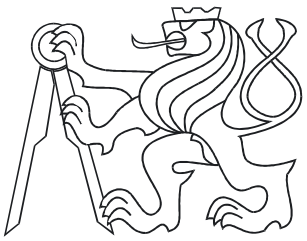
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měřič kapacit s integrovaným obvodem UTI

Jiří Richtr

2006

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne ....
podpis

Poděkování

Tato práce by nemohla vzniknout bez vedení Ing. Ondřeje Holuba, bez jeho podnětných připomínek a cenných rad. Za podporu při tvorbě také děkuji všem, kdo mě pomohli technickou radou či morální podporou. Zejména však děkuji svému otci, který je mi svým nadšením pro tento obor vzorem.

Abstrakt

Tato bakalářská práce měla za cíl sestavit zařízení pro měření malých kapacit do 2 pF s využitím integrovaného obvodu UTI03. Zařízení má výstupní signál obvodu UTI03 zpracovat a na LCD displej zobrazit poměr hodnoty měřené kapacity k referenční hodnotě. K ovládání měřicího obvodu UTI03 a zpracování jeho výstupního signálu, kde informaci o měřené kapacitě nese proměnná perioda pulsů, se využívá mikroprocesor AT89S52. Metoda zpracování vylučuje vliv kapacit přívodů a časová změna kapacity se na výstup zařízení přenáší metodou klouzavého průměru.

Abstract

This bachelor thesis aims at developing capacitive measuring device with measuring range of 2 pF. The measuring system is based on integrated circuit UTI03. The device processes output signal of the UTI and displays a ratio of unknown capacitance to reference value. Control of both, the UTI and data processing is provided by AT89S52 microcontroller.

Obsah

1 Úvod **1**
- 1.1 Návrh a stavba měřiče kapacit . . . 1
  - 1.1.1 Stavba prototypu . . . 1
  - 1.1.2 Návrh konečné podoby zařízení . . . 2
  - 1.1.3 Stavba a oživení zařízení . . . 2
- 1.2 Měření kapacity přelaďováním oscilátoru . . . 3

2 Popis měřicího obvodu **4**
- 2.1 Obvod UTI03 . . . 5
  - 2.1.1 Kalibrace třemi signály . . . 8
  - 2.1.2 Přesnost UTI . . . 9
  - 2.1.3 Obvodové řešení . . . 10
  - 2.1.4 Vyloučení vlivu kapacit přívodu . . . 11
- 2.2 Procesor AT89S52 . . . 12
  - 2.2.1 Třetí čítač/časovač . . . 12
- 2.3 Ostatní obvody v zařízení . . . 15
  - 2.3.1 Obvod oscilátoru procesoru . . . 15
  - 2.3.2 Resetovací obvod . . . 15
  - 2.3.3 Stabilizátor napětí . . . 16
  - 2.3.4 Invertor signálu . . . 17

3 Popis programu **18**

4 Výsledky měření **20**
- 4.1 První měření . . . 20
- 4.2 Druhé měření . . . 21
- 4.3 Třetí měření . . . 22

5 Závěr **23**

Literatura **24**

A Seznam součástek **25**

B Fotografie zařízení **27**

C Schéma zapojení **28**

Seznam obrázků

1.1 Blokové schéma oscilátoru 3

2.1 Blokové schéma měřicího obvodu 4
2.2 Rozložení vývodů na 16ti vývodovém DIL pouzdře UTI 5
2.3 Připojení kapacitních senzorů v módu C300 7
2.4 Výstupní signál IO UTI 7
2.5 Blokové schéma obvodu UTI 10
2.6 Funkční struktura měřicího obvodu UTI 10
2.7 Zapojení pro eliminaci vlivu parazitních kapacit 11
2.8 Rozložení vývodů na pouzdru procesoru AT89S52 12
2.9 Čítač/časovač 2 v záchytném režimu 14
2.10 Připojení krystalového rezonátoru k procesoru 15
2.11 Zapojení resetovacího obvodu 16
2.12 Invertor signálu 17

3.1 Vývojový diagram 19

B.1 Měřicí obvod 27

C.1 Schéma zapojení 28

Seznam tabulek

2.1 Módy měření UTI 6
2.2 Rozložení bitů v registru T2CON 13
2.3 Volba pracovního režimu T2 13

A.1 Seznam součástek 26

Kapitola 1

Úvod

Tato bakalářská práce vznikla z původně studentského projektu, který byl zadán Centrem aplikované kybernetiky [http://www.c-a-k.cz]. Cílem bylo postavit přístroj pro měření malých kapacit s přesností na cca $0,5 \cdot 10^{-}15$ F. Výsledek měření se měl přenášet po sériové lince do PC a tam zpracovávat a zobrazovat. Během stavby prototypu však bylo rozhodnuto, že přístroj bude samostatný a zpracovaný výsledek se bude zobrazovat pomocí znakového LCD. Takto rozšířené požadavky se staly podkladem pro zadání bakalářské práce.

1.1 Návrh a stavba měřiče kapacit

Jako základní stavební prvek byl zvolen integrovaný obvod UTI03 od firmy Smartec [http://www.smartec.nl], který je schopen bez dalších složitých rozhraní toto měření provádět a výsledek předávat v podobě pulsního číslicového signálu zpracovatelného mikropočítačem.

Na výběr vhodného procesoru měl vliv požadavek, aby bylo možno aplikaci přeprogramovat bez vyjmutí procesoru. Tomu vyhověl ze snadno dostupných procesorů AT89S52 firmy Atmel [http://www.atmel.com]. Tato volba se dále ukázala jako vhodná, když se jako prostředek měření signálu z UTI vybrala jedna ze specifických periferií řady procesorů x52 - čítač/časovač 2 se záchytným režimem.

Jako zobrazovací modul byl vybrán znakový LCD s integrovaným řadičem s velikostí zobrazovací plochy 2 x 16 znaků.

1.1.1 Stavba prototypu

Když byly potřebné součástky zakoupeny, přistoupilo se k testování funkce UTI, a to především v tom ohledu, zda v nepříliš příznivých podmínkách laboratoře [1] bude zřetelný a dobře měřitelný jeho výstup a jestli případné nevhodné připojení s předpokládanou parazitní kapacitou srovnatelnou s hodnotou měřeného prvku. Toto zkušební měření se

[1] Vzhledem k tomu, že UTI má jako výstup pulsní signál s poměrně nízkou frekvencí, nebyla jistota, zda nepronikne do tohoto signálu nízkofrekvenční rušení od síťových zdrojů

provádělo pomocí číslicového osciloskopu, a přestože odečítání délek period na jeho obrazovce lze považovat pouze za orientační, získané výsledky se překvapivě shodovaly s hodnotami udávanými v katalogu. Později byly výsledky některých měření konfrontovány s hodnotami naměřenými přesným RLC můstkem.

Dále se zkoušelo programování procesoru v aplikaci pomocí rozhraní ISP, kterým je možno programovat procesor prostřednictvím paralelního portu PC. Samotný algoritmus programování, který je určen výrobcem procesoru, uskutečňuje program *aec_isp.exe* [11]. K propojení PC a programovaného procesoru slouží kabel, zapojený podle [10]. Programování ISP se však ukázalo jako velmi citlivé na různé druhy rušení, nejdramatičtěji se projevila blízkost spínaného napájecího zdroje, byť poměrně nízkého výkonu. Později bylo od tohoto způsobu programování zcela upuštěno, ikdyž hardware aplikace ji stále umožňuje, protože z konzultace s jinými uživateli vyplynulo, že ISP je u této řady procesorů nespolehlivé obecně.

Prototyp zařízení se začal stavět na tzv. univerzální tištěný spoj, kde se řada propojek musela vést vnějšími vodiči. Zde bylo zprovozněno jak měření samotným obvodem UTI, tak i programování ISP. Z časových důvodů se ovšem v této fázi nedokončilo programové zpracování měření, ani se neuskutečnilo připojení LCD.

1.1.2 Návrh konečné podoby zařízení

Prvky použité v prototypovém kusu zařízení byly přeneseny i do návrhu jeho finální podoby. Přidáno bylo pouze samostatné napájení a konektor pro LCD.

Při návrhu plošného spoje v programu Eagle byl brán zřetel na okolnost, že jde o měřicí aplikaci a že se doporučuje připojení senzorů stíněnými vodiči, takže okolo vodivé cesty od rozhraní UTI k připojení konektorů pro měření byl proveden tzv. rozlitý zemní vodič.

1.1.3 Stavba a oživení zařízení

Během osazování desky plošných spojů součástkami bylo nutno vyřešit problém, kdy se se musela odstranit chyba vzniklá v návrhu desky; při křížení spojů ve schématu se automaticky vytvořil uzel, který zkratoval odpor ležící v cestě resetovacího signálu programovacího rozhraní. Tento odpor byl tedy umístěn do konektoru programovacího kabelu.

