

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIV TA‘LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI
ANDIJON MASHINASOZLIK INSTITUTI**

**MASHINASOZLIK
ILMIY-TEXNIKA JURNALI**

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И ИННОВАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
АНДИЖАНСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
МАШИНОСТРОЕНИЕ**

**MINISTRY OF HIGHER EDUCATION, SCIENCE AND INNOVATIONS REPUBLIC
OF UZBEKISTAN
ANDIJAN MACHINE-BUILDING INSTITUTE
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
MACHINE BUILDING**

O‘zbekiston Respublikasi Vazirlar mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi (OAK) Rayosatining 2021-yil 30-dekabrda 310/10-son qarori bilan Andijon mashinasozlik institutining “Mashinasozlik” ilmiy-texnika jurnali “TEXNIKA” va “IQTISODIYOT” fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

Ushbu jurnalda chop etilgan materiallar tahririyatning yozma ruxsatisiz to‘liq yoki qisman chop etilishi mumkin emas. Tahririyatning fikri mualliflar fikri bilan har doim mos tushmasligi mumkin. Ilmiy-texnika jurnalida yozilgan materiallarning haqqoniyligi uchun maqolaning mualliflari mas‘uldirlar.

MASHINASOZLIK
ILMIY-TEXNIKA JURNALI

Bosh muharrir:

U.M.Turdialiyev – texnika fanlari doktori, k.i.x.

Mas’ul muharrir:

U.A.Madrahimov – iqtisodiyot fanlari doktori, professor.

T A H R I R H A Y ’ A T I

Negmatov Soyibjon Sodiqovich – texnika fanlari doktori, professor O‘ZRFA akademigi (TDTU);
Abralov Maxmud Abralovich – texnika fanlari doktori, professor (TDTU);
Dunyashin Nikolay Sergeevich – texnika fanlari doktori, professor (TDTU);
Norxudjayev Fayzulla Ramazanovich – texnika fanlari doktori, professor (TDTU);
Pirmatov Nurali Berdiyrovich – texnika fanlari doktori, professor (TDTU);
Salixanova Dilnoza Saidakbarovna – texnika fanlari doktori, professor (O‘ZRFA UNKI);
Siddikov Ilxomjon Xakimovich – texnika fanlari doktori, professor (TIQXMMI);
Fayzimatov Shuhrat Numanovich – texnika fanlari doktori, professor (FarPI);
Xakimov Ortiqali Sharipovich – texnika fanlari doktori, professor (Standartlashtirish, sertifikatlashtirish va texnik jihatdan tartibga solish ilmiy-tadqiqot instituti);
Xo‘jayev Ismatillo Qo‘shiyevich – texnika fanlari doktori, professor (Mexanika instituti);
Ipatov Oleg Sergeyevich – professor (Sankt-Peterburg politexnika universiteti, Rossiya);
Naumkin Nikolay Ivanovich - p.f.d., t.f.n., professor. (Mordov milliy tadqiqot davlat universiteti, Rossiya);
Aliyev Suxrob Rayimjonovich – fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent (AndMI);
Shen Zhili – professor (Shimoliy Xitoy texnologiyalar universiteti, Xitoy);
Hu Fuwen – professor (Shimoliy Xitoy texnologiyalar universiteti, Xitoy);
Won Cholyeon – professor (Janubiy Koreya Milliy tadqiqotlar fondi, Janubiy Koreya);
Celio Pina – professor (Setubal politexnika universiteti, Portugaliya);
Ricardo Baptista – professor (Setubal politexnika universiteti, Portugaliya);
Rui Vilela – professor (Setubal politexnika universiteti, Portugaliya);
Dmitriy Albertovich Konovalov - t.f.n., professor (Voronej davlat texnika universiteti);
Мухаметшин Вячеслав Шарифуллович – директор Института нефти и газа федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (филиал в г.Октябрьском), доктор геологоминералогических наук, профессор.
Nimchik Aleksey Grigorevich – kimyo fanlari doktori, professor (TDTU Olmaliq filiali)
Muftaydinov Qiyomiddin – iqtisodiyot fanlari doktori, professor (AndMI);
Zokirov Saidfozil – i.f.d., (Prognozlashtirish va makroiqtisodiy tadqiqotlar instituti);
Orazimbetova Gulistan Jaksilikovna - t.f.d., dotsent (AndMI)
Jo‘raxonov Muzaffar Eskanderovich – iqtisodiyot fanlari bo‘yicha falsafa doktori (AndMI);
Ermatov Akmaljon – iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent (AndMI);
Qosimov Karimjon – texnika fanlari doktori, professor (AndMI);
Yusupova Malikaxon – iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent (AndMI);
Akbarov Xatamjon Ulmasaliyevich – texnika fanlari nomzodi, dotsent (AndMI);
Mirzayev Otabek – texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), (AndMI);
Raxmonov O‘ktam Kamolovich – texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), (TDTU, Olmaliq filiali);
Xoshimov Xalimjon Xamidjanovich – texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), (AndMI).
Kuluyev Ruslan Raisovich - texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), (TDTU).

Texnik muharrir:

B.Iminov – Andijon mashinasozlik instituti nashriyoti.

Tahririyat manzili: Andijon shahar, Bobur shox ko‘cha, 56-uy. **Tel:** +998 74-224-70-88 (1016)

Veb sayt: www.andmiedu.uz

e-mail: andmi.jurnal@mail.ru

“Mashinasozlik” ilmiy-texnika jurnali O‘zbekiston Respublikasi Axborot va ommaviy kommunikatsiyalar agentligining 2020 yil 28- fevraldagi 04-53-raqamli guvohnomasiga binoan chop etiladi.

