



Fakulteta za elektrotehniko
Univerza v Ljubljani

Vladimir Umek

**Kapacitivna tipka
ali
Stikalo občutljivo na dotik**

Seminarska naloga

pri predmetu
Elektronska vezja

V Ljubljani, april 2008

Izvleček	3
Senzorski del stikala.....	4
Možni principi delovanja	4
Na kakšen način merimo kapacitivnost.....	4
Možne realizacije	4
Konkreten primer realizacije kapacitivnega stikala	9
Senzorski del	9
Napajalni del	9
Spominski del.....	10
Izhodni ojačevalnik	11
Močnostni del.....	11
Priloga A – izpeljava ojačevalnika za transformacijo naboja	13
Priloga B – izpeljava za relaksacijski oscilator	14
Priloga C – izračun tranzistorskega stikala	15
Literatura in reference	17

Izвлеček

Zamisel projekta je bila izdelati na dotik občutljivo stikalo, enostavno zamenjavo klasičnega mehanskega stikala z elektronskim, ki zaznava kapacitivnost človeškega prsta ali pa kar cele dlani proti kovinski ploščici, ki je edini vidni del zunanjega stikala. Različni pristopi zaznavanja človeške kapacitivnosti se ne izkažejo dovolj učinkovito, zato je bilo potrebno izbrati najbolj primerne, ki zadosti zahtevam po zanesljivosti, velikosti in ceni. Z upoštevanjem dejstva, da človeško telo ozemljeno z obutvijo proti zemlji predstavlja kapacitivnost okrog 100pF, sta predstavljena dva principa linearne zaznavanja majhnih kapacitivnosti z ojačevalnikom za transformacijo naboja (charge amplifier) ter relaksacijskim oscilatorjem ter način zaznavanja kapacitivnega praga s klasičnim tranzistorskim stikalom. Predstavljena principa linearne zaznavanja sta ena izmed pogosteje uporabljenih v kapacitivnem zaznavanju pri pospeškometerih (accelerometri) in vseh visokoimpedančnih polprevodniških kapacitivnih detektorjih.

Celotno stikalo je sestavljeno iz senzorskega dela, ojačevalnika, pomnilnika in močnostnega dela, ki dejansko skrbi za vklop in izklop bremena. Zgrajeno je modularno, z namenom hitrih modifikacij pri preklapljanju različno močnih bremen.

Senzorski del stikala

Možni principi delovanja

Izkoristimo lahko lastnosti:

- naboj zaradi šumnega polja izmeničnih vodov, ki ga človeško telo pobira z bližnjih naprav, ta naboj pa potem detektiramo z visoko impedančnim vhodom
- upornosti kože, kjer med dva med seboj ločena kontakta položimo prst, preko katerega izmenični signal lažje prehaja
- kapacitivnosti, ki zahteva uporabo oscilatorja, vendar je zaradi tega tudi bolj zanesljiva, če je le oscilator frekvenčno stabilen
- toplote, ker je silicij oz. katerikoli drug polprevodnik občutljiv na spremembe temperature, vendar je problem čas, ki ga potrebujemo, da polprevodnik sploh ogrejemo
- odbojnosti svetlobe, ker prst ali dlan lahko odbijata svetlobo
- gibanja, če premikamo prst ali dlan blizu detektorja

Najbolj zanimivi in hkrati zanesljivi sta možnost zaznavanja naboja ter kapacitivnosti, kjer za 'referenco' uporabimo nekaj desetkiloherčni oscilator.

Na kakšen način merimo kapacitivnost

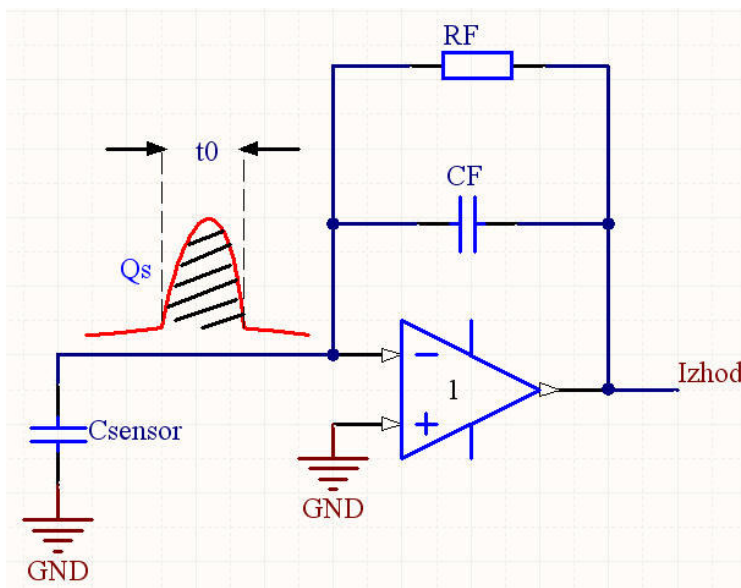
- Direktna metoda merjenja je polnjenje kondenzatorja s konstantnega tokovnega vira, za določen čas ter potem merjenje napetosti na njem. Ta metoda zahteva majhen tok, natančen tokovni vir in visokoimpedančni vhod za merjenje napetosti.
- Po drugi možni metodi, s kondenzatorjem naredimo RC oscilator in potem merimo časovno konstanto, frekvenco ali periodo. Metoda je enostavna, vendar ponavadi nenatančna.
- Lahko izmerimo tudi kondenzatorjevo impedanco za izmenične signale. Kondenzator izpostavimo sinusni signal in merimo tok in napetost.
- Uporabimo ojačevalnik za transformacijo naboja (charge amplifier), ki nam razmerje referenčnega naboja in naboja na merjenem kondenzatorju pretvori v ustrezno veliko napetost.

