

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Kapacitní dotykové prvky pro ovládání elektronických zařízení
Čepička Tomáš

Bakalářská práce

2013

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Čepička**
Osobní číslo: **I09005**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Kapacitní dotykové prvky pro ovládání elektronických zařízení**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Proveďte detailní rozbor kapacitních dotykových prvků vhodných k ovládání elektronických zařízení. Zaměřte se především na běžné ovládací prvky, jako jsou tlačítka a posuvníky. Teoretickou část práce věnujte přehledu možných kapacitních dotykových prvků, jejich možnostem, principu funkce a jejich návrhu.

V praktické části realizujte vybrané kapacitní dotykové ovládání s využitím mikrokontroléru MSP430. Ověřte funkčnost a vlastnosti.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

BEZOUŠEK, Pavel, SCHEJBAL V. Elektrotechnika. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003. ISBN 80-7194-620-6.

ALBUS, Z. SLAA363A: PCB-Based Capacitive Touch Sensing With MSP430. Texas Instruments [online], 2007. Dostupné z: <http://www.ti.com/litv/pdf/slaa363a>

CHAN, V., UNDERWOOD, S. SLAA379: MSP430 Capacitive Single-Touch Sensor Design Guide. Texas Instruments [online], 2008. Dostupné z: <http://www.ti.com/litv/pdf/slaa379>

MAK, Z. SLAA481A: Two-Dimensional Capacitive-Touch Implementation Using the High-Resolution Timer_D of the MSP430F5132. Texas Instruments [online], 2012. Dostupné z: <http://www.ti.com/litv/pdf/slaa481a>

Capacitive Touch Sense Library. Texas Instruments [online]. 2012 [cit. 2012-11-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/capsenselibrary>

SLAU144I: MSP430x2xx Family User's Guide. Texas Instruments [online]. 2012 [cit. 2012-11-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/slau144i/slau144i.pdf>

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Lauterbach

Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

21. prosince 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

10. května 2013



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013

Prohlášení autora

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 29. 8 2013

Tomáš Čepička

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především své rodině, která tu pro mě byla po celou dobu studia a podporovala mě nejen finančně, ale především psychicky. Také bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Lauterbachovi za vedení mé práce a jeho pomoc při její tvorbě a jejího úspěšného dokončení.

Anotace

Úkolem této bakalářské práce, je provést detailní rozbor kapacitních ovládacích prvků k ovládání elektronických zařízení a realizovat kapacitní dotykové ovládání s mikrokontrolérem MSP430. Teoretická část práce se zabývá principem funkce kapacitního snímače, výhodami a nevýhodami kapacitní technologie a metodami zpracování na mikrokontroléru. Dále jsou v teoretické části popsány nejpoužívanější prvky kapacitního snímání. Praktická část práce obsahuje ověření doporučených postupů při návrhu kapacitních tlačítek a posuvníků, použitý software pro vývoj a také samotný návrh zařízení.

Klíčová slova

elektrická kapacita, kapacitní snímač, mikrokontrolér, MSP430

Title

Capacitive touch controls for electronic devices.

Annotation

The task of this bachelor work is to perform a detailed analysis of capacitive controls to control electronic devices and construct capacitive touch control device with MSP430 microprocessor. The theoretical part deals with the principles of the function, advantages and disadvantages of the technology and processing methods on the microprocessor. The theoretical part also describes the most common elements of the capacitive sensing. Practical work includes recommended practices in the design of capacitive buttons and sliders, used software and design and construct of the capacitive touch control.

Keywords

electric capacity, capacitive sensor, microprocesor, MSP430

Obsah

Seznam zkratek.....	9
Seznam obrázků.....	10
Seznam tabulek.....	10
Úvod.....	11
1 Kapacitní dotykové snímače.....	12
1.1 Princip funkce kapacitního snímače.....	12
1.2 Výhody a nevýhody kapacitních snímačů.....	15
1.3 Metody zpracování na mikrokontroléru.....	17
1.4 Softwarové parametry tlačítka.....	19
1.5 Okolní rušení a jeho vlivy.....	20
2 Používané prvky kapacitního ovládání.....	21
2.1 Tlačítka.....	21
2.2 Posuvníky.....	21
2.3 Dvourozměrná dotyková pole.....	23
2.4 Kapacitní dotykové displeje.....	24
2.5 Senzor přiblížení.....	27
3 Návrh kapacitního dotykového ovládání.....	28
3.1 Návrh kapacitního tlačítka.....	28
3.2 Návrh posuvníku.....	29
3.3 Překrývací izolační vrstva.....	30
4 Hardwarová realizace.....	32
4.1 MCU.....	32
4.2 Demonstrační deska kapacitního ovládání.....	33
4.3 Napájení.....	35
4.4 RGB LED dioda.....	35

5	Softwarová realizace	36
5.1	Rozhraní JTAG.....	36
5.2	Capacitive Touch Sense Library (CTS).....	37
5.3	Tlačítka a posuvník.....	39
6	Naměřené výsledky.....	43
6.1	Předpokládané průběhy	43
6.2	Naměřené výsledky	43
	Závěr	46
	Literatura	47
	Příloha A – Schéma zapojení.....	48
	Příloha B – Fotografie zařízení.....	49

Seznam zkratek

CTS Library	Capacitive Touch Sense Library
ITO	Indium Tin Oxide
MCU	Micro Controller Unit
LED	Light Emitting Diode
RGB	Red-Green-Blue
SBWTCK	Side-By-Wire Test Clock
SBWTDIO	Side-By-Wire Test Data Input Output

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Princip funkce [11]	13
Obrázek 2 - Struktura otevřeného kondenzátoru	13
Obrázek 3 - Metoda Relaxation Oscillator (RO) [6]	17
Obrázek 4 - Metoda Resistor-Capacitor (RC) [6]	18
Obrázek 5 - Metoda Fast Relaxation Oscillator (fRO).....	19
Obrázek 6 - Úrovně citlivosti	19
Obrázek 7 - Uspořádání vrstev snímače	21
Obrázek 8 - Lineární posuvník [11]	22
Obrázek 9 - Posuvník s větším rozlišením [11].....	22
Obrázek 10 - Kruhový posuvník [11].....	23
Obrázek 11 - Maticová kapacitní klávesnice [11].....	23
Obrázek 12 - Struktura dotykového displeje [8]	25
Obrázek 13 - Vyhodnocování polohy.....	25
Obrázek 14 - Odraz světla [4].....	26
Obrázek 15 - Senzor přiblížení [11]	27
Obrázek 16 - Základní parametry tlačítka [11]	28
Obrázek 17 - Šipkový tvar posuvníku [11]	29
Obrázek 18 - Závislost tloušťky izolantu na počtu pulsů [3]	31
Obrázek 19 - Mikrokontrolér MSP430G2553 (DIP pouzdro) [7].....	32
Obrázek 20 - Horní vrstva desky (TOP).....	34
Obrázek 21 - Spodní vrstva desky (BOTTOM)	34
Obrázek 22 - Schéma zapojení napájení.....	35
Obrázek 23 - Klasické a SMD provedení RGB diody.....	35
Obrázek 24 - Úrovně na posuvníku	42
Obrázek 25 - Naměřený počet impulsů v CCS	43
Obrázek 26 - Závislost pulsů na tloušťce izolantu	45

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Relativní permitivita materiálů [11]	14
Tabulka 2 – Používané izolanty [3].....	30
Tabulka 3 – Závislost pulsů na tloušťce izolantu	44

Úvod

Cílem této bakalářské práce je provést detailní rozbor kapacitních ovládacích prvků k ovládní elektronických zařízení a realizovat kapacitní dotykové ovládní s využitím mikrokontroléru MSP430 od firmy Texas Instruments. Druhá kapitola se zabývá vysvětlením principu funkce kapacitního snímače, výhodami a nevýhodami kapacitních snímačů a metodami zpracování na mikrokontroléru. Dále jsou v druhé kapitole stručně popsány softwarově nastavitelné parametry snímače a účinky okolních vlivů.

Ve třetí kapitole jsou popsány běžně používané prvky kapacitního ovládní od nejzákladnějších kapacitních snímačů ve formě tlačítek až po dotykové kapacitní displeje.

Čtvrtá kapitola popisuje parametry a postupy při návrhu kapacitních dotykových snímačů. Popisuje konkrétně postup při návrhu kapacitních tlačítek a posuvníku, jež jsou použity v praktické části práce. V této kapitole jsou také popsány hlavní parametry izolační vrstvy.

Pátá kapitola je zaměřena na konstrukci samotného zařízení. Jsou zde popsány jednotlivé součásti zvolené pro výrobu a také softwarové řešení.

Poslední šestá kapitola obsahuje naměřené výsledky.

1 Kapacitní dotykové snímače

Každý den se setkáváme s tím, že potřebujeme domácí spotřebiče, spotřební elektroniku a jiná elektronická zařízení určitým způsobem ovládat. Existují klasická mechanická ovládání a jde o různé vypínače, tlačítka, klávesnice, knoflíky. Od jisté doby se využívá nového, sofistikovanějšího způsobu ovládání, jež překonává problémy, které se vyskytují u mechanických spínačů. Tento způsob se nejprve začal objevovat ve spotřební elektronice. Šlo především o mobilní telefony, hudební přenosné přehrávače a postupem času až do dnešní doby se ho užívá k ovládání v širokém spektru zařízení. Řeč je o ovládání založené na dotykovém kapacitním snímání. S těmito kapacitními ovládacími prvky se dá běžně setkat u elektroniky například u zmíněných mobilních telefonů, televizí, hudebních přehrávačů, kuchyňských spotřebičů přes přístroje v laboratořích, ale i v průmyslu. Jde o nahrazení klasického mechanického ovládání obyčejnou snímací elektrodou tvořenou na desce plošného spoje, která je v nejčastějších případech umístěna pod krytem ovládaného zařízení a neobsahuje žádné mechanicky pohyblivé části. Nejčastěji se jedná o jednoduchá dotyková tlačítka či posuvníky, s kterými se nastavuje například hlasitost u televize, hi-fi soustavy nebo intenzita osvětlení aj. Na vrchol se stále více dostávají kapacitní displeje u mobilních telefonů, které postupně nahrazují displeje pracující na rezistivní technologii.

Kapacitní bezkontaktní snímání se hojně využívá v průmyslu pro snímání dílů vyrobených z kovů, plastu nebo skla pohybujících se po automatické lince nebo třeba pro zjišťování přítomnosti kapalných či sypkých látek. Kapacitní snímače vyhodnocují změnu kapacity vyvolanou právě předmětem, který vstoupí do elektrického pole snímače a toto pole naruší svou relativní permitivitou. Snímače snímají nejen elektricky vodivé, ale i nevodivé materiály, jejichž relativní permitivita je dostatečně velká pro změnu kapacity. [9] [10]

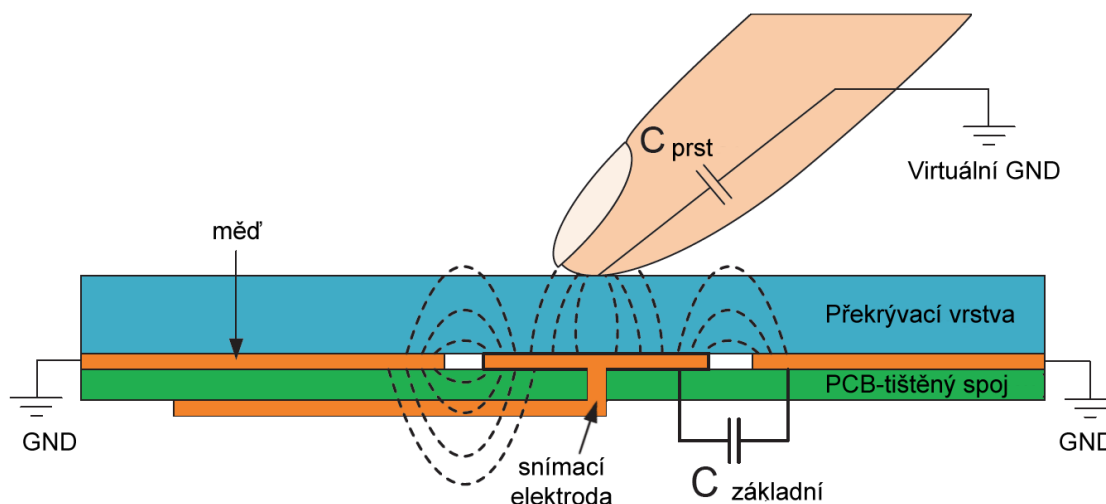
1.1 Princip funkce kapacitního snímače

Princip spočívá ve změně kapacity, která je vyvolána vnějším vlivem, nejčastěji prstem lidské ruky. Přiblížováním a oddalováním, kdy se mění vzdálenost od snímací elektrody, se potom mění i výsledná kapacita. Na obrázku 1 je vidět snímací elektroda, která má vzájemnou vazbu s okolní zemí a díky této vazbě má i určitou kapacitu. Tato kapacita je základní a platí tehdy, pokud není v blízkosti elektrody žádný vnější vliv, ovlivňující tuto kapacitu. V úvahu ještě připadají i parazitní kapacity, které vznikají na signálových spojích. Potom platí vztah 1.1. [8]

$$(1.1) \quad C_{\text{VÝSLEDNÁ}} = C_{\text{ZÁKLADNÍ}} + C_{\text{PARAZITNÍ}} \text{ [pF]}$$

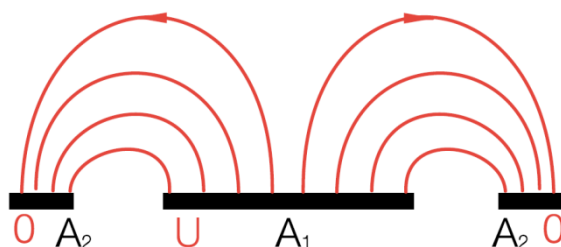
Při dotyku prstem nad elektrodou jsou původní vazby narušeny a k původní kapacitě se přičítá kapacita prstu a vztah 1.1 se pak mění o kapacitu prstu na vztah 1.2.

$$(1.2) \quad C_{\text{VÝSLEDNÁ}} = C_{\text{ZÁKLADNÍ}} + C_{\text{PARAZITNÍ}} + C_{\text{PRST}} \text{ [pF]}$$



Obrázek 1 - Princip funkce [11]

Základním prvkem potřebným pro kapacitní dotykové snímače je nějaká kapacita, tedy kondenzátor, který za určitých podmínek mění svou kapacitu. Dá se tedy říci, že kapacitní snímač je kondenzátor. Ovšem se nejedná o klasickou elektronickou součástku s dvěma vývody, velmi dobře známou z elektrotechnické praxe. Jde o vhodně upravený kondenzátor, který je vytvořený na desce plošného spoje. Nazývá se „otevřený kondenzátor“, případně kondenzátor s „otevřenou strukturou“. Otevřený se nazývá proto, že elektrody jsou rozloženy vedle sebe, nikoli proti sobě, jak je to typické a vzniká v jeho okolí otevřené elektrické pole. Lépe toto rozložení lze pochopit z obrázku 2.



