

Univerzita Pardubice

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Tester elektronek

Milan Trnka

Bakalářská práce

2013

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Milan Trnka**
Osobní číslo: **I09058**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Tester elektronek**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Cílem práce je navrhnout univerzální tester elektronek pro měření nejběžnějších typů elektronek používaných v NF technice např.: ECC81, ECC82, ECC83, ECC85, ECC88, EL84, EL34, 6L6, 6V6, KT88.

Teoretická část bude obsahovat princip činnosti a typů elektronek, jejich parametrů a vlivu na jejich činnost. Z teoretické části by měli vyplynout potřebné vlastnosti testeru pro měření základních parametrů například strmost (statickou/dynamickou), vnitřní odpor, zesilovací činitel, průřez.

V praktické části bude realizován jednoduchý tester řízený mikroprocesorem, aplikace bude mít v paměti neznámější typy elektronek a jejich parametrů, pro nastavení mezních hodnot a porovnání měřených údajů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

O. Kabrna. Univerzální měřič elektronek, Praktická elektronika AR, 7/2011,s20-22, ISSN 1804-7173 1211-328X

<http://www.amplitrex.com/>

<http://www.roehrentest.de/hardware.html>

http://www.klausmobile.narod.ru/projects/pr_02_kmtt_e.htm

<http://www.maximatcher.com/>

<http://m1kta-qrp.blogspot.cz/2011/11/valve-tester-homebrew.html>

<http://www.jacmusic.com/Tube-testers/>

http://amapro.cz/datove_zdroje/knihy/_elektronika/radioelektronika/radiotechnika_9

<http://www.aldax.cz/index.php?act=prod&show=clanky&key=lampy>

http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_215.pdf

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Rozsival

Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **21. prosince 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2013**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 12. 8. 2013

Milan Trnka

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Rozsivalovi za cenné rady a svojí rodině za podporu po dobu celého studia.

Anotace

Bakalářská práce popisuje princip funkce elektronek a měření jejich základních parametrů. Součástí práce je návrh digitálního měřicího přístroje, který dokáže změřit základní parametry elektronek.

Klíčová slova

Elektronka, měření, zdroj, digitální, atmega32, elektron

Title

Tube tester

Annotation

Bachelor thesis describes the basic functions of vacuum tubes and measuring their basic parameters. Part of this work is to design a digital meter that can measure basic parameters of vacuum tubes.

Keywords

Vacuum tube, measuring, power source, a digital, atmega32, electron

Seznam zkratk	9
Seznam tabulek	9
Seznam obrázků	10
Úvod	11
1. Elektronky	12
1.1 Historie elektronek	12
1.2 Rozdělení elektronek dle účelu	13
1.3 Princip činnosti usměrňovacích a zesilovacích elektronek	13
1.3.1 Dioda.....	14
1.3.2 Trioda.....	14
1.3.3 Tetroda	15
1.3.4 Pentoda.....	18
1.3.5 Hexoda.....	19
1.3.6 Heptoda	19
1.3.7 Oktoda.....	20
1.3.8 Enioda	20
1.3.9 Sdružené elektronky	21
1.4 Žhavení elektronek.....	21
1.4.1 Přímé žhavené.....	21
1.4.2 Nepřímé žhavené	22
1.5 Základní parametry a hodnoty elektronek.....	23
1.6 Měření vlastností elektronek	25
1.6.1 Statické měření vlastností triody.....	27
1.6.2 Statické měření vlastností tetrody a pentody	28
1.6.3 Dynamické měření vlastností elektronek.....	30
1.7 Značení evropských elektronek.....	31
2. Návrh testeru	33

2.1	Základní vlastnosti testeru.....	33
2.2	Použitý hardware.....	34
2.2.1	Mikroprocesor.....	34
2.2.2	AD a DA převodníky.....	36
2.2.3	LCD display.....	40
2.2.4	Klávesnice.....	41
2.2.5	Ostatní.....	41
2.3	Stručný popis zapojení.....	42
2.3.1	Řídící část.....	42
2.3.2	Zdroj anodového napětí (proudu).....	43
2.3.3	Zdroj napětí pro řídicí mřížku.....	44
2.3.4	Napájecí zdroje.....	44
3	Realizace testeru.....	45
3.1	Hardware.....	45
3.2	Software.....	47
3.2.1	Stručný popis software.....	47
4.	Závěr.....	48
	Literatura.....	49
	Příloha A – Vývojový diagram.....	51
	Příloha B – Obsah CD.....	52

Seznam zkratek

U _a	Anodové napětí
I _a	Anodový proud
U _g	Napětí mřížky
mA	Miliampér
RISC	Reduced Instruction Set Computer
OZ	Operační Zesilovač
IO	Integrovaný Obvod
NF	Nízko Frekvenční
ISP	In Systém Programing
LCD	Liquid Crystal Display
LSB	Least Significant Bit

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Značení žhavení elektronek.....	32
Tabulka 2 - Značení typu elektronek.....	32
Tabulka 3 - Značení druhu patice a baňky.....	33

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Edisonův pokus.....	12
Obrázek 2 - Systém přímo žhavené diody a její schematická Značka.....	14
Obrázek 3 - Systém nepřímo žhavené triody a její schematická značka.....	15
Obrázek 4 - Řez tetrodou a její schematická značka.....	16
Obrázek 5 - Schématická značka svazkové tetrody.....	17
Obrázek 6 - Systém pentody a její schématická značka.....	18
Obrázek 7 - Schématická značka hexody.....	19
Obrázek 8 Schématická značka heptody.....	20
Obrázek 9 Obrázek a schématická značka zapojení vývodů dvojité triody ECC83.....	21
Obrázek 10 - Přímou žhavená katoda - různá provedení.....	22
Obrázek 11 - Nepřímou žhavená katoda - různá provedení.....	23
Obrázek 12 - Obvod pro měření statických vlastností triody.....	27
Obrázek 13 - Přenosová a anodová statická charakteristika triody ECC83.....	28
Obrázek 14 - Obvod pro měření statických vlastností tetrody a pentody.....	29
Obrázek 15 - Přenosová a anodová statická charakteristika výkonové pentody EL34.....	29
Obrázek 16 - Přenosová a anodová statická charakteristika svazkové terody 6L6.....	30
Obrázek 17 - Obvod pro měření dynamických vlastností triody.....	31
Obrázek 18 - Přenosová a anodová dynamická charakteristika triody ECC84.....	31
Obrázek 19 - Blokové schéma mikroprocesoru ATmega32.....	35
Obrázek 20 Pouzdro TQFP mikroprocesoru ATmega32L.....	36
Obrázek 21- Blokové schéma D/A převodníku MCP 4726.....	37
Obrázek 22 - Schéma zapojení regulovatelného proudového zdroje s MCP 4726.....	37
Obrázek 23 - - Blokové schéma a schéma zapojení A/D převodníku ADS1110.....	38
Obrázek 24 - - Blokové schéma D/A převodníku AD5667.....	39
Obrázek 25 - - Schéma zapojení D/A převodníku AD5667 s napět'ovou referencí.....	40
Obrázek 26 - Blokové schéma LCD RC4004.....	40
Obrázek 27 - Fotografie a schéma zapojení klávesnice 4x4.....	41
Obrázek 28 - Blokové schéma izolátoru ADuM1251.....	41
Obrázek 29 - Pohled na osazené tištěné spoje.....	45
Obrázek 30 - Pohled na osazené tištěné spoje.....	46
Obrázek 31 - Pohled na zprovozněný tester.....	46

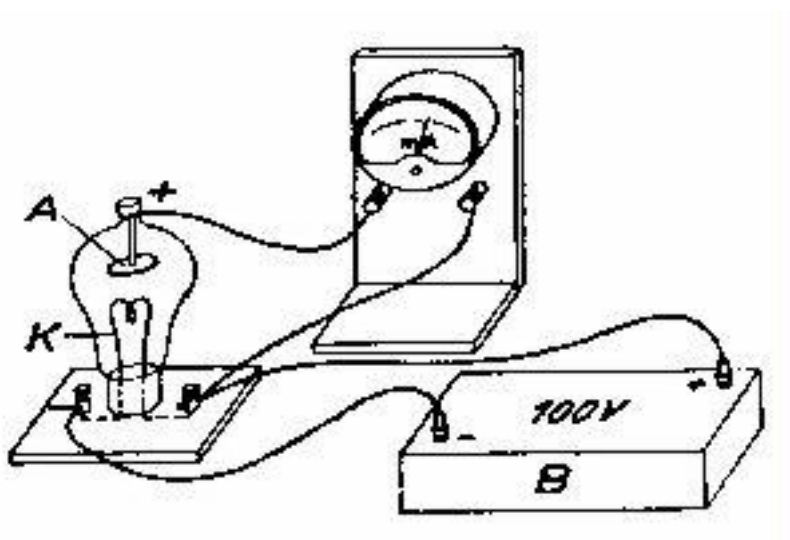
Úvod

Cílem této bakalářské práce je návrh a konstrukce měřicího přístroje elektronek užívaných převážně v NF technice. Přestože pro mnohé lidi představuje elektronika dávnou historii a v elektronice byla nahrazena modernějšími polovodičovými prvky, existují stále aplikace, ve kterých díky svým vlastnostem náhradu nenašla. Mezi takovéto aplikace patří např. použití elektronek v audiotechnice. Díky specifickému a příjemnému zvuku elektronkových předzesilovačů, koncových zesilovačů a kytarových aparátů, začala být opět poptávka po těchto zařízeních. Na tuto poptávku výrazně zareagovali výrobci a postupem času začali vyrábět nepřehledné množství elektronkových audiozařízení v různých cenových relacích. Jelikož elektronky podléhají opotřebení, je potřeba je po určitém čase měnit za nové. Tady ovšem nastává problém, přestože se spolu s novými zařízeními na trhu začali opět objevovat i nové náhradní elektronky, tak výrobci opomenuli zkonstruovat měřicí přístroje, jimiž by se mohl zkontrolovat stav elektronek. Díky vysokým cenám elektronek, které dosahují až dvaceti násobku dřívější ceny, si již většina uživatelů nemůže dovolit nakoupit zásoby elektronek a v případě zhoršení vlastností zařízení je pro jistotu vyměnit všechny doma, jako to bývalo v dřívější době. Proto při zhoršení vlastností zařízení vyhledávají servisy, ve kterých používají dodnes prastaré nebo vlastnoručně vyrobené testery elektronek. Protože se zabývám i opravami elektronkových zařízení, rozhodl jsem se vyrobit si vlastní tester.

1. Elektronky

1.1 Historie elektronek

Přibližně roku 1880 pozoroval vynálezce Thomas Alva Edison, že se u jeho žárovek s uhlíkovými vlákny objevují na vláknech jasně bílé skvrny, proti kterým černala skleněná baňka a vlákno žárovky rychle zašlo. Edison se snažil vypátrat příčiny tohoto jevu a nad vlákno žárovky zatavil do baňky kovovou destičku. Když vlákno žárovky připojil na tehdy běžné síťové stejnosměrné napětí 100V zjistil, že pokud vloží galvanometr mezi zatavenou destičku a kladný konec vlákna protéká galvanometrem proud, kdežto při spojení se záporným koncem vlákna nikoliv. V roce 1883 získal Edison za tzv. Edisonův jev americký patent. Zjistil tedy, že ve vzduchoprázdnu teče z rozžhaveného vlákna elektrický proud, ovšem tento jev si Edison nedokázal vysvětlit.



Obrázek 1 - Edisonův pokus. [5]

Objasnil jej až britský fyzik John Ambrose Fleming, který zjistil, že při větším kladném napětí oproti vláknu začíná obvodem protékat proud, přestože mezi destičkou a vláknem není viditelné vodivé prostředí. Jev vedení proudu ve vakuu byl vysvětlen pohybem elektronů od záporně nabitých elektrod – KATODY ke kladně nabitým elektrodě – ANODĚ. Fleming jako první postřehl možnost usměrňovat střídavé proudy. Později, kdy se už používalo vlákno žárovky z wolframu a díky technologickému pokroku se dosáhlo v baňce vyššího vakua, zkonstruoval Fleming první použitelnou usměrňovací diodu. V roce 1904 byl

udělen Flemingovi patent na diodu, která se nechala použít detekci vysokofrekvenčních kmitů.

Největšího vynálezu ve vývoji elektronek dosáhl Američan Lee de Forest, který vložil mezi žhavou katodu a studenou anodu další elektrodu ve formě mřížky, kterou se nechá po přiložení napětí proti katodě výrazně ovlivňovat tok elektronů mezi katodou a anodou. Nejprve používal triodu pouze k detekci vysokofrekvenčních signálu, ovšem zanedlouho objevil možnost triodou zesilovat proud. De Forest také zkoumal možnosti vyrábění oscilací pomocí triody, ale své práce uveřejnil až roku 1913, kdy se problematikou zabývalo již více osob. [1]

1.2 Rozdělení elektronek dle účelu

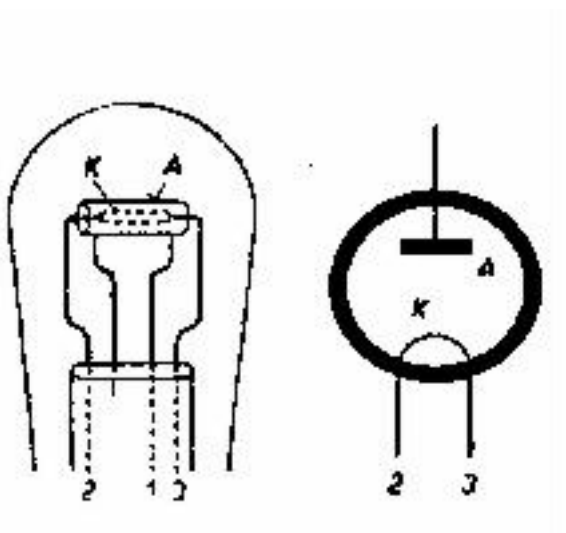
- Usměrnovací
- Elektronky zesilovací
- Elektronky nelineární, spínací
- Elektronky obrazové
- Elektronky indikační
- Elektronky mikrovlnné
- Elektronky s postupující vlnou [7]

1.3 Princip činnosti usměrnovacích a zesilovacích elektronek

Elektronka je aktivní elektronický prvek skládající se ze skleněné nebo kovové vzduchoprázdné baňky, ve které jsou zataveny minimálně dvě elektrody anoda a katoda. Katoda je pomocí žhavicího vlákna rozžhavana přibližně na 1000°C, díky čemuž emituje elektrony, které jsou po připojení vyššího napěťového potenciálu na anodu vůči katodě přitahovány k anodě a způsobují tedy vedení elektrického proudu. Do baňky elektronky mohou být zataveny i další elektrody, kterými se může řídit průtok elektronů z katody na anodu.