Možne realizacije

Ker načrtujemo stikalo, je lahko tudi senzorski del prilagojen temu in ni nujno, da kapacitivnost merimo linearno, ampak samo določimo neko mejo, nad katero bo naše stikalo preklopilo, kar je tudi naša osnovna zahteva, saj mora biti stikalo čim bolj neodvisno od raznih šumnih virov, še manj pa si želimo, da bi preklapljal, če se mimo stikala samo sprehodimo (po vzoru kapacitivnih proximity senzorjev).

Vseeno, naj predstavim možne realizacije, s katerimi je možno naboj in kapacitivnost zaznavati na različne, a precej zanesljive principe:

Če ima detektor kapacitiven značaj in ima visoko impedanco, uporabimo operacijski ojačevalnik kot integrator s kapacitivnostjo v povratni veji. Operacijski ojačevalnik imaj visoko vhodno impedanco, integrira pa šibke pulze naboja in jih pretvarja v napetost na nizkoimpedančnem izhodu.



Slika 1: Ojačevalnik za transformacijo naboja

Slika 1 prikazuje princip delovanja ojačevalnika naboja oz. ojačevalnika za transformacijo naboja, saj naboja ne ojačuje, ampak ga transformira v napetost oz. normira z referenčno kapacitivnostjo.

Vhodna diferencialna stopnja operacijskega ojačevalnika je ponavadi narejena z nizko šumnimi FET v CMOS vezavi ali JFET, ojačevalnik pa mora imeti visoko odprtozančno ojačanje, da kapacitivnost detektorja ne vpliva na povratni sklop.

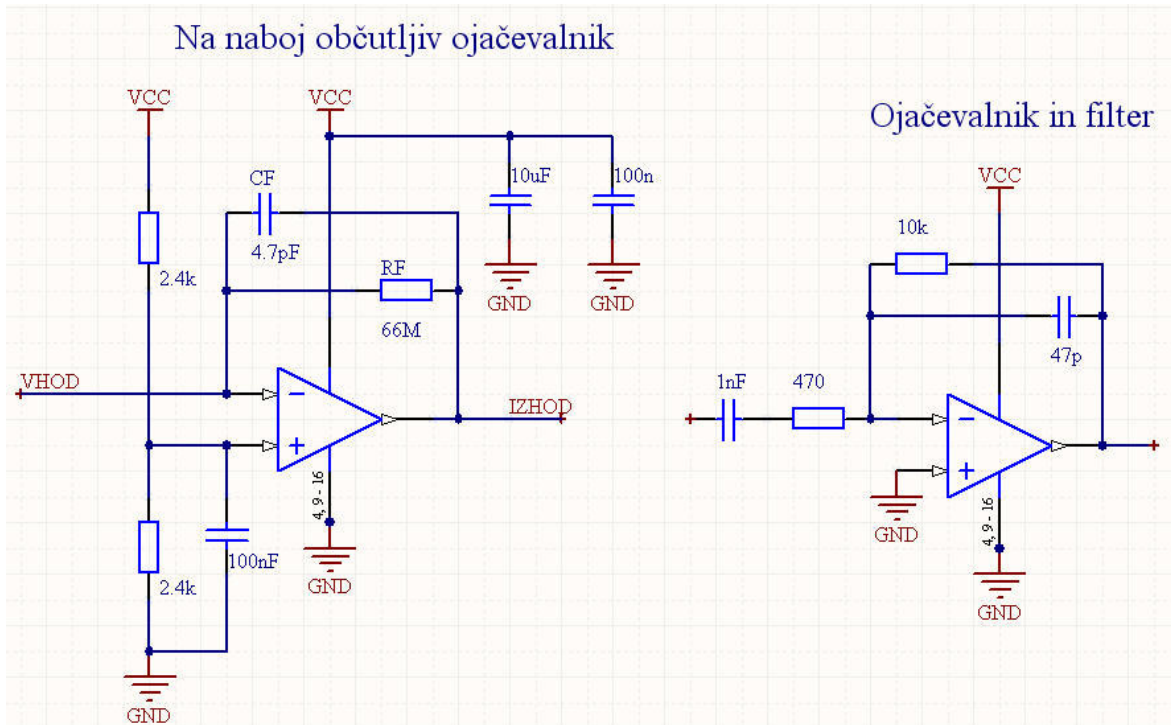
Pri spremembi kapacitivnosti se generirajo pulzi naboja. Zaradi generiranega naboja se vhodni potencial ojačevalnika poveča, zato se prav tako poveča izhodni potencial. Ker imamo visoko odprtozančno ojačanje, izhod preko povratnega sklopa deluje nazaj na vhod in znižuje potencial invertirajoče sponke (izenačuje vhodna potenciala). Posledica tega so napetostni pulzi na izhodu, ki so integrirani pulzi naboja. Zaradi upornosti R_F (za DC tokove) dodane paralelno k kapacitivnosti C_F , se izhodni pulzi na izhodu zmanjšujejo s časovno konstanto $\tau = R_F * C_F$.

Izračun ojačevalnika je dodan v prilogi A.

Na **Slika 2** je prikazan na naboj občutljiv ojačevalnik, z enojnim napajanjem in napetostnim delilnikom na pozitivni sponki.

