KO‘P KASKADLI KUCHAYTIRGICHLAR VA ULARNING QO‘LLANILISHI

Jumabaeva Sevinch Ko‘pjursin qizi
Farg‘ona davlat texnika universiteti
sevinchjumabaeva25@gmail.com

Ergashev Shaxboz
Farg‘ona davlat texnika universiteti

Annotatsiya. Ushbu maqolada ko‘p kaskadli kuchaytirgichlarning nazariy asoslari, matematik modeli, chastota tavsifi va amaliy qo‘llanilish yo‘nalishlari ilmiy jihatdan tahlil qilinadi. Ko‘p kaskadli kuchaytirgichlar bir nechta kuchaytirish bosqichlarining ketma-ket ulanishi orqali kirishdagi kichik amplitudali signalni talab etilgan kuchlanish, tok yoki quvvat darajasiga yetkazuvchi analog elektron qurilmalar hisoblanadi. Maqolada kuchaytirish koeffitsienti, detsibelli ifodalash, kirish va chiqish qarshiliklari, past va yuqori chegaraviy chastotalar, o‘tkazish polosasi, shovqin koeffitsienti hamda teskari aloqa kabi asosiy tushunchalar yoritilgan. Shuningdek, RC-ulanishli, transformatorli, bevosita ulanishli va integral sxema asosidagi ko‘p kaskadli kuchaytirgichlarning afzalliklari hamda cheklovlari jadval va grafiklar asosida solishtirilgan. Tahlil natijalariga ko‘ra, ko‘p kaskadli kuchaytirgichlarni loyihalashda har bir kaskadning funksional vazifasini aniq belgilash, impedans moslashuvini ta’minlash, chastota diapazonini hisobga olish va barqarorlik shartlarini bajarish asosiy talab hisoblanadi.

Kalit so‘zlar: ko‘p kaskadli kuchaytirgich, tranzistor, operatsion kuchaytirgich, kuchaytirish koeffitsienti, chastota tavsifi, o‘tkazish polosasi, impedans moslashuvi, shovqin, teskari aloqa, analog elektronika.

Kirish

Elektronika va telekommunikatsiya tizimlarida signal ko‘pincha juda kichik amplitudada shakllanadi. Mikrofon, antenna, fotoelement, tenzodatchik, harorat

datchigi yoki bioelektrik elektroddan olinadigan signal bevosita qayta ishlash, raqamlashtirish yoki yuklamaga uzatish uchun yetarli bo‘lmaydi. Shu sababli analog elektronikaning eng muhim funksional tugunlaridan biri kuchaytirgich hisoblanadi. Kuchaytirgichning vazifasi signalning informatsion mazmunini saqlagan holda uning kuchlanish, tok yoki quvvat darajasini oshirishdan iborat.

Bitta kaskadli kuchaytirgich ayrim sodda qurilmalar uchun yetarli bo‘lishi mumkin. Biroq yuqori sezgirlik, keng chastota diapazoni, past shovqin va yetarli chiqish quvvati talab qilingan tizimlarda bir nechta kuchaytirish bosqichlari ketma-ket ulanadi. Bunday elektron qurilma ko‘p kaskadli kuchaytirgich deb ataladi. Sedra va Smith tomonidan ishlab chiqilgan mikroelektronika darsligida signallar, kuchaytirgichlar, detsibelli ifodalash, kaskadli kuchaytirgichlar va chastota javobi alohida bo‘limlar sifatida berilishi ushbu mavzuning fundamental ahamiyatini ko‘rsatadi [1].

Ko‘p kaskadli kuchaytirgichning ilmiy-amaliy mohiyati shundan iboratki, umumiy kuchaytirish bir kaskadga haddan tashqari yuklanmasdan bir nechta bosqichga taqsimlanadi. Natijada sxemaning chiziqliligi, barqarorligi, yuklama bilan moslashuvi va chastota xususiyatlarini boshqarish imkoniyati ortadi. Zamonaviy operatsion kuchaytirgichlar, radiochastota kuchaytirgichlari, audio qurilmalar, tibbiy diagnostika apparatlari va sanoat avtomatikasi tizimlari aynan shu prinsipga tayanadi.