1.3.1 Dioda

Dioda je nejjednodušší elektronka, která má dvě elektrody. Žhavenou katodu a studenou anodu. Je-li katoda nažhavena, jsou z ní emitovány elektrony, které se v jejím nejbližším okolí hromadí a tvoří jakýsi mrak elektronů. V tomto mraku se všechny elektrony odpuzují, jelikož mají stejný náboj. Mrak elektricky nabitých částic nazýváme prostorový náboj, který je v našem případě záporný. Přivedeme-li na anodu vůči katodě kladné napětí, začne anoda přitahovat elektrony a obvodem protéká proud, jehož velikost závisí na velikosti anodového napětí. Proud může diodou procházet jen jedním směrem, jelikož studená anoda žádné elektrony neemituje. Konstrukce jednoduché elektronky se může skládat z dokonale vyčerpané baňky, ve které anoda vyrobena jako váleček z niklovaného plechu, uprostřed kterého je nataženo žhavicí vlákno, které plní úkol žhavené katody.

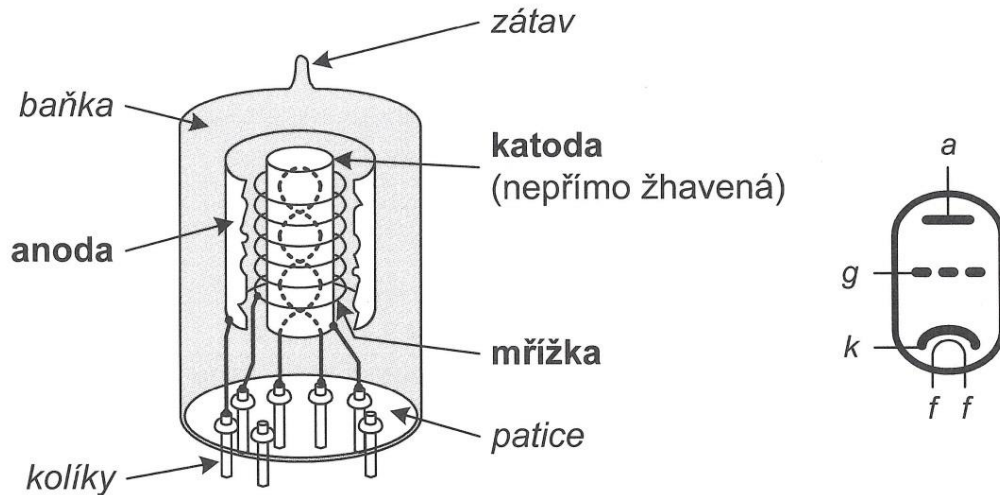


Obrázek 2 - Systém přímo žhavené diody a její schematická Značka. [5]

1.3.2 Trioda

Trioda je nejstarší s nejjednodušší elektronka, která dokáže zesilovat. Trioda má oproti diodě jednu elektrodu navíc. Tato elektroda je nazývána řídicí mřížka, jelikož malou změnou svého potenciálu oproti katodě způsobí velkou změnu procházejícího anodového proudu a je označována jako g1. V nejjednodušším případě je mezi katodou a anodou vložena drátěná mřížka, nebo drátěná spirálka, která je většinou upevněná na nosících nebo je samonosná. Je-li na mřížku přiveden nulový potenciál oproti katodě, elektrony volně procházejí mezerami mřížky k anodě. Pokud je na mřížku přiveden kladný potenciál pomáhá mřížka přitahovat

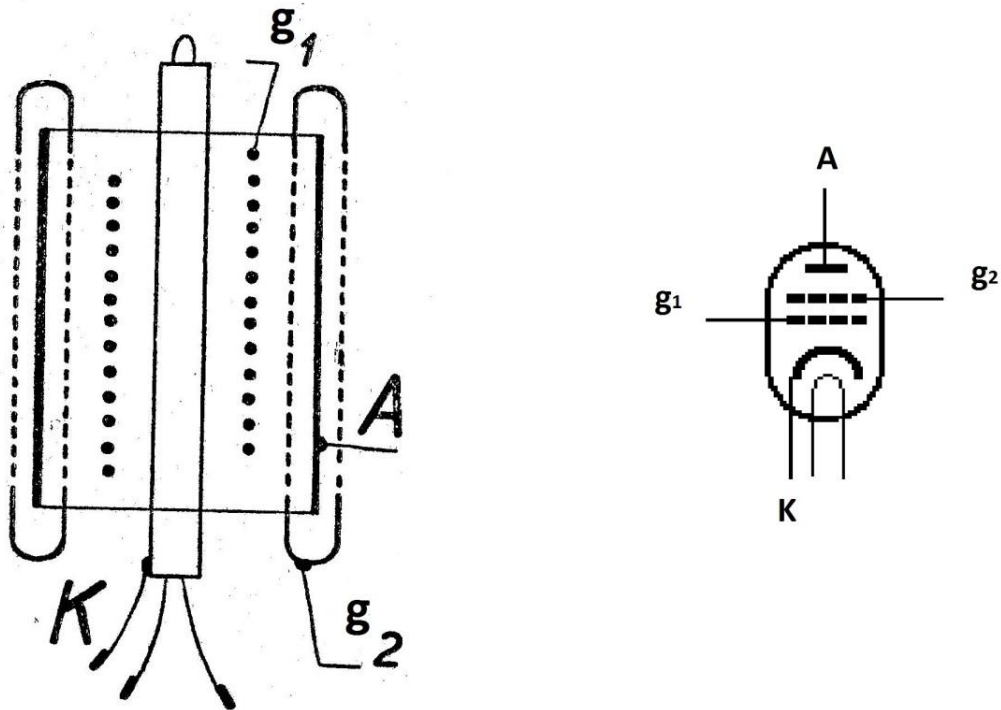
elektrony z katody a tudíž zvětšuje proud protékající anodou. Jestliže na mřížku přivedeme záporné napětí, bude mřížka letící elektrony z katody odpuzovat a bránit jim tak v průletu k anodě. Ve skutečnosti může mít mřížka např. proměnné stoupání závitů, či proměnnou tloušťku drátu, díky čemuž můžeme dosáhnout specifických vlastností různých typů elektronek.



Obrázek 3 - Systém nepřímo žhavené triody a její schematická značka. [4]

1.3.3 Tetroda

Jelikož postupem času rostli požadavky kladené na výkon a vlastnosti triody, byla vyvinuta elektronka se čtyřmi elektrodami nazvaná Tetroda. Tato elektronka měla anodu, katodu a dvě mřížky. Nepříjemná vlastnost triody byla kapacitní vazba mezi mřížkou a anodou, která způsobovala, že se z anodového obvodu přenášela část energie z výstupu zpět na obvod mřížky a tudíž se při větších zesíleních elektronka sama rozkmitávala. Hlavní důvod konstrukce tetrody byl však ten, že zmiňovaná kapacita triody značně brzdila vývoj vysokofrekvenčních zesilovačů, které byly nezbytné pro bezdrátový přenos signálu.



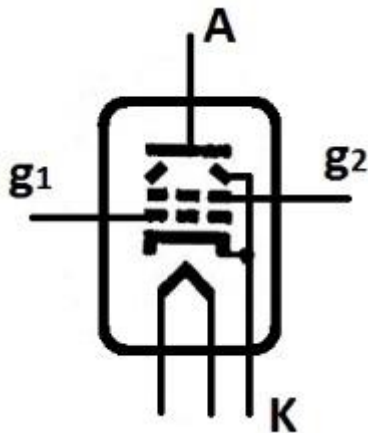
Obrázek 4 - Řez tetrodou a její schematická značka. [1]

- **Tetroda se stínící mřížkou**

Tetroda se stínící mřížkou byla konstruována hlavně proto, aby se zmenšila kapacita mezi řídicí mřížkou a anodou, která vadila rozvoji vysokofrekvenčních zesilovačů. První mřížka tetrody je řídicí stejně jako u triody, druhá mřížka obklopuje anodu ze všech stran i z vnitřku a stíní ji proti řídicí mřížce i proti katodě, tudíž i odděluje mřížku od zpětného působení anody, čímž se zmenší kapacita mezi anodou a mřížkou a zvětší stabilita proti rozkmitání. Tato mřížka je označována jako g_2 . Na stínící mřížku se obvykle přivádí kladné napětí vzhledem ke katodě, které je o něco menší, nežli je napětí přivedené na anodu. Jelikož je stínící mřížka umístěna mezi anodou a řídicí mřížkou, má daleko větší vliv na tok elektronů než anoda, která pouze zachycuje část urychlených elektronů, které propluli stínící mřížkou. Jestliže napětí na anodě při činnosti kolísá, nemá téměř žádný vliv na napětí stínící mřížky, které je konstantní. Výsledkem je přibližně desetinásobné zesílení oproti triodě.

Při funkci tetrody ovšem vznikl nežádoucí jev, který způsobil, že tetroda v této podobě téměř zanikla. Pole stínící mřížky dodá elektronům letícím z katody takovou rychlost a energii, že dopadu na anodu vyrážejí zpět další elektrony z anody. Pokud nastala situace,

že napětí na anodě kleslo pod úroveň napětí na stínící mřížce, byly tyto elektrony přitaženy stínící mřížkou. Ještě mohla nastat situace, při které bylo napětí na anodě podstatně vyšší, a proto byly elektrony vyraženy mimo systém elektronky. Tento jev se nazývá sekundární emise a způsoboval „nevyzpytatelné“ chování elektronky. Pro eliminaci sekundární emise byla vynalezena svazková tetroda, která odstraňuje nevýhody tetrody. Funkce brzdy a záchytné sítě pro zbloudilé elektrony tvoří potenciálové minimum, které je vytvořené prostorovým nábojem. U některých elektronek je ještě doplněn plechový rámeček mezi anodou a druhou mřížkou, který je uvnitř elektronky spojen s katodou, čím je do jisté míry zajištěno, že dráha letících elektronů k anodě není náhodná, ale je v přesně vymezených svazcích.



Obrázek 5 - Schématická značka svazkové tetrody.

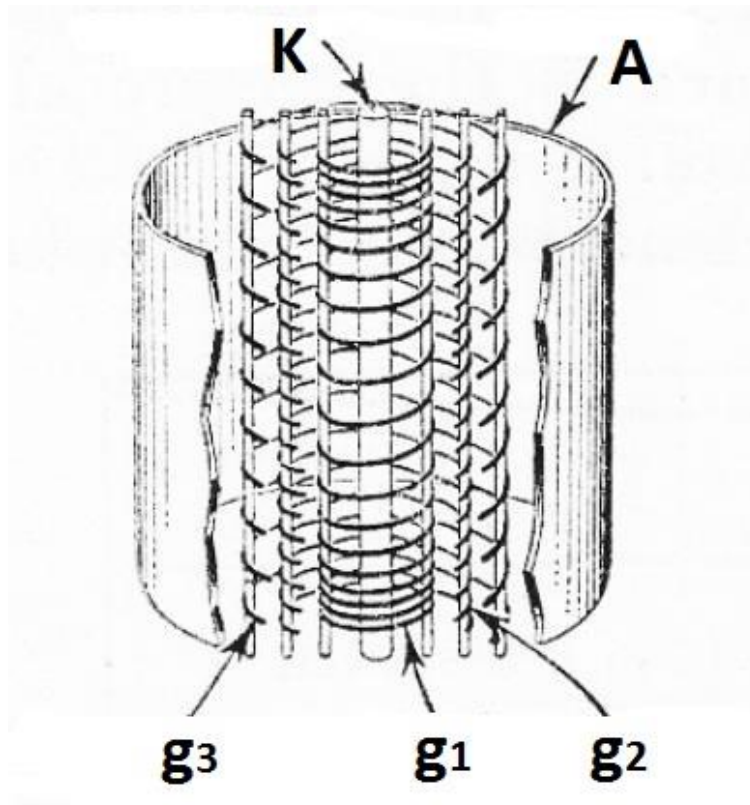
- **Tetroda s mřížkou proti prostorovému náboji**

Tetroda může být zapojena i jinak. Pokud zaměníme funkce obou mřížek, budeme mít poblíž katody mřížku, na kterou přivedeme menší kladné napětí a druhou mřížku u anody, kterou budeme využívat jako řídicí mřížku. Při přivedení menšího kladného napětí na mřížku bližší katodě se začnou elektrony z katody odsávat větší rychlostí a tím pádem se v bezprostřední blízkosti katody zmenší záporný prostorový náboj. Část elektronů je odsáta první mřížkou a část skrz ni projde k řídicí mřížce, kde se zastaví a vytvoří nový prostorový náboj, který vytvoří jakousi virtuální katodu, ze které odčerpává elektrony anoda přes řídicí mřížku. Virtuální katoda má velký průměr a je blízko řídicí mřížky, proto má tato tetroda značně menší vnitřní odpor a vyšší strmost, než odpovídající trioda.

Největší výhodou tetrody s potlačeným prostorovým nábojem je velikost anodového napětí, jelikož velkého zesílení dosáhne tetroda již při anodovém napětí cca 6 - 10 voltů.

