

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta

Návrh a realizace A/D převodníku s jednočipovým mikropočítačem

Bakalářská práce

Jiří Vonášek

Vedoucí práce doc. PaedDr. Petr Adámek, Ph.D.

Blatná 2007

Anotace

Cílem této práce je vytvoření měřícího A/D převodníku řízeného jednočipovým mikropočítačem, který nalezne uplatnění při výuce odborných předmětů na střední škole elektrotechnického směru jako měřicí přístroj a zároveň jako zařízení s možností dalšího rozvoje ze strany studentů.

Annotation

The aim of this work is construction of an A/D converter with a microcontroller. This converter can be used as an educational equipment on a technical high school like a measuring device as well as a device with possibility of another improvement by students.

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
Pedagogická fakulta
Katedra fyziky
Akademický rok: 2006/2007

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří VONÁŠEK**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Měřicí a výpočetní technika**

Název tématu: **Návrh a realizace A/D převodníku s jednočipovým mikropočítačem**

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


- teoretický rozbor z hlediska konstrukce A/D převodníků
- návrh řešení a volba obvodů pro konstrukci převodníku
- praktická realizace převodníku a ukázka jeho aplikace při měření
- kalibrace a ověření přesnosti převodníku

Rozsah práce: cca 40 stran
Rozsah příloh:
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


- GOOK, M.: Hardwarová rozhraní - Průvodce programátora. Praha, Computer Press, 2006.
- MATOUŠEK, D.: Práce s mikrokontroléry ATMEL AT89C2051. Praha, BEN - technická literatura, 2002, 2. vydání.
- DOSTÁL, J.: Aplikace analogově číslicových obvodů. Rožnov pod Radhoštěm, Tesla Rožnov, 1986.
- PIRKL, J.: Řešené příklady v C# aneb C# skutečně prakticky. Č. Budějovice, KOPP, 2005.

Vedoucí bakalářské práce: doc. PaedDr. Petr Adámek, Ph.D.
Katedra fyziky

Datum zadání bakalářské práce: 9. listopadu 2006
Termín odevzdání bakalářské práce: 30. dubna 2007


doc. PhDr. Alena Hošpesová, Ph.D.
děkanka




prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 9. listopadu 2006

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Hornosíně dne 29. prosince 2007

Jiří Vonášek, v.r.

Děkuji vedoucímu práce doc. Adámkovi za připomínky k návrhu práce, panu Pavlu Bartůškovi za ochotu konzultovat se mnou dotazy ohledně činnosti některých součástí, panu Václavu Hajníkovi za asistenci při návrhu a výrobě desek plošných spojů a panu Václavu Machovci za bezplatné poskytnutí mnoha užitých součástí.

Obsah

1 Úvod.....	8
1.1 Požadavky projektu.....	8
2 Rozbor problematiky A/D převodu.....	10
2.1 Základní pojmy.....	10
2.2 Typy A/D převodníků.....	12
2.2.1 Paralelní převodníky.....	12
2.2.2 Aproximační převodníky.....	13
2.2.3 Integrační převodníky.....	14
2.2.4 Převodníky sigma-delta.....	15
2.3 Souhrn vlastností A/D převodníků.....	15
3 Návrh zařízení.....	16
3.1 Blokové schéma obvodu.....	16
3.2 Rozbor činnosti jednotlivých bloků.....	17
3.2.1 Vstupní dělič.....	17
3.2.2 Zdroj referenčního napětí.....	18
3.2.3 Integrátor.....	18
3.2.4 Displej.....	19
3.2.5 Řídící obvod.....	20
3.2.6 Napájecí zdroj.....	20
3.2.7 Propojovací deska.....	20
4 Konstrukce funkčních modulů.....	21
4.1 Stanovení řídicích signálů.....	21
4.2 Výběr součástek a návrh schémat.....	22
4.2.1 Propojovací deska.....	22
4.2.2 Vstupní dělič.....	23
4.2.3 Zdroj referenčního napětí.....	26
4.2.4 Řídící obvod.....	27
4.2.5 Napájecí zdroj.....	28
4.2.6 Displej.....	29
4.2.7 Integrátor.....	31
5 Oživení a kalibrace obvodu.....	33
5.1 Oživení základních částí.....	34
5.2 Oživení řídicího obvodu a displeje.....	34
5.3 Oživení vstupního děliče.....	36
5.4 Oživení zdroje referenčního napětí.....	37
5.5 Oživení integrátoru.....	37
6 Vývoj řídicího programu.....	41
7 Zhodnocení výsledků.....	44
7.1 Konfrontace požadavků a dosažených výsledků.....	44
7.2 Návrh budoucích rozšíření obvodu.....	45
Seznam užitá literatury.....	46
Přílohy.....	47
A Osazovací schémata desek plošných spojů.....	48

1 Úvod

Tato práce si klade za cíl vytvoření výukové pomůcky, jež nalezne použitelnost v co nejširším spektru odborných předmětů¹ vyučovaných na střední odborné škole elektrotechnického zaměření. Měla by umožnit studentům rozvíjet své znalosti návrhu, osazení a oživení desky plošného spoje, programování, ale zároveň může sloužit i jako funkční měřicí přístroj.

Po zvážení několika alternativ byl zvolen návrh a konstrukce analogově-digitálního (dále jen A/D) převodníku řízeného jednočipovým mikropočítačem (příklady aplikace jsou uvedeny v [1]), jehož základní verze umožní měřit proud a napětí se zobrazením hodnoty na čtyř a půl místném displeji. Studenti jej tedy budou moci využívat jako měřicí přístroj, ale zároveň budou moci rozšiřovat jeho možnosti o měření dalších veličin či komunikaci s osobním počítačem, na čemž si procvičí návrh elektronických obvodů i programování jak jednočipového mikropočítače pomocí assembleru, tak uživatelského rozhraní osobního počítače ve vyšším programovacím jazyce.

Aby byla zaručena co nejvyšší efektivita výsledného produktu, je zapotřebí ještě před započítáním návrhu stanovit jednoznačné cíle a požadavky projektu a po celou dobu realizace dbát na jejich důsledné plnění.

1.1 Požadavky projektu

Jednoduchost

Navržený obvod by měl být co nejjednodušší pro snadné pochopení principu činnosti jednotlivých bloků tak, aby studenti byli schopni podle dokumentace vyrobit kopii zařízení, kterou lze s pomocí běžně dostupných diagnostických přístrojů oživit a zkalibrovat.

Důkladná dokumentace

K zařízení musí být k dispozici schéma zapojení, návrhy plošných spojů a zdrojový kód programu mikrokontroléru. Tento požadavek je v daném případě velmi snadné splnit, neboť výše uvedené dokumenty lze nalézt právě v této publikaci. Aby byl text srozumitelný i pro středoškolské studenty, je nutno přihlídnout k úrovni jejich znalostí a v některých případech rozebrat problematiku zevrubněji.

Cenová dostupnost

Při výběru součástek užitých k realizaci obvodu je vždy nutno hledat nejlevnější variantu, vždy však tak, aby její cena nebyla vykompenzována nežádoucími vlastnostmi, jež by ohrozily stabilitu a životnost zařízení, nebo neúměrně zvyšovaly složitost zapojení.

Modularita

Obvod není žádoucí realizovat jako jeden všeobsahující blok, ale naopak je třeba jej racionálně rozdělit na více funkčních bloků s jasně definovanými vstupními a výstupními signály. Díky tomu bude možné provádět jednoduché úpravy převodníku

1 Podle dosud platných učebních osnov oboru 26-47-M/002 Elektronické počítačové systémy se jedná o předměty elektrotechnická měření ve třetím a čtvrtém ročníku, elektronické počítače ve třetím ročníku, praxe ve všech ročnících a programové vybavení ve třetím a čtvrtém ročníku.

bez nutnosti opětovného nákupu všech užitých součástek, nebo jejich recyklace ze stávajících plošných spojů. Navíc zde bude možnost rozdělit vývojové úkoly mezi více pracovních týmů.

Možnost komunikace s osobním počítačem

Řídící jednočipový mikropočítač musí být vybaven obvodem pro komunikace s počítači kompatibilními se standardem PC, tedy sériovým kanálem, nebo lépe modernějším kanálem USB, k porozumění komunikačních principů může sloužit např. [2]. Dále je nutno při konstrukci jednotlivých modulů brát v potaz skutečnost, že některé signály, přestože pro činnost řídicí jednotky nemají význam, je nutno do řídicí jednotky zavést, aby je mohla dále předat osobnímu počítači. Pro tvorbu uživatelského rozhraní by měl být využit programovací jazyk C# popsany v [3]

Nízká spotřeba, hmotnost a malé rozměry

Požadavek na nízkou spotřebu není vyvolán stále se zvyšujícími cenami elektrické energie, ale je rozhodující pro dimenzování napájecího zdroje, nebo dokonce možnost napájení obvodu z akumulátorů či baterií. Při bateriovém napájení by připadala v úvahu mobilita zařízení, jež se pak automaticky stává pádným důvodem pro dosažení co nejmenší hmotnosti a rozměrů celého systému. Z toho důvodu se při výběru součástek stane vážným kritériem i jejich spotřeba. Při návrhu je vhodné vycházet z již vyzkoušených zapojení. Praktické příklady lze nalézt v [4].

2 Rozbor problematiky A/D převodu

A/D převodníky, označované též jako ADC, představují zařízení umožňující číslicové zpracování spojitého analogového signálu. Využití naleznou při digitalizaci zvuku v počítačích, telefonech, nebo nahrávacích studiích; digitalizaci obrazového signálu; nebo třeba v digitálních měřicích přístrojích a řadě dalších aplikací.

Jejich funkce spočívá ve vyjádření okamžité úrovně (zpravidla napětí) vstupního signálu pomocí binárního datového slova. V souvislosti s touto činností se užívá řada termínů, jejichž význam bude dále vysvětlen.

2.1 Základní pojmy

Vzorkování je děj, při němž se v pravidelných časových intervalech zjišťuje okamžitá hodnota vstupního signálu, jež bude následně převáděna do digitální podoby. Počet vzorkování za sekundu vyjadřuje vzorkovací kmitočet. Příliš vysoký kmitočet znamená velký počet datových vzorků a klade tedy vysoké požadavky na kapacitu paměti pro uchování vzorků a též na rychlost převodníku; nízký kmitočet naopak znamená zkrácení průběhu, pak lze hovořit o **chybě vzorkování**.

Pro optimální stanovení vzorkovacího kmitočtu je vhodné vycházet ze Shannon-Kotelnikova teorému, uvedeného např. v [5], podle něhož by vzorkovací kmitočet měl být minimálně dvojnásobkem frekvence nejvyšší harmonické v signálu obsažené. Velmi dobrým příkladem může být audio CD, na němž je uložena zvuková stopa ovzorkovaná kmitočtem 44,1 kHz, jelikož lidský sluch dokáže u některých jedinců vnímat zvuky o kmitočtu až 20 kHz.

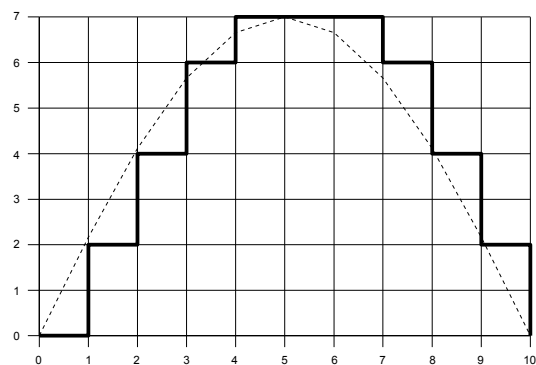
Kvantování označuje proces převodu vzorku na binární kód. Počet bitů výstupního slova (rozlišení) ukazuje na citlivost převodníku, neboť pro n -bitový převodník existuje právě 2^n rozlišitelných hodnot (kvantizačních úrovní) v intervalu minimální a maximální úrovně vstupního signálu. Čím vyšší počet bitů, tím nižší je **kvantovací krok**, tedy rozdíl mezi dvěma po sobě jdoucími úrovněmi. Rozdíl mezi skutečnou hodnotou vstupního signálu a kvantizační úrovní se nazývá **chyba kvantování**. Ta vyjádřená v absolutní hodnotě může nabývat maximálně poloviny kvantovacího kroku. Posloupnost jednotlivých chyb kvantování tvoří **kvantizační šum**², jehož velikost udávaná v decibelech vyjadřuje poměr užitečného signálu a šumu.

Doba převodu vyjadřuje čas uplynulý od přivedení signálu na vstup převodníku po vystavení binárního kódu na výstup. Nízká doba převodu znamená možnost provést více kvantování za časovou jednotku a je žádoucí například u digitálních osciloskopů pro zobrazení jednorázových dějů krátkého trvání. U dějů periodických lze odebrat postupně vzorky z několika period a doba převodu tedy může být delší.

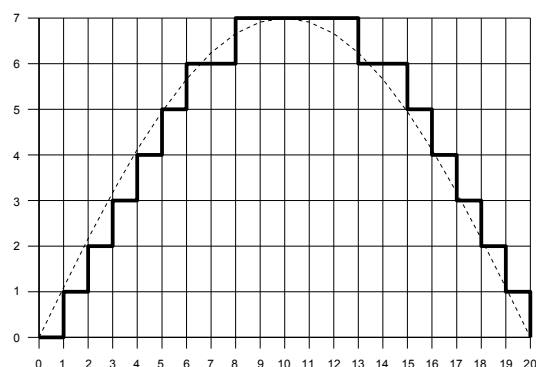
Příklad digitalizace kladné půlvlny harmonického signálu je znázorněn na obrázcích 1 a 2. Na vodorovné ose je zaneseno pořadové číslo vzorku, na svislé ose pak pořadové číslo kvantizační úrovně. Obrázek 1 zobrazuje vliv počtu odebraných vzorků a tedy doby převodu na tvar digitalizovaného průběhu, obrázek 2 se zabývá vlivem počtu kvantizačních úrovní a tedy počtem bitů převodníku na výsledný průběh.

2 Jelikož jsou zde rovnoměrně zastoupeny všechny frekvenční složky se stejnou amplitudou, je tento šum v analogii se světelným zářením nazýván bílý šum.

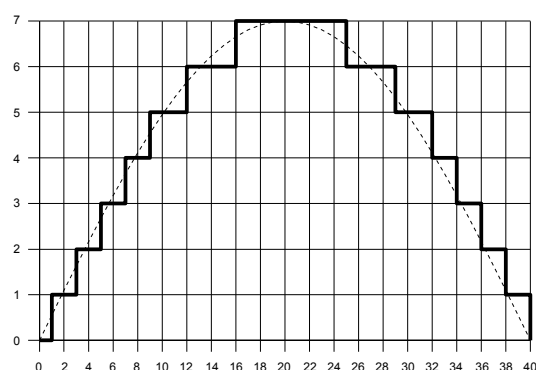
Z obrázku 1 a 2 je jasné patrné, že pro časově proměnné signály záleží jak na počtu kvantizačních bitů tak na počtu odebraných vzorků za časovou jednotku. U signálů konstantních, či měnících se pozvolna, už doba převodu nehraje podstatnou roli a záleží pouze na počtu kvantizačních bitů, od něhož se odvíjí **rozdílení převodníku** někdy vyjadřované přímo počtem kvantizačních bitů, častěji procentuálně jako procentní část jednoho kvantizačního kroku z maximální vyjádřitelné hodnoty.



a

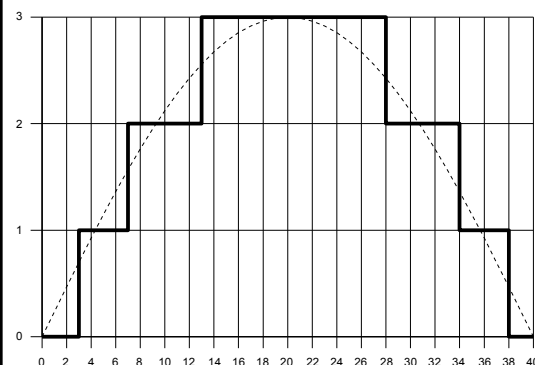


b

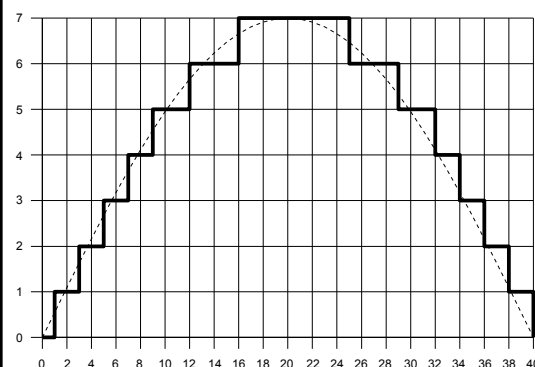


c

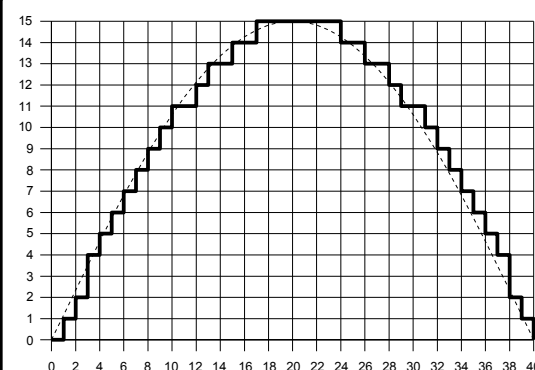
Obrázek 1. Vliv frekvence vzorkování na kvalitu průběhu pro 3 kvantizační bity: a) 10 vzorků, b) 20 vzorků, c) 40 vzorků



a



b



c

Obrázek 2. Vliv počtu kvantizačních bitů na kvalitu průběhu pro 40 vzorků: a) 2 bity, b) 3 bity, c) 4 bity

2.2 Typy A/D převodníků

Existuje několik principů technologie převodu velikosti napětí analogového signálu na binární kód. Jednotlivé typy se liší dobou převodu, maximálním dosažitelným počtem kvantizačních bitů, i svou přesností a samozřejmě pořizovacími náklady. Proto je vždy nutno pečlivě zvážit veškeré požadavky a zvolit mezi nimi nejvhodnější kompromis.

