

VILNIAUS UNIVERSITETAS

INTEGRINIŲ GRANDYNŲ LABORATORINIAI DARBAI

Laboratoriniai darbai skirti Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto Telekomunikacijų fizikos ir elektronikos specialybės studentams

Paruošė Vygintas Jankauskas

Vilnius, 2018

Paaiškinimai

Šie darbai atliekami Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto Elektrinių virpesių ir integrinių grandynų mokomojoje laboratorijoje. Darbai yra skirti Fizikos fakulteto Telekomunikacijų fizikos ir elektronikos specialybės studentams, besimokantiems trečiame kurse, ir atliekami studijuojant Integrinių grandynų dalyką.

Darbų sąrašas:

1. Operacinio stiprintuvo parametrai.
2. Operacinis stiprintuvas su tiesiniais ir netiesiniais elementais.
3. Operacinis stiprintuvas su reaktyviaisiais elementais.
4. Aktyvusis žemo dažnio filtras.
5. Integriniai stabilizatoriai.
6. Analoginis skaitmeninis keitiklis.
7. Integrinis analoginis daugintuvas.
8. Puslaidininkinės technologijos integrinio grandyno topologijos tyrimas.

Literatūra:

1. Č. Pavasaris. Puslaidininkiniai įtaisai. II dalis, Mokymo priemonė. – V.:2009.
2. Pramoninė elektronika: Vadovėlis aukšt. m-lų studentams. 1 dalis. – V.: Mokslas, 1988.
3. Pramoninė elektronika: Vadovėlis aukšt. m-lų studentams. 2 dalis. – V.: Mokslas, 1991.
4. S. Štaras, R. Kirvaitis. Mikroelektronikos pagrindai. – V.: Mokslo ir enciklopedijų leidykla, 1995.
5. R. Kirvaitis. Loginės schemos. – V.: Enciklopedija, 1999.
6. R. Kirvaitis, R. Martavičius. Analoginė elektronika. – V.: Technika, 2003.
7. P.J. Žilinskas. Mikroelektronikos grandinių laboratoriniai darbai. – V., 1988.
8. Hans Camenzind. Designing Analog Chips. – Virtualbookworm Publishing, 2005.
9. U. Tietze, Ch. Schenk. Halbleiter-Schaltungstechnik. 11., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999. p.479-594.
10. Аваев Н.А., Наумов Ю.Е., Фролкин В.Т. Основы микроэлектроники. – М.: Радио и связь, 1991.
11. Алексеенко Ф.Г., Шабури И.И. Микросхемотехника. – М.: Радио и связь, 1982.
12. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1983.
13. Агаханян Т.М. Интегральные микросхемы. – М. Энергоатомиздат, 1983.

1. Integrinių grandynų laboratorinis darbas Nr. 1

Operacinio stiprintuvo parametrai

Darbo tikslas – išmatuoti pagrindinius integrinio operacinio stiprintuvo parametrus.

Užduotis:

1. Išsiaiškinti tiriamojo integrinio operacinio stiprintuvo sandarą ir laboratorinio darbo maketo veikimą.
2. Išmatuoti operacinio stiprintuvo dažninę amplitudės charakteristiką, nustatyti operacinio stiprintuvo stiprinimo koeficientą.
3. Išmatuoti operacinio stiprintuvo triukšmą.
4. Išmatuoti operacinio stiprintuvo įėjimo įtampos poslinkio dydį.
5. Išmatuoti operacinio stiprintuvo sinfazinio signalo perdavimo koeficientą.
6. Nubraižyti grafikus. Paaiškinti gautus rezultatus.

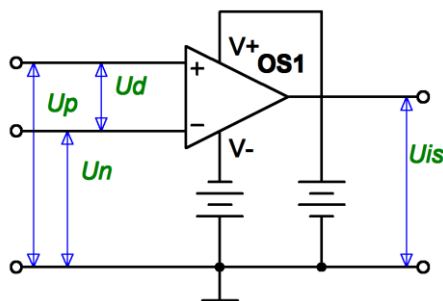
Metodiniai paaiškinimai

Operaciniai stiprintuvai – tai diferenciniai nuolatinės srovės stiprintuvai su nesimetriniu (t.y., vienfaziu) išėjimu ir nuliniu išėjimo įtampos postūmiu. Jiems būtinas didelis stiprinimo koeficientas, didelė įėjimo varža ir maža išėjimo varža.

Jei paprasto stiprintuvo parametrus lemia jo schema, tai įrenginio su operaciniu stiprintuvu parametrus iš esmės lemia grįžtamojo ryšio grandinės, be kurių jis negali būti naudojamas.

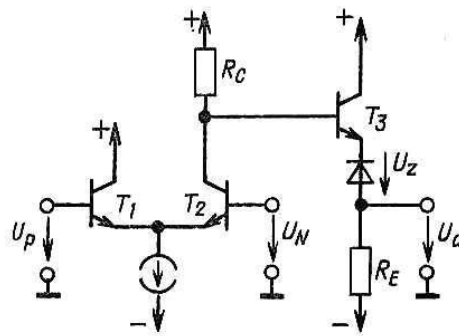
Pirmieji operaciniai stiprintuvai buvo sukurti apie 1940-1950 m., panaudojant elektronines lempas. Tokius aukštos kokybės brangius stiprintuvus naudodavo analoginėse skaičiavimo mašinose sumavimo, integravimo bei kitoms matematinėms operacijoms atlikti analoginiu būdu. Iš čia kilo jų pavadinimas – operaciniai stiprintuvai.

Dabar operaciniai stiprintuvai gaminami integrine technologija ir savo kaina bei gabaritais mažais skiriasi nuo atskiro tranzistoriaus. Praktiškai idealių operacinių stiprintuvų charakteristikų dėka įvairių analoginių schemų realizavimas naudojant operacinius stiprintuvus žymiai paprastesnis, nei naudojant atskirus tranzistorius ir dažniausiai nereikalauja jo vidinės struktūros žinojimo. Norint nustatyti tinkamo operacinio stiprintuvo tipą konkrečiam atvejui užtenka žinoti pagrindinius jo parametrus. Tik atskirais panaudojimo atvejais, kai atsiremama į charakteristikų ribas, prireikia jų vidinės struktūros žinojimo.



1.1 pav. Operacinio stiprintuvo žymėjimo schema

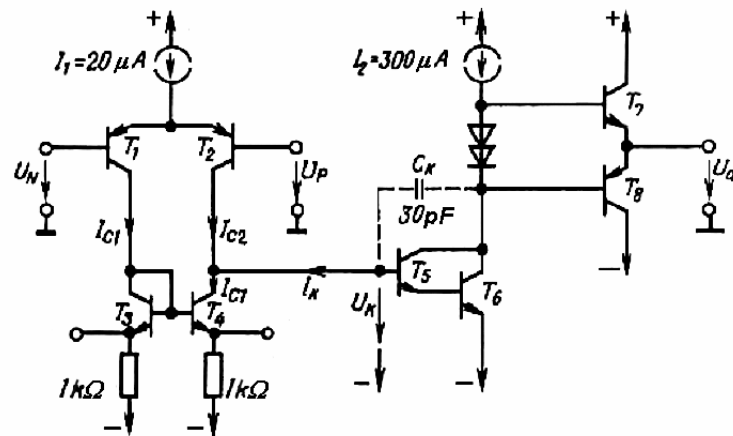
Operaciniam stiprintuvui būtina diferencinė pakopa ir potencialinio lygio postūmio pakopa. Galima tokia schema (1.2 pav.). Tačiau ši schema neturi pakankamo stiprinimo, per silpnai slopina sinfazinį signalą.



1.2 pav. Paprasčiausio operacinio stiprintuvo schema.

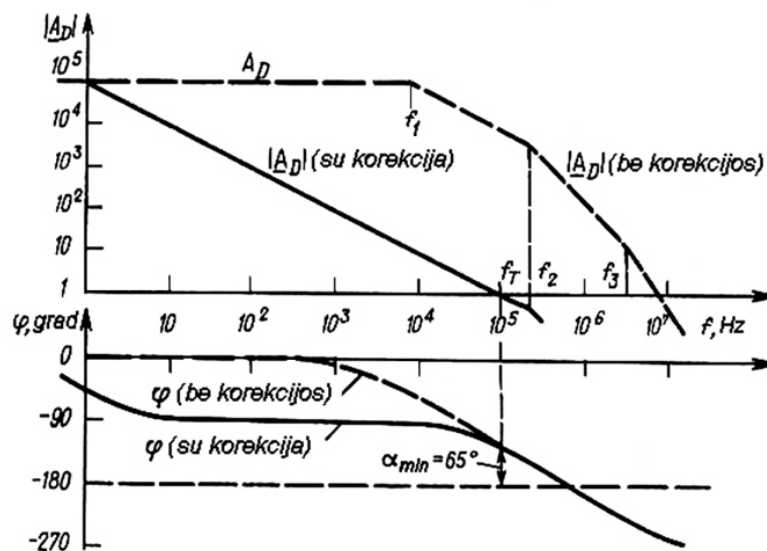
Pirmieji integriniai operaciniai stiprintuvai buvo trijų stiprinančių pakopų. Patobulėjus dvipoliams integriniams tranzistoriams vėlesnės kartos operaciniai stiprintuvai daromi dviejų stiprinančių pakopų.

Supaprastinta dviejų stiprinančių pakopų operacinio stiprintuvo su dvipoliais tranzistoriais schema pavaizduota 1.3 pav. Šio stiprintuvo maksimalus stiprinimo koeficientas viršija 10^5 .



1.3 pav. Operacinio stiprintuvo $\mu A741$ supaprastinta schema

Tipinė nekoreguota operacinio stiprintuvo, veikiančio be grįžtamojo ryšio, amplitudės dažninė charakteristika pavaizduota punktyrine linija 1.4 pav.:



1.4 pav. Tipinės operacinio stiprintuvo amplitudės ir fazės dažninės charakteristikos (Bode diagrama)

Nekoreguotoje charakteristikoje galima išskirti tris dažnius f_1, f_2, f_3 .

Operacinio stiprintuvo dažninę charakteristiką riboja integrinio grandymo elementų parazitinės talpos, kurios yra apie 10 pF. Pirmosios diferencinės pakopos išėjimo varža, kurią lemia T_2 kolektoriaus sandūros diferencinė varža r_{k2} , srovės veidrodžio diferencinė varža – T_4 kolektoriaus sandūros varža ir Darlingtono schemos įėjimo varža. Tipinės vertės nurodytoms schemoje (1.3 pav.) srovių vertėms $\sim 8M\Omega \parallel 8M\Omega \parallel 4M\Omega = 2M\Omega$. Apskaičiavę ribinį dažnį gauname $f_1 = 8 \text{ kHz}$.

Darlingtono schemos išėjimo varžą lemia T_5T_6 kolektoriaus sandūros varža $r_{k'}$, srovės šaltinio diferencinė varža ir išėjimo kartotuvų įėjimo varža βR_{ap} . Tipinės vertės, esant $R_{ap} = 2 \text{ k}\Omega$, yra $\sim 220k\Omega \parallel 270k\Omega \parallel 200k\Omega \approx 75 \text{ k}\Omega$. Tada šios pakopos ribinis dažnis yra $f_2 \approx 200 \text{ kHz}$.

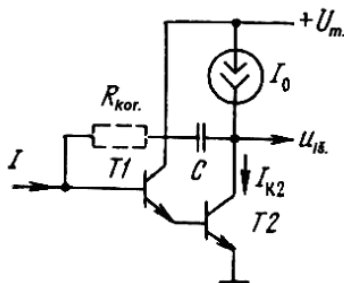
Integriniai *pnp* tranzistoriai, kurių ribinis dažnis yra mažesnis, nei *nnp* tranzistorių lemia trečiąjį ribinį šios schemos dažnį $f_3 \approx 3 \text{ MHz}$.

Didėjant dažniui išėjimo įtampa faze vis labiau atsilieka nuo įėjimo įtampos. Susidarius -180° fazės postūmiui ir jei paties operacinio stiprintuvo stiprinimas didesnis už 1, grįžtamuju ryšiu apimtame stiprintuve susižadina negęstantys virpesiai (Nyquist kriterijus). Todėl reikia imtis priemonių, kad operacinis stiprintuvas būtų stabilus.

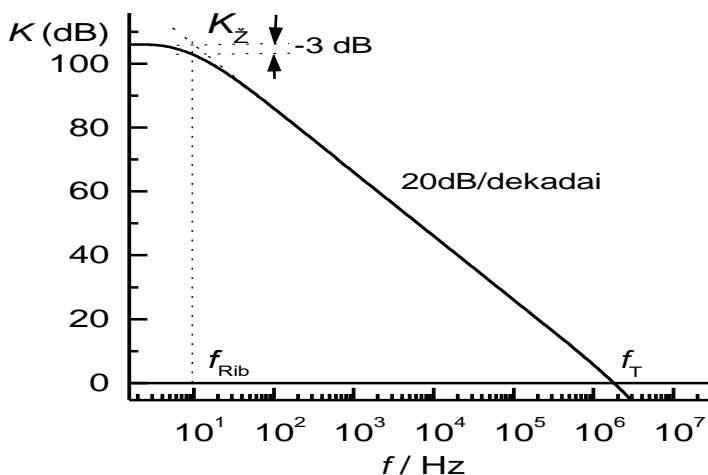
Norint turėti pakankamą stabilumą reikia turėti fazės atsargą – tai kampas papildomas iki kritinio fazės posūkio (180°). Dažniausiai fazės atsarga pasirenkama artima 65° (1.4 pav.) ir tada gaunama taip vadinama Batervorto charakteristika. Tam išgauti pasirenkama, kad vienetinio stiprinimo dažnis būtų lygus $f_T \approx 1/2 f_2$, o tam pasiekti f_1 reikia sumažinti iki 1 Hz, jei mūsų stiprintuvas stiprina 10^5 kartų:

$$f_1 = f_{rib} = f_T / K_{dif} = 100 \text{ kHz} / 10^5 = 1 \text{ Hz} .$$

Tam reiktų 80000 pF talpos kondensatoriaus. Bet tokią didelę talpą neracionalu integraliai gaminti. Korekcijai naudojamas kitas būdas – antroji stiprinanti pakopa paverčiama Milerio integratoriumi, kuris sudarytas iš invertuojančio stiprintuvo, o talpa C sudaro neigiamą grįžtamąjį ryšį:



1.5 pav. Milerio integratoriaus schema



1.6 pav. Tipinė operacinio stiprintuvo amplitudės dažninė charakteristika

Šios pakopos stiprinimo dėka korekcijai reikalinga talpa sumažėja iki $C \approx 300$ pF.

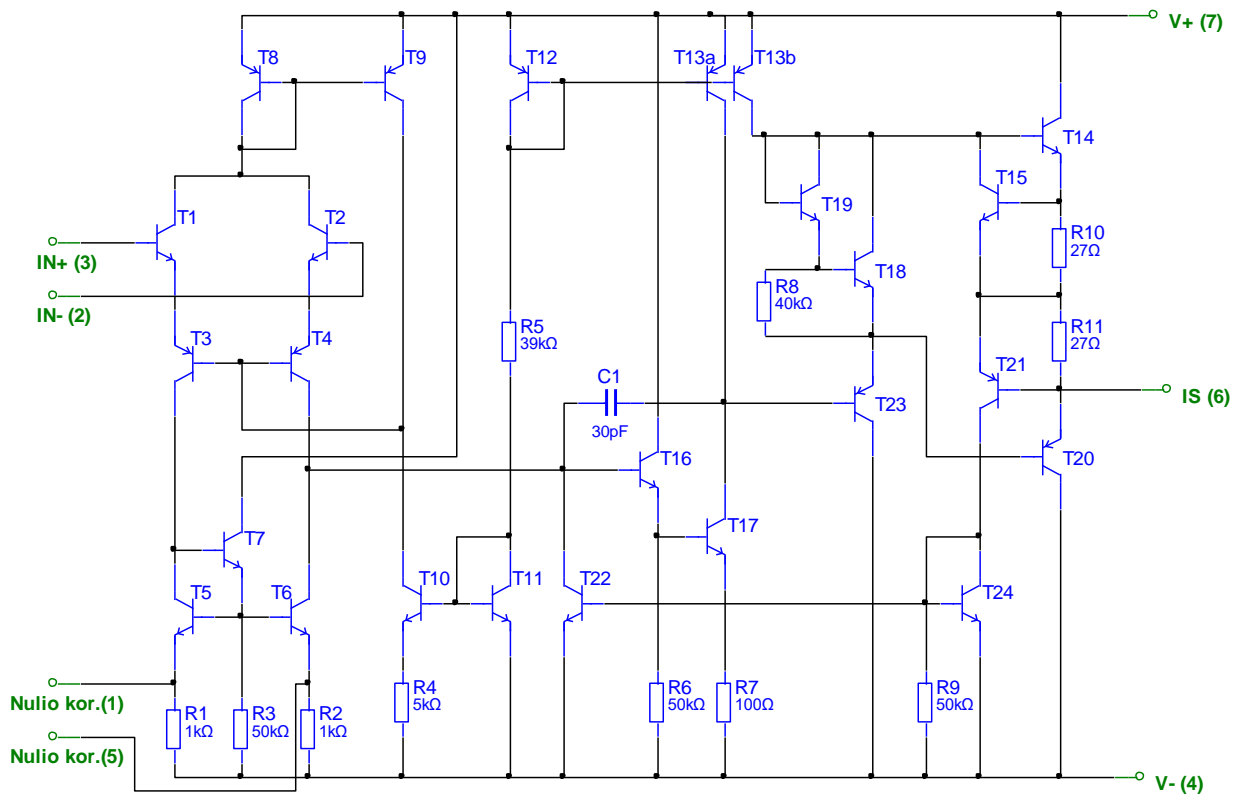
Be to neigiamas grįžtamasis ryšys per kondensatorių C sumažina Darlingtono schemos išėjimo varžą, ir tuo pačiu padidina f_2 nuo 200 kHz iki ~ 10 MHz, tuo pagerindama schemos stabilumą. Todėl f_T galima padidinti priartinant jį iki f_3 ir darant $f_T = 1$ MHz. Taigi užtenka $C = 30$ pF koreguojančios talpos. Su tokia talpa operacinio stiprintuvo charakteristika pasidaro panaši į pavaizduotą 1.6 pav.

Dėl pirmos eilės žemo dažnio filtrui būdingo 20 dB/dek amplitudės dažninės charakteristikos polinkio galioja:

$$K_{dif} f = K_{dif} \zeta f_{rib} = f_T.$$

Darbe tiriamas universalios paskirties operacinis stiprintuvas $\mu A741$ arba jam analogiškas. Operacinio stiprintuvo $\mu A741$ elektrinė schema pateikta 1.7 pav.

Šio operacinio stiprintuvo įėjimo pakopą sudaro T1, T2, T3, T4 tranzistoriai, sujungti BK-BB jungime. Dinaminė apkrova – tranzistoriai T5, T6, T7. Srovių stabilizacijos schema – tranzistoriai T9-T12. Visus režimus pagal nuolatinę srovę užduoda R5 ir tranzistoriai T11-T12. Antra stiprinimo pakopa – tranzistoriai T16 ir T17. Suderinimas su išėjimo pakopa – tranzistorius T23. Išėjimo pakopa – tranzistoriai T14 ir T20. Postūmio schema – tranzistoriai T18, T19. Apsaugos schema – tranzistoriai T15, T21, T24 ir T13. VACH korekcija – talpa C1.



1.7 pav. Operacinio stiprintuvo $\mu A741$ schema

Operacinių stiprintuvų parametrai apibūdina jų panaudojimo galimybes ir sritis.

Įtampos stiprinimo koeficientas K_{dif} parodo kiek kartų sustiprinama operacinį stiprintuvą veikianti diferencinė įtampa.

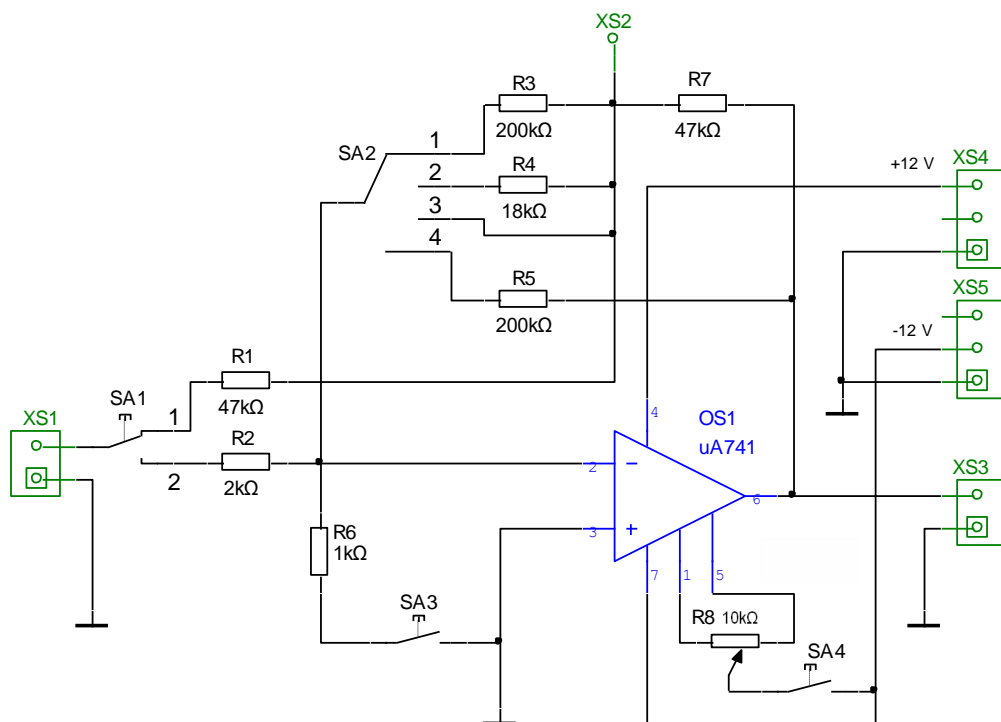
Triukšmų įtampa – tai chaotiškų virpesių amplitudė, atsirandanti operacinio stiprintuvo išėjime. Matuojama triukšmo įtampa išėjime ir perskaiciuojama į įėjimą.

Nulio poslinkio įtampa – tai įtampa, kurią reikia paduoti į operacinio stiprintuvo įėjimą, kad jo išėjimo įtampa būtų lygi 0. Dažniausiai matuojant nulio poslinkio įtampą remiamasi tuo, kad operacinis stiprintuvas yra tiesinis įrenginys ir sujungus tarpusavyje jo įėjimus išmatuojama išėjimo įtampa, atsirandanti dėl nulio poslinkio įtampos.

Sinfazinio signalo perdavimo koeficientas rodo kiek kartų susilpninamas sinfazinis signalas. Žinynuose dažniausiai pateikiamas santykis diferencinio stiprinimo koeficiento su sinfazinio signalo perdavimo koeficientu, kuris vadinamas CMRR (*common-mode rejection ratio*).

Darbo schema

Laboratorinio darbo makete (1.8 pav.) yra integrinis operacinis stiprintuvas OS1 ir keturi jungikliai SA1-SA4, su kuriais galima keisti matavimo grandinės pavidalą, bet visais atvejais lieka OS1 jungimas invertuojančio stiprintuvo režime. Jungiklių SA1 ir SA2 padėties pažymėtos skaičiais 1,2 ... 4. Šie žymėjimai naudojami aiškinant matavimo schemas. Įėjimo signalai U_{iej} paduodami į lizdą XS1, o išėjimo signalai matuojami lizde $U_{iš}$. Lizdas XS2 naudojamas įtampos U_m matavimui. Potenciometru R8 galima reguliuoto OS1 nulinę postūmį, t.y. nustatyti nulinę įtampą lizde XS3 bei kartu ir lizde XS2. Maketas maitinamas iš dviejų 9-12 V įtampos šaltinių, kurie prijungiami prie lizdų XS4 ir XS5, nustačius 12 V šaltinių išėjimo įtampą.



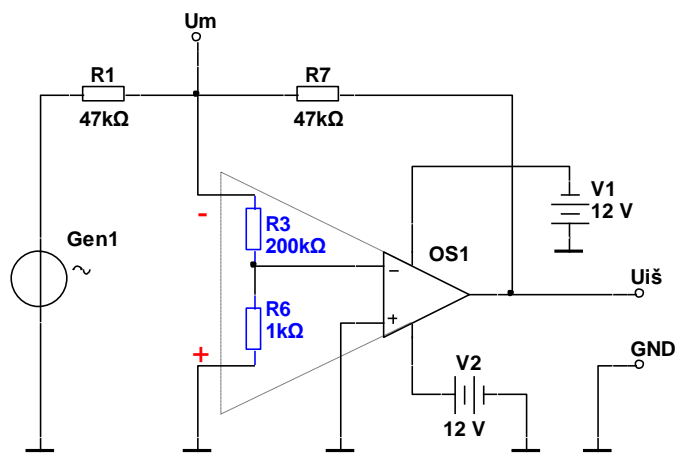
1.8 pav. Laboratorinio darbo, skirto operacinio stiprintuvo parametrų matuoti, maketo principinė elektrinė schema

Darbo atlikimo tvarka

Operacinio stiprintuvo stiprinimo koeficiento dažninės amplitudės charakteristikos matavimai atliekami 0,5 Hz – 1 MHz diapazone.

