1.4 Oblikovanje digitalnega signala

1.4.1 Komparator napetosti

Signal svetlobnega sprejemnika je lahko zvezna napetost U_{mer}, nadaljnja elektronika pa pogosto potrebuje samo informacijo, ali je signal dovolj velik ali ne. Če želimo signal priključiti na digitalni vhod, mora ustrezati napetostnim nivojem uporabljene logične družine. Pri klasični 5-voltni logiki TTL (na primer družina 74xx) veljajo približno naslednje meje:

Tabela 1: Približni napetostni nivoji klasične 5-voltne logike TTL.

Vhod ali izhod	Logična 0	Logična 1
vhodni nivo	$U_{\mathrm{IL}} \leq 0{,}8\,\mathrm{V}$	$U_{\mathrm{IH}} \geq 2{,}0\,\mathrm{V}$
zagotovljeni izhodni nivo	$U_{\mathrm{OL}} \leq 0{,}4\,\mathrm{V}$	$U_{\mathrm{OH}} \geq 2{,}4\,\mathrm{V}$

Vhodna napetost med približno $0{,}8\,\mathrm{V}$ in $2{,}0\,\mathrm{V}$ je nedoločena: digitalno vezje v tem območju ne zagotavlja pravilnega logičnega stanja. Zato zvezno spreminjajočega se signala fotodiode ali fototranzistorja praviloma ne priključimo neposredno na digitalni vhod. Najprej ga pretvorimo v jasno določeno nizko ali visoko logično raven.

Za to uporabimo komparator napetosti. Komparator primerja merilno napetost U_{mer} z referenčno napetostjo U_{ref} in na izhodu ustvari signal, ki je odvisen od tega, katera napetost je večja. Tako lahko na primer določimo, ali je osvetljenost presegla izbrano mejno vrednost. Operacijski ojačevalnik lahko uporabimo kot preprost komparator, vendar je za hitro in zanesljivo preklapljanje pogosto primernejši namenski komparator.

Če je merilna napetost priključena na neinvertirajoči vhod in referenca na invertirajoči vhod, velja približno:

Pri tem sta U_{ZN} zgornja in U_{SN} spodnja izhodna nasičitvena napetost:

$$U_{\mathrm{iz}} \approx \begin{cases} U_{\mathrm{ZN}}, & U_{\mathrm{mer}} > U_{\mathrm{ref}}, \\ U_{\mathrm{SN}}, & U_{\mathrm{mer}} < U_{\mathrm{ref}}. \end{cases}$$

Izhodna napetost ni nujno enaka napajalni napetosti. Pri izbiri vezja preverimo, ali je vhodno območje ustrezno in kako blizu napajalnim napetostnim potencialom se lahko približa izhod. LM358 je uporaben pri enojnem napajanju, vendar ni namenski hitri komparator in njegov izhod se pri visoki ravni ne obnaša kot idealen izhod logičnega vezja.

Slika 1.8: Komparator za pretvorbo osvetljenosti v digitalni signal.

Slika 1: Slika 1.8: Komparator za pretvorbo osvetljenosti v digitalni signal.

Za primerjavo delovanja sta na voljo KiCadov projekt komparatorja LM741 in starejši KiCadov projekt z LM358.

1.4.1.1 Komparator z odprtim kolektorjem

Pri komparatorju z odprtim kolektorjem izhodni tranzistor lahko izhod potegne na nižji napetostni potencial V, ne more pa ga sam postaviti na visoko raven. Zato potrebujemo dvigovalni upor R_P (pull-up):

$$I_P \approx \frac{U_C - U_{\text{iz}}}{R_P}.$$

Prednost takega izhoda je možnost prilagoditve na drugo logično napetost in združevanje več izhodov v funkcijo »wired-AND«. Pri izbiri R_P upoštevamo uhajavi tok, vhodni tok naslednjega vezja, zahtevano hitrost in dovoljeni tok izhodnega tranzistorja. Manjši upor omogoči hitrejši prehod navzgor, vendar poveča tokovno obremenitev.