MUNDARIJA	
MASHINASOZLIK VA MASHINASHUNOSLIK. MASHINASOZLIKDA MATERIALLARGA ISHLOV BERISH. METALLURGIYA. AVIASIYA TEXNIKASI	
Усовершенствованное устройство управления процесса ректификации <i>Мухитдинов Д.П., Султанов И.Р.</i>	5
Необходимость правильного подбора цвета специальной одежды работников машиностроительной отрасли <i>Араббаева Ф.У.</i>	15
Tabiiy tusdagi favqulodda vaziyatlarda texnik tizimlar faoliyatini takomillashtirish <i>Jalilov A. I.</i>	20
Asinxron motor validagi yuklama o'zgarishi asosida quvvatini avtomatik rostlash <i>Olimov J.S.</i>	25
Analysis of structural changes as a result of modifiers introduced in the process of liquefaction of gray cast iron <i>Xasanov J.N.</i>	34
Barmoqsimon frezalarda konturli ishlov berishning uzlukli rejimlarida kesilayotgan qatlam ko'ndalang kesim yuzasining va kesish kuchining o'zgarish xarakterlari <i>Umarov T.U., Baydullayev A.A.</i>	40
ENERGETIKA VA ELEKTROTEXNIKA. QISHLOQ XO'JALIGI ISHLAB CHIQRISHINI ELEKTRLASHTIRISH TEXNOLOGIYASI. ELEKTRONIKA	
Boshqaruv tizimining barqarorlik mezonlari va ko'rsatkichlari <i>Sabirov U.K.</i>	46
Вопросы управление массообменными процессами <i>Султанов И.Р.</i>	58
QISHLOQ XO'JALIGI ISHLAB CHIQRISHINI MEXANIZATSIYALASH TEXNOLOGIYASI	
Mahalliy xomashyolar asosida mineral kukunlarni olish texnologiyasini ishlab chiqish va tadqiq qilish <i>Ахмадҷонов М.А., Ubaydullayev M.M.</i>	68
Fermalarda sog'ilgan sut mahsulotini umumiy miqdorini monitoring qilish algoritmi <i>Safarov E.X.</i>	74
Qishloq xo'jalik texnikalarini atmosfera muhiti ta'sirida korroziyaga uchrab yemirilish jarayonining tahlili <i>Qosimov K.Z., To'raqulov A.X.</i>	80
Ikki qatlamli trikotaj to'qimalarida qatlamlarning birlashtirish usulini trikotajni fizik-mexnik xususiyatlariga ta'sirini tadqiqoti <i>Karimov N.M.</i>	85
Kartoshka tuganaklarni elevatorlarda saralash bo'yicha nazariy tadqiqotlar tahlili <i>Bayboboev N.G., Do'smatov T.G', Qambarov E.A., Haydarov A.Q.</i>	91

**ENERGETIKA VA ELEKTROTEXNIKA. QISHLOQ XO‘JALIGI ISHLAB CHIQRISHINI
ELEKTRLASHTIRISH TEXNOLOGIYASI. ELEKTRONIKA**

Sabirov Ulugbek Kuchkarovich

**i.f.n., dotsent, Andijon mashinasozlik instituti,
Andijon sh. uqsabirovasu1951@gmail.com**

**BOSHQARUV TIZIMINING BARQARORLIK MEZONLARI VA
KO‘RSATKICHLARI**

**КРИТЕРИИ И ПОКАЗАТЕЛИ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
CRITERIA AND INDICATORS OF CONTROL SYSTEM STABILITY**

Annotatsiya. Maqolada boshqaruv tizimlarining muhim xususiyatlaridan biri – barqarorlik va uni baholash mezonlari va ko‘rsatkichlari avtomatik boshqarish tizimlari nuqtai nazaridan ko‘rib chiqilgan. Unda barqarorlikning sifat mezonlari, ildizli mezon, Stodola mezoni, Gurvits mezoni, Mixaylov mezoni, Nyquist mezoni, sifat ko‘rsatkichlari, bevosita sifat ko‘rsatkichlari, ildizli sifat ko‘rsatkichlari, chastotali sifat ko‘rsatkichlari yoritilgan. Ushbu mezonlar va ko‘rsatkichlar turli boshqaruv tizimlari faoliyatini baholashda qo‘llanilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: barqarorlik, sifat mezonlari, ildizli mezon, Stodola mezoni, Gurvits mezoni, Mixaylov mezoni, Nyquist mezoni, sifat ko‘rsatkichlari, bevosita sifat ko‘rsatkichlari, ildizli sifat ko‘rsatkichlari, chastotali sifat ko‘rsatkichlari.

Аннотация. В статье рассматривается одно из важных свойств систем управления - устойчивость, а также критерии и показатели ее оценки с точки зрения систем автоматического управления. Описаны качественные критерии устойчивости, корневой критерий, критерий Стодолы, критерий Гурвица, критерий Михайлова, критерий Найквиста, показатели качества, прямые показатели качества, корневые показатели качества, частотные показатели качества. Эти критерии и показатели могут быть использованы для оценки эффективности различных систем управления.

Ключевые слова: устойчивость, критерии качества, корневой критерий, критерий Стодолы, критерий Гурвица, критерий Михайлова, критерий Найквиста, показатели качества, прямые показатели качества, корневые показатели качества, частотные показатели качества.

Annotation. The article discusses one of the important properties of control systems - stability, as well as criteria and indicators for its assessment from the point of view of automatic control systems. Qualitative stability criteria, root criterion, Stodola criterion, Hurwitz criterion, Mikhailov criterion, Nyquist criterion, quality indicators, direct quality indicators, root quality indicators, frequency quality indicators are described. These criteria and indicators can be used to evaluate the effectiveness of various management systems.

Key words: stability, quality criteria, root criterion, Stodola criterion, Hurwitz criterion, Mikhailov criterion, Nyquist criterion, quality indicators, direct quality indicators, root quality indicators, frequency quality indicators.

Kirish. Boshqaruv tizimlarining muhim ko‘rsatkichlaridan biri barqarorlikdir, chunki tizimning asosiy maqsadi boshqariladigan parametrning belgilan qiymatini saqlash yoki uni ma‘lum bir qonunga muvofiq o‘zgartirishini ta‘minlashdan iborat [1-4]. Agar boshqariladigan parametr belgilangan qiymatdan chetga chiqsa (masalan, buzilish yoki sozlashning o‘zgarishi ta‘sirida), rostlagich ob‘ektga bu og‘ishni bartaraf etadigan tarzda ta‘sir ko‘rsatadi. Agar ushbu ta‘sir natijasida tizim o‘zining dastlabki holatiga qaytsa yoki boshqa muvozanat holatiga kirsa, unda bunday tizim *barqaror* deyiladi. Agar doimiy ravishda ortib borayotgan

amplitudali tebranishlar yuzaga kelsa yoki xatoning monoton ortishi sodir bo'lsa, u holda tizim *beqaror* deb ataladi.

Demak, boshqaruv tizimining barqarorligi, boshqaruv tizimining normal ishlashi va turli muqarrar buzilishlarga (ta'sirlarga) dosh berish qobiliyati bilan izohlanadi. Tizim holatining barqarorligi uchun kirish signallaridagi har qanday etarlicha kichik o'zgarishlarda tizimning barqarorlik holatdan og'ishi imkoni boricha kichik bo'lib qolishi talab etiladi. Barqarorlik turli tizimlar uchun turlicha usullar bilan aniqlanadi.

Chiziqli avtomatik boshqaruv tizimining barcha holatlari barqaror, beqaror yoki barqarorlik chegarasida bo'lishi mumkin. Oddiy differensial tenglamalar bilan tavsiflangan statsionar chiziqli tizim uchun tegishli xarakteristik tenglamaning barcha ildizlari manfiy haqiqiy qismlarga ega bo'lishi barqarorlik uchun zaruriy va etarli shart hisoblanadi (tizim asimtotik barqaror).