Tadqiqotning maqsadi va vazifalari

Maqolaning maqsadi ko‘p kaskadli kuchaytirgichlarning tuzilishi va ishlash prinsipini nazariy, matematik hamda amaliy jihatdan tahlil qilishdan iborat. Ushbu maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar belgilandi: kuchaytirish koeffitsientining matematik ifodasini tahlil qilish; kaskadlararo ulanish turlarini solishtirish; chastota tavsifi va o‘tkazish polosasi tushunchalarini izohlash; shovqin, impedans moslashuvi va barqarorlik omillarini yoritish; ko‘p kaskadli kuchaytirgichlarning qo‘llanilish sohalarini ilmiy asoslash.

Nazariy asoslar va terminologik apparat

Kuchaytirgichlar kirish signaliga nisbatan chiqish signalining amplitudasini oshiruvchi faol elektron qurilmalardir. Ular tranzistorlar, maydon tranzistorlari,

operatsion kuchaytirgichlar yoki integral mikrosxemalar asosida quriladi. Kuchaytirgichning asosiy parametrlari kuchlanish bo‘yicha kuchaytirish koeffitsienti, tok bo‘yicha kuchaytirish koeffitsienti, quvvat bo‘yicha kuchaytirish koeffitsienti, kirish qarshiligi, chiqish qarshiligi, chastota diapazoni, o‘tkazish polosasi va signal buzilish darajasidan iborat.

Ko‘p kaskadli kuchaytirgichda har bir kaskad mustaqil kuchaytirish bosqichi sifatida ishlaydi. Birinchi kaskad odatda kirish signalini qabul qiladi va shovqinni minimal darajada saqlagan holda dastlabki kuchaytirishni bajaradi. Oraliq kaskadlar asosiy kuchlanish kuchaytirishini ta’minlaydi. Chiqish kaskadi esa yuklama bilan moslashish, zarur tok va quvvatni yetkazib berish vazifasini bajaradi. Razaviyning mikroelektronika bo‘yicha darsligida bipolyar va CMOS kuchaytirgichlar, operatsion kuchaytirgichlar, chastota javobi hamda chiqish bosqichlari tizimli ravishda o‘rganilishi bu elementlarning amaliy loyihalashdagi o‘rnini ko‘rsatadi [2].

$$A_u = U_chiq / U_kir$$

Bu yerda A_u — kuchlanish bo‘yicha kuchaytirish koeffitsienti, U_chiq — chiqish kuchlanishi, U_kir — kirish kuchlanishidir. Agar kuchaytirish tok yoki quvvat bo‘yicha baholansa, mos ravishda $A_i = I_chiq / I_kir$ va $A_p = P_chiq / P_kir$ ifodalari ishlatiladi.

$$A_u(dB) = 20 \cdot lg|A_u|, \qquad A_p(dB) = 10 \cdot lg(A_p)$$

Detsibelli ifodalash ko‘p kaskadli tizimlarni tahlil qilishda juda qulay, chunki alohida kaskadlarning dB dagi kuchaytirishlari ko‘paytirilmaydi, balki qo‘shiladi. Bu esa loyiha hisob-kitoblarida xatolikni kamaytiradi va signal zanjirini bosqichma-bosqich baholash imkonini beradi.

Ko‘p kaskadli kuchaytirgichning matematik modeli

Agar kuchaytirgich n ta kaskaddan iborat bo‘lsa va har bir kaskadning kuchlanish bo‘yicha kuchaytirish koeffitsienti A_{u1}, A_{u2}, ..., A_{un} bilan belgilansa, umumiy kuchaytirish koeffitsienti quyidagi ko‘paytma bilan aniqlanadi:

$$A_u\Sigma = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdot \ldots \cdot A_{un} = \prod_{i=1}^{n} A_{ui}$$

