

Kapacitný senzor zapojený ako theremin

Ján Bogár

14. júna 2013

Jednou z podmienok úspešného absolvovania predmetu Základy elektroniky je postaviť vlastné elektronické zariadenie a napísať o tom článok, z ktorého budú môcť ťažiť budúce generácie. Ako už čitateľ isto pochopil, toto je ten článok.

Ja som sa rozhodol, že ako svoj projekt zostrojím kapacitný senzor, ktorý neskôr zapojím buď ako theremin, alebo vstupné zariadenie pre počítač. V tomto článku si teda najprv ujasníme o čo ide, potom ako to funguje a nakoniec ako som to postavil. Nájdete tu tiež kompletnú schému zapojenia, ktoré som použil. Takže postupne:

1 Čo je kapacitný senzor?

Kapacitné senzory bezkontaktne merajú vzdialenosť predmetov, ktoré sa k nim približia. Robia to tak, že merajú kapacitu nejakého vodiča-antény, ktorá závisí aj od predmetov v okolí antény.

Aj keď takýto spôsob znie exoticky a nie príliš presne ¹, v praxi sa hojne využíva. Väčšina dotykových obrazoviek a touchpadov už dnes meria dotyk prstov kapacitne (teda pod citlivou plochou sa skrýva kapacitný senzor). Kapacitné senzory sa využívajú aj v priemysle na meranie vzdialeností častí strojov. No a jedno extra využitie je hudobný nástroj theremin.

2 Čo je theremin?

Theremin je hudobný nástroj, ktorý je unikátny tým, že sa naň hrá bez akéhokoľvek dotyku. Je pomenovaný po svojom tvorcovi, pričom Theremin postavil prvý theremin už v roku 1928. Samotný nástroj vyzerá jednoducho: krabica s reproduktorom, z ktorej trčia dve antény (ako ste už isto uhádli, vydávaný zvuk sa mení podľa kapacity týchto antén). Hudobník hrá približovaním svojich rúk k anténam, pričom jedna ovláda hlasitosť a druhá výšku tónu. Závisí už od šikovnosti hudobníka, či to znie úžasne, alebo otravne.

¹Napríklad, rovnakú zmenu kapacity môžu vyvolať predmety z rôzneho materiálu aj pri rôznych vzdialenostiach od senzora

3 Ako to funguje?

Keď už vieme aké všestranné zariadenie je kapacitný senzor, je na čase zamyslieť sa, ako funguje. Kapacitný senzor meria kapacitu nejakého vodiča, takže najprv treba pochopiť, čo to je. Kapacita je definovaná ako:

Kapacita sústavy dvoch vodičov je množstvo náboja, ktorú je nutné premiestniť z jedného vodiča na druhý aby napätie medzi nimi stúplo o jednotkové napätie.

Vyjadrené vzorcom

$$C = \frac{Q}{U}$$

Zdalo by sa teda, že potrebujeme na meranie kapacity dva vodiče, medzi ktorými odmeriame napätie- napríklad v doskovom kondenzátore meriame napätie medzi jeho dvomi doskami. To ale nie je tak úplne pravda. Môžeme merať aj kapacitu vodiča samého o sebe- potom meriame jeho kapacitu voči nekonečnu, a za napätie vystupuje potenciál.²

Občas sa to zvykne označovať ako samokapacita, nakoľko od kapacity voči inému vodiču, ktorá je vzájomnou kapacitou. Kapacitný senzor meria práve túto samokapacitu svojej antény. Za nekonečno budeme už štandardne považovať zem, o ktorej vyhlásime, že má nulový potenciál. Keď už ideme kapacitu merať, musíme mať rádovú predstavu o tom, aké hodnoty dosahuje.

Keďže stačí rádový odhad, vyberieme si taký tvar vodiča, pre ktorý sa to dobre počíta. Napríklad guľový vodič s polomerom R .

Potenciál vo vzdialenosti r od vodivej gule je daný vzťahom:

$$\phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r}$$

Čo pre napätie medzi povrchom gule a nekonečnom dáva:

$$U = \phi(r = R) - \phi(r = \infty) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{R}$$

Kapacita gule teda bude:

$$C = \frac{Q}{U} = 4\pi\epsilon R$$

Pre guľu s polomerom v ráde centimetrov to dáva $C = 10^{-12} \text{ F} = 1 \text{ pF}$

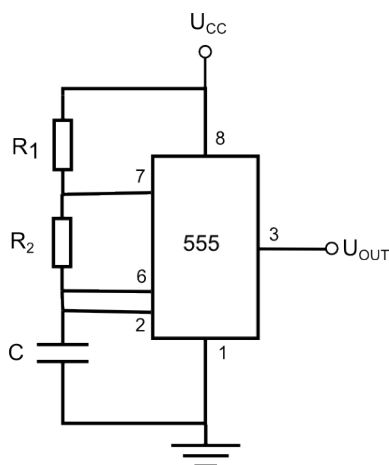
Prečo sa zmení kapacita tejto gule, keď k nej priblížim svoju ruku? Ľudskú ruku môžeme brať ako uzemnený vodič, a teda keď ju priblížim, prinesiem s ňou nekonečno bližšie k nášmu vodiču. Konfigurácia kondenzátora sa teda zmení,