Tizimning xarakteristik tenglamasi ildizlarining ishorolari bo'yicha xulosa qilish imkonini beradigan turli xil mezonlar (shartlar) mavjud. Bunda tenglamani yechmasdan to'g'ridan-to'g'ri uning koeffitsientlari bo'yicha xulosalar qilinadi. Masalan, quyi tartibli (4-tartibgacha) differensial tenglamalar bilan izohlanadigan barqarorlikni tadqiq etishda Raus va Gurvits mezonlari qo'llaniladi (E. Raus, ingliz mexanikasi; A. Gurvits, nemis matematigi). Biroq, bu mezonlardan ko'p hollarda (masalan, yuqori tartibli tenglamalar bilan tavsiflangan boshqaruv tizimlarida) foydalanish murakkab hisob-kitoblarni amalga oshirishni talab etadi, shuning uchun ham amaliyotda deyarli qo'llanilmaydi. Bundan tashqari, murakkab boshqaruv tizimlarining xarakteristik tenglamalarini aniqlashning o'zi ham ko'p mehnat talab qiladigan matematik hisoblar bilan bog'liq.

Barqarorlikni aniqlashning chastota usullari ham mavjud. Har qanday murakkab chiziqli tizimning chastotali xarakteristiklari oddiy grafik va algebraik operatsiyalar yordamida osongina topilishi mumkin. Shuning uchun chiziqli statsionar avtomatik boshqaruv tizimlarini tadqiq qilish va loyihalashda odatda Nyquist va Mixaylovning chastota mezonlari qo'llaniladi (H. Nyquist, amerikalik fizik; A.V. Mixaylov, avtomatik boshqarish sohasidagi Rossiyalik olim). Ayniqsa Nyquist mezoni amaliyotda qo'llash uchun sodda va qulay.

Tizimning barqarorlik holatidagi parametrlari qiymatlari to'plami *barqarorlik sohasi* (maydoni) deb ataladi. Tizimning barqarorlik chegarasiga yaqinligi ochiq tizimning amplituda-faza xarakteristiklari bo'yicha aniqlanadigan faza va amplituda zahiralari bilan baholanadi.

Chiziqli avtomatik boshqaruv tizimlarining zamonaviy nazariyasi uzluksiz va diskret (impulsli), statsionar va nostatsionar hamda taqsimlangan parametrli boshqaruv tizimlarini o'rganish usullarini taqdim etadi.

Nochiziqli tizimlarning barqarorlik muammosi chiziqli tizimlarga nisbatan bir qator muhim farqli xususiyatlarga ega. Tizimdagi nochiziqlilik xususiyatiga ko'ra, tizimning ba'zi holatlari barqaror, boshqalari beqaror yoki barqarorlik chegarasida bo'lishi mumkin. Nochiziqli tizimlarni boshqarish nazariyasida butun tizimning barqarorligi emas, balki tizimning ma'lum bir holatining barqarorligi haqida gapiramiz. Nochiziqli boshqaruv tizimining biror holatining barqarorligi saqlanib qolishi mumkin, agar tizimga (ob'ektga) ko'rsatilayotgan og'diruvchi ta'sirlar etarlicha kichik bo'lsa va katta og'diruvchi ta'sirlarda tizim barqarorlik holatidan chiqsa. Shuning uchun ham nochiziqli tizimlarda *kichik barqarorlik*, *katta barqarorlik* va *umumiy barqarorlik* tushunchalari kiritiladi. Bulardan tashqari *mutlaq barqarorlik* tushunchasi, ya'ni ixtiyoriy cheklangan boshlang'ich ta'sirlarda va tizimning har qanday nochiziqliligida (ma'lum bir nochiziqliliklar sinfidan tashqari) boshqaruv tizimining barqarorligi ham muhim ahamiyat kasb etadi. Nochiziqli avtomatik boshqaruv tizimlarining barqarorligini o'rganish hatto kompyuterdan foydalanganda ham juda qiyin bo'lishi mumkin.

Materiallar va usullar. Barqarorlikning etarli shartlarni topish uchun ko'pincha Lyapunov funksiyalari usuli qo'llaniladi. Mutlaq barqarorlikning chastota mezonlari Ruminiyalik matematik V. M. Popov tomonidan taklif qilingan. Barqarorlikni tadqiq etishning aniq usullari qatorida amaliyotda tahminiy usullar qo'llaniladi, masalan, chiziqlantirishning garmonik yoki statistik usullari.

Tasodifiy buzilishlar va shovqinlar (og'iruvchi ta'sirlar) ta'sirida avtomatik boshqaruv tizimining barqarorligi stohastik tizimlar nazariyasida o'rganiladi.

Zamonaviy kompyuter texnikasi turli sinfdagi chiziqli va nochiziqli avtomatik boshqaruv tizimlarini boshqarishning ko'plab masalalarini ma'lum algoritmlardan foydalangan holda, zamonaviy kompyuterlar va hisoblash tizimlarining imkoniyatlariga mo'ljallangan yangi maxsus algoritmlar asosida hal qilish imkonini beradi.

Tizimning barqaror yoki barqaror emasligini aniqlash uchun barqarorlikning quyidagi mezonlari va ko'rsatkichlar qo'llaniladi²:

1. Ildizli mezon.
2. Stodola mezoni.
3. Gurvits mezoni.
4. Mixaylov mezoni.
5. Nyquist mezoni.
6. Sifat ko'rsatkichlari.
7. Chastotalir sifat ko'rsatkichlari va boshq.

Natijalar va muhokamar. Ildizli va Stodola mezonlari alohida dinamik zvenolar va ochiq tizimlarning barqarorligi uchun zaruriy bo'lgan mezonlardan hisoblanadi. Gurvits mezoni algebraik bo'lib, kechikishlarsiz yopiq tsikli tizimlarning barqarorligini aniqlash uchun ishlab chiqilgan. Mixaylov va Nyquist mezonlari chastota mezonlari guruhiga kiradi, chunki ular chastotali xarakteristikalar asosida yopiq tizimlarning barqarorligini aniqlaydi. Ularning xususiyati - boshqaruv tizimlarining katta qismi bo'lgan kechikishli yopiq tizimlarda qo'llash imkoniyatini beradi.

1. Ildizli mezon. Ildizli mezon uzatish funksiyasining turi bo'yicha tizimning barqarorligini belgilaydi. Boshqaruv tizimining asosiy xususiyatlarini tavsiflovchi tizimning dinamik xarakteristikasi uzatish funksiyasining maxrajida joylashgan xarakteristik polinom (ko'phad) hisoblanadi. Maxrajni nolga tenglashtirish orqali xarakteristik tenglamani olish mumkin, uning ildizlari barqarorlikni aniqlash uchun ishlatilishi mumkin.

Xarakteristik tenglamaning ildizlari haqiqiy yoki kompleks bo'lishi mumkin va barqarorlikni aniqlash uchun kompleks tekislikda chiziladi (1-rasm). Rasmdagi belgi ☆ tenglamaning ildizlarini bildiradi. Xarakteristik tenglamaning ildizlarining turlari quyidagicha:

Haqiqiy:

- musbat (ildiz raqami 1);
- manfiy (ildiz raqami 2).
- nolli (ildiz raqami 3).