1.3.4 Pentoda

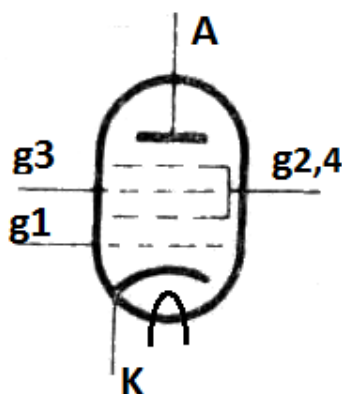
Spolu s vývojem svazkové tetrody vznikala elektronka, která by dokázala zneškodnit sekundární elektrony, které již jednou vystoupili z anody. Potlačení jevu sekundární emise bylo docíleno přidáním další mřížky, mezi mřížku stínící a anodu. Tato mřížka označovaná jako g3 je nazývána jako mřížka hradící, nebo brzdící. Takováto elektronka je nazývána pentoda. Mřížka je připojena na nízký napěťový potenciál, obvykle přímo ke katodě, což způsobí, že vyražené elektrody z anody jsou díky ní odpuzovány zpět k anodě. Tímto způsobem je jev sekundární emise na anodový proud zcela potlačen. Dále je u této elektronky odstraněn vliv anody na stínící mřížku i řídicí mřížku a kapacita mezi anodou a řídicí mřížkou stejně jako u tetrody. Tato elektronka má poněkud vyšší vnitřní odpor a zesílení oproti tetrodě. Vstupní kapacity jsou u pentod velmi nízké a proto je možno je bez obav z rozkmitání používat k zesilování velmi vysokých kmitočtů. Brzdící mřížka se také v některých zapojeních používala např. pro modulaci nebo regulaci zesílení.



Obrázek 6 - Systém pentody a její schématická značka. [2]

1.3.5 Hexoda

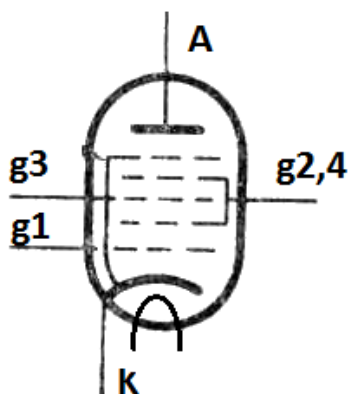
Během vývoje rozhlasových přijímačů a to hlavně superheterodinů se vyskytl požadavek na ovládání anodového proudu pomocí dvou rozdílných napětí, pro použití jako směšovač ve vstupní části přijímače. Byla tedy vyvinuta elektronka se čtyřmi mřížkami, která se nazývá hexoda. Hexoda byla zapojována tak, že první mřížka byla řídicí, na kterou bylo přivedeno vysokofrekvenční vstupní napětí. Druhá mřížka měla funkci jako stínící mřížka a byla spojena se čtvrtou mřížkou, která měla taktéž funkci stínící. Na třetí mřížku se přivádělo napětí z pomocného oscilátoru. Z principiálního hlediska jsou elektrony odsávané z katody druhou mřížkou přes první záporně nabitou mřížku silně brzděny třetí záporně nabitou mřížkou. Před třetí mřížkou se tedy vytvoří záporný prostorový náboj, který vytvoří stejně jako u tetrody virtuální katodu. Čtvrtá mřížka stínící odsává elektrony skrz třetí řídicí záporně nabitou mřížku, ale z virtuální katody. Zjednodušeně můžeme na funkci hexody nahlížet tak, že první mřížka řídí velikost prostorového náboje před třetí řídicí mřížkou, který označujeme jako virtuální katodu a třetí mřížka už ovládá velikost anodového proudu.



Obrázek 7 - Schématická značka hexody.

1.3.6 Heptoda

Jelikož hexoda trpí stejnými nedostatky jako tetroda, je zde přidána pátá mřížka, která je spojena s katodou a plní stejnou funkci jako brzdící mřížka u pentody. Taková to elektronka se nazývá heptoda.



Obrázek 8 Schématická značka heptody.

1.3.7 Oktoda

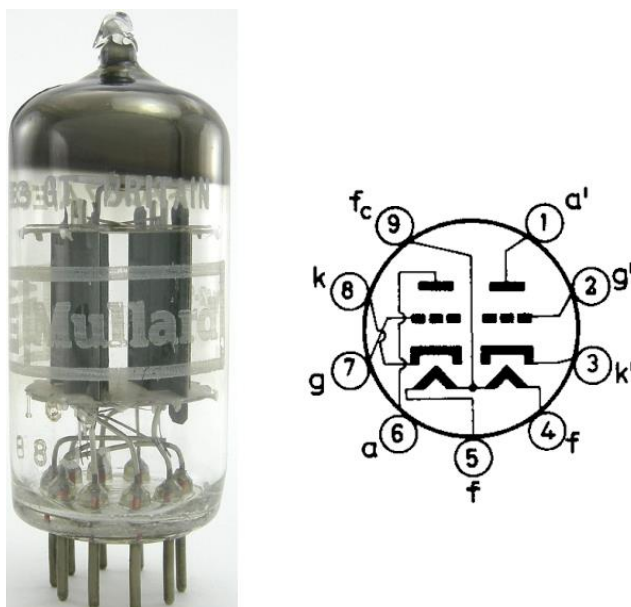
Oktoda je elektronka se šesti mřížkami, která se používala v rozhlasových přijímačích na vstupech, jako měnič kmitočtů. Katoda, první mřížka a druhá mřížka, která měla funkci anody oscilátoru, fungovala jako pomocný oscilátor, díky kterému se za třetí stínící mřížkou vytvářel z elektronů prostorový náboj, který pulsoval podle frekvence pomocného oscilátoru. Čtvrtá, pátá a šestá mřížka spolu s anodou a virtuální katodou tvořila klasický pentodový systém. Tím, že jsme tedy dosáhly pulsující virtuální katody, jsme mohly např. z modulovaného vř signálu odstranit nosnou frekvenci modulovaného signálu v jediné elektronce.

1.3.8 Enioda

Enioda je elektronka se sedmi mřížkami. Tyto elektronky byly vyvinuty pro vojenské účely, kde byly používané jako detektor frekvenčně modulovaného signálu, nebo jako amplitudový omezovač v telemetrických systémech. Jelikož pracovaly na velmi vysokých frekvencích, vyráběly se výhradně v miniaturním provedení s drátovými vývody. V české republice se v prodeji nikdy nevyskytovali.

1.3.9 Sdružené elektronky

Z důvodu úspory materiálů i místa se začaly vyrábět elektronky, které obsahovali v jedné baňce několik stejných, nebo různých systémů. Mezi nejznámější zástupce patří pentoda – trioda PCF82 používaná v televizní technice, nebo dvojitě triody používané v NF i VF technice jo jsou např. ECC82, ECC83, ECC85, ECC88.



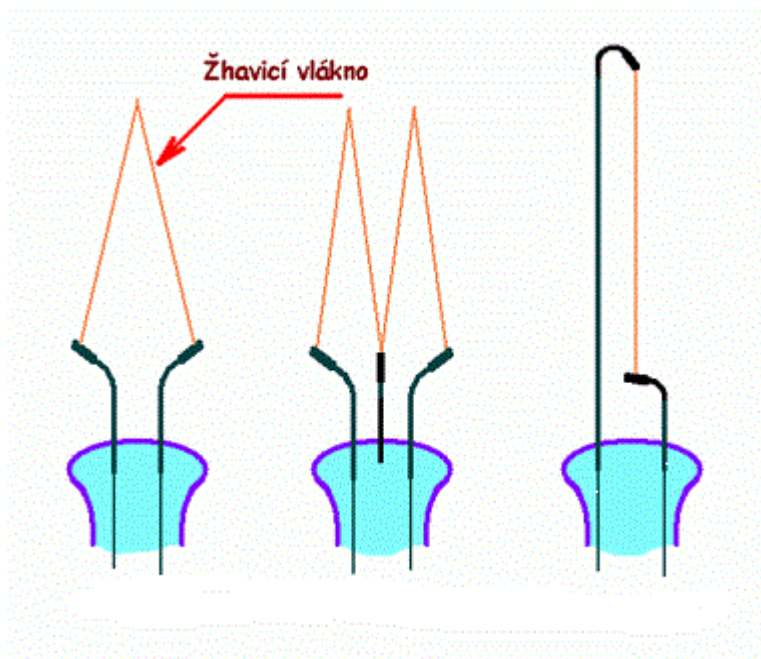
Obrázek 9 Obrázek a schématická značka zapojení vývodů dvojitě triody ECC83.

1.4 Žhavení elektronek

1.4.1 Přímo žhavené

Jelikož první elektronky vycházeli z konstrukce žárovek, byl z nich převzat taktéž způsob emitování elektronů z rozžhaveného vlákna elektronek. První elektronky měli vlákna z čistého wolframu, jelikož patřil mezi dostupné kovy, které mají při vysokých teplotách ještě dostatečnou pevnost. Později se, ale ukázalo, že wolframová vlákna mají pro běžné zesilovací elektronky a diody malou schopnost emise elektronů a proto se začal kombinovat s thoriem. Tato kombinace má vysokou schopnost emise elektronů, ale je velice citlivá na přezhavení,

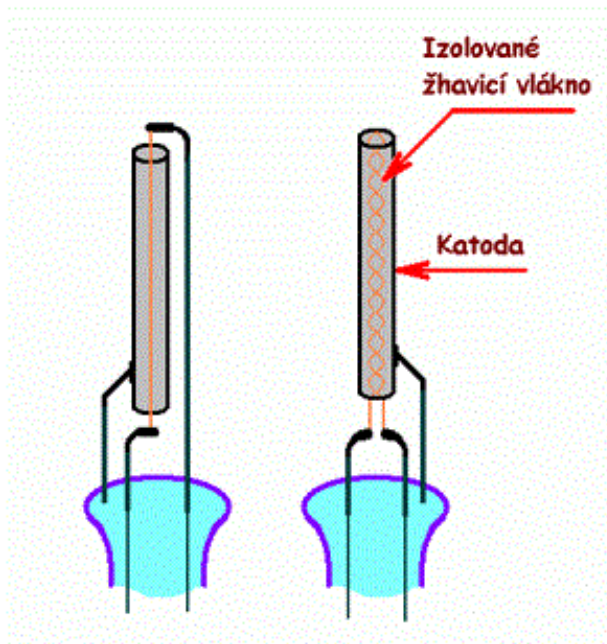
protože se thorium rychleji odpařuje a katoda tím ztrácí emisní schopnost. Wolframová vlákna časem křehla a snadno se přepalovala, proto se postupným vývojem wolfram nahradil kovovými vlákny, která byla potažena směsí oxidů silně emitujících látek. Nejčastěji se používali oxidy barya a stroncia. Tato vlákna lépe emitovala elektrony i při menších nárocích na protékající proud. Přímě žhavené zesilovací elektronky je nutné žhavit stejnosměrným napětím, jelikož střídavé napětí ovlivňuje tok elektronů tekoucích z katody a způsobuje např. brum dle frekvence žhavicího napětí.



Obrázek 10 - Přímě žhavená katoda - různá provedení. [6]

1.4.2 Nepřímě žhavené

Aby bylo možné vlákno elektronky žhavit střídavým napětím bez vlivu na anodový proud, byla vynalezena nepřímě žhavená katoda. Skládá se ze žhavicího vlákna, které je izolováno keramickým tmelem, nebo kysličníkem hlinitým. Vlákno je vloženo do žárovzdorné trubičky, zhotovené z niklu s přísadou hořčíku, která je pokryta vrstvou silně emitujících látek, např. barya nebo stroncia. Tento celek tvoří katodu. Později se zjistilo, že magnetické pole žhavicího vlákna také ovlivňuje proud anodou, z tohoto důvodu se začalo vlákno vinout bifilárně. [6]



Obrázek 11 - Nepřímo žhavená katoda - různá provedení. [6]

1.5 Základní parametry a hodnoty elektronek

Základní parametry lze stanovit z převodových a anodových charakteristik elektronek[3]. Mezi tyto parametry patří: S – strmost, R_i – vnitřní odpor, μ - zesilovací činitel, D – průnik.

- Strmost S určuje, o kolik mA se změní anodový proud I_a při změně napětí řídicí mřížky U_g o 1 V, zůstane-li anodové napětí U_a konstantní. Její velikost se udává mA/V.

$$S = \left(\frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \right)_{U_a = konst.} \quad (1.1)$$

- Vnitřní odpor R_i udává, o kolik voltů se musí změnit anodové napětí U_a , aby se při konstantním napětí na mřížce U_g změnil anodový proud I_a o 1 mA. Jeho velikost se udává v k Ω .

$$R_i = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \right)_{U_g = konst.} \quad (1.2)$$

- Zesilovací činitel určuje, o jakou hodnotu musíme změnit anodové napětí U_a , aby při jednotkovém skoku mřížkového napětí U_g zůstal anodový proud I_a konstantní. Zesilovací činitel je bezrozměrná veličina.

$$\mu = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} \right)_{I_a = \text{konst.}} \quad (1.3)$$

- Průnik D je převrácená hodnota zesilovacího činitele.

$$D = \frac{1}{\mu} \quad (1.4)$$

- Charakteristické hodnoty elektronek jsou v každém pracovním bodě vázány Barkhausenovým vztahem (2.5), jehož platnost vyplývá přímo z definičních vztahů (2.1) až (2.4)

$$(R_i \times S \times D)_{Px} = 1 \quad (1.5)$$

- Vedle těchto vztahů zavedl Barkhaus ještě „činitel jakosti“, který vyjadřuje schopnost elektronky. V praxi se ho však téměř neužívá.

$$G = \frac{S}{D} \quad (1.6)$$

Mezi základní parametry elektronek můžeme zařadit i provozní a mezní hodnoty elektronek. Mezní hodnoty nesmíme překročit, nechceme-li elektronku poškodit.

U elektronek se především uvádí:

- Jmenovité žhavicí napětí a proud

Toto napětí má největší vliv na emisi elektronů, proto musí být v toleranci $\pm 5\%$.

- Kapacity mezi některými elektrodami

Tyto kapacity omezují funkčnost elektronek ve vf obvodech.