Když se začaly na postaveném zařízení zkoušet jeho dílčí funkce, ukázalo se, jak už bylo zmíněno v 1.1.1, že metodu programování ISP bude nutno nahradit pomocí paralelního paticového programátoru procesorů. K tomuto účelu posloužil univerzální programátor *51&AVRprog* firmy Elenec [`http://www.elnec.com`], postačující pro většinu procesorů Atmel řady x51 a AVR.

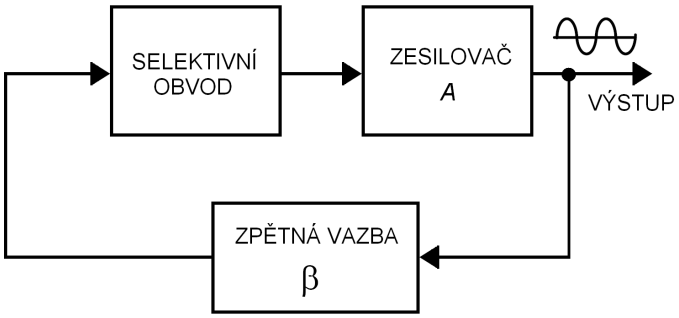
Další problém vyvstal s oživováním LCD. V návrhu byly umístěny řídicí a datové signály LCD modulu na jediný port procesoru, což se při komunikaci s displejem ukázalo jako kritické. Nejedná se však o problém principiální; bylo totiž zjištěno, že jiný kus LCD téměř shodného typu s totožným řadičem nemá potíže při komunikaci s procesorem. Ovšem problém byl vyřešen připojením řídicích signálů na volné vývody procesoru.

Se samotným procesorem a UTI nebyly potíže, oboje bylo od začátku plně funkční.

1.2 Měření kapacity přelaďováním oscilátoru

Než si popíšeme naše zařízení jako celek i jednotlivé části, přibližme si teoretický princip převodu kapacity na délku periody oscilátoru.

Elektronické zařízení přeměňující energii stejnosměrného proudu na energii proudu střídavého se nazývají generátory kmitů. Jako oscilátory bývají označovány generátory harmonických kmitů. Tyto harmonické kmity ovšem mohou být dále tvarovány. Perioda oscilátorů je závislá na jednom nebo více parametrech rezonančního obvodu. Bývají to zejména prvky kapactní a indukčnostní. Pro naši práci se teď zaměřme na závislost frekvence ocilátoru na kapacitě.



Obrázek 1.1. Blokové schéma oscilátoru

Uveďme si, za jakých podmínek bude obvod kmitat netlumenými periodickými kmity:

$$\varphi_{\mathrm{A}} + \varphi_{\beta} = 0$$

se nazývá fázová podmínka,

$$\beta A = 1$$

je podmínka amplitudová. Pro kmitání obvodu je nutné splnit obě dvě.

Měření kapacity na základě převodu její hodnoty na délku periody oscilátoru využívá rezonanci sériového nebo paralelního rezonančního obvodu LC nebo RC. Při zanedbání parazitních vlastností jednotlivých prvků platí pro rezonanční kmitočet LC oscilátoru Thomsonův vztah

$$f_{\mathrm{r}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

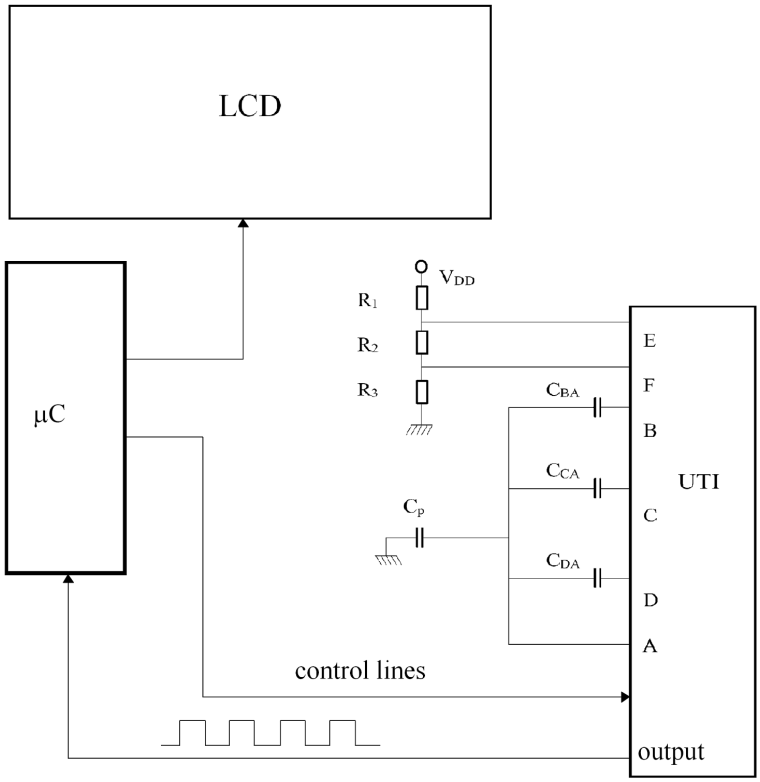
v případě oscilátoru RC se tento základní vztah modifikuje podle způsobu zapojení.

Z Thomsonova vztahu je tedy vidět, že pokud se mění jeden z parametů v něm obsažených, mění se frekvence výstupních kmitů oscilátoru.

Kapitola 2

Popis měřicího obvodu

Zapojení měřícího přípravku je realizováno s mikroprocesorem AT89S52, který nabízí dostatečné množství periférií a výpočetního výkonu, jež v této úloze ani nelze plně využít. Předností procesorů řady 8052 je, že jsou vybaveny čítatčem/časovačem T2 [6], který umožňuje práci v záchytném režimu, tzv. *Capture*. S jeho pomocí je možno dosáhnout větší přesnosti při měření délky periody vstupního signálu než při použití standardních čítačů/časovačů T0 nbo T1.



Obrázek 2.1. Blokové schéma měřicího obvodu

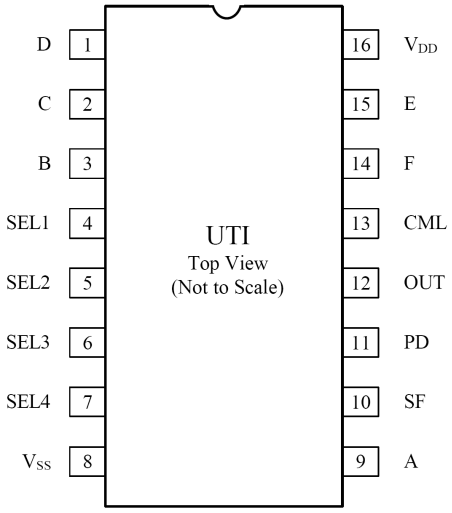
Měřicí obvod UTI je připojen k procesoru bitovými vodiči SEL1 až SEL4, PD a SF, jejichž funkce je popsána v 2.1. Výstup UTI je přímo připojen jednak k pinu procesoru P3.2 ($\overline{\text{INT0}}$), jednak na vstup invertoru, odkud vede k pinům procesoru P3.3 ($\overline{\text{INT1}}$) a P1.1 (T2EX). Ve všech případech jde o přerušovací vstupy čítačů/časovačů procesoru.

Jako výstup zařízení slouží znakový LCD modul, jenž je připojen 4-bitovým datovým rozhraním a řídicími vodiči k vstupně/výstupní bráně procesoru.

Vposled se na desce plošného spoje nachází napájecí obvody a podpůrné obvody pro procesor.

Popišme si zde tedy jednotlivé bloky zapojení podrobně.

2.1 Obvod UTI03



Obrázek 2.2. Rozložení vývodů na 16ti vývodovém DIL pouzdře UTI

Integrovaný obvod UTI (Universal Transducer Interface) firmy Smartec je převodník měřených veličin na pulsní, TTL kompatibilní signál s proměnnou periodou. Je určen pro konstrukci tzv. inteligentních senzorů (*Smart Sensor Systems*), které veličinu zároveň měří a požadovaným způsobem zpracovávají. Využívá se při tom jednočipových mikroprocesorů, které svým výkonem plně požadavkům těchto zařízení dostačují a nezvyšují výrazně jejich cenu. Pro spolupráci s takovým procesorem je právě obvod UTI připraven. Odstraňuje nutnost používání A/D převodníku a umožňuje tak dosažení velké přesnosti měření bez dalších vložených prvků. Jeho ovládání spočívá v nastavování několika bitových vodičů [5]:

- SEL1 až SEL4 slouží k nastavování módu měření,
- SF nastavuje rychlý (SF=1, *Fast*) nebo pomalý (SF=0, *Slow*) režim měření,

- PD slouží k uvádění do *power-down* módu (PD=0), kdy je snížena potřeba obvodu a výstup nastaven do stavu vysoké impedance,
- CML se nastavuje do logické '0' ve všech módech měření s výjimkou módu CMUX, kdy se jím určuje měřicí rozsah na 0-2 pF(CML=0) nebo 0-12 pF (CML=1).