1.4.2 Schmittov sprožilnik in histereza

Če je vhodni svetlobni signal blizu preklopne meje, lahko šum povzroči več zaporednih preklopov. Schmittov sprožilnik uporablja pozitivno povratno zvezo in ima dve preklopni meji:

- pri naraščanju vhodne napetosti se izhod preklopi pri zgornji meji,
- pri padanju vhodne napetosti se izhod preklopi pri spodnji meji.

Digitalna izvedba s Schmittovimi vrati (npr. 74HC14). Histerezo lahko zagotovijo digitalna vrata z vgrajeno Schmittovo vhodno stopnjo. Ta ima dve preklopni meji: pri naraščanju vhodnega signala preklopi pri zgornjem pragu, pri padanju pa pri spodnjem. Med pragoma ohranja prejšnje logično stanje, zato počasno ali nekoliko šumno vhodno napetost pretvori v jasen digitalni prehod in zmanjša možnost neželenega večkratnega preklapljanja.

74HC14 vsebuje šest invertirajočih Schmittovih prožilnikov. Uporabimo ga lahko za oblikovanje signalov iz tipk, RC-členov ali senzorskih izhodov, kadar njegovi vhodni pragovi ustrezajo uporabljeni logični družini. Ker gre za invertirajoča vrata, je logični izhod nasprotnega stanja glede na vhod; po potrebi uporabimo dodatno stopnjo ali drugačno izvedbo vrat.

Mejna vhodna potenciala glede na GND, V_{T+} in V_{T-}, ter širino histereze lahko odčitamo iz podatkovnega lista Nexperia za 74HC14/74HCT14 (Nexperia 2024). V razdelku 12, preglednici 10 (stran 7), poiščemo del tabele za **74HC14** in pri uporabljeni napajalni napetosti U_C preberemo najmanjšo, značilno

in največjo vrednost pragov; podatkovni list napajalno napetost označuje z V_{CC}. Širino histereze izračunamo kot razliko potencialov: $U_H = V_{T+} - V_{T-}$. Pri načrtovanju upoštevamo dovoljeno območje vrednosti, ne le značilnih vrednosti. Pazimo tudi, da ne zamenjamo različic 74HC14 in 74HCT14, saj imata različna vhodna pragova.

Pragovi niso poljubno nastavljivi, ampak so določeni z družino in izvedbo integriranega vezja. Vhodni signal in napajanje morata ostati znotraj dovoljenih meja, izhod pa lahko krmili le omejeno breme. Zato Schmittova vrata niso nadomestilo za komparator, kadar potrebujemo natančno nastavljiv prag, večje območje vhodnih napetosti ali določeno histerezo; pred uporabo preverimo podatkovni list. Kadar potrebujemo tak nadzor nad pragovi, uporabimo analogno izvedbo s komparatorjem in pozitivno povratno zvezo. V nadaljevanju najprej obravnavamo simetrično napajanje, nato pa še enojno napajanje z nastavljivo sredino histereze.

1.4.2.1 Simetrično napajanje: histereza okoli 0 V Najprej obravnavajmo invertirajoči Schmittov sprožilnik: vhodni signal priključimo na invertirajoči vhod, na neinvertirajočem vhodu pa z uporoma ustvarimo prag, ki je odvisen od izhodnega stanja.

Invertirajoči Schmittov sprožilnik z uporoma R in hR, vezanima na GND.

Slika 2: Invertirajoči Schmittov sprožilnik z uporoma R in hR, vezanima na GND.

Začnimo z osnovno idejo: upor R je vezan na GND, zato je sredina histereze pri $0\,\mathrm{V}$. Predpostavimo enaka izhodna nasičenja po absolutni vrednosti: $U_{\mathrm{ZN}} = +U_{\mathrm{nas}}$ in $U_{\mathrm{SN}} = -U_{\mathrm{nas}}$.