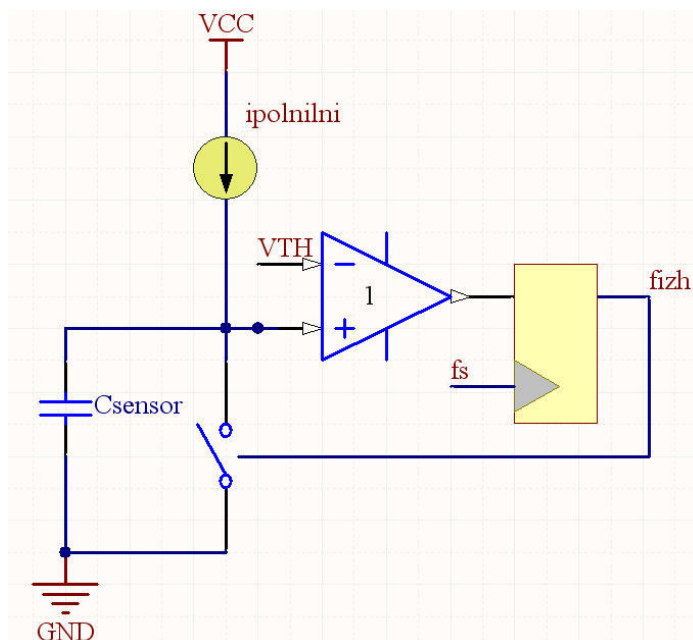
V povratni vezavi sta C_F in R_F . C_F naj bo točen, temperaturno kompenziran keramični kondenzator, R_F pa visokoohmski upor. Oba sestavljata povratni sklop, po katerem teče DC komponenta I_b^- operacijskega ojačevalnika in zagoravlja praznenje C_F in tako »resetira« vezje. Operacijski ojačevalnik mora imeti zelo nizek DC vhodni tok I_b^- (reda pA) in CMOS ali JFET

vhode. Poleg tega je zahtevan nizek vhodni šum in visok slew rate. (Zahtevam zadostita npr. MAX4477 ali OPA134).



Slika 2: realizacija ojačevalnika za transformacijo naboja ter dodan filter

Na izhod na naboj občutljivega ojačevalnika dodamo še ojačevalnik in filter v enem, saj vezje do frekvenc nižjega pola deluje kot diferenciator, pri višjih frekvencah pa kot integrator z namenom slabljenja visokofrekvenčnega šuma.



Slika 3: princip relaksacijskega oscilatorja

Na **Slika 3** je prikazan princip z relaksacijskem oscilatorjem, ki je učinkovito in enostavno vezje za meritev kapacitivnosti.

Sestavljen je iz:

- komparatorja,
- tokovnega vira,
- stikala za razelektritev
- kapacitivnega senzorja

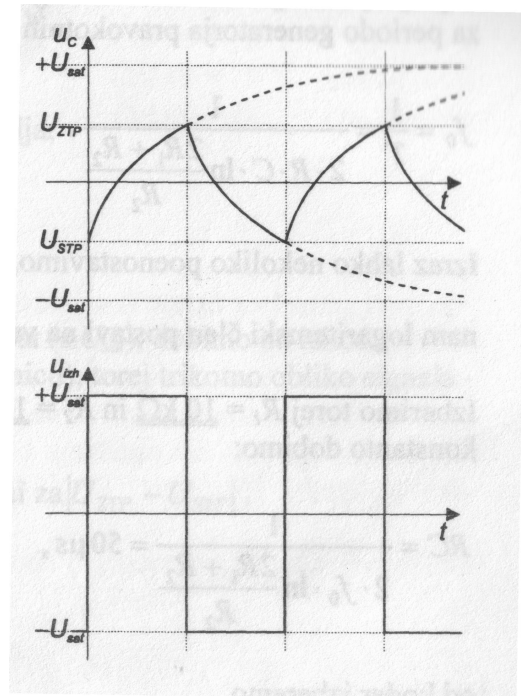
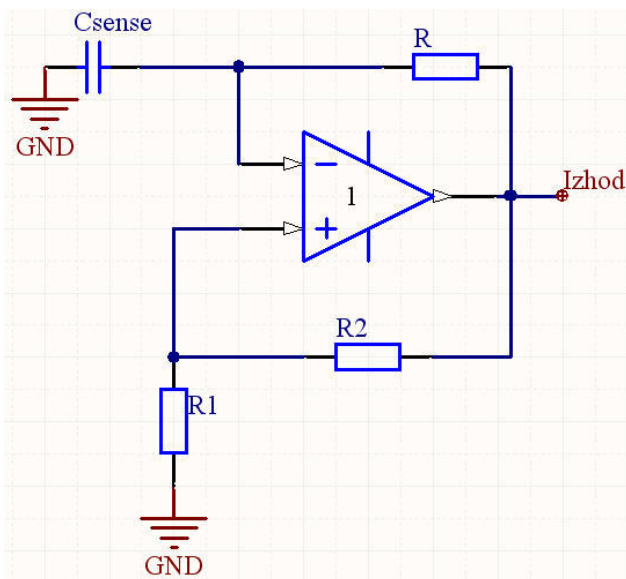
Na začetku je stikalo odprto, tok zato teče v »kondenzator« in ga polni, napetost na njem raste, dokler ne doseže praga V_{TH} določenega na minus sponki. Komparator nato preklopi in sklence stikalo. Naboj s kondenzatorja steče proti

masi, zato se kondenzator izprazni, izhod komparatorja pa spet preklopi. Izhodna frekvenca oscilatorja je direktno proporcionalna polnilnemu toku in inverzno proporcionalna kapacitivnosti (in pragu).

$$f_{IZH} = \frac{i_{po \ln i \ln i}}{C_{sensor} \times V_{TH}} \Rightarrow C_{sensor} = \frac{i_{po \ln i \ln i}}{V_{TH}} \times \frac{1}{f_{IZH}}$$

Vidimo, da če merimo frekvenco, lahko ugotovimo velikost kapacitivnosti. Bolj natančno (in dlje časa) kot merimo frekvenco, bolj natančno imamo izmerjeno kapacitivnost.

