

ELEKTRONIKA NA POTI OD DETEKTORJA DO OSREDNJEGA DELA SISTEMA

Janez Krč, Marko Jankovec, Marko Topič

Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija

POSVET O SENZORJIH V ZAVODU ITC SEMTO

15.03.2002, FE Ljubljana

Ključne besede: detektor, elektronika, senzorski sistem, ojačevalnik, motilni signal, tokovna zanka

Izveček: Senzorski sistem smo razčlenili na elektronska vezja, ki jih srečamo na poti od detektorja do osrednjega dela. Opredelili smo najpomembnejše osnovne gradnike in izvedbe ojačevalnikov ter opisali način in realizacijo odjema upornosti, napetosti, toka in naboja. Podali smo zgled delovanja optoelektronskega detektorskega polja. Pri prenosu signalov smo se posvetili zmanjševanju vpliva motilnih signalov s tokovno zanko.

Electronics on the Way From a Detector to the Central System Unit

Key words: detector, electronics, sensor system, amplifier, disturbant signal, current loop

Abstract: Sensor system is divided into electronic circuits, which are present on the way from a detector to a central sensor system unit (Fig. 1). In an input stage the transduced physical quantity is amplified within a pre-amplifier. A middle stage serves for further amplification and linear transformations of the electrical signals may occur on the way to the central unit; however, with high insensitivity to the disturbances and minimized drift. In the central unit the analog electrical signal is converted into the digital signal.

Basic types of amplifiers are presented (Fig. 2). Apart from an operational amplifier and its derivative called instrumentation operational amplifier, which amplify the difference of input voltage into an output voltage, an operational transconductance amplifier and an operational transresistance amplifier are introduced and their properties discussed. Utilization of negative feedback leads to stable amplifier stages (Fig. 4 gives examples for the operational amplifier).

Conversion of resistivity into an output voltage signal is demonstrated in two versions: (i) classical bridge configuration followed by a differential amplifier and (ii) active bridge configuration (Fig. 5). Conversion of (open-circuit) voltage or (short-circuit) current into a voltage output signal is discussed using a photodiode as a detector of illumination intensity (Fig. 6).

Working principle of charge-to-voltage conversion requires at least two electronic switches (Fig. 7). The concept of optoelectronic detector array (Fig. 8) with common addressing of pixels in each address line and multiplexing of output voltages from charge-to-voltage amplifiers (one per each data line) is explained.

Utilization of current loop (Fig. 9) as a means of diminishing the effect of disturbances on analog transmission path of information signals is highlighted.