Operacinio stiprintuvo stiprinimo koeficiento dažninės amplitudės charakteristikos matavimo schema žemuose dažniuose pateikta 1.9 pav. Tokia schema gaunama tinkamai sukombinuojant SA1, SA3 ir SA3 jungiklius. Rezistoriai R1 ir R7 su OS1 sudaro invertuojančią stiprintuvą, o rezistorinis daliklis R3 ir R6 atlieka pagalbinį vaidmenį, kad U_m vertė būtų didesnė. Į lizdą XS1 paduodamas žemo dažnio generatoriaus signalas, kurio amplitudė turi būti 7-10 V. Tokiame jungime didinant signalo dažnį išėjimo įtampa ilgą laiką išlieka pastovi, o kinta U_m dydis. OS1 stiprinimo koeficientas skaičiuojamas pagal formulę:

$$K = \frac{U_{iš}}{U_m} \cdot \frac{R3 + R6}{R6}$$



1.9 pav. Operacinio stiprintuvo stiprinimo koeficiento matavimo žemuose dažniuose schema

Matavimai pradedami nuo 0,5-1 Hz dažnio ir iki 10 Hz matuojama kas 2 Hz. Nuo 10 Hz matuojama dvigubinant signalo dažnį, t.y. matuojant esant 20 Hz, 40 Hz, 80 Hz ir t.t. Oscilografu matuojant žemo dažnio virpesius, negalima naudoti oscilografo įėjime esančio skiriamąjo kondensatoriaus – reikia matuoti nuolatinės srovės režimu. Dėl šios priežasties prieš matavimą būtina potenciometru R8 tiksliai sureguliuoti OS1 nulio padėtį. Matuoti voltmetrais nerekomenduojama, nes negalima kontroliuoti ar nėra triukšmų ar pašalinių signalų. Dėl lėto signalo kitimo iki ~20 Hz rekomenduojama naudoti atmintinį oscilografą. Schema (1.9 pav.) teisingai matuoja stiprinimo koeficientą tol, kol $U_m \ll U_{i\dot{s}}$. Kai U_m išauga, reikia keisti matavimo schemą.

Dažniui didėjant jungiklį SA2 reikia perjungti į padėtį 2 ir tuo sumažinti rezistorinio daliklio dalinimo koeficientą. Dabar stiprinimo koeficientas skaičiuojamas pagal formulę:

$$K = \frac{U_{i\dot{s}}}{U_m} \cdot \frac{R4 + R6}{R6}.$$

Toliau didinant dažnį reikia visai atsisakyti pagalbinio daliklio. Tam jungiklis SA2 pervedamas į 3 padėtį, o jungiklis SA3 atjungiamas. Kartu reikia atkreipti dėmesį, kad didesniuose dažniuose $U_{i\dot{s}}$ jau neišlieka pastovus. Be to, kadangi tiriamas operacinis stiprintuvas gali turėti nedidelį maksimalų išėjimo įtampos augimo greitį, tai didesniuose dažniuose gali susidaryti papildomų matavimo paklaidų dėl dinaminų iškraipymų. Kad to nebūtų būtina sumažinti $U_{i\dot{e}j}$ iki ~0,5 V (maždaug nuo 30 kHz). Jungikliui SA2 esant 3-je padėtyje stiprinimo koeficientas skaičiuojamas pagal formulę:

$$K = \frac{U_{i\dot{s}}}{U_m}.$$

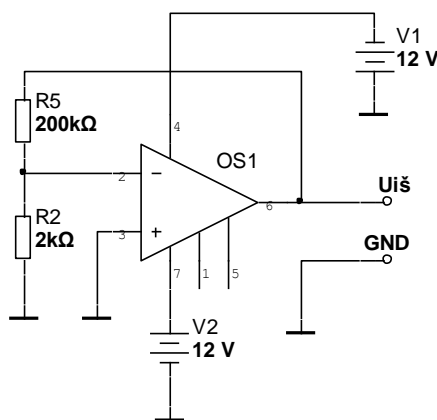
Braižant amplitudės dažninės charakteristikos grafiką, logaritminėje ($\lg 10$) ordinačių ašyje atidedamas išmatuotas ir apskaičiuotas stiprinimo koeficientas, o logaritminėje abscisų ašyje – dažnis (Bode diagramos pavidalu). Iš gauto grafiko reikia nustatyti tiriamo operacinio stiprintuvo $K_{dif\dot{z}}$, f_{rib} , f_T .

Matuojant triukšmo lygį, jungikliai SA1-SA3 sujungiami taip, kad gautume 1.10 pav. parodytą schemą (SA1 – padėtyje 2, SA2 – padėtyje 4, SA3 - atjungtas). Papildomai trumpu laidu lizdas XS1 sujungiamas su žemės lizdu, pakoreguojama nulio postūmį reguliuojančio rezistoriaus R8 padėtis.

Neturint triukšmo analizatoriaus maketo išėjimo signalas tiriamas dviejų kanalų oscilografu. Į abu oscilografo kanalus perduodama ta pati įtampa iš išėjimo lizdo XS3. Abiejų kanalų jautriai turi būti vienodi, oscilografas turi dirbti nuolatinės srovės režime. Toliau vieno kanalo lygio reguliavimo rankenėlė sukama tol, kol pirmojo ir antrojo spindulių vaizdų kraštai susiliečia. Įžeminus abiejų oscilografo kanalų įėjimus oscilografo jungikliais, ekrane gaunamos dvi tiesės,

atstumas tarp kurių bus lygus $U_{i\text{str}}$. Kadangi operacinio stiprintuvo triukšmų įtampa perskaičiuojama į ekvivalentinę įtampą stiprintuvo įėjime, $U_{i\text{str}}$ reikia padalinti iš invertuojančio stiprintuvo stiprinimo koeficiento. Taigi triukšmų įtampa skaičiuojama pagal formulę:

$$U_{tr} = U_{i\text{str}} \cdot \frac{R2}{R5}.$$



1.10 pav. Operacinio stiprintuvo triukšmo ir nulio poslinkio matavimo schema

Matuojant įėjimo įtampos poslinkio dydį SA1-SA3 jungikliais sujungiama 1.10 pav. parodyta schema. Papildomai trumpu laidu lizdas XS1 sujungiamas su žemės lizdu. Nulio padėtį reguliuojantis rezistorius R8 jungiklius SA4 atjungiamas nuo maitinimo šaltinio. Voltmetru arba oscilografu matuojamas išėjimo įtampos dydis $U_{i\text{š}}$. Poslinkio įtampa apskaičiuojama pagal formulę:

$$U_{posl} = U_{i\text{š}} \cdot \frac{R2}{R5}.$$

Matuojant sinfazinio signalo perdavimo koeficientą toliau naudojama 1.10 pav. schema, trumpu laidu lizdas XS1 sujungiamas su žemės lizdu, pakoreguojama nulio postūmį reguliuojančio rezistoriaus R8 padėtis. Sinfazinio signalo atsiradimas operacinio stiprintuvo įėjime išgaunamas sumažinant vieno įtampos šaltinio įtampą nuo 12 V iki 9 V. Matuojamas išėjimo įtampos pokytis $U_{i\text{šsf}}$. Sinfazinio signalo perdavimo koeficientas skaičiuojamas pagal formulę:

$$K_{\text{sinf}} = \frac{U_{i\text{šsf}}}{U_{\text{š1}} - U_{\text{š2}}},$$

čia $U_{\text{š1}}$ – pirmoji maitinimo įtampa, $U_{\text{š2}}$ – antroji maitinimo įtampa. Išmatavus sinfazinio signalo perdavimo koeficientą reikia apskaičiuoti CMRR (žemam dažniui) ir jo vertę išreikšti decibelais.

Matavimo priemonės, prietaisai

Du 9-12V įtampos šaltiniai.

Funkcinis generatorius G6-28;

Oscilografai C1-83 ir C8-17;

Nuolatinės įtampos voltmetras B7-26 ar jam analogiškas.

Literatūra:

1. U. Tietze, Ch. Schenk. Halbleiter-Schaltungstechnik. 11., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999, p.479-594.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир,1983, с.78-91.
3. Pramoninė elektronika: Vadovėlis aukšt. m-lų studentams. 1 dalis. – V.: Mokslas, 1991, p.170-236.
4. Č. Pavasaris. Puslaidininkiniai įtaisai. II dalis. Mokymo priemonė. – V.:2009, p.297-315.

2. Integrinių grandynų laboratorinis darbas Nr. 2

Operacinis stiprintuvas su tiesiniais ir netiesiniais komponentais

Darbo tikslas – išnagrinėti tiesinių ir netiesinių aktyviųjų grandinių sudarymą, naudojant integrinį operacinį stiprintuvą su tiesiniais ir netiesiniais komponentais grįžtamojo ryšio grandinėje.

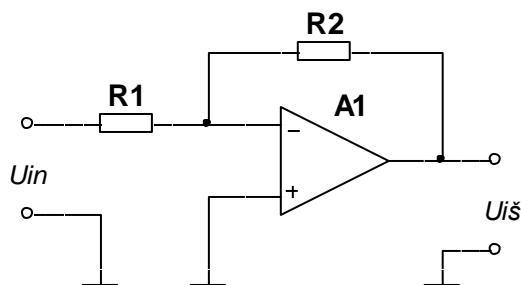
Užduotis:

1. Išsiaiškinti panaudoto integrinio operacinio stiprintuvo sandarą ir laboratorinio darbo maketo veikimą.
2. Išmatuoti invertuojančio stiprintuvo stiprinimo koeficiento ir dažninės amplitudės charakteristikos priklausomybę nuo rezistorių, įjungtų į grįžtamojo ryšio grandinę, dydžių.
3. Išmatuoti sumatoriaus amplitudės charakteristiką ir nustatyti jo vykdomą funkciją.
4. Išmatuoti atėmimo įrenginio amplitudės charakteristiką ir nustatyti jo vykdomą funkciją.
5. Išmatuoti keitiklio srovė-įtampa vykdomą funkciją ir nustatyti transformacijos koeficientą.
6. Išmatuoti netiesinio keitiklio amplitudės charakteristiką ir paaiškinti ją.
7. Išmatuoti diodinio logaritmatoriaus amplitudės charakteristiką ir patikrinti jo vykdomą funkciją.
8. Išmatuoti tranzistorinio logaritmatoriaus amplitudės charakteristiką ir patikrinti jo vykdomą funkciją.
9. Nubraižyti grafikus. Paaiškinti gautus rezultatus.

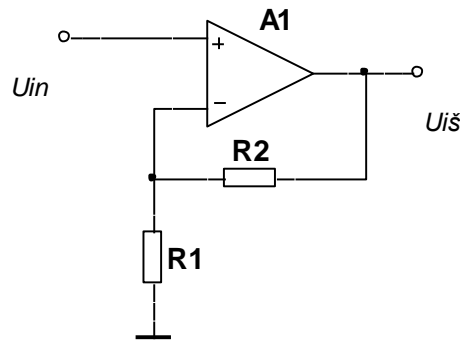
Metodiniai paaiškinimai

Operaciniai stiprintuvai kaip taisyklė naudojami su neigiamu grįžtamojo ryšio grandinėmis. Skaičiuojant tokias grandines remiamasi tuo, kad operacinių stiprintuvų įėjimo varža $R_{in} \rightarrow \infty$, įėjimo srovė $I_{in} \rightarrow 0$, stiprinimo koeficientas $K \rightarrow \infty$. Priėmus begalinę stiprinimo koeficiento sąlygą, jei stiprintuvas dirba tiesinėje amplitudinės charakteristikos dalyje, diferencinė įėjimo įtampa yra nykstamai maža ir ją galima laikyti lygia 0, t.y. $U_{dif} = 0$. Kadangi susidaro gilus neigiamas grįžtamasis ryšys, tai grandinės su operaciniu stiprintuvu realizuojamą funkciją lemia grįžtamojo ryšio grandinės parametrai.

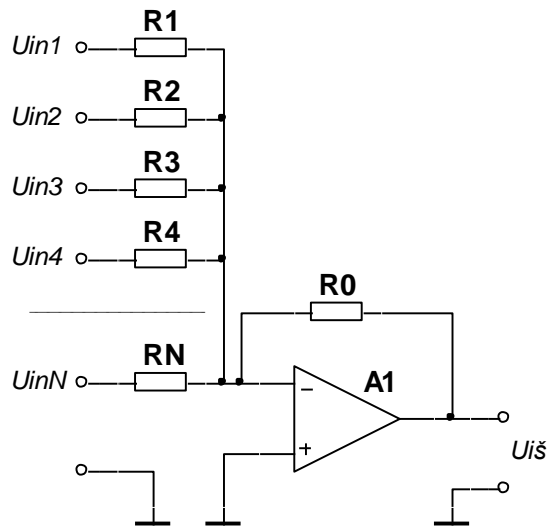
Darbe tiriamos kelios dažniausiai pasitaikančios grandinės su operaciniais stiprintuvais.



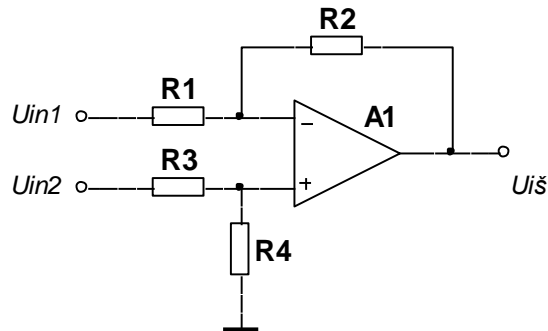
2.1 pav. Invertuojantis įtampos stiprintuvas, padarytas iš operacinio stiprintuvo su neigiamu rezistoriniu grįžtamoju ryšiu. Įtampos stiprinimo koeficientas $K_U = -(R_2/R_1)$ [1]



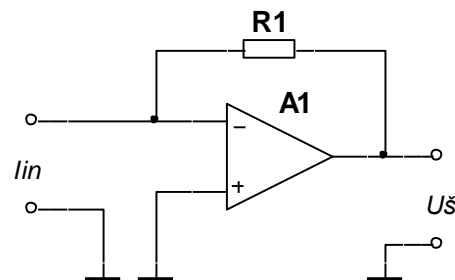
2.2 pav. Neinvertuojantis įtampos stiprintuvas su įtampos stiprinimo koeficientu $K_U = 1 + (R_2/R_1)$ [1]



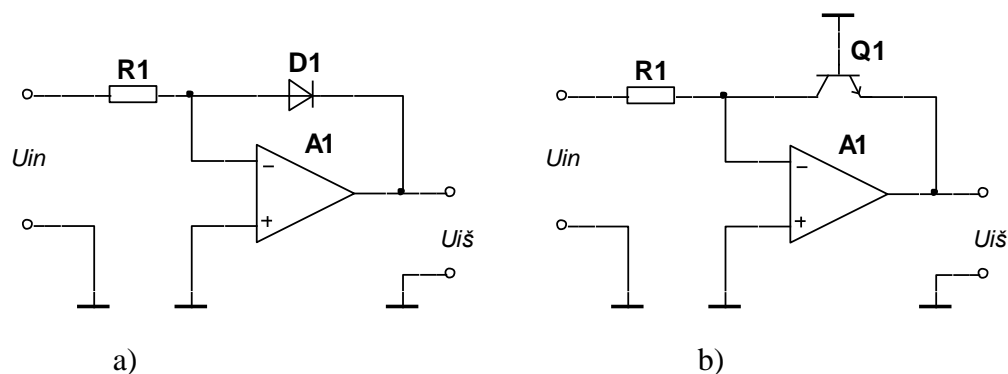
2.3 pav.. Analoginių signalų (įtampų $U_{in\ i}$) elektroninis sumatorius (sudėtuvas), padarytas iš operacinio stiprintuvo su rezistoriniu neigiamu grįžtamoju ryšiu [1]



2.4 pav. Elektroninis atimtuvas, padarytas iš operacinio stiprintuvo su neigiamu rezistoriniu grįžtamoju ryšiu, kur išėjimo įtampos $U_{iš} = (R_2/R_1)(U_{in2}-U_{in1})$ išraiška galioja, kai yra tenkinama sąlyga: $R_2/R_1 = R_4/R_3$ [1]

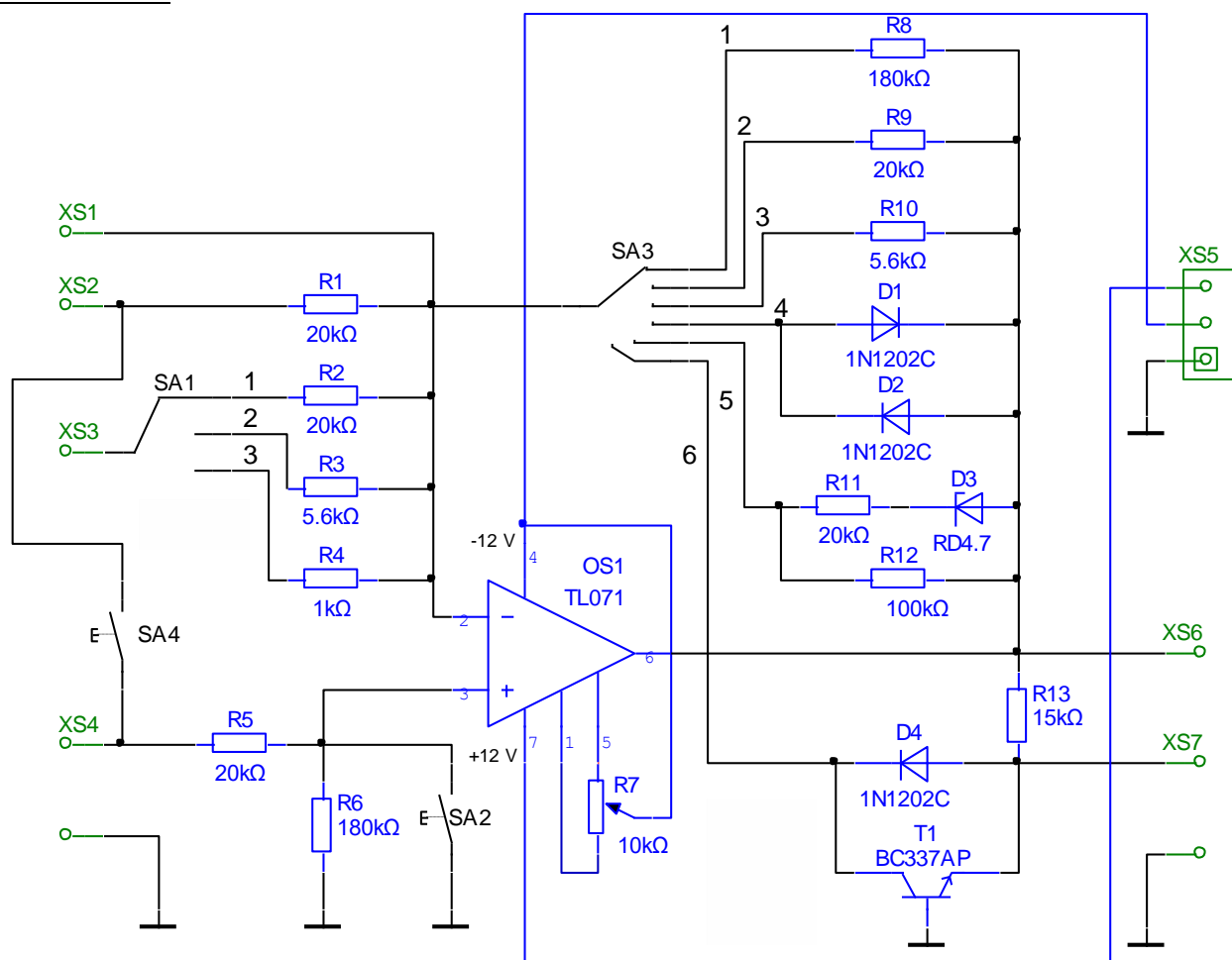


2.5 pav. Keitiklis srovė-įtampa, padarytas su operaciniu stiprintuvu. Galioja $U_{iš} = -R_1 I_{in}$



2.6 pav. Elektroninis logaritmatorius, padarytas invertuojančio įtampos stiprintuvo su operaciniu stiprintuvu ir puslaidininkiniu diodu D1 (a) bei dvipoliu tranzistoriumi Q1 (b) neigiamo grįžtamojo ryšio grandinėje pagrindu [1]

Darbo schema

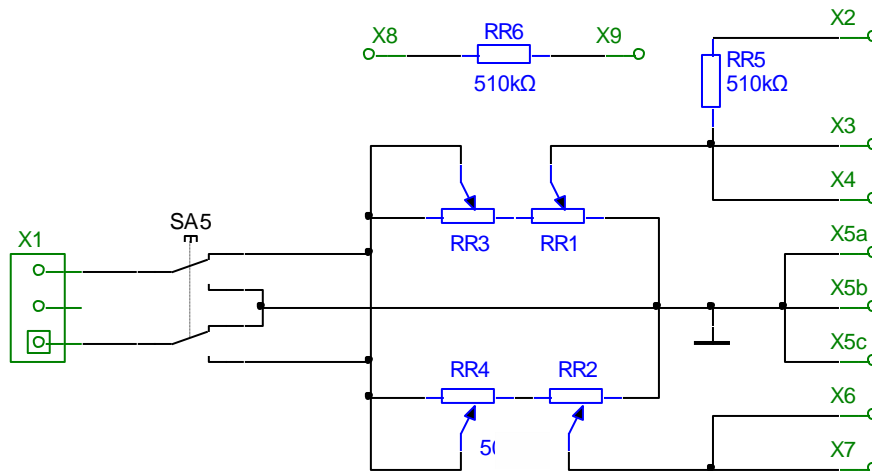


2.7 pav. Laboratorinio darbo, skirto operacinio stiprintuvo su tiesiniais ir netiesiniais komponentais tyrimui, maketo principinė elektrinė schema

Laboratorinio darbo maketą (2.7 pav.) sudaro integrinis operacinis stiprintuvas OS1 su nulio nustatymo potenciomtru R7, įėjimo grandinių komponentai (rezistoriai R1 – R6) ir grįžtamojo ryšio grandinių komponentai (rezistoriai R8 – R13, diodai D1, D2, D4, stabilitronas D3, tranzistorius T1). Įėjimo signalai paduodami į lizdus XS1 –XS4, o išėjimo signalai matuojami

lizduose XS6 ir XS7. Laboratorinio darbo maketas maitinamas iš 12 V dvipoliarinio įtampos šaltinio, kuris prijungiamas prie lizdo XS5.

Pastovios įtampos įėjimo signalai paduodami iš reguliuojamų įtampų šaltinio, kurio schema parodyta 2.8 pav. Jis turi du išėjimus: vienas – lizdai X3 ir X4, kitas – lizdai X6 ir X7. Šiuose išėjimuose įtampa lizdo X5 atžvilgiu yra reguliuojama grubiai potenciometrais RR1 ir RR2, o švelniai – potenciometrais RR3 ir RR4. Prie lizdo X1 prijungiamas 12 V stabilizuotas įtampos šaltinis. Jungiklis SA5 leidžia pakeisti išėjimo signalų poliarumą.



2.8 pav. Nuolatinės įtampos signalų šaltinio principinė elektrinė schema

Darbo atlikimo tvarka

Tiriamos grandinės sudaromos vadovaujantis 2.1 ir 2.2 lentelėmis. Ruošiantis darbui reikia išnagrinėti užduotyse nurodytų matavimų schemas ir nubraižyti darbo žurnale jų elektrines schemas. Taip pat reikia susipažinti su tokių grandinių skaičiavimo pagrindais.

2.1 lentelė. Tiesinių aktyviųjų grandinių sudarymas

Eil.Nr.	Grandinė	Įėjimo lizdai	Išėjimo lizdai	SA1 padėtis	SA2 padėtis	SA3 padėtis
1.	Invertuojantis stiprintuvas	XS3	XS6	1,2,3	Sujungtas	1,2,3
2.	Sumatorius	XS2 ir XS3	XS6	1	Sujungtas	2
3.	Atėmimo įrenginys	XS2 ir XS4	XS6	-	Atjungtas	1
4.	Keitiklis srovė-įtampa	XS1	XS6	-	Sujungtas	1, (2, 3)

2.2 lentelė. Netiesinių aktyviųjų grandinių sudarymas

Eil.Nr.	Grandinė	Įėjimo lizdai	Išėjimo lizdai	SA1 padėtis	SA2 padėtis	SA3 padėtis
1.	Netiesinis keitiklis	XS2	XS6	-	Sujungtas	5
2.	Diodinis logaritmatorius	XS2 XS3	XS6 XS6	- 1	Sujungtas Sujungtas	4 4
3.	Tranzistorinis logaritmatorius	XS2 XS3	XS7 XS7	- 1	Sujungtas Sujungtas	6 6

Matuojant invertuojančio operacinio stiprintuvo stiprinimo koeficiento priklausomybę nuo įėjimo grandinės ir grįžtamojo ryšio grandinės rezistorių matavimai atliekami kintamos įtampos režime parinkus nedidelį įėjimo signalo dažnį (0,2-1 kHz). Įėjimo signalo amplitudė parenkama

tokia, kad operacinio stiprintuvo išėjime būtų gaunamas pakankamai didelis signalas, bet nebūtų signalo apribojimo dėl riboto operacinio stiprintuvo dinaminio diapazono, kuris paprastai yra 1-2 V mažesnis, nei operacinio stiprintuvo maitinimo įtampa. Perjungėjais SA1 ir SA3 sudaromos skirtingos rezistorių kombinacijos, apskaičiuojama teorinė stiprinimo koeficiento vertė ir palyginama su eksperimentiškai išmatuota stiprinimo koeficiento vertė, nubraižomas grafikas.

