

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 27 (1999/2000)

Številka 5

Strani 270-274

Jože Pahor:

ANALOGNO DIGITALNA PRETVORBA

Ključne besede: fizika, računalništvo, elektronika, pretvorniki, prevajalniki.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/27/1416-Pahor.pdf>

© 2000 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

ANALOGNO DIGITALNA PRETVORBA

Računalniki delajo z digitalnimi podatki. Pogovarjajo se z besedami, kot so 10010000 ali 11001100. Tega jezika ne razumemo, zato imamo tipkovnico, ki, denimo, pritisk na tipko A spremeni v vzorec ali besedo 01000001, številko 1 pa v vzorec 00110001. Kar se v računalniku dogaja pomembnega za nas, pove računalnik prek zaslona. Tudi tja pošilja računalnik sporočila v svojem jeziku.

Tipkovnico in zaslon smo si oblikovali po meri, da bi nam bilo komuniciranje čim lažje. Tipkovnica prevaja naše znake v sporočila, ki jih razume računalnik, monitor pa napravi računalnikova sporočila razumljiva nam.

Marsikdaj pa si želimo, da bi bil računalnik bolj vsestranski. Namesto da bi se pogovarjal le z nami, bi se morda sam ozrl naokoli. Zakaj bi mu vtipkovali, da je temperatura v sobi 18°C ? Če zna danes vsak računalnik sam pogledati na koledar in na uro, zakaj ne bi gledal še na termometer? Ura in koledar sta v računalnik že vgrajena; morda termometra, barometra ali kakšnega drugačnega merilnika res ne gre vgrajevati v prav vsak računalnik, marsikdaj pa bi nam prišlo prav, da bi znal računalnik tudi meriti. Naučimo ga!

Potrebujemo torej merilnik temperature. Običajni termometer ne bo dober, saj računalnik ne zna prebrati, do kje se je v cevki povzpelo živo srebro. Bolj pripraven bo termometer z električnim izhodom. Termometer LM335, kapsula s tremi žicami, ki ga lahko poceni kupimo, daje npr. na izhodu po 10 mV za vsako stopinjo nad absolutno ničlo. Pri sobni temperaturi 20°C , kar je 293 K , bo na izhodu napetost 2930 mV ali $2,93\text{ V}$. Pravimo, da je naša meritev analogna. Napetost, ki jo daje čutilo, oponaša merjeno količino. V našem primeru je to temperatura.

S takim podatkom računalnik nima kaj početi, zato potrebujemo enoto, ki prevede napetost v ustrezni vzorec enic in ničel. Enoti pravimo analogno-digitalni pretvornik, postopku pa analogno-digitalna pretvorba. Tak pretvornik kaže slika 1. Vhodni signal je v našem primeru $2,93\text{ V}$, vzorec



Slika 1. Električni termometer LM335 daje napetost $2,93\text{ V}$ kot odgovor na temperaturo 293 K . Analogno digitalni pretvornik odgovori z vzorcem 010.

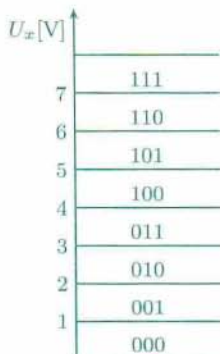
010, kar po dogovoru s slike 2 ustreza napetosti od 2 do 3 V, pa se pojavi na treh izhodnih žicah.¹ Vzorec, ki ga sestavljajo le trije zaporedni dvojiški podatki, je kratek. S tremi biti, kar pomeni največ trimestna dvojiška števila, seveda temperature ne moremo posebno natančno izraziti. Imamo le osem možnosti, s katerimi povemo številke od 0 do 7. Za večjo natančnost bomo potrebovali več bitov: osem, deset, morda celo štirinajst.

Kaj je v škatlici z napisom analogno-digitalni pretvornik? Čeprav ne obvladamo elektronike, nas vseeno zanima, kako pretvarjamo analogne signale v digitalne.