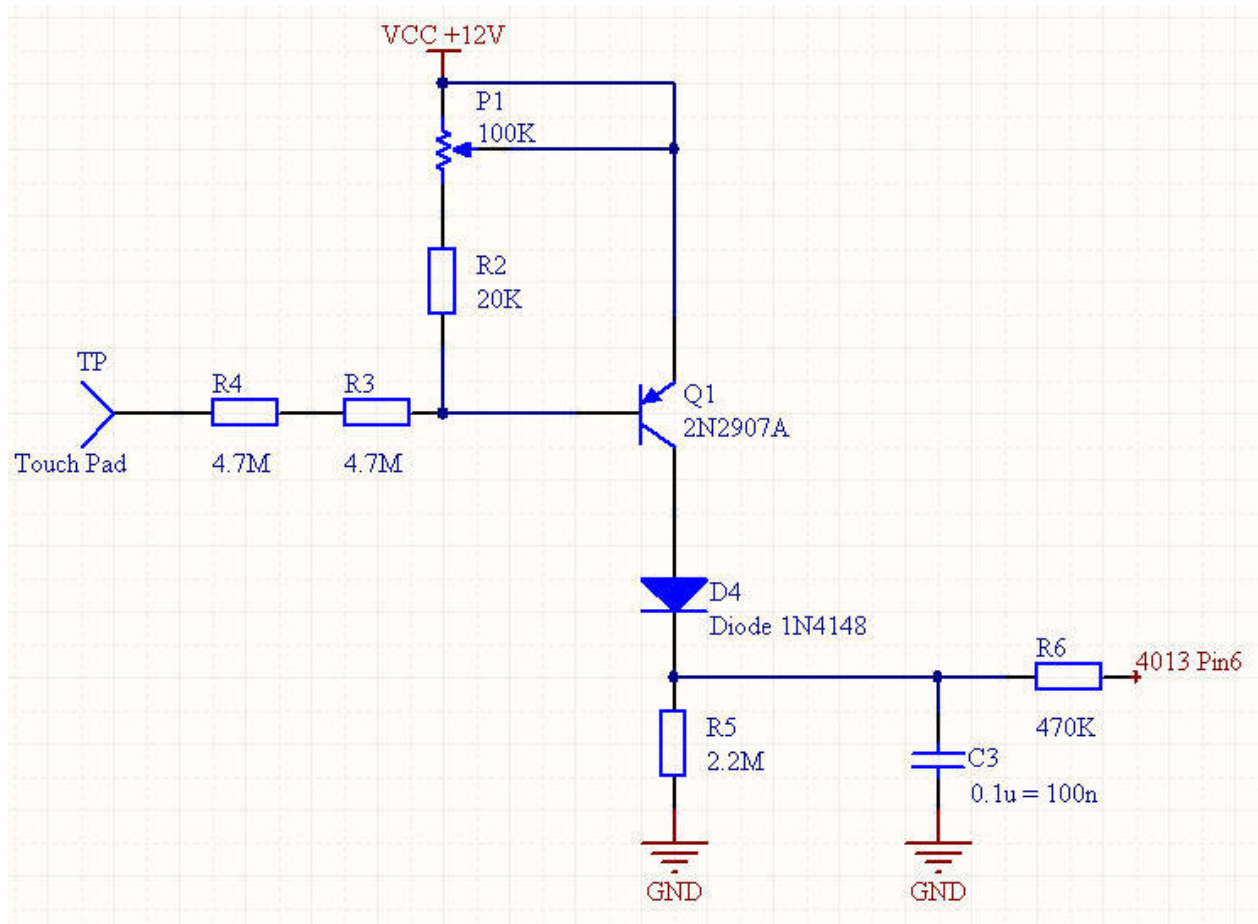
Pri toku generatorja 5uA, $V_{TH} = 1.3V$ in $C=30pF$ dobimo frekvenco na izhodu $f_{IZH} = 128kHz$, kar predstavlja periodo okrog 7.8us, kar s sodobnim mikrokrmilnikom ni težko meriti.



Slika 4: relaksacijski oscilator in idealiziran graf napetosti na kondenzatorju ter izhodu

Izračun za relaksacijski oscilator najdete prilogi B.

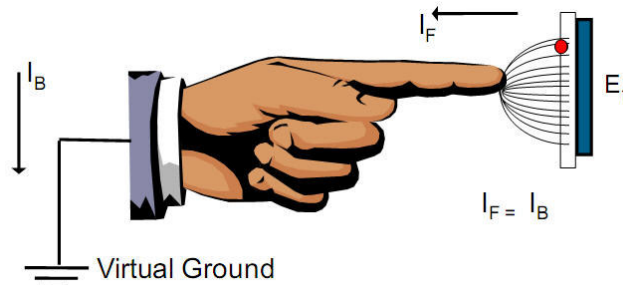
Naslednji princip, ki sem ga tudi uporabil v svojem vezju je prikazan na **Slika 5**: tranzistorski ojačevalnik z visokoimpedančnim vhomom in je načeloma še enostavnejši od prejšnjih dveh in popolnoma zadosti potrebi po enostavnem kapacitivnem stikalu, saj za realizacijo potrebujemo samo en tranzistor in upore, s katerimi zagotovimo visokoimpedančni vhod.



Slika 5: tranzistorski ojačevalnik z visokoimpedančnim vhomom

Vendar pa za realizacijo tega vezja potrebujemo oscilator, kar na shemi ni prikazano!