- Maximální katodový proud

Celkový proud vysílaný katodou, musí zůstat dostatečně pod sytícím proudem katody

- Maximální anodové napětí

Při jeho překročení mohou nastat uvnitř systému elektronky přeskoky napětí.

- Maximální anodová ztráta

To je výkon, který se smí na anodě přeměnit v teplo, aniž by se anoda příliš zahřála.

- Maximální anodové napětí za studena

Je omezené přeskokovými vzdálenostmi mezi elektrodami.

- Maximální odpor mezi mřížkou a katodou

Souvisí se stabilitou pracovního bodu.

- Maximální odpor mezi žhavicím vláknem a katodou

Souvisí s brucením při použití střídavého žhavicího napětí a jinými jevy.

- Maximální napětí mezi žhavicím vláknem a katodou

Je dané izolačními vlastnostmi mezi vláknem a katodou.

- Hranice mřížkového napětí

Je to maximální velikost mřížkového napětí, při kterém je mřížkový proud = 0. [2]

1.6 Měření vlastností elektronek

Vlastnosti elektronek se popisují především statickými charakteristikami. U elektronek se měří především anodové charakteristiky, kterými se rozumí závislost anodového proudu I_a na anodovém napětí při konstantním napětí všech mřížek systému. Anodová charakteristika elektronky s n mřížkami je dána vztahem[1]:

$$I_a = f(U_a); U_{gi} = konst.; i = 1, 2, \dots, n. \quad (1.7)$$

Jako U_{gi} je zde označováno napětí i -té mřížky.

Dále se měří převodní charakteristika, která je definovaná jako závislost mezi anodovým proudem I_a a napětím řídicí mřížky U_{g1} při konstantním napětí na zbývajících mřížkách. Ta je vyjádřena vztahem:

$$I_a = f(U_{g1}); U_a = konst.; U_{gi} = konst.; i = 2, 3, \dots, n. \quad (1.8)$$

U více mřížkových elektronek je možné taktéž měřit charakteristiku i -té mřížky. Tímto se rozumí závislost proudu I_{gi} na anodovém napětí U_a při konstantním napětí na všech zbývajících mřížkách. Tato charakteristika je vyjádřena vztahem:

$$I_{gi} = f(U_a); U_{gi} = konst.; i = 1, 2, \dots, n. \quad (1.9)$$

V praxi ovšem přichází v úvahu měření charakteristiky pouze stínící mřížky.

Za určitých předpokladů, které jsou ovšem v praxi těžko splnitelné, lze vyjádřit závislost anodového proudu na anodovém napětí tzv. Langmuirovým třípolovinovým zákonem. U diody vztahem (2.10) a u triody vztahem (2.11) v němž k , znamená konstantu určenou konfigurací elektrod. [1]

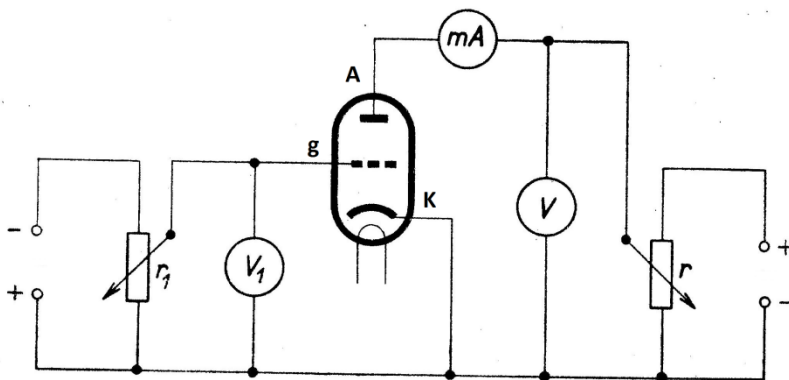
$$I_a = k \cdot U_a^{\frac{3}{2}} \quad (1.10)$$

$$I_a = k \cdot \left(U_g - \frac{U_a}{\mu} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.11)$$

1.6.1 Statické měření vlastností triody

Na obrázku 8 vidíme obvod pro měření voltampérových charakteristik triody. Při měření převodních charakteristik (viz (2.8)) nastavíme potenciometrem r anodové napětí na pevně zvolenou hodnotu, kterou odečteme z voltmetru V . Potenciometrem r_1 pak postupně nastavujeme různá napětí mřížky. Pro každou hodnotu mřížky, kterou měříme voltmetrem V_1 odečítáme na miliampérmetru velikost procházejícího anodového proudu, přičemž musíme kontrolovat anodové napětí, aby bylo konstantní. Pokud nebude, což je z důvodu měnicího se úbytku napětí na potenciometru pravděpodobné, dorovnáme jej opět na pevně zvolenou hodnotu potenciometrem r . Po získání potřebného počtu bodů k sestrojení křivky změním velikost anodového napětí a celý postup opakujeme. Tímto způsobem získáme převodní charakteristiky (viz obr. 9).

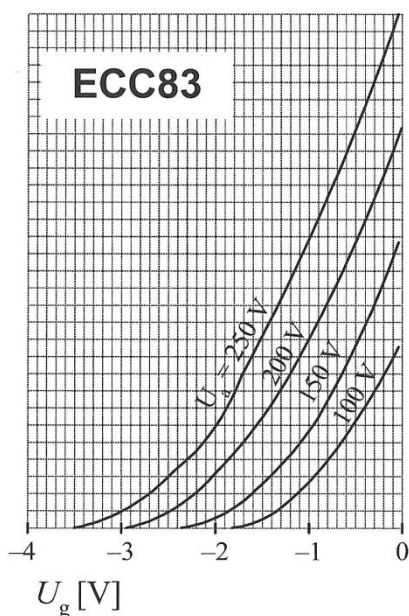
Při měření anodových charakteristik (viz (2.7)) postupujeme přesně opačným způsobem. Na mřížce udržujeme konstantní napětí a potenciometrem r měníme velikost anodového napětí. Pro každé anodové napětí odečítáme hodnoty anodového proudu z miliampérmetru mA , ze kterých opět sestavíme křivku. Tento postup opět opakujeme pro různá napětí mřížky vůči katodě. Výsledkem jsou anodové charakteristiky (viz obr. 9). Proud protékající mřížkou obvykle neměříme, jelikož je při záporném napětí mřížky zanedbatelný.



Obrázek 12 - Obvod pro měření statických vlastností triody[3]

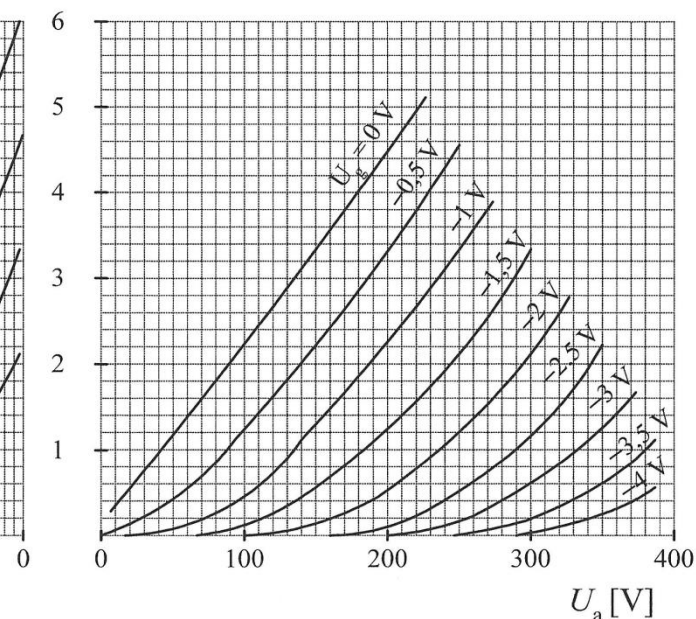
Přenosová charakteristika

$$I_a = f(U_g)$$



Anodová charakteristika

$$I_a = f(U_a)$$



Obrázek 13 - Přenosová a anodová statická charakteristika triody ECC83.[4]

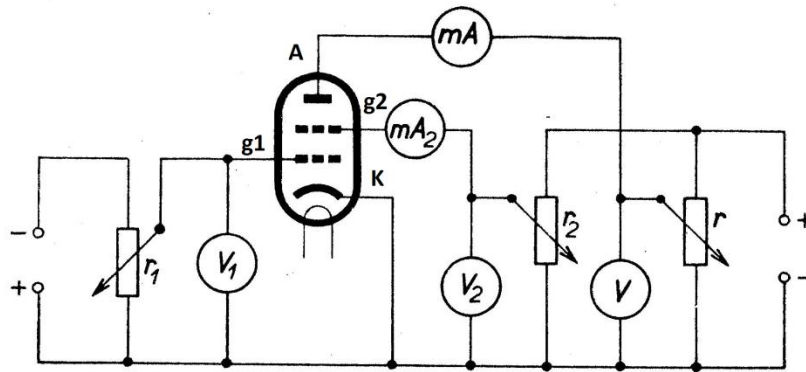
1.6.2 Statické měření vlastností tetrody a pentody

Výše popsany postup je možné použít i pro elektronky s vyšším počtem mřížek. Úměrně počtu mřížek se však zvětší počet volitelných parametrů. Obvod pro měření charakteristik tetrody je znázorněn na obr. 10. V tomto obvodu je použitý společný zdroj napětí pro anodu i stínící mřížku, ovšem napětí na těchto elektrodách nastavujeme zvlášť dvěma potenciometry r_1 a r_2 . Tento obvod může být použit i pro měření pentod. Jak již bylo uvedeno výše, pentoda má hradičí mřížku většinou spojenou s katodou uvnitř baňky, čímž je její potenciál pevně určen a nemůžeme jej měnit zvenčí. [3][2]

Všechny více mřížkové elektronky mohou být zapojeny jako trioda a tudíž i jako trioda měřeny. Stačí pouze všechny mřížky (i stínící, není-li spojena s katodou uvnitř systému elektronky) propojit s anodou.

Pokud potřebujeme přesná měření, musíme použít na žhavení stabilizované napětí, jelikož jeho odchylky do značné míry ovlivňují měření.

Při měření V-A charakteristik elektronek musíme dbát na to, abychom nepřekročili maximální ztrátový výkon na anodě, který označujeme P_a (viz obr. 11).



Obrázek 14 - Obvod pro měření statických vlastností tetrody a pentody.[3]

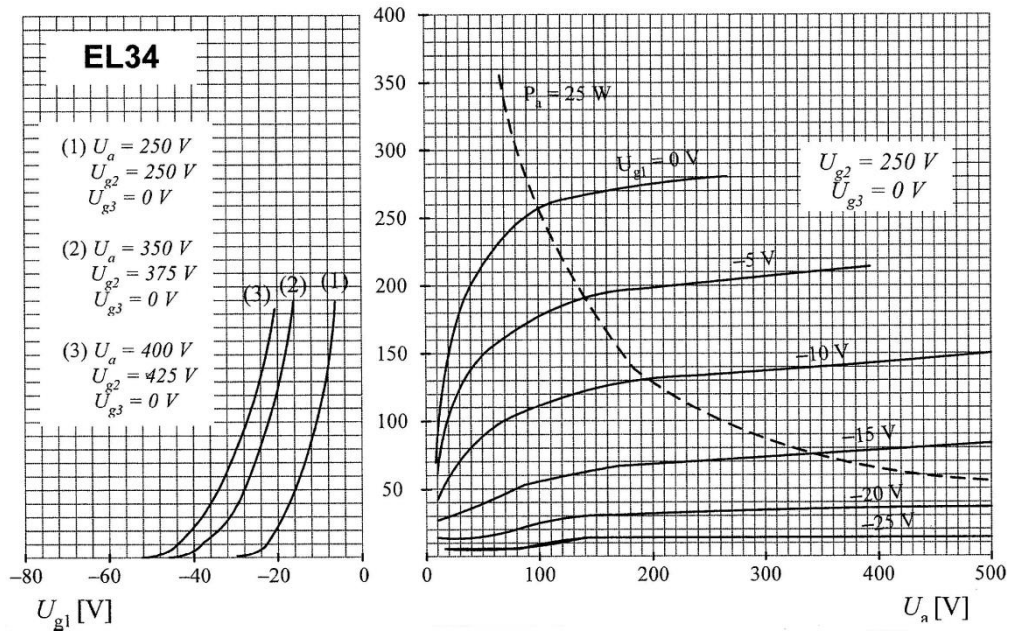
Přenosová charakteristika

$$I_a = f(U_{g1})$$

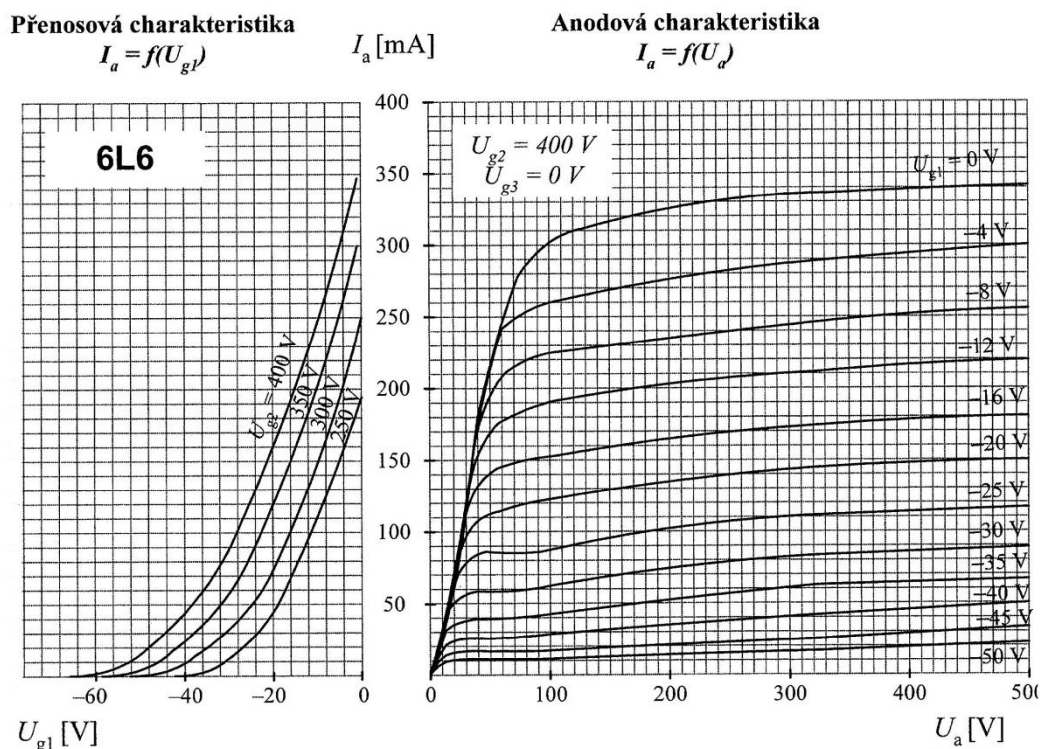
I_a [mA]

