRESU NADOBA			A4
				HMOTNOST:	MĚŘITKO: 1:2	LIST 1 Z 1 LISTŮ		



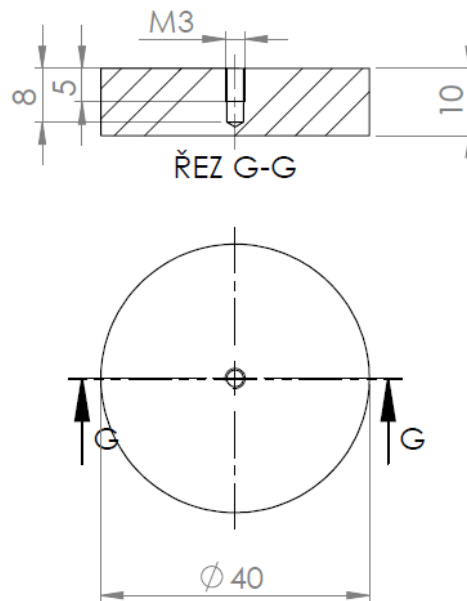
ŘEZ B-B

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:				OPRACOVÁNÍ:		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA
NÁZEV	PODPIS	DATUM				NÁZEV: DÍL 5		
NAVRHL						Č. VÝKRESU NADOBA		A4
PŘEZKOUSEL								
SCHVÁLIL								
VÝROBA					MATERIÁL: PTFE			
Z. JAKOSTI					HMOTNOST:	MĚŘÍTKO: 1:1	LIST 1 Z 1 LISTŮ	



3 KUSY

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA
NAVRHL	NÁZEV	PODPIS	DATUM	NÁZEV: DÍL 6		
PŘEZKOŠEL				MATERIÁL: PTFE		
SCHVÁLIL						
VÝROBA				Č. VÝKRESU	NADOBA	A4
Z. JAKOSTI				HMOTNOST:	MĚŘÍTKO:1:1	LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTRÉ HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU	ZMĚNA
NAVRHL	NÁZEV	PODPIS	DATUM		NÁZEV: ELEKTRODA	
PŘEZKOŮŠEL						
SCHVÁLIL						
VÝROBA						
Z. JAKOSTI				MATERIÁL: DIN 1.4571	Č. VÝKRESU NADOBA	A4
				HMOTNOST:	MĚŘÍTKO:1:1	LIST 1 Z 1 LISTŮ