V dalším textu budou rozebrány čtyři nejčastěji používané. Na doprovodných obrázcích je symbolem U_R značen vstup referenčního napětí, U_X označuje vstupní analogový signál. U výstupního signálu se pro snazší orientaci často označují i nejvyšší a nejnižší bit jako MSB (z angl. most significant bit) a LSB (z angl. least significant bit).

2.2.1 Paralelní převodníky

Paralelní, nebo též flash převodník, nalezne využití v aplikacích s vysokým nárokem na krátkou dobu převodu, celý převod se zde totiž odehrává v jediném kroku. Daní za rychlost je ale vysoký počet užitých součástek. Princip činnosti totiž spočívá v rozdělení referenčního napětí na tolik úrovní se stejným odstupem, kolik kvantizačních úrovní má převodník rozlišit. Každá tato úroveň je pak v samostatném napěťovém komparátoru porovnávána se vstupním signálem a úroveň nejbližší velikosti měřeného signálu je pomocí prioritního kodéru vyjádřena binárním slovem a přivedena na výstup.

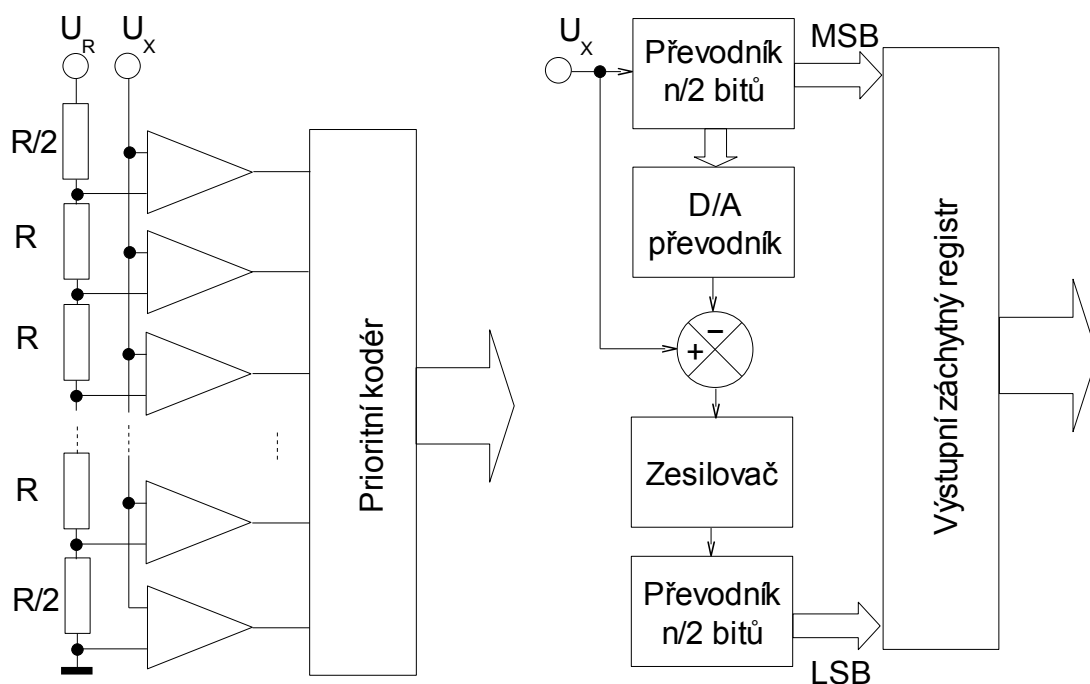
Uvedený princip vyžaduje, aby obvod s n -bitovým výstupním slovem obsahoval $2^n - 1$ napěťových komparátorů. Z toho důvodu nelze paralelní převodníky realizovat pro vícebitová výstupní slova, neboť již pro v praxi často užívané 16b vyjádření výstupního slova je zapotřebí 65535 napěťových komparátorů, existuje ovšem řešení v podobě dvoustupňových, tzv. half-flash převodníků.

Zde se nejprve vstupní signál zdigitalizuje opět paralelním převodníkem, ale polovičním počtem bitů než kolik má obsahovat výstupní slovo. Poté je hodnota vyjádřená výstupem od vstupního signálu odečtena a vzniklý rozdílový signál se zesílí. Aby mohly být užity dva shodné bloky paralelního převodníku s počtem kvantizačních bitů $n/2$, musí být koeficient zesílení roven právě $2^{n/2}$. Pak má rozdílový signál velikost kvantizačními úrovněmi srovnatelnou s původním signálem. Díky tomu se výsledný počet komparátorů n -bitového převodníku rovná pouze $2^{n/2+1}$. Části výstupního slova získané během prvního a druhého převodu se spojí ve výsledný kód ve výstupním záchytném registru.

Při využití vhodné řídicí logiky a rychlých prepínačů by bylo možné užít k převodu původního i rozdílového signálu týž blok, čímž by se nutný počet komparátorů snížil na $2^{n/2}$.

I přes nezanedbatelnou úsporu součástek vzrůstá u half-flash převodníků doba převodu a navíc je zapotřebí užít digitálně-analogový (dále D/A) převodník a zesilovač, jejichž nepřesnost zvyšuje chybu kvantování.

Doba převodu paralelních převodníků je dána spínacími dobami komparátorů. Podle [6] se v současnosti tato doba pohybuje v řádu jednotek až desítek nanosekund a počet kvantizačních bitů jednostupňového převodníku je maximálně deset.



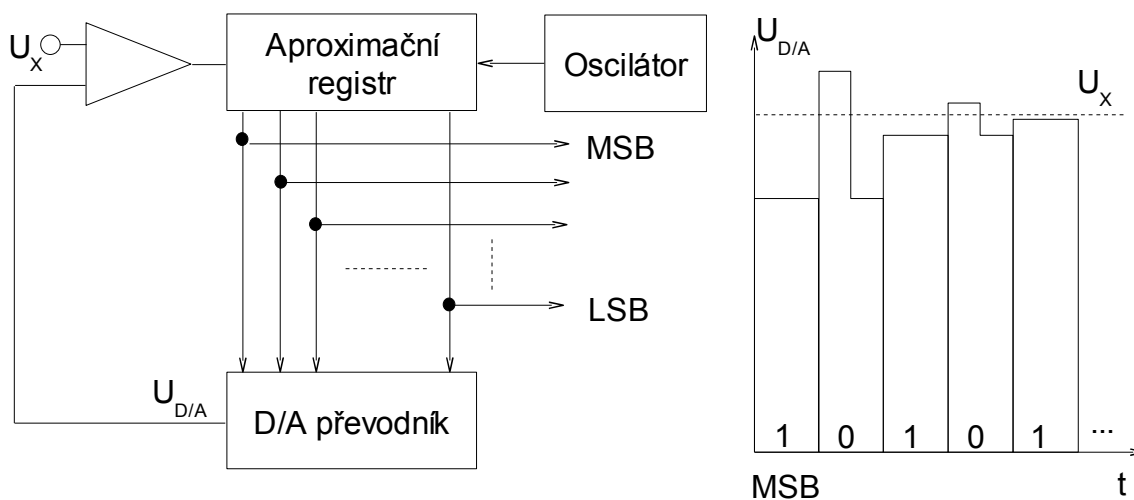
Obrázek 3. Principiální schéma paralelního převodníku. Obrázek 4. Blokové schéma half-flash převodníku.

2.2.2 Aproximační převodníky

Mezi aproximační převodníky se řadí převodník s postupnou aproximací, který v několika krocích postupně zpřesňuje binární vyjádření hodnoty vstupního signálu. Na počátku převodu je vynulován obsah aproximačního registru a proces pokračuje nastavením MSB na úroveň „1“. Obsah aproximačního registru se nyní pomocí D/A převodníku zkonvertuje na napěťovou úroveň, jež se porovnává se vstupním signálem. Pokud je hodnota napětí vstupního signálu vyšší než velikost napětí na výstupu D/A převodníku, bit zůstane nastaven v úrovni „1“, v opačném případě je bit nastaven na úroveň „0“. V dalším taktu se pokračuje bitem na sousedící nižší pozici a opakuje se stejný postup, dokud není stanovena úroveň LSB.

Doba převodu je zde podle [6] o tři řády vyšší než u paralelního převodníku, tedy desítky mikrosekund a je přímo úměrná počtu kvantizačních bitů, jichž bývá až 16. Po celou dobu převodu musí být úroveň vstupního signálu konstantní, k čemuž se využívá vzorkovacího zesilovače (Sample/Hold). Tím ovšem tento typ ztrácí odolnost proti sériovému rušení³. Na chybě kvantování se zde do značné míry podílí i chyby D/A převodníku ve zpětnovazební větvi obvodu.

3 Vlivem elektromagnetické indukce mezi vodiči se na signál mohou superponovat další složky. Nejčastější a patrně nejsilnější zdroj rušení představují vodiče rozvodné soustavy a rušivé složky tedy mají kmitočet 50 Hz. Tomu odpovídá perioda 20 ms. Pokud je doba převodu celistvým násobkem doby periody a převodník při zpracování vstupní signál integruje, je vliv rušivé složky nulový, neboť hodnota integrálu přes dobu periody je pro střídavý průběh bez stejnosměrné složky vždy rovna nule.

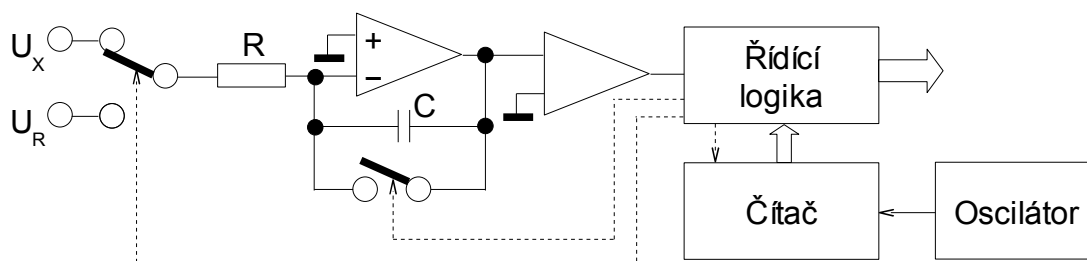


Obrázek 5. Blokové schéma převodníku s postupnou aproximací a časový průběh napětí na výstupu D/A převodníku

2.2.3 Integrační převodníky

Integrační převodníky jsou konstruovány s jednou, nebo vícenásobnou integrací. V praxi se nejčastěji užívá převodníků s dvojitou integrací, které nejprve integrují vstupní napětí po dobu, během níž vestavěný čítač dojde od nulové hodnoty k maximální. Poté se na vstup integrátoru přivede referenční napětí opačné polarity než napětí vstupní. Opět je spuštěn čítač a k jeho zastavení dojde až při průchodu napětí na výstupu integrátoru nulovou úrovní. Poměr aktuálního stavu čítače ku maximální hodnotě vyjadřuje poměr hodnot neznámého napětí ku referenčnímu. pomocí řídicí logiky je vypočtena hodnota výstupního slova a proces je možné opakovat. Nulování výstupu integrátoru se provádí pomocí spínače připojeného paralelně ke kondenzátoru ve zpětné vazbě integrátoru.

Doba převodu u tohoto typu se pohybuje v řádu desítek až stovek milisekund, pro vícebitové převodníky může být i delší, avšak je kompenzována vysokým rozlišením (až 27 kvantizačních bitů) a vysokou přesností způsobenou zdvojením integrace, díky němuž se vzájemně vyruší některé chyby obvodových prvků a navíc je dosaženo odolnosti proti sériovému rušení.



Obrázek 6. Zjednodušené principiální schéma A/D převodníku s dvojitou integrací

2.2.4 Převodníky sigma-delta

Tyto převodníky jsou založeny na sigma-delta (Σ - Δ) modulaci, kdy je analogový signál kvantován s vysokým kmitočtem, avšak pouze jedním bitem, a tvarování šumu. Binární výstup se pak vytváří v číslicovém decimálním filtru.

Tyto převodníky se vyznačují vysokým rozlišením (až 24 kvantizačních bitů) a dobou převodu srovnatelnou, či o řád vyšší oproti aproximačním převodníkům.

2.3 Souhrn vlastností A/D převodníků

Jelikož při návrhu konkrétního zařízení většinou největší roli hraje rozlišení převodníku a doba převodu, jsou v tabulce 1 uvedeny právě tyto dva parametry pro možnost vzájemného porovnání jednotlivých typů převodníků.

Tabulka 1. Porovnání parametrů současných A/D převodníků, převzato z [7]

Typ převodníku	Rozlišení [bit]	Doba převodu [s]
Paralelní	6...10	10^{-9} ... 10^{-7}
Aproximační	8...16	10^{-6} ... 10^{-4}
Integrační	10...27	10^{-3} ... 10^1
Sigma-delta	16...24	10^{-5} ... 10^{-1}

3 Návrh zařízení

Z typů převodníků uvedených v předchozí kapitole je nyní nutno vybrat nejvhodnější model k realizaci. Při výběru musí být zohledněny všechny cíle projektu zmíněné v úvodní kapitole, tedy především skutečnost, že se jedná o výukovou pomůcku a tudíž ne všechny principy činnosti obvodu musí odpovídat standardům používaným při sériové výrobě digitálních měřicích přístrojů.

Kupříkladu v současnosti se velmi často v měřicí technice užívá převodníků sigma-delta, avšak principy jeho fungování nejsou pochopitelné pro studenty středních škol a tudíž by nemohl být studenty dále plnohodnotně rozvíjen.

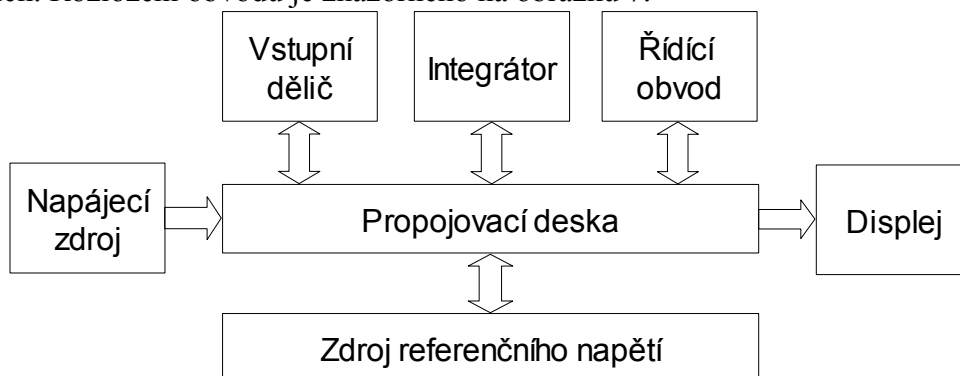
Dalším nepoužitelným typem je paralelní převodník, jehož jádrem je vysoký počet napěťových komparátorů a tudíž jeho výroba z diskretních součástek je prakticky nemožná, navíc neobsahuje žádnou řídicí logiku a tedy rovněž nemůže sloužit k procvičování programování jednočipového mikropočítače, ani dalších stanovených cílů.

Převodník s postupnou aproximací splňuje požadavek na jednoduchost a ve funkci aproximačního registru by bezesporu našel vhodné uplatnění jednočipový mikropočítač. Díky těmto okolnostem je možné převodník s postupnou aproximací zařadit do užšího výběru.

Zbývá ještě zvážit vlastnosti převodníku s dvojitou integrací. I zde je princip činnosti snadno pochopitelný a blok řídicí logiky nabízí vhodné využití jednočipového mikropočítače, je tedy nutno volit mezi převodníkem aproximačním a integračním. Jelikož výsledný obvod má sloužit jako voltmetr a ampermetr, není nutná příliš nízká doba převodu, ale oproti tomu je žádoucí co nejvyšší rozlišení, přesnost a odolnost proti sériovému rušení, jimiž disponuje převodník s dvojitou integrací. Zařízení tedy bude využívat principů integračního převodníku s dvojitou integrací.

3.1 Blokové schéma obvodu

Jedním z požadavků na zařízení byla i jeho modularita a proto je nyní nutno rozdělit obvod na několik samostatných modulů a jednoznačně definovat standardy umožňující jejich vzájemné propojení. Při tomto dělení je vždy nejdůležitější snaha rozdělit obvod na části pokud možno stejné složitosti a tak, aby se minimalizoval počet vodičů zprostředkávajících komunikaci mezi jednotlivými moduly. Celek se tak rozštěpí na sedm dílů, z nichž jeden – propojovací deska – zajišťuje spolupráci ostatních. Rozložení obvodu je znázorněno na obrázku 7.



Obrázek 7. Blokové schéma realizovaného obvodu

Pro pojmenování signálů vedoucích mezi jednotlivými funkčními bloky bude využito výrazů z angličtiny. Užití českých výrazů se jeví nevhodné vzhledem k nemožnosti zpracování diakritických znamének některými softwarovými nástroji a vypuštěním diakritiky mohou vzniknout výrazy nejednoznačné, jejichž různá interpretace by ohrozila řešení úkolu širším týmem realizátorů.

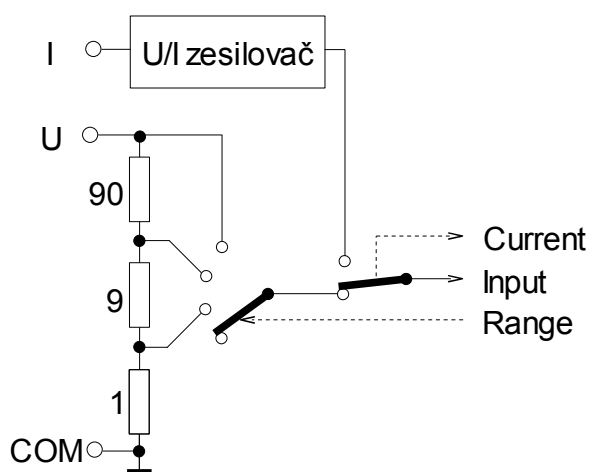
3.2 Rozbor činnosti jednotlivých bloků

3.2.1 Vstupní dělič

Převodník samotný je konstruován pouze pro jeden rozsah hodnot vstupního napětí, který je víceméně určen typem logiky použitých součástek. Tím by ovšem bylo znemožněno měření napětí vyšších úrovní a pro napětí nižších řádu by nebyly využity nejvyšší kvantizační bity a převodník by ztrácel na přesnosti. Z toho důvodu je vhodné zařadit do obvodu přepínač rozsahů, který umožní přizpůsobit řád vstupní úrovně řádu převodníku. Navíc byla v požadavcích na zařízení uvedena možnost měření proudu a tudíž musí vstupní obvod obsahovat i převodník proudu na napětí.