Matuojant dažninę amplitudės charakteristiką pasirenkamos dvi rezistorių kombinacijos, duodančios žymiai besiskiriančias stiprinimo koeficiento vertes ir nemažesnes nei 5. Matavimai pradunami nuo 50 Hz ir didinant dažnį tęsiami tol, kol išėjimo signalas sumažės ne mažiau nei 40 dB (atskirais atvejais gali prireikti matuoti iki 10 MHz). Toje srityje, kur stiprinimo koeficientas išlieka pastovus dažnį reikia keisti dekadomis, o jam pradėjus mažėti – oktavomis. Amplitudės dažninės charakteristikos grafikas braižomas atidedant išmatuotas stiprinimo koeficiento vertes Bode diagramos pavidalu. Abi išmatuotos charakteristikos pateikiamos viename grafike. Palyginant charakteristikas, surandami dažninių charakteristikų lūžio taškai, padaromos išvados.

Tiriant sumatoriaus vykdomą funkciją pradžioje perjungėjais SA1, SA2 ir SA3 sudaroma sumatoriaus schema. Rekomenduojama sumatorių tirti skaitmeniniu oscilografu (pvz., LeCroy WaveAce1020), jam veikiant XY režimu. Matavimui naudojamas pakankamai didelę (iki 16 V) signalo amplitudę duodantis žemo dažnio generatorius (pvz., Г3-112). Kad matavimai, atliekami aprašomu būdu, nebūtų iškraipyti rekomenduojama parinkti 10-15 Hz generatoriaus signalo dažnį. Pradžioje YT režime reikia suderinti matavimo režimą. Prie maketo XS2 ir žemės gnybtų dviem trumpais laidais prijungiamas nuolatinės įtampos signalų šaltinis (pavaizduotas 2.7 pav.), o maketo išėjimas prijungiamas prie oscilografo II įėjimo. Atjungus 12 V šaltinį nuo nuolatinės įtampos signalų šaltinio X1 gnybto rezistoriumi R7 sukoreguojama operacinio stiprintuvo nulio padėtis. Tada prijungiamas 12 V šaltinis, o prie maketo XS3 ir žemės gnybtų bei oscilografo I įėjimo prijungiamas žemo dažnio generatorius. Kadangi tiriant reikia išsiaiškinti OS dinaminį diapazoną, nustatoma 14-16 V generatoriaus signalo įtampa, o oscilografo I ir II įėjimų jautris – 5 V/pad., skleistinė – 10 ms/pad.. Šiame režime turite matyti sumatoriaus išėjimo signalo apribojimus. Oscilografą perjungiamas į XY režimą (spaudžiant mygtukus *Display*→*XY*) ir stebima perdavimo charakteristika. Į atsineštą FAT32 ar FAT tipo USB atmintinę reikia įsirašyti 3 perdavimo charakteristikas: kai nuolatinė įtampa XS2 lizde $U_{in}=0$ bei, kai $U_{in}=+(3...5)$ V ir $U_{in}=(3...5)$ V. Perdavimo charakteristikos įrašymui reikia spausti mygtukus: *Save/recall*→*Type CSV*(esant *Depth* – *Displaed*, *ParaSave* - *Off*)→*Save*→*New File*→*Confirm*. Duomenų išsaugojimas užtrunka tam tikrą laiką priklausomai nuo atmintinės atsiliepimo greičio. Rekomenduojama palikti automatinę failų numeraciją, kad nereiktų gaišti laiko su kiekvieno failo pavadinimu, bet darbo užrašuose pasižymėti failų pavadinimus. Norint vėl grįžti prie signalų stebėjimo reikia paspausti *Next Page*→*Return*. Išsaugoti duomenys vėliau padorojami. Viename grafike pavaizduojamos visos 3 perdavimo charakteristikos, apskaičiuojamas perdavimo koeficientas.

Tiriant atėmimo įrenginio vykdomą funkciją pradžioje perjungėjais SA1, SA2 ir SA3 sudaroma jo schema. Norint gauti teisingą įrenginio veikimą, reikia jį tinkamai sureguliuoti. Atėmimo įrenginio tikslumas labai stipriai priklauso nuo jį sudarančių rezistorių tikslumo. Kadangi standartinio rezistorių tikslumo nepakanka, reikia reguliuoti vieno iš rezistorių varžą. Iš pradžių pakoreguojama operacinio stiprintuvo nulio padėtis potenciometru R7. Po to šuntuojami tarpusavyje XS2 ir XS4 lizdai jungikliu SA4 ir į juos paduodamas 3-5 V įtampos 10-15 Hz generatoriaus signalas. Reguluojant rezistoriaus R5 vertę išgaunama horizontali perdavimo charakteristika, t.y. minimalus sinfazinio signalo stiprinimas. Atjungus jungiklį SA4 atliekamas atėmimo įrenginio tyrimas: į vieną įėjimą (XS2) paduodama pastovi 0,8-1,5 V įtampa, o į kitą įėjimą (XS4) paduodamas apie 2 V generatoriaus signalas. Parenkamas oscilografo I įėjimo jautris – 2 V/pad., II įėjimo jautris – 5 V/pad., skleistinė – 10 ms/pad.. Pradžioje stebint signalą YT režimu įsitikinama, kad oscilografe signalas neribojamas. Perjungus oscilografą į XY režimą analogiškai kaip ir sumatoriaus tyrime, išsaugomos trys perdavimo charakteristikos: su teigiama XS2 įėjimo įtampa, su neigiama ir su lygia 0. Išsaugotos charakteristikos pavaizduojamos viename grafike, apskaičiuojamas perdavimo koeficientas.

Tikrinant keitiklio srovė-įtampa vykdomą funkciją reikia išmatuoti jo transformacijos charakteristiką. Srovės šaltiniu gali būti įtampos šaltinis su nuosekliai įjungta didele varža. Keitiklio srovė-įtampa įėjimo mazgas yra „virtualios žemės“ mazgas, jo įėjimo varža yra labai maža. Todėl įėjimo srovę dideliu tikslumu galima apskaičiuoti pagal formulę $I = E/R$. Tiriant srovė-įtampa keitiklį, reikia į jo įėjimą XS1 (2.7 pav.) paduoti srovę iš reguliuojamų įtampų šaltinio lizdo X9 (2.8 pav.), o prie šio šaltinio X8 lizdo prijungti 14-16 V sinusoidės ar pjūklo pavidalo generatoriaus signalą. Perdavimo charakteristika stebima oscilografu XY režime ir išsaugoma USB atmintinėje. Vėliau braižomas transformacijos charakteristikos grafikas ir apskaičiuojamas perdavimo koeficientas.

Netiesinio keitiklio amplitudės charakteristika matuojama analogiškai. Į keitiklio įėjimą paduodamas 14-16 V įtampos generatoriaus signalas. Perdavimo charakteristika išsaugoma USB atmintinėje. Nubraižius perdavimo charakteristiką reikia paaiškinti jos pavidalą.

Prieš pradėdant tirti logaritmtorių būtina įsitikinti, ar gerai sureguliuota nulinė padėtis OS išėjime. Toliau tiriant logaritmtoriaus amplitudės charakteristiką XY oscilografo režimu ji tiriama naudojant nedidelės amplitudės generatoriaus signalą, patartina vertė – 100 mV. . Parenkamas oscilografo I įėjimo jautris – 50 mV/pad., II įėjimo jautris – 200 mV/pad., skleistinė – 10 ms/pad.. Įsijungus XY oscilografo režimą išsaugomos diodinio ir tranzistorinio logaritmtorių perdavimo charakteristikos. Transformacijos charakteristikos grafiką reikia pateikti pusiau-logaritminiame mastelyje, įvertinti logaritnavimo tikslumą.

Matavimo priemonės, prietaisai

Maitinimo šaltiniai 12V ir ±12V.

Harmoninių virpesių generatoriai G4-117; G3-112.

Oscilografas LeCroy WaveAce1020;

Nuolatinės įtampos voltmetras.

Literatūra:

1. Č. Pavasaris. Puslaidininkiniai įtaisai. II dalis. Mokymo priemonė. – V.:2009, p.315-334.
2. U. Tietze, Ch. Schenk. Halbleiter-Schaltungstechnik. 11., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999. p.479-594.

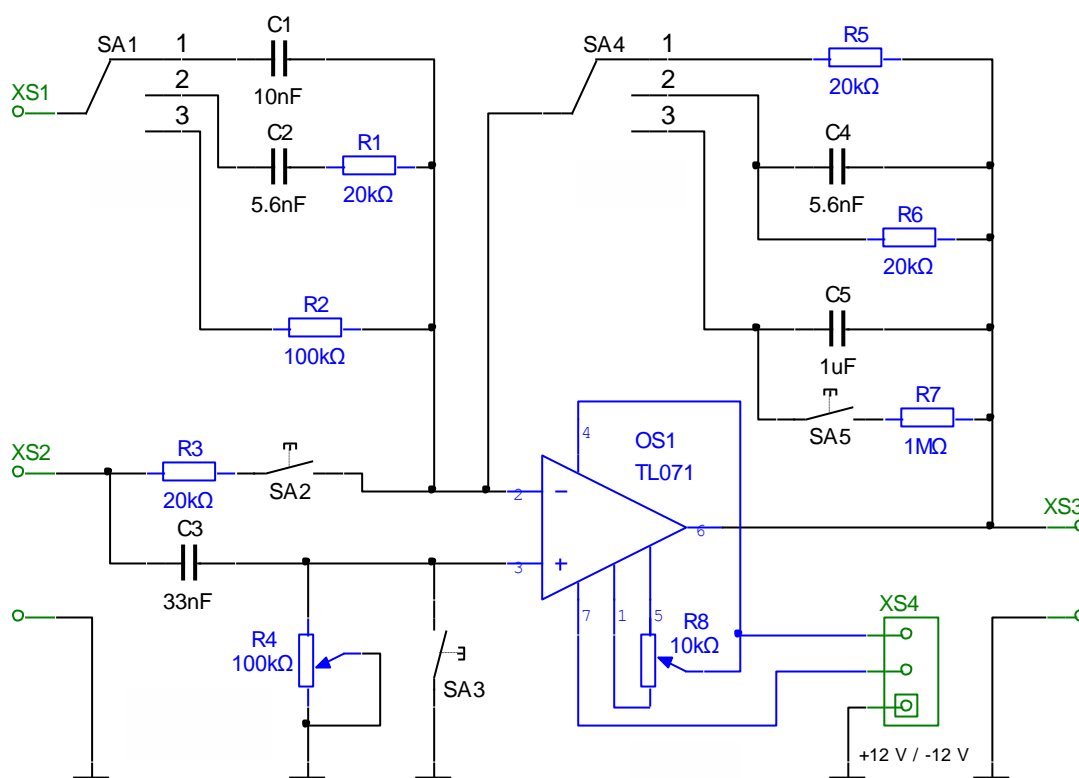
3. Integriųjų grandynų laboratorinis darbas Nr. 3

Operacinis stiprintuvas su reaktyviaisiais komponentais

Darbo tikslas: išnagrinėti aktyviųjų grandinių, sudarytų iš integrinio operacinio stiprintuvo ir reaktyviųjų elementų grįžtamojo ryšio grandinėje, savybes.

Užduotis:

1. Išsiaiškinti naudojamo integrinio operacinio stiprintuvo sandarą ir laboratorinio darbo maketo veikimą.
2. Išmatuoti diferenciatoriaus dažnuminę amplitudės charakteristiką ir patikrinti jo vykdomą funkciją.
3. Išmatuoti integratoriaus dažnuminę amplitudės charakteristiką ir patikrinti jo vykdomą funkciją.
4. Išmatuoti filtro dažnuminę amplitudės ir fazės charakteristikas.
5. Patikrinti fazės keitiklio vykdomą funkciją, matuojant dažnuminę fazės charakteristiką, ir nustatyti rezistoriaus R4 dydžio įtaką šiai charakteristikai.
6. Nubraižyti grafikus. Paaiškinti gautus rezultatus.



3.1 pav. Laboratorinio darbo maketo, skirto integrinio operacinio stiprintuvo su reaktyviaisiais elementais tyrimui, principinė schema.

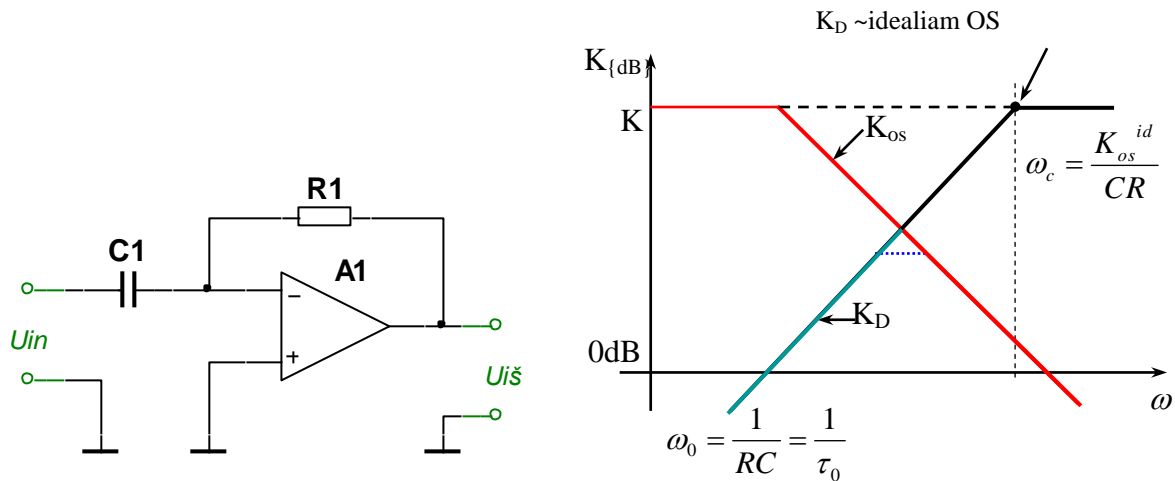
Laboratorinį darbo maketą sudaro integrinis operacinis stiprintuvas (integrinis grandynas OS1) su nulio nustatymo potenciometru R8, įėjimo grandinių elementai (rezistoriai R1 – R4, kondensatoriai C1 – C3) ir grįžtamojo ryšio grandinių elementai (rezistoriai R5 – R7, kondensatoriai C4, C5).

Įėjimo signalai paduodami į lizdelius XS1, XS2, o išėjimo signalas matuojamas lizdelyje XS3. Jungikliais SA1 – SA4 keičiamas tiriamosios grandinės pavidalas.

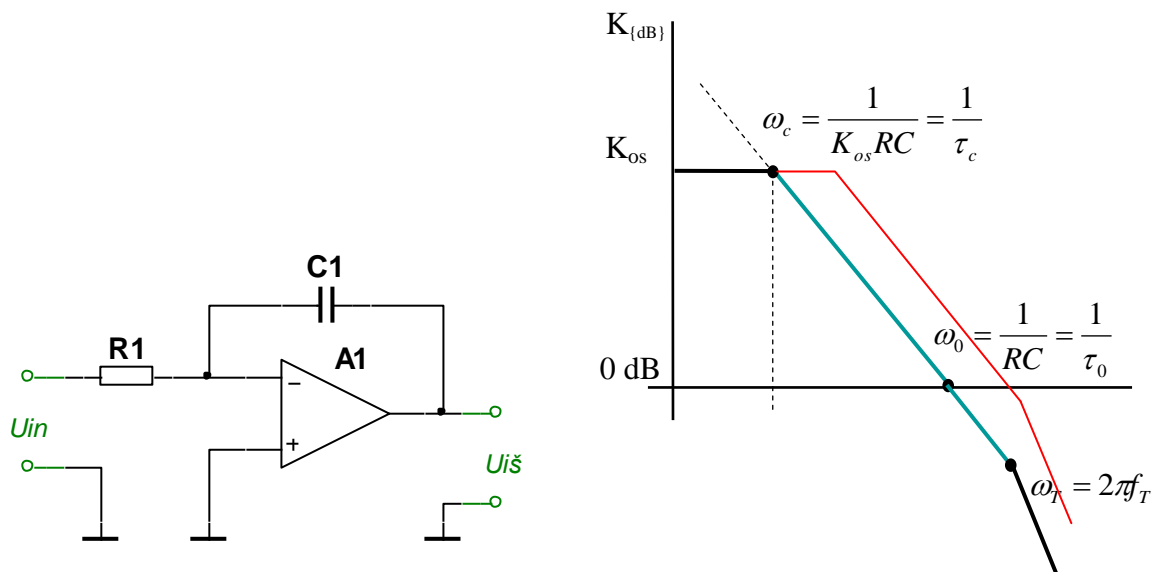
Laboratorinis maketas maitinamas iš dvipolio $\pm 12V$ įtampos šaltinio, kuris jungiamas prie lizdo XS4.

Metodiniai paaiškinimai

Darbe tiriamos kelios dažniausiai pasitaikančios operacinių stiprintuvų jungimo su reaktyviais elementais grandinės.



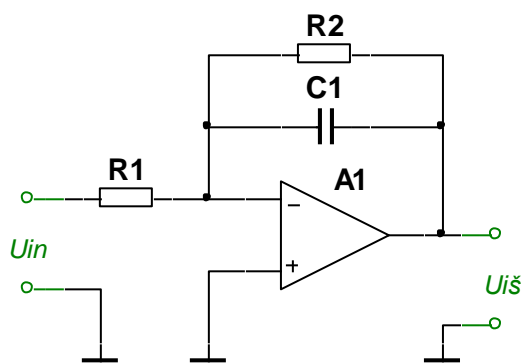
3.1 pav. Diferenciatorius, sudarytas iš operacinio stiprintuvo bei jo amplitudės dažninė charakteristika. Jo įtampos perdavimo funkcija $U_{iš} = -RC \frac{dU_{in}}{dt}$



3.2 pav. Integratorius, sudarytas iš operacinio stiprintuvo bei jo amplitudės dažninė charakteristika.

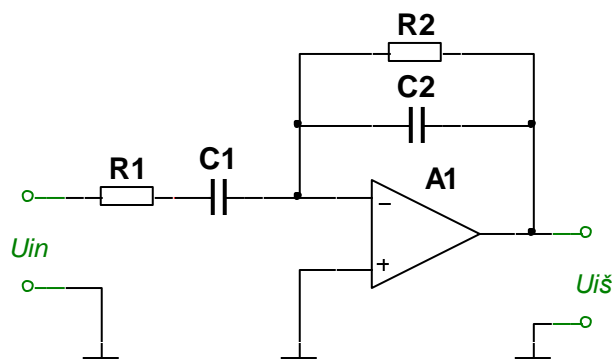
Jo įtampos perdavimo funkcija $U_{iš} = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{in} dt$

Dėl operacinių stiprintuvų neidealumo 3.2 pav. pavaizduota schema gali veikti tik neilgą laiko tarpą, nes dėl operacinio stiprintuvo įėjimo srovės kondensatoriuje C1 kaupiasi krūvis ir išėjime atsiranda auganti įtampa. Šio reiškinio sumažinimui lygiagrečiai kondensatoriui prijungiamas rezistorius R2 (3.3 pav.). Bet tai blogina integratoriaus charakteristikas žemų dažnių srityje.



3.3 pav. Integratorius, sudarytas iš operacinio stiprintuvo su papildomu rezistoriumi

Juostinis filtras gaunamas prijungiant prie operacinio stiprintuvo integruojančias ir diferencijuojančias grandinėles.



3.4 pav. Juostinis filtras, sudarytas iš operacinio stiprintuvo ir RC komponentų

Darbo atlikimo tvarka

Atsakant į pirmąjį užduoties klausimą, reikėtų išnagrinėti panaudoto integrinio operacinio stiprintuvo sandarą, paaiškinti kiekvieno stiprintuvo elemento paskirtį [1, 2] pagal principinę elektrinę operacinio stiprintuvo schemą, išnagrinėti užduotyje nurodytas matavimo schemas, kurios sudaromos, statant į atitinkamas padėtis jungiklius SA1 – SA4 (3.1 lentelė).

3.1 lentelė. Tiriamųjų grandinių sudarymas

Eil. nr.	Ką tiriamo	Įėjimo lizdeliai	Jungiklių padėtys			
			SA1	SA2	SA3	SA4
1	Diferenciatorių	XS1	1	atjungtas	sujungtas	1
2	Integratorių	XS1	3	atjungtas	sujungtas	3
3	Filtrą	XS1	2	atjungtas	sujungtas	2
4	Fazės keitiklį	XS2	X	sujungtas	atjungtas	1

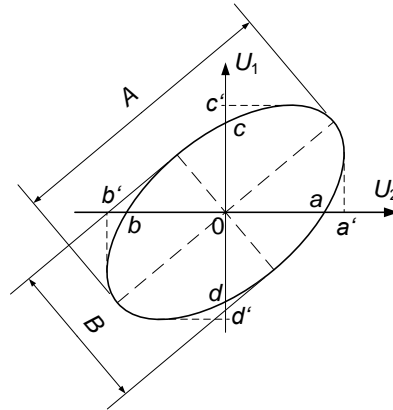
X – bet kokia jungiklio padėtis.

Nubraižyti diferenciatoriaus, integratoriaus, filtro ir fazės keitiklio principines elektrines schemas. Mokėti išvesti formules, aprašančias šias nagrinėjamas aktyvias grandines.

Matuojant tiriamųjų grandinių, t.y. diferenciatoriaus, integratoriaus ir fazės keitiklių dažnumines amplitudės charakteristikas, naudoti sinusinių virpesių generatorių ir oscilografą. Braižant šių charakteristikų grafikus, ordinačių ašyje atidėti stiprinimo koeficientą decibelais, abscisų ašyje – dažnio logaritmą.

Tiriant filtro ir fazės keitikli dažnumines fazės charakteristikas, reikėtų jas matuoti Lisažu figūrų metodu. Braižant šias charakteristikas, ordinačių ašyje atidedama fazė laipsniais, o abscisių ašyje – dažnis logaritminiu masteliu.

Matuojant dažnuminę fazės charakteristiką Lisažu figūrų metodu oscilografas perjungiamas į XY režimą. Į vieną oscilografo įėjimą, pvz. vertikalaus atlenkimo, yra paduodama tiriamojo maketo įėjimo įtampa, o į kitą, pvz., horizontalaus atlenkimo – tiriamojo maketo išėjimo įtampa. Oscilografo ekrane stebima elipsė (3.5. pav.).



3.5. pav. Fazės postūmio matavimas Lisažu figūrų metodu

Elipsės centras sutapatinamas su koordinatinių pradžia. Reikia rasti elipsės susikirtimo taškus su abscisių (a, b) arba ordinačių (c, d) ašimis ir maksimalią elipsės abscisę (a', b') arba ordinatę (c', d'). Jei $U_f = 0$, tai atstumas tarp taškų a ir b yra proporcingas $2U_{m2} \sin\varphi$ (čia U_{m2} – virpesio U_2 amplitudė). Atstumas tarp taškų a' ir b' yra proporcingas virpesio U_2 dvigubai amplitudei, t.y. $2U_{m2}$, tada:

$$\varphi = \arcsin(ab / a'b')$$

Fazės posūkio kampą galima paskaičiuoti, išmatavus elipsės ilgosios ir trumposios ašies ilgį pagal formulę:

$$\varphi = \arctg(A / B)$$

Čia A – ilgosios ašies ilgis, B – trumposios ašies ilgis.

Matuojant fazę, atkreipti dėmesį į jos ženklą.

Tiriant diferenciatoriaus vykdomą funkciją, į tiriamojo laboratorinio maketo įėjimą reikėtų paduoti pjūklinę ar kitos formos įtampą iš specialios formos virpesių generatoriaus. Gautus rezultatus palyginti su teoriniais rezultatais, gautais nagrinėjant šias grandines [1].

Nubraižyti atliktų matavimų struktūrines schemas.

Matavimo priemonės, prietaisai

Maitinimo šaltinis $\pm 12V$.

Harmoninių virpesių generatorius G6-27;

Oscilografas C1-83 arba LeCroy WaveAce1020;

Literatūra:

1. U. Tietze, Ch. Schenk. Halbleiter-Schaltungstechnik. 11., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999. p.479-594.

