

**PROJEKTOVANJE MERNIH KONDICIONERA****DESIGN OF MESURING CONDITIONERS**Damjan Vučić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – Merni kondicioneri su veoma važan deo mernih sistema jer kvalitet i tačnost merenja veoma zavise od kvaliteta realizacije tih ulaznih mernih elektronskih sklopova. Tema ovog rada je teoretska analiza tehnika realizacije mernih kondicionera, a zatim projektovanje operacionog pojačavača kao osnovnog gradivnog bloka mernih kondicionera. Kolo je projektovano i simulirano korišćenjem programskog paketa Cadance. Provereno je da projektovano kolo zadovoljava vrednosti propisane specifikacijom za ekstremne vrednosti parametara okoline kao i za velike varijacije prilikom procesiranja kola na silikonu.

**Ključne reči:** Merni sistemi, kondicioneri, operacioni pojačavači

**Abstract** – Measuring conditioners are a very important part of measuring systems because the quality and accuracy of measurement very much depends on the quality of realization of these input measuring electronic circuits. The topic of this paper is the theoretical analysis of the techniques of realization of measuring conditioners, and then the design of the operational amplifier as the basic building block of measuring conditioners. The circuit was designed and simulated using the Cadance software package. It was checked that the designed circuit meets the values prescribed by the specification for extreme values of environmental parameters as well as for large variations when processing circuits on silicone.

**Keywords:** Measuring systems, conditioners, operational amplifiers

**1. UVOD**

Prelazak sa analognih mernih instrumenata na digitalne merne instrumente je dominantan trend. Ulazna kola kod digitalne merne instrumentacije se uglavnom sastoje od ulaznog multipleksera, *sample & hold* kola, operacionog pojačavača, AD konvertora i mikroprocesora. Bitno je primetiti da se korišćenjem digitalne instrumentacije zanemaruje fizička priroda ulazne veličine jer se nakon digitalizacije signal obrađuje matematičkim operacijama. Taj digitalni signal je veoma otporan na smetnje jer po svojoj prirodi zauzima dve diskretne vrednosti sa kojima je lako manipulirati u matematičkim operacijama.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Josif Tomić, vanr. prof.

Kako je sam hardver standardizovan, rešavanje problema obrade signala se svodi na softverska rešenja programirana na mikroprocesoru.

Tačnost transformacije analognog signala u digitalni predstavlja jednu od najvažnijih stavki. U tom procesu vrši se diskretizacija po vremenu i amplitudi.

Na sreću, u poslednje vreme AD konvertori poseduju brzine od 1MHz i tačnost od 16 bita, po veoma pristupačnoj ceni (oko 30 evra) tako da taj problem više nije aktuelan i ne uzima se u ozbiljnim razmatranjima [1]. Postoje slučajevi kada je potrebna veća brzina od navedene, ali ne tako često.

Po definiciji, metrologija je nauka o merenjima, a instrumentacija je oprema kojom se ta merenja obavljaju. Merenja su osnova prirodnih nauka i ključni element istraživanja i razvoja u svakoj vrsti praktične delatnosti.

Osnovne karakteristike savremenih merenja su:

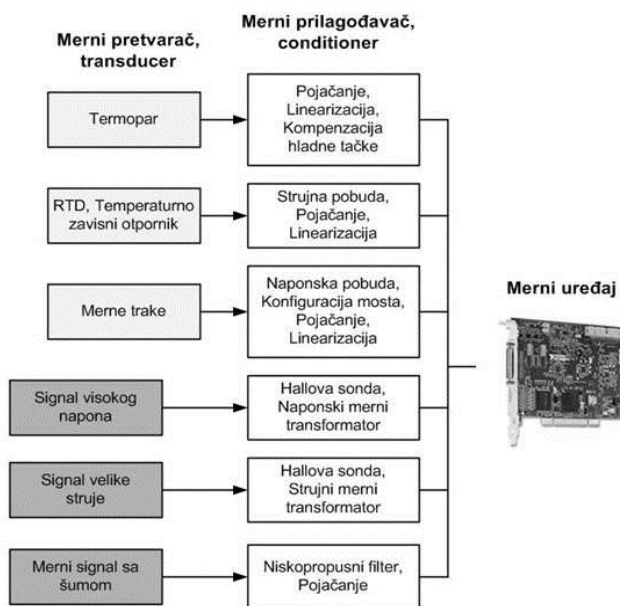
- realizacija merenja gotovo svih fizičkih veličina električnim putem,
- nove metoda merenja, proistekle iz simbioze informacionih tehnologija i tehnika merenja,
- tehnološki prelazak na sredstva merenja kod kojih je softver dominantan,
- korišćenje složenih matematičkih algoritama.