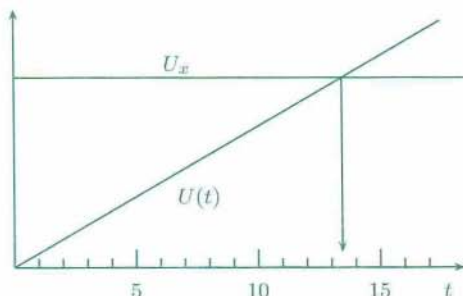
Rešitev je cela kopica. Oglejmo si prvo!

Imamo neznano napetost U_x ; ob začetku meritve pa ustvarimo enakomerno rastočo napetost $U(t)$, kot kaže slika 3. Sprožimo uro štoparico in čakamo, da sta obe napetosti enaki. Čim večja je neznan napetost U_x , tem dlje traja, da rastoča napetost doseže napetost U_x , in tem več naštejemo do trenutka, ko se izenačita. Rezultat štetja, ki ga dobimo v digitalni obliki, recimo 7 ali 12, je kar digitalni zapis napetosti U_x . Ker pa moramo rezultat povedati računalniku, štejemo dvojiško: 0000, 0001, 0010, 0011 itd.

Imamo torej idejo za prvi pretvornik, ne vemo pa še, kako bi ga urešili s pomočjo elektronike. Škatla, ki je analogno-digitalni pretvornik, bo najbrž vsebovala več povezanih manjših škatel, od katerih bo vsaka opravljala razmeroma preprosto nalogo. Potrebujemo generator sunkov, ki se ponavljajo v enakomernih presledkih. Takemu generatorju pravimo običajno *ura* (slika 4). Sunke preševa *dvojiški števec*, kadar mu to velimo. V ta namen ima števec poleg števnega vhoda tudi kontrolni vhod.



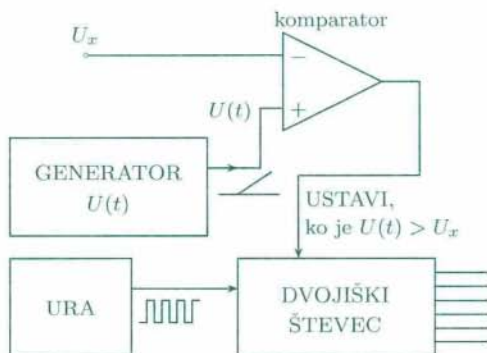
Slika 2. Odzivi pretvornika na različne vhodne napetosti.



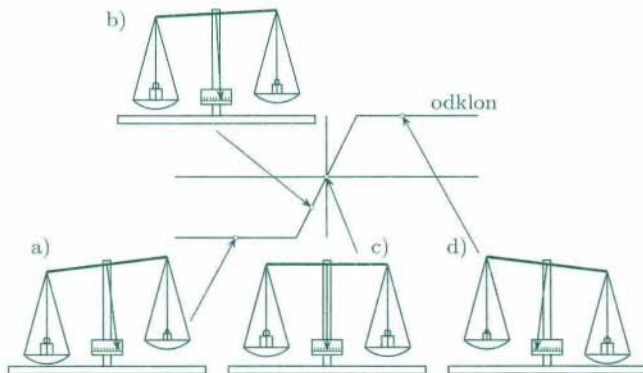
Slika 3. Preštetli smo do 13, preden je napetost $U(t)$ dosegla U_x .

¹ 0 in 1 so le simbolični zapisi električnih signalov. Na žici, kjer je signal 0, bi lahko izmerili napetosti od 0 do 0,3 V; na žici, kjer je signal 1, pa bi bile napetosti od 3 do 5 V.