2. Фолкенберрк Л. Применения операционных усилителей и линейных ИС: Пер. с англ.- М.: Мир, 1985.-С. 126-135, 142-148.

3. Достал И. Операционные усилитель: Пер. ц англ. - М.: Мир, 1982 - С. 190 -196.

4. Integrinių grandynų laboratorinis darbas Nr. 4

Aktyvusis žemo dažnio filtras

Darbo tikslas – išnagrinėti aktyvųjį žemo dažnio filtrą, kuriame panaudotas operacinis stiprintuvas su teigiamu grįžtamoju ryšiu, ir ištirti jo parametų priklausomybę nuo grandinės komponentų parametų kitimo.

Užduotis:

1. Išsiaiškinti panaudoto integrinio operacinio stiprintuvo sandarą, aktyviųjų filtrų sudarymo principus ir laboratorinio darbo maketo veikimą.

2. Duotiems filtro rezistorių ir kondensatorių dydžiams apskaičiuoti ribinį dažnį f_g ir stiprinimo koeficiento vertę, šių tipų antrojo laipsnio filtrams: a) su kritiniu slopinimu, b) Beselio, c) Batervorto, d) Čebyševo.

3. Išmatuoti pirmojo laipsnio žemo dažnio filtro dažninę amplitudės charakteristiką ir laikinę charakteristiką kelioms stiprinimo koeficiento vertėms.

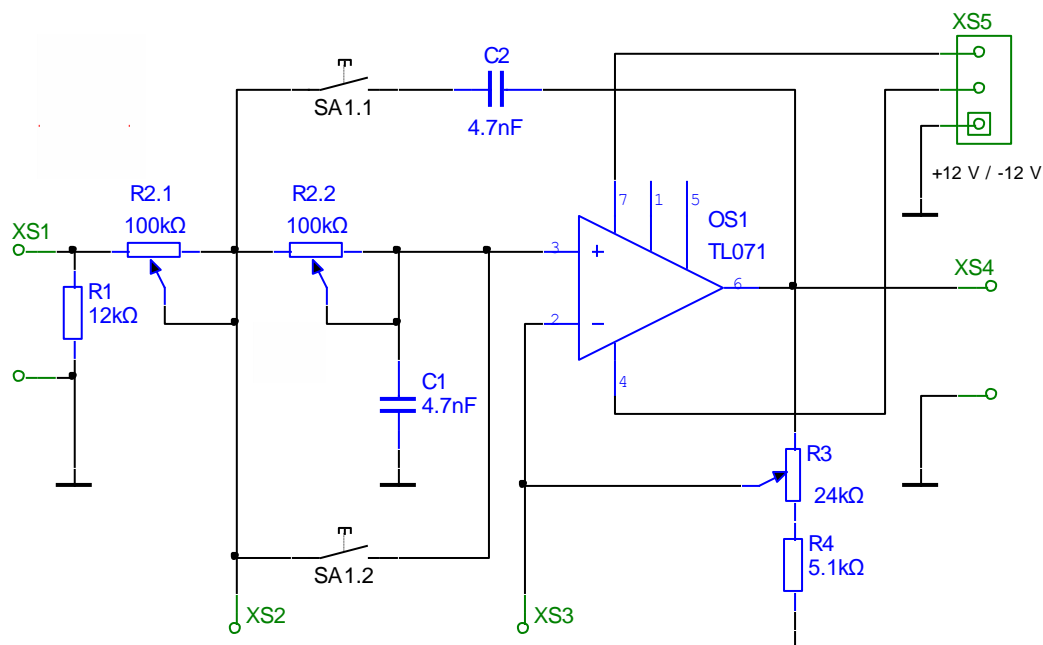
4. Išmatuoti dažninę amplitudės charakteristiką ir laikinę charakteristiką šiems antrojo laipsnio žemo dažnio filtrams: a) su kritiniu slopinimu, b) Beselio, c) Batervorto, d) Čebyševo.

5. Stebėti generacijos reiškinį ir išmatuoti generacijos dažnį, kai stiprinimo koeficientas ≥ 3 .

6. Ištirti vieno iš nagrinėtų antrojo laipsnio filtrų tipo ribinio dažnio priklausomybę nuo rezistoriaus R2 vertės.

7. Nubraižyti grafikus ir oscilogramas. Paaiškinti gautus rezultatus.

Darbo schema



4.1 pav. Laboratorinio darbo maketo, skirto aktyviam žemo dažnio filteriui tirti, principinė elektrinė schema

Laboratorinio darbo maketą (4.1 pav.) sudaro integrinis operacinis stiprintuvas OS1, stiprinimo koeficiento reguliavimo grandinė, kuri sudaryta iš potenciometro R3 ir rezistoriaus R4 ir kuri įjungta į operacinio stiprintuvo neigiamo grįžtamojo ryšio grandinę, integruojanti grandinė R2C1 ir teigiamo grįžtamojo ryšio grandinė su kondensatoriumi C2.

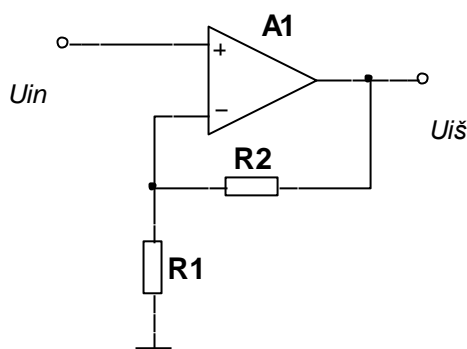
Pirmojo laipsnio žemo dažnio filtras gaunamas, kai SA1.1 jungiklis atjungtas, o SA1.2 jungiklis sujungtas. Antrojo laipsnio žemo dažnio filtras gaunamas, kai SA1.1 jungiklis sujungtas, o SA1.2 jungiklis atjungtas. Potenciometru R2 galima keisti filtro ribinio dažnio vertę, o rezistoriais R3, R4 – aktyviosios dalies stiprinimo koeficientą. Kontroliniai taškai XS2 ir XS3 gali būti naudojami potenciometrų R2 ir R3 varžų matavimui. Filtro įėjimas yra XS1 lizdas, o XS4 lizdas – išėjimas.

Laboratorinio darbo maketas maitinamas iš 12 V dvipoliarinio įtampos šaltinio, kuris prijungiamas prie lizdo XS5.

Metodiniai paaiškinimai

Nagrinėjant į pirmąjį užduoties klausimą reikia išnagrinėti panaudoto integrinio operacinio stiprintuvo struktūrą, paaiškinti kiekvieno elemento paskirtį pagal principinę elektrinę operacinio stiprintuvo schemą.

Darbe tiriamame aktyviajame žemo dažnio filtre panaudojamas operacinis stiprintuvas, kuris įjungtas pagal tipinę neinvertuojančio stiprintuvo schemą (4.2 pav.). Neinvertuojančio stiprintuvo stiprinimo koeficientą nustato rezistoriai R1 ir R2 (4.2 pav.) ir jis lygus $K_V = 1 + (R_2/R_1)$, o jo įėjimo varža yra didelė ir yra lygi paties operacinio stiprintuvo įėjimo varžai. Šios savybės naudingai išnaudojamos aktyviajame žemo dažnio filtre.



4.2 pav. Operacinio stiprintuvo jungimas neinvertuojančio stiprintuvo režime

Žemo dažnio filtras yra elektrinė grandinė be pakeitimų praleidžianti žemus dažnius ir slopinanti aukštus dažnius. Filtro savybės aprašomos matematiniais metodais, todėl, atsakant į antrąjį užduoties klausimą reikia išnagrinėti žemo dažnio filtro skaičiavimo metodiką.

Laboratoriniame darbe tiriamas antrojo laipsnio žemo dažnio aktyvusis filtras su operaciniu stiprintuvu ir teigiamu grįžtamoju ryšiu (Sallen–Key tipo). Neigiamo grįžtamojo ryšio grandinė su rezistoriais R3,R4 nustato stiprinimo koeficientą α .

Žemo dažnio filtro perdavimo funkcija gali būti užrašyta taip:

$$A(P) = \frac{\alpha}{\prod_i (1 + a_i P + b_i P^2)}, \quad (1)$$

čia

α – aktyviojo elemento stiprinimo koeficientas žemiems dažniams;

$P = j\omega/\omega_0$ – normuotas kompleksinis ciklinis dažnis;

ω – ciklinis dažnis;

ω_0 – centrinė ciklinio dažnio vertė;

a_i, b_i – teigiami realūs koeficientai.

Maksimalus normuoto ciklinio dažnio P laipsnis filtro perdavimo funkcijoje apsprendžia filtro laipsnį, žymimą n . Šis laipsnis nulemia dažninės amplitudės charakteristikos asimptotinį polinkį, kuris lygus -20dB/dekadai vienam filtro laipsniui. Dažninės amplitudės charakteristikos pavidalas priklauso ne tik nuo filtro laipsnio, bet ir nuo aktyviojo elemento stiprinimo koeficiento, kurio dydis nagrinėjamoje filtro schemoje lemia filtro tipą. Išskiriami šie filtrų tipai: su kritiniu slopinimu, Beselio, Batervorto, Čebyševio (su 3 dB netolygumu). Jų perdavimo funkciją aprašančioje lygtyje (1) koeficientai a_i ir b_i yra skirtingi. Išvardinti filtrai gaunami, kai koeficientai a_i, b_i įgyja vertes pateiktas 1 lentelėje.

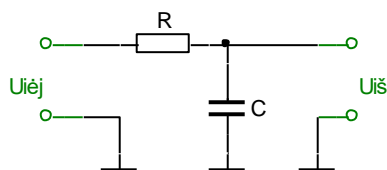
4.1 lentelė. a_i, b_i koeficientai antrojo laipsnio skirtingų tipų filtrams

Filtro eilė n	i	a_i	b_i	Filtro tipas
2	1	1,287	0,414	Su kritiniu slopinimu
2	1	1,362	0,618	Beselio
2	1	1,414	1	Batervorto
2	1	1,065	1,931	Čebyševio su 3 dB netolygumu

Pirmojo laipsnio filtro perdavimo funkcija atrodo taip:

$$A(P) = \frac{\alpha}{(1 + a_1 P)}. \quad (2)$$

Tokią perdavimo funkciją galima realizuoti paprasta RC grandinėle (4.3 pav.).



4.3 pav. Pirmojo laipsnio žemo dažnio filtras

Galima parašyti tokią šios sistemos lygtį:

$$A(P) = \frac{1}{1 + \omega_g R C P}, \quad (3)$$

čia ω_g – ciklinis dažnis, kai perdavimo funkcijos reikšmė sumažėja 3 dB. Jis vadinamas ribiniu cikliniu dažniu.

Sulyginę (2) ir (3) išraiškų koeficientus gauname, kad

$$\alpha = 1 \quad \text{ir} \quad f_g = \frac{a_1}{2\pi RC}, \quad (4)$$

o pirmojo laipsnio filtro koeficientai $a_1 = 1$, o $b_1 = 0$. Čia f_g – ribinis dažnis.

Šią RC grandinę papildę neinvertuojančiu stiprintuvu gausime laboratorinio darbo makete sudarytą schemą. Ji realizuojama kai jungiklis SA1.1 yra atjungtas, o SA1.2 – sujungtas. Tokio invertuojančio stiprintuvo stiprinimo koeficientas skaičiuojamas pagal formulę:

$$\alpha = 1 + \frac{R3'}{R3'' + R4}, \quad (5)$$

čia $R3'$ ir $R3''$ – potenciometro dalių varža (4.1 pav.).

Laboratorinio darbo makete antrojo laipsnio filtras sudaromas sujungus SA1.1 jungiklį ir atjungus SA1.2 jungiklį. Tokio filtro perdavimo funkcija išreiškiama tokia formule:

$$A(P) = \frac{\alpha}{1 + \omega_g RC(3 - \alpha)P + (\omega_g RC)^2 P^2}, \quad (6)$$

čia $R = R2.1 = R2.2$; $C = C1 = C2$.

Iš šios lygties gaunama, kad antrojo laipsnio filtro ribinis dažnis ir stiprinimo koeficientas yra:

$$f_g = \frac{\sqrt{b_1}}{2\pi RC} \quad \text{ir} \quad \alpha = 3 - \frac{a_1}{\sqrt{b_1}}. \quad (7)$$

Kaip matome keičiant stiprinimo koeficientą galima keisti filtro tipą (nuo kritinio slopinimo iki Čebyševio), o ribinis dažnis f_g kinta nežymiai.

Darbo atlikimo tvarka

Ruošiantis darbui iš pateiktų duomenų ir formulių skaičiuojami stiprinimo koeficientai, su kuriais gaunami 4.1 lentelėje išvardinti filtrų tipai.

Atliekant matavimus reikia naudoti žemo dažnio harmoninių ir meandrinų virpesių generatorių (funkcinį generatorių), oscilografą, ommetrą. Stiprinimo koeficientas α keičiamas stumiant potenciometro R3 šliaužiklio padėtį ir nustatomas matuojant stiprintuvo stiprinimo koeficientą padavus pakankamai žemo dažnio signalą iš generatoriaus (daug mažesnę už f_g) ir matuojant virpesių amplitudes oscilografu arba kintamos įtampos voltmetru. Koeficiento α vertė turi būti nustatyta labai tiksliai, ypač kai jo vertės artėja prie 3.

Parinkus reikalingą stiprinimo koeficientą bei įjungus pirmos arba antros eilės filtrų grandines, matuojamos laikinės charakteristikos. Tam funkcinis generatorius perjungiamas į meandrinio signalo režimą, o oscilografo ekrane stebima pereinamoji charakteristika. Matuojant reikia įsitikinti, ar nėra signalo apribojimo dėl per didelės paduodamo signalo amplitudės. Pirmos eilės filtriui reikia išmatuoti laikinės charakteristikos laiko pastoviąją τ arba fronto trukmę (laikas, kol signalas užauga nuo 0,1 lygio iki 0,9 lygio) ir paskui jas palyginti su dažninės amplitudės charakteristikos matavimo rezultatais. Antros eilės filtrų laikinėms charakteristikoms matuojamos fronto trukmės ir jos tarpusavyje palyginamos.

Filtrų dažninės amplitudės charakteristikos matuojamos kompiuteriniais signalų generatoriumi ir spektro analizatoriumi. Prie maketo įėjimo prijungiamas kompiuterio garso kortos išėjimas, o prie maketo išėjimo – kompiuterio garso kortos linijinisėjimas. Svarbu nesupainioti jungimo, nes dėl to gali sugesti kompiuterinės garso kortos išėjimas. Kompiuteryje paleidžiama spektro analizatoriaus programa. Programoje signalo generatorius nustatomas „Frequency sweep“ režime nuo 20 Hz iki 48 kHz per 20-30 s trukmę. Spektro analizatorius įjungiamas maksimumų registravimo režime „Peak hold“. Praėjus keliems generavimo ciklams ir sukauptus tinkamą dažninę amplitudės charakteristiką, jos duomenys išsaugojami kompiuteryje Origin programos byloje arba txt formatu. Braižant dažninių amplitudės charakteristikų grafikus ordinačių ašyje atidedamas stiprinimo koeficientas decibelais, o logaritminėje ($\lg 10$) abscisų ašyje atidedamas dažnis. Gauta charakteristika aproksimuojama dviem tiesėmis slopinimo srityje ir pralaidumo srityje. Aproksimuojančių tiesių susikirtimo taškas parodo filtro ribinį dažnį.

Tiriant ribinio dažnio priklausomybę nuo rezistoriaus R2 vertės, jo varžą keičiama 10 – 100 k Ω ribose (rekomenduojama seka: 10 k Ω , 15 k Ω , 21 k Ω , 36 k Ω , 60 k Ω ir maksimali). Rezistoriaus varža matuojama ommetru, prijungtu prie XS1 ir XS2 lizdų. Dažninės amplitudės

charakteristikos išsaugomos kompiuteryje ir analizuojamos. Toliau reikia nubraižyti išmatuoto ir apskaičiuoto teoriškai ribinio dažnio priklausomybių nuo R2 vertės grafiką, padaryti išvados.

Matavimo priemonės, prietaisai

Maitinimo šaltinis $\pm 12\text{V}$.

Funkcinis generatorius G6-27;

Oscilografas C1-65 ir kintamos įtampos voltmetras B3-38;

Kompiuterinis signalų generatorius ir spektro analizatorius (96 kHz garso plokštės pagrindu);

Ommetras.

Literatūra:

1. U. Tietze, Ch. Schenk. Halbleiter-Schaltungstechnik. 11., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999. p.479-594.
2. Active Filter Design Techniques (<http://www.ti.com/lit/ml/sloa088/sloa088.pdf>).

5. Integrinių grandynų laboratorinis darbas Nr. 5

Integriniai įtampos stabilizatoriai

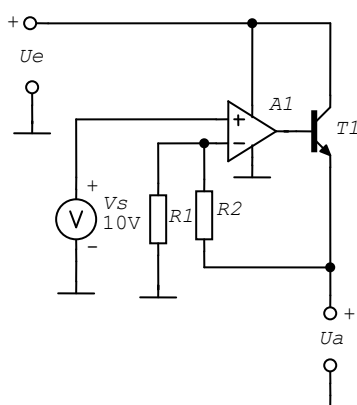
Darbo tikslas – išmatuoti 7800 serijos integrinio stabilizatoriaus parametrus.

Užduotis:

1. Išmatuoti stabilizatoriaus išėjimo įtampos priklausomybę nuo įėjimo įtampos, esant skirtingoms apkrovos varžoms ($R_{ap} \approx \infty$ ir $R_{ap} \approx 10 \Omega$).
2. Išmatuoti stabilizatoriaus išėjimo įtampos priklausomybę nuo išėjimo srovės.
3. Išmatuoti įtampos pulsacijų silpninimo koeficiento priklausomybę nuo išėjimo srovės.
4. Iš matavimų nustatyti maksimalų įtampos stabilizacijos koeficientą, stabilizatoriaus vidinę diferencinę varžą, ribojimo srovę, įvertinti temperatūrinio nestabilumo koeficientą.
5. Nubraižyti grafikus. Paaikškinti gautus rezultatus.

Metodiniai paaikškinimai

Paplitusi įtampos stabilizatoriaus schema sudaryta iš reguliuojančio stiprintuvo su neigiamu grįžtamoju ryšiu. Scheminė įtampos stabilizatoriaus realizacija parodyta 5.1 pav. Schemą sudaro



operacinis stiprintuvas, įjungtas neinvertuojančio stiprintuvo režime, apimtas neigiamu grįžtamoju ryšiu. Išėjimo srovę stiprina didesnės galios tranzistorius T_1 . Operacinis stiprintuvas maitinamas ne simetrine +/- įtampa, o vienpole teigiama įtampa. Tai nustato apribojimus operacinio stiprintuvo įėjimo ir išėjimo įtampoms, kurios gali būti tik teigiamos. Tačiau įtampos stabilizatoriui šie apribojimai neturi reikšmės. Tokio stabilizatoriaus išėjimo įtampa lygi

$$U_a = [1 + R_2 / R_1] \cdot V_s,$$

čia V_s – atskaitos įtampa.

5.1 pav. Įtampos stabilizavimas reguliuojančiu stiprintuvu

Šio stabilizatoriaus reguliuojantis tranzistorius nėra apsaugotas nuo trumpo jungimo. Srovės apribojimui į schemą įjungiami rezistorius R_3 ir tranzistorius T_2 (5.2 pav.).

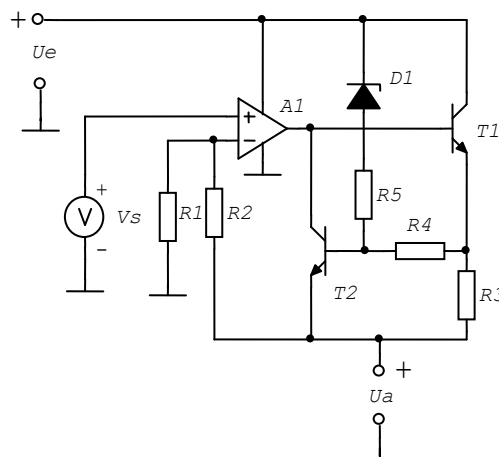
Išėjimo srovė ribojama lygiu

$$I_{a \max} = 0,6V / R_3$$

Tuo metu galia, išsiskirianti išėjimo tranzistoriuje gali būti pakankamai didelė ir lygi

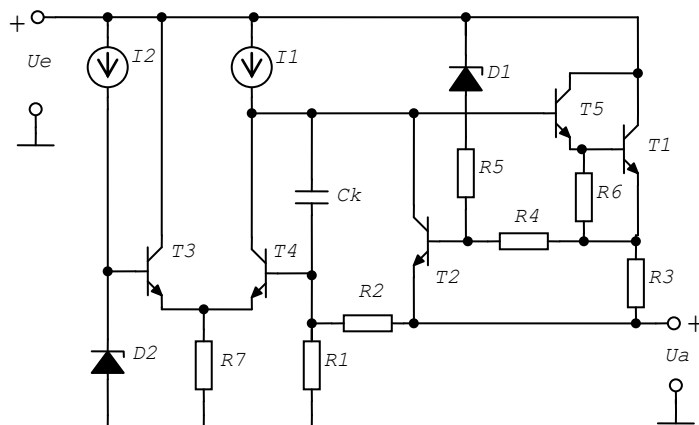
$$P_{T1} = I_{a \max} (U_e - U_a)$$

Galios sumažinimui prijungiamą grandinę $R_5 D_1$, kuri sumažina srovės ribojimo lygį, sumažėjus išėjimo įtampai. Kai U_a sumažėja, stabilitronas D_1 atsidaro ir papildomai sumažina išėjimo srovę.

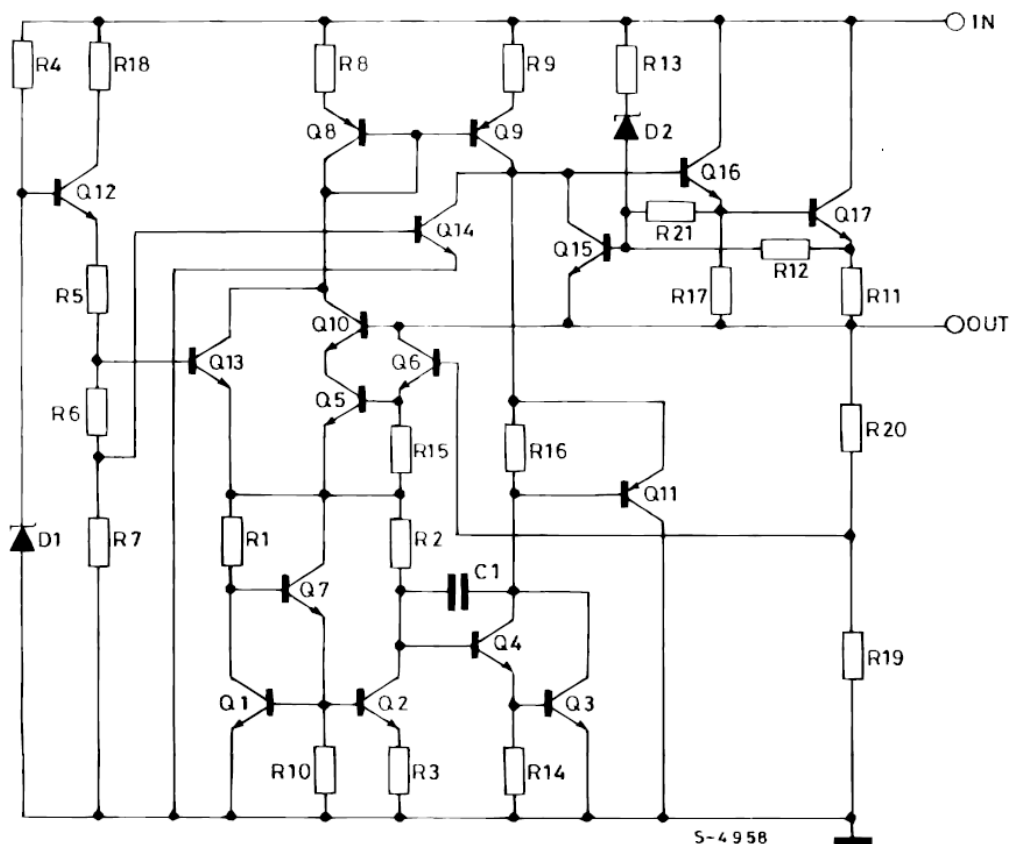


5.2 pav. Modifikuota įtampos stabilizatoriaus schema su išėjimo srovės ribojimo grandinėmis

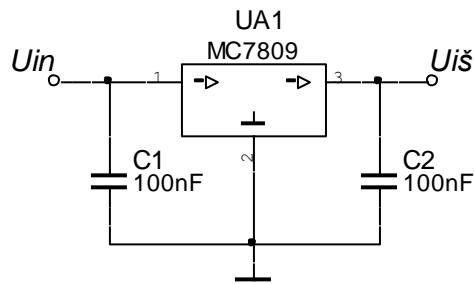
Pavaizduota stabilizatoriaus schema yra gaminama pramonės kaip integrinis stabilizatorius. Tokios schemos gaminamos kelių standartinių įtampų, pvz. 7800 serijos gaminamos nuo 5 iki 24V, tiek teigiamai, tiek ir neigiamai įtampai. Integrinis grandynas turi tik 3 išorinius išvadus – įėjimą, išėjimą ir žemę. Integrinio stabilizatoriaus reguliuojančiam stiprintuvui nekeliama dideli reikalavimai, todėl pakanka pagerintų savybių paprasto diferencinio stiprintuvo (5.3 pav.). Atskaitos įtampos gavimui naudojamas stabilitrono tipo elementas. Kondensatorius C_k reikalingas dažnuminei korekcijai. Papildoma priemonė prieš schemos susižadinimą yra $\sim 0,1\mu\text{F}$ talpos keraminiai kondensatoriai, prijungti grandyno įėjime ir išėjime montuojant grandyną.