Přepínání rozsahů se obvykle realizuje pomocí odporového děliče napětí, ten zároveň vytvoří patřičný vnitřní odpor přístroje. V případě voltmetru je hodnota vnitřního odporu žádoucí co nejvyšší, aby přístroj co nejméně zatěžoval měřený obvod. Faktorem limitujícím maximální velikost odporu rezistorů děliče je pouze proud potřebný pro činnost dalších obvodů přístroje. U digitálních přístrojů, kde se předpokládá využití operačních zesilovačů, jejichž vstupní proud se pohybuje maximálně v řádu nanoampér, je obvykle odpor vstupního děliče větší než 1 M Ω .

Převodník proudu na napětí musí mít naopak vnitřní odpor co nejmenší, aby sám ampérmetr neomezoval průchod proudu měřeným obvodem. S výhodou se zde využívá operačního zesilovače v zapojení I/U zesilovač, který má lineární závislost mezi výstupním napětím a proudem tekoucím obvodem, přičemž vstupní odpor tohoto zapojení je prakticky nulový. Měřicí rozsah byl zvolen 200 mA.



Obrázek 8. Principiální schéma vstupního děliče

Výběr měřené veličiny bude prováděn pomocí manuálního přepínače, o jehož stavu zároveň musí být informována řídicí jednotka, přepínač napětíových úrovní pak bude ovládán automaticky podle velikosti přivedeného napětí. Jedna poloha tohoto přepínače zůstává nezapojena a bude využita v situacích, kdy vstupní napětí překročí měřitelný rozsah a mohlo by poškodit některé součástky obvodu.

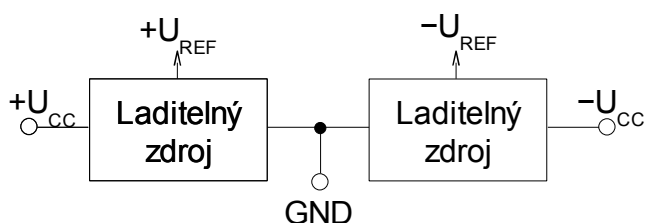
Vstupní svorky jsou značeny v souladu s obvyklým standardem, kdy značení COM znamená společnou svorku, U svorku pro měření napětí a I svorku pro měření proudu.

Navržený napěťový dělič umožňuje měření vstupních napětí tří různých úrovní. Při dodržení dělicího poměru 90:9:1 to může být přímo napětí připojené na svorku U , nebo jeho desetina, či setina. Pro čtyř a půl místný displej se tedy jako nejvhodnější rozsahy jeví 20 V, 2 V a 200 mV, přičemž přepínač musí zajistit, aby právě 200 mV byla maximální hodnota výstupního signálu pro další zpracování.

Výstupem modulu je analogový signál Input a digitální signál Current nesoucí informaci pro řídicí jednotku, je-li měřeno napětí, nebo proud. Řídicí obvod naopak musí ovládat přepínač rozsahů vstupem Range. Jelikož má přepínač rozsahů čtyři polohy, musí být vstup Range reprezentován minimálně dvěma bity, jejichž stavy mohou nabývat právě čtyř různých kombinací.

3.2.2 Zdroj referenčního napětí

Jelikož referenční napětí musí být opačné polarity oproti napětí měřenému, musí referenční zdroj dodávat napětí obou polarit. Velikost referenčního napětí lze jednoduše stanovit z maximální úrovně napětí dodávaného vstupním děličem, tedy 200 mV.

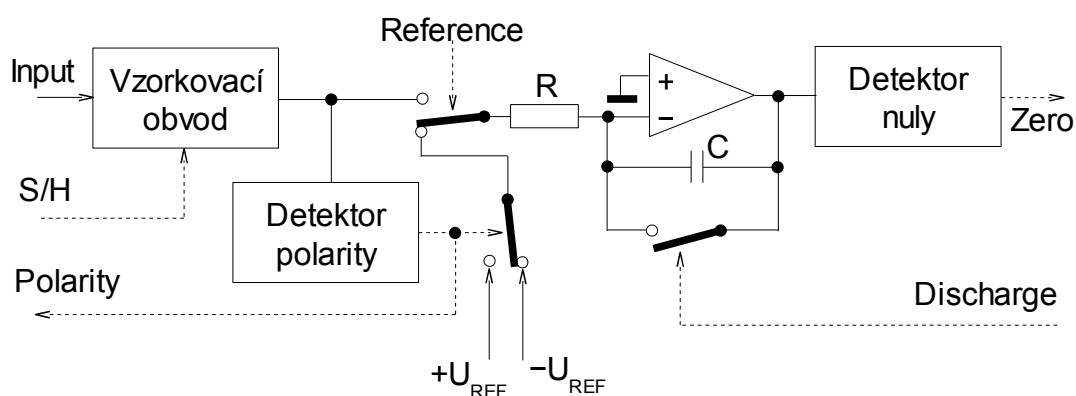


Obrázek 9. Blokové schéma zdroje referenčního napětí

K realizaci je vhodné využít některý ze sériově vyráběných monolytických referenčních zdrojů s proměnným výstupním napětím. Modul pak musí vykazovat co největší přesnost výstupního napětí a stabilitu jak časovou, tak teplotní. K činnosti modulu není zapotřebí žádného řídicího signálu.

3.2.3 Integrátor

Modul označený jako integrátor musí kromě integračního zesilovače obsahovat ještě detektor polarity vstupního signálu, který bude ovlivňovat volbu polarity referenčního napětí a dále musí obsahovat komparátor pro detekci dosažení nulového napětí na výstupu integračního zesilovače.



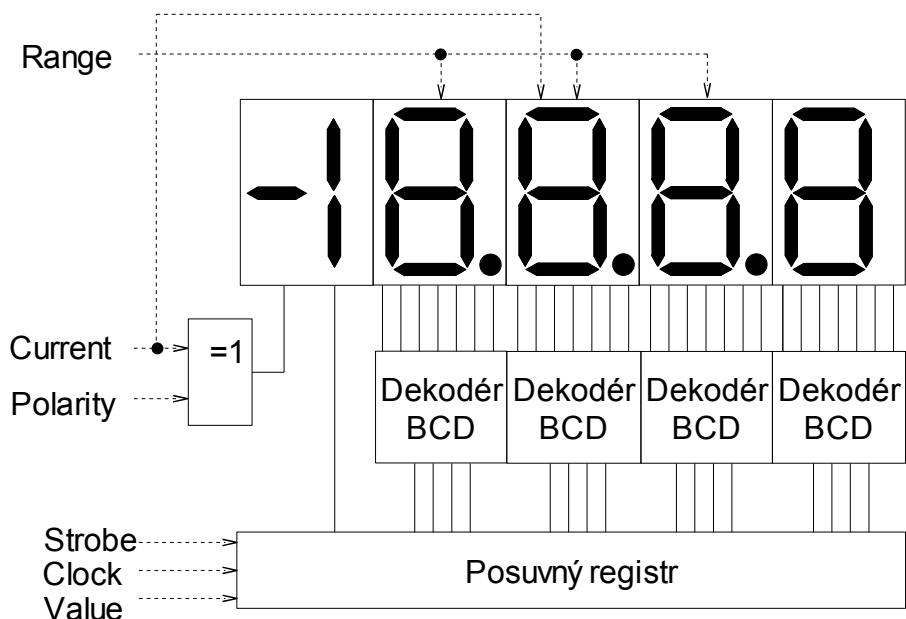
Obrázek 10. Blokové schéma modulu integrátoru

Pro možnost zjištění okamžité hodnoty vstupního signálu je vhodné zařadit ještě před integrační zesilovač vzorkovací obvod. Vzorkovací obvod v režimu Sample funguje jako napěťový sledovač a na jeho výstupu je tedy v každém okamžiku stejná napěťová úroveň jako na vstupu. V tomto režimu se bude obvod nacházet při měření jen pozvolna se měnících napětí a proudů. V režimu Hold se na výstupu vzorkovacího obvodu udržuje napěťová úroveň, jaká byla na vstupu v okamžiku změny řídicího signálu S/H z úrovně Sample na úroveň Hold. Toho bude využíváno k určování okamžité hodnoty měnicího se signálu.

Zdetekovaná polarita měřeného signálu bude využita nejen pro přepínání zdrojů referenčního napětí, ale musí být rovněž přivedena na modul displeje, kde bude ovládat zobrazování znaménka minus. Zároveň musí být o polaritě signálu informována řídicí jednotka, aby mohla tuto informaci předat při komunikaci osobnímu počítači.

3.2.4 Displej

Čtyř a půl místný displej obsahuje celkem třicet segmentů pro zobrazení číslic. Při tak vysokém počtu evidentně nelze řídit každý segment přímo z mikropočítače. Pro co největší úsporu komunikačních portů je vhodné zvolit sériový přenos informace. Hodnota určené k zobrazení se tedy nejprve v kódu BCD uloží do posuvného registru a poté se přivede na vstupy dekodéru kódu BCD na sedmissegmentový zobrazovač



Obrázek 11. Blokové schéma modulu displeje

Jelikož zobrazovač na prvním místě může ukazovat buď číslici jedna, nebo nezobrazuje žádnou číslici, jeví se daleko vhodnější reprezentovat rozsah 2 V jako 2 000 mV, aby desetinná tečka pro napětí nižší než 1 V nesvítla před první číslicí údaje. Patříčná desetinná tečka bude rozsvěcována stejnými signály Range, jaké jsou užity pro přepínání měřících rozsahů. Pro rozsah 200 mV a 200 mA pak desetinnou tečku rozsvěčí nejen volba rozsahu, ale i signál Current detekující přepnutí vstupního obvodu do režimu měření proudu.

Znaménko minus může být ovládáno signálem z detektoru polarity. Nesmíme však zapomínat, že výstup z U/I zesilovače má opačnou polaritu oproti vstupnímu signálu. Proto je zde zařazeno hradlo XOR, které umožňuje řízené negování signálu Polarity v závislosti na stavu signálu Current.

Do posuvného registru se data přenášejí po signálu Value, jehož úrovně jsou potvrzovány pomocí signálu Clock. Aby v průběhu změny hodnot uvnitř posuvného registru neproblikávaly segmenty zobrazovačů, je užít ještě signál Strobe, který vyše data do BCD dekodérů až po naplnění posuvného registru.

3.2.5 Řídící obvod

Řídící obvod je vlastně tvořen pouze jednočipovým mikro počítačem a jeho nejnutnějšími podpůrnými součástkami. Vzhledem k faktu, že ve třetím ročníku se v rámci předmětu elektronické počítače procvičuje programování jednočipových mikro počítačů založených na bázi typu Intel® 8051, musí být i v tomto případě využít některý z mikrokontrolérů této rodiny.

Tyto mikro počítače disponují dvěma vestavěnými šestnáctibitovými čítači využitelnými právě pro integrační metodu A/D převodu a dále jsou vybaveny dvěma osmibitovými vstupně-výstupními branami, což znamená, že celkový počet signálů zpracovávaných, nebo generovaných mikrořadičem může dosahovat až čísla šestnáct.

3.2.6 Napájecí zdroj

Pro co nejjednodušší řešení je jednoznačně zapotřebí, aby počet napájecích napětí všech obvodů byl co nejmenší. Jelikož se v řešení nacházejí obvody analogové i digitální, je nutné najít napájecí úroveň vyhovující oběma skupinám. Jako vhodná úroveň se jeví napájecí napětí 5 V. Kvůli možnosti měření napětí a proudů obou polarit je nutno vytvářet i symetrický protipól, tedy napětí -5 V.

S přihlédnutím k odhadu odběru jednotlivých bloků je nezbytné, aby obě větve napájecího zdroje dokázaly dodat proud alespoň 1 A. Jiné požadavky na napájecí zdroj nejsou a lze tedy využít jak zdroje běžně dostupné na trhu, tak zdroj vlastní konstrukce, samozřejmě při dodržení všech bezpečnostních norem.

3.2.7 Propojovací deska

Tento modul je ze všech nejjednodušší, neboť neobsahuje žádné elektronické součástky, pouze má za úkol správně propojit patřičné piny konektorů jednotlivých modulů. pro možnost budoucího rozšiřování jednotlivých modulů je vhodné vyvést na propojovací desku všechny piny řídicího mikrokontroléru a umožnit jejich snadné připojení na konektory ostatních modulů.

Pro větší přehlednost je vhodné oddělit napájecí sběrnici od signálové. Napájecí napětí bude rozvedeno pomocí tří vodičů s konektorem znemožňujícím záměnu polarity. Tyto konektory ovšem budou zapojeny shodně ve všech modulech. Analogové a digitální signály budou rozvedeny rovněž pomocí shodných konektorů, u nichž lze ovšem jednoduchým způsobem znemožnit připojení konektoru na nesprávnou pozici v propojovací desce. K přivedení referenčních úrovní napětí postačí dvoužilový vodič s konektorem znemožňujícím prepólování.

4 Konstrukce funkčních modulů

4.1 Stanovení řídicích signálů

Z blokových schémat jednotlivých modulů je již možné stanovit počet a význam řídicích bitů a přiřadit očekávané funkci vhodnou logickou úroveň. Vycházet je nutno z předpokladu, že ve výchozím stavu jsou všechny vstupně-výstupní bity řídicího mikropočítače nastaveny do úrovně „1“ a dokud nebudou programově změněny, nesmí umožnit vznik situace nebezpečné pro libovolný blok zařízení.

V návrzích blokových schémat jednotlivých modulů se vyskytly signály Current, Range, Reference, Zero, S/H, Polarity, Discharge, Value, Clock a Strobe, které rozhodně mají vliv na činnost řídicího mikropočítače, nebo jsou jím přímo generovány. Z toho signál Range musí být reprezentován minimálně dvěma vodiči při užití dekodérů 1 ze 4, nebo třemi vodiči bez užití dekodéru. Dále je nezbytné přičíst dva piny TxD a RxD pro budoucí sériovou komunikaci. Řídicí mikroprocesor tedy musí mít dostatečný počet vstupů a výstupů, aby všechny výše uvedené signály pokryl.

V návrhu se předpokládá, že mikroprocesor obdrží informace o dosažení nulové úrovně pomocí signálu Zero a podle úrovně signálu Polarity pak dále usoudí na polaritu měřeného signálu. Je však třeba si uvědomit, že detekce nuly musí být provedena pomocí dvou obvodů a to jednak jako detekce dosažení nuly z kladného napětí a pak jako detekce dosažení nuly ze záporného napětí.

To znamená buď přidat do modulu integrátoru další přepínač ovlivňovaný signálem Polarity, na jehož výstupu se bude nacházet výstupní úroveň jednoho z komparátorů, nebo přivést do řídicího mikroprocesoru výstupy obou komparátorů a na základě toho, který z nich bude detekovat dosažení nuly, rozhodnout o polaritě měřeného signálu. Počet signálů vstupujících do mikroprocesoru tak zůstane nezměněn.

Vzhledem k tomu, že mikroprocesory rodiny 8051 obsahují dva vstupy vnějšího přerušení reagující na nízkou úroveň, nebo sestupnou hranu signálu, bude vhodné oba výstupy komparátorů přivést právě na tyto přerušovací vstupy. Tím bude zajištěno, aby řídicí obvod zareagoval okamžitě na dosažení nulové úrovně na jednom z komparátorů. Tyto signály budou dále označovány jako Up a Down podle směru dosažení nuly.

Jelikož dekodéru signálu Range by bylo nutno využít jak ve vstupním děliči, tak v modulu dipleje, bude zřejmě výhodnější zakódovat signál Range přímo do tří bitů, čímž bude uspořena energie na provoz dekodérů za cenu jediného bitu navíc. Celkový součet pak dává čtrnáct využitých bitů, což znamená možnost využití zjednodušené varianty mikroprocesoru AT89C2051 disponující patnácti vstupně-výstupními bity.

Signál Range tedy bude rozdělen na signály Lo, Mid a Hi označující jednotlivé rozsahy. Ve vstupním děliči pak bude zapotřebí rozdělit původní čtyřpolohový přepínač na tři nezávislé spínače, které při zapnutí napájení obvodu musí zůstat nesepnuty, což znamená, že zmíněné tři signály budou aktivní v nízké úrovni.

O významu logických úrovní ostatních signálů bude lépe rozhodnout až při konkrétním návrhu zapojení v závislosti na tom, které řešení bude úspornější jak z hlediska součástek, tak spotřeby elektrické energie.

K návrhu schémat a desek plošných spojů bude využit program EAGLE® 4.16 r2, jehož volně šiřitelná verze umožňuje návrh desek plošných spojů do maximálních rozměrů 100×80 milimetrů.

4.2 Výběr součástek a návrh schémat

Při výběru elektronických součástek užitých k realizaci obvodů je nezbytné spolupracovat současně s nabídkovými katalogy dodavatelů a konstrukčními katalogy výrobců. V prvních lze vyhledat dostupnost součástky na trhu a především její cenu, druhý pak nabízí přehled nejdůležitějších technických parametrů a příklady zapojení. Mnohé katalogové listy součástek jsou k dispozici na síti Internet. Zdrojů je nepřeberné množství a při realizaci této práce byly využity archivy [8].

Rozhodování mezi více součástkami s podobnou funkcí je pro tento měřicí převodník téměř vždy pouze hledáním kompromisu mezi spotřebou součástky a její cenou, aby zůstaly prvotní požadavky na nízkou spotřebu a finanční dostupnost zařízení pokud možno v rovnováze.

V některých případech je vhodné návrh přizpůsobit k využití součástek, či celých zapojení, jež je možné jednoduše opatřit vyjmutím z různých vyřazených zařízení. V tomto konkrétním případě se jedná o využití odporových trimrů a displeje pětimístného čítače z nefunkčního CNC obráběcího stroje.