Tranzistor je v tem primeru uporabljen kot stikalo. Če pritiska na kontaktno ploščico ni, je stikalo razklenjeno, vsa napetost je praktično na U_{CE} in toka $I_E = I_C$ skozi stikalo ni. Ko pa pride do pritiska na ploščico, na njej ustvarimo (navidezni) kondenzator, ki se preko roke poveže na maso, kot lepo kaže **Slika 6**:



Slika 6: ob pritisku na stikalno ploščico

Novonastali kondenzator predstavlja zaradi izmenične komponente (zaradi oscilatorja) visoko impedanco (imamo kapacitivnost okrog 60-200pF), ki skupaj s serijsko dodanima uporoma R_3 in R_4 poskrbi, da se tranzistorsko stikalo sklone, prepušča tok, ta pa povzroča napetostni padec na visokoohmskem uporu R_5 . Na ta način, lahko realiziramo kapacitivno stikalo.

Potenciometer je dodan za nastavljanje praga odprtja tranzistorja, saj bo kapacitivnost povzročena s pritiskom na kontaktno ploščico najverjetneje odvisna od okolja v katerem se bo nahajala. Vezju je dodana še dioda, ki preprečuje povratni sklop izmeničnega signala ter izhodni filter, ki signal počisti izmenične komponente za nadaljno obdelavo.

Izračun tranzistorskega stikala je v prilogi C.

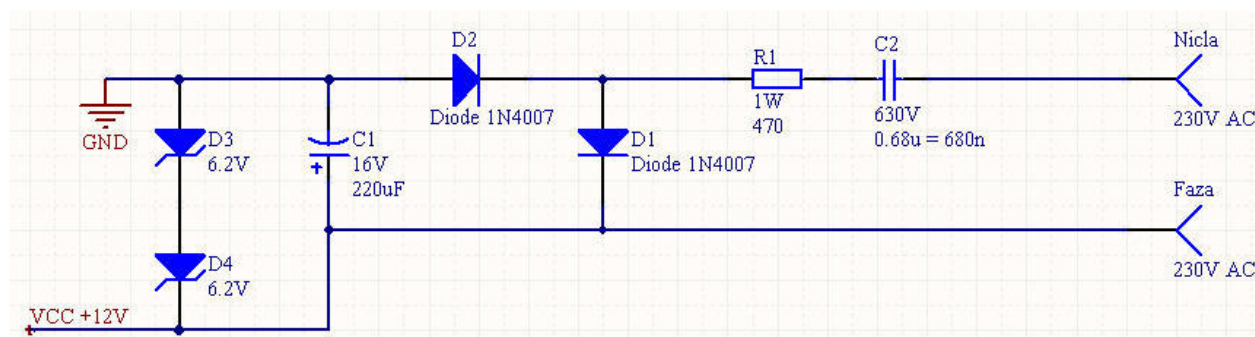
Konkreten primer realizacije kapacitivnega stikala

Senzorski del

Senzorski del vezja lahko vidimo na **Slika 5**: tranzistorski ojačevalnik z visokoimpedančnim vhodom razlaga pa se nahaja pod sliko.

Napajalni del

Kot rečeno, sem kot najenostavnejšo ter za moj primer hkrati zanesljivo in robustno možno realizacijo vzel zadnje vezje prikazano na **Slika 5**: tranzistorski ojačevalnik z visokoimpedančnim vhodom. Senzorski del vezja, za delovanje potrebuje oscilator, oziroma dodaten vir izmenične komponente signala, ki ga zagotovimo kar iz usmerniškega vezja na **Slika 7**: usmerniški del vezja.



Slika 7: usmerniški del vezja

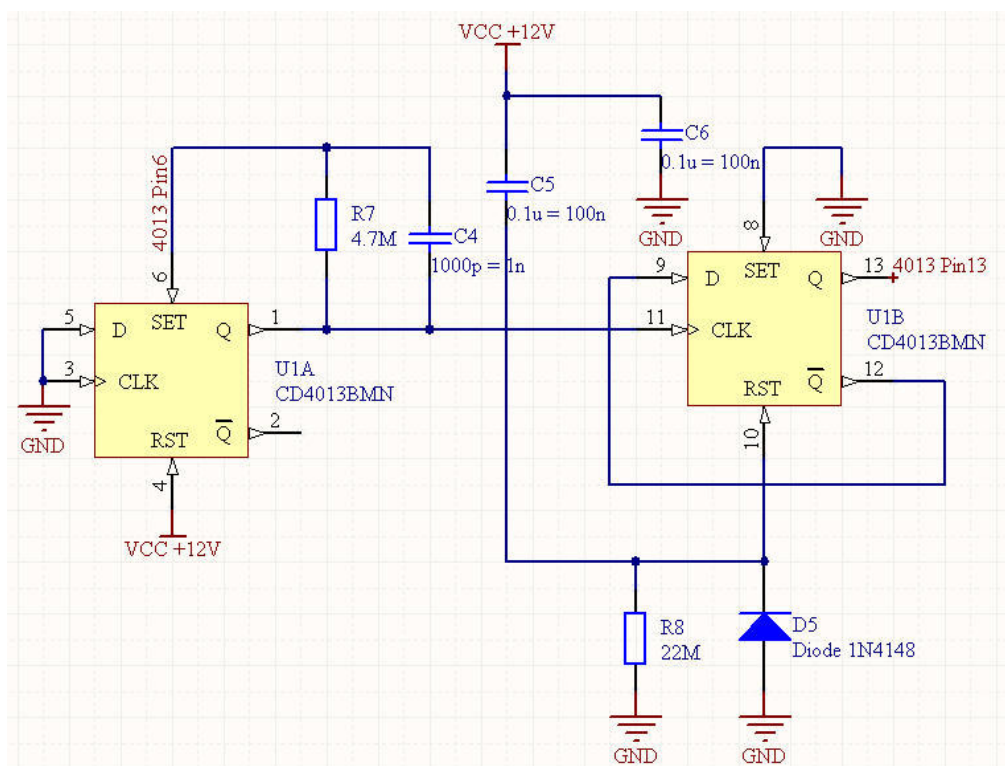
Vezje ima na izhodu namesto ene 12V Zener diode, kar dve 6.2V, edini razlog pa je v tem, da pri roki ni bilo nobene z Zenerjevo napetostjo 12V. Zaradi tega se nam enosmerna komponenta dvigne za 0.4V, kar pa v ničemer ne škoduje nadaljnim delom vezja. Za prototip je ta rešitev dobra, za vsa nadaljna stikala pa bomo seveda vgradili Zener diode z nazivno napetostjo 12V.