Obrázek 2 - Struktura otevřeného kondenzátoru

Původní dvě protilehlé elektrody jsou nyní rozloženy vedle sebe. Jedna tvoří signálovou elektrodu snímače (A1) a druhá elektroda (A2) tvoří kolem signálové elektrody zem. Mezi těmito elektrodami pak v blízkém prostoru vzniká elektrostatické pole. Tento kondenzátor s „otevřenou strukturou“ má určitou kapacitu, která byla již zmíněna jako kapacita základní. Při dodržení podmínek při navrhování kapacitního snímače, bývá tato kapacita kolem 10pF pro snímač velikosti bříška lidského prstu tj. objekt kruhového tvaru o průměru zhruba 10mm.

Když je řeč o kapacitě, platí samozřejmě uvedený vzorec 1.3 pro její výpočet. Kapacita vzniká mezi dvěma elektrodami, které jsou z elektricky vodivého materiálu. Bez přítomnosti lidské ruky, jde o základní kapacitu vznikající mezi elektrodou a zemí. Při dotyku prstem pak je v této oblasti jedna elektroda prst lidské ruky a druhá elektroda je plocha snímací elektrody. Mezi těmito elektrodami je zpravidla nějaké dielektrikum.

V oblasti kapacitního snímače je toto dielektrikum tvořeno izolačním materiálem vykazující určité dielektrické vlastnosti. Nejdůležitější vlastnost je relativní permitivita, která se liší dle druhu materiálu. Tabulka 1 ukazuje některé druhy materiálů a jejich relativní permitivitu, která potom ovlivňuje velikost vznikající kapacity. V tabulce jsou uvedeny především nejpoužívanější materiály pro výrobu izolační překrývací vrstvy a materiály s tím související. [1]

$$(1.3) \quad C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} [F]$$

$$(1.4) \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r [F \cdot m^{-1}]$$

C celková kapacita

ε_0 permitivita vakua

ε_r relativní permitivita

S plocha elektrod

d vzdálenost mezi elektrodami

Ze vzorce jasně vyplývá, že čím větší je plocha elektrod (S) a čím menší je vzdálenost mezi těmito elektrodami (d), tím je potom větší výsledná kapacita (C). Vzdálenost mezi elektrodami, tedy mezi elektrodou a prstu při dotyku, se dá také chápat jako tloušťka izolační vrstvy.

Tabulka 1 – Relativní permitivita materiálů [11]

Materiál	Rel. permitivita - ε_r
Vzduch / vakuum	1
Voda	80
Polyethylen (PE)	2,16
Polyvinylchlorid (PVC)	2,51 ÷ 3,1
Plexisklo (PMMA)	3,6
Sklo (dle složení)	3,7 ÷ 10
Polystyren (PS)	2,4 ÷ 2,7
Sklolaminát (Cuprexit)	4,2
Papír	1,6 ÷ 2,6
Lepidlo 467MP/468MP	2 ÷ 3

1.2 Výhody a nevýhody kapacitních snímačů

Kapacitní snímače a další kapacitní snímací prvky, mají oproti mechanickým tlačítkům a jiným mechanickým snímačům obrovské výhody, ale mají i některé nevýhody. Následující text se právě věnuje popisu výhod a nevýhod kapacitní technologie.

1.2.1 Výhody

- **Životnost**

Oproti mechanickému ovládání má kapacitní technologie řadu obrovských výhod. Veliká a nenahraditelná výhoda je jejich životnost oproti klasickým mechanickým tlačítkům a spínačům, které mají životnost danou jen určitým počtem cyklů, která je v dané míře garantovaná výrobcem. Klasická mechanická tlačítka a přepínače se každým použitím opotřebovávají a jejich životnost je podstatně kratší. Dochází u nich k trvalému poškození elektrické části, jako například opotřebení vodivé vrstvy či oxidaci kovového materiálu kontaktů. Dále může docházet k trvalému poškození z důvodu mechanického namáhání a nedokonalou konstrukcí tlačítka. Může to být například prasklá plastová či kovová část spínače, která musí být nahrazena za novou, případně musí být vyměněn celý spínač, což je nepraktické. Tyto popsané nevýhody mechanických tlačítek a různých mechanických spínačů se u kapacitní technologie nevyskytují.

- **Mechanická odolnost**

V praxi je zpravidla samotný kapacitní snímač překryt ještě izolační vrstvou, nejčastěji polyetylenem či sklem, což činí zařízení velice mechanicky odolným. Díky této odolnosti se tato zařízení dají použít na různých místech, kde klasická mechanická tlačítka selhávají. Nejčastější využití bývá v prostředí se zvýšeným obsahem prachu, v prostředí s chemicky agresivním ovzduším, nebo na místech, kde je vyžadována čistota a sterilita, tedy v nemocnicích nebo v potravinářském průmyslu. Překrývající izolační vrstva kapacitního snímače se chová jako ochrana před všemi těmito nepříznivými vlivy. Tedy například před prachem, který mechanické tlačítko časem zanese a způsobí jeho nenávratné poškození, stejně tak jako některé agresivní chemické látky, které při dlouhodobém působení na snímač mohou urychlovat oxidaci kontaktů, nebo mohou tlačítko jakkoli jinak poškodit.

- **Vysoká citlivost**

Další výhodou je vysoká citlivost na přítomnost elektricky vodivého předmětu, v tomto konkrétním případě prstu ruky, že i nejjemnější dotyk se snímací plochou je zaznamenán a může dojít k jeho dalšímu zpracování. Citlivost snímače ovšem přímo závisí na tloušťce překrývací izolační vrstvy, kdy s její narůstající tloušťkou citlivost snímače klesá. Hlavním cílem je však parametry snímače nastavit tak, aby byl zaznamenán stisk tlačítka při skutečném fyzickém kontaktu. V jiném případě by mohlo docházet k ovlivňování okolních tlačítek a snímání by bylo nepřesné a systém snímání by mohl být nestabilní.

- **Estetický vzhled**

Velkou výhodou, je možnost zvolit si v podstatě jakýkoliv vzhled snímače. Na povrchu nevznikají žádné nerovné přechody a hrany a snímač je zcela rovný, proto lze pod či nad izolační vrstvu vhodným způsobem umístit grafický potisk, pro dokonalý estetický vzhled.

- **Spolehlivost**

Velkou výhodou kapacitních snímačů je spolehlivost a již zmíněná životnost. A protože tyto snímače nemají žádné mechanicky pohyblivé části, je konstrukce takovýchto tlačítek a posuvníků velice jednoduchá. Ovšem je nutné myslet na to, že je třeba dodržovat určitá pravidla při navrhování těchto snímačů, aby byla jejich funkce bezchybná.

- **Multi-touch**

Obrovským přínosem v kapacitní technologii v oblastní dotykových displejů je tzv. multi-touch. Pochází z angl. multi – více a touch – dotek. Displej dokáže v jeden moment zpracovávat více dotyků najednou, tudíž nabízí daleko širší škálu možností. Například v mobilních aplikacích je to dobře známé zoomování obrázku či fotografie na displeji, kdy dva prsty od sebe roztahujeme, či přitahujeme. Či například rotace otáčení těles zobrazovaných na displeji.

1.2.2 Nevýhody

- **Zpětná vazba**

Negativem kapacitního snímání je chybějící zpětná vazba uživateli, která u mechanického ovládání existuje už sama o sobě. Tedy, že při stisku mechanického tlačítka je poznat, že bylo skutečně stisknuto. Je vidět změna polohy tlačítka či je slyšet cvaknutí. Tato nevýhoda se u kapacitního ovládání nejčastěji řeší tím nejjednodušším způsobem – optickou signalizací, tedy např. podsvícením konkrétního kapacitního tlačítka světlo vyzářující diodou LED. Pokud je to možné, dá se tento problém odstranit zvukovou signalizací vycházející z reproduktoru zařízení. Také se může řešit poněkud sofistikovaným způsobem – vibrací.

- **Nežádoucí účinky vody**

Tato nevýhoda se týká především kapacitních dotykových displejů. Vzhledem k jejich citlivosti na cizí vodivý předmět v blízkosti, jsou tyto displeje velice náchylné na vodu a nejčastěji se jedná o dešťové kapky, páru či pot na ruku. Protože má voda vysokou permitivitu, dokáže nepříznivě ovlivňovat kapacitu a vytvářet tak nevyžádané chyby dotyků na displeji. Tyto chyby se dají řešit softwarově za použití určitých algoritmů, které dokážou přítomnost vody téměř ignorovat.

1.3 Metody zpracování na mikrokontroléru

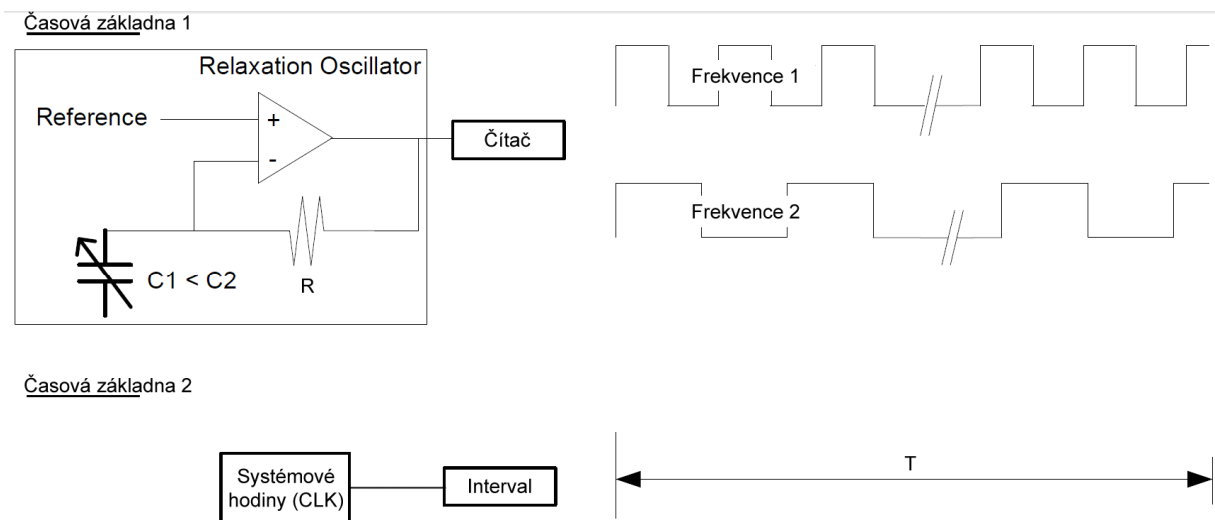
Následující metody zpracování většinou spočívají v tom, že jsou porovnávány dvě na sobě nezávislé časové základny. Jedna časová základna je konstantní a druhá je proměnná ve funkci měnící se kapacity. Dokud nedojde ke změně kapacity, zůstává vztah mezi časovými základnami nezměněn. Pro měření časových základen jsou použity integrované časovače v mikrokontroléru a jejich vzájemný vztah je měřen softwarově. Pokud dojde ke změně, software musí správně rozhodnout, zda se jednalo o skutečný dotyk.

Metody, o kterých bude řeč, jsou tři a jedná se o Relaxation Oscillator (RO) metodu, dále o RC metodu a rychlou tedy fast Relaxation Oscillator (fRO) metodu. [6]

- **Metoda Relaxation Oscillator (RO)**

Metoda RO spočívá ve změně frekvence za určitou pevnou periodu T . Proměnná Časová základna 1 je připojena na obvod RO oscilátoru. Pevná Časová základna 2, je připojena na vnitřní systémové hodiny mikrokontroléru.

Frekvence RO oscilátoru je funkcí měnící se kapacity. S rostoucí kapacitou se mění vztah mezi Časovými základnami 1 a 2. To znamená, že počet pulsů RO oscilátoru za periodu T klesá. Naopak pokud kapacita klesá, zvyšuje se počet pulsů. Z toho vyplývá, že kapacita a počet pulsů mají mezi sebou v RO metodě inverzní vztah. [6]



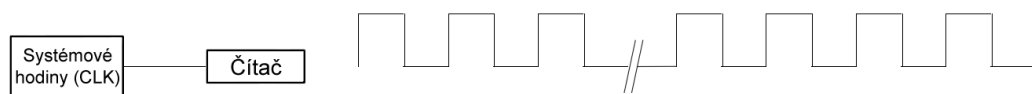
Obrázek 3 - Metoda Relaxation Oscillator (RO) [6]

- **Metoda Resistor-Capacitor (RC)**

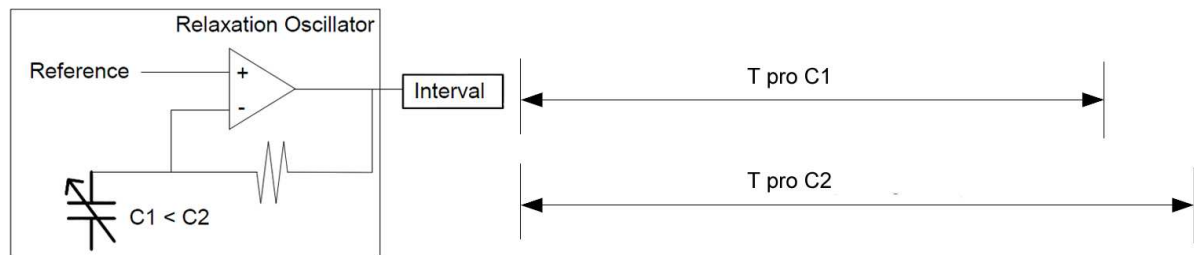
RC metoda je inverzní k předchozí RO metodě. Spočívá v tom, že je dána pevná frekvence, perioda T je proměnná. Časová základna 1 je tedy neměnná a je připojena na systémové hodiny mikrokontroléru. Proměnná Časová základna 2 je připojena na RC článek a proměnná perioda T je dána časem, který je potřebný k nabití a vybití kondenzátoru.