4.2.1 Propojovací deska

I přesto, že je propojovací deska nejjednodušší částí celku, k jejímu návrhu je lépe přistoupit co nejdříve, neboť je jediným prvkem stýkajícím se se všemi ostatními a vhodný výběr konektorů a rozmístění signálů na jejich pinech může zjednodušit konstrukci ostatních modulů.

K realizaci napájecí sběrnice byly zvoleny třípinové konektory Molex, které jsou užívány například v osobních počítačích k propojení ventilátorů se základní deskou. Jejich konstrukce nedovoluje přepólování a okolnost, že jsou užívány k napájení ventilátorů, zaručuje, že umožní průchod potřebného proudu a jejich přechodový odpor nezpůsobí velké úbytky napětí na styčných plochách.

Podobný, avšak pouze dvoupinový konektor Molex pak bude sloužit pro přivedení referenčních napětí ze zdroje referenčního napětí k propojovací desce. I v tomto případě je znemožněno přepólování konektoru.

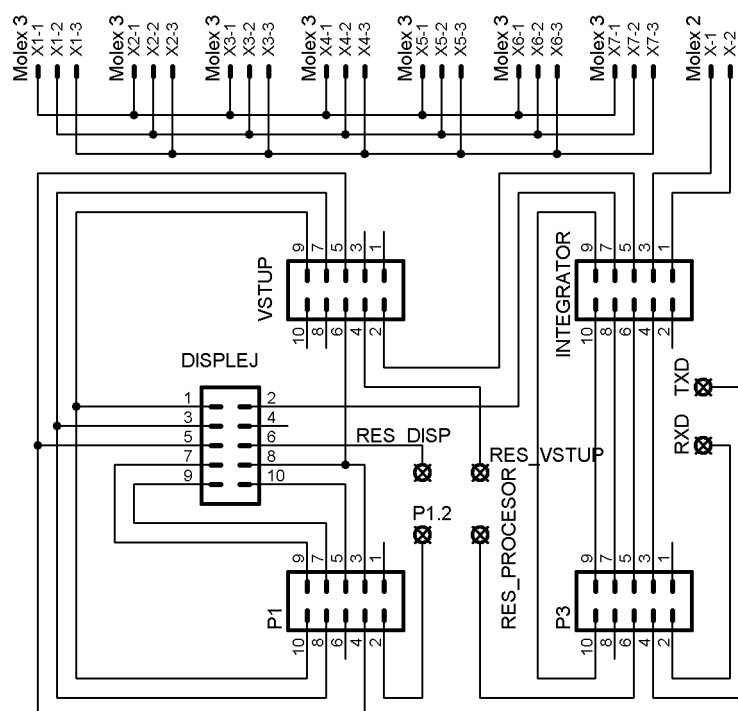
Pro přenos signálů lze opět využít součástky užívané při konstrukci osobních počítačů, tedy samořezné konektory na plochý kabel užívaný k připojení např. disketových mechanik. Nejvíce signálů vede mezi propojovací deskou a integrátorem. Jejich počet je devět a jako postačující se tedy jeví konektor PFL 10, jenž disponuje dvěma řadami po pěti pinech.

Konektor sice obsahuje zámek znemožňující jeho otočení, ovšem neobsahuje žádnou ochranu proti zasunutí konektoru do nesprávné zásuvky. Mají-li tedy být všechny signály vedeny právě konektory PFL 10, je nutno provést úpravy, které nesprávnému užití konektoru zabrání. Nejjednodušší úpravou je odebrání jednoho pinu z konektoru a zaslepení odpovídající pozice v protikusku. Pokud bude pro každý modul užit jako klíčový jiný pin, stanou se konektory vzájemně nezáměnnými.

Rozmístění konektorů na desce musí být provedeno s ohledem na počty signálů, jimiž spolu jednotlivé moduly komunikují a rovněž tak, aby jednotlivé moduly desku pokud možno rovnoměrně obklopovaly a nevznikaly nepřehledné propletence propojovacích sběrnic.

Rozmístění signálů uvnitř konektoru závisí v této fázi pouze na nutnosti dodržovat v každém z konektorů klíčovací pozici a vhodně navrhnut propoje tam, kde jeden signál sdílí více než dva moduly. V případě propojení modulu integrátoru a brány mikroprocesoru není rozmístění signálů momentálně vůbec důležité a stačí dodržet pouze počet spojů. Až při návrhu desky plošného spoje modulu integrátoru budou jednotlivým pinům přiřazeny signály podle potřeby.

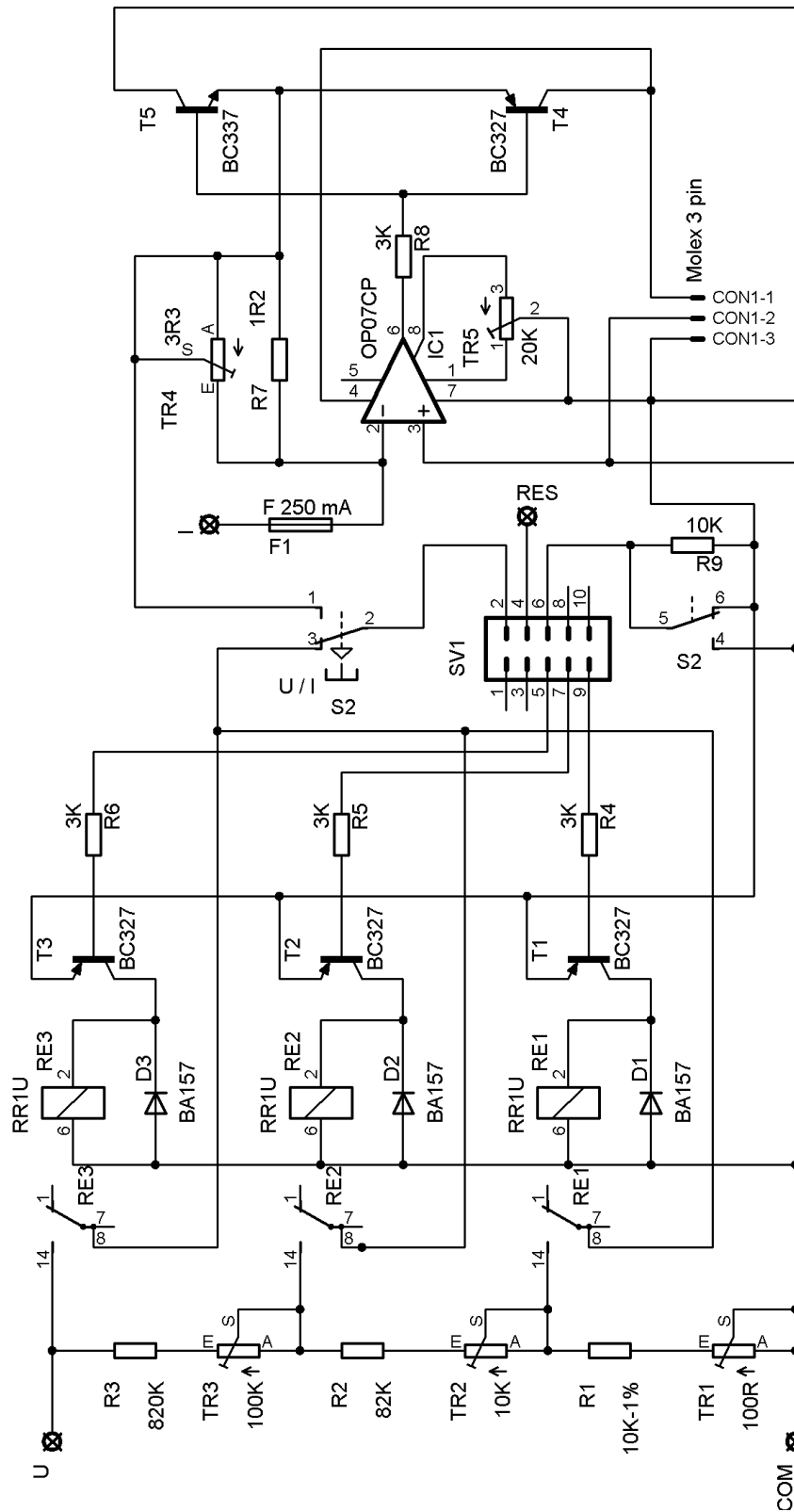
U modulů, kde je předpoklad budoucího rozšiřování, je zapotřebí vyvést na propojovací desku ještě rezervní piny a umístit je tak, aby umožnily jednoduchým způsobem přiřadit k modulu další signál. Dále jsou na desce umístěny svorky se signály RxD a TxD pro sériovou komunikaci.



Obrázek 12. Elektronické schéma propojovací desky

4.2.2 Vstupní dělič

V blokovém schématu bylo počítáno se čtyřpolohovým přepínačem na určování měřicích rozsahů, který byl při dalším návrhu nahrazen třemi nezávislými řízenými spínači. Jako řízené spínače lze využít buď relé, nebo integrované obvody na bázi technologie CMOS. Polovodičové obvody mají oproti cívce relé výrazně nižší spotřebu, avšak jejich negativní vlastností je poměrně vysoký odpor v sepnutém stavu, který dosahuje stovek Ω . Z toho důvodu bude lépe realizovat přepínač vstupního děliče pomocí jazýčkových relé v pouzdru DIL.



Obrázek 13. Elektronické schéma vstupního děliče

Při výběru konkrétního typu relé bude důležitější nízká spotřeba oproti nízké ceně a samozřejmě napájecí napětí 5 V. Podle těchto kritérií byl ze sortimentu dvou největších tuzemských zasilatelských obchodů s elektronickými součástkami vybrán typ DIP 05 7221-L výrobce Meder. Ten bohužel nebyl momentálně dostupný a byl tedy nahrazen typem DIP 05 9051-L, který má stejnou spotřebu (125 mW), ale je o polovinu dražší. Pro návrh však lze u obou typů využít shodné vývody a tudíž je možné stávající obvody v budoucnu nahradit levnější variantou.

Pro spínání cívek relé nelze využít přímo výstupů mikroprocesoru, ale nějaký spínací prvek. Nejsnazší je využití PNP tranzistorů zapojených jako spínače tak, aby vývody z mikroprocesoru směřovaly na jejich báze. Aby proudový impuls vznikající při odpojení napájení cívky relé tranzistory nepoškodil, je třeba zapojit paralelně k cívkám relé polovodičové diody v závěrném směru.

Odporový napěťový dělič bude mít celkový odpor 1 M Ω a hodnota odporu jeho částí bude docílena pomocí běžných rezistorů v sériovém zapojení s odporovými trimry pro jemné doladění hodnoty. Důraz zde není kladen na přesné dodržení ohmické hodnoty jednotlivých částí děliče, ale na dodržení poměru hodnot odporu 90:9:1.

Pro převodník proudu na napětí je nutno užít operační zesilovač, který je schopen kompenzovat vstupní proud, jehož maximální měřitelná hodnota je 200 mA. Skutečná hodnota ale může být i vyšší a je proto vhodné omezit maximální vstupní proud pomocí pojistky. Užití pojistky se jmenovitým proudem shodným s maximálním měřitelným by pravděpodobně znamenalo nutnost velmi časté výměny pojistky, proto bude lépe dimenzovat obvod na větší proud a užít pojistku se jmenovitým proudem 250 mA, nebo 315 mA a s charakteristikou F.

Jako převodník proudu na napětí bude užít precizní operační zesilovač OP 07. Jeho výstupní proud však nemůže dosahovat hodnot řádu stovek mA a je tedy nutné tento výstupní proud posílit pomocí dvou komplementárních tranzistorů dodávajících proud do zpětnovazební větve převodníku. Ve zpětné vazbě operačního zesilovače musí být rezistor s hodnotou odporu 1 Ω , toho bude opět docíleno pomocí kombinace rezistoru a odporového trimru, tentokrát ovšem v paralelním zapojení. Drobné nepřesnosti operačního zesilovače a jeho zpětné vazby lze korigovat vhodnými softwarovými úpravami v řídicí jednotce.

Výstup modulu bude připojován na proudovou, nebo napěťovou větev pomocí přepínače MTS 245. Tento přepínač je dvoupólový, neboť druhý pól musí měnit logickou úroveň signálu Current. Jako vstupní svorky modulu jsou užity klasické zdířky s vnitřním průměrem 4 mm, které jsou standardem v technice laboratorních přístrojů.

Rozmístění jednotlivých signálů na konkrétních pozicích konektoru je zachyceno na obrázku 14.

9	7	5	3	1
<i>Hi</i>	<i>Mid</i>	<i>Lo</i>	Nezapojen	Nezapojen
Klíč	Nezapojen	<i>Current</i>	Rezerva	<i>Input</i>
10	8	6	4	2

Obrázek 14. Rozmístění signálů v konektoru vstupního děliče

4.2.3 Zdroj referenčního napětí

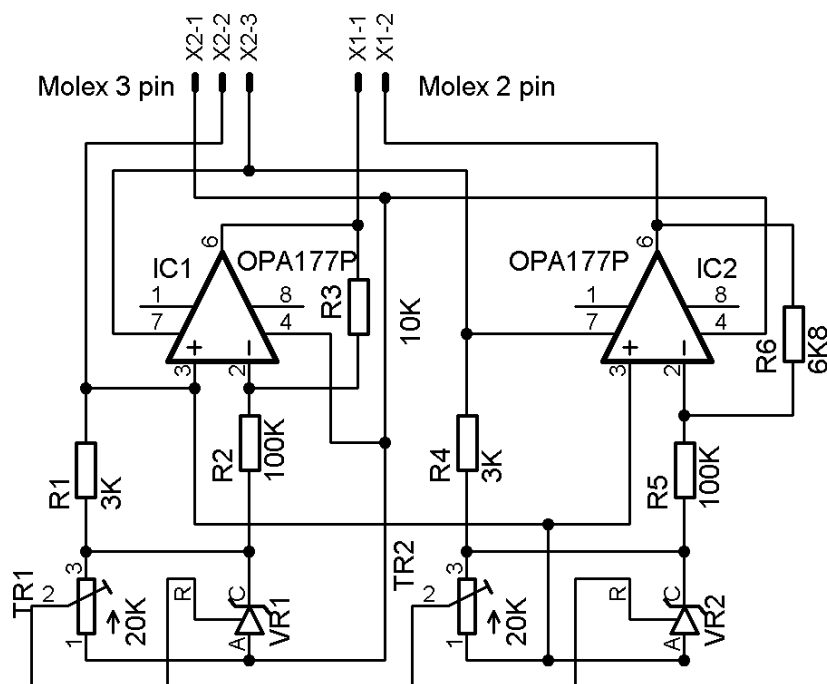
Pro referenční napětí 200 mV není sériově vyráběn žádný monolytický zdroj, bude tedy užit zdroj dodávající vyšší referenční napětí, které bude poté pomocí operačního zesilovače upraveno na požadovanou velikost 200 mV.

Monolytický zdroj referenčního napětí TL431 je schopen na svém výstupu dodávat stabilní napětí v rozmezí 2,5 V až 36 V. Při zapojení mezi kladné napájecí napětí a nulu bude nastaven na úroveň cca. 3 V, při zapojení mezi nulu a záporné napájecí napětí bude nastaven obdobně a na jeho výstupu tedy bude napěťová úroveň cca. -2 V.

Tato dvě napětí budou upravena pomocí invertujících zesilovačů. Invertující zesilovač je nutno použít z toho důvodu, že neinvertující neumožňuje dosáhnout zesílení menší než jedna. U použitých zesilovačů nezáleží na přesném dodržení velikosti zpětnovazebních odporů a nemusí být kompenzována vstupní napěťová nesymetrie, jelikož přesná hodnota výstupního napětí bude doladěna pomocí trimru u referenčního zdroje TL431.

Podle katalogového listu TL431 je typická hodnota minimálního odebíraného proudu 0,5 mA, maximální hodnota tohoto parametru může dosahovat až 1 mA a proto předřadný rezistor bude mít hodnotu odporu 3 k Ω . Trimr pro nastavení výstupního napětí bude víceotáčkový s ohmickou hodnotou 20 k Ω .

Rezistory ani trimry nemohou být konstruovány na bázi uhlíku neboť by jejich šum velmi nepříznivě ovlivňoval velikost výstupního napětí referenčního zdroje, proto je třeba užit rezistory metalizované a trimry s cernetovými drahami.



Obrázek 15. Elektronické schéma zdroje referenčního napětí.

4.2.4 Řídící obvod

Jak již bylo uvedeno v předchozím textu, k ovládání převodníku bude využit jednočipový mikropočítač AT89C2051, který je zjednodušenou variantou mikroprocesoru Intel® 8051. Oproti základní verzi obsahuje pouze dvě vstupně-výstupní brány, přičemž brána P3 má z pouzdra vyvedeno jen sedm vývodů a bit P3.6 pouze interně reprezentuje výstup napět'ového komparátoru, jehož vstupy jsou vyvedeny na stejných pinech jako bity P1.0 a P1.1.

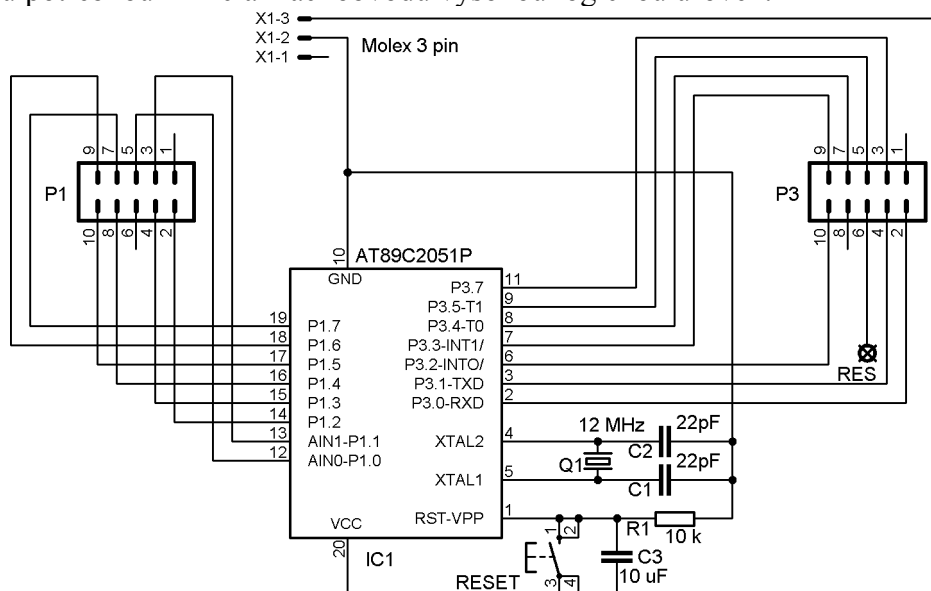
Mikropočítače rodiny 8051 jsou koncipovány podle Harwardské architektury a mají tedy oddělenou paměť dat od paměti programu. U varianty AT89C2051 má paměť programu kapacitu 2 KB a paměť dat 256 B, z toho 128 B uživatelsky přístupných. Paměť programu je realizována pamětí flash s životním cyklem tisíce přepsání.