**2. MERENJE I AKVIZICIJA**

Merni pretvarači, *transducer-i*, su uređaji koji konvertuju fizičke fenomene, kao što su: svetlo, temperatura, pritisak ili zvuk, u električni signal koji se može izmeriti. U inženjerskoj terminologiji oni se često nazivaju i sensorima. Najčešći oblici izlaznog električnog signala su napon ili struja.

Za različite fizičke fenomene postoje njima prilagođeni tipovi mernih pretvarača. Tako na primer, pretvarači za temperaturu su termopar, termistor, poluprovodnički senzor; za svetlo foto i vakuumske ćelije, a za zvuk mikrofon [2].

Izbor *transducer-a* je najčešće prvi korak u kreiranju DAQ sistema, (*Data Acquisition System*). *Transducer* najčešće ima efekta u izboru ostalih komponenti u sistemu. Bitno je razumeti rad različitih vrsta pretvarača i koje su njihove prednosti i ograničenja. Nakon konverzije signala *transducer-om* potrebno je prilagoditi (kondicionirati) signal. Na slici 2.1 prikazan je izgled kompletnog merno-akvizicionog sistema sa neophodnim mernim pretvaračima i prilagođavačima signala.



Slika 2.1. - Merni system

### 3. SIGNALI, SENZORI I KONDICIONIRANJE SIGNALA

Prilikom merenja stvarne fizičke pojave, kondicioniranje signala je preduslov za ispravno procesiranje električnih signala sa senzora i poboljšanje opšteg kvaliteta podataka [3]. Osnovni tipovi kondicioniranja signala su:

- pobuda mernog senzora,
- pojačanje mernog signala,
- linearizacija mernog signala,
- izolacija mernog signala,
- filtriranje mernog signala.

Pošto merni signali u realnom svetu često imaju male amplitude, kondicioniranje signala može da poboljša tačnost mernih rezultata. Pojačavači povećavaju nivo ulaznog signala tako da bolje odgovara mernom opsegu analogno-digitalnog konvertora (ADC), povećavajući rezoluciju i osetljivost merenja. Dok mnogi DAQ uređaji uključuju *on-board* pojačavače iz ovog razloga, mnogi *transduceri*, kao što su termoparovi, zahtevaju i dodatne pojačavače. Takođe, korišćenje eksternih kondicionera signala, lociranih bliže izvoru signala, poboljšava odnos signal-šum merenja, pojačavanjem nivoa signala pre nego što na njega utiču šum i smetnje iz okruženja [4].

Slabljenje je suprotno od pojačanja. Neophodno je kada je napon koji treba da se digitalizuje iznad ulaznog mernog opsega AD konvertora. Ovaj oblik kondicioniranja signala smanjuje amplitudu ulaznog signala a najjednostavniji kondicioner može biti običan razdelnik napona. Slabljenje je neophodno za merenje visokih napona i struja u elektroenergetici.

Kondicioneri signala mogu da sadrže filtere za smanjenje nepoželjnog šuma u okviru određenog opsega frekvencija. Skoro sve DAQ aplikacije imaju prisutan šum od 50 ili 60 Hz, pokupljen sa električne mreže ili sa električnih mašina. Međutim, većina kondicionera uključuje

niskopropusne filtere dizajnirane specijalno da omoguće maksimalno otklanjanje šuma od 50 do 60 Hz. Sledeća česta upotreba filtera je da spreči izobličenje signala – to je fenomen koji se javlja kada je signal *podsempliran* (uzrokovan previše sporo). Nikvistova teorema tvrdi da kada se semplira analogni signal, bilo koja komponenta signala, na frekvenciji većoj od polovine frekvencije sempliranja, pojavljuje se u podacima kao niskofrekventni signal. Ovu distorziju signala možete da izbegnete jedino uklanjanjem svake komponente signala koja je iznad polovine frekvencije sempliranja, pomoću niskopropusnog filtera, pre nego što se signal diskretizuje.