Agar kuchaytirish detsibellarda ifodalansa, umumiy kuchaytirish quyidagi yig‘indi bilan aniqlanadi:

$$A_u\Sigma(dB) = A_{u1}(dB) + A_{u2}(dB) + \ldots + A_{un}(dB)$$

Masalan, uch kaskadli kuchaytirgichda har bir kaskad 20 dB dan kuchaytirsa, umumiy kuchaytirish 60 dB bo‘ladi. Bu oddiy ko‘rinishga ega bo‘lsa-da, real sxemada kaskadlararo yuklanish, kirish va chiqish qarshiliklarining nomosligi, chastota bo‘yicha susayish va teskari aloqa ta’siri sababli nazariy natija amaliy qiymatdan farq qilishi mumkin.

$$B = f_H - f_L$$

Bu yerda B — o‘tkazish polosasi, f_L — past chegaraviy chastota, f_H — yuqori chegaraviy chastota. Amaliyotda f_L va f_H odatda kuchaytirish o‘rta chastotadagi qiymatdan 3 dB ga kamayadigan nuqtalar sifatida olinadi. Analog Devices kompaniyasining op-amp kuchaytirish va polosa kengligi bo‘yicha texnik materiallarida ochiq kontur kuchaytirishi, dominant qutb, 20 dB/dekada pasayish va barqarorlik masalalari batafsil tushuntirilgan [3].

1-jadval. Ko‘p kaskadli kuchaytirgich bosqichlarining funksional vazifalari

Kaskad turi	Asosiy vazifasi	Muhim parametrlar	Amaliy izoh
Kirish kaskadi	Zaif signalni qabul qilish va dastlabki kuchaytirish	R_kir, shovqin koeffitsienti, sezgirlik	Kirish qarshiligi yuqori, shovqin past bo‘lishi kerak
Oraliq kaskad	Asosiy kuchlanish kuchaytirishini ta’minlash	A_u, chastota javobi, chiziqlilik	Umumiy gainning katta qismi shu bosqichlarda hosil bo‘ladi
Chiqish kaskadi	Yuklamaga zarur tok va quvvatni uzatish	R_chiq, P_chiq, FIK, issiqlik rejimi	Yuklama bilan moslashuv va termik barqarorlik muhim
Teskari aloqa zanjiri	Barqarorlik, chiziqlilik va polosa kengligini boshqarish	β, faza zaxirasi, gain-bandwidth	Kuchaytirish kamayishi mumkin, ammo sifat oshadi

Kaskadlararo ulanish turlari

Ko‘p kaskadli kuchaytirgichda kaskadlararo ulanish turi signalning doimiy tarkibi, o‘zgaruvchan tarkibi, chastota diapazoni va yuklama bilan moslashuviga

bevosita ta’sir qiladi. Amaliy sxemalarda RC-ulanish, transformatorli ulanish, bevosita ulanish va integral sxema ichidagi faol bog‘lanishlar keng uchraydi.

RC-ulanishli kuchaytirgichlarda kaskadlar kondensator va rezistorlar orqali bog‘lanadi. Kondensator doimiy tok tarkibini ajratadi, o‘zgaruvchan signalni esa keyingi kaskadga o‘tkazadi. Bu usul audiochastota kuchaytirgichlarida sodda va arzon yechim sifatida ishlatiladi. Transformatorli ulanishda esa kaskadlar transformator yordamida bog‘lanadi va u asosan impedans moslashuvi yoki quvvat uzatish samaradorligini oshirish uchun qo‘llaniladi. Bevosita ulanish past chastotali yoki doimiy tokka yaqin signallarni kuchaytirishda muhim bo‘lib, bunda ish nuqtasining siljishi, harorat barqarorligi va ofset kuchlanishi alohida nazorat qilinadi.