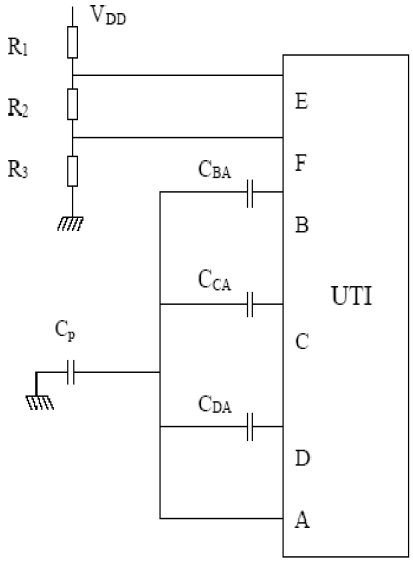
V závislosti na konfiguraci vstupů SEL1 až SEL4 umožňuje obvod UTI měření v 16 různých módech.

SEL1	SEL2	SEL3	SEL4	Mode	No. of Phases	Name	Mode No.
0	0	0	0	5 Capacitors, 0-2pF	5	C25	0
0	0	0	1	3 Capacitors, 0-2pF	3	C23	1
0	0	1	0	5 Capacitors, 0-12pF	5	C12	2
0	0	1	1	Capacitors, 0-2pF, external MUX CML=0 Capacitors, 0-12pF, external MUX CML=1	-	CMUX	3
0	1	0	0	3 Capacitors, variable range to 300pF	3	C300	4
0	1	0	1	Platinum resistor Pt100-Pt1000, 4-wire	4	Pt	5
0	1	1	0	Thermistor 1k Ω-25k Ω, 4-wire	4	Ther	6
0	1	1	1	2 or 3 platinum resistors Pt100-Pt1000	5	Pt2	7
1	0	0	0	2 or 3 thermistors, 1k Ω-25k Ω	5	Ther2	8
1	0	0	1	Resistive bridge, ref. is Vbridge, +/- 200mV	3	Ub2	9
1	0	1	0	Resistive bridge, ref. is Vbridge, +/- 12.5mV	3	Ub1	10
1	0	1	1	Resistive bridge, ref. is Ibridge, +/- 200mV	3	Ib2	11
1	1	0	0	Resistive bridge, ref. is Ibridge, +/- 12.5mV	3	Ib1	12
1	1	0	1	Res. bridge and two resistors, +/- 200mV	5	Brg2	13
1	1	1	0	Res. bridge and two resistors, +/- 12.5mV	5	Brg1	14
1	1	1	1	3 Potentiometers 1k Ω -50k Ω	5	Potm	15

Tabulka 2.1. Módy měření UTI

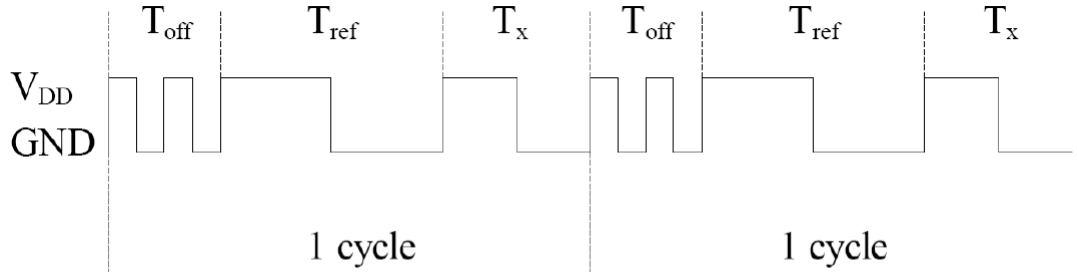
Senzory se připojují k rozhraní pomocí vývodů A až F, a to v závislosti na módu činnosti. V módech, které využívá naše zařízení, jsou samotné kapacitní prvky připojeny

pouze třemi vodiči a v případě módu C300 je ještě připojen napěťový dělič určující rozkmit měřicího signálu k vývodům E a F.



Obrázek 2.3. Připojení kapacitních senzorů v módu C300

Obvod umožňuje a v některých módech předpokládá spolupráci s externím multiplexerem, který je ovládán procesorem.



Obrázek 2.4. Výstupní signál IO UTI

Pulsní výstupní signál se skládá z několika cyklů podle zvoleného módu, jednotlivé cykly pak sestávají ze třech fází.

První fáze T_{off} reprezentuje offset měřicíh zapojení. Obsahuje dvě periody, aby bylo snažší jednotlivé fáze od sebe rozeznat. Perioda další fáze T_{ref} odpovídá referenční hodnotě, která je nutná pro měření a výpočet neznámé hodnoty měřené veličiny, jíž je úměrná poslední fáze T_{x}.

2.1.1 Kalibrace třemi signály

Tato technika eliminuje vliv neznámého offsetu a neznámého zesílení v lineárním systému. Předpokládejme lineární převodní charakteristiku

$$M_{\text{i}} = kE_{\text{i}} + M_{\text{off}}. \tag{2.1}$$

Měřené tři signály jsou

$$M_{\text{off}} = M_{\text{off}}, \qquad M_{\text{ref}} = kE_{\text{ref}} + M_{\text{off}}, \qquad M_{\text{x}} = kE_{\text{x}} + M_{\text{off}}. \tag{2.2}$$

Pak výsledné měření dáme do poměru

$$M = \frac{M_{\text{x}} - M_{\text{off}}}{M_{\text{ref}} - M_{\text{off}}} = \frac{E_{\text{x}}}{E_{\text{ref}}}. \tag{2.3}$$

V tomto poměru je vliv neznámého offsetu M_{off} a neznámého zesílení k odstraněn.

U integrovaného obvodu UTI odpovídají změřené hodnoty M_{off}, M_{ref} a M_{x} délkám period oscilátoru v jednotlivých fázích měřicího cyklu. Trvání jednotlivých fází úměrné signálům v těchto fázích měřeneným. V případě třífázového měřicího cyklu jsou doby fází dány:

$$M_{\text{off}} = NK_1C_0, \qquad M_{\text{ref}} = NK_1\left(C_{\text{ref}} + C_0\right), \qquad M_{\text{x}} = NK_1\left(C_{\text{x}} + C_0\right) \tag{2.4}$$

pro měření kapacity a

$$M_{\text{off}} = NK_2V_0, \qquad M_{\text{ref}} = NK_2\left(V_{\text{ref}} + V_0\right), \qquad M_{\text{x}} = NK_2\left(V_{\text{x}} + V_0\right) \tag{2.5}$$

pro měření odporu, kde

C_{x} a V_{x} jsou neznámé měřené veličiny,

C_{ref} a V_{ref} jsou referenční signály,

K_1 a K_2 zesílení pro jednotlivé módy měření.

Činitel N je reprezentuje počet period vnitřního oscilátoru v jedné fázi výstupního signálu UTI. Jeho hodnota je určena zvoleným režimem měření (*Slow*/*Fast*). V pomalém módu (*Slow*) je $N = 1024$, v rychlém módu (*Fast*) $N = 128$. Při zpracování výstupního signálu UTI se určuje počet period hodinových impulsů odpovídající trvání fáze signálu. Z takto získaných hodnot N_{off}, N_{ref} a N_{x} se vypočítá poměr M hodnot měřené a referenční veličiny $C_{\mathrm{x}}/C_{\mathrm{ref}}$ nebo $V_{\mathrm{x}}/V_{\mathrm{ref}}$ podle vztahů

$$M = \frac{N_{\mathrm{x}} - N_{\mathrm{off}}}{N_{\mathrm{ref}} - N_{\mathrm{off}}} = \frac{C_{\mathrm{x}}}{C_{\mathrm{ref}}} \tag{2.6}$$

nebo

$$M = \frac{N_{\mathrm{x}} - N_{\mathrm{off}}}{N_{\mathrm{ref}} - N_{\mathrm{off}}} = \frac{V_{\mathrm{x}}}{V_{\mathrm{ref}}}. \tag{2.7}$$

Vidíme, že takto získaný výsledek nezávisí na offsetu zapojení ani na zesílení systému. Pokud se tedy tyto hodnoty v průběhu měřicího cyklu dramaticky nezmění, je jejich vliv zcela potlačen.