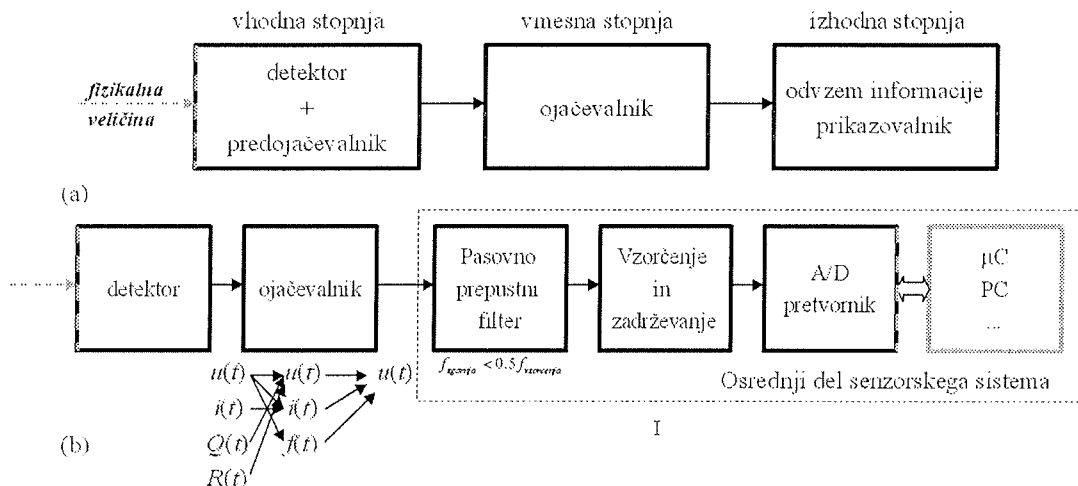
1 Uvod

Detektorji pretvarjajo fizikalne veličine v električne. Pretvorba je po večini šibka in električni signal je slaboten ter ranljiv od motenj, šuma ipd., zato ga je treba ojačiti preko več stopenj. Navadno so detektorji dislocirani od osrednjega dela sistema, in na poti od detektorja do osrednjega dela si pomagamo z raznovrstnimi elektronskimi vezji. Nekatere izmed rešitev odjema električnega signala, ojačevanja, pretvarjanja in vzorčenja bomo opisali v tem prispevku.

Senzorski sistem lahko načelno razdelimo na tri stopnje: vhodno, vmesno in izhodno stopnjo (slika 1a). Vhodna stopnja vsebuje detektor, ki fizikalno veličino pretvori v električno, in predojačevalnik, ki šibek električni signal odjema in ga ojači. Predojačevalnik je praviloma malošumni ojačevalnik z majhnim popačenjem. Predojačevalnik iz-

boljšuje in hkrati navzgor omejuje razmerje signal/šum ter se lahko izkoristi tudi za linearizacijo detektorjevega odziva. Vmesna stopnja navadno vsebuje večstopenjski ojačevalnik, ki nam zagotavlja kakovosten prenos električnega signala do izhodne stopnje, kjer se informacija odvzema in se bodisi prikazuje bodisi shranjuje.

Na sliki 1b je senzorski sistem razčlenjen bolj podrobno in vključuje analogno-digitalno pretvorbo. Električna veličina, ki jo generira detektor, je lahko napetost u , tok i , naboj Q ali upornost R . Na poti od odjema detektorskega signala pa do osrednjega dela sistema (mikrokontrolerja, osebnega računalnika, ...) se lahko informacija pretvarja iz ene analogne električne veličine v drugo, ki pa se navadno na koncu analogne poti zaključi kot napetostni signal. Pretvorbe morajo biti čim bolj linearne, čim manj občutljive za motnje iz okolice in s čim manjšim lezenjem (npr. tem-



Slika 1: Shematska prikaza senzorskega sistema

peraturno, časovno lezenje). V osrednjem delu senzorskega sistema analogni napetostni signal frekvenčno omeji- mo z nizkoprepustnim ali pasovnoprepustnim filtrom, ki ima zgornjo frekvenčno mejo določeno glede na frekvenco vzorčenja A/D-pretvornika. Shannonov teorem [1] postavlja za spekter vzorčnega signala brez prekrivanja omejitev za zgornjo mejo:

$$f_{zgornja} < \frac{1}{2} f_{vzorčenja}$$

Vezje za vzorčenje in zadrževanje poskrbi, da je v času pretvorbe enega vzorca na vhodu A/D-pretvornika konstantna vrednost. Informacija v digitalni obliki je preko podatkovnega vodila primerna za nadaljnjo obdelavo, prikazovanje ali shranjevanje.

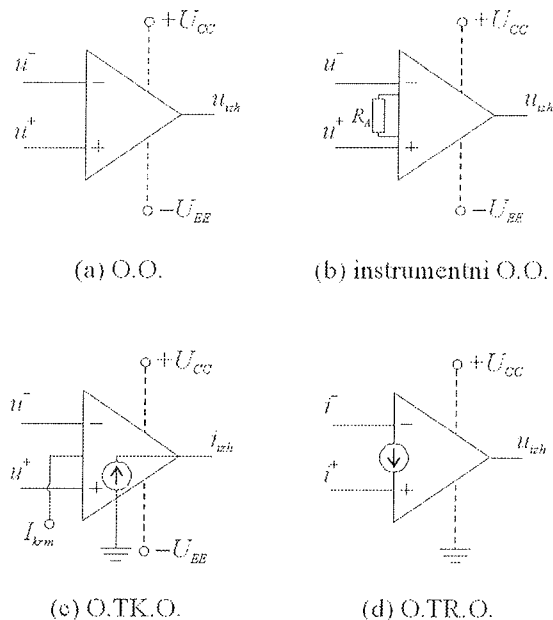
2 Osnovni gradniki in izvedbe ojačevalnikov