Nyní je tedy perioda T funkcí proměnné kapacity. S rostoucí kapacitou se protahuje perioda T . Naopak s klesající kapacitou se perioda zkracuje. Vztah mezi frekvencí a kapacitou je přímý. [6]

Časová základna 1



Časová základna 2



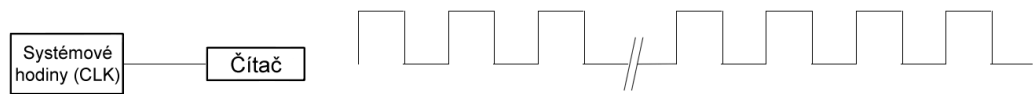
Obrázek 4 - Metoda Resistor-Capacitor (RC) [6]

- **Metoda Fast Relaxation Oscillator (fRO)**

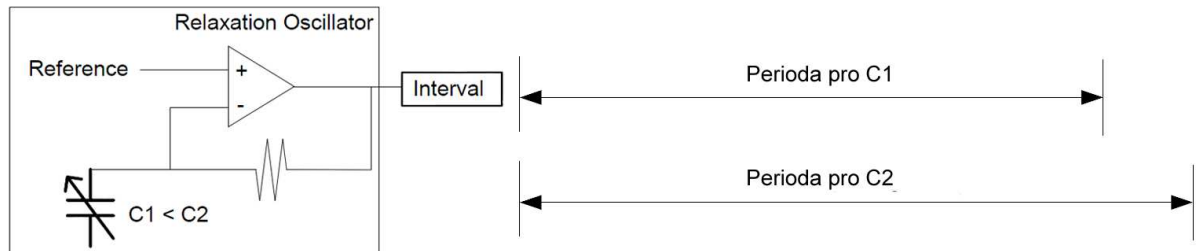
Tato metoda zpracování je podobná RC metodě s tím rozdílem, že proměnná Perioda pro $C1$, $C2$ je tvořena oscilátorem Relaxation Oscillator, nikoliv časovou periodou nabití a vybití kondenzátoru. Metoda fRO je určena k překlenutí nevýhod RC a RO metody a využívá rychlosti snímání pulsů metody RC a velice dobrou citlivost metody RO.

Jak název napovídá, tak účelem fRO metody je poskytnout větší snímací rychlost, než je rychlost běžné RO metody a to vše za předpokladu stejně dobré citlivosti. Při klasické RO metodě je citlivost funkcí proměnné periody T . Při zvyšující se periodě T se zvyšuje citlivost a naopak. Ovšem negativním důsledkem zvyšování citlivosti a tedy narůstající periody T se snižuje snímací rychlost. Citlivost v metodě fRO se dá rovněž zvýšit větší frekvencí systémových hodin mikrokontroléru. [6]

Časová základna 1



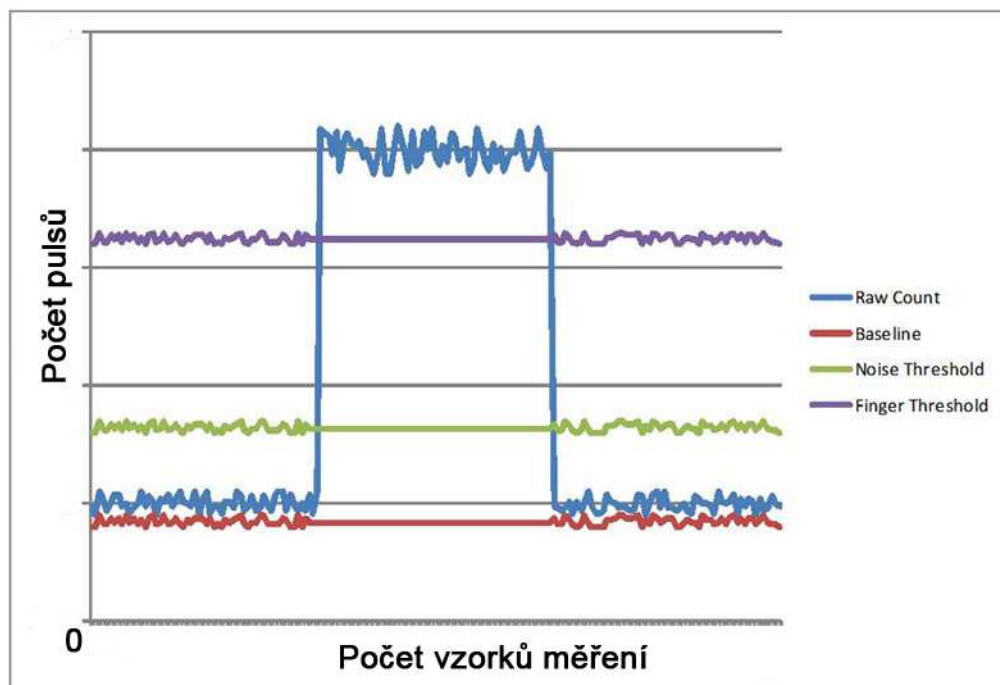
Časová základna 2



Obrázek 5 - Metoda Fast Relaxation Oscillator (fRO)

1.4 Softwarové parametry tlačítka

Pro správnou funkci každého kapacitního dotykového tlačítka je důležité zvolit ty správné parametry, které se nastavují a ladí softwarově při vytváření programového kódu. Nejdůležitější parametry jsou čtyři a pro jejich lepší pochopení jsou vidět na obrázku 6.



Obrázek 6 - Úrovně citlivosti

Asi nejdůležitějším je práh šumu (Noise threshold), který určuje jaké signály má mikrokontrolér zpracovat a vyhodnotit jako dotyk a jaké signály ignorovat. Práh šumu se pohybuje kolem základní úrovně (Baseline).

Pro konstruktéra je velice důležitý parametr prahová úroveň dotyku prstu (Finger threshold), jež určuje vlastní citlivost tlačítka, která se řídí dle tloušťky izolační vrstvy. Parametr Raw Count je tzv. hrubý počet pulsů, jinými slovy se jedná o počet pulsů, podle kterého se porovnávají zmíněné parametry. Na obrázku 6 je vidět vzestup počtu pulsů od určitého vzorku a poté sestup. Právě v tomto intervalu došlo ke stisku tlačítka.

1.5 Okolní rušení a jeho vlivy

Nestálé okolní vlivy, vznikající v blízkosti kapacitního snímače mohou mít negativní účinek na celý kapacitní dotykový systém a mohou způsobovat jeho nesprávnou funkci. Jedná se o vliv na vlastní kapacitu snímače a na měnící se kapacitu. S některými vlivy je možné se vypořádat již při návrhu kapacitního dotykového zařízení a s některými správným softwarovým doladěním. [11]

Příklady vznikajícího rušení mohou být různého charakteru. Často jde o rušení, které nelze nijak předem ovlivnit. Již při návrhu je třeba volit vhodné parametry tak, aby se vznikající rušení projevovalo co nejméně. Jde především o vyzařující šum v okolí a šum ve vedení.

- **Vyzařovaný šum okolí**

Šum vyzařující ze součástek a jiných zařízení je společný problém pro všechna zařízení v oblasti kapacitního snímání. Všechny součástky vyzařují do okolí elektromagnetický šum, což představuje překážku pro kapacitní snímač, jelikož zpracovávaný signál není v požadované formě. Tomuto rušení se může předejít kvalitním uzemněním již při návrhu.

- **Šum vedení**

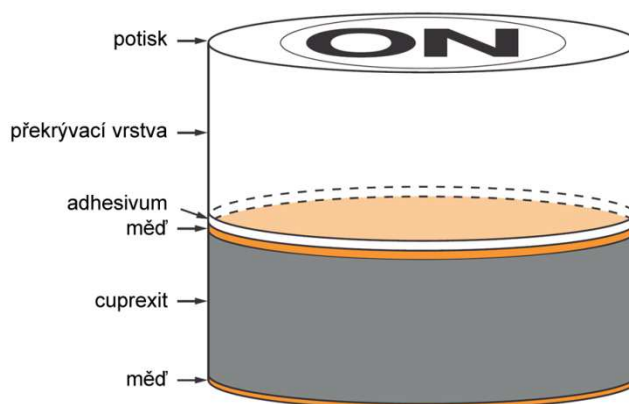
Rušení na vedení vzniká především v systémech a zařízeních, která jsou napájena externě baterií. Rušení je poté způsobeno odlišným potenciálem uzemnění mezi dvěma zařízeními, kdy jedno je připojeno na pevný zdroj elektrické energie a druhé právě na baterii.

2 Používané prvky kapacitního ovládání

Mezi nejpoužívanější prvky kapacitního ovládání se řadí tlačítka, lineární a kruhové posuvníky, maticové klávesnice, touchpady či kapacitní dotykové displeje.

2.1 Tlačítka

Tlačítko je v oblasti kapacitního dotykového snímání základním a nejjednodušším prvkem. Uspořádání vrstev nejjednoduššího snímače je na obrázku 7. Pro esteticky, ale i přehledně vypadající zařízení, je dobré zvolit nějaký potisk, což je jeho první a viditelná vrstva. Další vrstvu tvoří izolační vrstva a lepidlo. Poté následuje samotná snímací elektroda tvořená mědí, sklolaminátový materiál plošného spoje a uzemnění tvořené další vrstvou mědi.



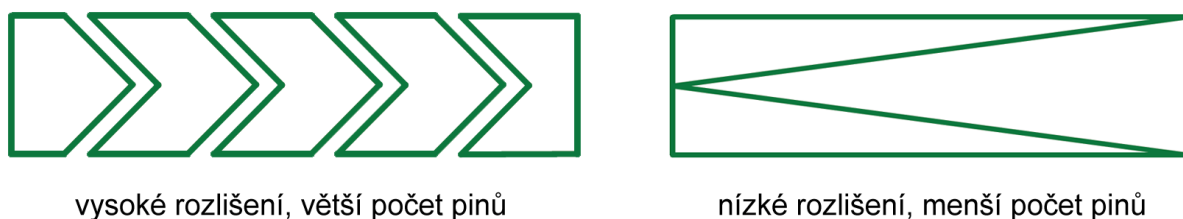
Obrázek 7 - Uspořádání vrstev snímače

2.2 Posuvníky

Vhodným rozmístěním tlačítek vznikne soustava, která se nazývá posuvník, či z angl. slova - slider. U posuvníků je hlavní rozdíl oproti tlačítkům v tom, že při jediném doteku, jsou v jeden moment ovlivněny dvě a více snímacích elektrod. Snímací elektrody jsou rozmístěny v těsné blízkosti vedle sebe a obvod pak softwarově vyhodnocuje pozici prstu na posuvníku.

- **Lineární posuvník**

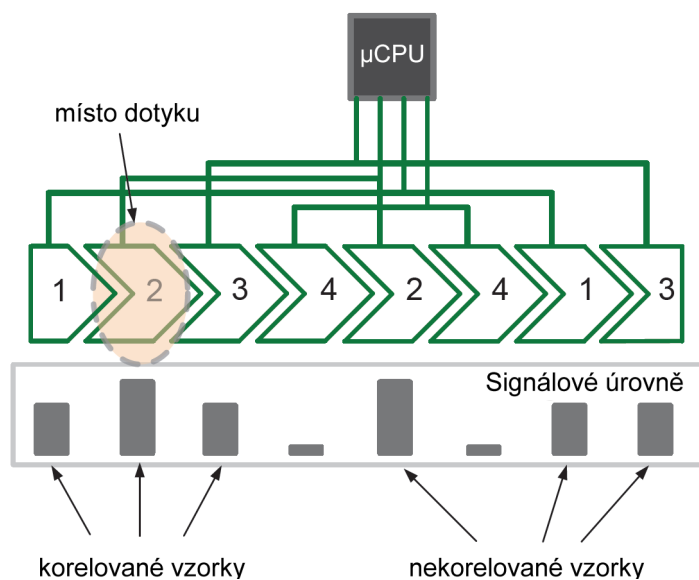
Lineární posuvník může být realizován tak jak je vidět na obrázku 8. Posuvník nalevo je tvořen z pěti snímacích elektrod, které jsou umístěny těsně u sebe a jsou prokládané. Toto prokládání zajišťuje jemnější a lineárnější změnu měřené kapacity při pohybu prstem po posuvníku. Posuvník má sice větší rozlišení, ale je potřeba přivádět větší počet signálových cest do mikrokontroléru. Posuvník vpravo má sice nízké rozlišení, ale výhodou je právě nízký počet signálových cest, konkrétně dvě. Toho se využije, pokud nemá mikrokontrolér dostatečný počet vstupů. V případě, že je potřeba vyhodnocovat přesnou pozici prstu na posuvníku, řeší se to softwarovým ošetřením.



Obrázek 8 - Lineární posuvník [11]

Pokud je potřeba posuvník s větším počtem snímačů (s větším rozlišením), ale nastane omezení s malým počtem pinů mikrokontroléru, dá se tento problém vyřešit.

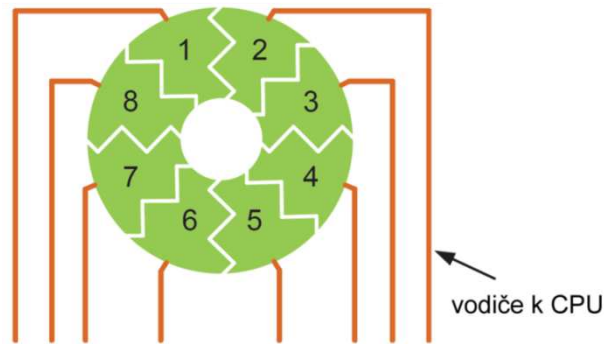
Princip spočívá ve správném spojení dvou či více posuvníků. Pro pochopení je princip vcelku jednoduchý, ale softwarové ošetření už je složitější. První část posuvníku má snímací elektrody v číselném pořadí 1 až 4. Kdežto druhá část už musí mít elektrody snímače prohozeny. Je to proto, že software při dotyku vyhodnocuje jen tu oblast, kde jsou signálové úrovně v korelaci, tedy že mají nějaký vzájemný vztah. Pokud by byly elektrody seřazeny na obou senzorech ve stejném pořadí, docházelo by ke zdvojování dotyku a posuvník by nefungoval správně. Mikrokontrolér tedy vyhodnocuje pouze korelované vzorky a nekorelované vzorky jsou ignorovány. [11]



Obrázek 9 - Posuvník s větším rozlišením [11]

- **Kruhový posuvník**

Tento typ posuvníku je vlastně obdoba lineárního posuvníku s tím rozdílem, že jeho konce jsou napojeny k sobě a vytváří tak nekonečný kruh. Tím získává velkou výhodu v podobě velkého rozlišení, tedy možnost více úrovní a plynulého ovládání bez nutnosti přehmatávání od konce na začátek jako u lineárního posuvníku.