2.1.2 Přesnost UTI

Přesnost měření je u obvodu UTI omezena kvantizačním šumem, který vzniká při vzorkování výstupního signálu. Ten je popsán relativní standardní odchylkou

$$\sigma_{\mathrm{q}} = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{t_{\mathrm{s}}}{T_{\mathrm{phase}}} \tag{2.8}$$

kde

t_{s} je vzorkovací perioda,

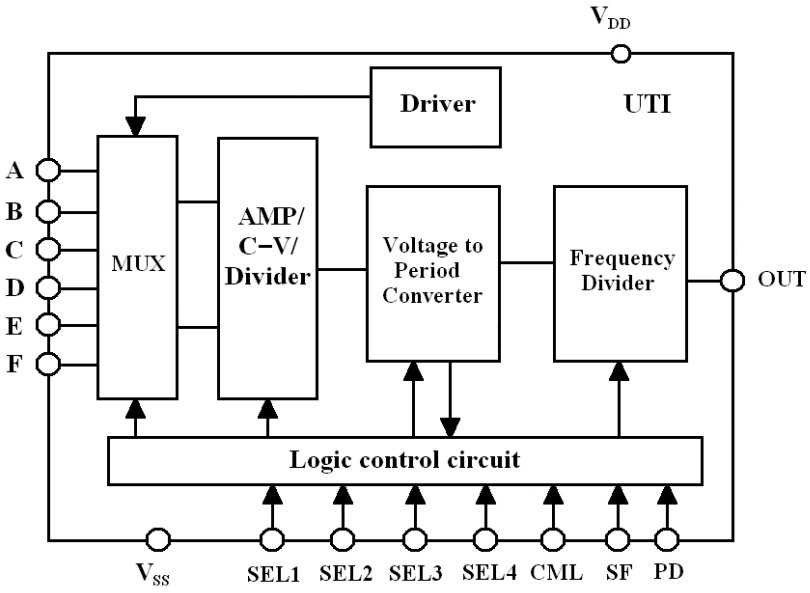
T_{phase} je délka měřené periody.

Při periodě vzorkování 1 μs dosahuje přesnost po rozšíření nejistoty na $3\,\sigma_{\mathrm{q}}$ 12,3 bitu v rychlém módu a 15,5 bitu v pomalém módu. Dalšího zlepšení přesnosti lze dosáhnout průměrováním z několika hodnot M. Je-li n počet hodnot $M_1 \ \ldots M_{\mathrm{n}}$, pak hodnota σ_{q} klesá s $\sqrt{n}$.

Vedle kvantizačního šumu zde působí i vlastní šum vnitřního oscilátoru UTI, ovšem ten je i v rychlém módu měření řádově menší než šum kvantizační.

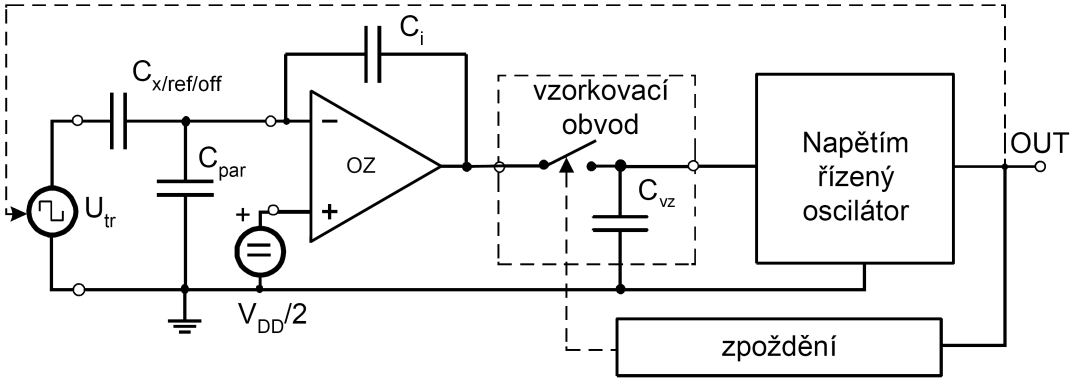
Linearitu rozhraní UTI výrobce udává v rozmezí 11 až 13 bitů.

2.1.3 Obvodové řešení



Obrázek 2.5. Blokové schéma obvodu UTI

Aby se vyloučil vliv kapacit přívodů, musí být měřený kondenzátor zapojen do zkratu.



Obrázek 2.6. Funkční struktura měřicího obvodu UTI

V ideovém schématu vnitřního zapojení měřicího obvodu 2.6 je operační zesilovač

zapojen jako převodník proud-napětí. Kvůli potlačení závislosti na kmitoctu je ve zpětné vazbě převodníku zapojen kondenzátor.

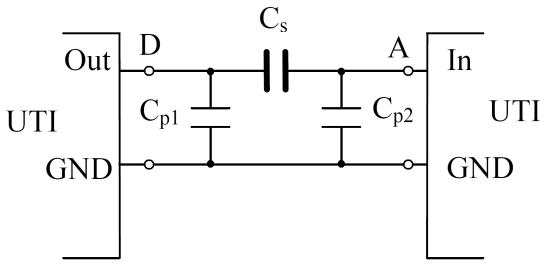
Pravoúhlý průběh budicího napětí je odvozen od oscilátoru generujícího výstupní signál. Vzorkování napětí na výstupu převodníku je také synchronizováno s výstupním signálem. Na výstupu vzorkovacího obvodu je stejnosměrné nebo pomalu proměnné napětí, úměrné amplitudě výstupního napětí převodníku, a tedy také hodnotě měřené veličiny, zde kapacity.

Vzorkovací obvod s kmitočtem řídicího signálu totožným s kmitočtem signálu výstupního se chová jako koherentní demodulátor se všemi příznivými důsledky na vyloučení vlivu rušivých napětí. Na demodulátor navazuje oscilátor řízený vstupním napětím. Délka jeho periody je úměrná vstupnímu napětí.

Zapojení pro odporové senzory se liší tím, že kapacita C_{x} je stálá a místo U_{tr} se měří napětí na neznámém R_{x} nebo referenčním R_{ref} odporu. Oba odpory v sérii jsou napájeny ze zdroje pravoúhlého napětí (oscilátoru). Aby se omezil vliv paralelně působících parazitních impedancí, získává se kmitočet budicího napětí z kmitočtu oscilátoru vyděleného čtyřmi.

2.1.4 Vyloučení vlivu kapacit přívodu

Parazitní kapacity přívodů k měřenému objektu se v případě velmi malých měřených kapacit mohou velikostí velmi blížit těmto měřeným kapacitám. Obvod UTI řeší tento problém čtyřsvorkovým připojením měřené kapacity.

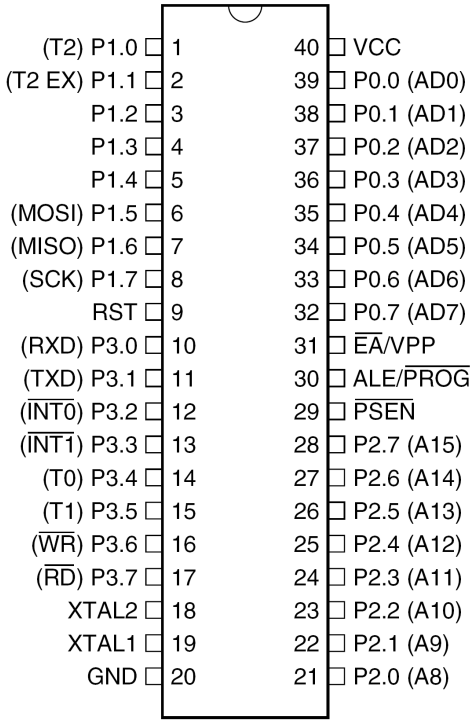


Obrázek 2.7. Zapojení pro eliminaci vlivu parazitních kapacit

Z vývodu D na obr. 2.7 je měřený objekt buzen zdrojem napětí, který se svými vlastnostmi blíží zdroji ideálnímu. Tím se při měření neuplatní C_{p1} Vstup A se chová jako ideální zdroj proudu, zde záporného, s nulovou impedancí, takže parazitní kapacita C_{p2} je zkratována a opět se neuplatní. Ve výsledku se tedy uplatňuje pouze sériová kapacita C_{s}.

2.2 Procesor AT89S52

AT89S52 je 8-bitový na harvardské architektuře založený procesor řady x51. Obsahuje 8 kB *In-System Programable* Flash paměti, 256 bytů vnitřní paměti RAM, tři 16-bitové čítače/časovače, 32 vstupně/výstupních bitových vodičů, plně duplexní obvod *UART*, hlídací obvod *Watchdog Timer*. Umožňuje práci v režimech se sníženou spotřebou (*Power-down Modes*), několik zdrojů vnějších přerušení, programování v aplikaci ISP (*In-System Programming*). Je možno použít vnější oscilátor s kmitočtem v rozmezí 0–33 MHz. Procesor je ve 40-ti vývodovém pouzdru PDIP.



Obrázek 2.8. Rozložení vývodů na pouzdru procesoru AT89S52

Popis celého procesoru by byl mimo rámec této práce, proto se při popisu zaměřme na třetí čítač/časovač, který je pro naši aplikaci kromě základních funkcí procesoru, jako jsou operace s registry a využívání vstupně/výstupních bran, zvláště využíván.