Anodová charakteristika

$$I_a = f(U_a)$$



Obrázek 15 - Přenosová a anodová statická charakteristika výkonové pentody EL34.[4]



Obrázek 16 - Přenosová a anodová statická charakteristika svazkové terody 6L6.[4]

1.6.3 Dynamické měření vlastností elektronek

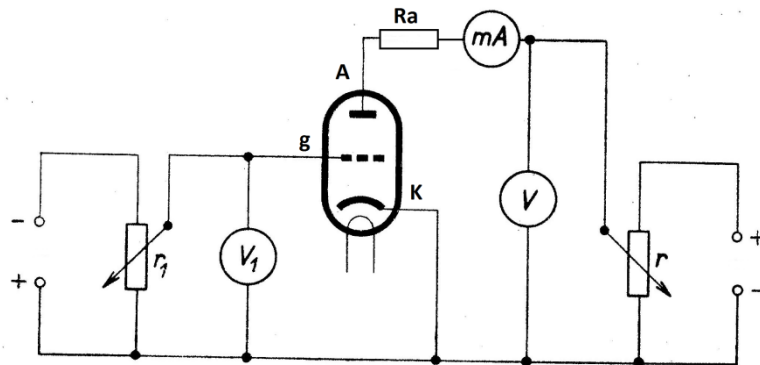
Statické charakteristiky popisují takový pracovní režim elektronky, při kterém se v důsledku změny napětí na některé z elektrod nezmění napětí na ostatních elektrodách. Při běžném použití elektronky nejsou však tyto podmínky obvykle splněny. Jako jednoduchý příklad můžeme uvést základní zapojení triody, která má mezi anodou a kladným napájecím napětím vložen zatěžovací rezistor R_a . Změníme-li napětí na mřížce, změní se i protékající proud elektronkou a rezistorem, tudíž se změní i její anodové napětí. Závislost anodového proudu na mřížkovém napětí, je tedy dána dynamickou charakteristikou.[3]

Dynamickou charakteristiku můžeme určit ze statických anodových charakteristik, pro danou hodnotu zatěžovacího rezistoru R_a a napětí zdroje U_n podle vztahu[3]:

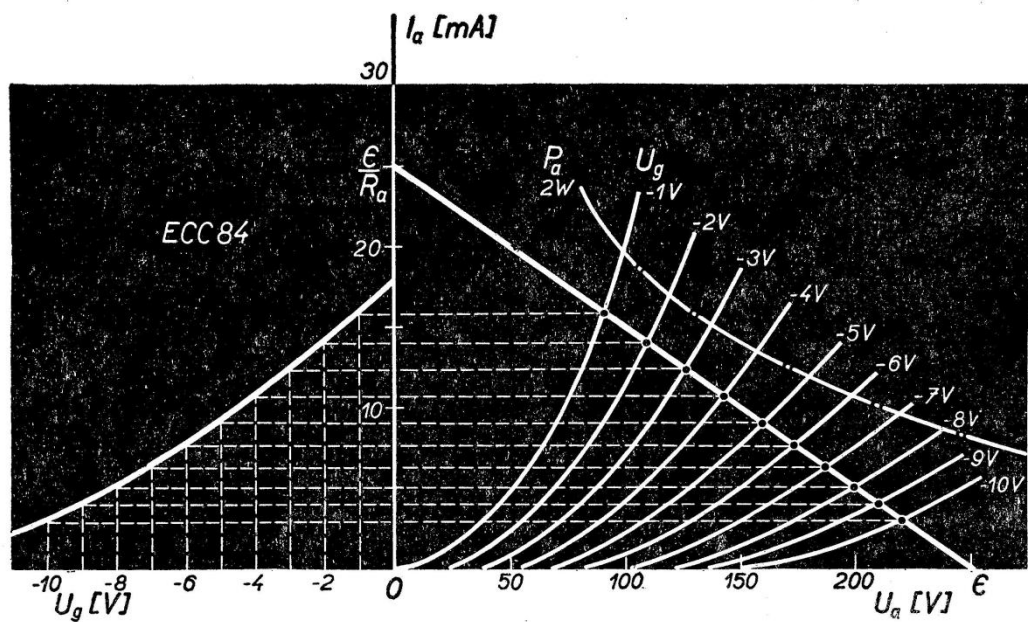
$$I_a = \frac{U_n}{R_a} - \frac{1}{R_a} * U_a \quad (1.12)$$

Pro měření dynamické charakteristiky používáme stejné zapojení, jako pro měření statických charakteristik. Rozdíl je pouze v tom, že mezi anodu a miliampérmetr mA zapojím

zatěžovací rezistor R_a . Postup měření je opět stejný jako pro měření statických charakteristik. Měníme napětí na řídicí mřížce a odečítáme anodový proud I_a z miliampérmetru mA při konstantním napětí U na voltmetru V.



Obrázek 17 - Obvod pro měření dynamických vlastností triody.



Obrázek 18 - Přenosová a anodová dynamická charakteristika triody ECC84.[3]

1.7 Značení evropských elektronek

Elektronky jsou značeny skupinou písmen a koncových čísel, které udávají žhavicí systém, funkci elektrodového systému, jejich počet a druh patice.

- První písmeno ve znaku udává druh, způsob zapojení a napětí nebo proud žhavicího vlákna:

Tabulka 1 - Značení žhavení elektronek[4]

	Žhavicí napětí	Žhavicí proud	Poznámka
A	4V		
B		180mA ss	
C		200mA	
D	1.2V nebo 1,4V		tzv. bateriové žhavení
E	6.3V		
F	12.6V		
G	5V		
H	4V ss	150mA	
I	20V		
K	2V ss		tzv. bateriové žhavení
L		450mA	
O		150mA	
P		300mA	
U		100mA	
V		50mA	
X		600mA	
Y		450mA	

- Druhé až čtvrté písmeno ve znaku udává stavbu a funkci elektrodového systému:

Tabulka 2 - Značení typu elektronek[4]

	Popis	Poznámka
A	dioda (mimo usměrňovací)	
B	dvojitá dioda (mimo usměrňovací)	tzv. duodioda
C	trioda (kromě koncové triody)	
D	koncová trioda	
E	teroda (kromě koncové terody)	
F	pentoda (kromě koncové pentody)	
H	hexoda nebo heptoda	
K	oktoda nebo pentagrid	
L	koncová pentoda nebo teroda	
M	světelný indikátor	např. magické oko
N	tyatron	
Q	enneoda	
W	jednocestný plynový usměrňovač	staré značení TESLA
X	dvoucestný plynový usměrňovač	
Y	jednocestný vakuový usměrňovač	
Z	dvoucestný vakuový usměrňovač	

- Skupina číslic ve znaku umístěná za písmeny udává druh patice a baňky:

Tabulka 3 - Značení druhu patice a baňky[4]

	Typ patice	Poznámka
1 ...10	patice P	
11 ...15	patice T	
16 ...19	patice P	
20 ... 29	patice loktal	tzv. evropský oktál
30 ... 39	patice octal	tzv. americký oktál
40 ... 49	patice rimlock	
50 ... 59	různé patice	
60 ... 79	různé patice	
80 ... 89	patice noval	
90 ... 99	patice heptal	
180 ... 189	patice noval	
200 ...	patice dekal	
300 ...	patice oktál	
500 ...	patice magnoval	
800 ...	patice noval	
900 ...	patice heptal	

Elektronky se zvláštními vlastnostmi, jako je např. dlouhá životnost, úzké tolerance parametrů nebo speciální odolnost systému proti otřesům, jsou označeny speciálně upraveným značením, nebo doplněny písmenem S (např. E34L, ECC803S apod.).

2. Návrh testeru

2.1 Základní vlastnosti testeru

- Digitálně řízený zdroj anodového napětí 0 – 350V a proudu 0 – 200mA
- Digitálně řízený zdroj napětí řídicí mřížky 0 – (- 80V)
- Měření velikosti anodového napětí a proudu
- Měření žhavicího proudu
- Změření a vypočtení strmosti S, vnitřního odporu Ri a zesilovacího činitele μ .
- Zobrazení a porovnání naměřených hodnot se zadanými katalogovými

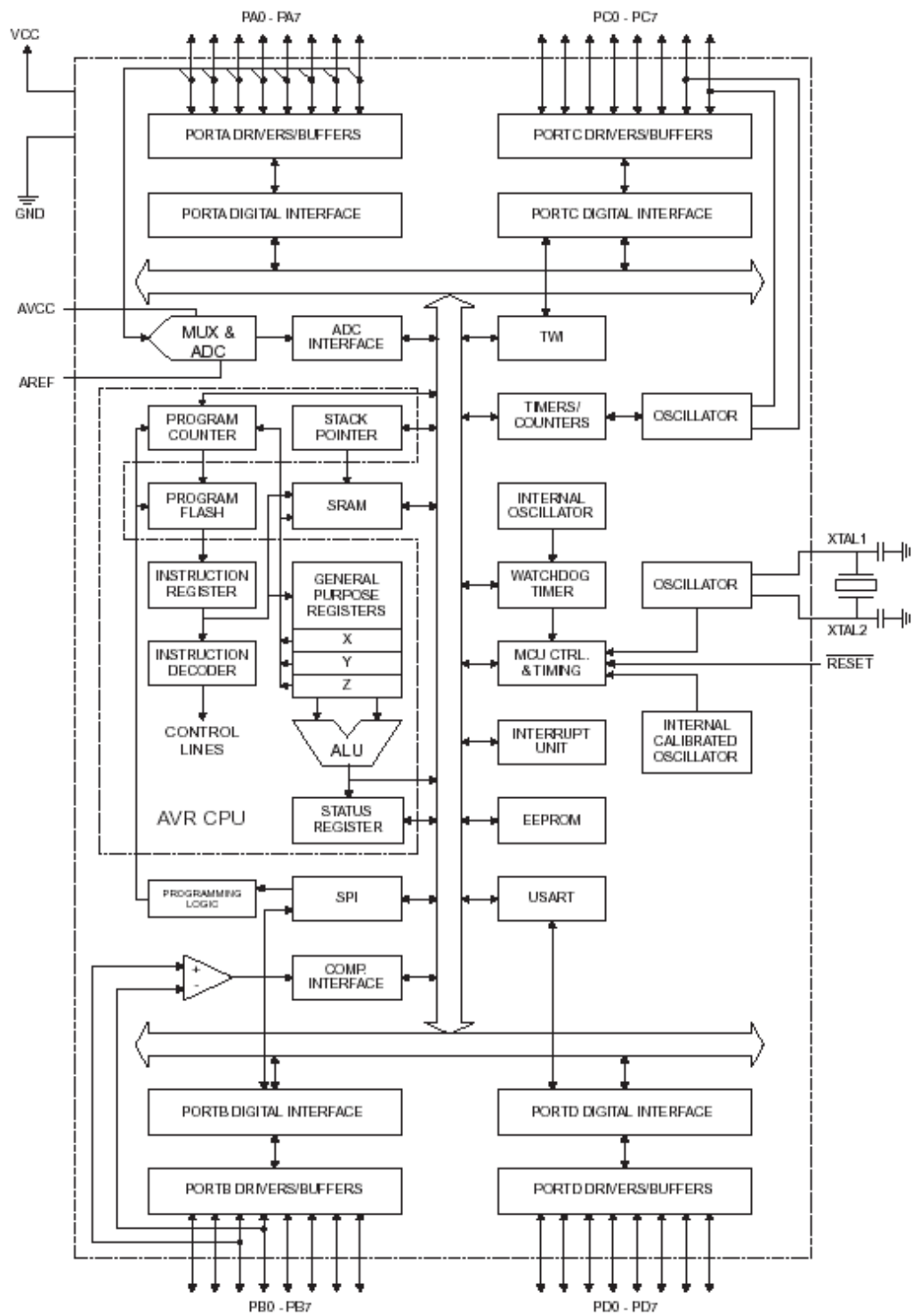
2.2 Použitý hardware

2.2.1 Mikroprocesor

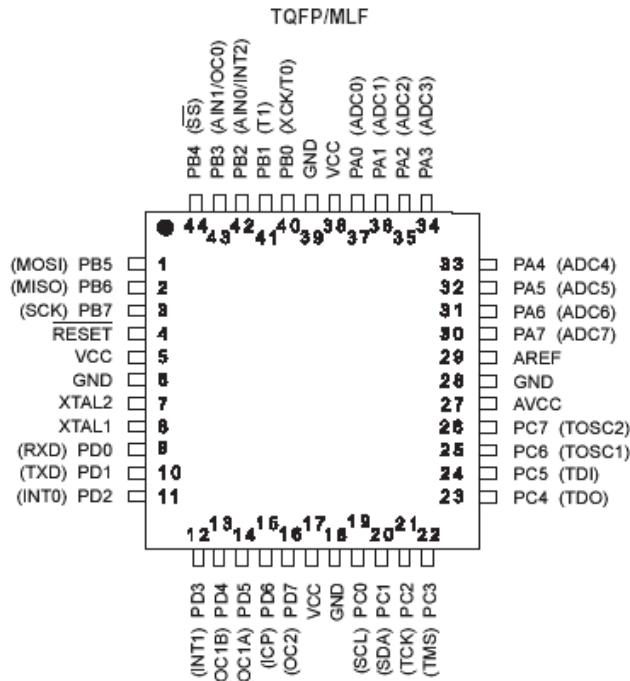
V testeru jsem použil k ovládání periférií a provádění výpočtů mikroprocesor od výrobce Atmel. Jedná se o osmi bitový model ATmega32L z rodiny AVR, který je postaven na Harvardské architektuře s RISC instrukční sadou. Z důvodu úspornosti místa jsem zvolil procesor v pouzdře TQPF (obr. 17).