²Dá sa to brať tak, že je to napätie merané voči hypotetickému vodiču umiestnenému v nekonečne, no takáto interpretácia je mátuca. Vodič v nekonečne je totiž naozaj len hypotetický.

zmení sa elektrické pole okolo vodiča a zmení sa aj jeho kapacita³. Odhadnúť o koľko sa kapacita zmení by vyžadovalo presnejší model a podrobnejšie výpočty, no nie je to nutné-vyskúšame a uvidíme. Predpokladajme, že zmena nebude príliš veľká.

4 Ako to postaviť?

Už teda vieme čo chceme odmerať a koľko to rádovo bude. Potrebujeme teda navrhnúť elektrický obvod, ktorý obsahuje kondenzátor, jeho výstup závisí na kapacite kondenzátora a funguje aj s kapacitami v ráde pikofaradov. Takýto obvod je našťastie jednoduché zapojenie integrovaného obvodu 555 nakreslené na obr. 1.



Obr. 1: Zapojenie integrovaného obvodu 555, ktoré produkuje obdĺžnikové pulzy s frekvenciou $f = \frac{1}{\ln(2) \cdot C \cdot (R_1 + 2R_2)}$

Takéto zapojenie produkuje na svojom výstupe obdĺžnikové pulzy, ktorých frekvencia závisí od kapacity kondenzátora C podľa vzťahu:

$$f = \frac{1}{\ln(2) \cdot C \cdot (R_1 + 2R_2)}$$

Miesto kondenzátora C teda pripojím na nožičku 2 kus drôtu, ktorý bude slúžiť ako anténa, ktorej kapacitu budem merať. Potom už len zvolím vhodné hodnoty odporov R_1 a R_2 a rudimentárny kapacitný senzor je na svete.

Výstup môžem ľahko zobrazit napríklad na osciloskope. Ak by som chcel použiť takýto kapacitný senzor ako vstupné zariadenie, môžem výstup priviesť

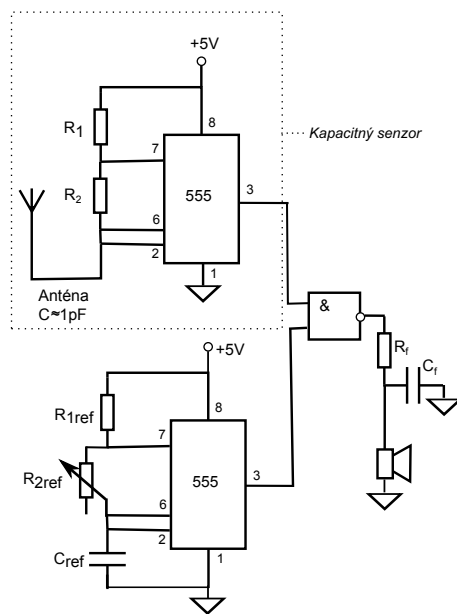
³Kapacita by sa zmenila aj keby bola ruka nevodivá, keďže má inú permitivitu ako vzduch. Takáto zmena by ale bola podstatne menšia. Preto sa napríklad pre dotykové obrazovky s kapacitným senzorom používa nie plastový, ale kovový stylus.

na audiovstup počítača a ďalej spracovať napr. pomocou knižnice PyAudio programovacieho jazyka Python. To by mohlo poskytnúť celkom zaujímavé možnosti, ale osobne som túto možnosť v čase písania článku nerealizoval.

Miesto toho som sa rozhodol spraviť z kapacitného senzora theremin. Priviesť výstup priamo na reproduktor by bolo možné, ale:

- Znel by zle.
- Na to, aby bol v počuteľných frekvenciách by museli byť odpory R_1 a R_2 fakt veľké (ale nič nedosiahnuteľné).
- Citlivosť na zmenu kapacity by bola malá

Miesto toho som zvuk generoval tak, že som výstup z kapacitného senzora zmiešal s druhým pulzným signálom s pevne danou, ale laditeľnou frekvenciou. Výsledný signál mal potom frekvenciu menšiu alebo rovnú rozdielu frekvencií týchto dvoch signálov. Vďaka tomu je citlivosť na zmenu kapacity podstatne vyššia. Potom som výsledný signál ešte prefiltraval cez dolnofrekvenčnú priepust', čím som sa zbavil všetkých vyššie vypísaných problémov (no, toho prvého len čiastočne). Výsledná schéma je na obr.2, pričom hodnoty použitých komponentov sú v tabuľke č.1.