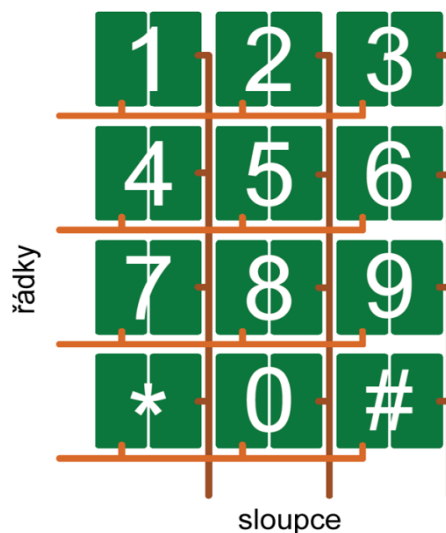
Obrázek 10 - Kruhový posuvník [11]

2.3 Dvourozměrná dotyková pole

Dvourozměrná dotyková pole jsou složitější obdobou kapacitních snímačů. Složitější především díky tomu, že je třeba rozlišovat X a Y souřadnice, neboli řádky a sloupce. Vyžadují větší počet vodičů pro připojení. Nejznámější je maticová klávesnice, či touchpad.

- **Maticová kapacitní klávesnice**

U dvourozměrné maticové kapacitní klávesnice o X řádkách a Y sloupcích je třeba využít co možná největší úspory počtu vodičů. Klávesnice je vhodně zapojena tak, že každé tlačítko je složeno ze dvou mechanicky oddělených snímacích plošek. Jedna z těchto plošek je propojena s vodičem řádků klávesnice a druhá snímací ploška je propojena s vodičem sloupců. Při stisku lze pak jednoduše určit, které tlačítko bylo stisknuto. Na obrázku 11 je vidět, že pro připojení 12-ti prvkové klávesnice postačí 7 vodičů oproti 12, které by byly třeba v případě, že by každé tlačítko bylo připojeno zvlášť.



Obrázek 11 - Maticová kapacitní klávesnice [11]

- **Touchpad**

Touchpad je velmi dobře známý mezi dvourozměrnými dotykovými poli. Nejvíce se využívá v zařízeních jako dotykový snímač k ovládní polohy kurzoru po obrazovce. Nejčastější užití má u přenosných počítačů - notebooků. Klasická myš potřebuje rovnou plochu, kdežto touchpad touto nevýhodou nedisponuje a díky tomu se stává preferovaným ovladačem polohy kurzoru.

Je tvořen polem o velkém počtu sloupců a řádků a má zpravidla veliké rozlišení pro plynulý pohyb kurzoru. Neslouží však jen pro pohyb, ale při poklepání zároveň i jako tlačítko kliknutí myši. Některé touchpady mají určitá místa, tzv. hotspoty, která mají i jiný účel než kliknutí. Například posouvání podél pravého okraje může ovládat svislý posuvník pro vertikální posun aktivního okna. Pohyb v dolní části touchpadu pak může rolovat okno horizontálně. Některé touchpady také mohou emulovat více tlačítek myši klikáním do rohů nebo klikáním více prsty naráz.

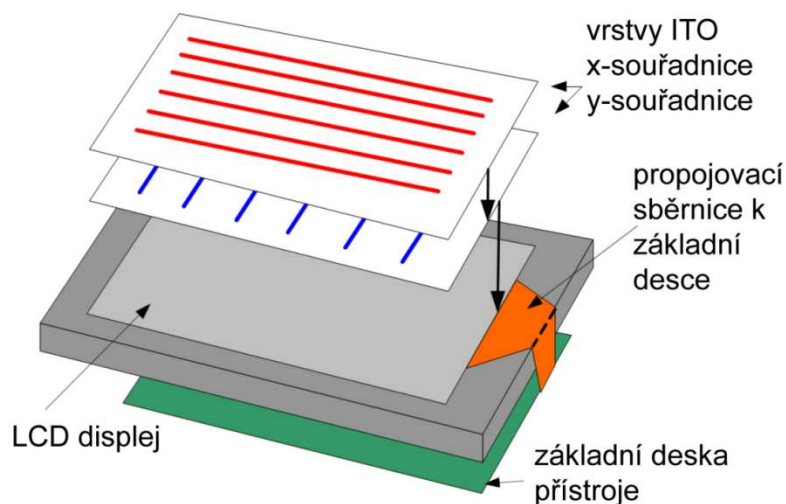
2.4 Kapacitní dotykové displeje

Původní dotykové displeje pracující na rezistivní technologii postupně nahradila kapacitní technologie, především díky jejím výhodám. Některé výhody kapacitní technologie snímání byly již z obecného hlediska zmíněny. Hlavní problém nastal, z čeho kapacitní snímač na displeji vyrábět.

Otázka jaký materiál zvolit k výrobě, byla položena hlavně z důvodu asi dvou hlavních požadavků a to co nejlepší transparentnost a elektrická vodivost. Indium Tin Oxide splňuje oba tyto požadavky, z hlediska dobré průhlednosti a elektrické vodivosti. Jako český ekvivalent nese název Oxid inditý, ovšem nejvíce se využívá zkratka ITO. Indium je vzácný drahý kov, který se v přírodě vyskytuje jen ve formě sloučenin. ITO se tak stal v širokém spektru těchto aplikací nejpoužívanější i přes jeho vyšší cenu a obtížnější dostupnost.

- **Struktura dotykového displeje**

Velice tenké vrstvy ITO, které se používají, jsou ve viditelném světelném spektru průhledné, bezbarvé a elektricky vodivé. Tloušťka vrstev bývá v rozsahu desetin až jednotek mikrometru. Platí pravidlo, že s narůstající tloušťkou vrstvy ITO roste její elektrická vodivost, ale zhoršuje se průhlednost, takže při výrobě musí být zachován rozumný poměr mezi těmito protichůdnými požadavky. Zjednodušené uspořádání dotykového displeje je na obrázku 12. Jedna vrstva ITO tvoří řádky a druhá vrstva tvoří sloupce. Při dotyku na určitém místě jsou tyto souřadnice zaznamenány a zpracovány mikrokontrolérem. [8]

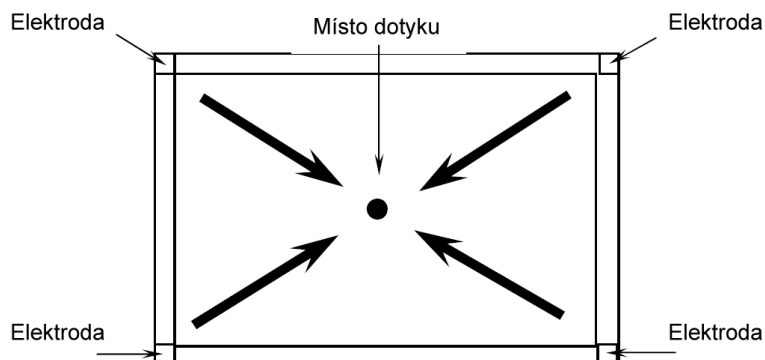


Obrázek 12 - Struktura dotykového displeje [8]

- **Princip vyhodnocování polohy**

Princip vyhodnocení polohy prstu spočívá v tom, že ve všech čtyřech rozích displeje jsou elektrody. Na všechny tyto elektrody působí napětí. Jakmile se člověk prstem dotkne v určitém místě, začne díky jeho vodivosti protékat proud a vzniká úbytek napětí na těchto elektrodách. V případě na obrázku 13 by měl být proud, který protéká přes elektrody teoreticky úměrný vzhledem ke stejné vzdálenosti mezi místem dotyku a všemi čtyřmi elektrodami v rozích.

Pro zjištění jiných míst dotyku procesor přesně vypočítá poměr proudů protékajících skrz elektrody a jako výsledek výpočtu jsou přesné X a Y souřadnice místa dotyku.



Obrázek 13 - Vyhodnocování polohy

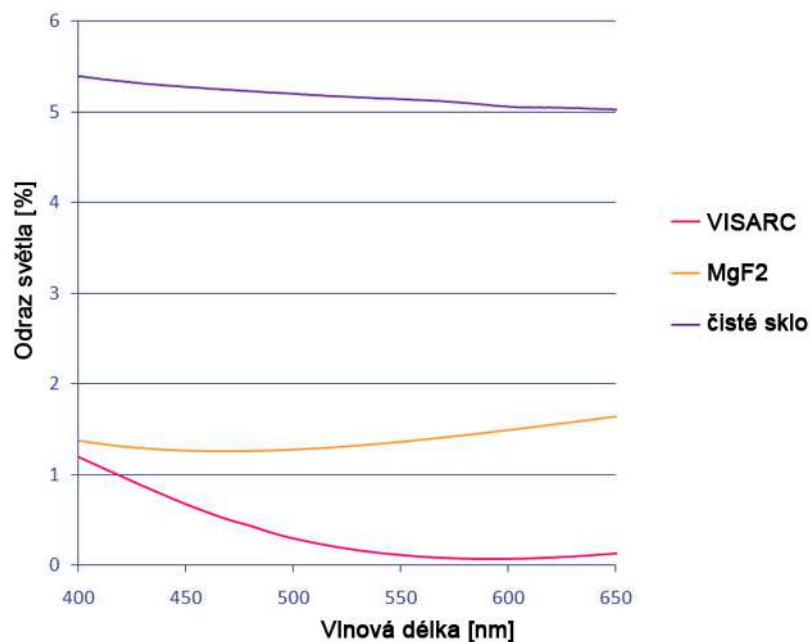
- **Možné nevýhody ITO**

Ke zmínění jistě stojí fakt, že kapacitní dotykové displeje na bázi ITO mají dvě nevýhody. Jedním je velice malá pružnost tenké vrstvy ITO, která je však do jisté míry zanedbatelná, pokud je displej dokonale rovný. To ovšem v obecném použití není zase až takový problém, protože málokdy je potřeba ohebný displej. Ovšem v aplikacích, kde jsou tyto pružné vlastnosti vyžadovány, by nastal problém.

Druhá nevýhoda pramení z průhlednosti resp. reflexivnosti vrstvy, která nemusí být zrovna zanedbatelná. Problém je v odrazu světla viditelného spektra. Tento odraz bývá i kolem 10% na jednu vrstvu ITO. V praxi jsou potřeba pro zjištění X a Y souřadnic tyto vrstvy dvě přes sebe a tedy jednoduchým počtem je jasné, že může docházet k odrazu až 20% světla. Tato nevýhoda se projevuje například u mobilních telefonů, používaných na přímém slunci, kdy jsou údaje na displeji velice špatně čitelné.

Jelikož je v dnešní době trendem stále něco vylepšovat a dosahovat tak lepších výsledků, platí to i pro tento případ, kdy se hodnoty odrazu pohybují dokonce kolem 0,1%. Takového výsledku se dosahuje pomocí technologie VISARC (Variable Index Single-layer Anti-Reflective Coating). Tato technologie spočívá v tom, že velice tenká vrstva antireflexního materiálu z nanočástic, je nanese na displej a svými vlastnostmi snižuje odraz světla s cílem dosáhnout lepší viditelnosti a čitelnosti displeje.

Nejnižších hodnot odrazu se dosahuje v aplikaci za použití VISARC technologie společně se sklem pro světlo o vlnové délce kolem 600 nm což je vidět na obrázku 14. Také se používá fluorid hořečnatý (MgF_2) ovšem pak se nedosahuje tak dobrých výsledků. [4]

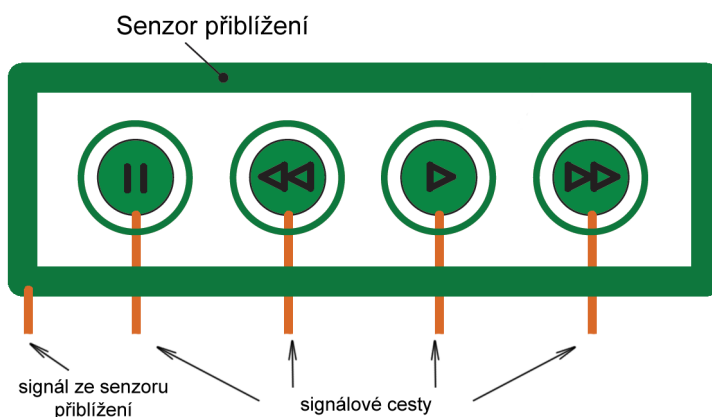


Obrázek 14 - Odráz světla [4]

2.5 Senzor přiblížení

Tento prvek se v oblasti kapacitního ovládání vyskytuje v nejrůznějších podobách. Jde o elektrodu s velkou citlivostí na blízkost lidské ruky nebo jiného elektricky vodivého předmětu v jejím elektrickém poli. Citlivost je nastavena tak, aby nemuselo dojít k fyzickému kontaktu mezi snímačem a prstem. Ve vzdálenosti několika centimetrů od snímače je již zaznamenána změna kapacity, která je zpracována mikrokontrolérem. [11]

V praxi se toho využívá například na probuzení mikrokontroléru z úsporného režimu, což je velice užitečná věc, pokud je zařízení napájeno baterií. Pro vysvětlení takového snímače přiblížení by se dal uvést příklad, kdy je mikrokontrolér v úsporném režimu s minimálními nároky na spotřebu elektrické energie. Při mávnutí rukou v blízkosti senzoru přiblížení, je mikrokontrolér probuzen a zařízení je připraveno k používání. Po určité době nečinnosti uživatele, přechází zařízení zpět do úsporného režimu. Na obrázku 15 je vidět umístění snímací elektrody senzoru přiblížení u ovládání přehrávače hudby.