Po nekaj časovnih konstantah, ko se časovni pojav konča imamo v ustaljenem stanju na izhodu DC komponento približno 12.4V ter približno pravokotno AC komponento frekvence 50Hz in amplitude 110mV.

Časovna poteka napetosti med prehodnim pojavom in v ustaljenem stanju sta simulirana v SPICE-u in sta priložena v prilogi D.

Spominski del

Da bo naše vezje po pritisku kontaktne ploščice zadržalo trenutno stanje in se zares obnašalo kot stikalo, potrebujemo vsaj en bit spomina, tega pa najenostavneje realiziramo z D celico. V ta namen je uporabljen CMOS IC 4013, ki vsebuje dve D pomnilni celici:

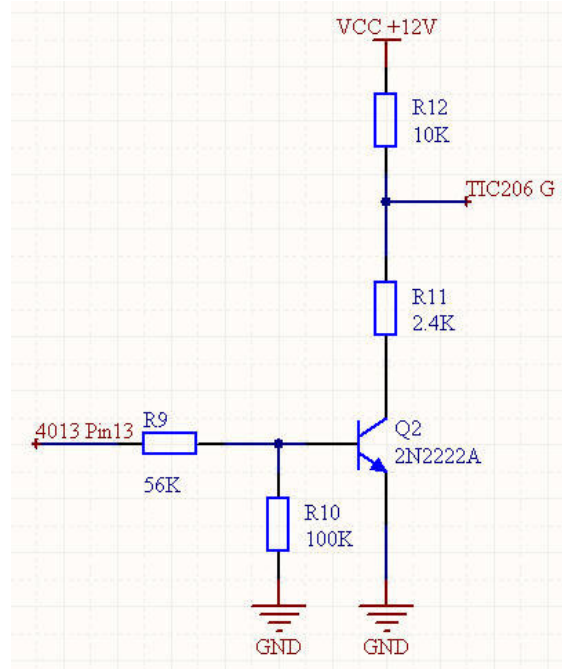


Slika 8: Schmittov prožilnik in pomnilni del vezja

Prva D celica na **Slika 8**: Schmittov prožilnik in pomnilni del vezja je povezana kot Schmittov prožilnik in služi za oblikovanje impulzov, ki prožijo uro naslednje celice, ki predstavlja en bit pomnilnika. Dioda D₅ in upor R₈ skrbita za pravilen reset celice ob vklopu. Izhod na pinu 13 lahko peljemo na poljuben ojačevalnik ali izhodno stopnjo, ki vklaplja in izklaplja breme.

Izhodni ojačevalnik

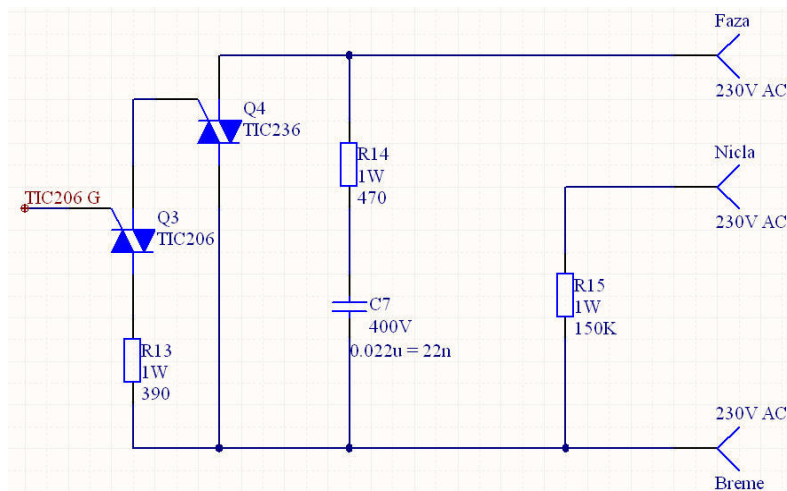
Tudi izhodni ojačevalnik na **Slika 9**: izhodni ojačevalnik je nastavljen kot stikalo, sposoben pa je krmiliti manjša bremena ali pa vklapljati močnejša polprevodniška stikala.



Slika 9: izhodni ojačevalnik

Močnostni del

Ker želimo stikalo uporabiti in zamenjati za standardna mehanska stikala, moramo primerno dimenzionirati tudi močnostno stopnjo stikala, tako da ta lahko krmili tudi močnejša bremena.



Slika 10: možna močnostna stopnja

Slika 10: možna močnostna stopnja prikazuje možno močnostno stopnjo, z dvema triakoma: prvega Q3 vžigamo in ugašamo z izhodnim ojačevalnikom, medtem ko se Q4 vžiga s pomočjo Q3 in upora R13, ki zagotovi potreben vžigni tok I_{GT} .

Bistvene podatke za uporabljen triak TIC206M in TIC236M najdemo v **Tabela 1**.