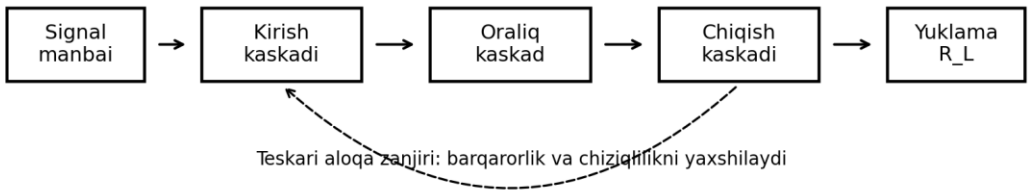
2-jadval. Kaskadlararo ulanish turlarining solishtirma tahlili

Ulanish turi	Afzalligi	Kamchiligi	Qo‘llanish sohasi	Baholash mezoni
RC-ulanish	Sodda, arzon, ixcham	Past chastotada susayish yuz beradi	Audio va umumiy maqsadli kuchaytirgichlar	f_L, f_H, C_bog‘lovchi
Transformatorli ulanish	Impedans moslashuvi va quvvat uzatish yaxshi	Hajm katta, chastota diapazoni cheklangan	Quvvat kuchaytirgichlari, RF bloklar	η, R_yuk, magnit yo‘qotishlar
Bevosita ulanish	Doimiy va juda past chastotali signalni uzatadi	Ofset va harorat siljishi sezilarli	Sensor, o‘lchov va instrumental kuchaytirgichlar	V_os, drift, barqarorlik
Integral faol ulanish	Ixcham, yuqori gain va moslashuv oson	Kompensatsiya va faza zaxirasi talab qilinadi	Op-amp, OTA, analog IC	GBW, phase margin, slew rate

Tuzilmaviy blok-sxema va signal oqimi

Ko‘p kaskadli kuchaytirgichni tizimli yondashuvda qaralganda u signal manbai, kirish kaskadi, oraliq kuchaytirish kaskadi, chiqish kaskadi va yuklamadan tashkil topgan signal zanjiri sifatida tasvirlanadi. Teskari aloqa zanjiri esa chiqishdagi

signalning bir qismini kirishga qaytarib, kuchaytirish, chiziqlilik va barqarorlikni boshqaradi.



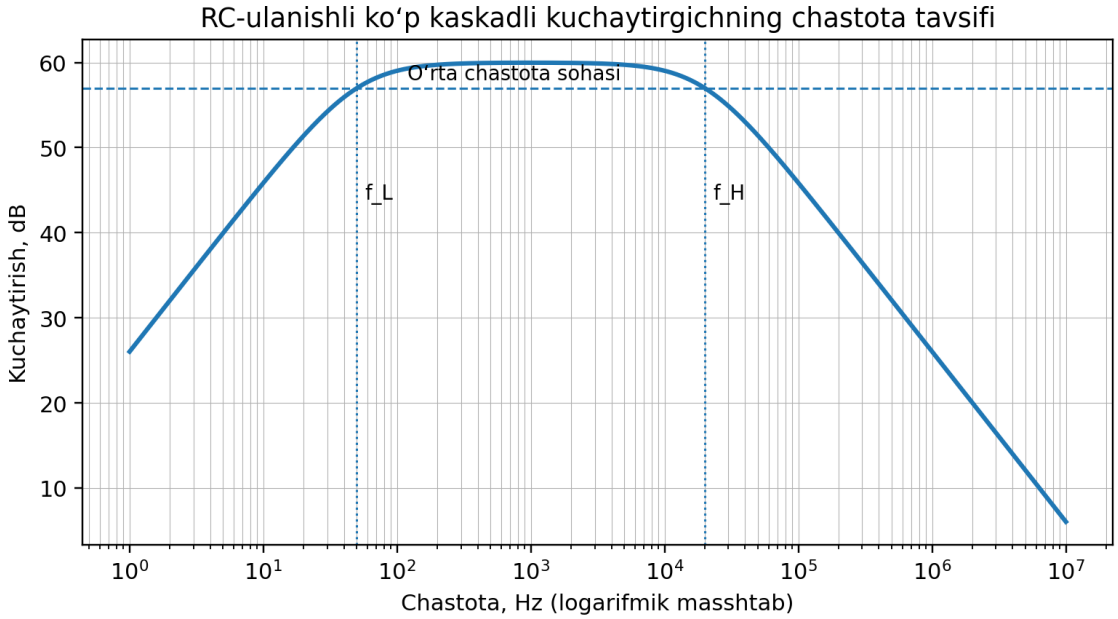
1-rasm. Ko‘p kaskadli kuchaytirgichning umumiy blok-sxemasi