Kljub množici elektronskih gradnikov, predvsem v integrirani obliki v enem ohišju, izpostavimo najbolj razširjene. Prvo mesto zagotovo pripada operacijskemu ojačevalniku (O.O.), ki ima napetostni diferenčni vhod z visoko vhodno impedanco in napetostni izhod z nizko izhodno impedanco (slika 2a). V linearnem območju delovanja ima veliko diferenčno napetostno ojačenje (A_d)

$$u_{izh} = A_d(u^+ - u^-)$$

in s tem izvaja matematično operacijo odštevanja dveh vhodnih signalov (od tod tudi ime operacijski ojačevalnik). Hkrati pa se O.O. odlikuje z visokim rejekcijskim faktorjem za so-fazne vhodne signale (CMRR ~ 80..120 dB) in z visokim rejekcijskim faktorjem za valovitost napajalne napetosti (PSRR ~ 80..120 dB) [1,2]. Diferenčno napetostno ojačenje je žal frekvenčno omejeno. Merilo frekvenčne zmogljivosti ojačevalnikov je produkt ojačenja in mejne frekvence, ki je pri O.O. praviloma konstanten, ne glede na izbrano velikost ojačenja (slika 3a). Operacijski ojačeval-

nik ima mnogo izvedb, med katerimi se odlikuje instrumentni operacijski ojačevalnik, ki v enem ohišju združuje 3 operacijske ojačevalnike in ki mu z zunanjim uporom (programirljivo) nastavlja diferencialno napetostno ojačenje (slika 2b). Instrumentne operacijske ojačevalnike odlikujejo tudi izredno velik CMRR in PSRR. V primerih potrebe po galvanski ločitvi med vhodom in izhodom pa posegamo po izolacijskih operacijskih ojačevalnikih [1].



Slika 2: Osnovni gradniki ojačevalnikov

Operacijski transkonduktančni ojačevalnik (O.TK.O.) ima napetostni diferenčni vhod z visoko vhodno impedanco in tokovni izhod z visoko izhodno impedanco (slika 2c). V linearnem območju delovanja izkazuje veliko transkonduktan- co (g_m):

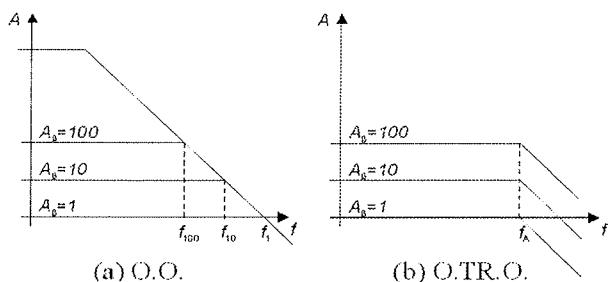
$$i_{izh} = g_m(u^+ - u^-) = kI_{krm}(u^+ - u^-)$$

ki jo lahko spreminjamo (moduliramo) s krmilnim tokom (I_{krm}). Ta ojačevalnik se uporablja v vezjih za vzorčenje in zadrževanje, multipleksorjih, množilnikih in napetostnih sledilnikih z visokim maksimalnim časovnim gradientom izhodne napetosti (ang. »slew-rate«).