Taktovací kmitočet může být až 24 MHz, ovšem v tomto případě bude vhodnější kmitočet 12 MHz, neboť oba integrované šestnáctibitové časovače inkrementují s dvanáctinou taktovacího kmitočtu, což pro 12 MHz představuje jednu mikrosekundu.

Mikropočítač je ještě vybaven sériovým kanálem a přerušovacím systémem s nastavitelnou prioritou přerušení, jehož zdroji mohou být dvě vnější přerušení, integrované časovače nebo sériový kanál. Obě vnější přerušení budou využita k detekci dosažení nulové úrovně na výstupu integrátoru a ke zjišťování doby integrace budou využity interní časovače.

Kromě TxD, RxD a vstupů vnějšího přerušení INT0 a INT1, na něž musí být přivedeny signály Up a Down, je rozložení ostatních signálů libovolné a je provedeno tak, aby nemusely být užity drátové propojky. V programu budou užívána pojmenování signálů a jejich pozice na branách bude definována pouze na začátku kódu.

Pro uvedení procesoru do výchozího stavu je obvod ještě opatřen tlačítkem RESET doplněným o rezistor 10 kΩ a elektrolytický kondenzátor 10 μF tvořící integrační článek udržující po stisku tlačítka nebo připojení napájení na vstupu RESET po dobu potřebnou k inicializaci obvodu vysokou logickou úroveň.



Obrázek 16. Elektronické schéma řídicího obvodu

9	7	5	3	1
<i>P1.6 - Value</i>	<i>P1.7 - Strobe</i>	<i>P1.0 - Clock</i>	<i>P1.1 - Current</i>	Nezapojen
<i>P1.5 - Hi</i>	<i>P1.4 - Mid</i>	Klíč	<i>P1.3 - Lo</i>	<i>P1.2</i>
10	8	6	4	2

9	7	5	3	1
<i>P3.3 - Down</i>	<i>P3.4 - SH</i>	<i>P3.5 - Discharge</i>	<i>P3.7 - Reference</i>	Nezapojen
<i>P3.2 - Up</i>	Klíč	Rezerva	<i>P3.1 - TxD</i>	<i>P3.0 - RxD</i>
10	8	6	4	2

Obrázek 17. Rozložení signálů v konektoru brány P1 (nahore) a P3 (dole)

4.2.5 Napájecí zdroj

Při konstrukci napájecího zdroje je zapotřebí brát v úvahu velikost vstupního napětí a dodržovat veškerá opatření zabráňující nebezpečnému dotyku živých i neživých částí. Velkou roli zde hraje již samotný transformátor, jehož konstrukce musí spolehlivě oddělit primární a sekundární část.

Celek napájecího zdroje je vhodné navrhovat jako zařízení s dvojitou izolací, což umožní užití dvoužilové přívodní šňůry se standardizovaným konektorem. K ochraně před zkratem na primárním vedení transformátoru bude sloužit zvenčí uživatelsky vyměnitelná pojistka s charakteristikou T.

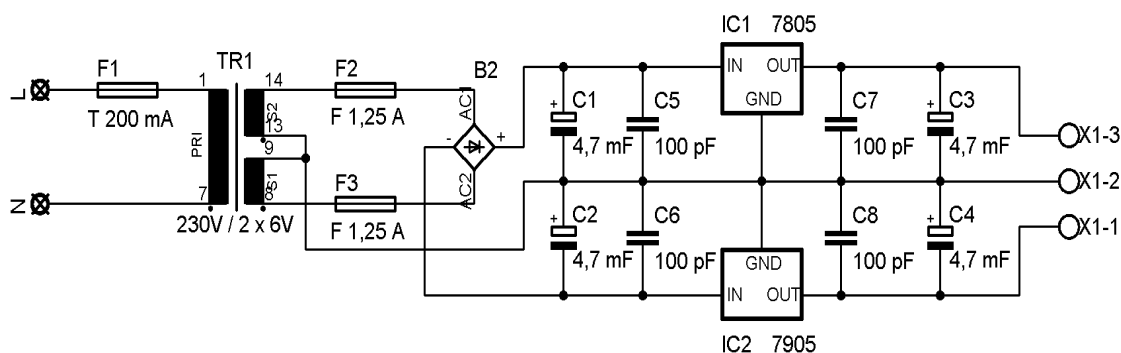
Jelikož odchadovaná velikost odebíraného proudu zdroje může dosahovat až 1 A, musí být transformátor patřičně dimenzován a pro dosažení souměrného výstupního napětí musí obsahovat dvě sekundární vinutí. Obě vinutí jsou jištěna pojistkami 1,25 A s charakteristikou F.

Usměrnění výstupního napětí je prováděno integrovaným Grätzovým můstkem. Velikost výstupních napětí je zajišťována stabilizátory 7805 a 7905. Usměrňovací můstek i oba stabilizátory je vhodné vzhledem k velikosti protékajících proudů opatřit vhodně dimenzovanými chladiči.

Aby se zabránilo oscilacím⁴ stabilizátorů, je třeba co nejbližší k součástkám umístit keramické kondenzátory 100 pF mezi vstupem, resp. výstupem stabilizátoru a nulou. K udržení napětí v době, kdy není patřičná úroveň na výstupu usměrňovače, slouží elektrolytické kondenzátory o kapacitě 4,7 mF.

Pro zapouzdření napájecího zdroje byla zvolena plastová krabička s větracími otvory U-KPZ8 ze sortimentu firmy GM Electronic, sro. Na krabičce je třeba provést pouze drobné úpravy, jež spočívají vyvýznutí otvoru pro konektor přívodu napájení a vyvrtání otvoru pro držák pojistky primárního vinutí.

⁴ Kondenzátory o kapacitě 100 nF je zvykem umísťovat rovněž mezi napájecí svorky a zem u veškerých integrovaných obvodů pro zabránění oscilací. V tomto případě z důvodu úspory součástek není s těmito blokovacími kondenzátory v návrhu počítáno, ale desky plošných spojů jsou řešeny tak, aby v případě potřeby bylo možno tyto kondenzátory umístit ze strany plošných spojů ve formě miniaturních SMD součástek.



Obrázek 18. Elektronické schéma napájecího zdroje

4.2.6 Displej

Návrh modulu displeje se od ostatních odlišuje, neboť v tomto případě není navrhována veškerá elektronika, ale je dán již funkční pětimístný displej z obráběcího stroje, na jehož vstupy lze přivádět čísla v BCD kódu. Podstatná část práce zde tedy spočívá v diagnostice stávajícího obvodu a jeho drobných úpravách pro možnost užití v daném případě.

Především je nutno nalézt význam všech vstupních pinů a dále upravit sedmissegmentový zobrazovač na pozici zcela vlevo pro zobrazování znaku minus a rozsvícení dvou segmentů reprezentujících číslici 1 pouze jedním vodičem. Nakonec je ještě zapotřebí zajistit rozsvícení desetinných teček.

Uvedené úpravy je možno realizovat pomocí přerušení některých vodivých cest na desce plošného spoje a pomocí drátových propojek. Nesmírnou výhodou užití továrně vyráběného displeje je přítomnost rezistorů regulujících proud tekoucí jednotlivými segmenty již na desce plošného spoje. Návrh podobného zařízení v amatérských podmínkách bez možnosti užití dvouvrstvého plošného spoje je prakticky vyloučen. Chybějící rezistory pro desetinné tečky je možno snadno doplnit pomocí SMD miniaturních součástek mezi deskou a drátovou propojkou.

Po úpravě displeje je možné přikročit ke konstrukci posuvného registru se sériovým vstupem a paralelním výstupem. Pro tyto účely lze využít integrované obvody 74164, nebo lépe 74595, které umožňují přímé ovládání výstupního registru. Návrh takového displeje lze nalézt např. v [1]. Oba zmíněné obvody jsou osmibitové, což znamená pro čtyř a půlmístný displej buď užití tří obvodů, z nichž u jednoho bude využit pouze jediný bit, nebo ovládání nejvyššího místa zobrazovače přímo z mikroprocesoru.

Jelikož volný výstup mikroprocesoru již zbývá pouze jeden, nejeví se vhodné užít jej k rozsvícení jednoho segmentu. To znamená využití tří obvodů 74595. Okamžitě se však nabízí možnost užít zbývající volný prostor posuvného registru k ovládání znaménkového segmentu a desetinných teček.

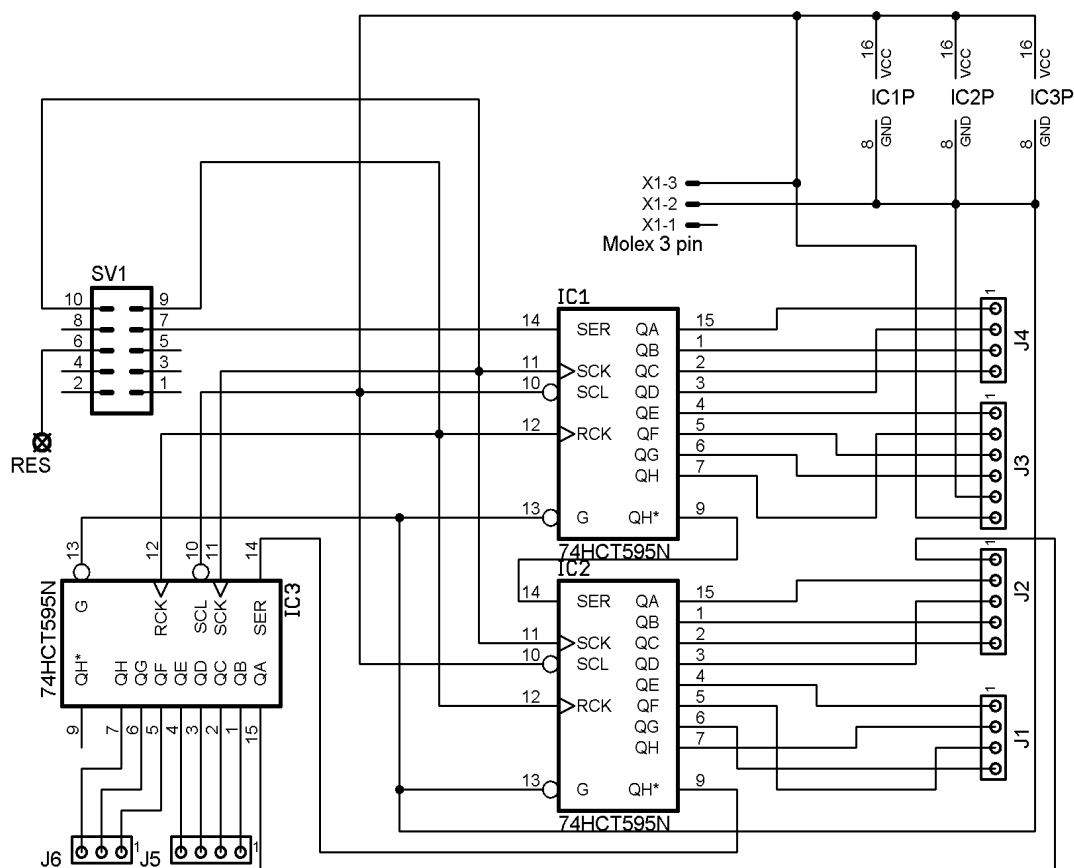
Uvedené řešení tedy přesouvá ovládání znaménka a desetinných teček z oblasti hardwaru do oblasti softwaru. V již navrženém modulu propojovací desky tedy zůstávají spoje vycházející z původní koncepce, ovšem při návrhu desky posuvného registru bude zohledněno pouze nově přijaté řešení a rozmístění signálů na konektoru je zachyceno na obrázku 19.

Rozmístění pinů, na něž budou vyvedeny výstupy registrů, je dáno stávající konstrukcí displeje a je pouze nutno dbát na logickou posloupnost předávání sériové informace tak, aby nejprve došlo k předání informace o znaménku, poté o desetinných tečkách a nakonec jednotlivé číslice.

Stávající deska displeje bohužel přesahuje rozměry, na něž je omezena volně šířitelná verze návrhového programu, což sice neznemožňuje zakreslení elektronického schématu, avšak brání návrhu desky plošného spoje. Možným řešením je navrhnout onu desku jako dva různé obvody a důsledně dbát, aby na sebe vodivé cesty v místě, kde se obvody stýkají, náležitě navazovaly.

9	7	5	3	1
Strobe	Value	Nezapojen	Nezapojen	Nezapojen
Clock	Nezapojen	Rezerva	Klíč	Nezapojen
10	8	6	4	2

Obrázek 19. Rozmístění signálů v konektoru displeje



Obrázek 20. Elektronické schéma posuvného registru displeje

4.2.7 Integrátor

Na desce integrátoru je kromě samotného integračního zesilovače umístěn ještě vzorkovací zesilovač a tři napěťové komparátory. U všech těchto obvodů by vstupní napěťová nesymetrie měla neblahý vliv na přesnost převodníku a je tedy nezbytné provést kroky k jejímu vykompenzování.

Jako integrátor bude užit operační zesilovač OP177, jehož konstrukce korekci vstupní napěťové nesymetrie umožňuje a poslouží k ní odporový trimr 20 k Ω . Jako napěťové komparátory budou sloužit obvody LM311, u nichž lze napěťovou nesymetrii kompenzovat pomocí rezistoru 3 k Ω a odporového trimru 5 k Ω . Vzorkovací zesilovač LF398 rovněž obsahuje vstup pro kompenzaci napěťové nesymetrie. Z dostupných katalogových listů však bohužel není zřejmé, jak by měla být kompenzace provedena a tedy v návrhu užití řešení pomocí odporového trimru 20 k Ω je pouze odhadem a nemusí být plně funkční.

Komparátory v obvodu slouží k detekci polaritu vstupního signálu a detekci dosažení nulové úrovně na výstupu integračního zesilovače. Výstupem komparátorů LM311 je otevřený kolektor a proto jsou v návrhu připojeny přes rezistor 10 k Ω na kladný pól zdroje, aby byla zaručena vysoká logická úroveň výstupu v neseprnutém stavu.

Parametry integračního zesilovače je nutno volit s ohledem na možnosti řídicí logiky. Displej může zobrazit, pokud nebude brána v potaz polarita, dvacet tisíc různých hodnot. To znamená, že pro rozlišitelnost na posledním místě musí čítač dosáhnout právě hodnoty 20 000. Šestnáctibitový čítač může dosáhnout hodnoty až 65 535 a jeví se tedy vhodné nechat čítač dojít ke stavu 60 000 a dosáhnout tak přesnosti třetiny posledního zobrazitelného místa.

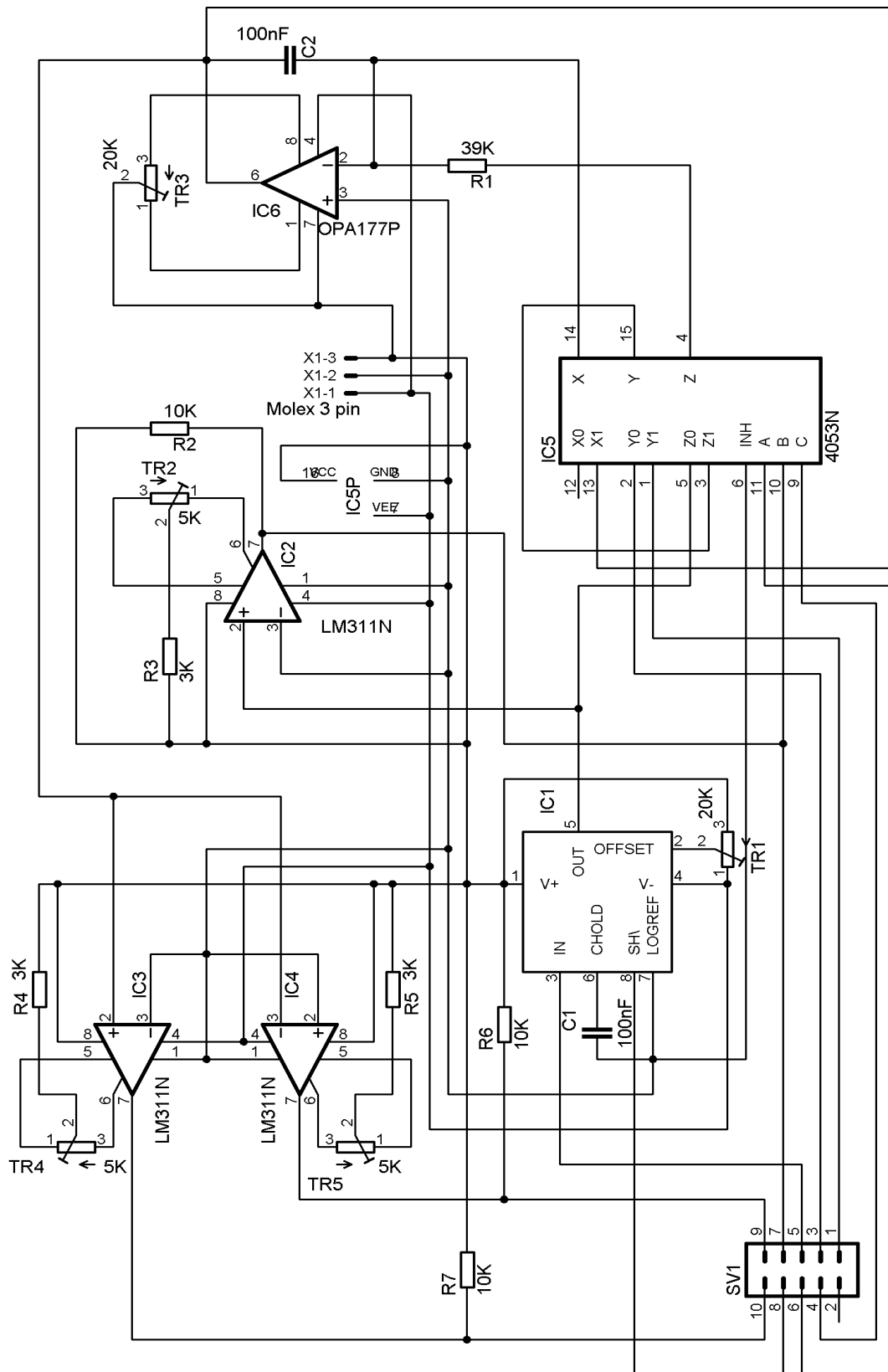
Při taktování mikrořadiče krystalem 12 MHz trvá čítání do 60 000 právě 60 ms. Tato doba je vhodná i s ohledem ke kmitočtu napětí v rozvodné síti. Jedna perioda zde trvá 20 ms a integraci přes celistvý ásobek doby periody bude potlačeno sériové rušení rozvodnou sítí. Době integrace přibližně vyhovují užití součástky – rezistor 39 k Ω a svitkový kondenzátor 100 nF.