Kompleks:

- kompleks bog'langan (juftlangan) (ildiz raqami 4);
- sof mavhum (ildiz raqami 5).

Ko'plik tartibida ildizlar bo'lishi mumkin:

- bittadan (ildiz raqamlari 1, 2, 3);
- bog'langanlar (juftlanganlar) (ildiz raqamlari 4, 5): $s_i = \alpha \pm j\omega$;
- karrali (ildiz raqami 6) $s_i = s_{i+1} = \dots$.

² <https://hromatron.narod.ru/lekcii-po-asu/kriterii-ustoychivosti.htm>

Yuqoridagilarga asoslanib ildizli mezon quyidagicha izohlanadi. Agar xarakteristik tenglamaning barcha ildizlari chap yarim tekislikda yotsa, chiziqli boshqaruv tizimi barqaror hisoblanadi. Agar hech bo‘lmaganda bitta ildiz barqarorlik chegarasi bo‘lgan mavhum o‘qda joylashgan bo‘lsa, u holda tizim barqarorlik chegarasida deyiladi. Agar kamida bitta ildiz o‘ng yarim tekislikda bo‘lsa (chapdagi ildizlar sonidan qat’iy nazar), unda tizim beqaror bo‘ladi.

Boshqacha qilib aytganda, kompleks ildizlarning barcha haqiqiy ildizlari va haqiqiy qismlari manfiy bo‘lishi kerak. Aks holda, tizim barqaror emas.

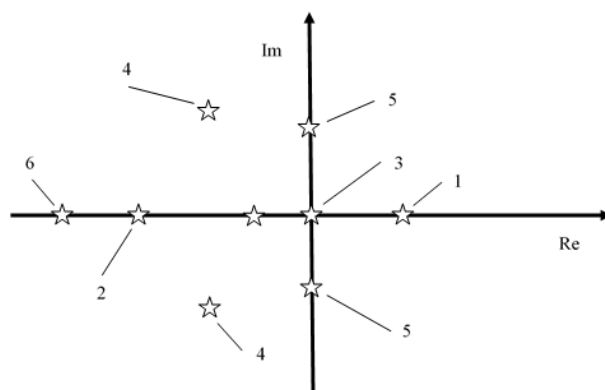
Misol – 1³. Uzatish funksiyasi quyidagi korinishga ega:

$$W(s) = \frac{3s+4}{s^3+2s^2+2.25s+1.25}$$

Xarakteristik tenglama: $s^3 + 2s^2 + 2.25s + 1.25 = 0$.

Ildizlar: $s_1 = -1$; $s_2 = -0.5 + j$; $s_3 = -0.5 - j$.

Demak tizim barqaror.

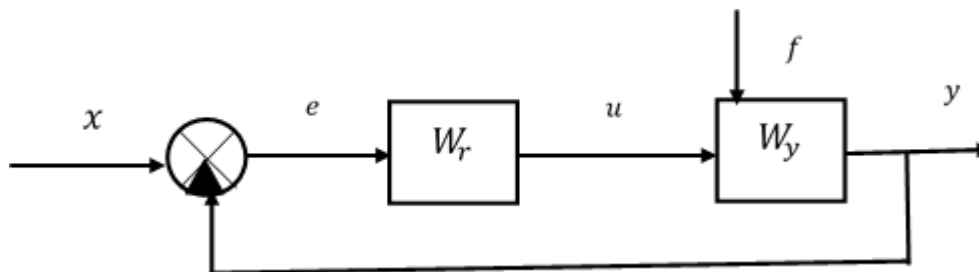


1-rasm. Xarakteristik tenglamaning ildizlari.

2. Stodola mezon. Ushbu mezon avvalgisining natijasi sifatida quyidagicha ifodalanadi: agar xarakteristik polinomning barcha koeffitsientlari ijobiy bo‘lsa, chiziqli tizim barqaror hisoblanadi.

Stodola mezoniga ko‘ra, 1-misoldagi uzatish koeffitsientlari barqaror tizimga mos keladi.

3. Gurvits mezon. Gurvits mezon yopiq tsikli tizimning xarakterli polinomi bilan ishlaydi. Ma’lumki, boshqaruv tizimining xatolik e bo‘yicha struktura sxemasi quyidagi ko‘rinishga ega (2-rasm):



2-rasm. Boshqaruv tizimining xatolik bo‘yicha struktura sxemasi.

W_r – rostlagichning uzatish funksiyasi,

³ <https://hromatron.narod.ru/lekcii-po-asu/kriterii-ustoychivosti.htm>

W_y - boshqaruv obyektining uzatish funksiyasi.

To'g'ri bog'lanish uchun uzatish funksiyasini aniqlaymiz (ochiq tsikli tizimning uzatish funksiyasi): $W_\infty = W_r W_y$.

Keyin, salbiy teskari aloqa mavjudligini hisobga olgan holda, yopiq tizimning uzatish funksiyasini olamiz:

$$W_\infty(s) = \frac{W_\infty}{1+W_\infty}.$$

Qoida bo'yicha ochiq tsikli tizimning uzatish funksiyasi kasr-ratsional shaklga ega:

$$W_\infty(s) = \frac{B(s)}{A(s)}.$$

Keyin almashtirish va o'zgartirishlardan keyin quyidagilarni olamiz:

$$W_\infty(s) = \frac{B(s)}{A(s)+B(s)}.$$

Bundan kelib chiqadiki, yopiq tsikli tizimning xarakteristik polinomini W_∞ ning surati va maxraji yig'indisi sifatida aniqlash mumkin:

$$D_{yopiq}(s) = A(s) + B(s).$$

Gurvits bo'yicha barqarorlikni aniqlash uchun matritsa shunday tuzilganki, yopiq tsikli tizimning xarakterli polinomi koeffitsientlari a_{n+1} dan a_0 gacha bo'lgan asosiy diagonal bo'ylab joylashgan bo'lishi zarur. Uning o'ng va chap tomonida indeksleri (a_0, a_2, a_4, \dots yoki a_1, a_3, a_5, \dots) 2 oraliqda ajratilgan koeffitsientlar yoziladi. Shunda barqaror tizim uchun determinant va matritsaning barcha asosiy diagonal minorlari noldan katta bo'lishi zaruriy va yetarlidir.

Agar kamida bitta determinant nolga teng bo'lsa, u holda tizim barqarorlik chegarasida bo'ladi.

Agar kamida bitta determinant manfiy bo'lsa, u holda musbat yoki nol determinantlar sonidan qat'i nazar, tizim beqaror hisoblanadi.

Misol – 2⁴. Ochiq tizimning uzatish funksiyasi quyidagi korinishga ega:

$$W_\infty(s) = \frac{2s^3+9s^2+6s+1}{2s^4+3s^3+s^2} = \frac{B(s)}{A(s)}.$$

Yopiq tizimning Gurvits bo'yicha barqarorligini aniqlash talab etiladi.