Operacijski transrezistivni ojačevalnik (O.T.R.O.), ki ga nekateri imenujejo tudi Nortonov ojačevalnik, ima tokovni diferenčni vhod z nizko vhodno impedanco in napetostni izhod z nizko izhodno impedanco (slika 2d). V linearnem območju delovanja izkazuje veliko transrezistivnost (r_m):

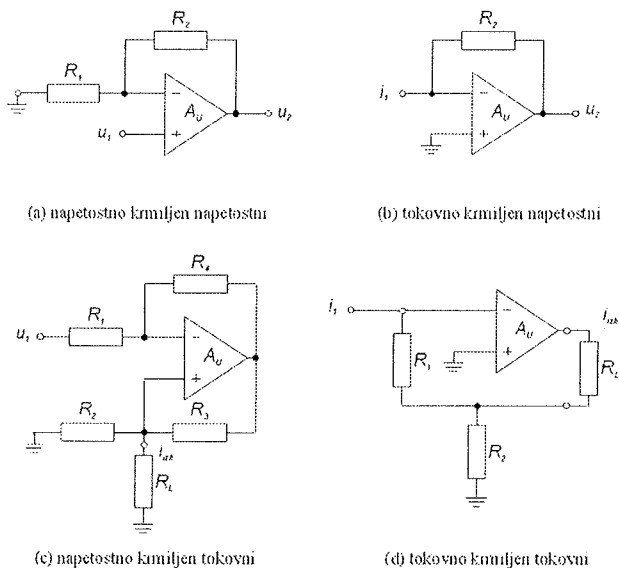
$$u_{izh} = r_m (i^+ - i^-)$$

Zanj je značilno, da nima omejevanja pasovne širine (slika 3b) in maksimalnega časovnega gradienta izhodne napetosti. Navadno zahteva le enojno napajanje.



Slika 3: Frekvenčna odvisnost ojačenja za (a) O.O. in (b) O.T.R.O.

Iz vsakega gradnika lahko z negativnim povratnim sklopom realiziramo vse štiri izvedbe ojačevalnikov: napetostno krmiljen napetostni (NN) ojačevalnik, napetostno krmiljen tokovni (NT) ojačevalnik, tokovno krmiljen napetostni (TN) ojačevalnik in tokovno krmiljen tokovni (TT) ojačevalnik. Slika 4 prikazuje vse štiri izvedbe ob uporabi O.O. kot gradnika teh ojačevalnikov.



Slika 4: Štiri izvedbe ojačevalnikov z O.O. kot osnovnim gradnikom: NN, NT, TN, TT

3 Odjem detektorskega signala

Pri opisu različnih odjemov detektorskega signala bomo uporabili realizacije z O.O. kot osnovnim gradnikom.

3.1 Mostični odjem

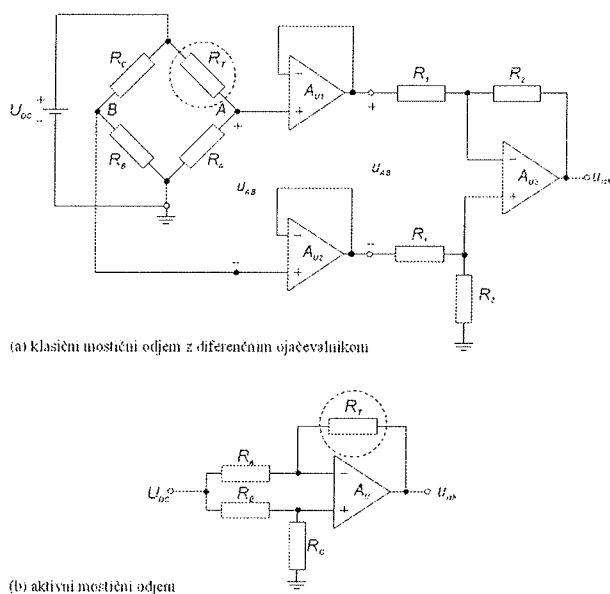
Mostični odjem se uporablja za odjem upornosti na našem detektorju, ki jo preoblikujemo v napetost. Slika 5a prikazuje klasični mostični odjem, ki je nadgrajen z diferenčnim ojačevalnikom. Neuravnoteženost uporov v mostiču, ki jo povzroča merjena fizikalna veličina (izberimo $R_A = R_B = R_C = R$ in $R_T = R + \Delta R$), povzroča različen enosmerni tok v obeh vejah mostiča, kar ustvarja napetostno razliko med sponkama A in B:

$$U_{AB} = -\frac{\Delta R}{2(2R + \Delta R)} U_{DC} \approx -\frac{\Delta R}{4R} U_{DC}$$