Svitkový kondenzátor 100 nF je rovněž užit jako udržovací ve vzorkovacím zesilovači. Kapacita 100 nF zaručuje dostatečnou stabilitu napětí na výstupu zesilovače a zároveň není překážkou pro dostatečně rychlou reakci na změnu vstupujícího napětí.

K realizaci spínačů a přepínačů slouží CMOS obvod 4053, který obsahuje tři obousměrné přepínače. Dokáže tedy obsloužit potřebné přepínání jednotlivých referenčních napětí podle polaritu vstupního signálu, přepínání mezi vstupním a referenčním napětím na vstupu integrátoru a nulování výstupu integrátoru zkratováním zpětnovazebního kondenzátoru.

9	7	5	3	1
<i>Up</i>	<i>Polarity</i>	<i>Input</i>	$+U_{REF}$	$-U_{REF}$
<i>Down</i>	<i>SH</i>	<i>Discharge</i>	<i>Reference</i>	Klíč
10	8	6	4	2

Obrázek 21. Rozložení signálů na konektoru modulu integrátoru



Obrázek 22. Elektronické schéma integrátoru

5 Oživení a kalibrace obvodu

Ačkoliv činnost všech jednotlivých obvodů byla předem pečlivě testována na kontaktním nepájivém poli, nelze očekávat, že celek bude okamžitě fungovat přesně podle počátečních očekávání. Navíc pro vyzkoušení funkčnosti mnohých obvodů je zapotřebí funkční řídicí obvod a odhalení nedostatků v návrhu hardwaru není možné bez současného vývoje testovacího softwaru. K tomu již ovšem musí být jasně definovány významy logických úrovní řídicích signálů, jež jsou shrnuty v tabulce 2.

Tabulka 2. Význam logických úrovní řídicích signálů

Signál	Význam v úrovni „0“	Význam v úrovni „1“
Current	Měření proudu	Měření napětí
Discharge	Pracovní režim integrátoru	Nulování výstupu integrátoru
Polarity	Záporná polarita vstupního signálu	Kladná polarita vstupního signálu
Hi	Vstupní dělič nastaven na napěťový rozsah 20 V	Vysoká úroveň na všech třech vstupech způsobuje odpojení obvodu od vstupní napěťové svorky. Lze užít při měření proudu, nebo pokud napětí na vstupní svorce překročí hodnotu 20 V
Mid	Vstupní dělič nastaven na napěťový rozsah 2000 mV	
Lo	Vstupní dělič nastaven na napěťový rozsah 200 mV	
Value	Vyslání bitu „0“ na displej	Vyslání bitu „1“ na displej
Clock	-	Náběžná hrana potvrzuje platnost úrovně signálu Value
Strobe	-	Náběžná hrana uvolňuje data z posuvného registru na výstup
Reference	Integrace vstupního signálu	Integrace referenčního napětí
SH	Na výstupu vzorkovacího zesilovače je uchována hodnota, která byla na vstupu v okamžiku sestupné hrany	Na výstupu vzorkovacího zesilovače je táž hodnota, jaká je právě přivedena na vstup
Up	Sestupná hrana detekuje dosažení nulové úrovně na výstupu integrátoru ze záporného napětí	Záporné napětí na výstupu integrátoru
Down	Sestupná hrana detekuje dosažení nulové úrovně na výstupu integrátoru z kladného napětí	Kladné napětí na výstupu integrátoru

5.1 Oživení základních částí

Pro otestování činnosti jednotlivých modulů je zjevně nutné ze všeho nejdříve dokončit osazování propojovací desky a desky napájecího zdroje. Propojovací deska neobsahuje kromě konektorů žádné další součástky, takže kontrolu správného zapájení je možno provést jednoduše otestováním odporu mezi svorkami, jež mají být propojeny.

Po osazení desky napájecího zdroje bylo nutno nejprve při vyjmutých pojistkách sekundárního vinutí otestovat velikost napětí na výstupu transformátoru a teprve poté připojit usměrňovací a stabilizační část. Následně proběhla kontrola napětí na výstupech zdroje.

Na závěr bylo nutno ověřit stabilitu výstupního napětí při zatížení. Proto byl nejprve mezi kladný pól a zem a poté mezi záporný pól a zem připojen výkonový reostat a pomocí ampérmetru a voltmetru byla sledována stabilita napětí v závislosti na odebíraném proudu až do výše 1 A.

Při zátěžovém testu bylo zjištěno, že kladný pól přestává při odběru nad cca. 30 mA dodávat do zátěže stabilní napětí. To by mohlo být způsobeno nějakým přechodovým odporem, např. studeným spojem. Deska plošného spoje byla proto znovu přezkumána a nalezena vlasová trhlinka vodivé cesty mezi pojistkou a vstupem usměrňovače. Po přemostění trhlinky již zdroj nevykazoval nedostatky.

Ihned po kontrole funkčnosti byl zdroj zapouzdřen do krabičky, aby bylo zabráněno možnosti nebezpečného dotyku živých částí a obvod mohl být využíván i osobami bez elektrotechnické kvalifikace.

5.2 Oživení řídicího obvodu a displeje

Pro funkci dalších modulů vyjma zdroje referenčního napětí je zapotřebí součinnost řídicího obvodu a proto je vhodné jako další oživit právě ten. Velmi snadným způsobem, jak ověřit správnou činnost mikroprocesoru, je pravidelné střídání logické úrovně na jednom z výstupních pinů. Střídání logické úrovně na pinu P3.7 s frekvencí přibližně 1 Hz lze docílit programem dle výpisu 1. Poté stačí pouze patřičný pin (na čipu pin číslo 11) sledovat pomocí logické sondy, nebo osciloskopu.

```

START:      MOV R2, #4           ;500 ms = 4 · 250 · 250 · 2 μs
SET_2:      MOV R3, #250        ;instrukce DJNZ totiž trvá 2 μs
SET_1:      MOV R4, #250        ;instrukce MOV naplňují registry
            DJNZ R4, $           ;od R4 odečítá 1 dokud v R4 není 0
            DJNZ R3, SET_1       ;od R3 odečítá 1 a naplňuje R4
            DJNZ R2, SET_2       ;od R2 odečítá 1 a naplňuje R3
            CPL P3.7             ;negace bitu P3.7
            SJMP START          ;opakování celého programu

```

Výpis 1. Program pro testování desky řídicího obvodu

Po nahrání programu do mikroprocesoru byl mikroprocesor umístěn do desky řídicího obvodu a připojen k napájecímu zdroji. Na osciloskopu byly patrné změny logické úrovně na pinu P3.7, ovšem zároveň byly zřetelné oscilace hodnoty při úrovni „1“. Oscilace byly rovněž zaznamenány po přiložení sondy na napájecí svorky, proto byl mezi přívod napájecího napětí a zem připojen kondenzátor s kapacitou 100 nF, čímž se problém oscilací napětí vyřešil.

Jedinou jednotkou umožňující zobrazení jakéhokoliv stavu procesoru, nebo jiných modulů, je displej a proto byla v další fázi testována jeho funkčnost. Pro tento účel byl vytvořen program uvedený na výpisu 2, jehož úkolem bylo zobrazit na displeji znaménko minus a hodnotu 12345.

```

VALUE          BIT   P1.6 ;definice proměnných na branách
STROBE         BIT   P1.7 ;a ve vnitřní paměti dat
CLOCK          BIT   P1.0
SIGN           DATA 40H
DIGIT1         DATA 41H
DIGIT2         DATA 42H
DIGIT3         DATA 43H
DIGIT4         DATA 44H
DIGIT5         DATA 45H

DISPLAY:  MOV SIGN,#1      ;hodnoty pro zobrazení na displeji
          MOV DIGIT1,#1
          MOV DIGIT2,#2
          MOV DIGIT3,#3
          MOV DIGIT4,#4
          MOV DIGIT5,#5

          CLR STROBE
          MOV R3,#24      ;sekvence pro nulování posuvných
          CLR VALUE      ;registrů

CLEAR:    CLR CLOCK
          SETB CLOCK
          DJNZ R3, CLEAR
          CLR CLOCK

          MOV R0,#SIGN    ;vysílání začíná znaménkem
SEND_VAL: MOV A,@R0
          SWAP A
          MOV R3,#4      ;každý znak se skládá ze 4 bitů
SEND_BIT: RLC A          ;bit k vyslání se přesouvá do CY
          MOV VALUE,C
          SETB CLOCK
          CLR CLOCK
          DJNZ R3, SEND_BIT
          INC R0          ;po vyslání 4 bitů jde další znak
          CJNE R0,#DIGIT5 + 1, SEND_VAL
          ;dokud nejsou vyslány všechny znaky
          SETB STROBE    ;hodnota z registrů na displej
          SJMP DISPLAY_VALUE
          ;program se neustále opakuje

```

Výpis 2. Program pro zobrazení sekvence znaků na displeji

Po nahrání programu dle výpisu 2 displej stále zobrazoval víceméně náhodné údaje. Nikterak nepomohlo přidání instrukcí způsobujících prodlevu mezi opětovným zápisem úrovně řídicí proměnné. Po několikerém snažení o úpravu programu přišlo na řadu zkoumání průběhů na osciloskopu, kde vyšlo najevo, že signál Clock umístěný na bitu P1.0 setrvává stále v nízké úrovni.

Opětovným čtením katalogového listu byl odhalen zprvu mylný překlad funkčnosti bitů P1.0 a P1.1. Tyto bity slouží primárně jako analogové vstupy a pro funkci výstupu potřebují externí podporu.

Nejprve bylo vyzkoušeno ovládání displeje pomocí rezervního bitu P1.2, kdy již displej fungoval přesně podle předpokladů. Následně byly konány pokusy s externí podporou bitu P1.0. Z okolnosti, že mikroprocesor dokáže v nízké logické úrovni pohltit proud až 20 mA, jasně vyplývala možnost podpořit pin rezistorem vůči kladnému napětí. Po připojení rezistoru 3 k Ω průběh na osciloskopu vykazoval dosažení potřebných logických úrovní a po připojení displeje již bylo vše v pořádku a pin P1.2 mohl být znovu uvolněn.

5.3 Oživení vstupního děliče

```

LO          BIT    P1.3          ;definice proměnných
MID         BIT    P1.4
HI          BIT    P1.5

ORG 00H
ORG 0BH
SJMP START
MOV TL0,#0AFH ;časovač0 a registr R4
MOV TH0,#3CH  ;vytvářejí zpoždění 5 s
DJNZ R4, RETURN
MOV R4,#100
JNB LO, MEDIUM ;poté se přepíná rozsah
JNB MID, MAX
SETB HI
CLR LO
SJMP RETURN
MEDIUM:
SETB LO
CLR MID
SJMP RETURN
MAX:
SETB MID
CLR HI
RETURN:
RETI
START:
MOV IE,#82H   ;nastavení časovače
MOV TMOD,#1
MOV R4,#100
MOV TH0,#3CH
MOV TL0,#0AFH
SETB TR0
SJMP $       ;čekání na žádost o přerušení

```

Výpis 3. Program pro ovládání vstupního modulu

U modulu vstupního děliče je zapotřebí vyzkoušet přepínání jednotlivých relé a rovněž nastavení trimrů u vstupního děliče a u převodníku proudu na napětí. Trimry vstupního děliče je vhodné nejprve pomocí ohmmetru nastavit na hodnotu, aby jednotlivé větve dosahovaly velikostí uvažovaných při návrhu.

Po hrubém doladění trimrů je vhodné nahrát do řídicího mikroprocesoru program dle výpisu 3, který bude přepínat periodicky jednotlivé větve děliče a na napěťový vstup obvodu připojit napětí ze stabilizovaného zdroje. Přesným voltmetrem pak bude sledováno napětí na výstupu modulu a podle jeho velikosti budou jednotlivé trimry děliče ještě následně donastaveny.

Pomocí programu dle výpisu 3 se na výstupu střídaly s intervalem 5 s hodnoty z jednotlivých větví děliče a bylo možno doladit jednotlivé trimry tak, aby hodnoty byly v dekadickém podílu. Tím byla provedena kalibrace vstupního děliče a bylo možno započít kalibraci převodníku proudu na napětí.

Na počátku kalibrace byl na vstup převodníku přiveden proud velikosti 100 mA byla sledována velikost napětí na jeho výstupu. Při prvním měření se ukázalo, že rezistor s odporem 1,2 Ω , ačkoliv podle měření ohmmetrem vykazuje dostatečný odpor, ve skutečnost projevuje převážně přechodový odpor a po zapájení do desky plošného spoje se odpor výrazně sníží.

Po sériovém spojení dvou rezistorů s nominální hodnotou 1,2 Ω je již odpor dostatečný a lze jej pomocí trimru 3,3 Ω doladit na výsledný odpor 1 Ω . To se projeví hodnotou výstupního napětí odpovídající hodnotě vstupního proudu. V tu chvíli je nutné měnit polaritu výstupního napětí vstupujícího do voltmetru a regulovat trimr kompenzující vstupní napěťovou nesymetrii operačního zesilovače, dokud nebude hodnota při obou polaritách shodná. Poté je možno ještě definitivně doladit hodnotu trimru 3,3 Ω tak, aby výstupní hodnota napětí co nejlépe kopírovala vstupní proud.

5.4 Oživení zdroje referenčního napětí

Zdroj referenčního napětí vyžaduje pouze stabilní napájecí napětí, proto je vhodné s jeho oživením počkat až do chvíle, kdy je možné připojit i zátěž na záporný pól zdroje, neboť teprve s odběrem proudu se ustálí hodnota napětí na výstupu stabilizátoru 7905.

Poté stačí připojit na každý z výstupů referenčního zdroje přesný voltmetr a pomocí trimru nastavit hodnoty výstupního napětí na úroveň +200 mV a -200 mV.

5.5 Oživení integrátoru

Integrátor představuje z hlediska oživování nejsložitější celek. Ze všeho nejdříve je nutné vykompenzovat vstupní napěťovou nesymetrii užitých obvodů. Nejvhodnější je začít s oběma komparátory na výstupu integrátoru. Na jejich vstupy se připojí nulová úroveň a při sledování stavu výstupu komparátorů na osciloskopu se trimry nastaví tak, aby se výstupy komparátorů nacházely těsně před překlopením do logické nuly.

V další fázi je možné vykompenzovat nesymetrii operačního zesilovače představujícího integrátor. Na vstup integrátoru se přivede nulová úroveň a trimr se nastaví tak, aby se úroveň napětí na výstupu neměnila.

Stejným způsobem jako u obou předchozích napěťových komparátorů je nyní možné vykompenzovat i vstupní napěťovou nesymetrii komparátoru zjišťujícího polaritu měřeného signálu.

```
HI          BIT    P1.5 ;definice proměnných
MID         BIT    P1.4
LO          BIT    P1.3
SH          BIT    P3.4
DISCHARGE  BIT    P3.5
REFERENCE  BIT    P3.7
INT_COUNT  BIT    1H

ORG 00H    AJMP  START
ORG 03H    SJMP  INT_0
ORG 0BH    SETB  REFERENCE
           SJMP  SET_T1
ORG 13H    SJMP  INT_1
ORG 1BH    ANL  IE,#0FAH ;zákaz vnějšího přerušeni
           SETB  DISCHARGE
           ANL  TCON,#5 ;zastavení časovačů
           CLR  INT_COUNT
           RETI

SET_T1:    MOV  TH1,#15H
           MOV  TL1,#0A5H
           ORL  IE,#5 ;povolení vnějšího přerušeni
           ANL  TCON,#0F5H ;nulování příznaků přerušeni
           SETB  TR1
           RETI

INT_0:     ANL  TCON,#0AFH ;zastavení časovačů
           ACALL COUNTING
           RETI

INT_1:     ANL  TCON,#0AFH ;zastavení časovačů
           ACALL COUNTING
           RETI

COUNTING: SETB  DISCHARGE
           MOV  COUNTER_HIGH,TH0
           MOV  COUNTER_LOW,TL0
           MOV  TH0,#15H
           MOV  TL0,#9FH
           MOV  IE,#8AH ;povolení přerušeni časovačů
           CLR  INT_COUNT
           CLR  REFERENCE
           CLR  DISCHARGE
           SETB  TR0
           RET
```

```
START:    MOV SP,#10H      ;nastavení zásobníku
          ORL TCON,#5     ;přerušeni aktivováno hranou
          MOV TMOD,#11H   ;režim šestnáctibitových časovačů
          SETB INT_COUNT
          SETB SH
          SETB DISCHARGE
          CLR REFERENCE
          MOV TH0,#15H
          MOV TL0,#9FH
          MOV IE,#8AH     ;povoleni přerušeni časovačů
          CLR LO
          CLR DISCHARGE
          SETB TR0
          JB INT_COUNT,$  ;čekání na přerušeni
          SJMP START
```

Výpis 4. Program pro ovládání integrátoru

Jako poslední je možno vykompenzovat nesymetrii vzorkovacího děliče, v tuto chvíli však pouze nahrubo, tak aby úroveň výstupního napětí co nejvíce odpovídala napětí vstupnímu. Konečné doladění bude možné až ve chvíli, kdy bude přístroj zcela funkční a provede se tak, že se bude střídat polarita napětí na vstupu převodníku a trimr se dostaví do pozice, v níž se bude na displeji zobrazovat při obou polaritách stejná hodnota vstupního napětí.