5.3 pav. Supaprastinta integrinio stabilizatoriaus schema



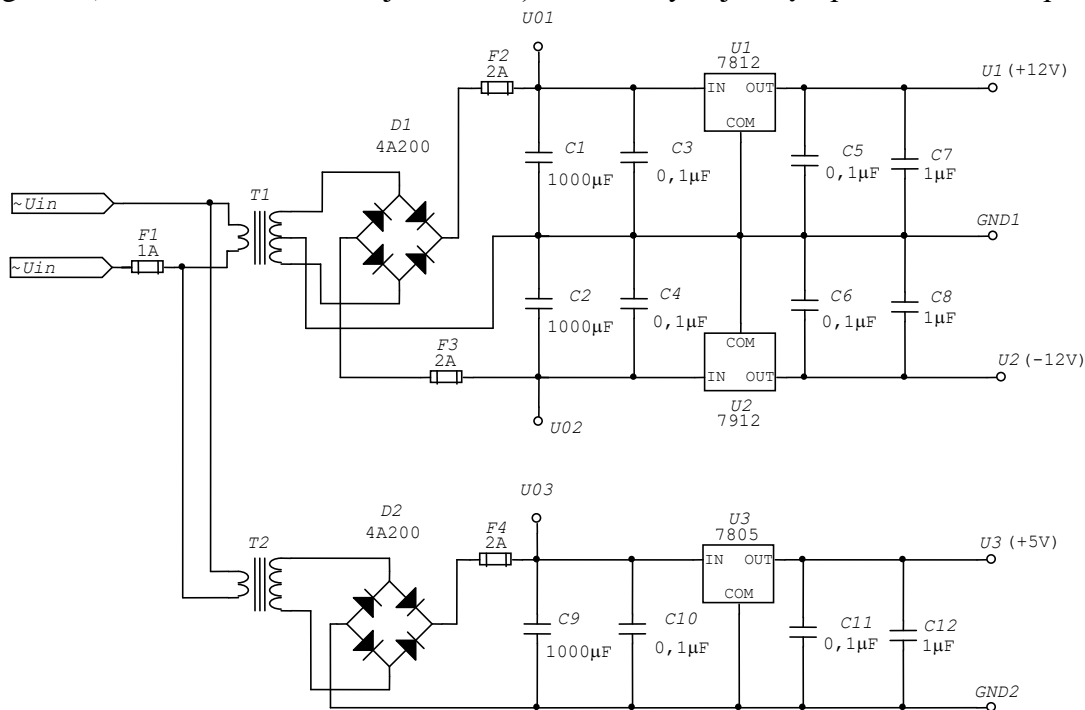
5.4 pav. 7800 serijos integrinio stabilizatoriaus principinė schema.



5.5 pav. 7800 serijos integrinio stabilizatoriaus standartinė jungimo schema

C_1 būtinas, jei stabilizatorius 78XX yra žymiai nutolęs nuo lygintuvo filtro. C_2 pagerina nusistovėjimo charakteristikas.

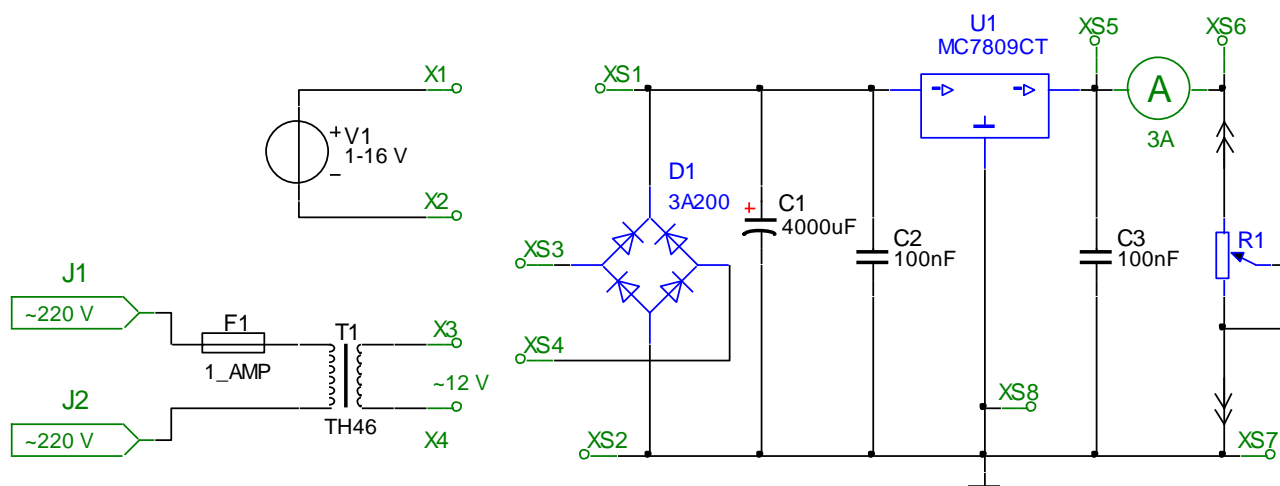
Pramonės gaminamas nemažas pasirinkimas integritinių stabilizatorių, kurie dažnai vadinami reguliatoriais. Skirti stabilizuoti teigiamai įtampai yra žymimi 78XX, o neigiamai – 79XX. Mažos galios (100 mA maksimali išėjimo srovė) varianto žymėjime įterpama raidė „L“, pvz. MC78L05.



5.6 pav. 7800 - 7900 serijų integritinių stabilizatorių panaudojimo pavyzdys

Darbo schema

Maketą sudaro 7809 tipo integrinis stabilizatorius, kurio stabilizacijos įtampa yra 9 V. Integrinis grandynas įjungtas pagal standartinę integritinių stabilizatorių jungimo schemą. Makete yra kintamos srovės lygintuvas, kurį sudaro diodų rinkinys D1 ir filtruojantys kondensatoriai C1, C2. Jis naudojamas, kai atliekami matavimai su kintamos įtamos šaltiniu. Naudojant nuolatinės įtamos šaltinį diodų rinkinį galima aplenkti ir šaltinį prijungti už lyginančių diodų.



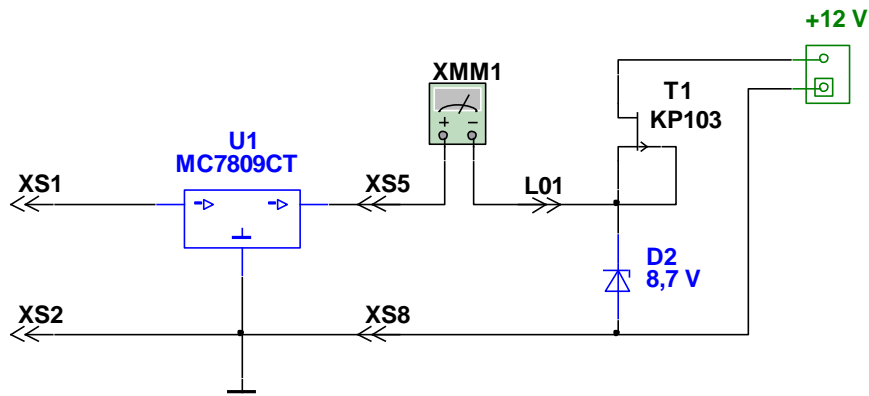
5.7 pav. Laboratorinio darbo maketo schema

Darbo atlikimo tvarka

Matuojant stabilizatoriaus charakteristikas (1 ir 2 užduotys) prie maketo prijungiamas reguliuojamas įtampos šaltinis, galintis užtikrinti 2-3 A srovę, esant 1-16 V įtampai. Įtampos šaltinis jungiamas prie gnybtų XS1 ir XS2 laikantis įtampos poliarumo (5.7 pav.), o prie gnybtų XS6 ir XS7 prijungiama apkrovos varža, kurios dydis gali būti keičiamas (0,7-190) Ω ribose. Tarp gnybtų XS1 – XS2 matuojama tiriamo grandyno įėjimo įtampa, o tarp gnybtų XS5 ir XS8 matuojama išėjimo įtampa. Išėjimo įtampa integrinio stabilizatoriaus išėjime turi būti matuojama dideliu tikslumu, nes stabilizacijos režime integrinio stabilizatoriaus išėjimo įtampa kinta labai nežymiai. Todėl naudojama pagalbinė grandinė, kuri maitinama papildomu 12 V stabilizuotu maitinimo šaltiniu (5.8 pav.). Grandinėje panaudotas precizinis temperatūriškai stabilizuotas stabilitronas D2 bei srovės stabilizatorius padarytas iš lauko tranzistoriaus T1. Tiksliu skaitmeniniu voltmetru XMM1, nustatius jame 1 V matavimo diapazoną, matuojamas įtampos skirtumas tarp maketo XS5 gnybto ir pagalbinės grandinės L01 gnybto 0,01% tikslumu. Išėjimo įtampa apskaičiuojama, išmatavus voltmetru L01 gnybto įtampą atžvilgiu XS8 gnybto. Stabilizatoriaus išėjimo srovė matuojama ampermetru.

Matuojant stabilizatoriaus išėjimo įtampos priklausomybę nuo įėjimo įtampos, įėjimo įtampa keičiama 1-16 V ribose, matavimai atliekami be apkrovos varžos ir su $\approx 10 \Omega$ apkrovos varža. Matuojant stabilizatoriaus išėjimo įtampos priklausomybę nuo išėjimo srovės, įėjimo įtampa parenkama lygi 15-16 V, o apkrovos varža keičiama nuo begalybės iki 0 Ω. *Atliekant šiuos matavimus svarbu ilgam nepalikti maketo, tekant didesnei nei 0,5 A srovei!*

Atliekant 3 darbo užduotį prie maketo gnybtų XS3 ir XS4 prijungiamas 50 Hz 12 V kintamos įtampos šaltinis (transformatorius). Įtampos pulsacijos stabilizatoriaus įėjime ir išėjime galima stebėti oscilografu, o matuojamos jos kintamos įtampos milivoltmetru (B3-38). Kadangi pulsacijos išėjime labai mažos, norint jas teisingai išmatuoti svarbu kintamos įtampos voltmetro žemės gnybtą prijunti prie tokio maketo gnybto, kelyje nuo kurio į integrinio grandyno 7809 vidurinę išvadą nėra montažo takelių, kuriais teka didelė srovė. Taigi, milivoltmetro žemės laidas jungiamas prie maketo XS8 gnybto, o signalinis laidas – prie gnybto XS1 (matuojant pulsacijas įėjime) ir gnybto XS5 (matuojant pulsacijas išėjime). *Atliekant šią užduotį taip pat svarbu ilgam laikui nepalikti maketo, tekant didesnei nei 0,5 A srovei!*



5.8 pav. Voltmetro jungimas siekiant didesniu tikslumu išmatuoti išėjimo įtampos kitimą

Stabilizacijos koeficientas įvertina įėjimo įtampos kitimo ΔU_{in} įtaką išėjimo įtampai $U_{i\check{s}}$ ir yra apibrėžiamas taip:

$$K_s = \frac{\Delta U_{in}}{\Delta U_{i\check{s}}}, \text{ kai } I_{i\check{s}} = \text{const}, T = \text{const}.$$

Stabilizatoriaus diferencinė vidinė varža lygi:

$$r_{st} = \Delta U_{i\check{s}} / \Delta I_{i\check{s}}, \text{ kai } U_{in} = \text{const}, T = \text{const}.$$

Pulsacijų silpninimo koeficientas apibrėžiamas kaip:

$$K_p = 20 \lg(U_{in}^p / U_{i\check{s}}^p),$$

čia U_{in}^p ir $U_{i\check{s}}^p$ - pulsacijų įtampos stabilizatoriaus įėjime ir išėjime.

Matavimo priemonės, prietaisai

Reguliuojamas įtampos šaltinis (1-16V; 3A).

Nuolatinės įtampos voltmetrui Ц 300 arba Ц 302;

Kintamos įtampos voltmetas В3-38;

Ampermetras 3A;

Apkrovos varža (0,7-190) Ω .

Literatūra:

1. U. Tietze, Ch. Schenk. Halbleiter-Schaltungstechnik. 11., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999. p.960-967.
2. Титце У., Шенк К., Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1983, с.257-261.
3. Pramoninė elektronika: Vadovėlis aukšt. m-lų studentams. 2 dalis. – V.: Mokslas, 1991, p.205-210.
4. <http://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00000444.pdf> (7800 datasheet).

6. Integrinių grandynų laboratorinis darbas Nr.6

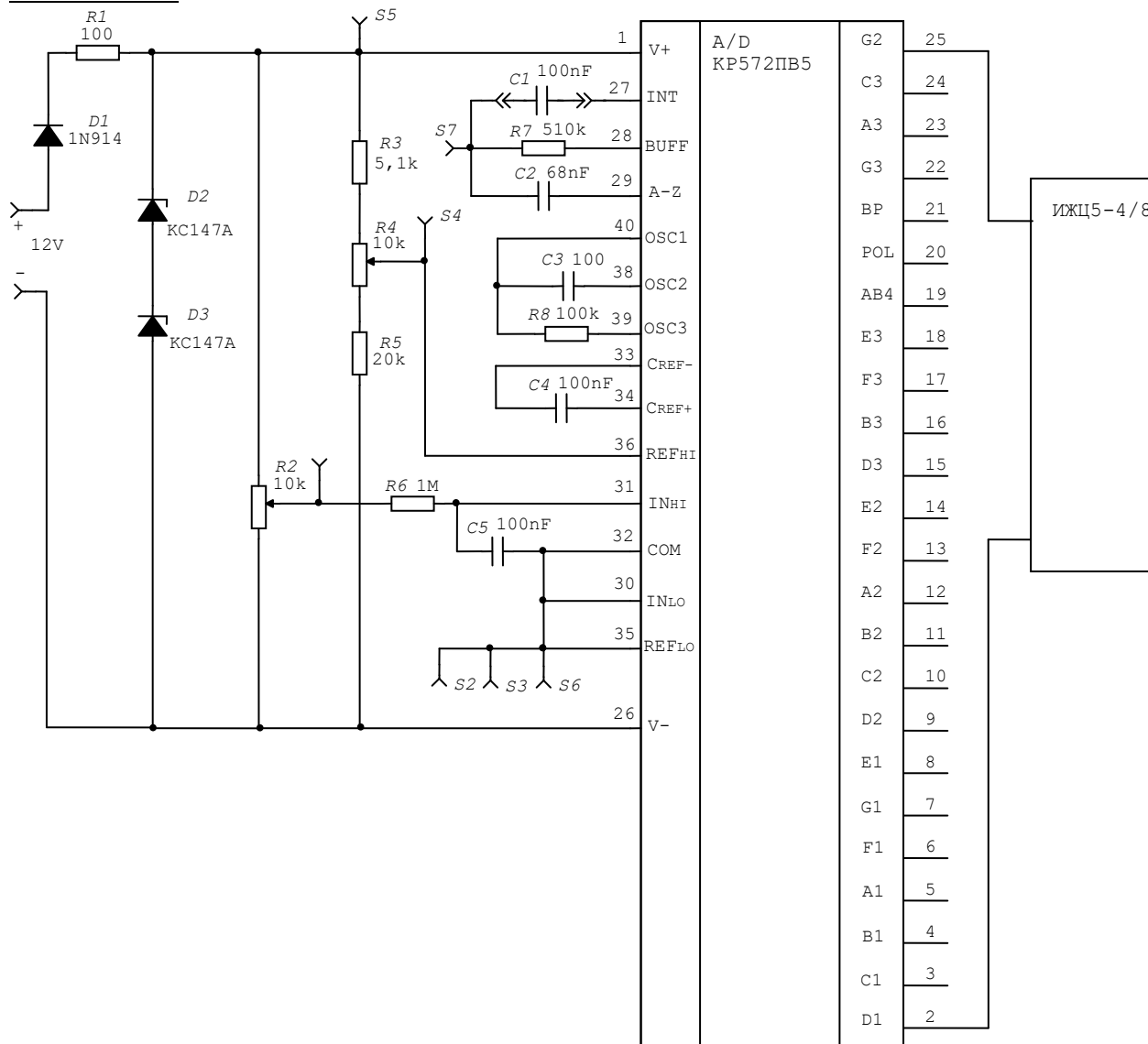
Analoginis skaitmeninis keitiklis

Darbo tikslas – išnagrinėti analoginių skaitmeninių keitiklių sudarymo principus ir ištirti integruojančio keitiklio charakteristikas.

Užduotis:

1. Išsiaiškinti integruojančio analoginio skaitmeninio keitiklio integrinio grandyno KP572ПБ5 (arba Intersil ICL7106) elektrinę schemą, laboratorinio darbo maketo ir jame panaudotų integrinių grandynų veikimą.
2. Ištirti transformacijos charakteristiką. Nustatyti charakteristikos netiesiškumą sritis.
3. Ištirti analoginio skaitmeninio keitiklio dvigubo integravimo ciklą:
 - a) ištirti atskirų fazių trukmių priklausomybę nuo įėjimo įtampos;
 - b) išmatuoti integruojančio kondensatoriaus įtampos kitimo greičio priklausomybes:
 - i) nuo įėjimo įtampos signalo integravimo fazėje,
 - ii) nuo atskaitos įtampos deintegravimo fazėje.
4. Nubraižyti grafikus. Paašškinti gautus rezultatus, padaryti išvadas.

Darbo schema

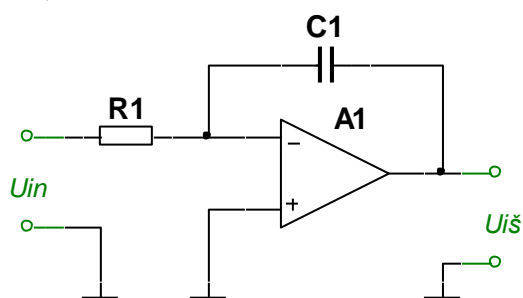


6.1 pav. Laboratorinio darbo maketo, skirto tirti integruojantį analoginį-skaitmeninį keitiklį, schema

Pagrindinė maketo dalis – integrinis grandynas KP572ПВ5А. Kaip indikatorius naudojamas 4 skaitmenų semisegmentinis skystųjų kristalų indikatorius ИЖЛЦ5-4/8, kuris dėka grandyno KP572ПВ5 dešifratorių matavimo rezultatą atvaizduoja patogiu dešimtiniu pavidalu. Maketas maitinamas 12 V nuolatinės įtampos šaltiniu. Potenciometru R2 parenkama įėjimo įtampa U_{in} , o potenciometru R4 nustatoma atskaitos įtampa U_R . Grandynas maitinimo šaltinio atžvilgiu sudaro U_{com} (kontaktas 32), kuris yra lygus $U^+ - 2,8$ V, ir kuris skirtas panaudoti kaip „žemės“ potencialas. Tiek U_{in} , tiek ir U_R matuojami šio potencialo atžvilgiu: voltmetrai U_{in} ir U_R matavimui prijungiami prie gnybtų S1-S2 ir S3-S4. Integravimo ciklas stebimas prijungus oscilografą prie S7-S6 gnybtų.

Metodiniai paaiškinimai

Dvigubo integravimo analoginio skaitmeninio keitiklio pagrindas – integratorius, kuriam panaudoti operacinis stiprintuvas, rezistorius ir kondensatorius. Jo schema parodyta 6.2 pav.



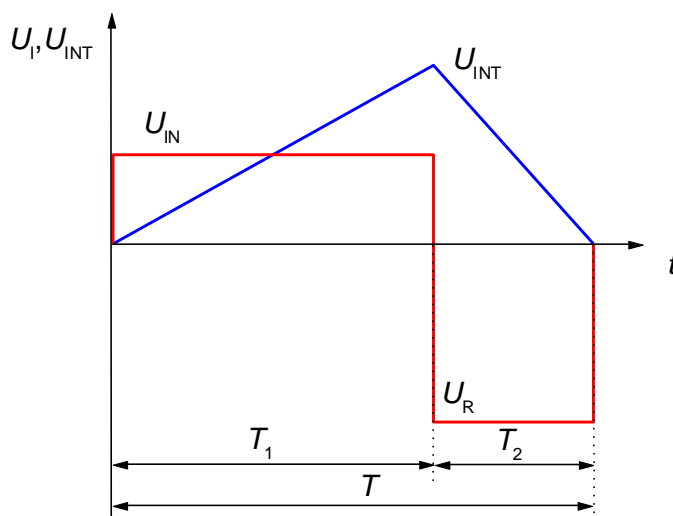
6.2 pav. Integratorius, sudarytas iš operacinio stiprintuvo

Esant pastoviai įėjimo įtampai U_{in} , integratoriaus išėjimo įtampa kinta pagal šį dėsnį:

$$U_{INT}(t) = -\frac{1}{R_1 C_1} U_{in} t, \quad (1)$$

t.y. tiesiškai, taip, kaip pavaizduota 6.3 pav.

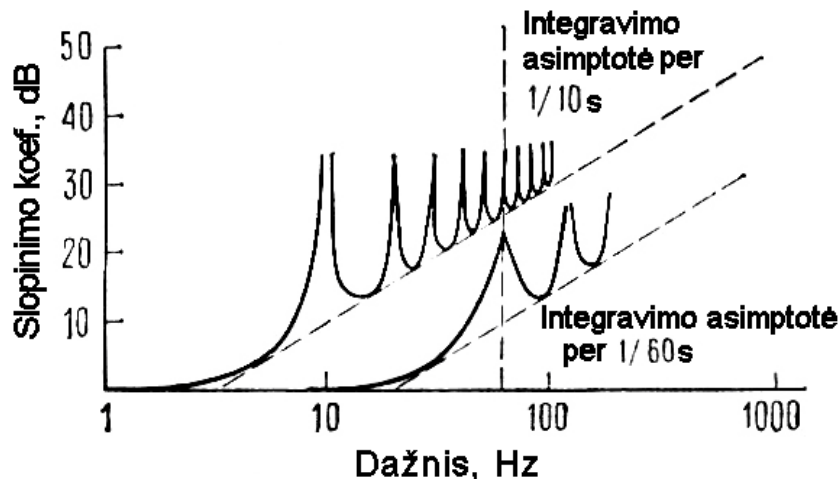
Dvigubo integravimo principas analoginiame skaitmeniniame keitiklyje leidžia panaudoti tą patį integratorių randant įėjimo signalo santykį su etaloniniu. Jo matavimo ciklas susideda iš nulio koregavimo fazės, įėjimo signalo integravimo per tam tikrą trukmę ir atvirkštinio atskaitos įtampos integravimo, kol išelektrinamas integruojantis kondensatorius (6.3 pav.).



6.3 pav. Keitiklio darbo diagrama, realizuojant dvigubo integravimo principą

Dvigubo integravimo metodo privalumai:

1. Nesvarbus integruojančio kondensatoriaus stabilumas. Taip pat nebūtinai tikslus įtampos lygių komparatorius.
2. Keitiklio išėjimo kodas proporcingas vidutinei signalo vertei per tam tikrą integravimo trukmę. Tuo labai sumažinamas jautis impulsiniams trikdžiams bei elektros įtampos tinklo trikdžiams (tinkamai parinkus matavimo trukmę) (6.4 pav.).



6.4 pav. Dvigubo integravimo analoginio skaitmeninio keitiklio trikdžių slopinimo koeficiento priklausomybė nuo trikdžių dažnio

Dvigubo integravimo metodas leidžia pasiekti didelį tikslumą bei didelių reikalavimų komponentams – integruojančiam kondensatoriui bei komparatoriui. Taip pat nereikalingas geras taktinio generatoriaus dažnio ilgalaikis stabilumas. Šiems keitikliams svarbus tik geras išelektravimo srovės stabilumas, o tam reikalingas tikslus atskaitos įtampos šaltinis. Šio tipo keitikliai būna 10-18 bitų.

Dvigubo integravimo keitiklyje vienoje ciklo fazėje vykdomas integravimas – integralo kaupimas nuo įėjimo signalo per fiksuotą laiko trukmę, o kitoje fazėje vykdomas atvirkštinis integravimas – sukaupto integralo skaičiavimas paduodant į integratoriaus įėjimą priešingo ženklo atskaitos įtampą, kol pasiekiamas nulis. Šio principo realizavimo diagrama pateikta 6.3 pav.