2.2.1 Třetí čítač/časovač

Třetí 16-bitový čítač/časovač se v návaznosti na značení čítačů/časovačů u procesorů řady x51 značí čítač/časovač 2 (T2). T2 může být využit v několika režimech činnosti:

- jako normální čítač s možností 16-bitového automatického přednastavení,
- pro generování rychlosti sériového kanálu,

- jako záchytný čítač/časovač - k zachycení času mezi údalostmi.

Jako čítač/časovač 0 a 1 může pracovat i T2 v režimu čítače vnějších událostí nebo časovače. Jednotlivé režimy činnosti se volí nastavením registru T2CON.

b7							b0
TF2	**EXF2**	**RCLK**	**TCLK**	**EXEN2**	**TR2**	**C/$\overline{\mathbf{T2}}$**	**CP/$\overline{\mathbf{RL2}}$**

Tabulka 2.2. Rozložení bitů v registru T2CON

Význam jednotlivých bitů je popsán např. v [3].

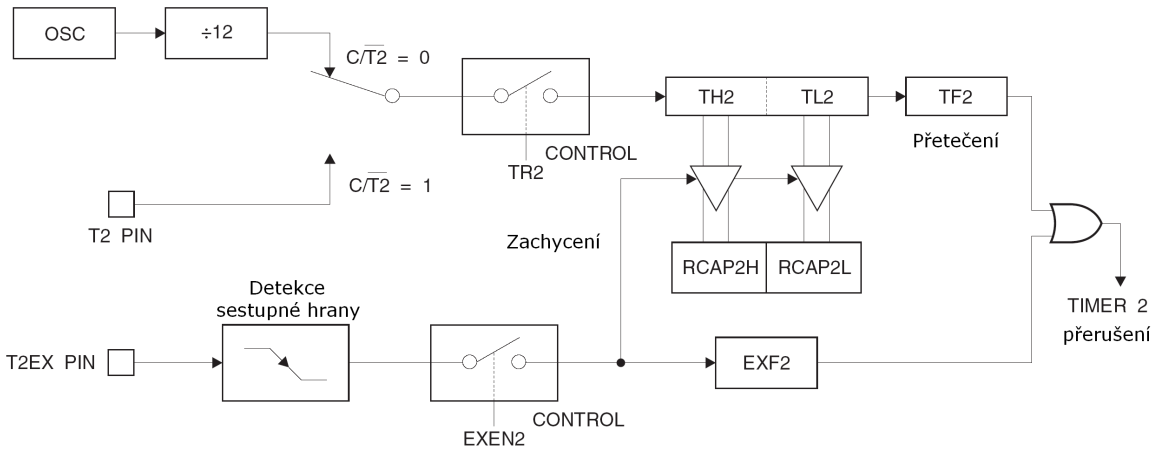
RCLK + TCLK	**CP/$\overline{\mathbf{RL2}}$**	**Režim**
0	0	16-bitový s automat. přednastavením
0	1	16-bitový záchytný
1	X	generátor přenosvé rychlosti sér. kanálu

X - libovolný stav

Tabulka 2.3. Volba pracovního režimu T2

Popišme si na tomto místě podrobněji režim činnosti T2 jako záchytného čítače/časovače (*Capture Mode*), tedy režim, který naše aplikace využívá. V tomto režimu je možno provozovat T2 dvěma způsoby, a to podle nastavení bitu EXEN2. Je-li EXEN2=0, pak T2 pracuje jako standardní 16-bitový čítač nebo časovač [1] (podle nastavení bitu C/$\overline{\mathbf{T2}}$), který při přetečení nastavuje příznakový bit TF2. Tento příznakový bit může vyvolat přerušení. Na rozdíl od bežného čítače/časovače se však musí u T2 příznakový bit TF2 v obsluze vyvolaného přerušení vynulovat programově. Druhý způsob funkce T2 se zvolí nastavením EXEN2=1. Pak se T2 chová stejně jako v předchozím případě, ale při sestupné hraně na vstupu T2EX dojde k uložení aktuální hodnoty T2 (registry TH2 a TL2) do registrů RCAP2H a RCAP2L. Současně s tím je nastaven i příznakový bit EXF2, od kterého může být (stejně jako od TF2) generováno přerušení. Toto je případ naší aplikace.

[1] Rozdíl mezi režimem čítače a časovače spočívá ve zdroji čítaných impulsů. *Časovač* přičítá do svého registru jedničku za každý strojový cyklus procesoru, tvořený 12 periodami oscilátoru. Zdroj impulsů je tedy vnitřní. Naproti tomu v režimu *čítače* se zvyšuje obsah registrů o jedničku při sestupné hraně signálu na příslušném vstupu procesoru, v případě čítače/časovače 2 jde o vstup T2. Vstupy se testují v každém strojovém cyklu procesoru. Jde tedy o čítač vnějších událostí.



Obrázek 2.9. Čítač/časovač 2 v záchytném režimu

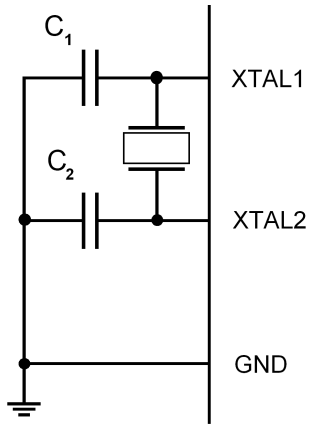
Výhodou tohoto módu činnosti je skutečnost, že čítač čítá impulsy bez jakékoliv přestávky v době přechodu do obsluhy přerušení nebo při jeho výkonu. Tím tedy nemůže dojít k chybě měření délky periody, která by vznikla, kdyby se čítač při vyvolání přerušení zastavil a opět spouštěl; tak by došlo k časovému zpoždění od začátku měřené periody do počátku měření času. Více o ostatních módech činnosti čítače/časovače 2 např. v [3] nebo v [8].

2.3 Ostatní obvody v zařízení

Kromě dvou shora popsaných integrovaných obvodů v zařízení pracuje ještě nekolik podpůrných obvodů, které zajišťují napájení celého systému, snižování napětí, změnu fáze signálu aj.

2.3.1 Obvod oscilátoru procesoru

Prvně zmiňme připojení krystalového rezonátoru ke vnitřnímu oscilátoru procesoru. Procesory řady x51 prakticky bez výjimky [2] vyžadují externí krystalový rezonátor zapojený na piny procesoru, které jsou vyvedeny z vnitřního aktivního kmitavého obvodu. Většinou umožňují poměrně široký rozsah kmitočtů; v našem zařízení je osazen krystal kmitající na kmitočtu 11,0592 MHz. Tento kmitočet se používá zejména v aplikacích, kde probíhá komunikace procesoru s jiným zařízením podle standardu *RS-232*[3], kde je po příslušném vydělení tento kmitočet schopen synchronizace přenosové rychlosti. Zde byl zvolen v době vzniku prototypu zařízení, kdy se zvažovala možnost komunikace s PC. K rezonátoru je nutno připojit paralelně dva blokovací kondenzátory na zemní vodič. Jejich hodnota (33 pF) a způsob zapojení jsou převzaty z katalogového listu výrobce procesoru [9].



Obrázek 2.10. Připojení krystalového rezonátoru k procesoru

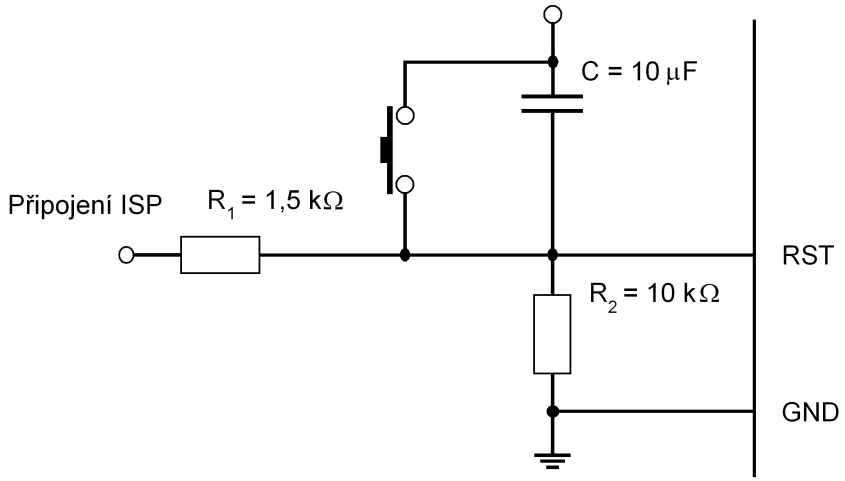
2.3.2 Resetovací obvod

Procesor je vybaven nulovacím vstupem, při jehož aktivaci dojde k nastavení obsahu všech registrů a paměti RAM na počáteční hodnotu a spuštění nového běhu programu.