Činnost obvodu je možné ověřit pomocí programu uvedeného ve výpisu 4. Ve výpisu je již uvedena finální funkční verze, ovšem původní verze prodělala řadu změn a obvod byl podroben mnoha testům, než tato funkční verze vznikla.

První a velmi snadno odhalitelnou chybou obvodu byl studený spoj na jedné drátové propojce mezi dvěma obvody. Poté již byl vytvořen program, který měl po dobu 60 ms integrovat vstupní napětí a poté integrovat referenční úroveň až po dosažení nuly na výstupu integrátoru. Tento cyklus se stále opakoval.

Při sledování výstupu integrátoru na osciloskopu však bylo zřejmé, že po dointegrovaní vstupního napětí je výstup integrátoru okamžitě vynulován a cyklus se opakuje. To znamená, že ihned po dokončení integrace bylo aktivováno vnější přerušeni, ačkoliv v tu chvíli nemohla být ani na jednom z výstupů komparátorů sestupná hrana.

Při kontrole výstupu jednoho z komparátorů druhou osciloskopickou sondou se však situace stabilizovala a obvod vykazoval očekávaný průběh, ovšem pouze při přiložené sondě na výstupu komparátoru. Z tohoto faktu vyplynul úsudek, že vstupní kapacita osciloskopu odstraňuje kmity na výstupu komparátoru a všechny komparátory v obvodu byly opatřeny kondenzátory 100 nF pro blokování napájecího napětí.

Po instalaci blokovacích kondenzátorů se však situace na výstupu integrátoru nezměnila, pouze se přestala projevovat reakce na přítomnost sondy na výstupu komparátoru. Dalším krokem tedy bylo přivedení signálu Polarity na volný bit P1.2 a programové blokování přerušeni od komparátoru, který v danou chvíli nedetekuje průchod výstupního napětí integrátoru nulou.

Situace zůstávala i nyní stejná. Proto byl do programu přidán blok zobrazující na displeji číslo vnějšího zdroje, od něhož byla žádost o přerušení generována. Nyní se ukázalo, že bez ohledu na polaritu vstupního signálu vždy dochází k obsluze obou vnějších přerušení a to v pořadí INTO a poté INT1.

Jelikož se jedná o standardní pořadí, v jakém procesor zpracovává žádosti o přerušení, pokud jsou generovány současně, může to znamenat, že příznaky žádostí zůstávají iktivní i při zakázání příslušného přerušení a při jeho povolení pak okamžitě dojde k obsluze.

Program byl tedy opatřen instrukcí pro nulování příznaků vnějšího přerušení, která již vedla k vyřešení problému. Funkčnost všech modulů byla tedy již ověřena a je možno přistoupit k tvorbě finálního ovládacího programu.

6 Vývoj řídicího programu

Výsledný ovládací program je v podstatě spojením jednotlivých testovacích programů uvedených v předchozí kapitole obohaceným o kód pro vydělení stavu čítače třemi a přecedení podílu na jednotlivé číslice v dekadické soustavě a dále o přepínání rozsahů a detekci měření proudu.

Kód pro dělení stavu čítače třemi vychází z předpokladu, že principy dělení musí být shodné pro libovolnou číselnou soustavu. Vyšší byte stavu čítače lze tedy vydělit třemi přímo pomocí instrukce DIV a dostat tak vyšší byte výsledku. Zbytek po dělení povýšený na pozici vyšší cifry a přičtený k vyšší čtveřici bitů spodního bytu stavu čítače dá po vydělení třemi vyšší čtveřici bitů spodního bytu výsledku a opětovným povýšením zbytku a přičtení poslední čtveřice bitů stavu čítače vznikne základ, po jehož vydělení třemi bude k dispozici poslední čtveřice bitů výsledku.

Převod výsledku dělení na jednotlivé číslice desítkové soustavy je prováděn pomocí přičítání vah jednotlivých bitů. Každý bit podílu je tedy testován a pokud má vysokou úroveň, je z tabulky přičtena patřičná váha ke každému místu desítkového výsledku včetně přenosu do vyššího řádu.

Přepínání rozsahů je prováděno na základě velikosti čísla posílaného na displej. Je-li číslo možné zobrazit pomocí nižšího rozsahu, provede se přepnutí rozsahu na nižší. Program vždy začíná s nejvyšším rozsahem a teprve poté případně přepíná na nižší. Při překročení maximálního rozsahu se na sekundu odpojí obvod od vstupu a na displeji bliká maximální hodnota, poté se znovu zkouší nejvyšší rozsah. Tímto postupem se minimalizuje riziko přivedení přepětí na součástky mimo vstupní dělič.

Zobrazování desetinných teček se provádí na základě přepnutého rozsahu, přičemž při odpojení vstupního děliče se zobrazuje tečka pro nejvyšší rozsah. Výjimku tvoří situace při přepnutí spínače na měření proudu, kdy je automaticky aktivována desetinná tečka pro nejnižší rozsah.

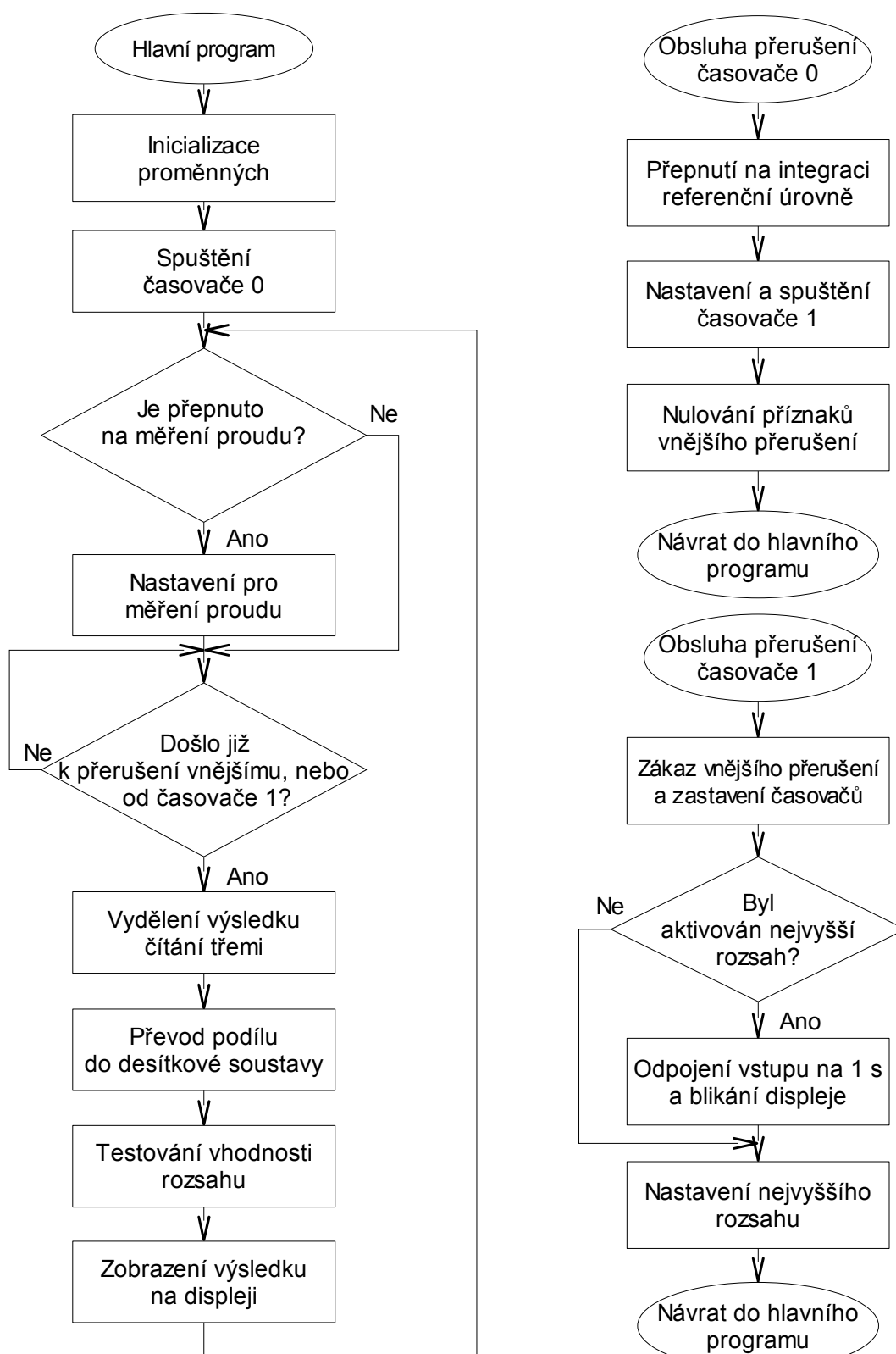
Pro určení doby integrace vstupního signálu a referenční úrovně slouží časovač 0, časovač 1 je pak využit k detekci překročení rozsahu. Ve chvíli přepnutí na referenční úroveň na vstupu integrátoru se časovač 1 aktivuje a je nastaven rovněž na dobu 60 ms. Pokud do té doby není detekováno vnější přerušení signalizující dosažení nuly, je situace vyhodnocena jako překročení rozsahu a provedou se příslušná opatření.

Program je koncipován tak, aby veškeré výpočty a operace prováděl v době, kdy je integrován vstupní signál, a není nebezpečí, že dojde ke změně hodnot v průběhu výpočtu. Užitá doba integrace 60 ms je dostatečně dlouhá, aby se v této fázi mohla odbývat i budoucí sériová komunikace s osobním počítačem.

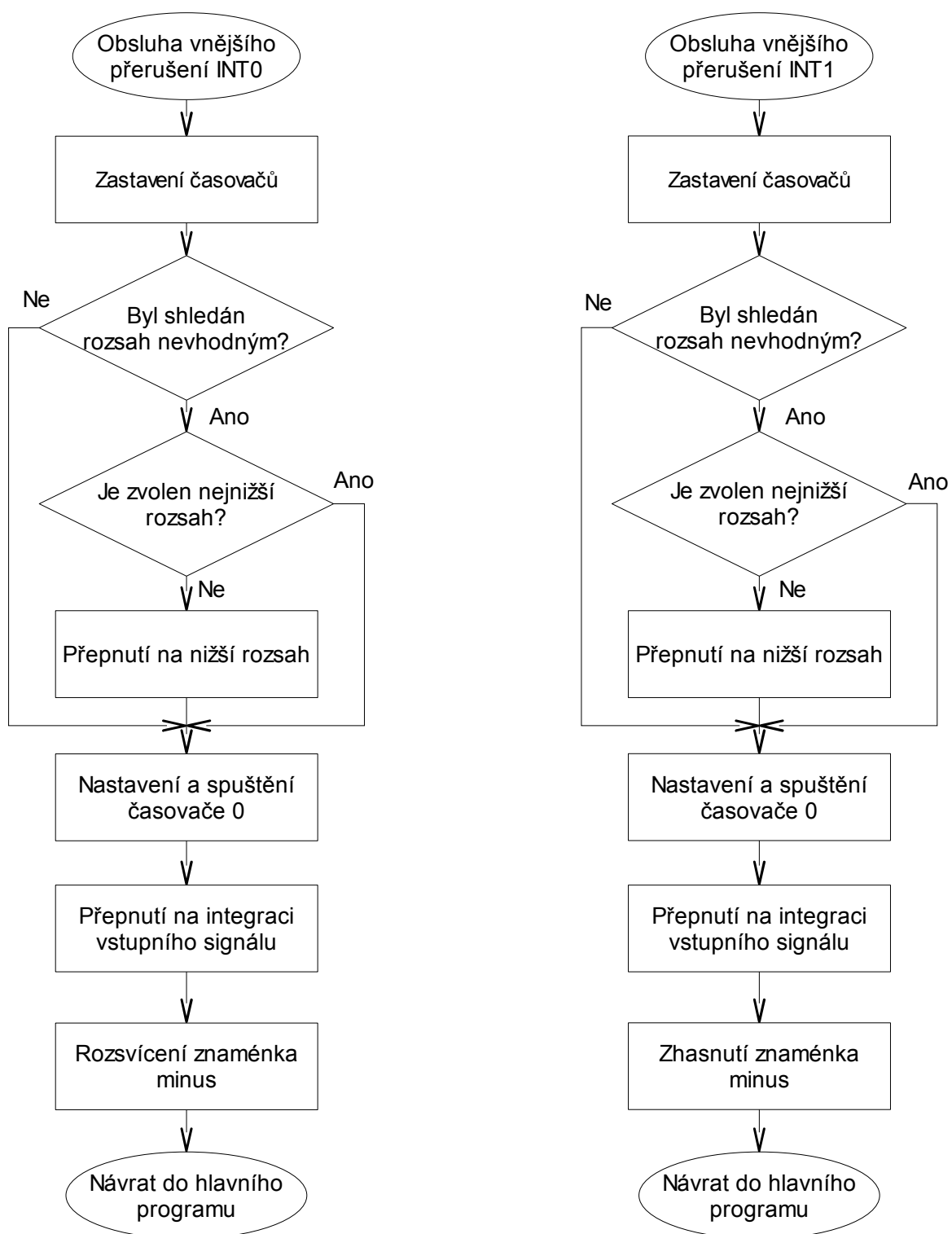
Přesnost převodu závisí na dodržení doby integrace a je tudíž nutné volit konstanty časovače s ohledem na prodlevy při vykonávání programu a operace s časovači vždy vykonávat jako první.

Jelikož ovládací program podléhá neustálému vývoji, není zde uvedena jeho nejaktuálnější verze, ale pouze vývojový diagram na obrázcích 23 a 24, které zachycují pořadí vykonávání nejdůležitějších operací, nikoliv už samotný způsob vykonání.

Je patrná podobnost vývojových diagramů obsluh vnějších přerušení, proto je na začátku obsluhy volán společný podprogram a teprve po jeho vykonání dochází podle zdroje přerušení k nastavení znaménkového bitu.



Obrázek 23. Vývojový diagram hlavního programu a obsluh přerušení obou časovačů



Obrázek 24. Vývojový diagram obsluh vnějších přerušení

7 Zhodnocení výsledků

Oživením a zkalibrováním všech modulů převodníku a vytvořením ovládacího programu dospěla práce ke svému závěru a je možné zhodnotit dosažené výsledky a porovnat je s předem stanovenými požadavky.

7.1 Konfrontace požadavků a dosažených výsledků

Primárním požadavkem bylo vytvoření funkčního A/D převodníku pro měření proudu a napětí. Tomuto požadavku bylo vyhověno a vytvořený obvod umožňuje měření proudu v rozsahu do 200 mA a napětí v rozsazích 200 mV, 2000 mV a 20 V. Naměřené údaje se zobrazují na 4,5místném LED displeji.

Přesnost měření byla ověřována pouze pomocí číslicových multimetrů a chyba přístroje tedy odpovídá chybě těchto multimetrů. Pro dosažení větší přesnosti bylo nutné užít přesnější metody měření napětí při kalibraci, např. kompenzační metody. K té je však zapotřebí napěťový etalon, který při kalibraci převodníku nebyl k dispozici.

Z dalších požadavků lze jednoznačně za splněný považovat požadavek na modularitu zařízení. Splnění požadavků na jednoduchost a důkladnou dokumentaci prověří až nasazení převodníku do výuky a zpracování samostatných prací pro jeho další vývoj studenty.

Vývoj desek plošných spojů probíhal v souladu s požadavkem na co nejmenší rozměry a proto lze i tento požadavek považovat za splněný. Na propojovací desce jsou vyvedeny vstup a výstup sériového kanálu řídicího mikrokontroléru a lze tedy považovat za splněný i požadavek na možnost komunikace s osobním počítačem.

V případě nízké spotřeby a budoucí možnosti napájení z baterií však požadavek naplněn nebyl. Byť byly vybírány součástky s nízkou spotřebou, nelze snížit spotřebu převodníku proudu na napětí, jehož odběr odpovídá měřenému proudu. bylo by ovšem možné snížit spotřebu displeje užitím LCD zobrazovačů namísto LED.

Na závěr zbývá zhodnotit cenovou dostupnost projektu. při vývoji byl používán pouze software šířený pod otevřenou licencí GPL, nebo volně šiřitelné a funkčně omezené verze komerčních produktů. Jako zdroje informací byly primárně voleny dokumenty volně stažitelné ze sítě Internet. Pro kalibraci pak sloužily přístroje dostupné ve školní elektrolaboratoři a tudíž lze výdaje omezit pouze na užití součástky.

Nejdražším modulem se stal napájecí zdroj, byť byla užita celá řada součástek získaných z nefunkčních zařízení, bylo však nutné zakoupit síťový transformátor, filtrační kondenzátory a plastovou krabičku, jejichž cena činila v součtu téměř 500 Kč.

Za stejnou cenu pak bylo možno pořídit součástky pro všechny ostatní moduly, pokud by byl v době pořizování součástek k dispozici původně navržený typ jazýčkového relé. Díky užití mnoha recyklovaných součástek se tedy celkové náklady převodníku pohybují okolo 1 000 Kč.

Tato částka umožňuje pořízení číslicového multimetru s 3,5místným displejem a bez možnosti komunikace s osobním počítačem. Vytvořený převodník má sice omezenou oblast využití svými rozsahy, avšak možnost dalších úprav jej nadřazuje sériově vyráběnému multimetru. Proto lze i požadavek na cenovou dostupnost považovat za splněný.

Celkově lze tedy většinu původních požadavků považovat za splněnou, ovšem největší význam mají právě zkušenosti nabyté při realizaci projektu.