1-rasmda ko‘rsatilgan tuzilma kuchaytirgichni alohida funksional bloklar orqali tahlil qilish imkonini beradi. Kirish bosqichida signal manbasi bilan moslashuv, oraliq bosqichda asosiy kuchlanish kuchaytirishi, chiqish bosqichida esa yuklamaga quvvat uzatish bajariladi. Teskari aloqa qo‘llanganda umumiy kuchaytirish biroz kamayadi, lekin sxemaning barqarorligi, chiziqliligi va chastota bo‘yicha ishlash sohasi yaxshilanadi.

Chastota tavsifi va o‘tkazish polosasi

Har qanday real kuchaytirgichning kuchaytirish koeffitsienti chastotaga bog‘liq. Past chastotalarda bog‘lovchi kondensatorlar va emitter yoki source zanjiridagi sig‘imlar sababli kuchaytirish kamayadi. Yuqori chastotalarda esa tranzistorning ichki sig‘imlari, Miller effekti, montaj parazitlari va kaskadlararo bog‘lanishlar kuchaytirishni cheklaydi. Shuning uchun ko‘p kaskadli kuchaytirgichda chastota tavsifi faqat bitta elementga emas, balki butun signal zanjiriga bog‘liq holda shakllanadi.

Chastota javobini baholashda o‘rta chastota sohasi, past chegaraviy chastota f_L, yuqori chegaraviy chastota f_H va o‘tkazish polosasi B aniqlanadi. Odatda chegaraviy chastotalar kuchaytirish 3 dB ga pasayadigan nuqtalar bo‘yicha belgilanadi. Amaliy loyihalashda bu ko‘rsatkichlar kuchaytirgichning qaysi sohada ishlatilishini aniqlashda asosiy mezon hisoblanadi.



2-rasm. RC-ulanishli ko‘p kaskadli kuchaytirgichning hisobiy chastota tavsifi

2-rasmda RC-ulanishli kuchaytirgich uchun tipik chastota tavsifi ko‘rsatilgan. Past chastota sohasida bog‘lovchi sig‘imlarning reaktiv qarshiligi katta bo‘lgani uchun signal susayadi. O‘rta chastota sohasida kuchaytirish deyarli barqaror bo‘ladi. Yuqori chastotalarda esa tranzistor va montaj sig‘imlari kuchaytirishning pasayishiga olib keladi. Shu sababli kuchaytirgich loyihalashda kondensatorlar qiymati, tranzistor modeli, yuklama qarshiligi va teskari aloqa zanjiri birgalikda tanlanadi.