Buning uchun yopiq tsikli tizimning xarakterli polinomi aniqlanadi:

$$D(s) = A(s) + B(s) = 2s^4 + 3s^3 + s^2 + 2s^3 + 9s^2 + 6s + 1.$$

Yopiq tsikli tizimning xarakterli polinomi darajasi $n = 4$ bo'lganligi uchun matritsa 4×4 xajmda bo'ladi. Yopiq tsikli tizimning xarakterli polinomi koeffitsiyentlari quyidagicha bo'ladi:

⁴ <https://hromatron.narod.ru/lekcii-po-asu/kriterii-ustoychivosti.htm>

$$a_4 = 2, a_3 = 5, a_2 = 10, a_1 = 6, a_0 = 1.$$

Matritsa quyidagi ko`rinishda bo`ladi:

$$\begin{pmatrix} 5 & 6 & 0 & 0 \\ 2 & 10 & 1 & 0 \\ 0 & 5 & 6 & 0 \\ 0 & 2 & 10 & 1 \end{pmatrix}.$$

1-qator 3-qatorga, 2-qator 4-qatorga mos tushishligiga ahamiyat bering. Aniqlovchilar:

$$\Delta_1 = 5 > 0,$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 5 & 6 \\ 2 & 10 \end{vmatrix} = 5 \times 10 - 2 \times 6 = 38 > 0,$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 5 & 6 & 0 \\ 2 & 10 & 1 \\ 0 & 5 & 6 \end{vmatrix} = (5 \times 10 \times 6 + 6 \times 1 \times 0 + 2 \times 5 \times 0) - (0 \times 10 \times 0 + 5 \times$$

$$5 \times 1 + 2 \times 6 \times 6) = 209 > 0,$$

$$\Delta_4 = 1 \times \Delta_3 = 1 \times 209 = 209 > 0.$$

Har bir aniqlovchilar musbat bo`lganligi uchun boshqaruv tizimi barqaror.

4. Mixaylov mezon. Yuqorida tavsiflangan barqarorlik mezonlari, agar tizimning uzatish funksiyasida kechikish bo`lsa, ishlamaydi. Kechikishli uzatish funksiyasini quyidagi ko`rinishda yozish mumkin:

$$W_\infty(s) = \frac{B(s)}{A(s)} e^{\tau s},$$

bu erda τ – kechikish.

Bunday holda, yopiq tizimning xarakteristik ifodasi ko`phad (polinom) bo`lmaydi va uning ildizlarini aniqlab bo`lmaydi. Bu holatda barqarorlikni aniqlash uchun Mixaylov va Nyquist chastota mezonlari qo`llaniladi.

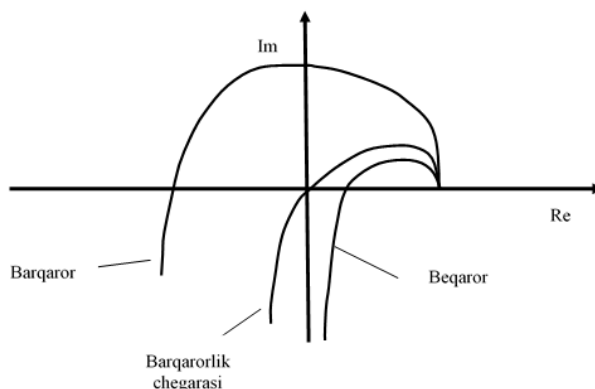
Mixaylov mezonini qo`llash tartiblari:

1) Yopiq tizimning xarakteristik ifodasi yoziladi:

$$D_{kech}(s) = A(s) + B(s) e^{\tau s}.$$

2) $s = j\omega$ deb qabul qilinadi: $D_{kech}(j\omega) = Re(\omega) + Im(\omega)$.

3) Mixaylov godografi (3-rasm) tenglamasi $D_{kech}(j\omega)$ yoziladi va kompleks tekislikda egri chiziq quriladi.



3-rasm. Mixaylov godografi.

Boshqaruv tizimining barqarorligi uchun Mixaylov godografi musbat real yarim o'qda $\omega = 0$ dan boshlanib chastotaning ω 0 dan ∞ gacha ortib borishida ketma-ket ijobiy yo'nalishda (soat miliga teskari) n kvadrantni aylanishi zaruriy va yetarlidir, bu erda n - xarakterli polinomning darajasi.

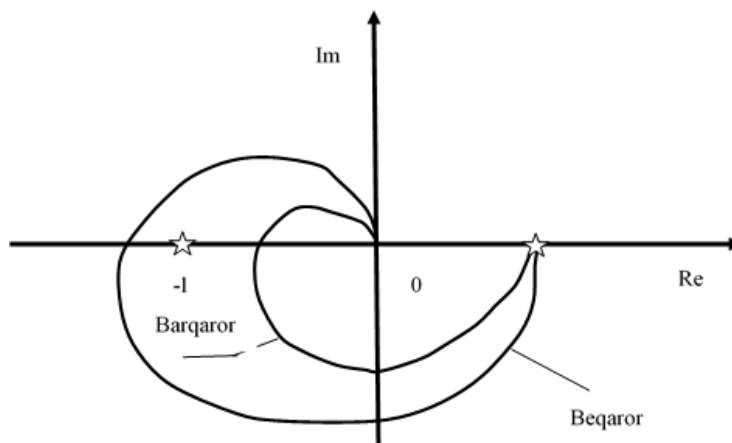
Agar Mixaylovning godografi koordinatalarning boshidan o'tsa, u holda tizim barqarorlik chegarasida deyiladi.

5. Nyquist mezon. Bu mezon Mixaylov mezoniga o'xshaydi, lekin tizimning amplituda-faza xarakteristikasida (AFX) o'rinli va shuning uchun ham hisob-kitoblari murakkabroq:

$$W_{\infty}(s) = \frac{B(s)}{A(s)}$$

Ketma-ketlikgi quyidagicha:

- 1) Ochiq tsikli tizimning uzatish funksiyasi aniqlanadi.
- 2) O'ng ildizlar soni m aniqlanadi.
- 3) $s = j\omega$ almashtirish amalga oshiriladi: $W_{\infty}(j\omega)$.
- 4) Ochiq tizimning AFX quriladi.



4-rasm. Nyquist mezonining qurilishi.

Tizimning barqarorligi uchun chastotaning ω 0 dan ∞ gacha ortishida AFX $W_{\infty}(j\omega)$ nuqtani $(-1; 0)$ m marta qamrab olishi zarur va yetarli, bu yerda m – ochiq tizimning o'ng ildizlari.

Agar AFX $(-1; 0)$ nuqtadan o'tsa, u holda yopiq tizim barqarorlik chegarasida bo'ladi.