Ko je izhod v zgornjem nasičenju, teče tok skozi zaporedno vezana upora hR in R. Napetost na uporu R določa zgornji preklopni prag:

$$U_{T+} = U_R = RI_+ = R\frac{U_{\mathrm{ZN}}}{hR + R} = \frac{U_{\mathrm{ZN}}}{h+1}.$$

Ko je izhod v spodnjem nasičenju, podobno dobimo spodnji prag:

$$U_{T-} = U_R = RI_- = R\frac{U_{\mathrm{SN}}}{hR + R} = \frac{U_{\mathrm{SN}}}{h+1} = -\frac{U_{\mathrm{nas}}}{h+1}.$$

Širina histereze je razlika med pragoma:

$$U_H = U_{T+} - U_{T-} = \frac{2U_{\mathrm{nas}}}{h+1}.$$

Če sta izhodni nasičenji na primer približno $+10\,\mathrm{V}$ in $-10\,\mathrm{V}$ ter izberemo $h = 9$, sta praga $U_{T+} = +1\,\mathrm{V}$ in $U_{T-} = -1\,\mathrm{V}$, histereza pa $U_H = 2\,\mathrm{V}$. Dejanski izhodni nasičenji preverimo v podatkovnem listu.

1.4.2.2 Enojno napajanje in nastavljiva sredina histereze V praksi je pogosto primernejše enojno napajanje, saj številna senzorska in digitalna vezja delujejo med 0 V in pozitivnim napajalnim potencialom. Histereza, centrirana okoli 0 V, bi tedaj lahko zahtevala negativne vhodne napetosti, ki jih vezje ne more sprejeti. Poleg tega želimo sredino preklopa pogosto nastaviti glede na senzor ali želeno zaznavno mejo. To dosežemo z nastavljivo referenco U_{ref}.

Invertirajoči Schmittov sprožilnik z enojnim napajanjem, uporoma R in hR ter nastavljivo referenco.

Slika 3: Invertirajoči Schmittov sprožilnik z enojnim napajanjem, uporoma R in hR ter nastavljivo referenco.

Če zanemarimo vhodni tok, izračunamo prag neposredno iz napetosti $U_R = RI$ na uporu R. Za zgornji prag, ko je izhod v zgornjem nasičenju, velja:

$$U_{T+} = U_{\mathrm{ref}} + U_R = U_{\mathrm{ref}} + RI_+ = U_{\mathrm{ref}} + R\frac{U_{\mathrm{ZN}} - U_{\mathrm{ref}}}{hR + R} = U_{\mathrm{ref}} + \frac{U_{\mathrm{ZN}} - U_{\mathrm{ref}}}{h + 1}.$$

Pri spodnjem nasičenju teče tok od reference proti izhodu. Označimo njegovo pozitivno velikost z I_-. Napetost na uporu R zato odštejemo od reference:

$$U_{T-} = U_{\mathrm{ref}} - U_R = U_{\mathrm{ref}} - RI_- = U_{\mathrm{ref}} - R\frac{U_{\mathrm{ref}} - U_{\mathrm{SN}}}{hR + R} = U_{\mathrm{ref}} - \frac{U_{\mathrm{ref}} - U_{\mathrm{SN}}}{h + 1}.$$

Širina histereze je zato

$$U_H = U_{T+} - U_{T-} = \frac{U_{\mathrm{ZN}} - U_{\mathrm{SN}}}{h + 1}.$$

Sredino histereze izračunamo kot povprečje obeh pragov:

$$U_M = \frac{U_{T+} + U_{T-}}{2} = U_{\mathrm{ref}} + \frac{U_{\mathrm{ZN}} + U_{\mathrm{SN}} - 2U_{\mathrm{ref}}}{2(h + 1)} = \frac{2hU_{\mathrm{ref}} + U_{\mathrm{ZN}} + U_{\mathrm{SN}}}{2(h + 1)}.$$