Nepropisno uzemljenje sistema je jedan od najčešćih uzroka problema merenja, uključujući šum i oštećenje uređaja za merenje. Kondicioneri signala sa izolacijom mogu da reše većinu ovih problema. Ovi uređaji prenose signal od izvora do mernog uređaja bez fizičke konekcije, korišćenjem transformatora, optičkih ili kapacitivnih tehnika povezivanja. Pored toga što prekida petlju kroz zemlju, izolacija blokira šumove i odbacuje visoki zajednički napon, te na taj način štiti operatera i skupocenu mernu opremu a merenje čini znatno preciznijim. Digitalni signali takođe zahtevaju periferije za kondicioniranje signala.

Digitalizator, AD konvertor, je obično najskuplji deo sistema za akviziciju podataka. Pomoću multipleksiranja možete da uzastopno dostavljate brojne signale u jedan AD konvertor, a to je jeftin način da se proširi broj mernih mesta u vašem sistemu. Multipleksiranje je neophodno u svim aplikacijama sa velikim brojem senzora.

Kada je potrebno da se mere dva ili više signala u istom trenutku, koristi se simultano sempliranje signala. U tom slučaju potrebno je da svaki kanal ima svoj AD konvertor. Tipični primeri koji zahtevaju simultano sempliranje su: merenje aktivne i reaktivne snage, merenje faznog pomeraja između signala, kao i merenje vibracija.

### 4. PROGRAMSKI PAKET CADENCE

Cadence Design System je americka kompanija koja se bavi razvojem *electronic design automation* (EDA) softvera, ali i inženjerskim poslovima kao što su projektovanje, verifikacija i priprema dizajna za fabrikaciju. Razvija softver za dizajniranje čipova i štampanih ploča (PCB), memorija, analognih kola, SoC periferija, procesorskih jedinica, kao i IP-a. *Virtuoso process design kits* (PDKs) sadrže sve relevantne parametre fabrikacije, od pravila fabrikacije do karakteristika modela, kako bi se sa sigurnošću moglo reći da to što se isprojektuje može i da se uspešno fabrikuje [5]. Osnova PDKa je precizno određen model komponente po pitanju silicijuma.

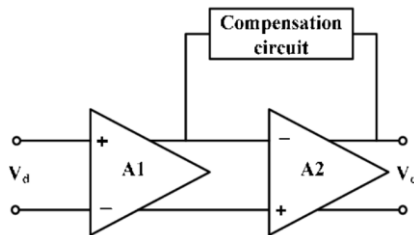
Analogno kolo projektovano je u 180nm TSMC tehnologiji korišćenjem posebnog PDK-a firme ams AG. Prilikom dizajniranja korišćeno je više različitih alata u sklopu Cadence programskog paketa, Schematic Editor XL za kreiranje šema i testova, i adexl za simulaciju.

## 5. PROJEKTOVANI OPERACIONI POJAČAVAČ

Operacioni pojačavač predstavlja jedan od osnovnih gradivnih blokova analognih kola. Pošto se operacioni pojačavači obično koriste kao samostalni blokovi, često je potrebno da se na njima izvrši veliki broj testova da bi se potvrdila stabilnost u širokom rasponu radnih uslova.

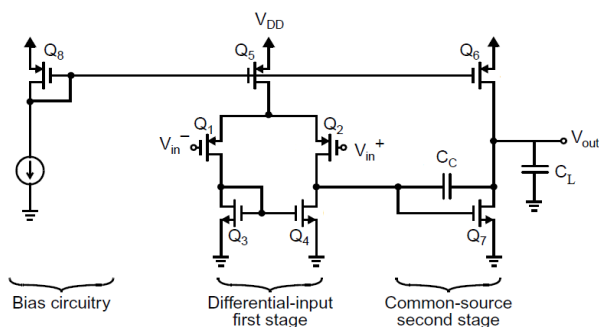
Jedan od osnovnih uslova koje operacioni pojačavač treba da ispuni je veliko pojačanje u otvorenoj povratnoj sprezi. Na pojačavač sa velikim pojačanjem u otvorenoj povratnoj sprezi može da se primeni negativna povratna petlja koja će da stabilizuje pojačanje, ali ga neminovno i smanji. Većina jednostepenih CMOS operacionih pojačavača ne može da obezbedi tako veliko pojačanje, pa su topologije koje se koriste često dvostepene ili višestepene.