Hlavní parametry mikroprocesoru[8]:

- Napájení 2,7V – 5,5V
- Frekvence oscilátoru až 8Mhz
- RISC architektura , 131 instrukcí, 32x8bit registrů
- 32kB Flash paměti
- 1024 B EEPROM
- 2kB SRAM
- Dva 8 bitové a jeden 16 bitový čítač/časovač
- Časovač reálného času se samostatným oscilátorem
- 4 PWM kanály
- Osm 10bitových AD převodníků
- SPI sériové rozhraní
- Programovatelný USART
- Dvouvodičová sériová sběrnice I2C
- Programovatelný Watchdog časovač
- 32 programovatelných I/O pinů
- Spotřeba bez periférií 1.1mA



Obrázek 19 - Blokové schéma mikroprocesoru ATmega32. [8]



Obrázek 20 Pouzdro TQFP mikroprocesoru ATmega32L. [8]

2.2.2 AD a DA převodníky

Pro přesná měření jsem musel použít kvalitní převodníky, kterých je v dnešní době na trhu nespočetně. Jelikož jich budu v měřáku využívat hned několik, rozhodl jsem se pro převodníky se sběrnici I2C, díky které potřebuji jen dva datové vodiče. Převodníky jsem vybíral především dle poměru cena/výkon, jelikož se často od sebe lišili neúměrně cenou a výkonem.

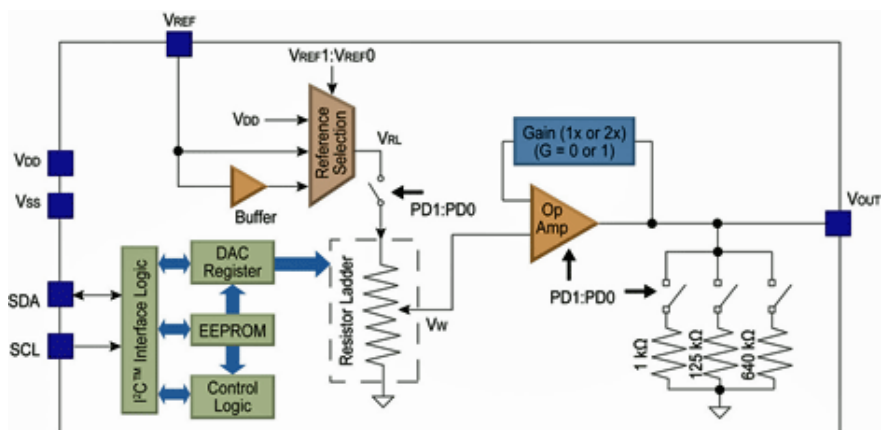
- MCP4726

Jedná se o moderní 12 bitový D/A převodník výrobce Microchip Technology nabízející nízký příkon, který má integrovanou EEPROM paměť pro uchování konfigurace. Tento převodník bude řídit napětí řídicí mřížky. [10]

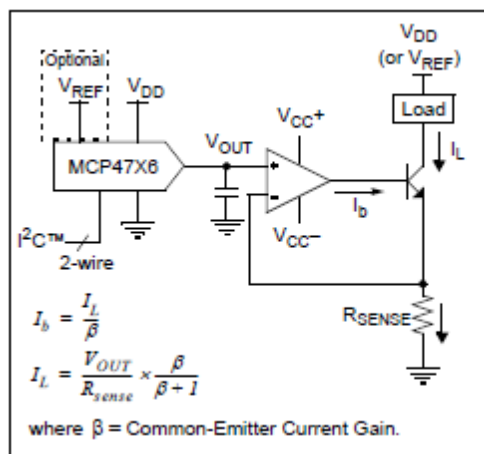
Základní vlastnosti:

- Výstupní rozlišení: 12-bitů
- Výstup typu rail-to-rail
- Doba ustálení typicky 6 μ s

- Možnost volby mezi referenčním a napájecím napětím
- Integrovaná paměť EEPROM pro automatické obnovení konfigurace
- Režim spánku s odpojeným výstupem a volbou pull-down rezistoru (1, 125, 640 kOhm)
- Nízká pracovní spotřeba proudu: 210 uA a 60 nA v Power Down režimu
- Jediné napájecí napětí: 2,7 až 5,5
- Rozhraní typu I2C s osmi adresami a rychlostí přenosu až 3,4 Mb/s
- Rozšířený teplotní rozsah: -40 až +125 °C
- Dostupné v provedení SOT-23-6 a DFN



Obrázek 21- Blokové schéma D/A převodníku MCP 4726.



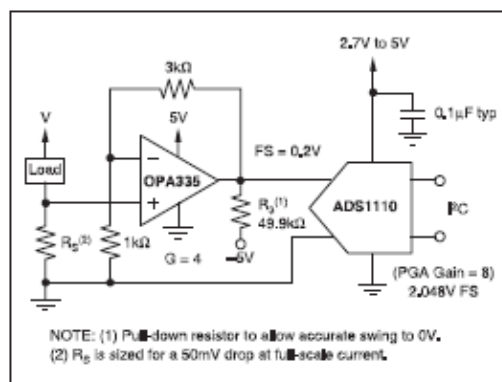
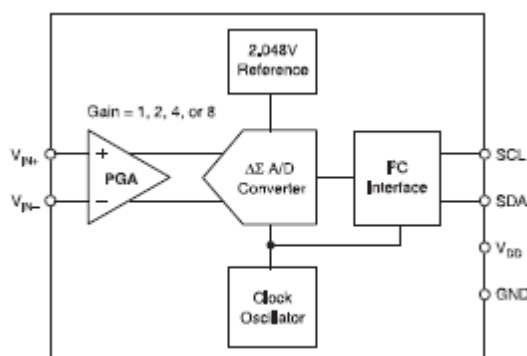
Obrázek 22 - Schéma zapojení regulovatelného proudového zdroje s MCP 4726.

- ADS1110

Pro měření anodového proudu, který se bude pohybovat od desítek uA po 100 mA jsem se rozhodl použít 16 bitový precizní A/D převodník od výrobce Texas Instruments, který se vyznačuje výbornou teplotní stabilitou a vysokou přesností. [11]

Základní vlastnosti:

- 16 bitové rozlišení
- Jeden vstupní kanál
- Programovatelná rychlost vzorkování 15ksp/s až 240ksp/s
- Přesnost: $\pm 1\text{LSB}$
- Vnitřní reference 2.048V $\pm 0.05\%$, Drift 5ppm/°C
- Vlastní oscilátor
- Samočinná kalibrace
- Až 8 převodníků na jedné sběrnici I2C
- Jediné napájecí napětí: 2,7V až 5,5V
- Nízká pracovní spotřeba proudu: 240uA
- Dostupné v provedení SOT-23-6

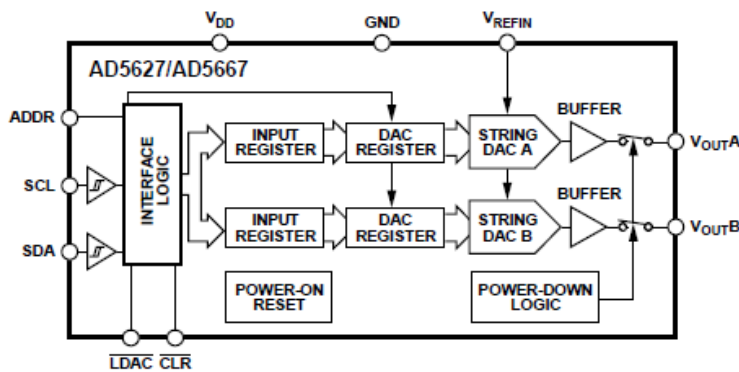


Obrázek 23 - - Blokové schéma a schéma zapojení A/D převodníku ADS1110.

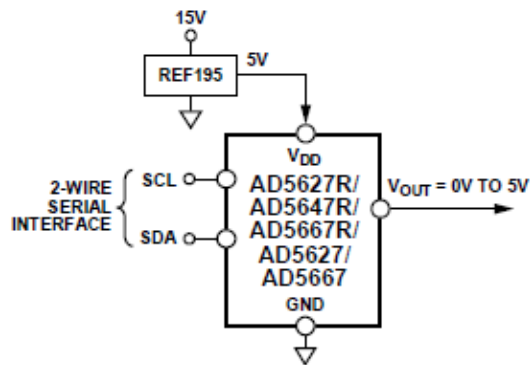
- AD5667

Je nejdůležitější převodník v zařízení, pomocí něhož se reguluje výstupní anodové napětí U_a a anodový proud I_a . Jedná se o dvoukanálový 16 bitový D/A převodník, který se vyznačuje nízkou spotřebou proudu. Ve svém zařízení budu využívat pouze jeden kanál, protože jsem se rozhodl regulaci proudu a napětí přepínat relátkem. [9]

- Nízká spotřeba
- 16 bitové rozlišení
- Dva výstupní kanály
- U verze R Vnitřní reference 1.25V/2.5V, Drift 5ppm/°C
- Možnost externí reference
- Rozhraní typu I2C s osmi adresami a rychlostí přenosu až 3,4 Mb/s
- Hardwarové funkce LDAC a CLR
- Vypínání kanálů
- Napájecí napětí: 2,7V až 5,5V
- Dostupné v provedení LFCSP a MSOP10



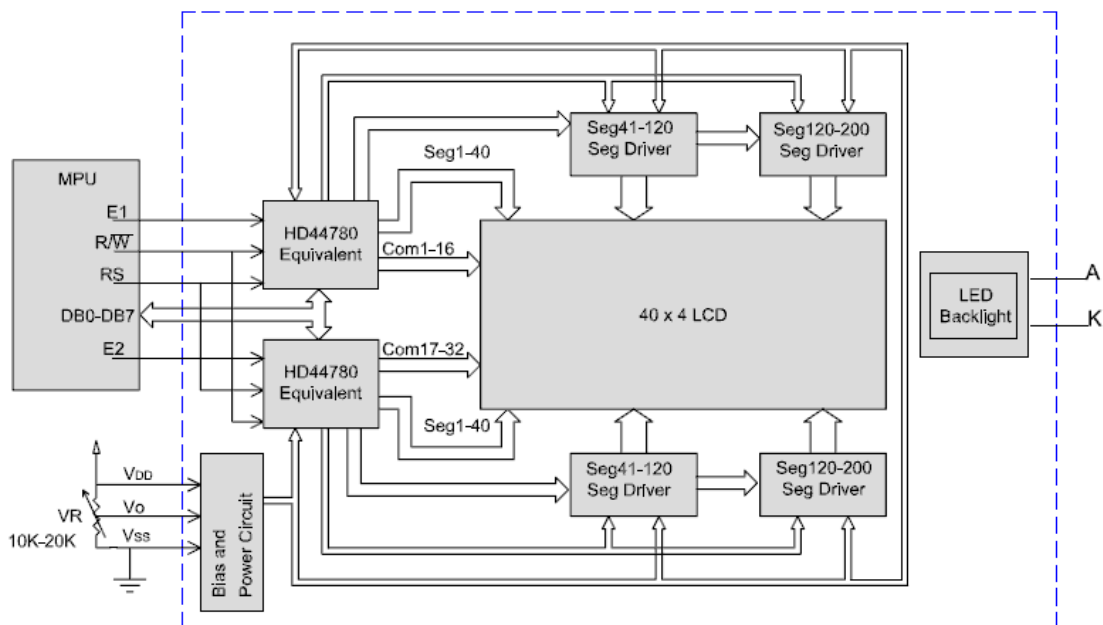
Obrázek 24 - - Blokové schéma D/A převodníku AD5667.



Obrázek 25 - - Schéma zapojení D/A převodníku AD5667 s napěťovou referencí.

2.2.3 LCD display

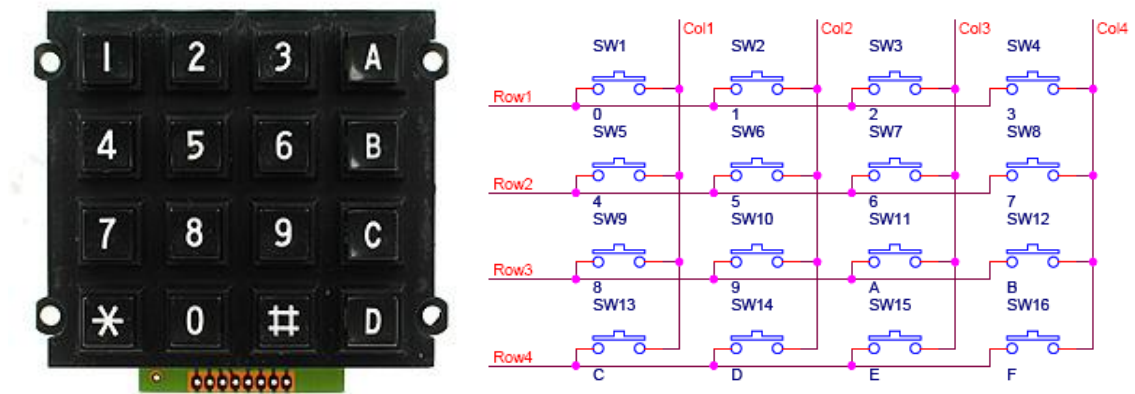
Jako zobrazovací prvek jsem zvolil LCD display RC4004 od výrobce Raystar, který je schopen zobrazit 4x40 znaků. Tento display jsem zvolil proto, že dokáže zobrazit potřebné množství informací a je relativně jednoduchý na ovládání oproti grafickému LCD, jelikož obsahuje dva standartní řadiče ST7066U, při čemž každý z nich ovládá dva řádky. [17]



Obrázek 26 - Blokové schéma LCD RC4004.