Obrázek 15 - Senzor přiblížení [11]

Senzor přiblížení má dokonce i každý chytrý telefon s kapacitním dotykovým displejem. Při telefonním hovoru, kdy přiložíme ucho k reproduktoru, dojde k vypnutí displeje, aby nedošlo k nežádoucím stiskům na displeji a také proto, aby se šetřila baterie. Senzor je umístěn právě vedle reproduktorového výstupu. Tento senzor sice není založen na principu kapacitního snímání, ale slouží jako dobrý příklad z praxe.

3 Návrh kapacitního dotykového ovládání

Při vytváření kapacitního ovládacího systému se dá vytvořit moderně a pěkně vypadající a na funkčnost stabilní ovládací systém.

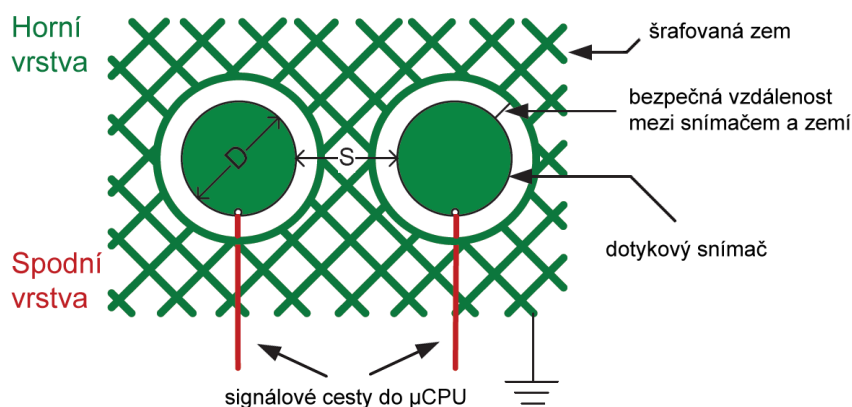
Parametry, s jakými navrhujeme dotykový snímač na desce plošného spoje, mají velký vliv na funkci celého kapacitního dotykového systému. Jde o parametry jako je velikost a tvar snímače - snímací elektrody. Dále jde o co nejmenší rušení signálu vedoucího do mikrokontroléru. Tato část práce se zabývá parametry, které mají vliv na správný chod celého systému, a také se zabývá doporučenými kroky, které bychom měli při návrhu dodržet.

3.1 Návrh kapacitního tlačítka

Při návrhu tlačítka je třeba dbát na jeho nejdůležitější parametr, což je jeho velikost. Další parametry jako je tvar a vzdálenost mezi tlačítky v případě většího počtu tlačítek, by rozhodně neměly být opomenuty. Na tvaru tlačítka záleží proto, aby docházelo ke správnému vyhodnocování stisků, na vzdálenosti mezi jednotlivými tlačítky proto, aby nedocházelo k nežádoucím stiskům a ovlivňování sousedních tlačítek.

- Tvar tlačítka

Tvar tlačítka může být v podstatě jakýkoli avšak nejvhodnější je zvolit kruhový tvar. Pokud je zvolen tvar jiný, je třeba veškeré vzniklé ostré hrany či rohy co nejvíce zaoblit. Tlačítko s oblými tvary je vhodnější zejména proto, že elektrické pole kolem tlačítka je rovnoměrné a nevznikají nahodilé siločáry. Siločáry vznikajícího elektrického pole jsou tedy rozprostřeny rovnoměrněji nad snímač. Na obrázku 16 jsou parametry, na které je třeba si dávat pozor. [11]



Obrázek 16 - Základní parametry tlačítka [11]

- **Velikost tlačítka**

Velikost tlačítka by měla být ve velikosti plochy bříška prstu. Pokud jde o tlačítko kruhového tvaru, bude jeho průměr D přibližně 15mm. Zkrátka průměr D , který je mezi 10 až 20mm je pro funkci snímače v pořádku a neměl by s vyhodnocením stisku být problém a případné doladění přesné funkce snímání se provádí softwarově. [11]

- **Vzdálenost mezi tlačítky**

V oblasti návrhu tlačítek je důležité, aby byly dotykové plošky snímače rozmístěny v dostatečné vzdálenosti od sebe. Tato vzdálenost je na obrázku 16 udávána pod písmenem S . To je důležité proto, aby nedocházelo k jejich vzájemnému nechtěnému ovlivňování, tedy ke stisku jiného tlačítka než tlačítka požadovaného. Tento problém se řeší i softwarově, ale na úkor snížení citlivosti snímače.

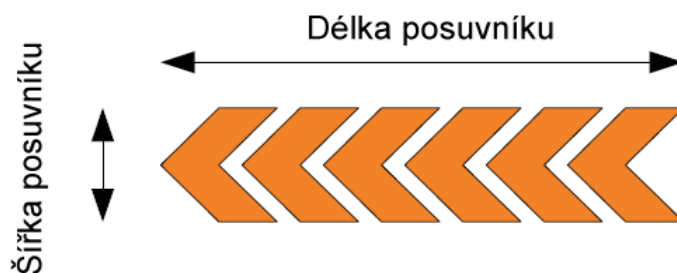
Vzdálenost je také závislá na tloušťce izolační vrstvy. Pokud je tato vrstva tenká, je signál na stisknutém tlačítku v porovnání s těmi okolními silnější než u silnější vrstvy. Pro tuto problematiku platí jednoduché pravidlo, že vzdálenost mezi okraji tlačítek by měla být větší nebo stejná, než je tloušťka izolační vrstvy. [11]

3.2 Návrh posuvníku

Při návrhu posuvníku platí podobná pravidla jako při návrhu obyčejných tlačítek, ale v některých bodech se návrh posuvníku přeci jen liší.

- **Tvar posuvníku**

Tento parametr se lehce liší od parametru při návrhu tlačítka. Tvar může být rovněž kruhového tvaru, ovšem v tomto případě je vhodnější volit tvary, které na sebe lépe navazují při skládání k sobě. Tedy nejjednodušší je zvolit čtvercový či obdélníkový tvar, popřípadě složitější šipkový tvar jako je na obrázku 17. Tento tvar má větší rozlišení. [11]



Obrázek 17 - Šipkový tvar posuvníku [11]

- **Velikost posuvníku**

Pokud jde o velikost, je vhodné volit v podstatě shodně s velikostí tlačítka, tedy alespoň co se týče jednotlivých prvků, z kterých je posuvník poskládán. Šířka posuvníku mezi 10 až max. 20mm, je nejvhodnější. Celková délka posuvníku pak určuje jeho počet úrovní, tedy rozlišení, což je omezeno počtem vstupních pinů na mikrokontroléru. Opět platí pravidlo, že čím více prvků, tím lépe.

- **Vzdálenost mezi prvky na posuvníku**

Vzdálenost mezi jednotlivými prvky posuvníku nemusí být dodržována tak jako u návrhu tlačítka, kdy je třeba dbát na to, aby při malé vzdálenosti nedocházelo k nevyžádaným stiskům a ovlivňováním okolních tlačítek. Naopak je tato vlastnost vyžadována, aby docházelo k ovlivňování více než jedné snímací elektrody v jeden časový okamžik.

3.3 Překrývací izolační vrstva

Tato součást hraje v kapacitní technologii snímání velice významnou roli. Překrývací izolační vrstva chrání kapacitní dotykový systém nejen proti mechanickému poškození, oxidaci, vlhku, ale i proti výbojům elektrostatické elektřiny.

3.3.1 Materiál vrstvy

Při návrhu kapacitního snímače je třeba myslet na volbu použitého materiálu izolační vrstvy. Jak již bylo zmíněno, tak snímač kruhového tvaru o průměru 10mm má kapacitu kolem 10pF. Izolační vrstva tuto kapacitu snižuje podle druhu materiálu a její relativní permitivity. Při výběru materiálu se dbá na nejžádanější parametry, což je tedy relativní permitivita voleného materiálu, jeho dostupnost a cena, někdy záleží i na hmotnosti materiálu a také se dbá na jeho mechanickou pevnost a odolnost proti elektrostatické elektřině.

Nejčastěji používané izolační materiály z hlediska pevnosti a ochrany proti elektrostatickým výbojům jsou uvedeny v tabulce 2. Pro ochranu proti výbojům až do 12kV je uvedena jejich minimální tloušťka. [3]

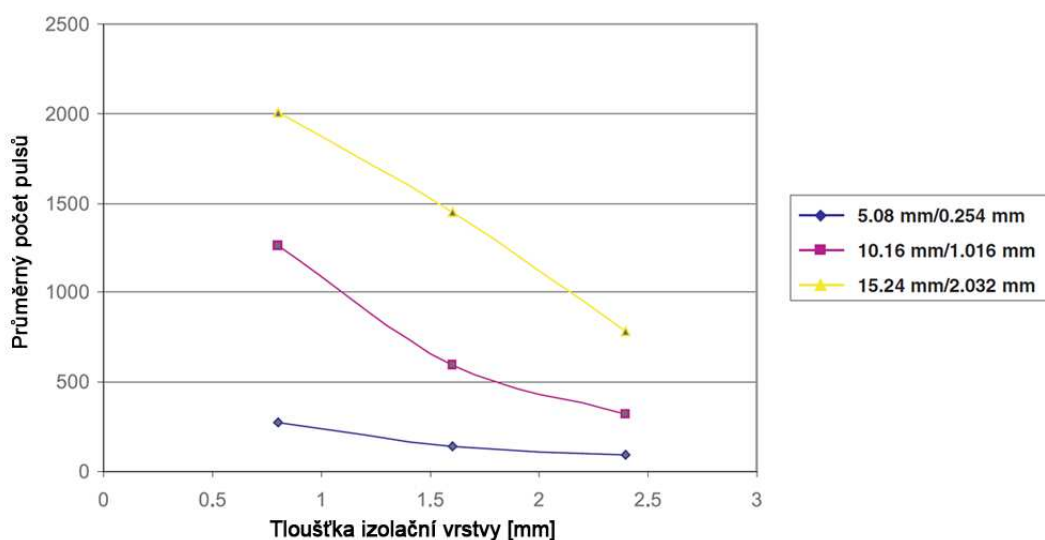
Tabulka 2 – Používané izolanty [3]

Materiál	Minimální tloušťka
Cuprexit (FR-4)	0,4 mm
Polykarbonáty	0,8 mm
Sklo	1,5 mm
ABS plasty	0,8 mm

3.3.2 Tloušťka vrstvy

Tloušťka izolační vrstvy úzce souvisí s jejím materiálem. Je nutné počítat již při návrhu systému, jakou tloušťku zvolit. Pro dostatečnou citlivost a spolehlivost snímání se volí tloušťka izolační vrstvy od 1mm do 5mm. V grafu na obrázku 18 jsou předpokládané průběhy závislosti počtu naměřených pulsů na rostoucí tloušťce izolační vrstvy. Průběhy v grafech zobrazují závislost na třech různých elektrodách, kde první číslo v legendě udává průměr elektrody a druhé číslo udává vzdálenost od ostatních elektrod. [3]

Na grafu je velice dobře vidět fungující vzorec (1.3) pro klasický kondenzátor, že s rostoucí vzdáleností elektrod (rostoucí tloušťkou izolantu) klesá kapacita (snižuje se počet pulsů). Dále je vidět, že při stejné vzdálenosti elektrod (tloušťce izolantu) kolem 0,8mm je pro elektrodu s větším průměrem (plochou) naměřena větší kapacita (větší počet pulsů).



Obrázek 18 - Závislost tloušťky izolantu na počtu pulsů [3]

3.3.3 Lepidlo

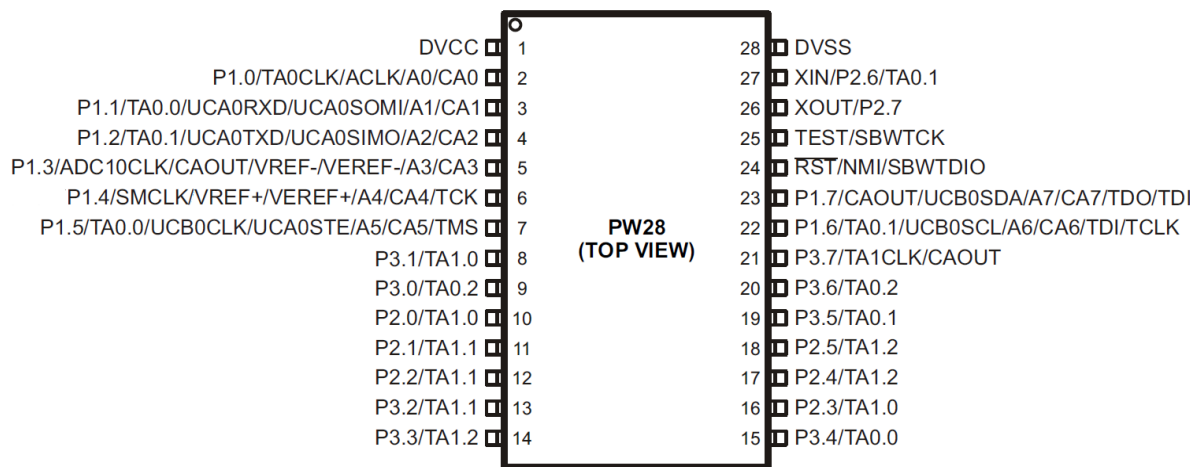
Pokud chceme dosáhnout dokonalé spolehlivosti a přesnosti snímače při snímání, je vhodné aplikovat mezi snímač a izolační vrstvu lepidlo tzv. adhezivum. Jedná se o lepidlo z materiálu, které je nejčastěji ve formě speciální oboustranné lepicí pásky, jež dokonale spojí obě tyto vrstvy a zaručí, že zde nevzniknou vzduchové mezery.