Kadar je, vzemimo, kontrolni vhod pri napetosti nič, števec šteje, kadar pa je na kontrolnem vhodu napetost, ki pomeni logično 1, števec miruje. Kdaj naj števec šteje, oz. kdaj naj počiva, odloča vezje, ki mu pravimo *komparator*. To je neke vrste tehtnica, ki primerja napetosti U_x in $U(t)$ in pove, katera od njiju je večja. Komparator se torčj obnaša kot zelo občutljiva lekarniška tehtnica: če je ena stran le malo težja od druge, se skodelica na težji strani prevesi do tal, kjer obsedi (slika 5).



Slika 4. Analogno digitalni pretvornik sestavlja več preprostejših enot.



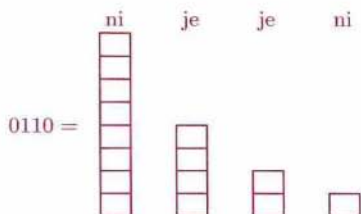
Slika 5. Komparator primerja $U(t)$ in U_x : a) $U(t)$ več kot U_x , b) $U(t)$ le malo več kot U_x , c) $U(t)$ enako U_x , d) $U(t)$ manj kot U_x .

Naša analogno-digitalna pretvorba traja precej manj kot pa opis. Kljub temu je fizikom marsikdaj predolga. Čas pretvorbe je odvisen od tega, kako hitro zmoredemo šteti. Če je perioda ure tisočinko sekunde in če bi radi svoje analogne rezultate prevedli v trimestno decimalno število (kar ustreza deset bitnemu dvojiškemu številu), potem traja pretvorba celo sekundo. Seveda je lahko ura dosti hitrejša, saj so elektronski števeci hitrejši od nas. Najhitrejši pretvornik, ki je deloval na opisani način, je uporabljal uro s frekvenco 450 MHz. Pretvorba, ki je dajala do štirinajst bitne rezultate, pa je trajala okoli 40 milijonin sekunde. Marsikdaj je to predolga. Kako skrajšati čas pretvorbe?

Poglejmo še enkrat svojo metodo. Pri iskanju neznanega števila x smo odgovarjali na zaporedna vprašanja: je x manjši od ena, je x manjši od dve, je x manjši od tri... Pri velikih x je bilo iskanje odgovora dolgotrajno.

Hitrejša pot do neznanega števila x (ki naj bo tu kvečjemu 15) je naslednja. Najprej si osvežimo, kaj pomeni binarni zapis 0110. Naše število 0110 ne premore osmice, sestavljata ga pa štirica in dvojka, ravno tako ne vsebuje nobene enice (slika 6):

$$0110 = 0 \cdot 8 + 1 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 0 \cdot 1.$$



Slika 6. Vzorec 0110 je navodilo, kako sestavimo število 6 iz gradnikov, vrednih 1, 2, 4 in 8.

Spet bomo skušali sestavo neznanega števila dognati tako, da zastavljamo vprašanja. Začeli bomo z osmico. Je x večji ali enak 8? Če je odgovor pritrdilen, si zapomnimo, da neznano število vsebuje osmico. Naše neznano število je ne vsebuje. Na vprašanje, ali je x večji ali enak 4, je odgovor pritrdilen. Število x torej vsebuje 4. Zdaj dodamo štirici dvojko in se vprašamo, ali je x večji ali enak 6. Ob pritrdilnem odgovoru si zapomnimo, da število x vsebuje tudi 2. Dodamo 1 in vprašamo, ali je x večji ali enak 7. Če ni, ne vsebuje 1. Nizu pritrdilnih in nikalnih odgovorov priredimo niz enic in ničel. Rezultat je binarni zapis neznanega števila x .

Če na opisani način raziskujemo sestavo majhnih števil, ne občutimo prednosti. A pri številu do 1023 opravimo že z desetimi vprašanji, medtem ko jih je treba pri prvi metodi v povprečju 512.