U ovom radu opisan je dvostepeni pojačavač. Blok šema takvog kola prikazana je na **slici 5.1**. Jedna od mogućnosti je dodavanje trećeg stepena koji se sastoji od bafera – pojačavača sa jediničnim pojačanjem. Bafer se primenjuje kad je opterećenje koje se postavlja na izlaz operacionog pojačavača rezistivnog tipa. Bafer bi smanjio izlaznu otpornost i omogućio veće varijacije na izlazu [6]. Kad je opterećenje čisto kapacitivno, kao što je i ovom slučaju, bafer se izostavlja. Kao što vidimo na **slici 5.1** kolo sadrži i kompenzaciono kolo (engl. *Compensation circuit*) koje je neophodno kako bi se postigla stabilnost operacionog pojačavača u zatvorenoj povratnoj sprezi.



Slika 5.1. - Blok šema dvostepenog OP

Na **slici 5.2** prikazana je odabrana topologija. Prvi stepen se sastoji od diferencijalnog pojačavačkog stepena sa nebalansiranim izlazom, a drugi od pojačavača sa zajedničkim sorsom. Stujno ogledalo obezbeđuje adekvatnu raspodelu struje do pojačavačkih stepena. Kompenzaciono kolo se pre svega sastoji od kapacitivnog elementa, međutim može da sadrži i otpornik. Budući da se nalazi između ulaza i izlaza drugog stepena velikog pojačanja, on se često naziva Milerov kapacitet, jer je njegovo efektivno kapacitivno opterećenje na prvom stepenu veće od fizičke vrednosti.



Slika 5.2- Odabrana topologija dvostepenog OP

Prednost topologije je da je prilagođena za aplikacije gde se koristi manji napon napajanja, iz razloga što izlazni stepen ne zahteva kaskodu [7]. Pomoću dvostepenog operacionog pojačavača možemo postići veliko pojačanje i veliki izlazni opseg napona. Pre početka projektovanja potrebno je utvrditi specifikacije koje kolo treba da zadovolji. Specifikacije kola su:

- *naponsko pojačanje*,  $A_v(\text{dB}) > 60 \text{ dB}$ ,
- *frekvencija jediničnog pojačanja ili proizvod pojačanja i 3dB opsega GBW*  $> 20 \text{ MHz}$ ,
- *fazna margina*,  $PM > 75^\circ$ ,
- *maksimalna brzina promene signala na izlazu (engl. Slew rate)*,  $SR > 50 \text{ V}/\mu\text{s}$ ,
- *disipacija kola*  $< 0,5 \text{ mW}$ ,
- *dozvoljeni opseg napona na ulazu (engl. common mode input range)*,  $CMIR (0,2 \text{ V} - 1,0 \text{ V})$
- *faktor potiskivanja šuma u naponu napajanja*,  $PSRR > 60 \text{ dB}$ ,
- *faktor potiskivanja zajedničkog signala*,  $CMRR > 60 \text{ dB}$
- $C_L = 1 \text{ pF}$ .

U proračunima se koriste i parametri tehnologije. Tehnologija u kojoj je dizajnirano kolo je 180nm TSMC tehnologija. Tu spadaju sledeći parametri:

- $K_{pn} = 200 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ;  $K_{pp} = 40 \mu\text{A}/\text{V}^2$ .
- $|V_{tpmin}| = 0,6 \text{ V}$ ,  $|V_{tpmax}| = 0,76 \text{ V}$ ;  $V_{tnmin} = 0,64 \text{ V}$ ,  $V_{tnmax} = 0,8 \text{ V}$  [8].
- *Nominalni napon napajanja je 3,3V, dok je opseg napona napajanja 2,5 V-3,3V.*
- *Temperetaura u kojoj je potrebno da kolo funkiconše je -40 do 80 °C.*

Potrebno je proračunati DC struje i dimenzije komponenti u bloku. Nakon proračuna slede simulacije rada kola koje će upotrebom složenih modela dati tačniji prikaz funkcionisanja kola i omogućiti informacije na osnovu kojih se kolo može poboljšati.