Jelikož relativní permitivita vzduchu je velice malá, mohla by pak právě vznikat místa, kde by nedocházelo k žádané změně kapacity, a snímač by nefungoval. Tedy změna kapacity by nebyla dostatečně velká pro vyhodnocení. Lepicí páska musí splňovat požadavek na nevodivost a nenasákavost. Tento výrobek nese označení 467MP či 468MP, jehož výrobou se zabývá firma 3M. V domácích testovacích podmínkách se bez ní však lze obejít. [3]

4 Hardwarová realizace

4.1 MCU

Řídící jednotkou celého kapacitního ovládání je 16bitový mikrokontrolér MSP430G2553 s architekturou RISC. Mikrokontrolér zpracovává dotyky na kapacitních snímačích a na výstupu řídí chod RGB LED diody. Mikrokontrolér MSP430G2553 od firmy Texas Instruments byl zvolen proto, že splňoval požadavky aplikace pro přímé měření kapacity na vstupních pinech, bez nutnosti dalších součástek či jiných periférií. Jeho velkou výhodou je to, že spadá do řady mikrokontrolérů s velice nízkou spotřebou a je tak vhodný zejména do zařízení napájených bateriemi. [7]



Obrázek 19 - Mikrokontrolér MSP430G2553 (DIP pouzdro) [7]

4.1.1 Hlavní parametry mikrokontroléru MSP430G2553 [7]

- Nízké napájecí napětí: 1,8 ÷ 3,6V
- Velice nízká spotřeba
 - 230μA Aktivní mód
 - 0,5μA Standby mód
- Frekvence vnitřního oscilátoru až 16MHz
- Dva 16-bit časovače
- Pět režimů pro úsporu energie
- 16-bit RISC architektura
- JTAG Spy-By-Wire rozhraní (SBW - 2 vodičové)
- Pro DIP pouzdro až 16 snímacích elektrod

4.2 Demonstrační deska kapacitního ovládání

Schéma zapojení demonstrační desky kapacitního ovládání bylo navrženo jedním z nejznámějších softwarových prostředí pro návrh plošných spojů, programem EAGLE firmy CadSoft. V programu byly využity součástky nabízené knihovnami EAGLU, jen některé součásti desky bylo třeba dodělat návrhem vlastní knihovnou součástek, konkrétně se jednalo o snímací elektrody tlačítek a posuvníku.

Nejprve je třeba vytvořit novou knihovnu příkazem File -> New -> Library. Vytvoření nové součástky v knihovně má tři kroky. Je potřeba vytvořit její pouzdro (Package), dále je třeba zvolit název a potvrdit „OK“. Potom přijde na řadu velikost mřížky (Grid) tak, aby se krokování shodovalo s výslednou součástkou. Pak přijde přidání kontaktních ploch (Pads), v případě kapacitního tlačítka byla tato plocha o průměru 10 mm. Dalším krokem je vytvoření schematické značky součástky, která bude viděna jen při návrhu schématu. V případě tlačítka na tomto vzhledu moc nezáleží. Dále je třeba vytvořit a pojmenovat pin pro připojení. Nakonec je potřeba vytvořit samotnou součástku tvořenou pouzdrem a schematickou značkou.

Při návrhu desky kapacitního ovládání bylo třeba rozhodnout, co bude na výstupech řízeno. Mikrokontrolér sice umožňuje připojení až 16 snímacích elektrod, ale je třeba myslet i na dostatek potřebných pinů pro připojení výstupu. Na výstup byla nakonec připojena RGB LED dioda řízená dvěma kapacitními tlačítky a posuvníkem.

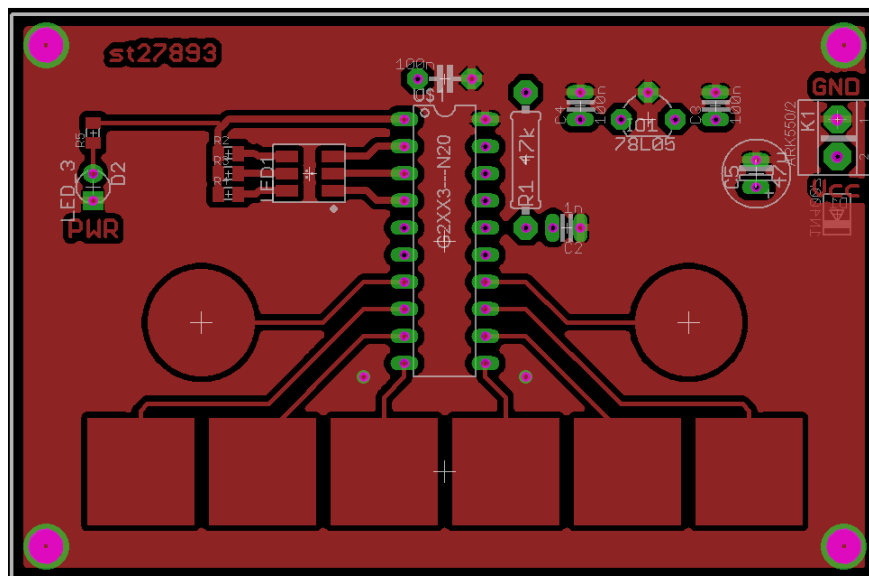
Také bylo třeba dbát na parametry zajišťující správný chod systému. Průměr tlačítek byl zvolen 10mm, velikost jednotlivých prvků posuvníku byla zvolena 10x10mm. Pro zajištění správné integrity signálu je vrchní vrstva v okolí signálových cest rozlita mědí, jenž je uzeměna. Jelikož je potřeba co nejmenší rušení signálu, je ve spodní vrstvě rozlita zem v mřížce. Obrázky 20 a 21 na další straně ukazují výsledné zařízení v programu EAGLE.

4.2.1 Funkce tlačítek

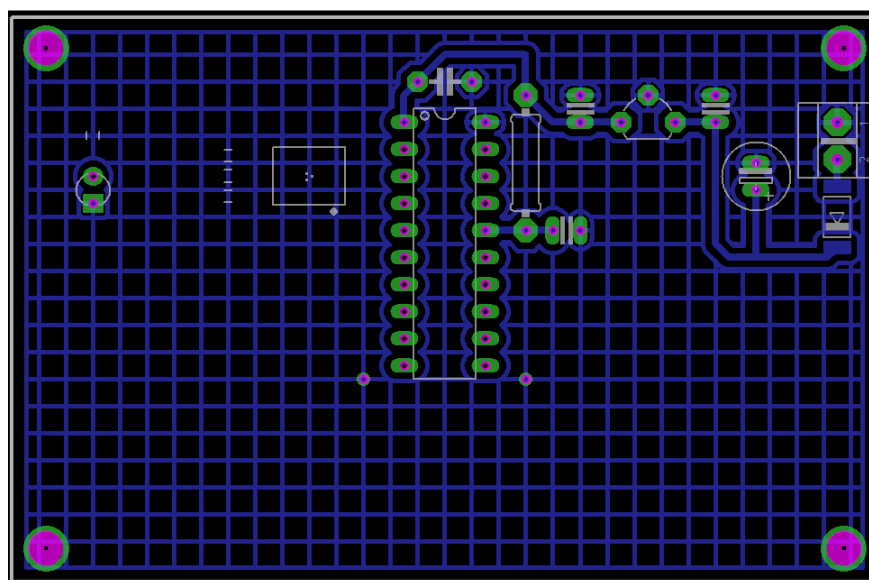
Na desce jsou dvě tlačítka, kde první tlačítko pracuje v režimu držení zapni, puštěním vypni. Druhé tlačítko pracuje v režimu stisknutím zapni a svít, opětovným stisknutím vypni. Levé tlačítko řídí svit modré barvy LED diody a pravé tlačítko řídí červenou barvu LED diody.

4.2.2 Funkce posuvníku

Posuvník řídí chod zelené barvy LED diody. Posouváním prstu zleva doprava se zvyšuje frekvence blikání LED diody až do stálého svitu. Posuvník se skládá ze šesti fyzických prvků a dále mezi každými dvěma prvky vzniká další úroveň. Tedy celkové rozlišení posuvníku je dáno celkově jedenácti úrovněmi. Prvek posuvníku nejvíce nalevo vypíná zelenou barvu, prvek nejvíce napravo zajišťuje stálý svit zelené barvy.



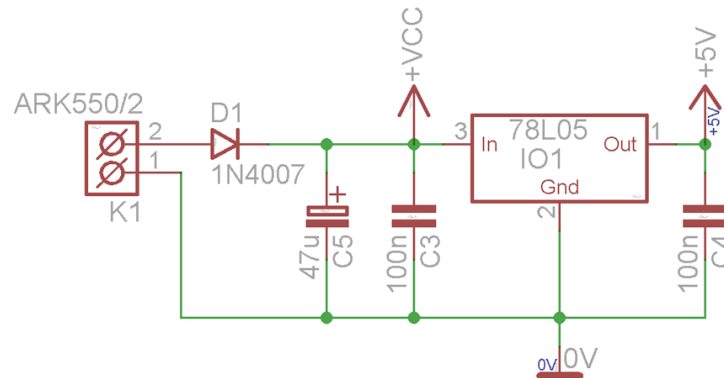
Obrázek 20 - Horní vrstva desky (TOP)



Obrázek 21 - Spodní vrstva desky (BOTTOM)

4.3 Napájení

Jako napájecí zdroj byl při vývoji a ladění použit 12V laboratorní zdroj. Pro demonstraci a přenosnost zařízení může být připojena 9V baterie. O stabilní napájení mikrokontroléru a RGB diody na výstupu se stará napěťový stabilizátor s pevně nastaveným stabilizovaným napětím +5V, který je schopen dodat proud až 100mA. Jde o napěťový stabilizátor 78L05, který je dle katalogového listu vybaven dvěma kondenzátory. Na vstupu je na ochranu proti přepólování klasická usměrňovací dioda a následuje filtrační kondenzátor.



Obrázek 22 - Schéma zapojení napájení

4.4 RGB LED dioda

Tato dioda je rozdílná v tom, že oproti jiné světelně emitující diodě dokáže vyzařovat různé barvy složením ze tří základních, tedy červené, zelené a modré barvy. Zpravidla má 4 vstupní elektrody. Jedna elektroda je připojena na zem, ostatní tři elektrody slouží k řízení jednotlivých barev. Dioda může mít však i šest elektrod, kde je poté možnost si vybrat, zda bude buzena příslušná barva na katodě nebo na anodě. Jas každé barvy lze jednotlivě regulovat změnou velikosti proudu na daném vodiči. Tímto je tedy možné docílit v podstatě jakékoliv barvy z viditelného světelného spektra.



Obrázek 23 - Klasické a SMD provedení RGB diody

5 Softwarová realizace

Programování mikrokontroléru bylo provedeno v programu CCS 5 (*Code Composer Studio*), což je vývojové prostředí určené speciálně pro mikrokontroléry MSP430 od firmy Texas Instruments. Toto vývojové prostředí umí vytvářet, ladit a nahrávat programy do mikrokontroléru. Pro fyzické nahrávání programového kódu posloužil programátor *MSP-EXP430G2 Launchpad*, určený pro mikrokontroléry MSP430. Programování probíhá spojením po sběrnici SBW JTAG. Programový kód je realizován v jazyce C. Navíc firma Texas Instruments zdarma poskytuje knihovnu *Capacitive Touch Sense Library*, jejíž předpřipravené funkce slouží k práci s měřením kapacit. Některé funkce knihovny byly využity v konstruovaném zařízení.

5.1 Rozhraní JTAG

Mikrokontroléry z řady MSP430 podporují tzv. „in-circuit programování“ neboli programování paměti Flash a FRAM za chodu aplikace přes JTAG rozhraní, které je k dispozici na všech MSP430 zařízeních. Všechna tato zařízení podporují 4-vodičový JTAG a některá z nich i úspornější 2-vodičovou verzi SBW JTAG (Spy-By-Wire JTAG), přes který je programován i použitý mikrokontrolér MSP430G2553.

5.1.1 4-vodičový JTAG

Toto rozhraní je standardní verzí a pro posílání a přijímání dat z paměti vyžaduje čtyři vodiče. Na větších zařízeních, s větším počtem pinů, jsou tyto čtyři vodiče určeny pouze pro JTAG rozhraní. U menších zařízení jsou tyto vodiče sdíleny s funkčními vstupy a výstupy. Vzhledem ke sdílení stejných vodičů, je třeba jeden signálový vodič navíc, který je určen pro přepínání programovacích a funkčních vstupů a výstupů. Právě vyšší počet vodičů je nevýhodou tohoto typu JTAGu. Ovšem výhodou je vyšší přenosová rychlost.

5.1.2 2-vodičový JTAG

U tohoto rozhraní se jedná o optimalizované rozhraní nové generace, které vyžaduje pro programování pouze dva vodiče. Jedná se o vodiče SBWTDIO a SBWTCK. Mikrokontroléry, které dvou-vodičové zapojení podporují, v sobě mají dekodér, který zajišťuje převod z dvou-vodičového JTAGu na standardní čtyř-vodičový. Výhodou tohoto typu JTAGu je právě menší počet potřebných vodičů pro připojení a také zde nedochází k žádnému sdílení s funkčními vstupy a výstupy. Nevýhodou je ovšem nižší přenosová rychlost.

5.2 Capacitive Touch Sense Library (CTS)

Řada mikrokontrolérů MSP430 nabízí možnost různých periferních zařízení. Capacitive Touch Sense knihovna poskytuje nejrůznější funkce pro práci s kapacitou. Účelem knihovny, je vytvořit rozhraní mezi programátorem a zařízením pro jednodušší práci s kapacitním dotykovým systémem a jeho programování. Knihovna se skládá ze čtyř souborů: CTS_HAL.c, CTS_HAL.h, CTS_Layer.c a CTS_Layer.h. [6]

5.2.1 Knihovna CTS

5.2.1.1 CTS_HAL.c

Tato část knihovny zastupuje hardwarovou vrstvu (HAL = hardware abstraction layer). Obsahuje hardwarové konfigurace snímačů a jejich zapojení. Dle hardwarového zapojení se z této části vybírá konkrétní metoda zpracování kapacity na mikrokontroléru. Jedná se konkrétně o metody RO, RC a fRO popsány v kapitole 1.3. Zvolená metoda je potom přímo využívána ve [Structure.c](#).