[2] Některé vývojově mladší řady mikrokontrolérů z důvodů jednoduchosti a snížení ceny aplikace mívají vestavěný RC oscilátor.

[3] Více o této normě např v [9]

AT89S52 má aktivní úroveň vstupu RST (*Reset*) v logické '1'. Zapojení tohoto obvodu bylo navrženo podle požadavků [10] s doplněním ručního tlačítka.



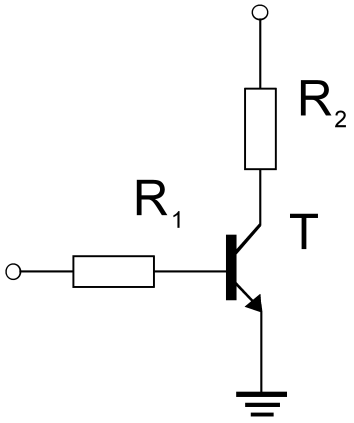
Obrázek 2.11. Zapojení resetovacího obvodu

2.3.3 Stabilizátor napětí

Pro napájení celého zařízení slouží stabilizátor napětí LM78L05 s ve standardním zapojení. Oba integrované obvody mají v bezprostřední blízkosti připojen mezi vodič V_{DD} a GND zapojen blokovací kondenzátor o velikosti 100 nF pro odfiltrování zákmitů na napájení.

2.3.4 Invertor signálu

Vzhledem k tomu, že se v době návrhu zařízení uvažovala jiná varianta zpracování výstupního signálu z UTI [4], bylo třeba přivést na vstup jednoho z čítačů/časovačů 0 a 1 tento signál s opačnou fází. Požadavkem bylo, aby byla zachována dostatečná strmost hran signálu. Jako nejvhodnější se jevilo zapojení NPN tranzistoru se společným emitorem. Volba rezistorů, zejména R_1, se musela přizpůsobit požadavku na strmost hran, tedy na dostatečné a rychlé otevírání tranzistoru. Experimentálně byly stanoveny hodnoty $R_1 = 100\ k\Omega$ a $R_2 = 1\ k\Omega$.



Obrázek 2.12. Invertor signálu

[4] Podrobněji rozebráno v kapitole 3.

Kapitola 3

Popis programu

Program procesoru sestává z několika důležitých bloků:

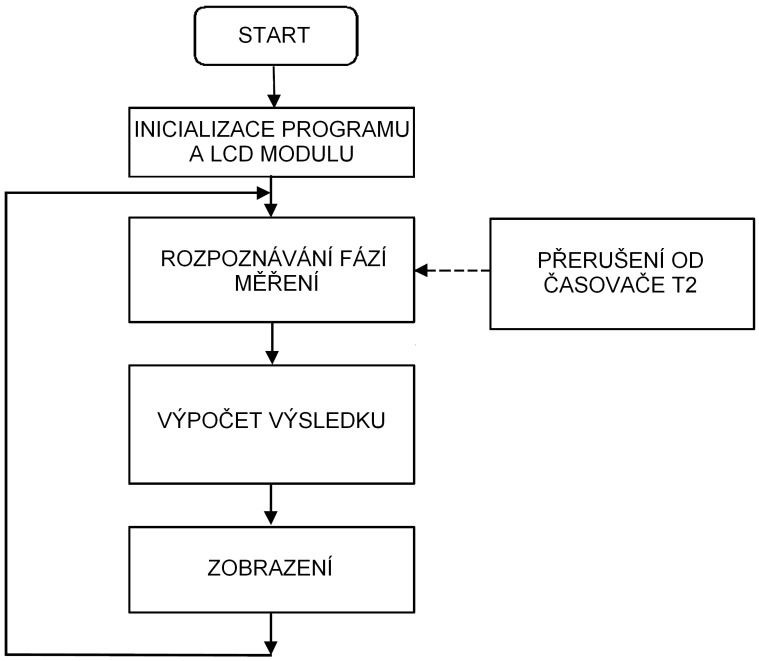
- ovládání řídicích vstupů obvodu UTI,
- měření doby periody výstupního sigálu UTI,
- rozpoznávání jednotlivých fází měřicího cyklu,
- počítání poměrné hodnoty kapacit vůči referenční hodnotě,
- komunikace s řadičem LCD modulu.

Prvním úkolem procesoru je provést inicializaci řadiče LCD modulu, aby mohly být nadále všechny měřené výsledky zobrazovány. Inicializace se skládá z posloupnosti příkazů posílaných po datové sběrnici do řadiče modulu v kombinaci s přepínáním řídicích signálů RS, RDWR a ENABLE. Tato posloupnost je určena výrobcem řadiče v katalogovém listě [7]. Určuje se jí nejdříve šířka datové sběrnice (4/8 bitů), počet znakových pozic displeje, poloha a blikání kurzoru. Příslušné programové rutiny pro pohyb kurzoru se využívají i při zobrazování znaků na displeji.

Program dále musí uvést měřicí obvod UTI do pracovního režimu z implicitního *power-down* módu do pracovního režimu. Ped započetím měření se ještě nastaví výstupní branou pomocí signálů SEL1 až SEL4 mód měření.

Při spuštění běhu programu se zapíná čítač T2, který je registrem T2CON nastaven do režimu 16-bitového záchytného čítače. Viz tab. 2.2 a 2.3.

Tento čítač začne čítat impulsy o kmitočtu 1/12 kmitočtu oscilátoru. V momentě, kdy se na pinu procesoru T2EX objeví sestupná hrana, se samočinně vyvolá přerušení od čítače/časovače T2. Ve stejné chvíli se také samočinně zapíší hodnoty v registrech TH2 a TL2 do registrů RCAP2H a RCAP2L. Ve vyvolaném přerušení se vynuluje příznak přerušení TF2 z registru T2CON a obsah registrů RCAP2H a RCAP2L se přepíše do datové proměnné. Zásadní nevýhodou je skutečnost, že díky spuštění čítače na začátku běhu programu není možno určit počátek první periody měřeného signálu. To je možno řešit připojením invertovaného signálu z výstupu UTI na pin T2EX, jako je to v naší aplikaci, případně tento invertovaný signál přivést na hradlovací vstup jednoho z čítačů/časovačů



Obrázek 3.1. Vývojový diagram

T0 nebo T1. Pak by se na počátku měřené periody vyvolalo sestupnou hranou (invertovaného) signálu přerušení, jehož obslužná programová rutina by spustila T2. Naše zařízení je i na tuto alternativu hardwarově připraveno, ale z důvodu, že softwarové spouštění a zastavování čítače T2 po vyvolání přerušení by představovalo ztrátu několika instrukčních cyklů, tedy snížení přesnosti v řádu desetin procenta, nebyla nakonec v programu uskutečněna.

V průběhu obslužného programu přerušení se dále zapíší hodnoty registrů RCAP2H a RCAP2L do připravených paměťových proměnných. V těch je prostor pro zaznamenání hodnot délek čtyř period, tedy jednoho měřicího cyklu v námi používaném módu měření C23. Při každém vyvolaném přerušení se tyto hodnoty posouvají ve smyslu fronty *FIFO*[1].

Po změření každého měřicího cyklu program setřídí hodnoty porovnáním tak, že vybere dvě nejkratší, které reprezentjí velikost offsetu (obr. 2.4), následující periodu vezme jako referenční a poslední jako periodu odpovídající neznámé měřené hodnotě kapacity. Tyto hodnoty dosadí do (2.6) a vypočte poměr neznámé a referenční kapacity M. K výpočtu se využívá podprogramu *ARITM4B* [13].

V další fázi programu se vypočtený výsledek převádí pomocí programové rutiny *BINTOASC* [12] na ASCII znaky, které se uloží připravených proměnných, z nichž se zobrazují na displej.

Zde se smyčka programu uzavírá a vrací se do místa výpočtu výsledku změřených hodnot.

[1] *First-In, First-Out*

Kapitola 4

Výsledky měření

Měřič kapacit se podařilo zprovoznit v závěru prací na této úloze, ale jeho funkčnost netrvala dostatečně dlouho, aby mohla být vyhodnocena jeho přesnost; došlo totiž k selhání některého funkčního bloku zařízení, který nebyl kvůli pevně vymezenému času odevzdání této práce zjištěn.

K vyhodnocení měření tedy máme omezený soubor hodnot, který byl naměřen v době zkoušení prototypu samotným obvodem UTI. Toto měření probíhalo v módu C300 (viz 2.1), ale dává dobrou představu o možnostech přesného měření s UTI.