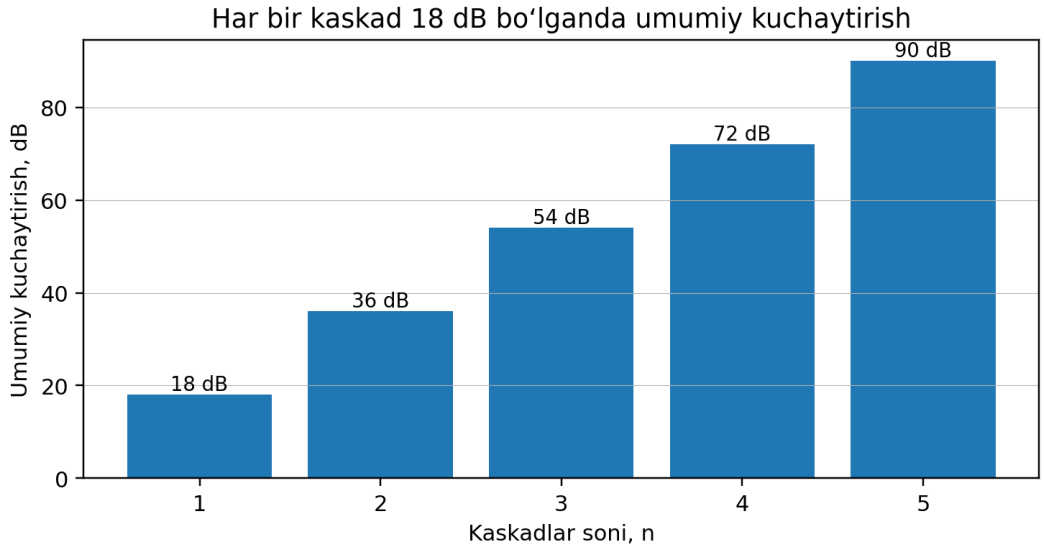
Hisobiy namuna

Quyida har bir kaskadi 18 dB kuchaytirishga ega bo‘lgan kuchaytirgich uchun kaskadlar soni ortganda umumiy kuchaytirishning qanday o‘zgarishi hisobiy tarzda ko‘rsatiladi. Bu jadval real laboratoriya o‘lchovi emas, balki ko‘p kaskadli kuchaytirgichda dB dagi qiymatlar qo‘shilishini tushuntirish uchun berilgan nazariy modeldir.

3-jadval. Kaskadlar soni bo‘yicha umumiy kuchaytirishning hisobiy bahosi

Kaskadlar soni n	Har bir kaskad gaini, dB	Umumiy gain, dB	Chiziqli gain $A_u\Sigma$	Izoh
1	18	18	7.9	Signal bosqichma-bosqich kuchayadi
2	18	36	63.1	Signal bosqichma-bosqich kuchayadi

3	18	54	501.2	Signal bosqichma-bosqich kuchayadi
4	18	72	3981.1	Signal bosqichma-bosqich kuchayadi
5	18	90	31622.8	Signal bosqichma-bosqich kuchayadi



3-rasm. Kaskadlar soni ortishi bilan umumiy kuchaytirishning oshishi

3-jadval va 3-rasmdan ko‘rinadiki, har bir kaskad 18 dB dan kuchaytirsa, besh kaskadli kuchaytirgichning umumiy kuchaytirishi 90 dB ga yetadi. Chiziqli koeffitsientda bu juda katta qiymatni beradi. Biroq real sxemada bunday katta gainni olish uchun faza zaxirasi, shovqin, to‘yinish, teskari aloqa va issiqlik rejimi alohida hisobga olinishi kerak.

Shovqin, impedans moslashuvi va barqarorlik

Ko‘p kaskadli kuchaytirgichlarda birinchi kaskadning shovqin xususiyati ayniqsa muhim. Sababi kirishdagi zaif signal birinchi bosqichda shovqin bilan aralashsa, keyingi kaskadlar foydali signal bilan birga shu shovqinni ham kuchaytiradi. Shu bois past shovqinli kuchaytirgichlarda kirish tranzistori, ish nuqtasi, rezistor qiymatlari va ekranlash masalalari ehtiyotkorlik bilan tanlanadi. Tibbiy diagnostika, radioqabul qilgich va ilmiy o‘lchov qurilmalarida bu talab yanada keskinlashadi.

Impedans moslashuvi signal manbasi va yuklama o‘rtasida energiya uzatish samaradorligini belgilaydi. Kirish qarshiligi signal manbasiga ortiqcha yuklama

bermasligi, chiqish qarshiligi esa yuklama bilan muvofiq bo‘lishi kerak. Agar moslashuv noto‘g‘ri tanlansa, signal darajasi pasayadi, chastota tavsifi buziladi yoki sxema barqaror ishlamaydi.

Barqarorlik masalasi ko‘p kaskadli kuchaytirgichlarda alohida ahamiyatga ega. Har bir kaskad faza siljishini kiritadi, parazit sig‘imlar esa yuqori chastotalarda qo‘shimcha qutblar hosil qiladi. Natijada teskari aloqa ayrim sharoitlarda musbat aloqa kabi ta’sir qilib, o‘z-o‘zidan tebranish hosil qilishi mumkin. 2024-yilda ko‘p kaskadli feedforward OTA kuchaytirgichlarining barqarorligini tahlil qilish bo‘yicha tadqiqotda successive one-pole approximation yondashuvi orqali ikki, uch va to‘rt bosqichli tuzilmalar tahlil qilingan [8].