Element	$I_{T(RMS)}$	V_{DRM}	I_{GT}	V_{GT}	I_H
TIC206M	4A	600V	5mA	2V	15mA
TIC236M	12A	600V	50mA	2.5V	50mA

Tabela 1

Vidimo lahko, da je močnostna stopnja dimenzionirana tako, da teoretično lahko preklaplja 2.7kW ohmski (!) porabnik. Za normalno uporabo (preklapljanje žarnic npr.) lahko močnostno vezje predimenzioniramo, kar stikalu zmanjša ceno in velikost.

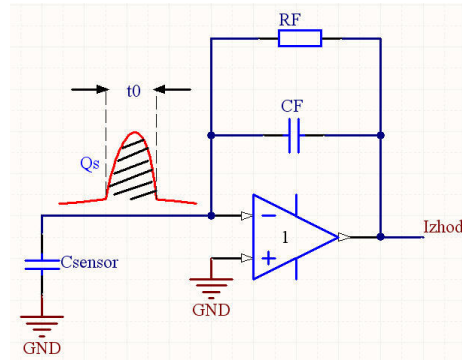
Kratek zaključek

Vezje, ki bi ga uporabili za praktično preklapljanje ima lahko ločene dele, najboljše na dva dela in sicer: detektor in spominski del skupaj, ter izhodni ojačevalnik in močnostni del skupaj. V primeru ločevanja detektorja in spominskega dela z zelo dolgim kablom se lahko zgodi, da impedanca kabla predstavlja prevelik padec napetosti in D celica zaradi prenizkega proženja ne preklopi.

V primeru dolge povezave med kontaktno ploščico in detektorjem, moramo nujno ustrezno prilagoditi napetost odprtja tranzistorja s potenciometrom P_1 , saj drugače tranzistor ne bo preklapljal.

Tiskano vezje lahko narišemo v več izvedbah, največ sprememb pri posamezni zahteva močnostni del, ki bi bil za preklapljanje ohmskih bremen nizkih moči (žarnice) lahko tudi v SMD tehniki, medtem ko bo za močnejša bremena potrebno poseči po klasični diskretni izvedbi. Vse druge dele vezja pa lahko v vseh primerih realiziramo z SMD elementi in tako precej minimiziramo tiskanino.

Priloga A – izpeljava ojačevalnika za transformacijo naboja



Prevajalno funkcijo vezja najlažje dobimo, če računamo z vidika naboja. C_{sensor} modeliramo kot serijsko vezavo kapacitivnosti C_s in konstantnega napetostnega vira V_s . Na C_{sensor} tako predpostavimo naboj, ki mora biti enak naboju vhodne kapacitivnosti operacijskega ojačevalnika C_A ter naboju kapacitivnosti C_F v povratni vezavi:

$$Q_S = Q_A + Q_F$$

$$Q_S = V_- C_A + V_F C_F$$

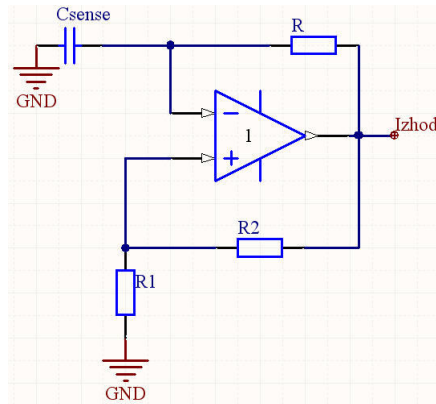
Sedaj upoštevamo relacijo med izhodom ojačevalnika in negativno sponko:

$$Q_S = -\frac{U_{\text{IZH}}}{A_U} C_A + (U_{\text{IZH}} + \frac{U_{\text{IZH}}}{A_U}) C_F = -U_{\text{IZH}} (C_A + (1 - A_U) C_F) \frac{1}{A_U}$$

Dobljeno enačbo še obrnemo in dobimo naslednji izraz:

$$U_{\text{IZH}} = \frac{Q_S}{\frac{C_A}{A_U} - C_F + \frac{C_F}{A_U}} \cong -\frac{Q_S}{C_F} \Big|_{A_U \rightarrow \infty} = -\frac{C_S}{C_F} V_-$$

Priloga B – izpeljava za relaksacijski oscilator



$$\text{Zgornja točka preklopa: } U_{ZTP} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (+U_{sat})$$

$$\text{Spodnja točka preklopa: } U_{STP} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-U_{sat})$$

Obe sta določeni z delilnikom (izhodne napetosti) v pozitivni povratni veji.
Kirchoffov zakon za vozlišče V-:

$$C \frac{du_C}{dt} = i_C = i_R = \frac{u_R}{R} = \frac{u_{izh} - u_C}{R} \Rightarrow \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{RC} = \frac{u_{izh}}{RC}$$

Reševanje nehomogene DE 1 reda se glasi:

$$u_C(t) = u_{izh} + B e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ kjer je } \tau = RC.$$