Pro standardní nejistotu měření podle (2.6) platí:

$$u_{\mathrm{x/ref}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial x_{\mathrm{i}}} u_{\mathrm{xi}} \right)^2} = \tag{4.1}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{-1}{N_{\mathrm{ref}} - N_{\mathrm{off}}} u_{\mathrm{Tx}} \right)^2 + \left(\frac{-N_{\mathrm{x}} - N_{\mathrm{off}}}{(N_{\mathrm{ref}} - N_{\mathrm{off}})^2} u_{\mathrm{Tx}} \right)^2 + \left(\frac{N_{\mathrm{x}} - N_{\mathrm{ref}}}{(N_{\mathrm{off}} - N_{\mathrm{ref}})^2} u_{\mathrm{Tx}} \right)^2},$$

kde

$$u_{\mathrm{Tx}} = \frac{\Delta T_{\mathrm{x}}}{\sqrt{3}}. \tag{4.2}$$

c je rozlišovací schopnost osciloskopu na časové ose.

Máme tedy záznam ze třech měření:

4.1 První měření

$$M_{\mathrm{off}} = 21,8\,\mathrm{ms}, \qquad M_{\mathrm{ref}} = 57,2\,\mathrm{ms}, \qquad M_{\mathrm{x}} = 28,2\,\mathrm{ms},$$

kde

M_{off} reprezentuje neznámý kapacitní offset přívodů,

M_{ref} odpovádá $C_{\text{ref}} = 270\,\text{pF}$,

M_{x} odpovídá $C_{\text{x}} = 54\,\text{pF}$, tedy dvěma paralelně spojeným kondenzátorům 27 pF.

Po dosazení do (2.6) dostáváme

$$M = \frac{28,2 - 21,8}{57,2 - 21,8} = \frac{6,4}{35,4} = 0,1808.$$

Hodnoty ve vzorci jsou změřené časy v ms, výsledek je bezrozměrný poměr.

Pro porovnání s jmenovitou hodnotou součástky si spočtěme:

$$C_{\text{x}} = MC_{\text{ref}} = 0,1808 \cdot 270 = 48,816\,\text{pF}.$$

Výsledek se tedy blíží hodnotě, kterou bychom předpokládali. Rozdíl lze přičíst možným odchylkám součástek od jejich jmenovitých hodnot; u referenčního kondenzátoru výrobce udává toleranci 10 %, u měřených kondenzátorů 5 %. Do těmito odchylkami vymezeného intervalu vypočtená hodnota spadá.

Pokusme se vypočítat nejistotu měření:

V našem případě při použitém měřítku 10 ms na dílek činí T_{x} 0,1 ms. Po dosazení do (4.2) tedy

$$u_{\text{Tx}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,0577\,\text{ms}.$$

Když vše dosadíme do (4.1), dostaneme

$$u_{\text{x/ref}} = \sqrt{\begin{array}{c}\left(\frac{-1}{0,0572-0,0218} \cdot 5,77 \cdot 10^{-5}\right)^2 + \left(\frac{-0,0282-0,0218}{(0,0572-0,0218)^2} \cdot 5,77 \cdot 10^{-5}\right)^2 + \\ + \left(\frac{0,0282-0,0572}{(0,0218-0,0572)^2} \cdot 5,77 \cdot 10^{-5}\right)^2\end{array}} = \\ = 0,0031$$

4.2 Druhé měření

$M_{\text{off}} = 21,8\,\text{ms}, \qquad M_{\text{ref}} = 57,2\,\text{ms}, \qquad M_{\text{x}} = 25,2\,\text{ms},$

M_{x} tentokrát odpovídá $C_{\text{x}} = 27\,\text{pF}$.

Po dosazení do (2.6) dostáváme

$$M = \frac{25,2 - 21,8}{57,2 - 21,8} = \frac{3,4}{35,4} = 0,0960.$$

Ve vzorci jsou opět změřené časy v ms, výsledek je bezrozměrný poměr.

Zde zase porovnejme výsledek se jmenovitou hodnotou součástky:

$$C_{\mathrm{x}} = MC_{\mathrm{ref}} = 0,0960 \cdot 270 = 25,920\,\mathrm{pF}.$$

Pro odchylku od jmenovité hodnoty součástky platí totéž, jako u předchozího měření. Nejistota měření v tomto případě bude:

$$u_{\mathrm{x/ref}} = \sqrt{\begin{array}{c}\left(\frac{-1}{0,0572-0,0218} \cdot 5,77 \cdot 10^{-5}\right)^2 + \left(\frac{-0,0252-0,0218}{(0,0572-0,0218)^2} \cdot 5,77 \cdot 10^{-5}\right)^2 + \\ + \left(\frac{0,0252-0,0572}{(0,0218-0,0572)^2} \cdot 5,77 \cdot 10^{-5}\right)^2\end{array}} = 0,0004$$

4.3 Třetí měření

$$M_{\mathrm{off}} = 21,8\,\mathrm{ms}, \qquad M_{\mathrm{ref}} = 57,2\,\mathrm{ms}, \qquad M_{\mathrm{x}} = 34,0\,\mathrm{ms},$$

M_{x} tentokrát odpovídá $C_{\mathrm{x}} = 100\,\mathrm{pF}$.

Po dosazení do (2.6) dostáváme

$$M = \frac{34,0 - 21,8}{57,2 - 21,8} = \frac{12,2}{35,4} = 0,3446.$$

Ve vzorci jsou opět změřené časy v ms, výsledek je bezrozměrný poměr.

Při porovnání výsledku se jmenovitou hodnotou součástky dostáváme:

$$C_{\mathrm{x}} = MC_{\mathrm{ref}} = 0,3446 \cdot 270 = 93,051\,\mathrm{pF}.$$

Pro odchylku od jmenovité hodnoty součástky platí to, co u předchozích dvou případů. Nejistotu měření spočteme opět dosazením do (4.1):

$$u_{\mathrm{x/ref}} = \sqrt{\begin{array}{c}\left(\frac{-1}{0,0572-0,0218} \cdot 5,77 \cdot 10^{-5}\right)^2 + \left(\frac{-0,0340-0,0218}{(0,0572-0,0218)^2} \cdot 5,77 \cdot 10^{-5}\right)^2 + \\ + \left(\frac{0,0340-0,0572}{(0,0218-0,0572)^2} \cdot 5,77 \cdot 10^{-5}\right)^2\end{array}} = 0,0032$$

Vidíme, že s ohledem na metodu odečítání délek period je přesnost poměrně dobrá. K tomu však, aby se mohlo měřit s větší přesností je nutno zvolit způsob měření délek period s vyšším rozlišením. Pak je možno do výpočtu nejistot zahrnout i (2.8). Zde je tato nejistota pod rozlišovací schopností způsobu měření.

Kapitola 5

Závěr

Shrňme si tedy výsledky naší práce. Po rozvážení a hrubém nástinu koncepce měřiče kapacit, který vyplýval z požadavků zadání, bylo navrženo řešení, kdy funkci ovládání UTI a zpracování jeho výstupního signálu zastává mikroprocesor AT89S52.

V období stavby prototypu byly odzkoušeny základní bloky systému, totiž UTI a procesor. U procesoru se zkoušela především možnost jeho přeprogramování metodou ISP, aby se při případném požadavku na změnu funkce zařízení nemusel procesor vyjímat z patice. Později se od ní ovšem kvůli její nespolehlivosti ustoupilo. Zároveň se v tomto období testovalo rozhraní UTI. Zkoušelo se měření v jeho různých měřicích režimech, zejména však pro měření kapacity.

V návrhu konečné podoby zařízení se uplatnila četná zjištění ze zkoušek UTI. Především se na desce plošného spoje zkrátily vodivé cesty od měřicích vývodů UTI ke konektorům pro připojení měřených objektů na minimum a provedl se okolo nich tzv. rozlitý zemní vodič.

Při oživování se začaly rodit potíže, zvláště při komunikaci s výstupním LCD modulem, které nebyly zcela spolehlivě odstraněny do termínu odevzdání této práce. Celkově se podařilo uvést zařízení do provozu, takže bylo schopno měřit připojenou kapacitu a zobrazovat poměr její hodnoty k referenční kapacitě na displeji. Přesnost měření však nebyla ověřena pomocí srovnání výsledků měření s jiným přesným měřicím přístrojem, jak se původně zamýšlelo, protože došlo k poruše našeho měřiče kapacit. Tato porucha byla zpočátku diagnostikována jako průraz přechodu kolektor-báze tranzistoru, který otáčí fázi výstupního signálu z UTI. Po jeho výměně se však ukázalo, že poškozeny jsou i napájecí obvody. Poruchu se již nepodařilo odstranit.

Při vyhodnocování měření tedy byly zpracovány výsledky ze zkoušek na prototypovém kusu zařízení. Z výsledků celkově vyplynulo, že metoda, která se při těchto zkouškách použila, neumožňuje využití možností přesného měření s UTI, ačkoli i tyto výsledky jsou s ohledem na velikost měřených veličin uspokojivé a těžko dosažitelné běžnými měřicími metodami.