Amaliy qo‘llanilish sohalari

Ko‘p kaskadli kuchaytirgichlar amaliy elektronikaning deyarli barcha yo‘nalishlarida uchraydi. Audio tizimlarda ular mikrofon yoki musiqiy signalni karnayni harakatlantira oladigan darajagacha kuchaytiradi. Radioaloqa tizimlarida antennadan kelgan juda zaif signal past shovqinli kuchaytirgich orqali qabul qilinadi, uzatish qismida esa quvvat kuchaytirgich antennaga yetarli energiya beradi. O‘lchov texnikasida sensorlardan kelgan millivolt yoki mikrovolt darajadagi signallar keyingi ADC yoki indikator blokiga mos darajaga yetkaziladi.

Tibbiyot elektronikasi ham ko‘p kaskadli kuchaytirgichlarning muhim qo‘llanish sohasidir. Elektrokardiografiya, elektroensefalografiya va elektromiografiya tizimlarida inson tanasidan olinadigan bioelektrik signallar juda kichik amplitudaga ega. Bunday signallarni kuchaytirishda past shovqin, yuqori kirish qarshiligi, yaxshi common-mode rejection ratio va xavfsiz galvanik izolyatsiya muhim hisoblanadi. 2023-yilgi biotibbiy operatsion kuchaytirgich loyihasida ikki bosqichli Miller kompensatsiyali topologiya past quvvat va yuqori gain talablari bilan bog‘liq holda ko‘rib chiqilgan [10].

Integral sxemalar va CMOS operatsion kuchaytirgichlarda ikki yoki ko‘p bosqichli topologiyalar yuqori ochiq kontur kuchaytirish, katta kirish qarshiligi, mos chiqish kuchlanish oralig‘i va kam quvvat sarfi kabi talablarni birlashtirish uchun ishlatiladi. 180 nm texnologiyada ikki bosqichli CMOS operatsion kuchaytirgich

loyihasi bo‘yicha tadqiqotda 1,8 V ta’minot kuchlanishi, kuchaytirish, polosa kengligi va quvvat sarfi kabi parametrlar birgalikda baholangan [9].

4-jadval. Ko‘p kaskadli kuchaytirgichlarning amaliy qo‘llanilish yo‘nalishlari

Soha	Signal manbai	Kuchaytirgichga qo‘yiladigan talab	Natijaviy vazifa
Audio texnika	Mikrofon, pleyer, preamp chiqishi	Past buzilish, keng audio polosa, yetarli quvvat	Karnay yoki audio yuklamani boshqarish
Radioaloqa	Antenna signali	Past shovqin, yuqori chastota barqarorligi	Qabul qilish sezgirligini oshirish
O‘lchov texnikasi	Datchik va sensorlar	Yuqori aniqlik, driftning kamligi	Signalni ADC yoki indikatorga moslash
Tibbiyot elektronikasi	EKG, EEG, EMG elektrodlari	Past shovqin, yuqori R_kir, xavfsizlik	Bioelektrik signalni qayd etish
Sanoat avtomatikasi	Bosim, harorat, namlik datchiklari	Ishonchlilik, shovqinga chidamlilik	Boshqaruv blokiga mos signal berish
Telekommunikatsiya	Optik yoki RF modul signali	Keng polosa, gain barqarorligi	Uzatish-qabul qilish sifatini oshirish

Muhokama

Tahlil shuni ko‘rsatadiki, ko‘p kaskadli kuchaytirgichni loyihalash faqat umumiy kuchaytirish koeffitsientini hisoblash bilan cheklanmaydi. Yuqori sifatli sxema uchun kuchaytirish, chastota diapazoni, shovqin, barqarorlik, chiziqlilik, energiya sarfi va yuklama bilan moslashuv birgalikda baholanishi kerak. Amaliy loyihalashda birinchi kaskad shovqin va sezgirlik nuqtai nazaridan, oraliq kaskadlar gain va chastota javobi nuqtai nazaridan, chiqish kaskadi esa quvvat va issiqlik nuqtai nazaridan optimallashtiriladi.