Agar ochiq tsikli tizimning xarakteristik tenglamasi $A(s) = 0$ hech qanday ildizlarga ega bo'lmasa (ya'ni, $m = 0$), u holda yopiq tsikli tizim barqaror bo'ladi, agar ochiq tsikli tizimning AFX $W_{\infty}(j\omega)$ $(-1; 0)$ nuqtani qamrab olmagan bo'lsa, aks holda tizim beqaror (yoki barqarorlik chegarasida) bo'ladi (4-rasm).

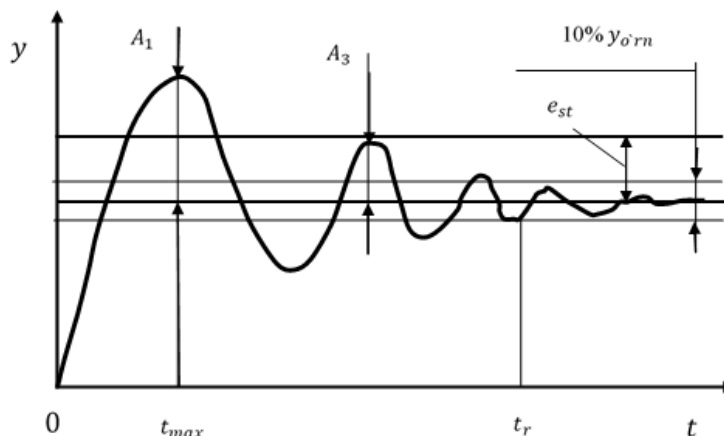
6. Sifat ko'rsatkichlari. Agar tadqiq etilayotgan boshqaruv tizimi barqaror bo'lsa, unda ushbu tizimda rostlash (boshqarish) qanchalik yaxshi sodir bo'ladi va u texnologik talablarga javob beradimi, degan savol tug'ilishi mumkin. Amalda, boshqaruv sifatini o'tish egri grafigidan vizual tarzda aniqlash mumkin, ammo aniq raqamli qiymatlarni beradigan aniq usullar ham mavjud.

Sifat ko'rsatkichlari 4 guruhga bo'linadi:

- 1) bevosita - to'g'ridan-to'g'ri o'tish jarayoni egri chizig'idan aniqlanadi;
- 2) ildizli - xarakteristik ko'phadning ildizlari bilan aniqlanadi;

- 3) chastota - chastota xususiyatlariga ko'ra aniqlanadi;
- 4) integral - funksiyalarni integrallash orqali olinadi.

7.1. Bevosita sifat ko'rsatkichlari. Bularga quyidagilar kiradi: so'nish darajasi ψ , ortiqcha rostlash σ , statik xatolik e_{st} , rostlash vaqti t_r va boshqalar.



5-rasm. Obyektning tebranishli o'tish egri chizig'i.

Obyektdan olingan o'tish egri chizig'i tebranishli ko'rinishiga ega deb faraz qilaylik (6.5-rasm).

5-rasmdagi grafikdan *chiqish kattaligining y_o'rn o'rnatilgan qiymati* aniqlanadi. So'nish darajasi ψ quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$\psi = 1 - \frac{A_3}{A_1}$$

bu erda A_1 va A_3 mos ravishda o'tish egri chizig'ining 1 va 3 amplitudalari.

Ortiqcha rostlash σ quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$\sigma = \frac{y_{max} - y_{o'rn}}{y_{o'rn}} 100\%,$$

bu erda y_{max} - o'tish egri chizig'ining maksimal qiymati.

Statik xatolik: $e_{st} = x - y_{o'rn}$, x - kirish qiymati.

Birinchi maksimumga erishish vaqti t_{max} grafik bo'yicha aniqlanadi.

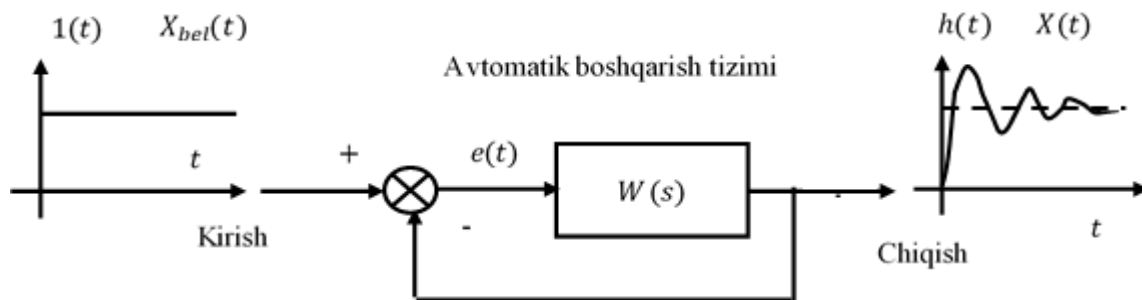
Rostlash vaqti t_r quyidagicha aniqlanadi: barqarorlik chegarasidan mumkin bo'lgan chetga og'sh aniqlanadi: $\Delta = 5\% y_{o'rn}$ va barqarorlik chegarasidan ikki tarafga 2Δ qalinlikda to'g'ri chiziqlar o'tkaziladi ("trubka"). Rostlash vaqti t_r ana shu chegarani ("trubka"ni) $y(t)$ tomonidan kesib o'tgan oxirgi nuqtaga mos keladi.

7.1.1. Pog'onali funksiya ta'sirida o'tish jarayoni sifatini baholash. Sifatni to'g'ridan-to'g'ri baholash boshqaruv tizimining o'tish xarakteristikasi $h(t)$ grafigi bo'yicha aniqlanadi, buning uchun tizimga birlik pog'onali funktsiya ta'sir qilinadi:

$$1(t) = \begin{cases} 1 & \leftarrow t > 0, \\ 0 & \leftarrow t \leq 0, \end{cases}$$

va nol boshlang'ich sharoitlarda yoki kirishga rostlanadigan (boshqariladigan) o'zgaruvchining $X(t)$ nominal yoki boshqa belgilangan qiymatiga mos keladigan amplitudali pog'onali funktsiya qo'llanilganda rostlanadigan o'zgaruvchining o'tish egri chizig'i bo'yicha aniqlanadi.

Struktura sxemasi 6-rasmda ko'rsatilgan birlik manfiy teskari bog'lanishli boshqaruv tizimini ko'rib chiqamiz.