5.2.1.2 CTS_Layer.c

Obsahuje definice funkcí, které jsou volané hlavní aplikací. Jde například o funkce:

- [TI_CAPT_Init_Baseline\(Sensor*\)](#); – Změří kapacitu na snímací elektrodě zadanou parametrem a naměřenou hodnotu uloží do přidružené proměnné jako základní kapacitu.
- [TI_CAPT_Update_Baseline\(Sensor *, uint8_t\)](#); – Aktualizované měření základní kapacity s porovnáním předchozí změřené kapacity. Jako parametr je snímací elektroda a počet měření, z kterých se vytvoří průměrná hodnota a porovná se.
- [TI_CAPT_Raw\(Sensor*, uint16_t*\)](#); – Funkce měří kapacitu každého prvku snímače, podle zadání vstupního parametru, vstupním parametrem je snímač, který je definován skupinou prvků a řadou čísel, která je aktualizována naměřenými hodnotami. Používá se k naladění citlivosti snímačů.
- [TI_CAPT_Button\(Sensor *\)](#); – Měření na obyčejném tlačítku, zadaným jako parametr, výstupem je „0“ pokud je změna kapacity menší než, nebo rovna prahové úrovni threshold nebo je výstupem „1“ pokud byla prahová úroveň threshold překročena.
- [TI_CAPT_Custom\(\)](#); – Měří změny relativní kapacity vzhledem ke kapacitě základní pro každý prvek snímače, skládá se alespoň ze dvou prvků. Vstupním parametrem je opět snímač definovaný skupinou prvků a řadou čísel.

5.2.1.3 CTS_HAL.h, CTS_Layer.h

Tyto dva soubory jsou hlavičkové soubory pro předchozí popsané c-soubory. Obsahují funkce pro volání v jejich nadřazených c-souborech a funkce pro volání v hlavní aplikaci.

5.2.2 Struktura snímače

Důležitými soubory, které jsou nutné pro funkci kapacitního dotykového systému a nastavení struktury samotného snímače, jsou strukturové soubory, především [Structure.c](#) a k němu jeho hlavičkový soubor [Structure.h](#).

5.2.2.1 Structure.c

Tento soubor obsahuje velice důležité parametry o struktuře snímače, tvořeného jedním nebo více prvky. Po nastavení správné struktury snímače, se zde provádí nastavení určitých parametrů. Příklad struktury a parametry můžou být následující:

```
const struct Element ele7 = {  
    .inputPxselRegister = (uint8_t *)&P1SEL,  
    .inputPxsel2Register = (uint8_t *)&P1SEL2,  
    .inputBits = BIT5,  
    .maxResponse = 450+655,  
    .threshold = 4000  
};  
const struct Sensor butB =  
{  
    .halDefinition = RO_PINOSC_TA0_WDTp,  
    .numElements = 1,  
    .baseOffset = 0,  
    .arrayPtr[0] = &ele7,  
    .measGateSource= GATE_WDT_ACLK,  
    .accumulationCycles= WDTp_GATE_64  
};
```

Vypsáný kód ukazuje strukturu levého tlačítka, ovládajícího modrou barvu. Každý snímač je tedy složen z prvků (elementů), které mají následující parametry:

[.inputPxselRegister](#) – Výběr portu, na jakém se nachází daný prvek.

[.inputBits](#) – Výběr konkrétního bitu zvoleného portu.

[.maxResponse](#) – Nastavení maximální hodnoty odezvy prvku, což je využitelné například u posuvníků, u tlačítka však může být nastavena hodnota 0, protože výstupní hodnota je buď „0“ nebo „1“. Maximální hodnota prvku snímače se jinak pohybuje při plném překrytí plochy prvku snímače prstem. Zadávané číslo je počet pulsů.

[.threshold](#) – Prahová úroveň snímacího prvku, pokud je překročena, je zpracována jako dotyk. Udané číslo udává počet pulsů potřebných k překročení.

Po nastavení prvku či prvků nacházející se snímači, se může přejít k vytvoření samotného snímače s následujícími parametry:

`.halDefinition` – Volba metody zpracování snímání kapacity. V práci bylo využito metody zpracování Relaxation Oscillator (RO).

`.numElements` – Počet prvků vytvářející samotný snímač. V tomto případě 1 protože jde pouze o jedno tlačítko se stavem 0 nebo 1.

`.baseOffset` – Offset pro index prvku. Když je nastaven na „0“ znamená, že první prvek snímače se začíná indexovat od 0.

`.arrayPtr[0]` – Ukazatel na jednotlivé prvky snímače.

`.measGateSource` – Časovač použitý pro měřící interval pulsů (kapacity).

`.accumulationCycles` – Nastavení délky intervalu měření.

5.3 Tlačítka a posuvník

Levé tlačítko tedy funguje jako obyčejné tlačítko. Stisknutím sepne, puštěním vypne modrou barvu diody. Druhé tlačítko funguje jako vypínač. Tedy stisknutím sepne a setrvá v tomto stavu až do dalšího stisknutí. Posuvník řídí zelenou barvu diody, tedy přesněji rychlost blikání, což je provedeno přes dekodér, kde má každé stisknuté tlačítko, či kombinace dvou stisknutých tlačítek určitou frekvenci.

5.3.1 Levé tlačítko

```
void switchBut(void){
    if(TI_CAPT_Button(&butB))
    {
        P1OUT &= ~BIT0;
    }
    else {
        P1OUT |= BIT0;
    }
}
```

Funkce `TI_CAPT_Button()`; z knihovny CTS vyhodnocuje pouze stav „0“ nebo „1“. Tedy zda došlo ke stisku, či nikoliv. Jelikož je LED dioda připojena tak, že má společnou anodu, je přes katody řízena zemí. Pokud tedy došlo ke stisku, je na Pin 0 Portu 1 poslána hodnota „0“. Pokud není podmínka provedena, na P1.0 je „1“.

5.3.2 Pravé tlačítko

```
void toggleBut(void){
    static unsigned char state = 0;

    if (state == 0){
        if(TI_CAPT_Button(&butR))
        {
            state = 1;
            P1OUT ^= BIT1;
        }
    }
    else if (!TI_CAPT_Button(&butR))
    {
        state = 0;
    }
}
```

Pro pravé tlačítko je opět použita funkce `TI_CAPT_Button()`; z knihovny CTS. Výjimkou oproti předchozímu kódu je pomocná proměnná `state`. Základní podmínkou funkce je, jestli je proměnná rovna nule. Pokud ano, přichází stejná funkce jako u předchozího tlačítka, která vyhodnotí změnu kapacity. Pokud je vyhodnocená změna jako stisk, je do `state` přiřazena hodnota „1“ a na výstupu se rozsvítí červená barva diody.

Při opětovném stisku tlačítka, kdy je do `state` přiřazena hodnota „1“ se nemůže provést základní podmínka, tudíž program pokračuje na řádce `else if`, kde negovaná funkce přiřadí proměnné `state` opět hodnotu „0“.

5.3.3 Posuvník

```
unsigned char decoder(void);
unsigned char pom = 0;
unsigned char but = 0;
unsigned char freq = 0;
unsigned int pole[] = {100 ,80 , 70, 60, 50, 40, 30, 20, 12, 6};
while (1)
{
    pom = decoder();
    if (pom != 0)
    {
        freq = pom - 1;
    }
}

unsigned char decoder(void)
{
    pom = 0;
    but = 0;

    if(TI_CAPT_Button(&but1))
        pom = 1;
    if(TI_CAPT_Button(&but2))
        pom += 2;
```



```

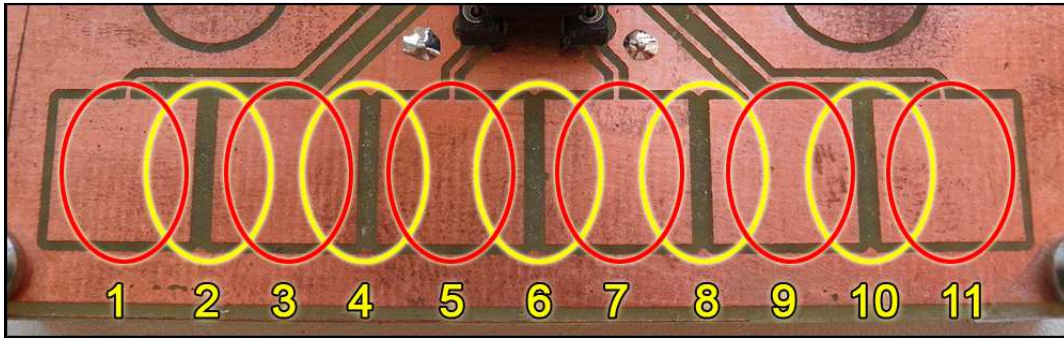
    if(TI_CAPT_Button(&but3))
        pom += 4;
    if(TI_CAPT_Button(&but4))
        pom += 8;
    if(TI_CAPT_Button(&but5))
        pom += 16;
    if(TI_CAPT_Button(&but6))
        pom += 32;

switch(pom)
{
    case 1: but = 1;         break;
    case 3: but = 2;         break;
    case 2: but = 3;         break;
    case 6: but = 4;         break;
    case 4: but = 5;         break;
    case 12: but = 6;        break;
    case 8: but = 7;         break;
    case 24: but = 8;        break;
    case 16: but = 9;        break;
    case 48: but = 10;       break;
    case 32: but = 11;       break;
    default: but = 0;        break;
}
return but;
}

#pragma vector=TIMER0_A0_VECTOR
__interrupt void ISR_Timer0_A0(void)
{
    static unsigned int cnt = 0;
    if (freq == 0){
        P1OUT |= BIT2;
        cnt = 0;
    }
    else {
        cnt++;
        if (cnt > (pole[freq])){
            P1OUT ^= BIT2;
            cnt = 0;
        }
    }
}
}

```

Posuvník je řešen jako soustava 11 prvků, z nichž 6 prvků je reálných a 5 prvků je „imaginárních“. Imaginární prvek posuvníku je vždy tvořen jako kombinace stisku mezi dvěma sousedícími reálnými prvky. Pro jasné pochopení je přiložen obrázek ze zkonstruovaného zařízení. Je zřejmé, že žlutě označené elektrody jsou právě imaginární.



Obrázek 24 - Úrovně na posuvníku

Pro funkci posuvníku byla vytvořena funkce `decoder()`, která je volána v nekonečné smyčce `while`. Vyhodnocení dotyku je opět realizováno pomocí funkce `TI_CAPT_Button()`; z knihovny CTS. Při vyhodnocení stisku prvku na posuvníku je do proměnné `pom` přiřazena hodnota 2^n dle stisknutého tlačítka. Konkrétně tedy: 1.tlačítko: 2^0 , 2.tlačítko: 2^1 , 3.tlačítko: 2^2 6.tlačítko: 2^5 . Při stisku imaginárního mezi-tlačítka, je pak do `pom` přiřazena hodnota součtu těch dvou stisknutých tlačítek.

Příkaz `switch` pracuje s proměnnou `pom` a do proměnné `but` přiřazuje hodnotu skutečného pořadí elektrody jako je na obrázku 24. V případě, že nenastane žádný z případů, je návratová hodnota `but = 0`. Tím je ošetřeno, že pokud dojde ke stisku více tlačítek najednou, na výstupu se nic nezmění.

Blikání zelené LED diody je ovládáno přerušením, kde se nejprve ověří, jestli se proměnná `freq = 0`. Pokud ano, tak je LED dioda trvale rozsvícena. V případě, že `freq` není nulová, přechází program do části `else`. Pokud je proměnná `cnt` větší, než hodnota v poli, dojde ke změně stavu na výstupu.

6 Naměřené výsledky

6.1 Předpokládané průběhy

Přibližné předpokládané průběhy závislosti pulsů na tloušťce izolační vrstvy jsou vidět na obrázku 18. Testování na obrázku 18 probíhalo pro izolant z jednoho materiálu různých tloušťek a pro tři různé velikosti snímací elektrody. Pro vyzkoušení správné funkce demonstrační desky, bylo nutné provést podobné testování, avšak s tím rozdílem, že snímací elektroda byla stále o stejném průměru a měnil se počet vrstev z různých materiálů.

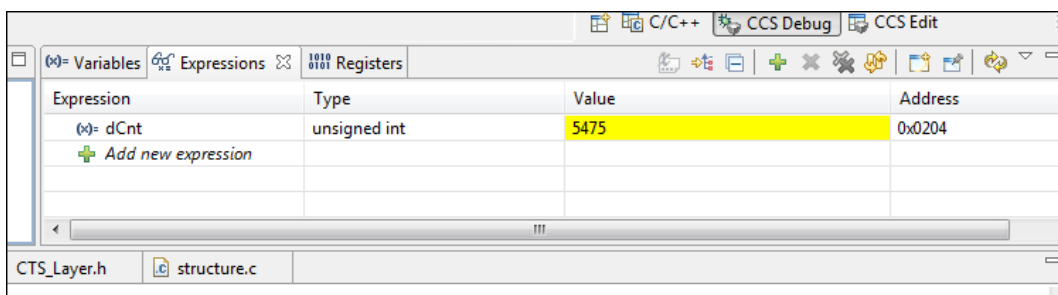
6.2 Naměřené výsledky

Pro zjištění správné funkce systému a jeho naladění bylo tedy provedeno vlastní měření pulsů na demonstrační desce a probíhalo na stále stejném tlačítku o průměru 10 mm. Byly vyzkoušeny tři různé izolanty: tvrdý silnější papír, plastové polystyrenové destičky a nakonec nepoměděné sklolaminátové destičky pro výrobu plošných spojů.

Měření pulsů probíhalo přes ukázkový kód dodávaný v Code Composer Studiu. Konkrétně se jedná o projekt *RO_PINOSC_TAO_WDTp_One_Button*. Po odkomentování řádku `#define ELEMENT_CHARACTERIZATION_MODE` se program přepne do režimu měření pulsů za pomoci funkce `TI_CAPT_Custom(&one_button,&dCnt)`; z knihovny CTS. Výstupem je proměnná `dCnt`, která obsahuje počet naměřených pulsů na testovaném tlačítku. Tuto proměnou je třeba nastavit v záložce *Expressions* pro její sledování. Pro průběžné sledování pulsů a vlastně i pro funkci měření, je třeba nastavit breakpoint na NOP, jak je to vidět v kódu.

```
#ifndef ELEMENT_CHARACTERIZATION_MODE
TI_CAPT_Custom(&one_button,&dCnt);
__no_operation();           // Zde musí dojít k nastavení BREAKPOINTU
#endif
```

Po nahrání programu do MCU a jeho spuštění už jen zbývá krokovat pomocí klávesy F7. Při každém jejím stisknutí dojde k aktualizaci hodnoty proměnné `dCnt`. Na následujícím obrázku je ukázka naměřené hodnoty pulsů na tlačítku. Počet zobrazených pulsů je vyšší, než jsou udávané výsledky v tabulce 3, protože toto ukázkové měření proběhlo bez jakékoliv izolační vrstvy.