Xalqaro ilmiy adabiyotlarda ko‘p kaskadli kuchaytirgichlar analog integral sxemalar, operatsion kuchaytirgichlar, biotibbiy qurilmalar va RF tizimlar bilan bog‘liq holda o‘rganiladi. Ushbu yo‘nalishda avtomatlashtirilgan sxema sintezi, SPICE modellashtirish, past quvvatli CMOS dizayn, keng polosali OTA tuzilmalari va shovqin-buzilish kompromisslari muhim tadqiqot mavzulari bo‘lib qolmoqda.

Xulosa

Ko‘p kaskadli kuchaytirgichlar zaif elektr signallarini bosqichma-bosqich kuchaytirib, kerakli kuchlanish, tok yoki quvvat darajasiga yetkazuvchi muhim analog elektron qurilmalardir. Ularning asosiy afzalligi katta umumiy kuchaytirishni bir nechta kaskadga taqsimlash, har bir kaskadga alohida funksional vazifa yuklash va signal sifatini boshqarish imkoniyatidir.

Maqolada ko‘rsatilganidek, umumiy kuchaytirish kaskadlar ko‘paytmasi orqali, dB dagi umumiy qiymat esa alohida kaskadlar yig‘indisi orqali aniqlanadi. Chastota tavsifi past va yuqori chegaraviy chastotalar bilan belgilanadi, o‘tkazish polosasi esa B = f_H − f_L ifodasi orqali baholanadi. Kaskadlar soni ortishi umumiy gainni oshiradi, biroq shovqin, faza siljishi, to‘yinish va barqarorlik muammolarini ham kuchaytirishi mumkin.

Amaliy jihatdan ko‘p kaskadli kuchaytirgichlar audio tizimlar, radioaloqa, o‘lchov texnikasi, tibbiyot elektronikasi, sanoat avtomatikasi va telekommunikatsiya qurilmalarida keng qo‘llaniladi. Ularni samarali loyihalashda kirish va chiqish qarshiliklarini moslashtirish, shovqinni kamaytirish, teskari aloqani to‘g‘ri tanlash, chastota diapazonini belgilash va termik barqarorlikni ta’minlash asosiy talab hisoblanadi. Kelgusida bu sohada past quvvatli CMOS kuchaytirgichlar, biotibbiy signal kuchaytirgichlari, RF integral sxemalar va avtomatlashtirilgan analog dizayn usullarining ahamiyati yanada ortadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

[1] Sedra A. S., Smith K. C. Microelectronic Circuits. 7th ed. Oxford University Press, 2014.

[2] Razavi B. Fundamentals of Microelectronics. 3rd ed. Wiley, 2021.

[3] Analog Devices. MT-033: Voltage Feedback Op Amp Gain and Bandwidth. Technical Tutorial, 2008.

[4] Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 3rd ed. Cambridge University Press, 2015.

[5] Boylestad R. L., Nashelsky L. Electronic Devices and Circuit Theory. Pearson Education.

[6] Floyd T. L. Electronic Devices. Pearson Education.

[7] Gray P. R., Hurst P. J., Lewis S. H., Meyer R. G. Analysis and Design of Analog Integrated Circuits. Wiley.

[8] Lee T. Analysis of Stability in Multistage Feedforward Operational Transconductance Amplifiers using Successive One-Pole Approximation. arXiv:2406.19267, 2024.

[9] Yuan T., Fan Q. Design of Two Stage CMOS Operational Amplifier in 180nm Technology. arXiv:2012.15737, 2020.

[10] Biswas A., Dhabal S., Venkateswaran P. Design of a Low-Power High-Gain Bio-Medical Operational Amplifier in 65nm Technology using gm/ID Methodology. arXiv:2309.04863, 2023.

[11] Texas Instruments. Op Amps for Everyone: Design Reference. Technical documentation.

[12] Analog Devices. Op Amp Applications Handbook. Elsevier / Newnes technical reference.

[13] Razavi B. Design of Analog CMOS Integrated Circuits. McGraw-Hill Education.

[14] Sedra A. S., Smith K. C., Carusone T. C., Gaudet V. Microelectronic Circuits. 8th ed. Oxford University Press, 2021.