Integralo kaupimas ($0-T_1$) prasideda į integratoriaus įėjimą paduodant įtampą $U_i=U_{in}$, o atvirkštinis skaičiavimas (T_1-T_2) – padavus $U_i=U_R$. Suminis integralo prieauglis per integravimo ciklą lygus nuliui, todėl

$$\frac{U_{in}T_1}{\tau} + \frac{U_R T_2}{\tau} = 0, \quad (2)$$

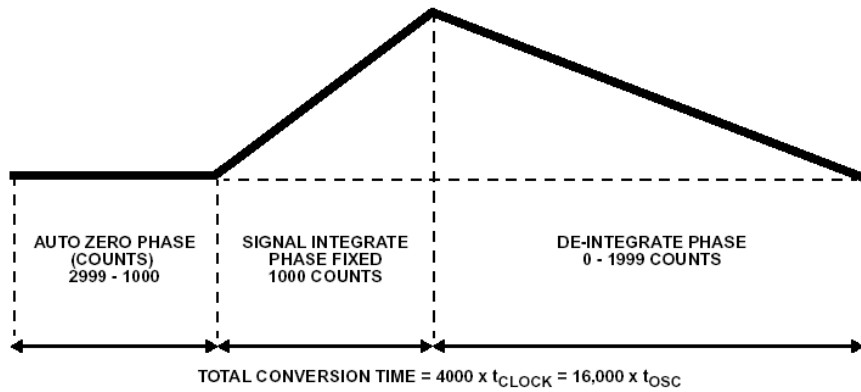
čia τ – integratoriaus laiko pastovioji, o įtampos U_{in} ir U_R – priešingų poliškumų. Fazių trukmė gali būti išreikšta sąryšiu:

$$\frac{T_2}{T_1} = -\frac{U_{in}}{U_R}. \quad (3)$$

Žinant fazių trukmes bei atskaitos įtampą, galima surasti įėjimo įtampą:

$$U_{in} = -U_R \frac{T_2}{T_1}. \quad (4)$$

Realiame keitiklyje yra dar viena fazė – automatinio nulio nustatymo (6.5 pav.), kuri reikalinga buferinio kartotuvo, integratoriaus bei komparatoriaus, esančių keitiklio sudėtyje (6.6 pav.), nulio postūmių išsimumui ir tolesniam jų kompensavimui.



6.5 pav. Tipinė integruojančio stiprintuvo išėjimo signalo diagrama (27 „INT“ išvadas)

Struktūrinė keitiklio KP572ΠB5 analoginės dalies schema pateikta 6.6 pav. Joje galima suskaičiuoti 11 puslaidininkinių perjungėjų. Kiekvienai iš trijų matavimo ciklo fazių būdingas tam tikras perjungėjų susijungimas. Nulio korekcijos fazėje susijungia „A-Z“ perjungėjai. Per šią fazę kondensatoriuje C_{AZ} (C2 makete) išimenuama visų trijų stiprintuvų postūmių įtampų sukelta paklaidos įtampa. Antroje ir trečioje fazėse ši įtampa bus atimama iš integratoriaus įėjimo signalo. Antroje fazėje susijungia perjungėjai „INT“ ir vyksta įėjimo įtampos integravimas 1000 taktinio generatoriaus taktų. Trečioje fazėje susijungia perjungėjai „DE+“ arba „DE-“, (tai valdo skaitmeninė dalis) ir prasideda integruojančio kondensatoriaus C_{INT} (C1 makete) išelektrinimas iki komparatoriaus persijungimo. Šios fazės trukmė, išmatuota taktų skaičiumi, kuris gali būti 0-2000 ribose, yra keitiklio matavimo rezultatas. Remiantis (3) formule

$$N = f_T \cdot T_2 = f_T T_1 \frac{U_{in}}{U_R},$$

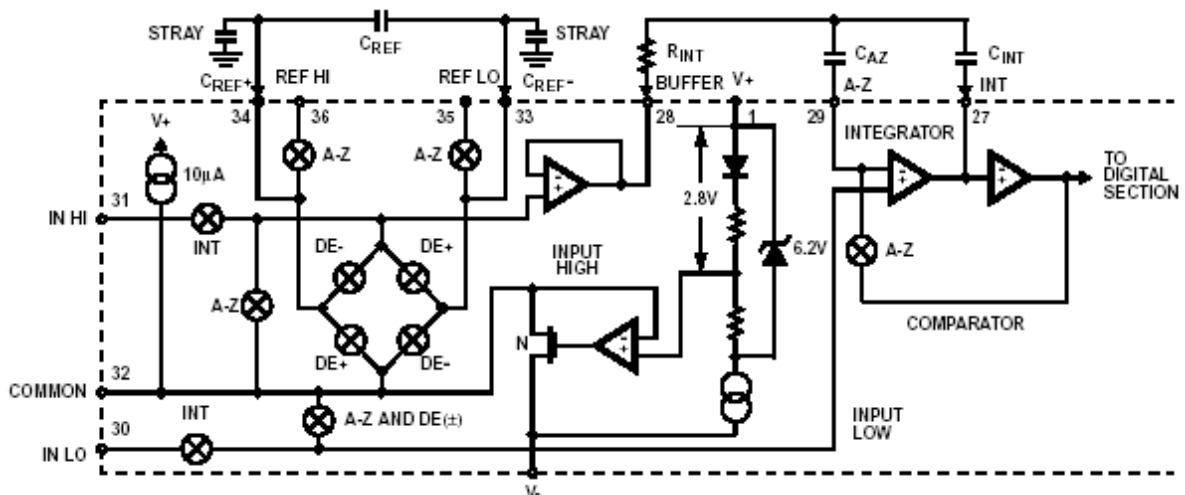
čia N – išėjimo kodas (arba T_2 fazės taktų skaičius), f_T – taktinis dažnis. Fazės trukmę T_1 galime suskaičiuoti dauginami N_1 (antrosios fazės taktų skaičius) iš takto trukmės $1/f_T$. Tada

$$N = f_T T_1 \frac{U_{in}}{U_R} = f_T \frac{N_1}{f_T} \frac{U_{in}}{U_R} = \frac{N_1 U_{in}}{U_R} \quad (5)$$

Antrosios fazės taktų skaičius N_1 yra lygus 1000. Pasirinkus $U_R=1$ V,

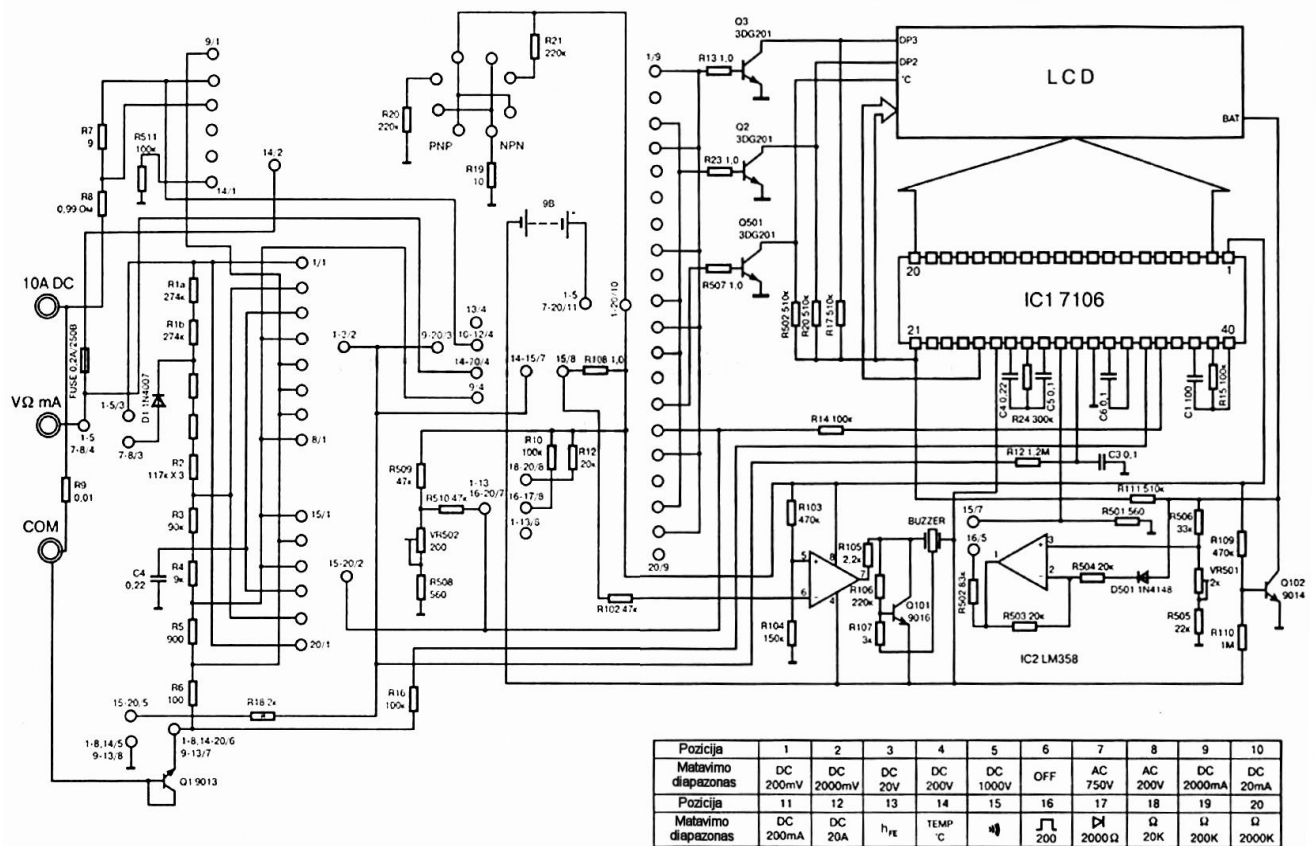
$$N = U_{in} \cdot 1000.$$

Taigi, keitimo rezultatas bus lygus įėjimo įtampai milivoltais.



6.6 pav. Struktūrinė keitiklio KP572ΠB5 analoginės dalies schema (www.intersil.com)

Keitikliai KP572IIB5 (arba ICL7106) plačiai naudojami, kur reikia tikslių, bet kartu ekonomiškų keitiklių, kada nereikalingas didelis keitimo greitis. Charakteringas pavyzdys – autonominio maitinimo multimetrai (6.7 pav.).

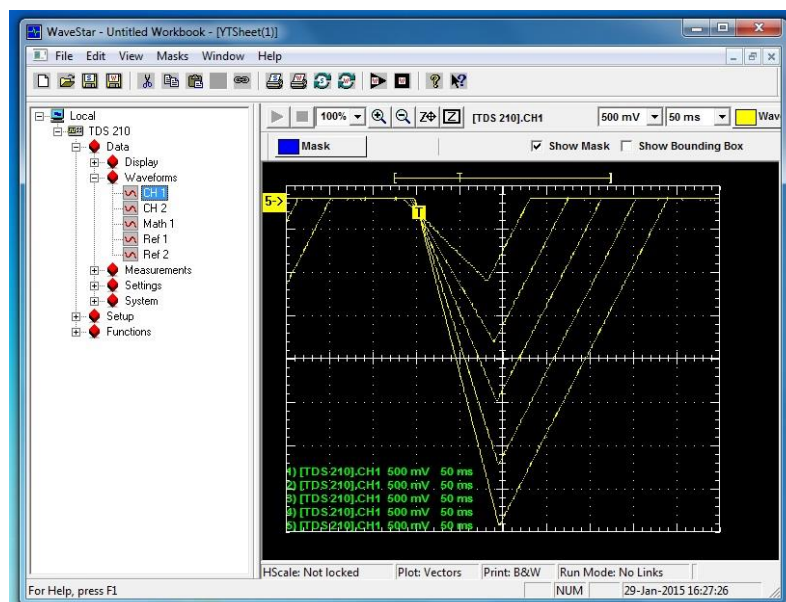


6.7 pav. Integrinio grandyno ICL7106 panaudojimo pavyzdys multimetre M838

Darbo atlikimo tvarka

Prie gnybtų S1-S2 ir S3-S4 jungiame voltmetrus. Gnybtai S2, S4, S6 prijungti prie vidinės „žemės“, prie jų jungiami voltmetrų ir oscilografo žemės gnybtai. Pirmasis voltmetras (S1-S2 gnybtai) rodys įėjimo įtampą, o antruoju voltmetru (S3-S4 gnybtai) bus registruojama pasirinktos atskaitos įtampos vertė (rekomenduojama vertė: 1 V). Tiriant analoginio skaitmeninio keitiklio transformacijos charakteristiką, tirama keitiklio parodymų priklausomybė nuo įėjimo įtampos, esant pastoviai atskaitos įtampai. Patikrinamas transformacijos charakteristikos tiesiškumas.

Kadangi tiriamo keitiklio matavimo ciklo trukmė yra apie 1 s, keitiklio matavimo ciklo tyrimui naudojamas atmintinis oscilografas. Oscilografas jungiamas prie išėjimo gnybtų S7-S6. Ekrane stebima integruojančio kondensatoriaus įtampos priklausomybė nuo laiko (6.5 pav. pavidalo). Tyrimo rezultatai registruojami kompiuteriu, prijungtu prie oscilografo. Naudojant TDS 210 oscilografą signalai paaimami programa „WaveStar for Oscilloscopes“. Šios programos lango pavyzdys parodytas 6.8 pav.



6.8 pav. Programos „WaveStar“ langas su YT dokumentu ir signalais

Paleidus programą, sukuriamas „YT Sheet“ tipo naujas dokumentas. Norint įkelti skaitmeninius duomenis iš oscilografo pirmojo kanalo CH1, kairėje lango pusėje pavaizduotas CH1 kanalo simbolis, esantis Data/Waveforms grupėje, pele įtempiamas į YTSheet sritį. Duomenys atkeliauja per tam tikrą trukmę, kuri priklauso nuo sąsajos spartos. Norint įkelti papildomus signalus, įtempimo procedūra pakartojama. Norint panaikinti signalą, kompiuterio klaviatūroje spaudžiama „Del“. Programos dokumente sukaupti duomenys eksportuojami (File>Export Datasheet>CSV>) į standartinį *.csv failą, kuris po to atvaizduojamas bei analizuojamas Origin programa.

Aprašytu būdu reikia sukaupti ir išsaugoti tris signalų šeimas, užsirašant kiekvieno signalo įėjimo ir atskaitos įtampas: 1) priklausomybė nuo įėjimo įtampas, keičiant ją nuo -2,5 V iki ~-0,3 V, esant pastoviai atskaitos įtampai (rekomenduojama 1,00 V); 2) priklausomybė nuo įėjimo įtampas, keičiant ją nuo +2,5 V iki ~+0,3 V, esant pastoviai atskaitos įtampai (rekomenduojama 1,00 V); 3) priklausomybė nuo atskaitos įtampas, keičiant ją nuo 0,4 V iki 1,5 V, esant pastoviai įėjimo įtampai (rekomenduojama apie 1 V).

Iš gautų signalų šeimų, analizuojant turimus duomenis, sudaromi šie priklausų grafikai:

- fazių trukmių T_1 ir T_2 priklausa nuo U_{in} ;
- integruojančio kondensatoriaus įtampas kitimo greičio dU/dt priklausa nuo U_{in} ;
- integruojančio kondensatoriaus įtampas kitimo greičio dU/dt priklausa nuo U_R ;

Matavimo priemonės ir prietaisai

Oscilografas TDS210 ir kompiuteris;
2 voltmetrai M9803R;
Maitinimo šaltinis (12 V).

Literatūra

- Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Ленинград, Энергоатомиздат, 1988, с. 251-263.
- Титце У., Шенк К., Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1983, с.462-464.
- Цифровые и аналоговые микросхемы: Справочник/ Под ред. Якубовского. – М. Радио и связь, 1989. с. 432-455.
- Intersil ICL7106, ICL7107, ICL7107S datasheet (www.intersil.com).

7. Integrinių grandynų laboratorinis darbas Nr. 7

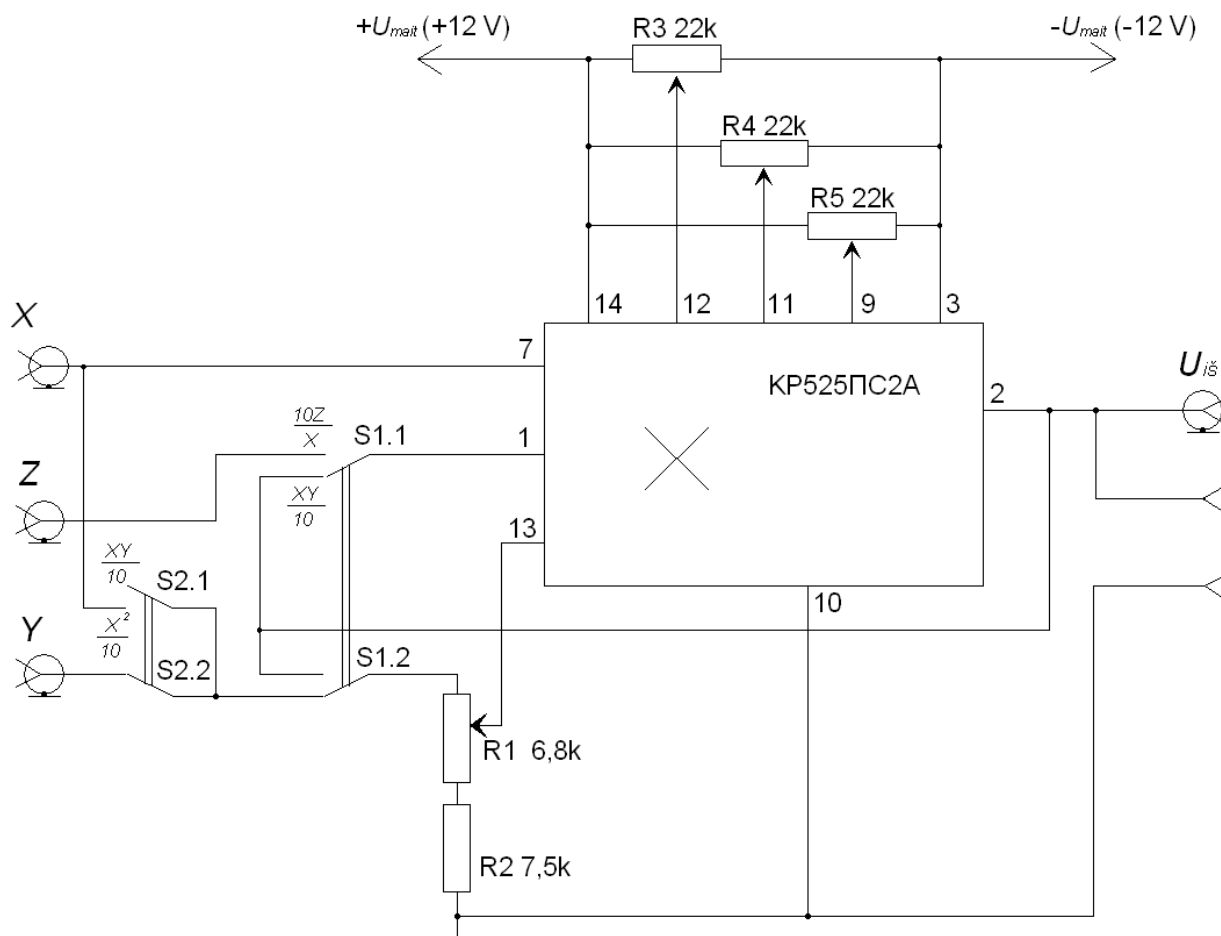
Integrinis analoginis daugintuvas

Darbo tikslas – susipažinti su analoginiu įtampos daugintuvu, išmatuoti pagrindines charakteristikas.

Užduotis:

6. Ištirti analoginį įtampos daugintuvą kėlimo kvadratu režime:
 - a) suderinti daugintuvo režimą, ištirti daugintuvo spektrinę charakteristiką ir išmatuoti perdavimo charakteristiką esant signalo dažniui apie 0,3-2 kHz. Pagal matavimo rezultatus nustatyti perdavimo funkciją;
 - b) išmatuoti daugintuvo dažninę charakteristiką;
7. Ištirti analoginį įtampos daugintuvą dviejų signalų dauginimo režime:
 - a) sudaryti balansinio moduliatoriaus režimą, spektrinėse charakteristikose ištirti šoninių dedamųjų dažnio priklausą nuo moduluojančio signalo dažnio bei nešlio dažnio, užregistruoti oscilogramą;
 - b) sudaryti sinchroninio detektavimo režimą ir išmatuoti išėjimo signalo priklausomybę nuo įėjimo signalo amplitudės, užregistruoti oscilogramą.
8. Nubraižyti grafikus. Paaikškinti gautus rezultatus.

Darbo schema



7.1 pav. Laboratorinio darbo maketo schema

Metodiniai paaiškinimai

Analoginiai daugintuvai skirti dviejų analoginių signalų (įtampų) sudauginimui ir gali būti naudojami dažnio dauginimo, fazinių ir sinchroninių detektorių, balansinių moduliatorių, automatinio reguliavimo, kėlimo laipsniu, tikrosios efektinės vertės keitiklių ir kitose schemose. Yra gaminami analoginių daugintuvų integriniai grandynai: AD633, AD834, AD835 (Analog Devices), MPY634 (Burr-Brown by Texas Instruments), K140MA1, KP525ПC1, KP525ПC2 (Rusija) ir kt.

Analoginiai daugintuvai formuoja išėjimo signalą proporcingą dviejų įėjimo signalų sandaugai. Daugybą galima realizuoti tranzistoriais ir paduodant į juos įtampas mažesnes negu φ_T (temperatūrinis potencialas). Tada yra išnaudojamas "kintamo statumo" principas. Daugintuvą galima daryti naudojant diferencinę pakopą, kai sujungtų emiterių taške yra įjungiamas įtampos valdomas tranzistorius. Daugintuvo pakopos schema pavaizduota 7.2 pav.

$$R_1 = R_2 = R_{ap}$$

Diferencinė pakopa išėjimo įtampos ($U_1 \ll \varphi_T$) mažiems signalams gali būti skaičiuojama taip:

$$U_{i\bar{s}} = S_T \times R_{ap} \times U_1,$$

čia - $S_T = \frac{I_e}{\varphi_T}$ - diferencinės pakopos statumas.

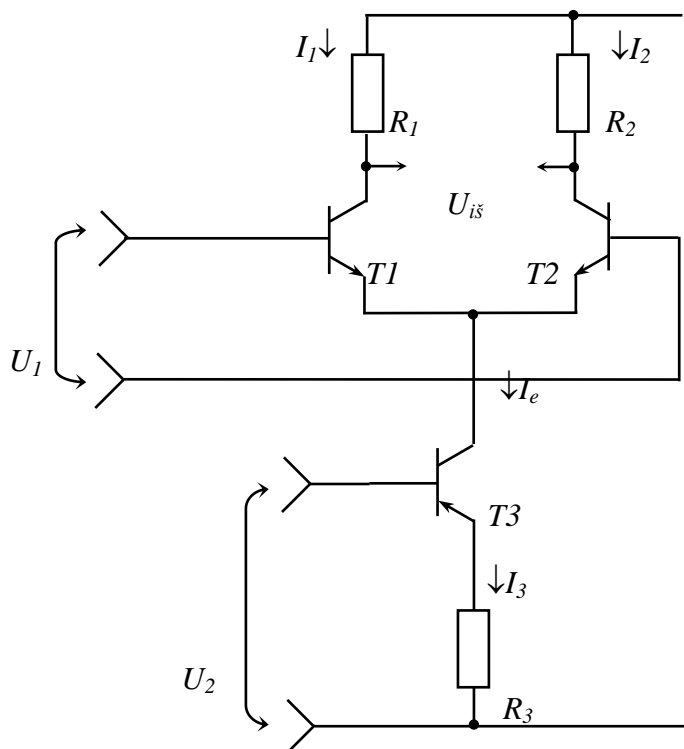
Šios pakopos statumas valdomas keičiant įtampą U_2 .

Jei $I_3 \cdot R_3 \gg U_{BET3}$, tai $U_2 \approx I_3 \cdot R_3$.