Iz izraza je razvidno, da U_{ref} pri končnem h praviloma ni natančno enaka sredini histereze. Sredina se ji približa, ko je $h \gg 1$; natančno pa velja $U_M = U_{\mathrm{ref}}$ tudi tedaj, ko je $U_{\mathrm{ref}} = (U_{\mathrm{ZN}} + U_{\mathrm{SN}})/2$. Pri enojnem napajanju 5 V, $U_{\mathrm{ZN}} = 4{,}8\,\mathrm{V}$, $U_{\mathrm{SN}} = 0{,}2\,\mathrm{V}$, $h = 9$ in $U_{\mathrm{ref}} = 2{,}0\,\mathrm{V}$ dobimo $U_{T+} = 2{,}28\,\mathrm{V}$, $U_{T-} = 1{,}82\,\mathrm{V}$, $U_H = 0{,}46\,\mathrm{V}$ in $U_M = 2{,}05\,\mathrm{V}$. Razmerje uporov določa širino histereze, referenca pa vpliva na njen položaj in sredino.

Za preverjanje izbrane izvedbe lahko uporabimo tudi spletna kalkulatorja Schmittovega sprožilnika. Vnesemo želena preklopna praga, izhodne nivoje in izbrano toleranco; kalkulatorja predlagata najbližje vrednosti uporov iz izbranega standardnega niza (E6–E96) ter prikažeta pričakovane pragove

pri dejanskih vrednostih in tolerancah uporov. Na voljo sta kalkulatorja za neinvertirajoči in invertirajoči Schmittov sprožilnik (Random Science Tools 2021b, 2021a). Rezultat uporabimo kot predlog in ga preverimo z izračunom vezja.

Vrednosti izhodnih nivojev in morebitno notranjo histerezo preverimo v podatkovnem listu komparatorja. Proizvajalčeve aplikacijske opombe in referenčne zasnove, na primer TI-jev načrt in članek Analog Devices, pokažejo izračun pragov in preverjanje vezja (Kay and Claycomb 2014; Moghimi 2000).

Za začetno izbiro naj bo histereza približno **2–3-krat večja od šuma od vrha do dna**. Če šuma ne poznamo, lahko poskusimo z **2–5 % uporabnega razpona**, nato pa preverimo, da signal še zanesljivo prečka oba praga. Preveliko histerezo je bolje preprečiti z zmanjšanjem šuma, na primer s filtriranjem ali ustreznejšo vezavo (Analog Devices 2009; Kay and Claycomb 2014; Moghimi 2000).

Na voljo sta KiCadova projekta za Schmittov sprožilnik: osnovna izvedba in neinvertirajoča izvedba.

Praktična opomba: Neinvertirajočo izvedbo lahko dobimo tako, da v opisani vezavi zamenjamo priključka vhodne napetosti U_{vh} in reference U_{ref}: U_{ref} priključimo na invertirajoči vhod, U_{vh} pa namesto reference na uporovno vejo, ki določa prag. Izhod se tako spremeni v isti smeri kot vhodni signal, kar je pogosto bolj naravno za načrtovanje in razumevanje delovanja vezja. V tem poglavju smo zaradi preglednejših računskih izpeljav podrobneje obravnavali invertirajočo izvedbo.

Literatura

[] Analog Devices. 2009. *Comparators*. MT-083. https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-083.pdf.

[] Kay, Art, and Timothy Claycomb. 2014. *Comparator with Hysteresis Reference Design*. No. TIDU020A. Texas Instruments. https://www.ti.com/lit/ug/tidu020a/tidu020a.pdf.

[] Moghimi, Reza. 2000. “Curing Comparator Instability with Hysteresis.” *Analog Dialogue* 34 (7). https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/curing-comparator-instability-with-hysteresis.html.

[] Nexperia. 2024. *74HC14; 74HCT14: Hex Inverting Schmitt Trigger*. Nexperia B.V. https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT14.pdf.

[] Random Science Tools. 2021a. “Inverting Schmitt Trigger Calculator.” https://www.random-science-tools.com/electronics/inverting-schmitt-trigger-calculator.htm.

[] Random Science Tools. 2021b. “Non-Inverting Schmitt Trigger Calculator.” https://www.random-science-tools.com/electronics/schmitt-trigger-calculator.htm.