Da dobimo konstanto B moramo upoštevati začetne pogoje, ki se v stacionarnem stanju za čas $t=0$ glasijo: $u_{izh} = U_{sat}^+$ in $u_C = U_{STP}$, kar nam da konstanto

$$B = U_{STP} - U_{sat}^+$$

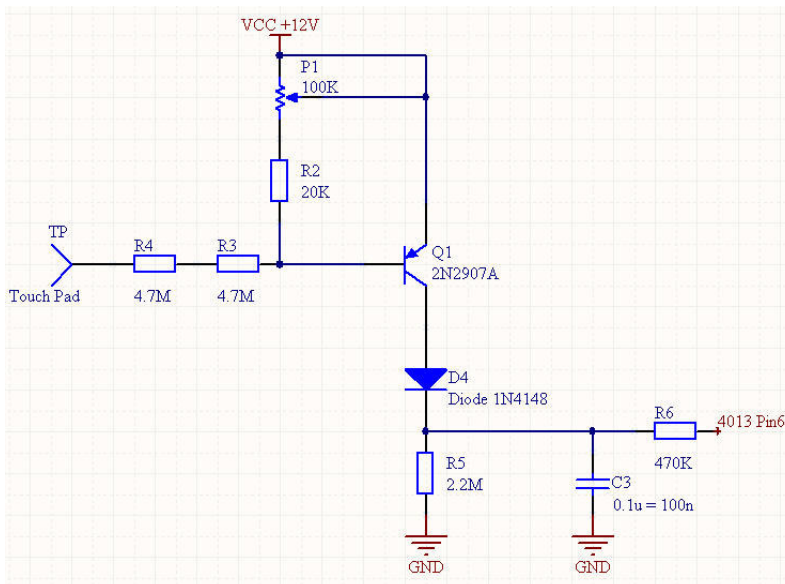
V stacionarnem stanju predpostavimo napetost na kondenzatorju U_{ZTP} , ter $U_{izh} = U_{sat}^+$ in dobimo:

$$U_{ZTP} = U_{sat}^+ + (U_{STP} - U_{sat}^+) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Če v zgornjo enačbo vstavimo enačbi za U_{ZTP} in U_{STP} , ter upoštevamo $U_{sat}^- = -U_{sat}^+$, dobimo rezultat za periodo nihanja oscilatorja:

$$T = 2\tau \ln \frac{2R_1 + R_2}{R_2}$$

Priloga C – izračun tranzistorskega stikala



V primeru odprtega stikala so želje: $U_{izh} = U_{R5} \approx 0V$, kolektorski tok je nezaželen, zato je želja $I_C \approx 0A$, vsa napetost pa zato ostane na U_{CE} . Bazni tok je zanemarljiv, zato predpostavimo, da je potencial na bazi kar enak U_{CC} in napetost $U_{BE} \approx 0$, saj je skorajda v kratkem stiku. Ker nam del vezja z R_3 in R_4 ter kondenzatorjem navidezno odpade, z računanjem nimamo skrbi.

Ob pritisku na kontaktno ploščico, imamo vejo z R_3 , R_4 preko kondenzatorja povezano na maso, zato veljajo Kirchoffove zančne in vozliščne enačbe. Kapacitivnost kondenzatorja vzamemo tipično 100pF, kar pri frekvenci 50 Hz, predstavlja reaktanco približno 32M Ω .

Za vezje na zgornji sliki podamo nove oznake: $P_1 + R_2 = \mathbf{R}_1$ ter $R_3 + R_4 = \mathbf{R}_2$, reaktanca kondenzatorja je X_C , potencial na bazi pa U_B .

Najprej poiščemo R_1 , pri ustrezni U_{BE} :

$$U_B = U_{CC} \frac{R_2 + X_C}{R_1 + R_2 + X_C}$$

Ker velja:

$$U_{CC} - U_B = -U_{BE}$$

Pišemo:

$$U_{CC} + U_{BE} = U_{CC} \frac{R_2 + X_C}{R_1 + R_2 + X_C} \Rightarrow U_{BE} = U_{CC} \left[\frac{R_2 + X_C}{R_1 + R_2 + X_C} - 1 \right]$$

Od koder sledi:

$$R_1 = \frac{U_{CC}}{U_{CC} + U_{BE}} [R_2 + X_C] - [R_2 + X_C]$$

Zapišemo vozliščno enačbo za bazno vozlišče, tok skozi R1 označimo kot I_1 , tok skozi R2 pa I_2 :

$$I_1 = I_B + I_2$$

$$\frac{U_{CC} - U_B}{R_1} = \frac{U_B}{R_2 + X_C} + I_B \Rightarrow I_B = \frac{U_{CC}}{R_1} - U_B \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + X_C} \right]$$

Sedaj, ko imamo bazni tok, lahko izračunamo tok skozi kolektor z upoštevanjem β :

$$I_C = \beta I_B$$

Izhodna napetost bo napetost na uporu R5, zato velja:

$$U_{IZH} = I_C + R_5 \Rightarrow R_5 = \frac{U_{IZH}}{I_C}$$

Napetost U_{BE} mora biti ravno na meji med odprtjem tranzistorja, upor R_2 si izberemo in mora biti visokoimpedančni, X_C je določen s kapacitivnostjo, R_C si želimo čim večjega za visoko izhodno napetost, čim bližje napajalni.

Literatura in reference

Jonassen N. – Human body capacitance: static or dynamic concept?

David A. Johnson, Discover Circuits – <http://www.discovercircuits.com>

David A. Johnson, Discover Circuits – Introduction to Capacitance Proximity Switches

Mark Lee, Cypress Semiconductor Corp – The art of capacitive touch sensing

Walter G. Jung, Analog Devices – OP AMP Applications

Jerald G. Graeme, Gene E. Tobey – Operational Amplifiers: Design and Applications

Hamamatsu, Solid State Division – Characteristics and use of Charge amplifier, SD-37

Silicon Labs - Capacitive touch sense solution, AN338

Brad Albing, Philips Medical Systems Inc, Touch switch needs no DC return path

Maxim – MAX4475 ÷ MAX4478/MAX4488/MAX4489, Low-Noise, Low-Distortion OPAMP

SGS-Thomson Microelectronics – 2N2907 datasheet

National Semiconductor – CD4013BC Dual D Flip Flop datasheet

Power Innovations Limited – TIC206, TIC236M datasheet