2.2.4 Klávesnice

Pro zadávání hodnot a pohyb v menu jsem se rozhodl použít modul klávesnice s 16-ti tlačítky, které nám usnadní zadávání hodnot. Modul klávesnice má tlačítka zapojená do matice 4x4, proto nám bude stačit osm vodičů na propojení s mikroprocesorem. Funkce této klávesnice je jednoduchá, mikroprocesor přivede napětí postupně na všechny čtyři řádky klávesnice a u každého z nich testuje, zdali se napětí neobjeví na některém ze sloupců klávesnice a podle toho vyhodnotí, jaký je stisknutý znak.

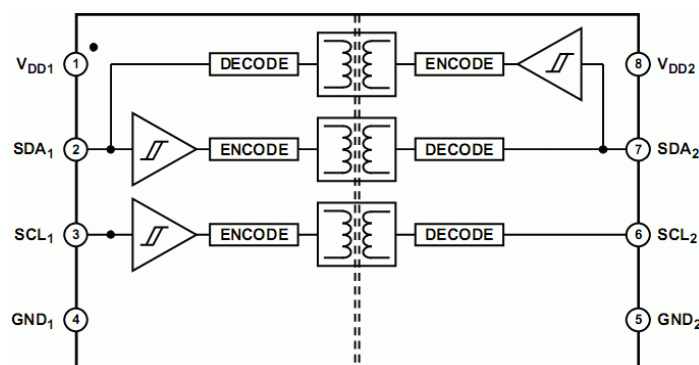


Obrázek 27 - Fotografie a schéma zapojení klávesnice 4x4.

2.2.5 Ostatní

- ADUM1251

Tento obvod výrobce Analog Devices označovaný jako iCoupler slouží k izolaci I2C sběrnice, jelikož měření probíhá na vysokém napěťovém potenciálu oproti GND mikroprocesoru. Jedná se o indukční izolátor s napěťovou pevností až 2.5kV rms, který má obousměrný tok dat a jednosměrný tok hodinového kmitočtu. [15]



Obrázek 28 - Blokové schéma izolátoru ADuM1251

- Stabilizátory napětí řady 78XX ,79XX a MCP1541

Stabilizaci všech napětí pro digitální i analogovou část zařízení obstarávají univerzální stabilizátory řady 78XX a 79XX [15]. Stabilizátory označené 78XX stabilizují kladné napětí a stabilizátory označené 79XX stabilizují záporné napětí. Tyto typy stabilizátorů obsahují integrovanou proudovou ochranu proti zkratu. Pro správnou funkčnost stabilizátoru je potřeba na jeho vstup přivádět napětí o cca 2-3V větší než je výstupní stabilizované napětí. V zapojení používáme ještě obvod MCP154. Jedná se o napěťovou referenci 4.096V, která slouží jako referenční napětí A/D a D/A převodníkům, u nichž nebylo možné využít vnitřní referenci. [12]

- Tranzistory

Pro řízení anodového napětí používáme tranzistor Mosfét IRFPF40 s kanálem typu N. Tento tranzistor má dostatečnou rezervu vůči napěťovému průrazu a potřebnou strmost. K řízení mřížkového napětí je použit obdobný tranzistor STP4NK60, který má pouze menší napěťovou pevnost.

- Operační zesilovače

Protože zařízení pracuje s opravdu malými napětími, bylo potřeba použít kvalitní OZ. Zvolil jsem tedy precizní nízkošumový OZ OP27[13], který má vstupní offset 30uV s možností donastavení potenciometrem, zesílení 126dB, drift 0.2uV/°C a šířku pásma 8MHz. Jako další jsem vybral OZ LF412[14] což je dvojitý OZ používající na vstupu tranzistory J-fet, díky kterým má veliký vstupní odpor.

2.3 Stručný popis zapojení

2.3.1 Řídící část

Řídící jednotkou celého zařízení je mikroprocesor ATmega32L taktovaný krystalem o frekvenci 8Mhz, na který jsou připojeny veškeré periferie. Na port B je připojen LCD display, který slouží pro zobrazování zadaných a změřených hodnot a klávesnice pracující

v maticovém režimu, která je připojena na port D. Pro měření žhavicího proudu jsou použity dva interní A/D převodníky ATmegy (dva, protože dvojitě triody mají dvě žhavicí vlákna). Velikost tohoto proudu je snímána jako úbytek napětí na měřících rezistorech malé hodnoty sériově zapojených mezi GND a žhavicí vlákno. Toto napětí je poté přivedeno na vstup neinvertujícího OZ, kde je zesíleno tak, aby 2,5A odpovídalo $V_{ref} = AVCC = 5V$, jelikož nám tento rozsah měření proudu postačí. Z portu C jsou přes tranzistory vyvedeny výstupy sloužící pro ovládání relé, které určeny pro přepínání měřeného a ovládaného proudu nebo napětí. Mikroprocesor dále ovládá přes sběrnici I2C dva zdroje napětí popř. proudu, které jsou zapojeny téměř shodně. Popíšeme si je v následujících odstavcích.

2.3.2 Zdroj anodového napětí (proudu)

Regulaci anodového napětí nám zajišťuje 16 bitový převodník, který nám na výstupu dává hodnotu napětí v rozsahu 0 – V_{ref} což je 4.096V. Toto napětí je přivedeno na neinvertující vstup OZ OP27. Na invertující vstup s integračním článkem je přivedeno upravené výstupní napětí zdroje. Toto napětí je nejprve odporovým děličem zmenšeno přibližně 100x a poté je přivedeno na napěťový sledovač vytvořený OZ LF412, za kterým následuje invertující zapojení OZ LF412 na kterém je velikost výstupního napětí přesně nastavena na 100x menší hodnotu než je napětí výstupní. Nyní je toto napětí přivedeno na již výše zmíněný invertující vstup OZ OP27. Výstup z OZ OP27 je připojen na tranzistor Mosfet s kanálem N, který je zapojen v kladné cestě napájecího zdroje a reguluje velikost napětí (Drain na napájecí zdroj).

Nyní se popíšeme funkci regulace. Na vstup D/A převodníku pošleme data, která nám na výstupu zajistí určitou hodnotu napětí, která odpovídá jedné šestině skutečného napětí. Napětí z D/A převodníku je přivedeno na vstup OZ OP27, který vyhodnotí rozdíl napětí na neinvertujícím a invertujícím vstupu. Jelikož na invertujícím vstupu není ještě žádné napětí, začne se napětí na výstupu OZ OP27 zvětšovat, čímž způsobí otevření tranzistoru Mosfet. V té době se začne zvyšovat napětí na výstupu zdroje, a proto se zvyšuje i napětí na invertujícím vstupu OZ OP27. Tento děj trvá až do doby než, jsou napětí na obou vstupech OZ OP27 shodná. Poté co jsou napětí shodná, přestane OZ OP27 zvyšovat napětí na výstupu a ustálí se. Vhodné je použít tranzistor Mosfet s malou strmostí, čímž zvýšíme pracovní oblast OZ OP27 a regulátor bude stabilnější. Funkce tohoto regulátoru je jednoduchá a díky zpětné

vazbě je výstupní napětí velice stabilní. Teoreticky je možné regulovat napětí v rozsahu 0 – 409.6V. Všechny děje jsou popsány ve zpomalené podobě.

Regulace proudu je založena na stejném principu, přičemž je pouze pomocí relé přepnut invertující vstup OZ OP27 z výstupní napětí na napětí, které je tvořeno úbytkem na měřicím rezistoru, jímž prochází anodový proud. Toto napětí je obdobně přesně nastaveno pomocí OZ OP LF412 jako u napětí výstupního. Rozsah je teoreticky 0 – 409.6mA.

Protože regulujeme pouze napětí nebo proud a známe vždy jeho hodnotu, stačí nám tedy pro provedení výpočtů měřit vždy druhou veličinu než je ta regulovaná. Z tohoto důvodu je zde použit pouze jeden 16 bitový A/D převodník ADS1110, na který je pomocí výše uvedeného relé připojeno napětí, které není regulované. I2C sběrnice musí být izolována od mikroprocesoru, jelikož je zde použit referenční GND bod, který je připojen pro správnou funkci celku na source tranzistoru Mosfet. Viz schéma zapojení.

2.3.3 Zdroj napětí pro řídicí mřížku

U tohoto zdroje nepotřebujeme měřit protékající proud, jelikož řídicí mřížka je ovládána záporným napětím oproti katodě a proud je tedy zanedbatelný. Tento regulovatelný zdroj je ze všech nejjednodušší, protože obsahuje jenom tu část, která řídí výstupní napětí, jak jsem již popsal výše. Pro regulaci napětí je opět použit 12 bitový A/D převodník MCP4726.

2.3.4 Napájecí zdroje

Pro napájení zařízení jsou použity následující zdroje:

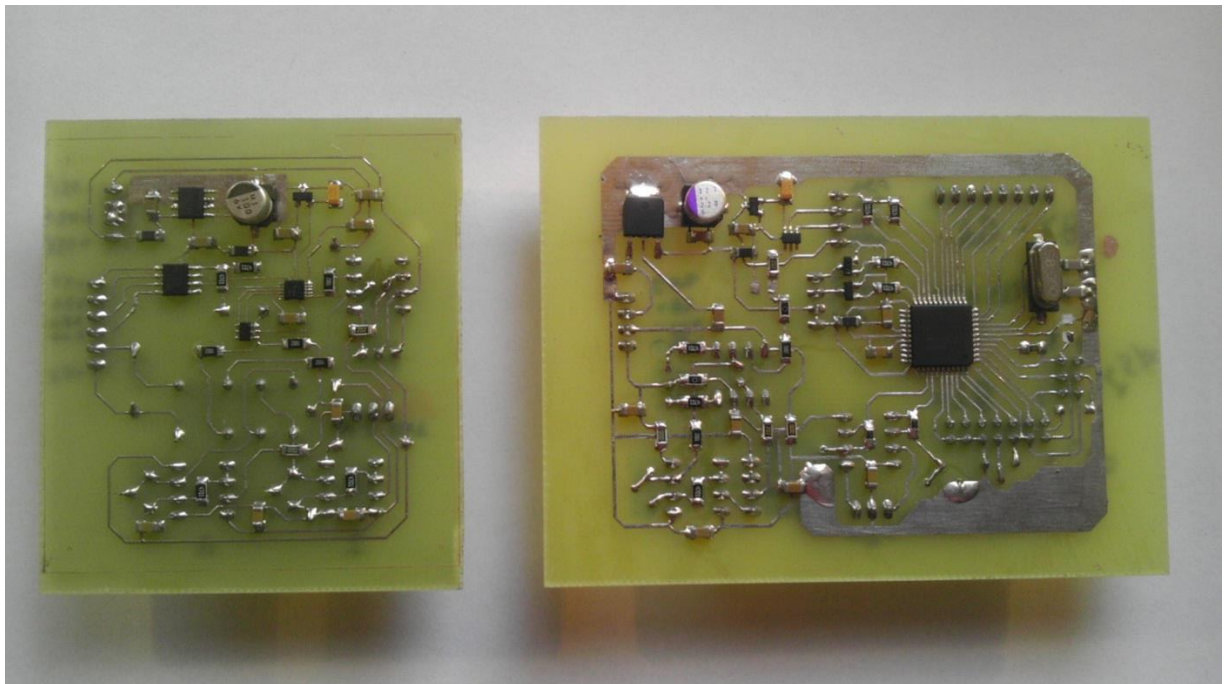
- Pro napájení digitální řídicí části je použit je použitý nestabilizovaný stejnosměrný zdroj o velikosti napětí 9V a proudu 500mA.
- Pro napájení operačních zesilovačů, jsou použity dva symetrické stabilizované (pomocí univerzálních stabilizátorů 7815 a 7915) galvanicky oddělené zdroje o velikosti napětí +/- 15V a proudu 100mA. Galvanicky oddělené jsou, protože regulační část U_a a I_a má potenciál GND vytvořen na kladném výstupním napětí U_a na source regulačního tranzistoru (abychom mohli ovládat tranzistor Mosfet, měřit U_a a I_a). Druhý je připojen na zápornou větev anodového napětí U_a . Je mezi nimi tedy potenciál o velikosti výstupního napětí.

- Anodový obvod je napájen ze stejnosměrného nestabilizovaného zdroje napětí o velikosti 350V a proudu 200mA.
- Na žhavení je použit stabilizovaný stejnosměrný zdroj o velikosti napětí 6.3V a max. proudu 1.5A.