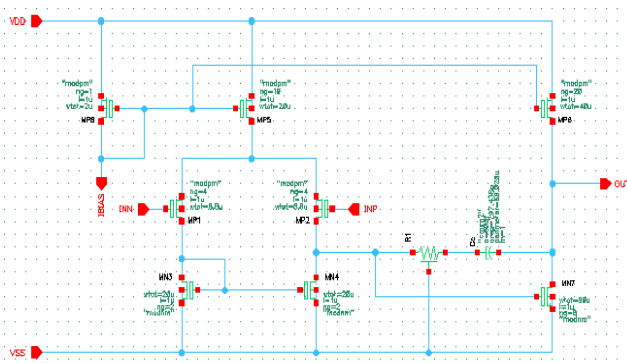
Na osnovu šeme kola dolazimo do sledećih realacija koje opisuju pojačanje prvog, odnosno drugog stepena:

$$A_{V1} = -g_{m1}(r_{ds2} || r_{ds4}) = -2 \frac{g_{m1}}{I_5(\lambda_2 + \lambda_4)} \quad (1)$$

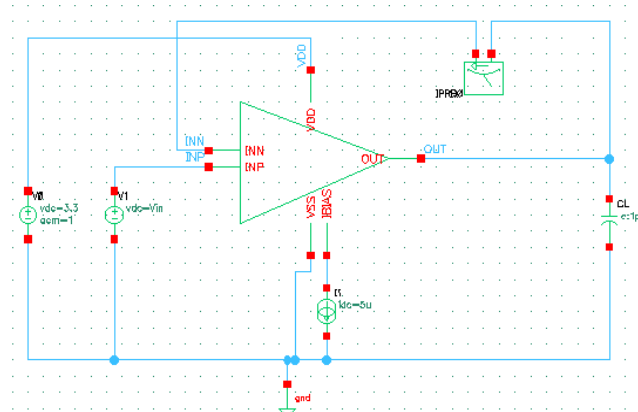
$$A_{V2} = -g_{m7}(r_{ds7} || r_{ds6}) = -\frac{g_{m7}}{I_7(\lambda_7 + \lambda_6)} \quad (2)$$

Proračun se započinje iskorišćavanjem vrednosti minimalne fazne margine zadate specifikacijom iz koje se dolazi do frekvencije polova i nula. Zatim se proračunava veličina kompenzacionog kondenzatora, sve struje u kolu i odnosi dimenzija tranzistora. U tim proračunima koriste se jednačine koje opisuju rad tranzistora u odgovarajućem režimu, jednostavni naponski razdelnici i vrednosti definisane iz specifikacije.

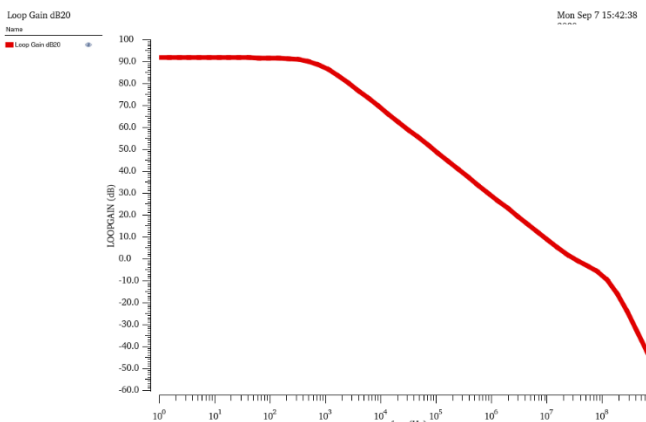
Nakon proračunatih vrednosti kreirana je šema kola (**slika 5.3**) i test šeme (**slika 5.4**) pomoću programskog paketa Cadence. Test šeme su različite i prilagođene za svaki parameter iz specifikacije koji je potrebno proveriti. Simulirane su vrednosti sledećih parametara: CMRR, PSRR, CMIR,  $SR_{rise}$ ,  $SR_{fall}$ , fazna margina i pojačanje kola (**slika 5.5**). Na kolu su izvršene i *Monte Carlo* i *corner* simulacije.