Odjem napetosti ne sme obremeniti uporovnega mostiča, zato mora biti odjem izveden z enakima in čim večjima vhodnima upornostima, ki ju dosežemo z uporabo dveh napetostnih sledilnikov, ki jima sledi diferenčni napetostni ojačevalnik. Enako dosežemo tudi z uporabo instrumentnega O.O.

Konfiguracijo diferenčnega napetostnega ojačevalnika izkoriščamo pri aktivnem mostičnem odjemu (slika 5b), ki ima detektor (upornost R_T) nameščen v povratnem sklopu. Aktivni mostični odjem ima dvakrat boljšo občutljivost, saj zanj velja:

$$U_{izh} = -\frac{\Delta R}{2R} U_{DC}$$



Slika 5: Mostični odjem: (a) klasični in (b) aktivni

3.2 Napetostni odjem

Napetostni odjem bomo opisali na primeru fotodiode. Fotodiode je detektor svetlobnega toka in lahko deluje pri različnih režimih delovanja. Eden izmed njih je režim odprtih sponk, ko ob osvetlitvi skozi fotodiode ne teče noben tok, med priključnima sponkama pa čutimo napetost odprtih sponk (U_{OC}). Režim odprtih sponk in napetostni odjem fotodiode je zagotovljen z vezjem, prikazanim na sliki 6a. Če je vhodni tok v neinvertirajočo vhodno sponko O.O. zanemarljiv ($i^+ \approx 0$), nam O.O. v linearnem območju delovanja zagotavlja takšno izhodno napetost, da je U_{OC} tudi na invertirajoči vhodni sponki. Od tod sledi ob pogoju $i^- \approx 0$:

$$U_{izh} \cong \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{OC} \propto \ln(I_{ph})$$

Ker je U_{OC} logaritemsko odvisna od vpadnega svetlobnega toka I_{ph} , smo s tem dobili logaritemski merilnik.

3.3 Tokovni odjem

Fotodiode nam v kratkostičnem režimu delovanja ustvarja električni tok, ki je linearno odvisen od I_{ph} . Vezje na sliki 6b nam poleg zagotavljanja kratkostičnega režima fotodiode pretvarja in ojačuje tokovni signal v napetostnega:

$$U_{izh} \cong R_2 I_{SC} \propto I_{ph}$$

Da bi bilo ojačenje čim večje, potrebujemo čim večjo upornost R_2 . V realnem O.O. ($i^+ \neq 0$, $i^- \neq 0$) je za izničenje vpliva vhodnega predtoka (sofazne komponente) potrebno tudi neinvertirajočo vhodno sponko zaključiti z enako upornostjo, kot jo čuti invertirajoča sponka /2/ (slika 6c). Velika vrednost R_2 pa nam izmika kratkostični režim delovanja fotodiode in hkrati povečuje ničelno izhodno napetost. Rešitev je v ohranjanju velikega ojačenja ob zmanjšanju upornosti, ki jo čuti invertirajoča sponka. To dosežemo z uporovnim T-četveropolom ($R_2 \gg R_{2T} \gg R_B \gg R_A$) v veji povratnega sklopa /3/ (slika 6d), pri čemer izberemo:

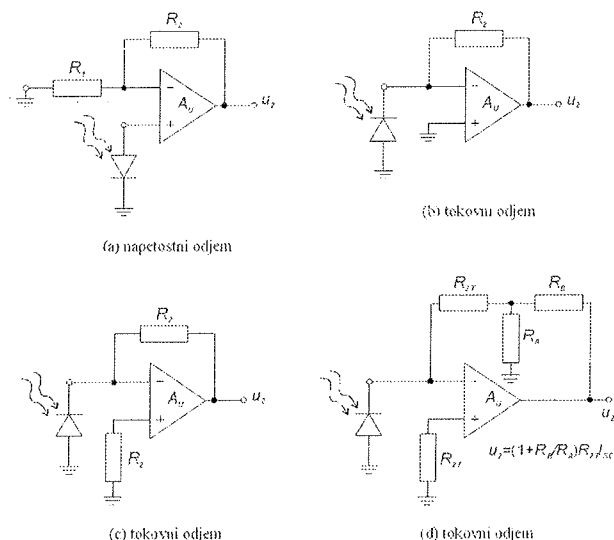
$$R_{2T} = \frac{R_A}{R_A + R_B} R_2$$

3.4 Odjem naboja

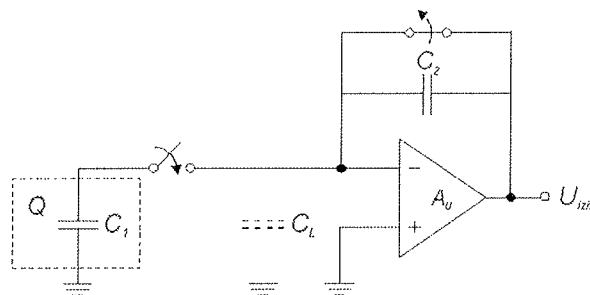
Pri odjemu naboja izkoriščamo O.O. v konfiguraciji ojačevalnika naboja (slika 7), ki pa zahteva najmanj dve elektronski stikali, kajti kondenzator C_2 mora biti inicializiran pred vsakokratnim prenosom naboja z detektorja. Izhodna napetost je tako proporcionalna naboju Q :

$$U_{izh} = -\frac{Q}{C_2}$$

V sliki 7 je črtkano vrisana še kapacitivnost C_L , ki je predvsem posledica kapacitivnosti dovodne linije, in nam idealno nabojo-napetostno zvezo kviri (slabi).



Slika 6: Realizacije: (a) napetostni odjem in (b-d) tokovni odjemi

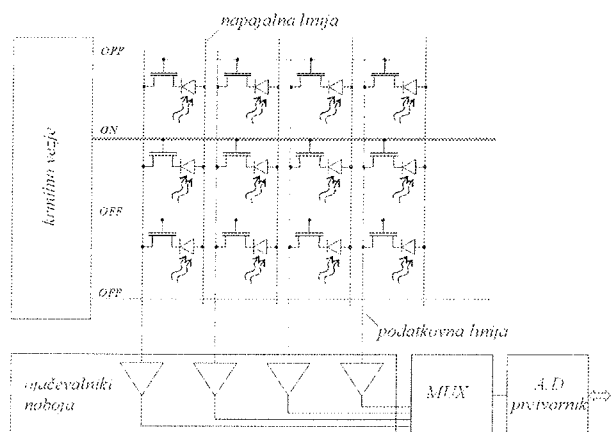


Slika 7: Realizacija odjema naboja

Princip odjema naboja se uporablja pri optoelektronskih detektorskih poljih, kjer imamo dvodimenzionalno razporejene posamične detektorje, t. i. pike »piksle« (slika 8). Informacija iz detektorskega polja se prenaša hkrati za eno celotno vrstico hkrati. S primernim naslavljanjem elektronskih stikal s krmilnim vezjem hkrati prenašamo naboj iz vseh detektorjev ene vrstice na ojačevalnike naboja, katerih izhodne napetosti zaporedno združujemo (multipleksiramo) v en signal. Pri multipleksiranju 128:1 potrebujemo na vsakih 128 ojačevalnikov naboja po en analogno-digitalni pretvornik.