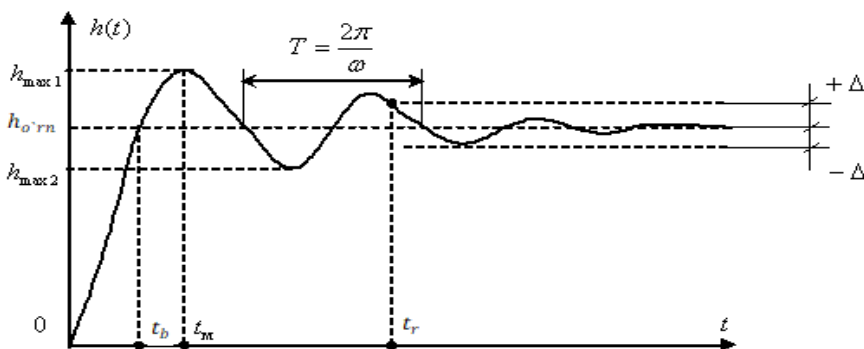


6-rasm. Birlik manfiy teskari bog'lanishli boshqaruv tizimi struktura sxemasi.

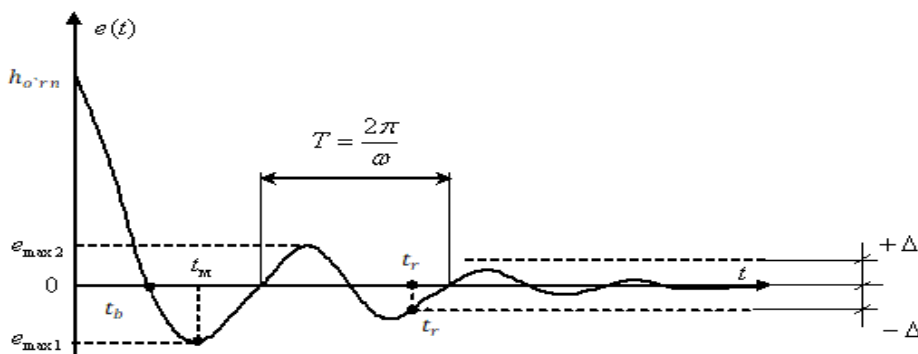
Tizimning kirishiga pog'onali signal berilgan, ushbu kirish signaliga tizimning aks ta'siri uning chiqishda kuzatilishi mumkin, bundan tashqari boshqaruv xatoligining o'zgarishi o'tish jarayoni sifatida qaralishi mumkin:

$$e(t) = X_{bel}(t) - X(t).$$

Chiqish signali va boshqaruv xatosidagi o'zgarishlarning taxminiy grafiklari mos ravishda 7 va 8-rasmlarda ko'rsatilgan.



7-rasm. Chiqish signali o'zgarishlarning taxminiy grafigi.



8-rasm. Boshqaruv xatosidagi o'zgarishlarning taxminiy grafigi.

7 va 8-rasmlarda ko'rsatilgan o'tish jarayonlari sifatining to'g'ridan-to'g'ri baholarini ko'rib chiqamiz:

1. t_r - minimal vaqt, ushbu vaqt tugagandan keyin boshqariladigan kattalik (o'zgaruvchi) belgilangan aniqlikdagi o'rnatilgan qiymatga eng yaqin holatlarda bo'ladi:

$$|h(t) - h_{o'rn}| \leq \Delta, \Delta = const.$$

bu erda Δ - barqaror holat qiymatining $h_{o'rn}$ foizi sifatida oldindan o'rnatiladi, bu erda maxsus talablar mavjud bo'lmasa - $\Delta\% = 5\%$ qabul qilinadi.

2. σ - ortiqcha rostlash - nisbiy birlik yoki foizlarda ifodalangan belgilangan qiymatdan maksimal og'ish:

$$\sigma = \frac{h_{max1} - h_{o'rn}}{h_{o'rn}} 100\% \text{ yoki } \sigma = \frac{|e_{max1}|}{e(0)} 100\% = \frac{|e_{max1}|}{h_{o'rn}} 100\% .$$

Odatda, ortiqcha rostlash $\sigma \approx 10 \div 30\%$ qiymatda o'rnatiladi, ba'zida jarayonlar sifatiga $\sigma = 0\%$ talabi ham qo'yiladi, masalan, sanoat robotlarining manipulyatorlari uchun joylashuvni aniqlash tizimlariga ushbu talab qo'yilishi mumkin.

3. ω - tebranishlar chastotasi:

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

bu erda T - tebranuvchi jarayonlar uchun tebranishlar davri.

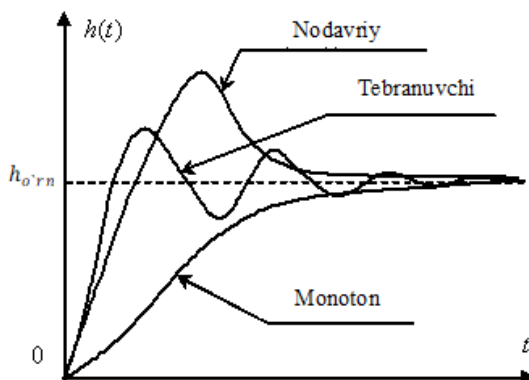
4. N - rostlash vaqti t_r davomida $h(t)$ yoki $e(t)$ larning to'liq tebranishlari soni, tebranishlar soniga nisbatan odatiy talablar - $N \approx 1 \div 2$, ba'zi tizimlarda tebranishlar soniga $N = 0$ cheklovi ham qo'yiladi, masalan, sezilarli lyuftga ega mexanik qurilmalarda (uzatmalarda).

5. t_m - birinchi maksimalga erishish vaqti.

6. t_b - o'tish jarayonining ko'tarilish vaqti, o'tish jarayonining boshlanishidan grafikning barqaror holat qiymati chizig'ini birinchi bo'lib kesib o'tguniga qadar bo'lgan vaqt.

7. K - ikki qo'shni o'sish modullarining nisbatiga teng bo'lgan so'nish dekrementi:

$$K = \frac{|h_{max1} - h_{o'rn}|}{|h_{max2} - h_{o'rn}|}$$



9-rasm. Tebranuvchi, nodavriy va monoton jarayonlarning taxminiy ko'rinishlari.

Yuqorida sanab oʻtilgan koʻrsatkichlar, agar boshqaruv tizimlarini loyihalash yoki tadqiq qilish boʻyicha maxsus texnik topshiriqlarda talab qilinsa, boshqa koʻrsatkichlar bilan toʻldirilishi mumkin.

Pogʻonali taʼsir paytida yuzaga keladigan barqaror oʻtish jarayonlari odatda uch guruhga boʻlinadi:

1. Monoton jarayonlar. Chiqish miqdorning vaqtga nisbatan birinchi hosilasi ishorasini oʻzgartirmaydigan jarayonlar.

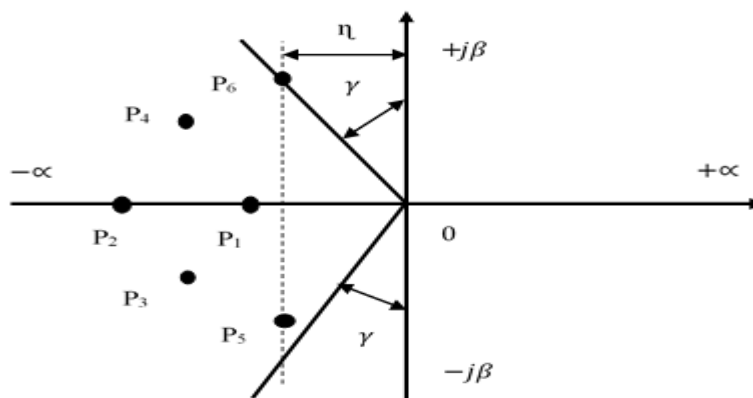
2. Nodavriy (Aperiodik) jarayonlar. Hosila ishorasini koʻpi bilan bir marta oʻzgartiradi.