Slika 5.3– Šema operacionog pojačavača



Slika 5.4. – Primer test šeme za određivanje pojačanja u zatvorenoj petlji



Slika 5.5 - Pojačanje dvostepenog operacionog pojačavača

Nakon prilagođenja dimezija i vrednosti komponenta u kolu sve vrednosti iz specifikacije su zadovoljene. Promene dimezija komponenti dovode do promene određenih karakteristika. U nastavku sledi nekoliko efekata primećenih tokom simulacije kola.

Povećavanjem odnosa dimezija tranzistora Q5 povećava se struja  $I_5$ , što uslovljava povećanje fazne margine i  $SR$ , međutim smanjuje se pojačanje (ne u svim slučajevima) i povećava se potrošnja. Povećanjem odnosa dimezija tranzistora diferencijalnog para povećava se i pojačanje prvog pojačavačkog stepena, međutim smanjuje se fazna margina. Povećanjem odnosa dimezija Q6 i Q7 povećava se pojačanje. Povećanjem Milerovog kondenzatora smanjuje se  $SR$  i povećava fazna margina.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu detaljno je teoretski obrađena tema mernih kondicionera. Proučeni su svi osnovni tipovi kondicioniranja signala. Operacioni pojačavač, kao jedan od najvažnijih komponenti kondicionog bloka, dodatno je proučen, a zatim i projektovan u 180nm TSMC tehnologiji.

Projektovan je dvostepeni pojačavač sa *nulling resistor* kompenzacijom. Simulacijama je potvrđeno da kolo radi u granicama specifikacije u svim *corner* slučajevima, procesnim i *mismatch* varijacijama. Potvrđeno je da kolo radi i sa padom napona na 2,5 V i u temperaturnom opsegu od -40 do 80 celzijusovih stepeni. Projektovani pojačavač ima veoma visoku faznu marginu što ga čini stabilnim.

Optimizovane dimezije kola su ( $L$  svih tranzistora je  $1\mu\text{m}$ ):  $W_{12} = 8,8\mu\text{m}$ ,  $W_{34} = 20\mu\text{m}$ ,  $W_7 = 80\mu\text{m}$ ,  $W_8 = 2\mu\text{m}$ ,  $W_5 = 20\mu\text{m}$ ,  $W_6 = 40\mu\text{m}$ ,  $C_C = 600\text{fF}$ ,  $R_I = 5590\Omega$ .

## 7. LITERATURA

- [1] J. Tomić, M. Milovanović, Virtualna instrumentacija primenom LabVIEW programa, FTN-GRID, Novi Sad, 2010.
- [2] J. Tomić, M. Kušljević, Merenje i analiza signala primenom LabVIEW programa, FTN-GRID, Novi Sad, 2016.
- [3] Data Acquisition Fundamentals: Improving Measurement Quality with Signal Conditioning, Measurement Computing, Inc., 2013.
- [4] Data Acquisition Handbook, Measurement Computing, Inc., 2012.
- [5] Ezra Cohen-Yashar, From Tools to Flow: Linking the chains in Cadence Reference Flow, paper from Tower Semiconductor LTD, 2006.
- [6] Tony Chan Carusone, David Johns, Ken Martin, Analog Integrated Circuit Design, 2nd edition, Toronto, 2011.
- [7] Behzad Razavi, Design of Analog CMOS Integrated Circuits, Los Angeles, 2001.
- [8] Interna dokumenta kompanije ams AG, Grac, Austrija.

## Kratka biografija:



**Damjan Vučić** rođen je u Bačkoj Topoli 1991. godine. Nakon završetka osnovnih akademskih studija na Fakultetu tehničkih nauka zapošljava se u firmi *ELSYS Eastern Europe* u Beogradu na poziciji analog lejaut inženjera. Karijeru nastavlja 2018.-te godine u firmi *ams AG* iz Graca.