Jei $I_{b3} \approx 0$, tai $I_e \approx I_3$, tada $U_{i\bar{s}} = \frac{I_e}{\varphi_T} \times R_{ap} \times U_1 = U_1 \times U_2 \frac{R_{ap}}{\varphi_T \times R_3}$

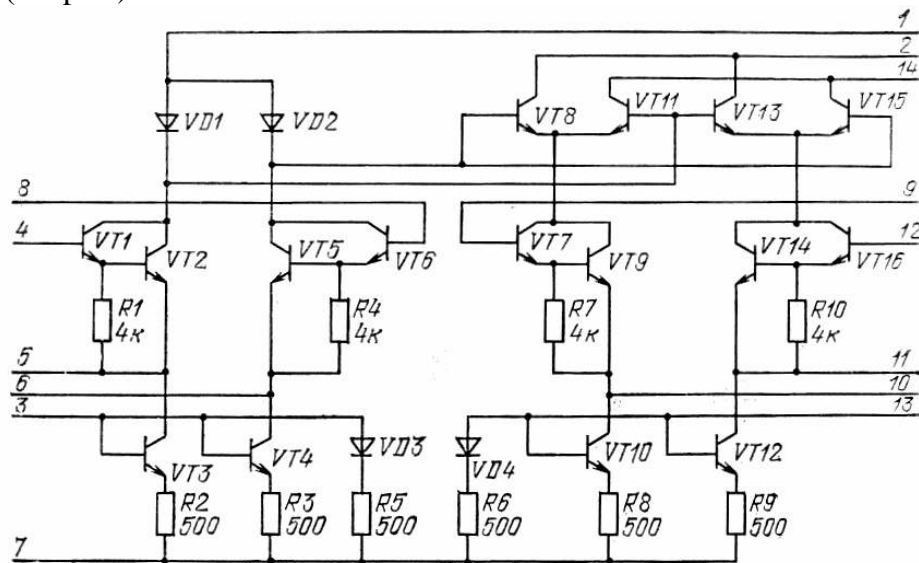
$$U_{i\bar{s}} = K \times U_1 \times U_2,$$

Čia $K = \frac{R_{ap}}{\varphi_T \times R_3}$.



7.2 pav. Analoginio daugintuvo pakopos schema

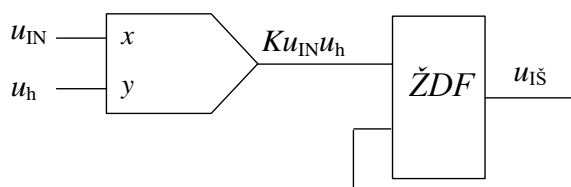
Praktikoje naudojamos sudėtingesnės schemos (grandinės) neturinčios trūkumų susietų su I_3 srovės kitimu (7.3 pav.).



7.3 pav. Analoginio daugintuvo KP525PIC1 schema

Realaus analoginio daugintuvo perdavimo charakteristika skiriasi nuo idealios dauginimo paklaida ϵ , kuri lygi skirtumui tarp faktinės ir teorinės išėjimo signalo vertės. Taip pat svarbūs parametrai yra įėjimo ir išėjimo signalų diapazonai, darbinis dažnių diapazonas, nulio postūmis ir nulio dreifas.

Įtampos daugintuvas įeina į sinchroninio detektoriaus sudėtį. Sinchroninio detektoriaus struktūrinė schema patekta 7.3 pav. Jį sudaro daugintuvas ir žemųjų dažnių filtras. Tarkime, kad į daugintuvo įėjimus paduodamas virpesys:



3 pav. Sinchroninio detektoriaus schema

$$u_{IN}(t) = U_m(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

ir pastovaus dažnio atskaitos virpesys:

$$u_h(t) = U_{mh}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

Atskaitos virpesio ir įėjimo signalo virpesio dažniai yra vienodi, t.y. abu virpesiai yra sinchroniški. Iš čia kilęs detektoriaus pavadinimas. Daugintuvo išėjime turime virpesį:

$$u_{xy}(t) = u_{AM}(t)u_h(t) = \frac{K}{2}U_{mh}U_m(t) \cos(\varphi - \varphi_0) + \frac{K}{2}U_{mh}U_m(t) \cos(2\omega_0 t + \varphi + \varphi_0),$$

kuriame susidaro žemadažnė dedamoji:

$$u_{xy1}(t) = \frac{K}{2}U_{mh}U_m(t) \cos(\varphi - \varphi_0),$$

ir kurios dydis priklauso nuo įėjimo signalo virpesio amplitudės $U_m(t)$, ir dvigubo dažnio aukštadažnė dedamoji, kuri gali būti nuslopinama žemųjų dažnių filtre. Todėl išėjimo įtampa:

$$u_{IŠ}(t) = u_{xy1}(t) = K_D U_m(t)$$

yra detektuotas signalas.

Detektoriaus perdavimo koeficientas:

$$K_D = \frac{K}{2}U_{mh} \cos(\varphi - \varphi_0),$$

priklauso nuo atskaitos virpesio amplitudės U_{mh} ir fazių skirtumo $\varphi - \varphi_0$. K_D maksimalus, kai $\varphi = \varphi_0$ ir lygus nuliui, kai $\varphi - \varphi_0 = \pm\pi / 2$.

Sinchroninis detektorius yra selektyvus virpesiams, kurių fazė skiriasi nuo atskaitos virpesio fazės φ . Kuo virpesių fazių skirtumas $\varphi - \varphi_0$ didesnis tuo labiau sinchroninis detektorius juos slopina ir esant fazių skirtumui $\pm\pi / 2$ virpesys detektoriuje visiškai nuslopinamas.

Sinchroniniu detektoriumi kokybiškai detektuojami moduluotosios amplitudės virpesiai su numalšintuoju nešliu, o taip pat vienos šoninės juostos moduluotosios amplitudės virpesiai. Pastarųjų virpesių detektuoti įprastais detektoriais neįmanoma dėl labai didelių netiesinių iškreipimų.

Sinchroninis detektorius turi dar vieną naudingą savybę – jis selektyvus virpesių dažniui. Tarkime, kad kartu su įėjimo signalu $u_{IN}(t)$ į detektorių patenka trukdys:

$$u_{TR}(t) = U_{mTR}(t) \cos(\omega_0 + \Delta\omega)t.$$

Tada daugintuvo įėjimo signalu $u_{xy}(t)$ prisidės dar dvi tokio pavidalo dedamosios:

$$\frac{K}{2} U_{mh} U_{mTR}(t) \cos(\Delta\omega + \varphi) + \frac{K}{2} U_{mh} U_{mTR}(t) \cos[(2\omega_0 + \Delta\omega)t + \varphi].$$

Jeigu $\Delta\omega$ yra didesnis už žemųjų dažnių filtro praleidžiamųjų dažnių juostos plotį, tai abi šio trukdžio dedamosios nuslopinamos filtre ir į detektorius išėjimą nepatenka. Sinchroninio detektoriaus selektyvumas virpesių dažniui atsiranda dėl virpesių dažnio pakeitimo dauginuve, po kurio naujo dažnio dedamosios nuslopinamos žemųjų dažnių filtre.

Dažnai naudojama modifikuota amplitudės moduliacijos rūšis, kurioje nešlys nuslopinamas ir paliekamos tik šoninės spektro dedamosios. Tam gali būti naudojami specialūs modulatoriai vadinami balansiniais. Balansinis modulatorius turi sudauginti nešlį $u_{IN}(t)$ ir moduluojantį virpesį $u_s(t)$. Tai įvykdoma paprastame signalų dauginuve.

Tegu moduluotosios amplitudės įėjimo u_s ir nešlio u_{IN} signalai yra:

$$u_s(t) = U_{ms}(t) \cos(\omega_s t + \varphi_s),$$

$$u_{IN}(t) = U_{mIN}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

Sudauginus šiuos signalus gausime signalą susidedantį iš dvejų šoninių dedamųjų:

$$\begin{aligned} u_{xy} &= K u_{IN}(t) u_s(t) = \\ &= \frac{K}{2} U_{mIN}(t) U_{ms} \cos[(\omega_0 - \omega_s)t + \varphi_0 - \varphi_s] + \frac{K}{2} U_{mIN}(t) U_{ms} \cos[(\omega_0 + \omega_s)t + \varphi_0 + \varphi_s] \end{aligned}$$

Taigi, signalų dauginuvas yra idealus balansinis amplitudės modulatorius.

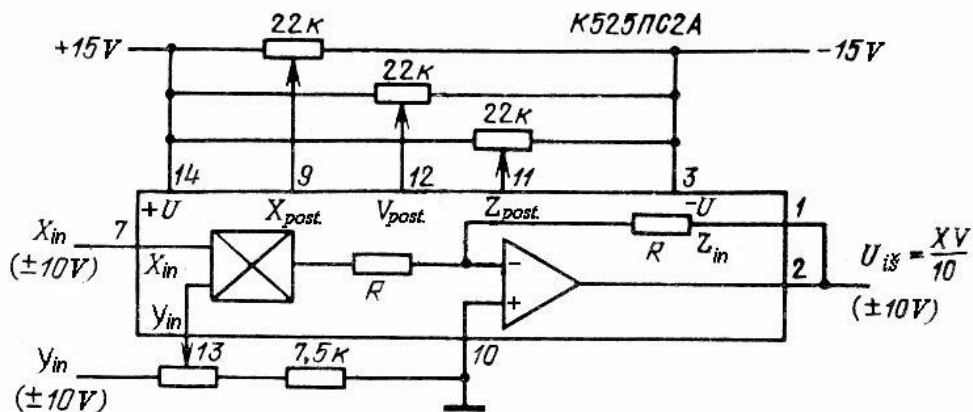
Maketo veikimo paaiškinimai

Makete naudojamas KP525ПC2A tipo integrinis analoginis įtampos dauginuvas su integruotu operaciniu stiprintuvu išėjime (7.4 pav.).

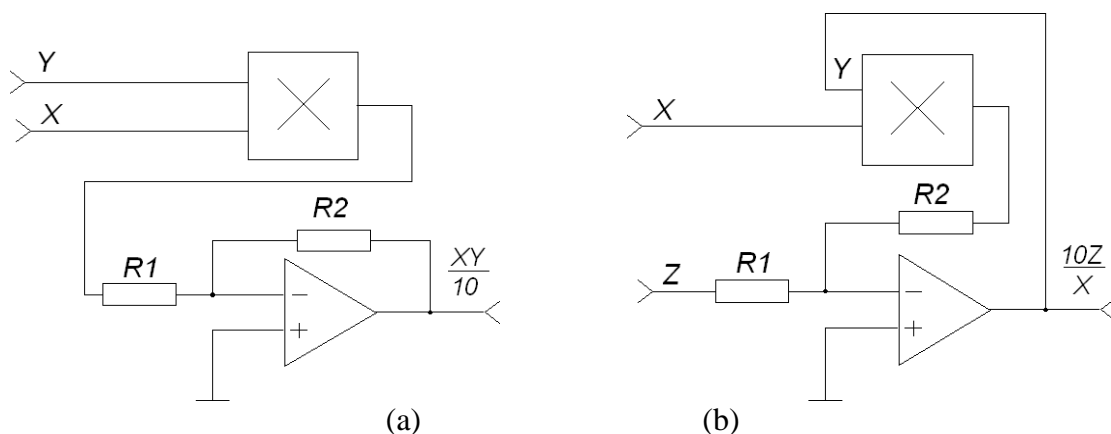
Dėka integruoto operacinio stiprintuvo įtampos dauginuvą galima priversti dirbti tiek įtampos dauginimo, tiek ir įtampos dalijimo režime: jungikliu S1 (7.1 pav.) maketo schemą galima perjungti iš dviejų signalų dauginimo ($\frac{x \cdot y}{10}$) į dviejų signalų dalijimo ($\frac{10 \cdot z}{x}$, $-10 \leq z < 0$) režimą. Dauginimo ir dalijimo režimus paaiškina supaprastintos schemos, pateiktos 7.5 pav. Potenciometru R1 koreguojamas schemas perdavimo koeficientas, kad atitiktų perdavimo koeficientą lygų $\frac{x \cdot y}{10}$,

$\frac{x^2}{10}$ arba $\frac{10 \cdot z}{x}$. Potenciometru R4 nustatomas nulis išėjime (dauginimo režime). Potenciometrais

R2 bei R4 koreguojamas stiprinimas didelių neigiamų bei teigiamų signalų srityse (t.y. pasiekiamas simetriškas stiprinimas).



7.4 pav. Integrinio grandyno KP525ΠC2A vidinė struktūra



7.5 pav. Įtampos dauginimo (a) ir dalijimo (b) struktūrinės schemas

Darbo atlikimo tvarka

Pirmoji darbo užduotis atliekama jungikliu S2 maketo schemą perjungus į įtampos kėlimo kvadratu režimą. T.y. jungikliu atjungiamas maketo y įėjimas, o x įėjimo signalas paduodamas į 7 ir 13 integrinio grandymo įėjimus. Padavus į x įėjimą sinusinį 3-7 V $f = 0,3-2$ kHz dažnio signalą (iš G6-27 ar pan.) daugintuvo režimas potenciometrais R3 ir R5 derinamas stebint su spektro analizatoriumi spektrinę charakteristiką: reikia taip suderinti, kad išnyktų dažnio f dedamoji, o $2f$ dažnio dedamoji būtų maksimali. Potenciometru R4 nustatoma teisinga nulio padėtis, oscilografu išmatuojama perdavimo charakteristika, t.y. išėjimo signalo amplitudės priklausa nuo įėjimo signalo amplitudės. Sudarius perdavimo charakteristikos grafiką, reikia iširti perdavimo charakteristikos pobūdį, nustatyti, kiek nukrypsta gauta charakteristika nuo parabolės.

Daugintuvo dažninė charakteristika tiriama didinant generatoriaus dažnį nuo ~ 100 Hz. Toje srityje, kur išėjimo įtampa išlieka pastovus dažnį reikia keisti dekadomis, o jam pradėjus mažėti – oktavomis ir ieškant dažnio, kada išėjimo signalas sumažės 3 dB.

Antroji darbo užduotis daroma dviejų signalų dauginimo režime.

Balansinio modulatoriaus režimas realizuojamas naudojantis dviem virpesių generatoriais, duodančiais skirtingų dažnių 2-4 V signalus. Nešlio dažnis ω_0 parenkamas apie 10-50

kartų didesnis už moduluojančio signalo dažnį ω_s . „Nešlį“ rekomenduojame paduoti į y įėjimą, o „signalą“ į x įėjimą, o oscilografą sinchronizuoti nuo „signalų“. Stebint spektrinę charakteristiką spektro analizatoriumi, potenciometrais R3 ir R5 daugintuvo schema suderinama, kad išėjimo signalo spektre praktiškai išnyktų ω_s dedamoji bei nešlys ω_0 , o būtų stebimos šoninės dedamosios ($\omega_0 - \omega_s$) ir ($\omega_0 + \omega_s$). Jei stebimas didelis kiekis aukštesnių dažnių harmonikų, sumažinamos įėjimo signalų amplitudės. Šioje darbo dalyje reikia išmatuoti šoninių dedamųjų dažnių priklausą nuo ω_0 ir ω_s . Taip pat reikia užregistruoti įėjimo ir išėjimo signalų oscilogramas atmintiniu oscilografu ir kompiuterio programa „WaveStar for Oscilloscopes“, kaip aprašyta 6 darbo aprašyme.

Sinchroninio detektavimo režimo realizavimui patogiausia pasinaudoti virpesių generatoriumi, turinčiu kelis signalų išėjimus – sinusinį ir meandrinį (pvz., G6-26). Sinusinį signalą paduodame į daugintuvo x įėjimą, o meandrinį – į daugintuvo y įėjimą. Daugintuvo suregulavimui iš pradžių, įjungę įtampos kėlimo kvadratu režimą, išgauname kokybišką sinusinio signalo kėlimą kvadratu, t.y. suderiname nulinį lygį bei vienodą teigiamų ir neigiamų pusperiodžių stiprinimą. Perjungus jungikliu S2 maketą į dauginimo režimą gaunamas sinchroninis x įėjime esančio signalo detektavimas. Kadangi makete nėra žemo dažnio filtro, reikia išmatuoti detektuoto signalo amplitudės priklausomybę nuo signalo x įėjime amplitudės. Taip pat reikia užregistruoti įėjimo ir išėjimo signalų oscilogramas atmintiniu oscilografu, kaip aprašyta 6 darbo aprašyme.

Matavimo priemonės ir prietaisai

Oscilografas TDS210 ir kompiuteris;
Spektro analizatorius (kompiuterinis);
Generatoriai G3-112 ir G6-26;
Maitinimo šaltinis (± 12 V).

Literatūra

1. R. Kirvaitis, R. Martavičius. Analoginė elektronika. – V.: Technika, 2003.
2. Č. Pavasaris. Puslaidininkiniai įtaisai. II dalis, Mokymo priemonė. – V.:2009.

8. Integrinių grandynų laboratorinis darbas Nr.8

Puslaidininkinės technologijos integrinio grandyno topologijos tyrimas

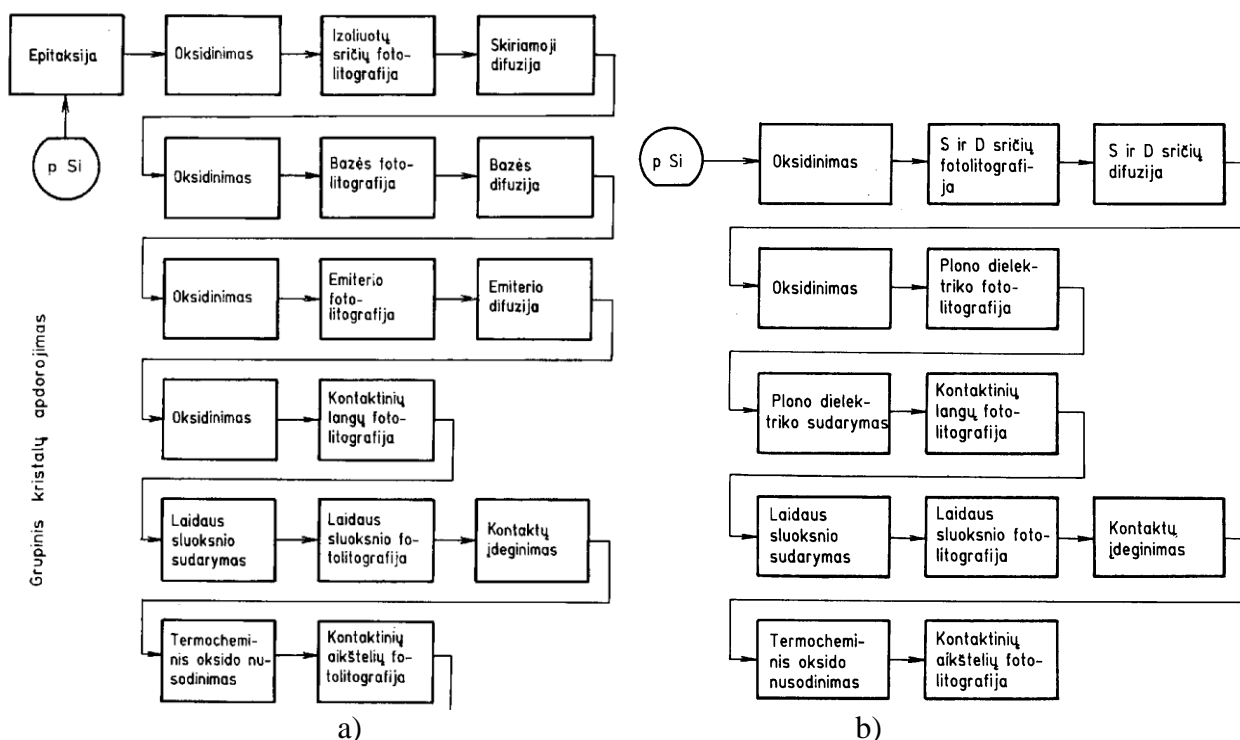
Darbo tikslas – išnagrinėti puslaidininkinės technologijos integrinio grandyno topologiją, susipažinti su grandyno elementų topologinio formavimo principais.

Užduotys:

1. Susipažinti su pateikto integrinio grandyno tipu bei paskirtimi, išnagrinėti grandyno principinę elektrinę schemą.
2. Stebint mikroskopu identifikuoti kokius integrinio grandyno korpuso išvadus atitinka grandyno Si kristalo kontaktinės aikštelės. Išmatuoti Si kristalo matmenis.
3. Padaryti pakankamo ryškumo Si kristalo paviršiaus nuotrauką.
4. Naudojantis gautu vaizdu identifikuoti integrinio grandyno elementus: dvipolius bei lauko tranzistorius, diodus, rezistorius, kondensatorius.
5. Išnagrinėti, kaip integrinio grandyno elementai metalizacijos takeliais tarpusavyje sujungti. Nustatyti principinės elektrinės schemos elementų atitikmenis topologinėje schemoje. Padaryti brėžinį.
6. Nustatyti kelių pasirinktų elementų matmenis. Apskaičiuoti interginio grandyno rezistorių varžų dydžius ir kondensatorių talpas (jei jų yra grandyne).
7. Apskaičiuoti integrinio grandyno integracijos laipsnį.

Metodiniai nurodymai

Puslaidininkinės technologijos integrinis grandynas – tai grandynas, kuris suformuojamas Si kristale, naudojantis priemaišų difuzijos bei jonų implantacijos operacijomis. Grandyno topologija priklauso nuo pasirinktos gamybos technologijos. Palyginsime dvi plačiai paplitusias technologijas (8.1 pav.).

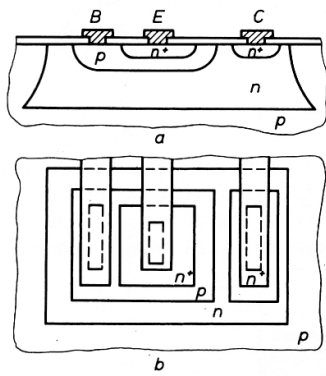


8.1 pav. Grupinio kristalų apdorojimo operacijos dvipolių tranzistorių (a) bei MDP (b) tranzistorių integrinių grandynų gamyboje

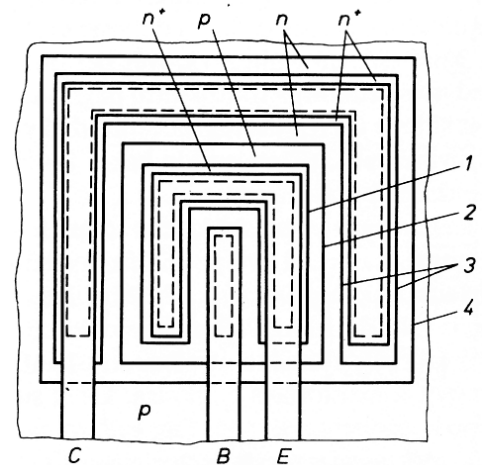
Kaip matome operacijų skaičius bei pobūdis skiriasi. Todėl viename integrujame grandyne siekiama naudoti tik vienodo tipo aktyviusius elementus (arba dvipolius, arba MDP), o pasyviuosius elementus pagaminti to paties gamybos ciklo metu.

Norint atpažinti interinio grandyno elementus jo topologinėje schemoje, reikia susipažinti su atskirų elementų topologinėmis schemomis. Pateikime labiausiai paplitusias elementų topologijos schemas.

Tranzistoriai. Dvipoliai tranzistoriai, ko paprastai reikalauja principinė elektrinė schema, turi

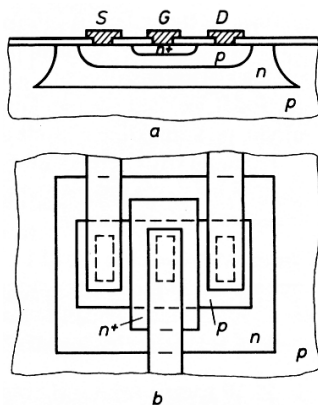


būti izoliuoti nuo kitų grandyno elementų izoliuojančioje salelėje (8.2-8.3 pav.). Salelė paprastai sudaroma izoliuojančios (skiriamosios) difuzijos operacija. Jei reikalingas didesnės galios tranzistorius, jo emiteris daromas didesnio ploto ir išriečiamas, kaip parodyta 8.3 pav.



8.2 pav. Izoliuotas n^+pn tipo dvipolis tranzistorius.

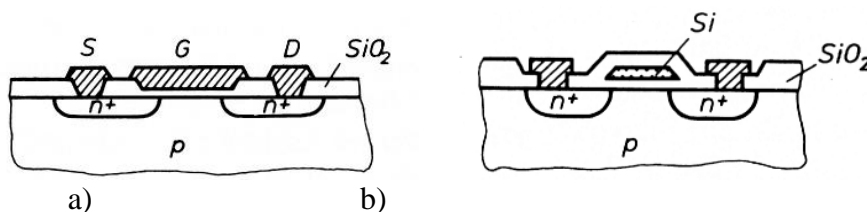
8.3 pav. Izoliuotas n^+pn tipo dvipolis didesnės galios tranzistorius. 1 – emiterio sritis (n^+), 2 – bazės sritis (p), 3 – kolektoriaus kontakto sritis (n^+), 4 – kolektoriaus sritis (n)



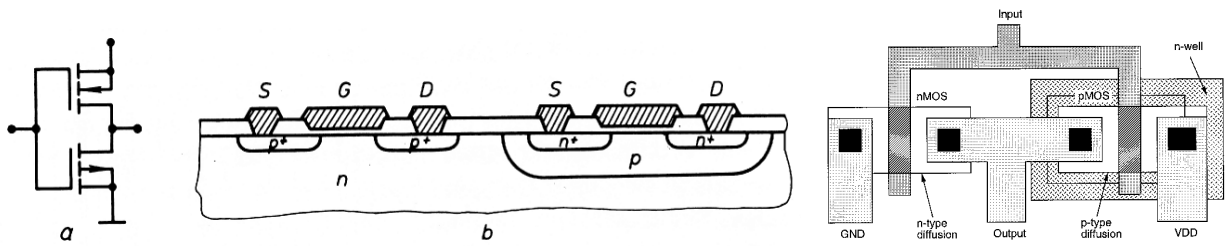
Pavaizduoto 8.1a pav. technologinio proceso metu gali būti sudaromi ir lauko tranzistoriai su valdančiąja pn sandūra (8.4 pav.).