Obrázek 25 - Naměřený počet impulsů v CCS

Výsledkem měření byl průměrný počet pulsů, který je závislý na tloušťce izolační vrstvy a druhu použitého materiálu. Tyto vrstvy byly celkem čtyři pro každý izolant. Na každé vrstvě proběhlo vždy osm měření, z nichž byl vypočítán průměr. Do průměru se nezapočítávala největší a nejmenší naměřená hodnota, aby se předešlo případným odchylkám. Přesné naměřené hodnoty pulsů jsou vidět v Tabulce 3. Graficky jsou hodnoty vidět v grafu na obrázku 26.

Tabulka 3 – Závislost pulsů na tloušťce izolantu

Materiál	Vrstva					
	1.	2.	3.	4.	5.	6.
	Průměrný počet pulsů					
Tvrký papír	2015	1234	895	730	601	498
0,4 mm / vrstva						
Polystyren	1123	439	305	162	N	N
0,9 mm / vrstva						
Sklolaminát	1220	705	568	511	N	N
1,4 mm / vrstva						

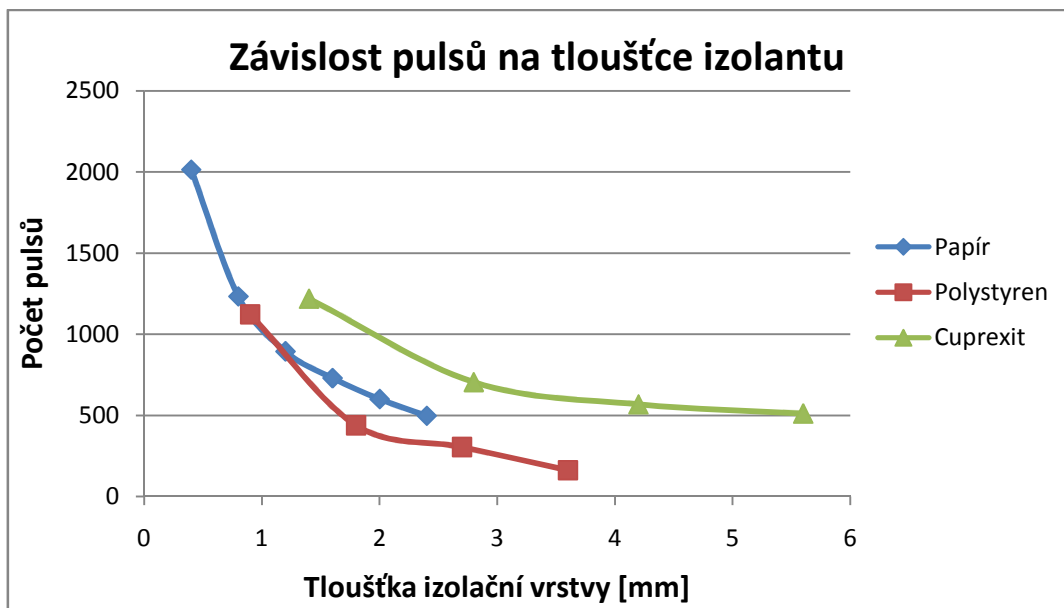
N – měření neproběhlo

Při použití papíru jako izolantu bylo možné provést měření dokonce až na šesti vrstvách, protože každá vrstva měla tloušťku jen 0,4 mm, tudíž přechod mezi jednotlivými výsledky naměřených pulsů nebyl tak skokový.

Jako další izolant byly použity tvrdé průhledné polystyrenové destičky. Každá vrstva této destičky měla tloušťku 0,9 mm, tudíž výsledky měření už se s každou vrstvou lišily významněji. Nejideálnější průběhy by byly na vrstvách s tloušťkou 0,1 mm, protože by vzniklo více naměřených bodů a průběh by vypadal lépe.

S posledním izolantem probíhalo opět měření na čtyřech vrstvách. Jako materiál izolantu byly použity sklolaminátové destičky, neboli nepoměděný cuprexit. Každá vrstva této destičky byla 1,4 mm silná. V celkovém součtu byla při čtvrté vrstvě tloušťka 5,6 mm, což už překračuje doporučené rozměry izolantu, které se volí v rozmezí 1 až 5 mm.

I přes to měření na čtvrté vrstvě sklolaminátu proběhlo a výsledný počet průměrných pulsů byl dokonce vyšší, než u tvrdého polystyrenu o celkové tloušťce 3,6 mm. Na grafu se opět potvrzuje správný průběh, jak tomu napovídá vzorec kondenzátoru, který má se vzrůstající vzdáleností mezi elektrodami exponenciálně klesající charakter.



Obrázek 26 - Závislost pulsů na tloušťce izolantu

Závěr

V této práci byla teoreticky rozebrána problematika technologie ovládání kapacitním snímáním. Bylo poukázáno na druhy kapacitních snímacích prvků, vlastnosti a jejich výhody a nevýhody. Byly také teoreticky popsány principy zpracování měřené kapacity.

Úkolem praktické části bylo zkonstruovat kapacitní dotykové ovládání sloužící k řízení elektrického zařízení.

Během tvorby jsem narazil na nejrůznější problémy způsobené hlavně neznalostí technologie a její teorie. Po důkladnějším nastudování materiálů a pochopení základů teorie kapacitního snímání mohla přijít na řadu praktická část práce. Návrh a vývoj zařízení probíhal podle doporučených postupů. Přesto jsem po zkonstruování zařízení přišel na nedostatky, které bych při další konstrukci již řešil jinak.

Co se týče hardwarové části zařízení, tak bych rozhodně volil jiné rozmístění snímačů na plošném spoji. V době jeho tvorby, jsem ještě neměl takové znalosti a snímací elektrody tlačítek byly zvoleny poměrně blízko snímacích elektrod posuvníku. Občas se totiž stává, že dojde k nechtěnému stisku prvku na posuvníku a tedy i k nechtěnému rozblíknutí diody. Asi největší nedostatek vidím ve vedení signálových spojů od snímacích elektrod do mikrokontroléru, které jsou vedeny ve stejné vrstvě, jako samotný snímač. Signálové spoje, součástky a MCU by měly být v jiné vrstvě než snímací elektrody. Integrita signálu je potom lepší a odolnější vůči rušení a výhodou je také lepší vzhled. Jednodušší i aplikování izolační vrstvy na plošný spoj. Právě při měření pulsů s izolanty byly jejich rozměry omezeny vzdáleností mezi snímačem a mikrokontrolérem. Jako poslední větší nedostatek bylo opomenutí na vyvedení konektoru pro programovací vodiče, aby mohl být mikrokontrolér laděn přímo v obvodu ovládání a nemusel být stále přendáván z patice zařízení do patice programátoru. Nouzovým řešením bylo připájení potřebných vodičů přímo na nožičky mikrokontroléru, což je vidět i na fotografii zařízení.

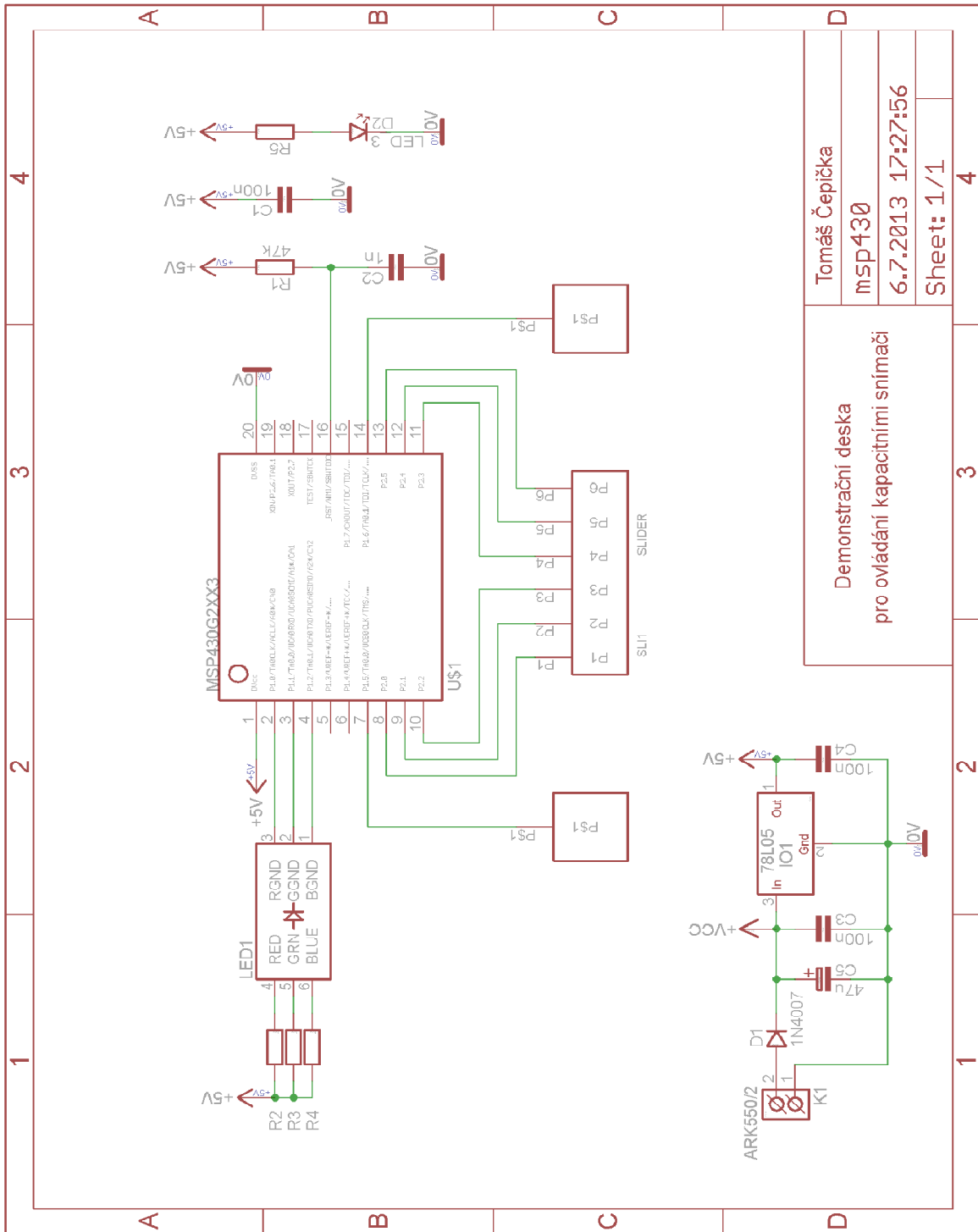
Jelikož je vždy co vylepšovat, tak by se i softwarová část dala řešit jiným způsobem. Při důkladném nastudování a výborných znalostech všech funkcí v knihovně *Capacitive Touch Sense Library*, by se dalo zhotovit dokonalejší zařízení a využít tak naplno velkého potenciálu mikrokontrolérů MSP430. Zmíněná knihovna byla pro práci obrovským přínosem, protože ušetřila spoustu práce i času při programování a ladění díky jejím funkcím pro vyhodnocování kapacity.

Vzhledem k popsaným problémům, které se vyskytly během vývoje zařízení, se podařilo zhotovit plně funkční kapacitní dotykové ovládání řídicí chod RGB LED diody. Plošný spoj byl tvořen v domácích podmínkách nejprve jako testovací verze. Tato verze se ukázala jako bezproblémově funkční, takže už se v tomto stavu ponechala bez změn. Toto kapacitní dotykové ovládání slouží spíše k ověření funkčnosti technologie a má v tomto stavu spíše demonstrační charakter.

Literatura

- [1] **BEZOUŠEK, Pavel a Vladimír SCHEJBAL.** *Elektrotechnika*. Pardubice, 2003. ISBN 80-7194-620-6. Univerzita Pardubice
- [2] **ALBUS, Z.** SLAA363A: *PCB-Based Capacitive Touch Sensing With MSP430* [online], 2007. [cit. 10-4-2013] Dostupné z: <http://www.ti.com/litv/pdf/slaa363a>
- [3] **CHAN, V., UNDERWOOD, S.** SLAA379: *MSP430 Capacitive Single-Touch Sensor Design Guide* [online], 2008. [cit. 21-4-2013]. Dostupné z: <http://www.ti.com/litv/pdf/slaa379>
- [4] **OXFORD SURFACES.** VISARC [online]. 2013 [cit. 2013-07-30]. Dostupné z: <http://www.oxfordsurfaces.com/content/technology/technology.asp>
- [5] **MAK, Z.** SLAA481A: *Two-Dimensional Capacitive-Touch Implementation Using the High-Resolution Timer_D of the MSP430F5132* [online], 2012. [cit. 24-3-2013]. Dostupné z: <http://www.ti.com/litv/pdf/slaa481a>
- [6] **TEXAS INSTRUMENTS.** *Capacitive Touch Sense Library* [online]. 2012 [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/capsenselibrary>
- [7] **TEXAS INSTRUMENTS.** SLAU144I: *MSP430x2xx Family User's Guide* [online]. 2012 [cit. 2012-11-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/slau144i/slau144i.pdf>
- [8] **FUJITSU.** *Capacitive Touch Sensors* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fme/articles/fujitsu-whitepaper-capacitive-touch-sensors.pdf>
- [9] **AJPTECH.** *Kapacitní snímače* [online]. 2013 [cit. 2013-07-20]. Dostupné z: <http://www.ajptech.cz/produkty/prumyslova-automatizace/baumer-senzory/snimace/kapacitni/>
- [10] **TOUCHSEMI.** *Kapacitní dotykové senzory* [online]. 2013 [cit. 2013-07-20]. Dostupné z: http://www.touchsemi.com/index.php?Show=10_Dotykov%E9_senzory_c
- [11] **ENERGY MICRO.** *Hardware Design for Capacitive Touch* [online]. 2012 [cit. 2013-06-23]. Dostupné z: http://cdn.energymicro.com/dl/an/pdf/an0040_efm32_capacitive_sense_hw_design.pdf
- [12] **EMBEDDED INSIGHTS.** *Replacing Mechanical Buttons with Capacitive Touch* [online]. 2010 [cit. 2013-04-02]. Dostupné z: <http://www.embeddedinsights.com/channels/2010/10/29/replacing-mechanical-buttons-with-capacitive-touch/>

Příloha A – Schéma zapojení



Příloha B – Fotografie zařízení