Kako elektronik porabi opisani recept za pretvorbo, si bomo ogledali morda kdaj drugič. Štirinajst bitni pretvorniki, ki delajo po novem receptu, opravijo pretvorbo v štirih do šestih mikrosekundah. Ti pretvorniki pa še zdaleč niso najhitrejši. Pri obeh dosedanjih pretvornikih smo reševali nalogo z vrsto zaporednih vprašanj eni enoti. Morda pa lahko skrajšamo pretvorbo tako, da naslovimo vsa vprašanja hkrati množici enot? Če neznano napetost U_x pokažemo sedmim komparatorjem, ki so nastavljeni na zaporedne nivoje od 1 do 7 voltov (slika 7), dobimo vseh sedem odgovorov istočasno. V našem primeru, ko je vrednost neznanne napetosti 5,3 V, spodnjih pet komparatorjev pove, da je neznan napetost večja, zgornja dva pa, da ni večja. Ko pripišemo potrdilnim odgovorom vrednost 1, nikalnim pa vrednost 0, je skupek odgovorov 1111100.

Novo število pa ni posebno prikladno – predolgo je. Tega se zavemo dosti bolj, če si predstavljamo osem bitni pretvornik, kjer bi se v odgovoru zvrstile najprej enice, ki jim slede ničle; vseh skupaj 255. Do mnogo krajšega dvojiškega zapisa bi prišli, če bi prešteli vse enice. Vendar bi tako spet izgubili čas, ki smo ga pridobili. Do sem je trajala pretvorba namreč le 5 do 10 nanosekund ($5 \cdot 10^{-9}$ s). Poiskati bo treba drugačno rešitev. Potrebujemo prevajalnik, ki bo prevajal sedem bitne vzorce v tri bitne:

0000000 naj da 000

1000000 naj da 001

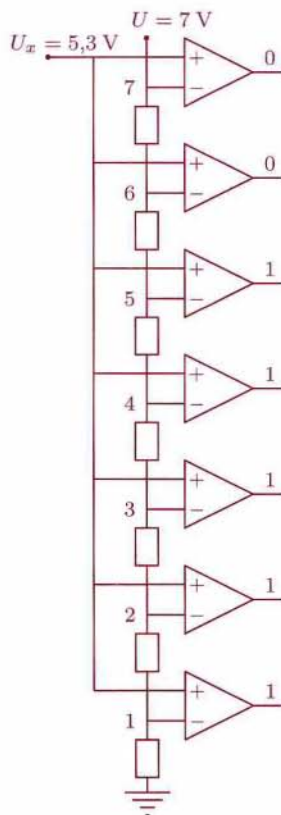
⋮

in

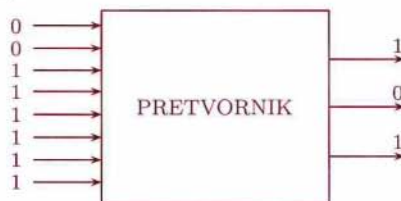
1111111 naj da 111.

Prevajalnik bo škatla, v katero bo vodilo sedem žic, iz nje pa tri (slika 8). Seveda pa s tremi bitni ne bomo zadovoljni, osmih bi bili bolj veseli. Kaj pa nam ponuja tržišče? Trudimo se, da spravimo čim več v eno samo integrirano vezje. Tako je naš novi analogno-digitalni pretvornik drobceno vezje, ki vsebuje vse našete elemente, to je 255 komparatorjev, uporovno verigo in prevajalnik. Celotno osem bitno pretvorbo opravi v 20 do 30 ns (20 do $30 \cdot 10^{-9}$ s).

Smo s tem prišli do konca? Ne! Spoznali smo le načela, po katerih delajo nekateri analogno-digitalni pretvorniki. Kako napraviti števec, kako napraviti komparator, kako sestaviti prevajalnik, ki prevaja dolge vzorce v binarna števila – o tem pa morda kdaj drugič.



Slika 7. Vezje v eni sapi pove, da je neznana napetost večja od 5 V, pa manjša od 6 V.



Slika 8. Prevajalnik, ki prevaja dolge vzorce v binarna števila.