8.4 pav. Lauko tranzistorius su valdančia sandūra.

MDP tranzistoriams papildomas izoliavimas nebūtinai, nes jie savaime izoliuojasi savo konstrukcijos dėka (8.5 pav.). Piešingo laidumo tipo salelės kristale reikalingos tuo atveju, jei naudojami komplementiniai MDP tranzistoriai (8.6 pav.).



8.5 pav. MDP tranzistorius. (a) - standartinės technologijos, (b) – su polikristalinio Si užtūra

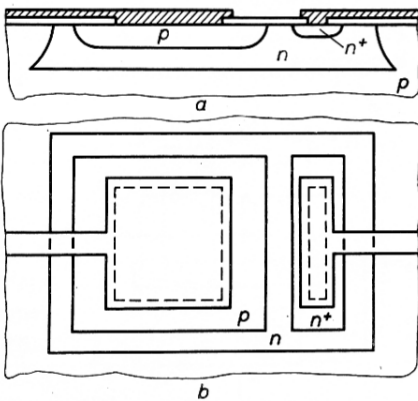


8.6 pav. Komplementinių MDP tranzistorių jungimo schema, pjūvis ir planas

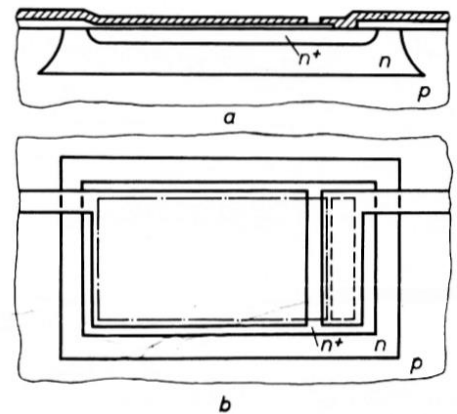
Kondensatoriai. Kondensatoriai gali būti difuziniai arba MDP struktūros. Difuziniams kondensatoriams panaudojama emiterio arba kolektoriaus sandūros barjerinė talpa. 8.7 pav. atvaizduota difuzinio kondensatoriaus, kuriame naudojamos kolektoriaus sandūra, struktūra. Tokių kondensatorių lyginamoji talpa būna apie $150\text{--}300\text{ pF/mm}^2$, pramušimo įtampa - $30\text{--}70\text{ V}$. Kai naudojamos emiterio sandūros talpa, kondensatoriaus lyginamoji talpa būna didesnė ($600\text{--}1000\text{ pF/mm}^2$), o pramušimo įtampa žemesnė ($5\text{--}8\text{ V}$).

MDP kondensatoriaus struktūra atvaizduota 8.8 pav. Tai paprastas plokščiasis kondensatorius, kuriame vieno laidaus elektrodo vaidmenį atlieka n^+ tipo emiterio sritis, kito - aliuminio sluoksnis. Kaip dielektrikas naudojamas plonas ($50\text{--}100\text{ nm}$ storio) silicio dioksido sluoksnis. Plono dielektriko kontūras vaizde iš viršaus (8.8 pav., b) parodytas brūkšnine - taškine linija. Tokių MDP kondensatorių lyginamoji talpa būna $400\text{--}600\text{ pF/mm}^2$, maksimali talpa - apie 500 pF , pramušimo įtampa - $30\text{--}50\text{ V}$, kokybė - $25\text{--}80$.

Jei vietoj silicio dioksido naudojamas silicio nitrido dielektrinis sluoksnis, lyginamoji talpa siekia $800\text{--}1600\text{ pF/mm}^2$, talpa gali viršyti 1000 pF , kokybė esti nuo 20 iki 100.



8.7 pav. Difuzinis kondensatorius (naudojama barjerinė talpa).



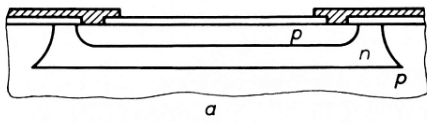
8.8 pav. MDP tipo kondensatorius.

Rezistoriai. Rezistoriams gali būti naudojamos bazės (8.9 pav.) arba emiterio sritys. Jei reikalingi didelės varžos rezistoriai, gaminami suspausti arba pinčrezistoriai (angl. pinch - spausti), kurių bazės sritis suploninama emiterine sritimi (8.10 pav.).

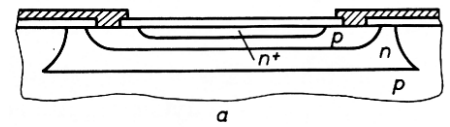
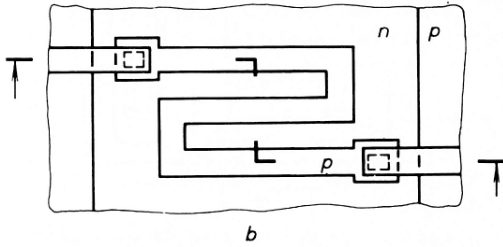
Rezistorių varža apskaičiuojama pagal formulę $R = \rho_s l / d$, kurioje $\rho_s = \rho / h$ - savitoji difuzinio sluoksnio kvadrato varža (žymima Ω/\square - omas kvadratui), l - ilgis, d - plotis. Sluoksnio storis h praktiškai lygus difuzinio sluoksnio gyliui. h lemia naudojama tranzistorių technologija, todėl norint gauti reikiamos varžos rezistorių reikia parinkti l/d .

Bazės sluoksnio kvadrato varža yra $\rho_s = 100\text{--}300\ \Omega/\square$. Naudojantis bazės difuziniu sluoksniu, galima sudaryti rezistorius, kurių varža nuo $30\ \Omega$ iki $40\text{ k}\Omega$, o $\text{TVK} \approx 0,1\text{--}0,3\ \%/\text{K}$. Mažos $3\text{--}100\ \Omega$ varžos rezistoriams naudojamas n^+ tipo difuzinis emiterio sluoksnis ($\rho_s = 2\text{--}5\ \Omega/\square$, $\text{TVK} \approx 0,01\ \%/\text{K}$). Didelės varžos rezistoriams naudojamas bazės sluoksnis, esantis po emiterio sluoksniu (8.10 pav.).

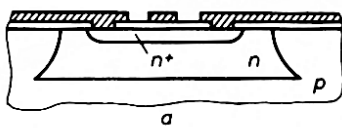
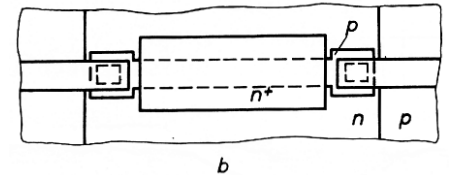
Tokių suspaustų rezistorių varža siekia dešimtis kiloomų (jų $\rho_s=10-30 \text{ k}\Omega/\square$). Didelę varžą pavyksta gauti todėl, kad bazės sluoksnis po emiterio sluoksniu būna plonas ir priemaišų koncentracija jame maža.



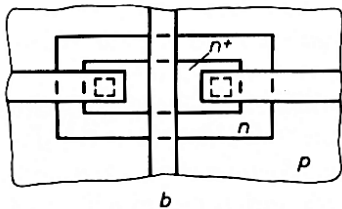
8.9 pav. Difuzinis rezistorius, kuriam sudaryti naudojama bazės sritis.



8.10 pav. Difuzinis suspaustas rezistorius.

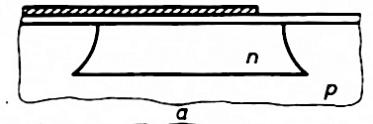


Tunelinė jungė skirta izoliuotam dviejų metalizacijos takelių kirtimuisi (8.11 pav.). Jai panaudojamas didelio laidumo emiterio sluoksnis.

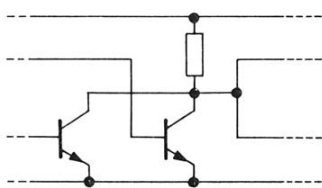
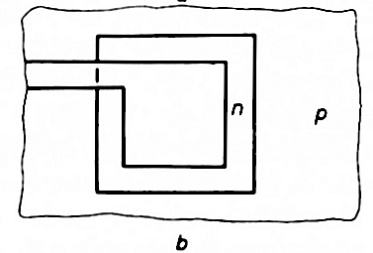


8.11 pav. Tunelinė jungė

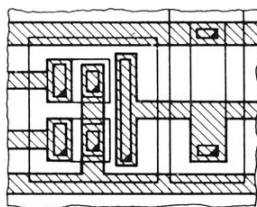
Kontaktinė aikštelė, skirta kristalo sujungimui su korpuso išvadais. Prie šių aikštelių privirinami laidai sujungiantys integrinį grandyną su korpuso išvadais.



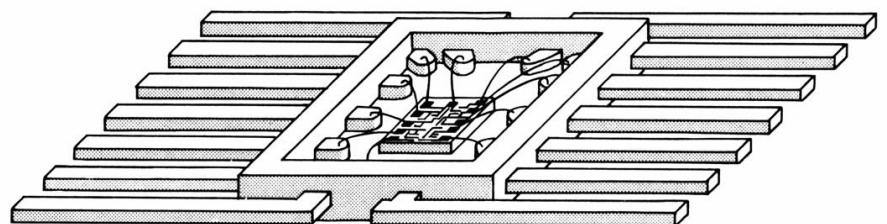
8.12 pav. Kontaktinė aikštelė



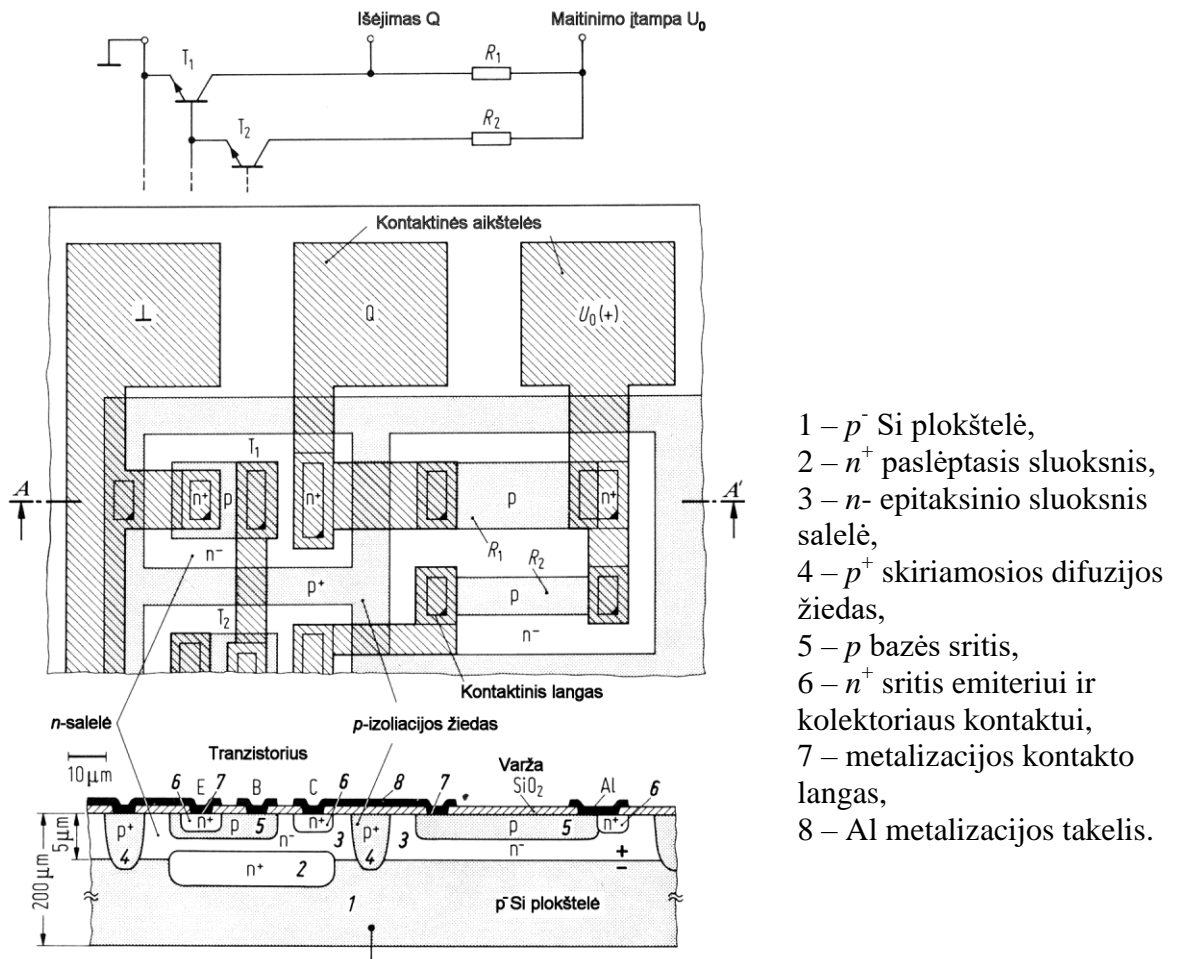
Pateiksime nedidelių principinės schemos fragmentų topologinio realizavimo pavyzdžius.



8.13 pav. Dviejų tranzistorių, kolektoriais sujungtų su rezistoriumi, topologinis realizavimas



8.14 pav. Integrinio grandyno kristalo įtvirtinimo korpuse pavyzdys (be dangtelio)



8.15 pav. Integrinio grandyno fragmento pavyzdys

Integracijos laipsnis – elementų arba komponentų kiekis, charakterizuojantis IG elementų integracijos laipsnį. Kiekybiškai integracijos laipsnis charakterizuojamas K_k , kuris surandamas pagal formulę

$$K_k = \lg N_k,$$

čia N_k – elementų arba komponentų kiekis. Dydis K_k nusako IG technologinį sudėtingumą.

Funkcinis integracijos laipsnis – loginių elementų kiekis skaitmeniniuose IG, nusakantis funkcinės integracijos laipsnį ir charakterizuojamas dydžiu K_f , kuris surandamas pagal formulę

$$K_f = \lg N_{f.el.}$$

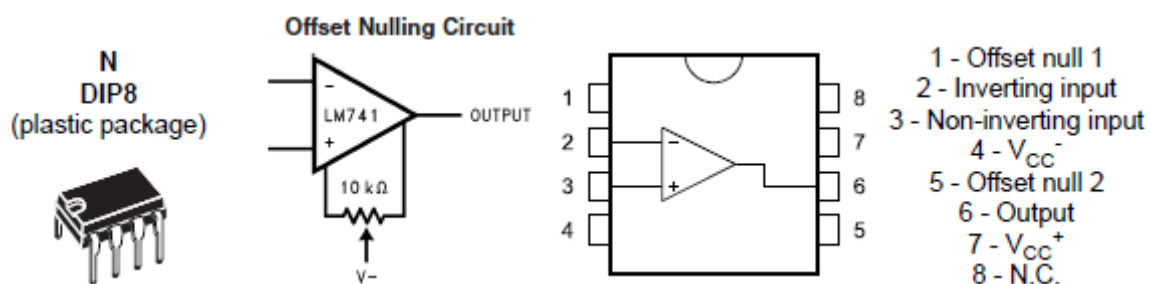
čia $N_{f.el.}$ – loginių elementų kiekis. Pagal funkcinės integracijos dydį, skaitmeniniai IG yra skirstomi į *mažus* IG ($K_f \leq 1$), *vidutinius* IG ($K_f \leq 2$), *didelius* IG ($K_f \leq 3$) ir *labai didelius* IG ($K_f > 3$). Analogiškai yra skirstomi analoginiai IG, bet charakterizuojamos pagal dydį K_k , kuris įvertina tik elementų kiekį. Analoginiai IG turi daug mažiau elementų negu skaitmeniniai IG.

Priemonės: optinis mikroskopas, CCD kamera (skaitmeninis fotoaparatas), kompiuteris.

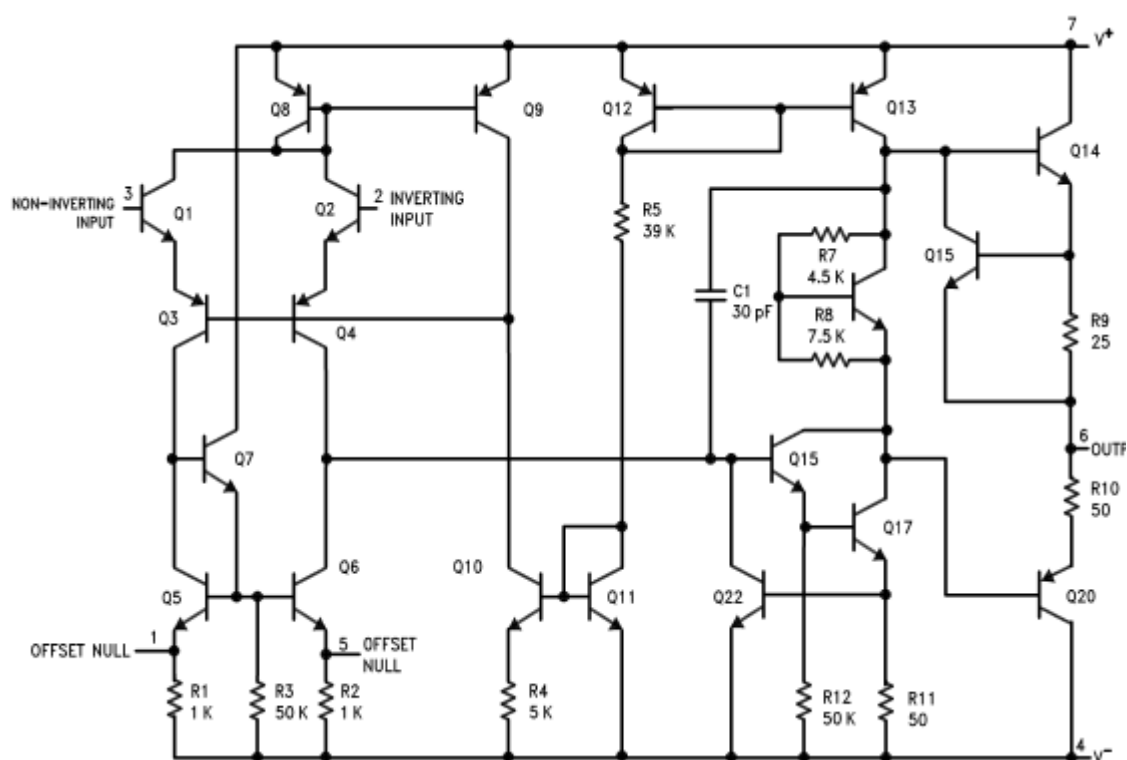
Literatūra:

1. Интегральные микросхемы: Справочник/Под ред. Б.В.Тарабрина. – М.: Радио и связь, 1984.
2. R. Kirvaitis. Loginės schemas. – V.: Enciklopedija, 1999. p. 65-72.
3. S. Štaras, R. Kirvaitis. Mikroelektronikos pagrindai. – V.: Mokslo ir enciklopedijų leidykla, 1995.

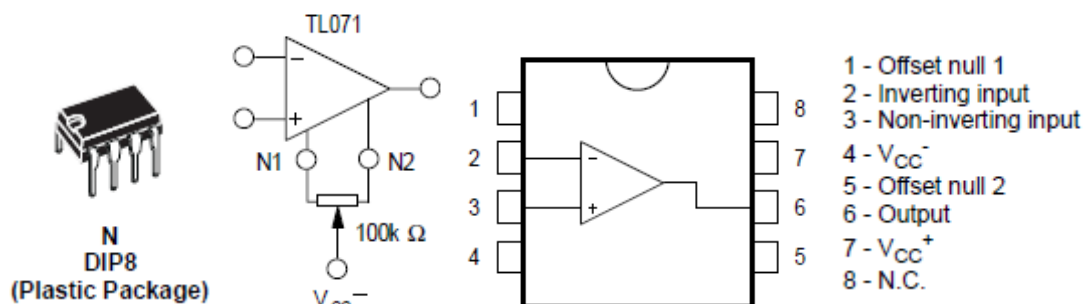
Priedai



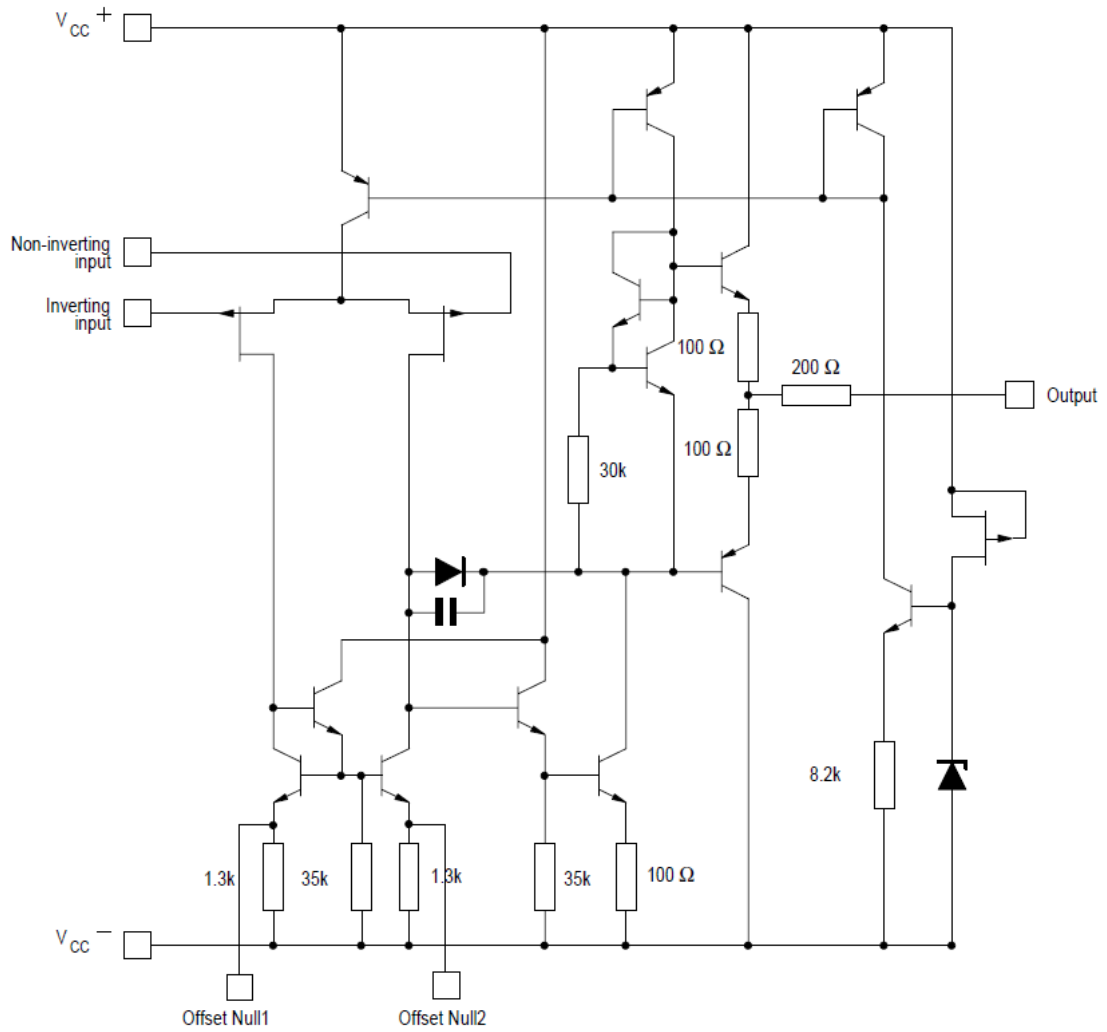
P.1 pav. Integrinio grandyno uA741 (LM741) DIP8 tipo korpuso ir jungimo schemas (<http://www.national.com>, <http://www.st.com>)



P.2 pav. Integrinio grandyno uA741 elektrinė schema, pateikiama National (<http://www.national.com>)



P.3 pav. Integrinio grandyno TL071 DIP8 tipo korpuso ir jungimo schemas (<http://www.st.com>)



P.4 pav. Integrinio grandyno TL071 elektrinė schema (<http://www.st.com>)

Turinys

Paaiškinimai	2
Operacinio stiprintuvo parametrai.....	3
Operacinis stiprintuvas su tiesiniais ir netiesiniais komponentais	10
Operacinis stiprintuvas su reaktyviaisiais komponentais.....	16
Aktyvusis žemo dažnio filtras	20
Integriniai įtampos stabilizatoriai.....	25
Analoginis skaitmeninis keitiklis	30
Integrinis analoginis daugintuvas.....	36
Puslaidininkinės technologijos integrinio grandyno topologijos tyrimas	42
Priedai.....	47
Turinys	49