7.2 *Návrh budoucích rozšíření obvodu*

Na závěr je vhodné stanovit jaké další vývojové úkoly mohou studenti zpracovávat při rozvíjení funkčnosti převodníku.

Především se jedná o realizaci komunikace s osobním počítačem, která spočívá v návrhu vhodného komunikačního protokolu, dopsání příslušné rutiny do kódu řídicího mikropočítače a vytvoření ovládacího prostředí na straně PC. Vzhledem k trendu neosazování sériových portů do nových základních desek osobních počítačů bude pravděpodobně nutné i změnit typ ovládacího mikrokontroléru za typ vybavený USB komunikační sběrnici.

Další úpravy se týkají vstupního děliče, kde se nabízí rozšíření měřících rozsahů pro ampérmetr přepínáním zpětnovazebních rezistorů převodníku proudu na napětí. Další vhodnou úpravou bude přidání obvodu pro svedení přepětí na výstupu vstupního děliče, neboť napětí vyšší než napájecí by mohlo poškodit ostatní obvody.

Vstupní modul by bylo rovněž možno obohatit o možnost měření odporu, pokud by byl příložený rezistor připojen na stabilní zdroj proudu a velikost odporu se určovala z úbytku napětí. Při použití stávajících vodičů by se toto rozšíření dalo zajistit zakódováním měřících rozsahů do dvou bitů a zbývající signál využít pro indikaci měření odporu.

Dosavadní ovládací program rovněž nevyužívá funkci vestavěného vzorkovacího zesilovače. Pravidelné odebrání vzorků může ve spojení s vhodným rozhraním na straně osobního počítače umožnit vytvoření digitálního osciloskopu pro periodické děje.

Nepříjemným průvodním jevem je rychlé střídání hodnot na displeji, jež v případě nepříliš stabilní úrovně měřeného signálu znemožňuje čtení hodnot nižších řádů. Jako řešení se nabízí filtrace údajů stanovením průměru z několika následně odebraných vzorků.

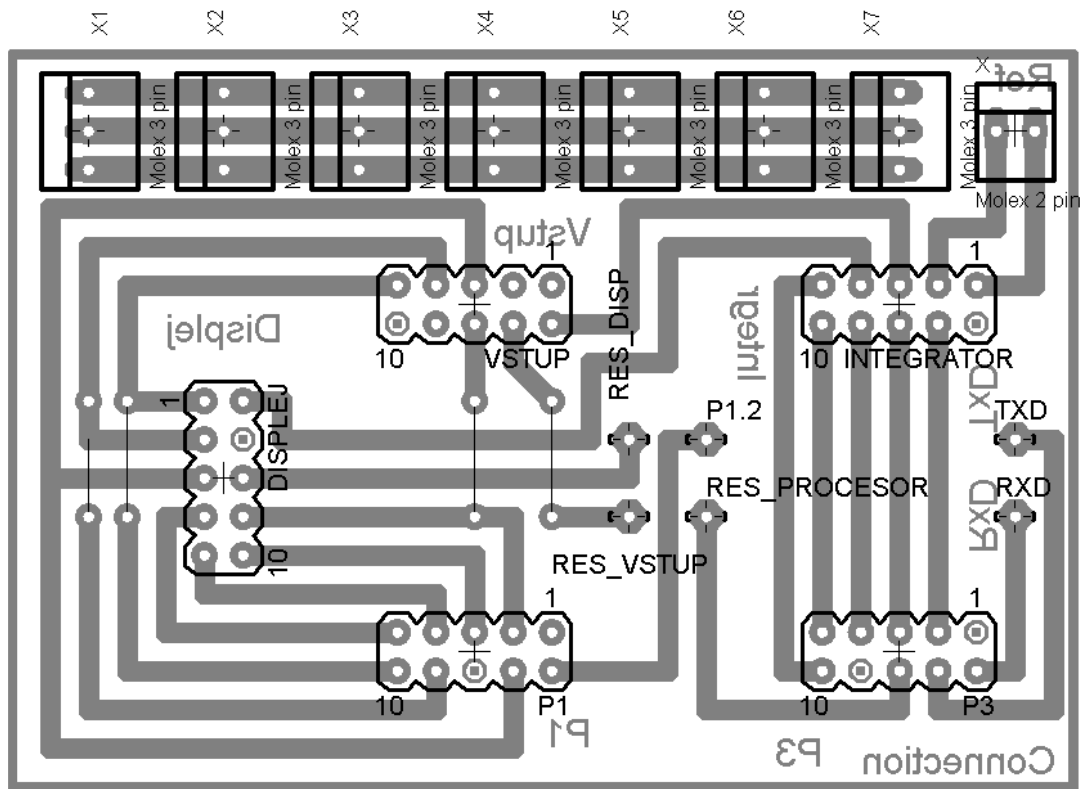
Navržené úpravy zcela jistě nevyčerpávají všechny možnosti rozšiřování obvodu a lze očekávat, že s přechodem škol na rámcové vzdělávací plány a vytvořením vhodných školních vzdělávacích plánů vzniknou vyučovací předměty umožňující studentům s nadstandardním zájmem o elektroniku a programování ve vývoji převodníku dále pokračovat.

Seznam užité literatury

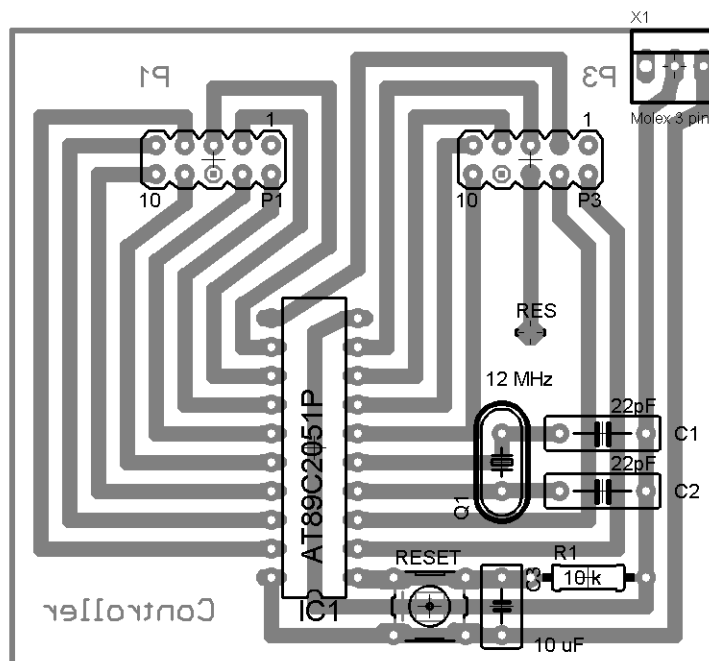
- [1] MATOUŠEK, D.: Práce s mikrokontroléry ATMEL AT89C2051. Praha, BEN – technická literatura, 2002, 2. vydání.
- [2] GOOK, M.: Hardwarová rozhraní – Průvodce programátora. Praha, Computer press, 2006.
- [3] PIRKL, J.: Řešené příklady v C# aneb C# skutečně prakticky. České Budějovice, KOPP, 2005.
- [4] DOSTÁL, J.: Aplikace analogově číslicových obvodů. Rožnov pod Radhoštěm, Tesla Rožnov, 1986.
- [5] Vzorkování spojitých signálů a jejich obnova [online]. Vysoká škola báňská Ostrava. [cit. 23.9.2007] Dostupné z <<http://home1.vsb.cz/~tum52/Projekty/Antialias.pdf>>.
- [6] HAASZ, V., SEDLÁČEK, M.: Elektrická měření – přístroje a metody. Praha, Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005, 2. vydání.
- [7] A/D a D/A převodníky [online]. Fakulta jaderné fyziky ČVUT. [cit. 5.10.2007] Dostupné z <http://praktika.fjfi.cvut.cz/data/VIP/V.Pospisil/scan/prevodniky%20A_D.pdf>.
- [8] Katalogové listy elektronických součástek [online]. Dostupné z <<http://www.alldatasheet.com>> a <<http://www.datasheetarchive.com>>.

Přílohy

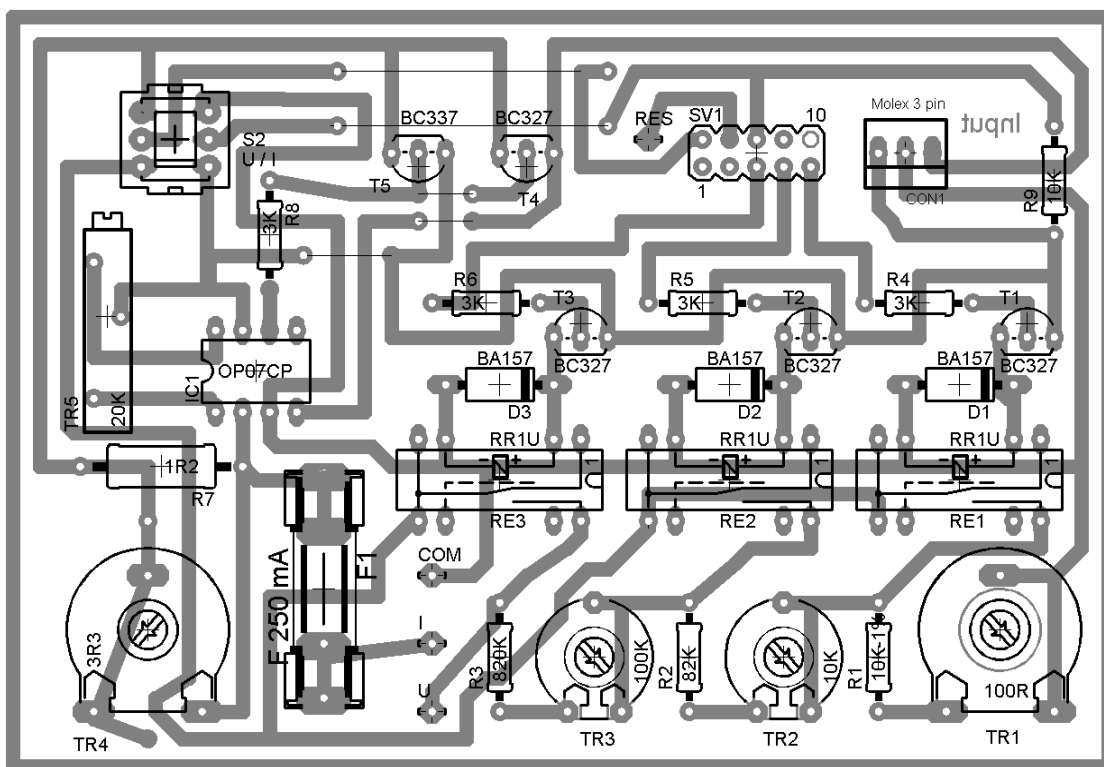
A Osazovací schémata desek plošných spojů



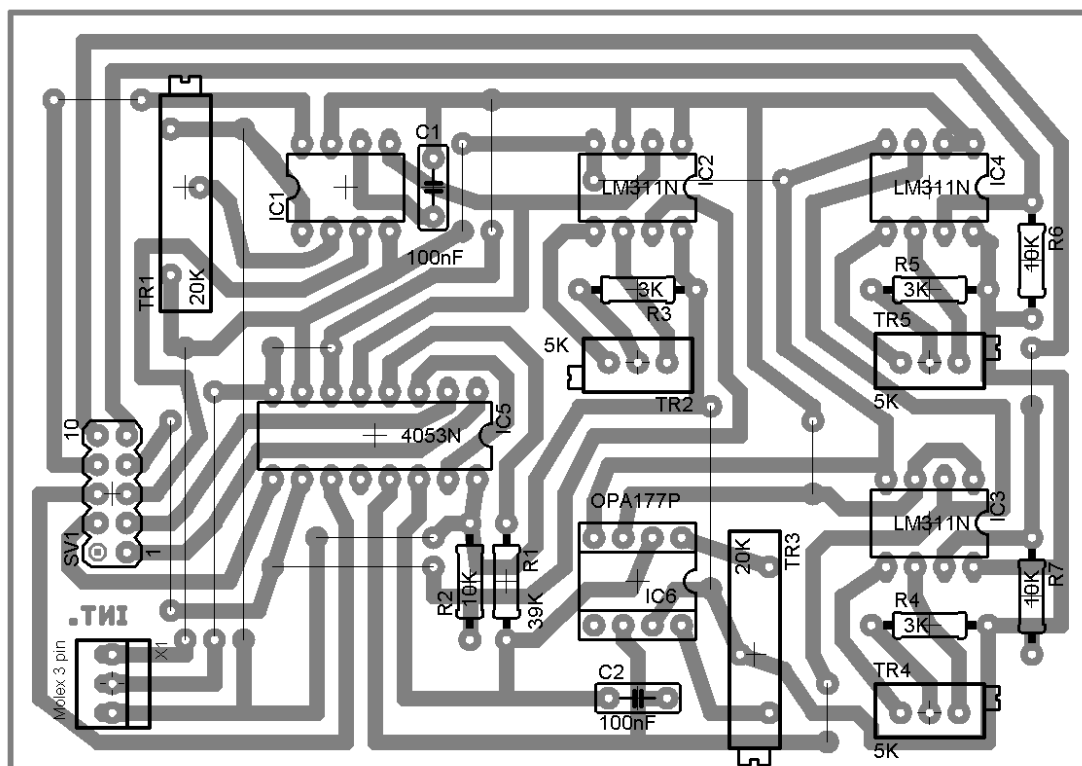
Obrázek 25. Propojovací deska



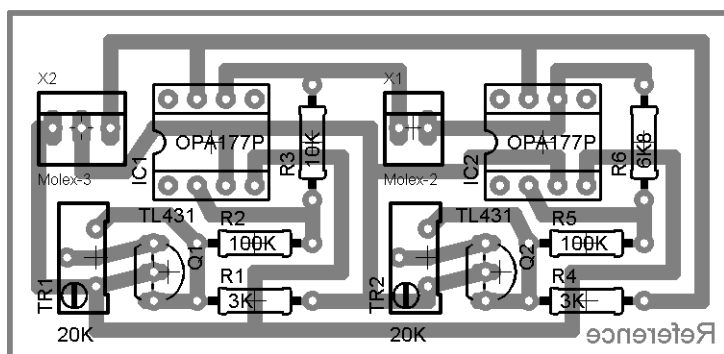
Obrázek 26. Řídicí obvod



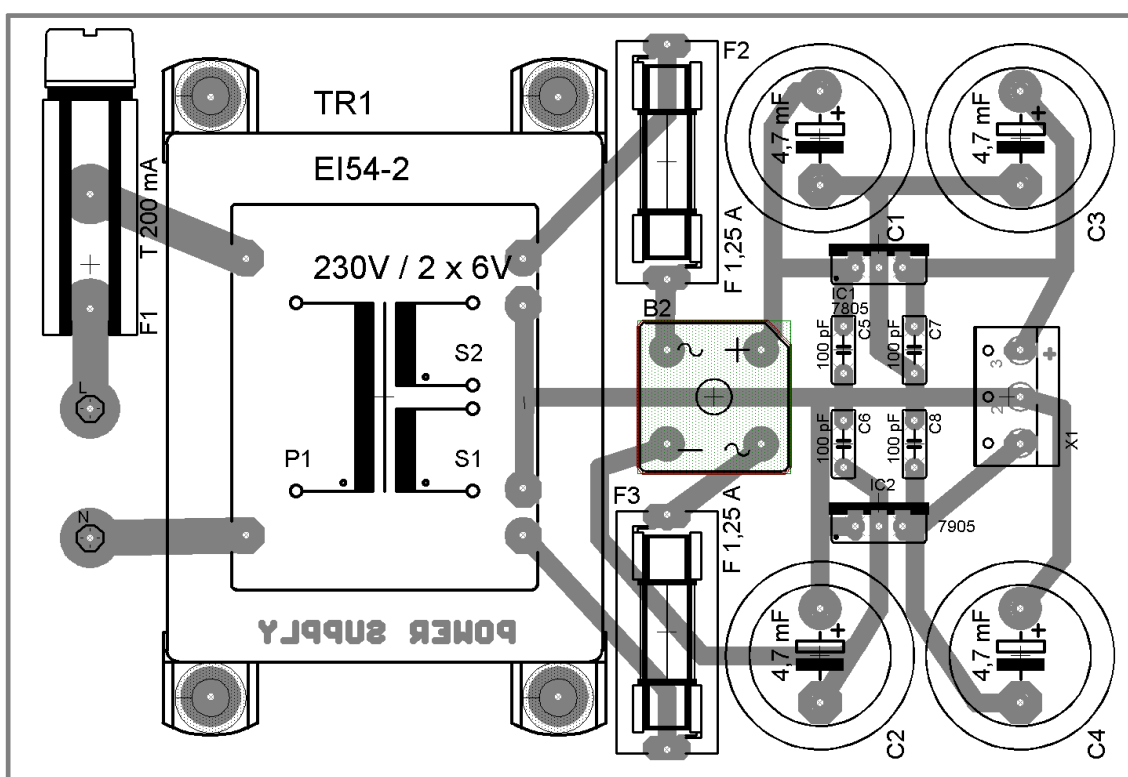
Obrázek 27. Vstupní dělič



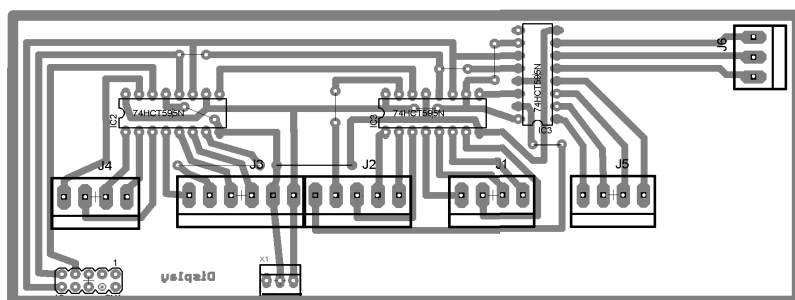
Obrázek 28. Integrátor



Obrázek 29. Zdroj referenčního napětí



Obrázek 30. Napájecí zdroj



Obrázek 31. Posuvný registr displeje