Během práce na tomto úkolu se ukázalo, že obvod UTI nabízí širší škálu způsobů využití, než se zamýšlelo v zadání této práce. Proto se zde tedy otevírá možnost měřič kapacit dále nejen zprovoznit odstraněním vzniklé závady, ale například rozšířením o možnost výběru z více módů kapacitního měření.

Literatura

[1] Skalický P. *Mikroprocesory řady 8051*. Praha: BEN, 1997. ISBN 80-86056-13-9

[2] Platil A., Ripka P. *Senzory a převodníky, Laboratorní cvičení*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02873-9

[3] Pražma V., Reznák M. *Obvody řady 8051 (Technický popis)*. ČSVTS, 1989. ISBN 80-02-99474-4

[4] Neumann P., Uhlíř J. *Elektronické systémy II - přednášky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1991. ISBN 80-01-00616-6

[5] *Universal Transducer Interface - UTI03*. Smartec. Datasheet. ⟨http://www.smartec.nl/pdf/Dsuti.pdf⟩.

[6] *Atmel 89S52*. Atmel. Datasheet. ⟨http://atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc1919.pdf⟩.

[7] *Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver HD44780U*. Hitachi. Datasheet. ⟨http://micro.feld.cvut.cz/home/X34MPC/Manualy/lcd_hitachi44780.pdf⟩.

[8] *Rozdíly mezi procesorem 8051 a 8052*. Technický popis. ⟨http://www.dhservis.cz/rozdily.htm⟩.

[9] *The RS232 STANDARD*. Tutorial. ⟨http://www.camiresearch.com/Data_Com_Basics/RS232_standard.html⟩.

[10] *AEC_ISP*. AEC electronics. Datasheet. ⟨http://www.aec-electronics.co.nz/aec_isp.pdf⟩.

[11] *AEC_ISP*. AEC electronics. Program. ⟨http://www.aec-electronics.co.nz/software.htm⟩.

[12] *BINTOASC*. www.8052.com. Program. ⟨http://www.8052.com/codelib/bintoasc.asm⟩.

[13] *Knihovny ARITM4B a UTILS*. Katedra měření FEL ČVUT. Program. ⟨http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/mip/libs.htm⟩.

Dodatek A

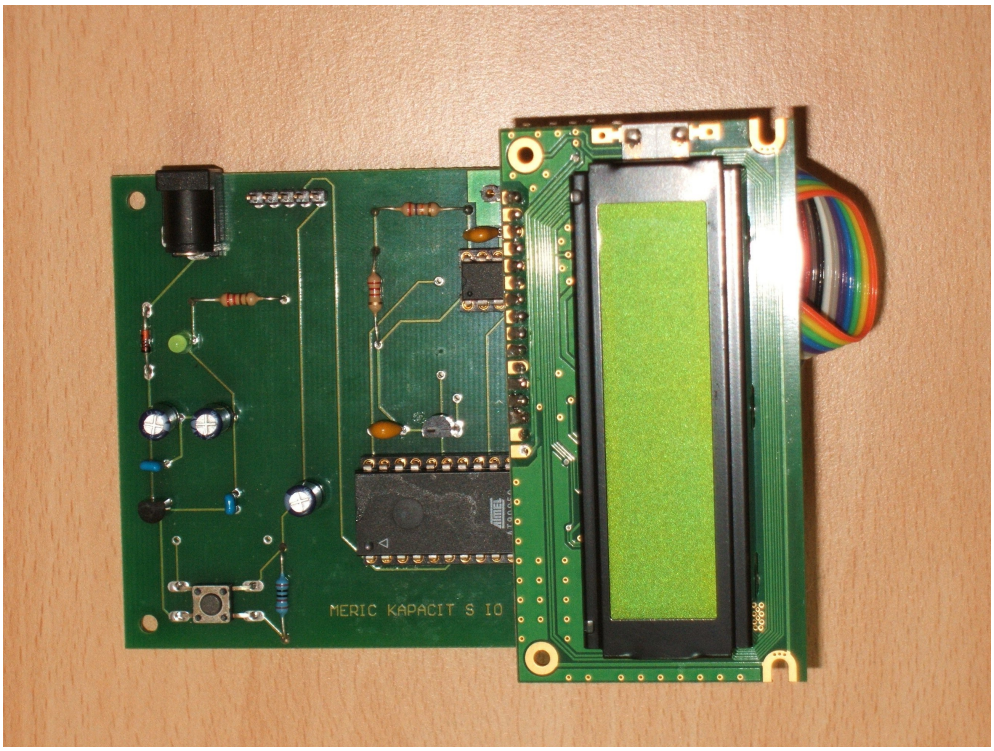
Seznam součástek

označení součástky	popis součástky
R_1	odpor 100 kΩ
R_2	odpor 220 Ω
R_3	odpor 1 kΩ
R_4	odpor 10 kΩ
R_5	odpor 1,5 kΩ
R_6	odpor 25 kΩ
R_7	odpor 2 kΩ
R_9	odpor 150 Ω
R_{10}	odporový trimr 100 kΩ
$C_{1,2}$	kondenzátor 33 pF
$C_{3,8}$	kondenzátor 10 nF
$C_{4,5}$	kondenzátor 100 nF
$C_{6,7}$	elyt. kondenzátor 47 μF/25 V
C_9	elyt. kondenzátor 10 μF/25 V
D_1	dioda 1N4148
D_2	LED zelená 3 mm/2 mA
Q_1	krystalový rezonátor 11, 0592 MHz
Q_2	tranzistor 2SC2603
IC_2	integrovaný obvod UTI03
IC_3	stabilizátor napětí LM78L05
IC_4	mikroprocesor AT89S52
X_1	napájecí vidlice K375A
$SV_{1,2,3,4}$	lámací konektorové kolíky
S_1	tlačítkový mikrospínač

Tabulka A.1. Seznam součástek

Dodatek B

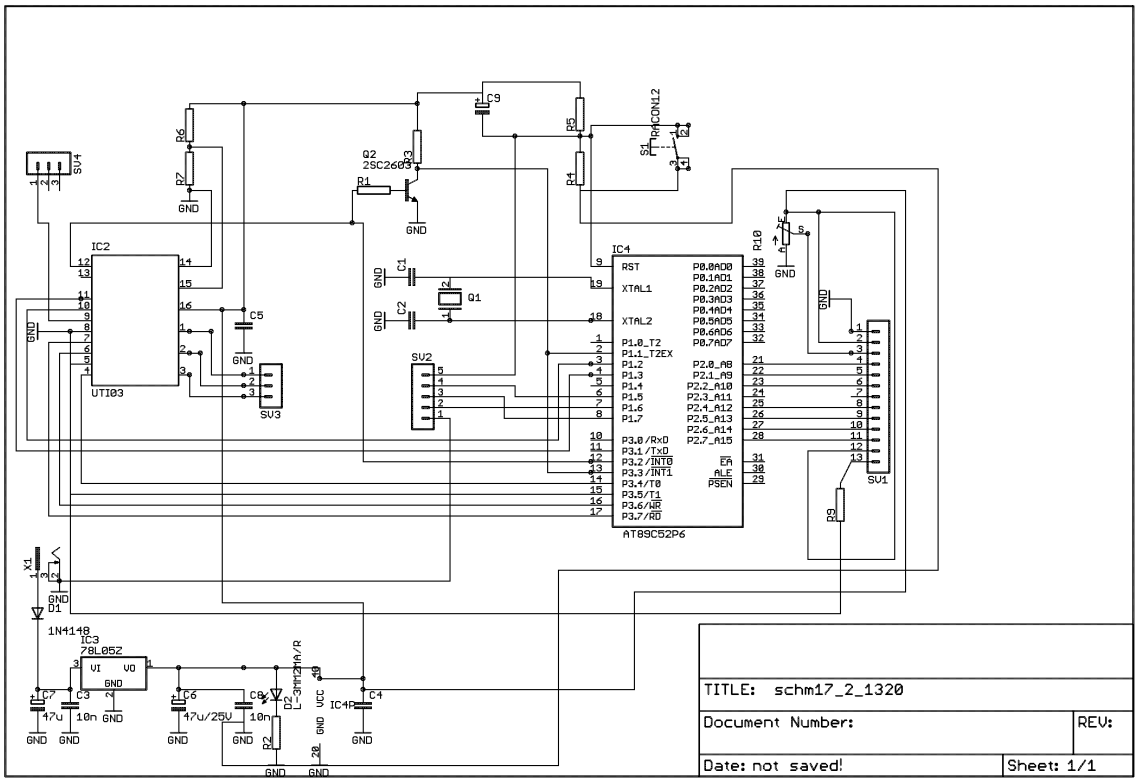
Fotografie zařízení



Obrázek B.1. Měřicí obvod

Dodatek C

Schéma zapojení



Obrázek C.1. Schéma zapojení