4 Zmanjševanje vpliva motilnih signalov

Vpliv motilnih signalov na poti od detektorja do osrednjega dela senzorskega sistema je treba minimizirati. Posamični tipi detektorjev zahtevajo specifične rešitve, pri vseh pa je treba nameniti posebno pozornost predojačevalniku in poskrbeti za neobčutljivost za spremembe napajalnih napetosti. Pri inteligentnih senzorjih skušamo digitalno pretvorbo izvesti čim bližje detektorju, da je analogna pot signala



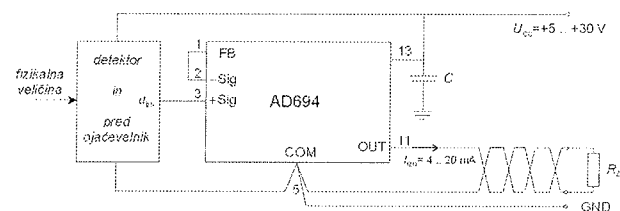
Slika 8: Realizacija odjema naboja v detektorskem polju. V trenutku, ko vrstica dobi od krmilnega vezja potencial ON, gredo nanjo priključeni stikalni tranzistorji v stanje ON, s čimer lahko naboj detektorjev (informacija posamezne pike »piksla«) v tej vrstici odteče na ojačevalnike naboja.

čim krajša. Zato prevladujejo digitalne motnje, ki pa se jih da uspešno odpravljati (npr. pri prenosu podatkov izvajamo CRC-preverjanje).

Pri dislociranih odjemih analognih detektorskih signalov je zelo razširjena tokovna zanka 4-20 mA. Ta interval od 4 mA do 20 mA ustreza linearnemu preslikanemu intervalu izhodne veličine predojačevalnika. Tokovna zanka se odlikuje po naslednjih lastnostih: (a) neobčutljiva za daljše razdalje (ni napetostnih padcev), (b) hitro zaznavanje napak (mirovni tok 4 mA ob ničtem signalu), (c) na koncu tokovne zanke preprosta zaključitev z uporabo R_Z , katerega vrednost je izbrana glede na napajalno napetost in pričakovano maksimalno vhodno napetost osrednjega dela senzorskega sistema. Slika 9 prikazuje uporabo tokovne zanke 4-20 mA, katere jedro je integrirano vezje AD694 [3/ v vlogi linearnega napetostno (0-2 V) - tokovnega (4-20 mA) pretvornika.

5 Sklep

V prispevku smo pregledali nekatera elektronska vezja, ki jih srečamo na poti od detektorja do osrednjega dela senzorskega sistema. Opredelili smo najpomembnejše osnovne gradnike in izvedbe ojačevalnikov ter opisali način



Slika 9: Realizacija tokovne zanke 4-20 mA ob uporabi integriranega vezja AD694

in realizacijo odjema upornosti, napetosti, toka in naboja. Podali smo zgled delovanja optoelektronskega detektorskega polja. Pri prenosu analognih signalov smo se posvetili zmanjševanju vpliva motilnih signalov s tokovno zanko.

6 Literatura

- /1/ P. Horowitz in W. Hill, The Art of Electronics, 2nd Ed., Cambridge University Press, 1989
- /2/ M. Topič, Elektronska vezja 1.del - Zbirka rešenih nalog, Založba FER, 1998
- /3/ J. Graeme, Photodiode Amplifiers: op amp solutions, McGraw-Hill, 1995
- /4/ AD694 Datasheet (http://www.analog.com/productSelection/pdf/ad694_.pdf)

As. mag. Janez Krč, univ. dipl. inž. el.

As. Marko Jankovec, univ. dipl. inž. el.

Izr. prof. dr. Marko Topič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

tel.: +386 1 4768 321

faks: +386 1 4264 630

e-pošta: janez.krc@fe.uni-lj.si

e-pošta: marko.jankovec@fe.uni-lj.si

e-pošta: marko.topic@fe.uni-lj.si

Prispelo (Arrived): 06.06.2002

Sprejeto (Accepted): 20.11.2002