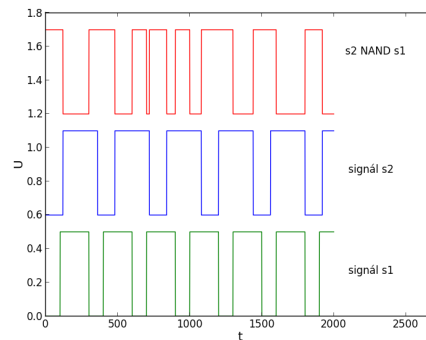
Obr. 2: Výsledné použité zapojenie. Použité hodnoty sú v tabuľke.

Konkrétne v mojom prípade som výstupy z obidvoch signálov spojil pomocou hradla NAND. Výstupný signál bol teda nulový len vtedy, ak boli nulové obidva zmiešavané signály zároveň. Dobré to vidieť na obr. 3. Obidva

Súčiastka	Hodnota
R_1	$750k\Omega$
R_2	$750k\Omega$
R_{1ref}	47Ω
R_{2ref}	$0 - 100\Omega$
C_{ref}	$0.033\mu F$
R_f	100Ω
C_f	$0.33\mu F$

Tabuľka 1: Hodnoty použitých súčiastok.

signály sú voči sebe v každej perióde viac a viac posunuté, a dĺžka medzier medzi výstupnými pulzmi je teda stále menšia.

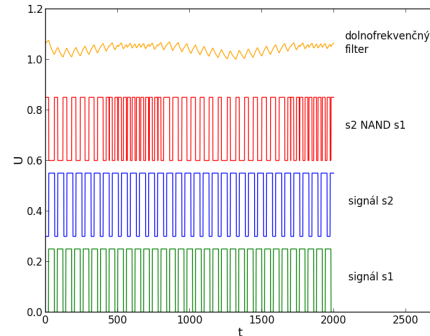


Obr. 3: Zmiešanie dvoch signálov s1 a s2 pomocou hradla NAND. Vidieť, že dĺžka pulzov vo výslednom signáli sa periodicky mení. Jednotlivé signály sú posunuté v y-ovom smere, a preto je treba brať y-ovú os len ako mierku. Všetky signály majú minimum na nule.

Z predchádzajúceho a aj z grafu je zrejmé, že priemerné napätie na výstupe bude periodicky klesať a stúpať.

Na obr. 4 je vykreslený priebeh napätí za dlhšiu časovú periódu, priebeh najnižšej harmonickej a výstupný signál po prefiltrovaní cez nízkofrekvenčnú priepusť.

Ku konštrukcii obvodu treba pridať ešte jednu poznámku. Pri zapojení je nutné prepojiť kondenzátorom uzemnený vodič a vodič ktorým privádzame napätie do obvodu. Dôvod je ten, že odber 555 obvodu kolíše, a tak sa predsalen mení napätie na napájacom vodiči. Obidva obvody 555 sa týmto ovplyvňujú, a ani jeden z nich nedostáva stabilné napájacie napätie, čo je nutné pre ich správnu funkciu. Pripojením kondenzátora medzi napájací a uzemňný vodič sa



Obr. 4: Zmiešanie dvoch signálov za dlhší časový úsek a výstupný signál po prefiltrovaní cez dolnofrekvenčnú priepusť. Výsledky boli získané numericky pre umelo zvolené hodnoty kapacity a odporu v dolnofrekvenčnej priepusti.

ale všetky nenulové frekvencie napájacieho napätia efektívne vyskratujú (treba preto vybrať dostatočne veľkú kapacitu), čo vstup stabilizuje.

5 A výsledok?

Ako anténa bol použitý kus obyčajného zaizolovaného drôtu, s dĺžkou približne 10 cm. Vyskúšal som aj iné dĺžky antén, ale rozdiel v citlivosti bol nepozorovateľný. Zariadenie reagovalo na pohyb ruky do vzdialenosti asi 10 cm až 20 cm od antény. Zvuk počuteľne menil svoj tón v pomerne širokom rozsahu, no ako hudobný nástroj by určite neposlúžil. Napriek filtrovaniu zrejme výstupný signál obsahoval dostatok frekvencií neladiacich so základnou frekvenciou. Zapojenie by sa osvedčilo možno tak ako alarm. Pri príliš malom aj pri príliš veľkom rozdieli frekvencií zmiešavaných signálov je totiž výstupný signál mimo rozsahu počuteľných frekvencií. Je teda možné naladiť systém pomocou potenciometra R_{2ref} tak, aby bol zvuk počuteľný len pri priblížení ruky k anténe (alebo naopak len pri jej vzdialení). Aby bol zvuk uchu lahodiacejší, bolo by zrejme nutné zmiešavať signály so sínusovým priebehom, a zmiešavať ich teda samozrejme inak ako NAND hradlom.