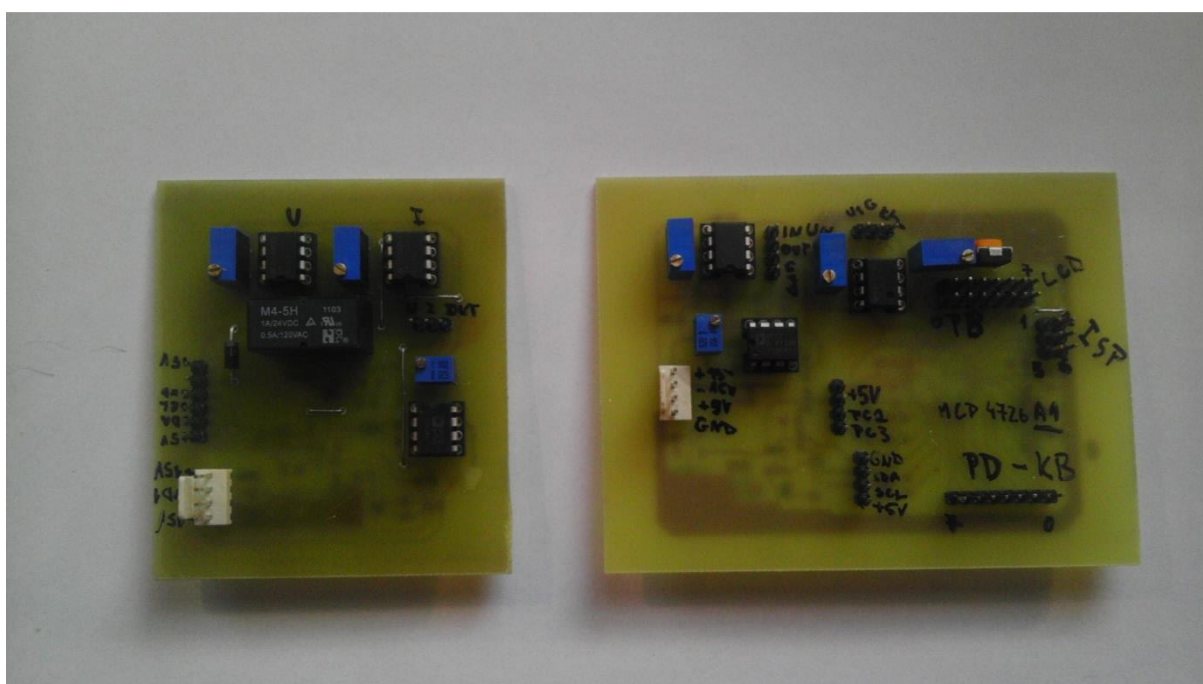
3 Realizace testeru

3.1 Hardware

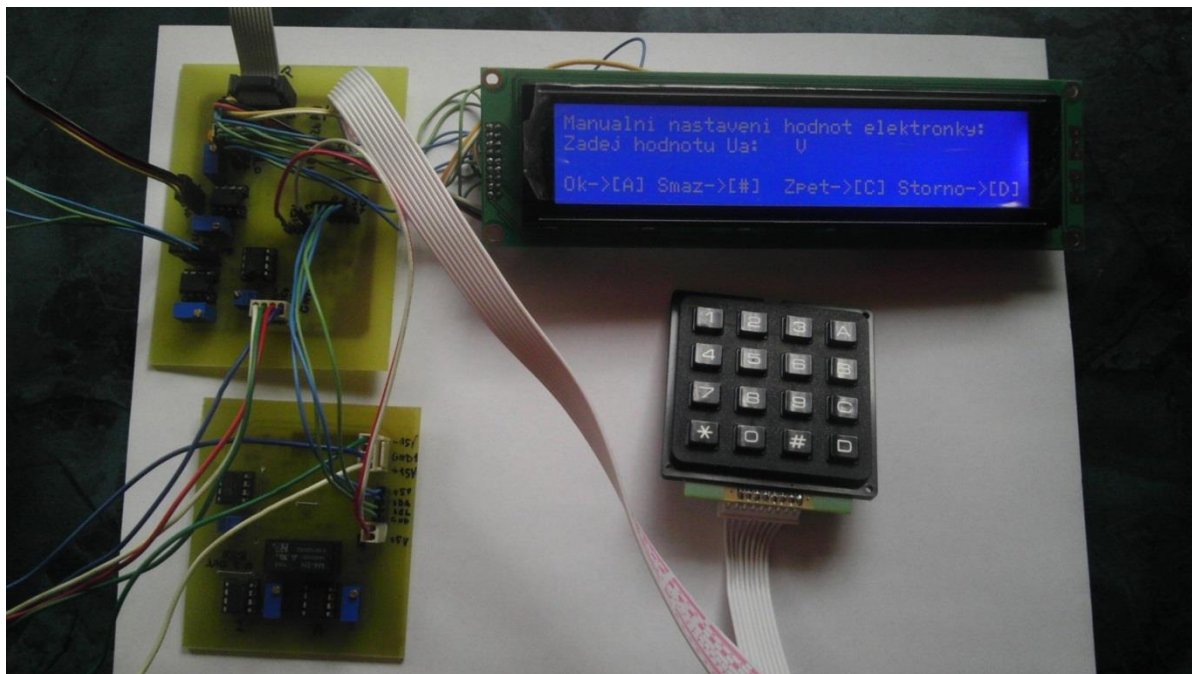
Při realizaci jsem kladl důraz především nato, aby byl tištěný spoj co nejlépe navrhnutý. Soustředil jsem se, aby byly signálové cesty co nejkratší, nevznikali zemnicí smyčky (např. GND je v rámci možností vedená z jednoho bodu), snažil jsem se umisťovat blokovací kondenzátory co nejbližší k IO. Výrobu tištěného spoje jsem prováděl fotocestou. Součástky jsem pájel na plošný spoj klasickou mikropájkou za použití širokého hrotu. Výsledkem je dle mého názoru, zdařilý tištěný spoj.



Obrázek 29 - Pohled na osazené tištěné spoje.



Obrázek 30 - Pohled na osazené tištěné spoje.



Obrázek 31 - Pohled na zprovozněný tester.

3.2 Software

Software pro mikroprocesor ATmega32L byl napsán v jazyce C pomocí prostředí ATMEL studio 6. Mikroprocesor jsem programoval programátorem AVR Dragon, pomocí sériového rozhraní ISP. V software jsem použil již hotové knihovny[18] pro I2C sběrnici a LCD, které jsem si upravil dle vlastních potřeb.

Hlavními úkoly mikroprocesoru jsou:

- Řízení LCD
- Načítání hodnot z klávesnice
- Komunikace s převodníky pomocí sběrnice I2C
- Provedení výpočtů

3.2.1 Stručný popis software

Po připojení napájecího napětí se nejprve provedou inicializace LCD, I2C, AD převodníku a portů. Poté se nám pro jistotu vynulují vstupní registry v převodnících, aby na výstupu měli nulové napětí. Jako další již následuje zobrazení menu na display s možností výběru zadávání parametrů elektronek. Následuje uložení hodnot do proměnných, kterým ještě předchází konverze zadaných znaků na double. Nyní je volána funkce žhavení, ve které je vytvořena čekací smyčka asi na necelou minutu, což na nažhavení elektronky stačí. V této funkci je taktéž zobrazována hodnota žhavicího proudu získávána interním převodníkem v mikroprocesoru. Po vykonání tohoto procesu je volána funkce měření, ve které jsou již dle zadaných hodnot měřeny hodnoty, které se následně použijí k vypočtení potřebných hodnot. Tyto hodnoty jsou poté zobrazeny na LCD spolu se zadanými a mikroprocesor čeká na stisk klávesnice, který znovu vyvolá funkci main a vše se opakuje.

4. Závěr

V této práci jsme probrali problematiku usměrňovacích a zesilovacích elektronek. Objasnili jsme si princip činnosti elektronek, ukázali jsme si základní parametry elektronek, jejich výpočty a jak je můžeme změřit.

V praktické části se podařilo sestrojít funkční zařízení na měření elektronek. Jelikož toto zařízení pracuje při měření s velice malými hodnotami napětí, bylo důležité navrhnout ho tak, aby bylo co nejodolnější vůči okolnímu rušení a také, aby byly a regulovatelné zdroje co možná nejstabilnější. Jelikož jsem návrhu zařízení i tištěnému spoji věnoval největší možnou péči, pozitivní výsledek se k mé radosti dostavil. Zařízení jsem neumisťoval do žádné přístrojové krabičky, protože jsem používal při testování několik externích zdrojů, které časem nahradím za jeden toroidní transformátor s potřebnými vinutími. Z důvodu nedostatku času jsem v přístroji nevytvořil databázi elektronek, což ovšem není nic kritického, jelikož hodnoty můžeme zadávat ručně. Pro zvýšení přesnosti měření proudu zvláště u elektronek, jimiž protéká v nastaveném pracovním bodě proud řádově ve stovkách mikroampér, nebo jednotkách miliampér, by bylo vhodné udělat mikroprocesorem přepínatelný rozsah.

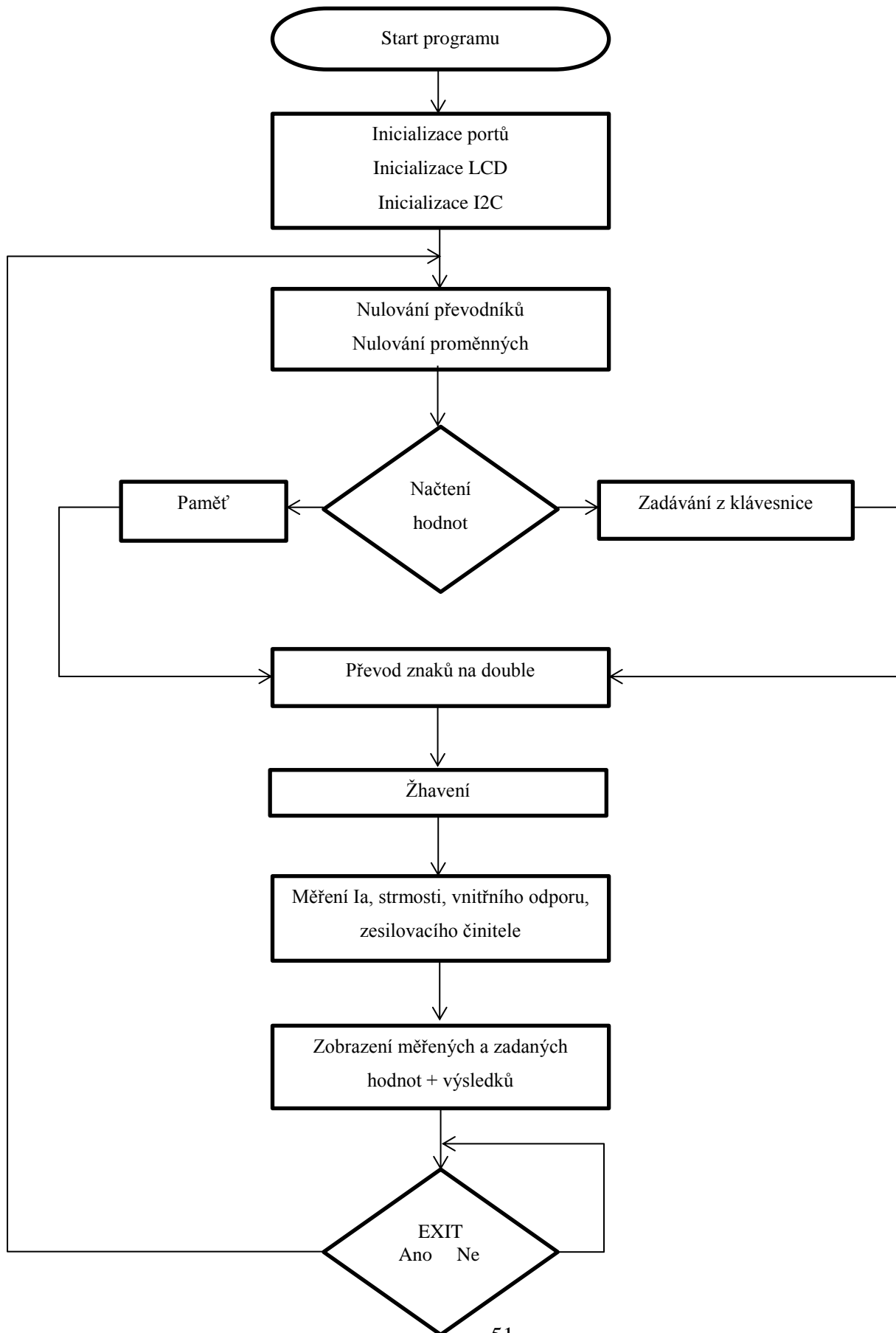
Při manipulaci se zařízením je nutné dávat pozor, jelikož pracuje se životu nebezpečným napětím!

Literatura

- [1] Ing. Dr JOSEF STRÁNDKÝ, Základy radiotechniky, I. elektronky. II vydání. Praha 1949.
- [2] Ing. Dr JOSEF NĚMEC – JINDŘICH FOREJT, Elektronky a výbojky v průmyslové praxi. II vydání. Praha 1946.
- [3] JAROMÍR BROŽ A KOLEKTIV, Základy fyzikálních měření. I vydání. Praha 1983
- [4] VLACH, J., VLACHOVÁ, V., LAMPÁRNA aneb Co to zkusit s elektronkami? Praha 2005, 152s. ISBN 80-7300-091-1
- [5] Sinclairovy články, Elektronky [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW: <http://aldax.cz/index.php?act=prod&show=clanky&key=lampy>
- [6] Alfaelektronky, Elektronky [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW: <http://alfaelektronky.cz/teorie/elektr.html>
- [7] Wikipedia, Elektronka [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronka>
- [8] Atmel, Datasheet AVR ATmega32L [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW: www.atmel.com/Images/2503s.pdf
- [9] Analog Devices, AD5667 [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5627R_5647R_5667R_5627_5667.pdf
- [10] Microchip, MCP4726 [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22272C.pdf>
- [11] Texas Instruments, ADS1110 [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW: <http://www.ti.com/lit/gpn/ads1110>
- [12] Microchip, MCP1541 [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21653C.pdf>
- [13] Analog Devices, OP27 [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/OP27.pdf

- [14] Texas Instruments, LF412 [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW:
<http://www.ti.com/lit/gpn/lf412-n>
- [15] Texas Instruments, LF412 [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW:
<http://www.ti.com/lit/gpn/ua7815>
- [16] Analog Devices, ADuM1251 [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW:
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADUM1250_1251.pdf
- [17] Raystar, RC4004A [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW:
<http://www.tme.eu/en/Document/4a573e634729352e730d7b40d914280f/RC4004A-BIW-ESX.pdf>
- [18] FLEURY, Library Atmel AVR [online]. [cit. 2013-08-02]. Dostupný z WWW:
<http://jump.to/fleury>

Příloha A – Vývojový diagram



Příloha B – Obsah CD

Tištěné spoje

Schémata zapojení

Seznam hodnot součástek

Zdrojový kód

Vlastní text práce ve formátu PDF