3. Tebranuvchi jarayonlar. Hosilaning ishorasi davriy oʻzgarib turadi.

9-rasmda tebranuvchi, aperiodik (nodavriy) va monoton jarayonlarning taxminiy koʻrinishi keltirilgan.

7.2. Ildizli sifat koʻrsatkichlari. Ildizli sifat koʻrsatkichlariga quyidagilar kiradi: tebranuvchanlik darajasi m , barqarorlik darajasi η va boshqalar.

Ushbu koʻrsatkichlar xarakteristik polinomning ildizlari boʻyicha aniqlanganligi uchun oʻtish egri chizigʻini qurish shart emas. Buning uchun xarakteristik polinomning ildizlari kompleks tekislikda belgilab chiqiladi va shu boʻyicha aniqlanadi (10-rasm).



10-rasm. Xarakteristik polinomning ildizlari kompleks tekislikda belgilanishi.

Barqarorlik darajasi η oʻng tarafida ildizlar boʻlmagan chegara sifatida aniqlanadi:

$$\eta = \min |Re(s_i)|,$$

bu erda $Re(s_i)$ – ildizning s_i haqiqiy qismi.

Tebranuvchanlik darajasi m kompleks tekislikdagi burchak $\gamma: m = tg\beta$ orqali hisoblanadi. γ ni aniqlash uchun barcha ildizlarni kompleks tekislikda cheklovchi (va qamrab oluvchi) ikkita nur (chiziq) oʻtkaziladi. γ – ana su nurlar va mavhum oʻq orasida burchak. Tebranuvchanlik darajasi m quyidagi formula bilan ham aniqlanishi mumkin:

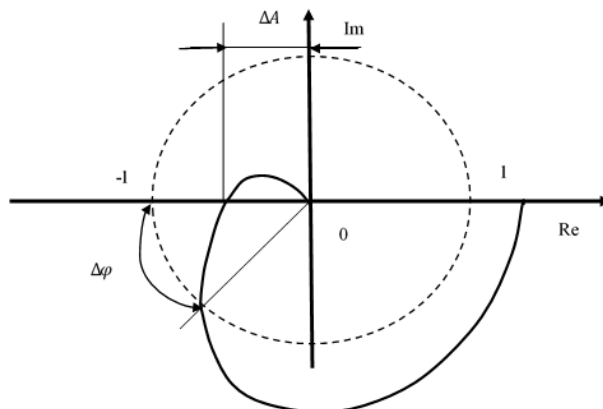
$$m = \min \left| \frac{Re(s_i)}{Im(s_i)} \right|$$

7.3. Chastotali sifat koʻrsatkichlari. Chastota sifati koʻrsatkichlarini aniqlash uchun ochiq tsikli tizimning amplituda-faza xarakteristikasini (AFX) va yopiq konturli tizimning amplituda-chastota xarakteristikasini (ACHX) qurish kerak boʻladi (11-rasm).

AFX boʻyicha zaxiralar aniqlanadi: ΔA – amplituda boʻyicha, $\Delta\varphi$ – faza boʻyicha.

ΔA amplituda boʻyicha zaxira AFXning manfiy real yarim oʻq bilan kesishgan nuqtasi bilan aniqlanadi.

$\Delta\varphi$ faza bo'yicha zaxirani aniqlash uchun birlik radiusi bilan koordinata markazi bo'yicha aylana quriladi. $\Delta\varphi$ zaxirasi qurilgan doira bilan kesishgan nuqta bilan aniqlanadi.



11-rasm. Yopiq konturli tizimning amplituda-chastota xarakteristikasi.

Yopiq tsikli tizimning ACHXga asoslanib *tebranish ko'rsatkichlari* aniqlanadi: belgilangan topshiriq bo'yicha M va xatolik bo'yicha M_E . Bular mos holda topshiriq bo'yicha ACHX va xatolik bo'yicha ACHXlarning maksimumlariga to'g'ri keladi.

Sifat ko'rsatkichlari o'rtasidagi munosabatlar. Yuqorida tavsiflangan sifat ko'rsatkichlari ma'lum munosabatlar bilan o'zaro bog'langan:

$$\psi = 1 - e^{-2xm}; t_r = \frac{3}{\eta}; \psi = 1 - M \frac{x}{m}; M = \frac{m^2+1}{2m}.$$

Yuqorida ko'rib chiqilgan boshqaruv tizimlarining sifat mezonlari va ko'rsatkichlarini MATLAB dasturiy paketida samarali tadqiq etish mumkin.

Xulosalar. Barqarorlik boshqaruv tizimlarining normal ishlashini ta'minlash uchun zaruriy shartlardan biri hisoblanadi. Shuning uchun boshqaruv tizimining faoliyati va barqarorligini baholash mezonlari va ko'rsatkichlarini aniqlash boshqarish nazariyasining muhim tarkibiy qismi hisoblanadi. Boshqaruv tizimi barqarorligining sifat mezonlari va ko'rsatkichlari: ildizli mezon, Stodola mezoni, Gurvits mezoni, Mixaylov mezoni, Nyquist mezoni, sifat ko'rsatkichlari, bevosita sifat ko'rsatkichlari, ildizli sifat ko'rsatkichlari, chastotali sifat ko'rsatkichlari nazariy jixatdan yoritildi; ularning aniqlanishi matematik ifodalarda va grafiklarda taqdim etildi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Рыкин О.Р. Исследование и синтез линейных одномерных САУ в инструментарию ЛТИ-моделей Матлаба. Учебное пособие по лабораторным работам / Рыкин О.Р. – СПб.: Политехн. Ун-т, 2016. – 167 с.
2. Свердлов Р.В. Линейные системы автоматического управления. Основы анализа, начала синтеза: учеб. пособие. Изд.2-е перераб. и доп./ Р.В. Свердлов; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2021. – 159 с.
3. Туманов М.П. Теория управления. Теория линейных систем автоматического управления: Учебное пособие. – МГИЭМ. М., 2005, 82 с.
4. Тюкин В. Н. Теория управления: Конспект лекций. Часть 1. Обыкновенные линейные системы управления. – 2-е изд., испр. и доп. - Вологда : ВоГТУ, 2000. - 200 с.: ил. ISBN 5-87851-110-X
5. <https://hromatron.narod.ru/lekci-po-asu/kriterii-ustoychivosti.htm>