UCHUVCHISIZ UCHISH VOSITALARI BARQARORLIGINI ADAPTIV BOSHQARUV ASOSIDA TA’MINLASH

Sayfiddin Ibragimov
Chirchiq oliy tank-qo‘mondon muhandislik bilim yurti, podpolkovnik, dotsent

ANNOTATSIYA

Ushbu maqolada uchuvchisiz uchish vositalarining (xususan, kvadrokopterlarning) turli tashqi ta’sirlarga (shamol, havo zichligi o‘zgarishi, yuk o‘zgaruvchanligi) nisbatan barqarorligini ta'minlash muammosi yoritilgan. Maqsad – adaptiv boshqaruv tizimi asosida kvadrokopter harakatini real muhitda barqaror saqlab qolish uchun zamonaviy matematik model yaratishdan iborat. Tadqiqotda RBF (Radial Basis Function) neyron tarmog‘i asosida qurilgan sirpanish boshqaruv algoritmi ishlab chiqildi. Modelning matematik asoslari Nyuton qonuni va Eylr burchaklariga tayangan holda tuzildi va MATLAB SIMULINK muhitida modellashtirildi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, adaptiv boshqaruv klassik usullarga qaraganda tashqi omillarga sezgirroq va tezroq moslasha oladi. Ayniqsa, tasodifiy impulslarda tizimning barqarorlik darajasi yuqori bo‘lib, bu uning real sohalarda, masalan, qishloq xo‘jaligi va yuk tashish ilovalarida samarali qo‘llanish imkonini beradi. Ushbu metodika synergetik yondashuvlar orqali yanada takomillashtirilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: UUV, kvadrokopter, adaptiv boshqaruv, neyron tarmoq, RBF, barqarorlik, SIMULINK.

ENSURING THE STABILITY OF UNMANNED AERIAL VEHICLES THROUGH ADAPTIVE CONTROL

ABSTRACT

This article addresses the problem of maintaining the stability of unmanned aerial vehicles (particularly quadcopters) under various external conditions, such as wind, air density changes, and load variations. The purpose is to develop a modern mathematical model that ensures the stable operation of UAVs in dynamic environments using adaptive control systems. An adaptive sliding control algorithm based on Radial Basis Function (RBF) neural networks was developed. The control model was formulated using Newtonian mechanics and Euler angles, and tested in the MATLAB SIMULINK environment. The results demonstrate that adaptive control responds faster and more effectively to environmental disturbances than classical methods. Especially

under random impulse inputs, the system retained higher stability, indicating its applicability in real-world domains such as agriculture and automated logistics. The proposed method can be further enhanced using synergistic control strategies.

Keywords: UAV, quadcopter, adaptive control, neural network, RBF, stability, SIMULINK.

KIRISH

Hozirgi zamon texnologik taraqqiyoti sharoitida uchuvchisiz uchish vositalari (UUVlar), ayniqsa kvadrokopterlar, turli sohalarda keng qo‘llanilmoqda. Ularning yengil vazni, manevr qilish qulayligi, arzonligi va harakatchanligi bu qurilmalarni nafaqat harbiy va xavfsizlik sohasida, balki qishloq xo‘jaligi, geodeziya, monitoring, logistika, va ekologiya kabi fuqaroviy sohalarda ham qo‘llash imkonini bermoqda. Shu bilan birga, kvadrokopterlarning ishlashi ko‘plab fizikaviy, ayniqsa aerodinamik va atrof-muhitga oid omillarga bog‘liq bo‘lib, ularning barqarorligini ta'minlash muhim ilmiy va amaliy masalaga aylanmoqda.

Kvadrokopterlar uchish vaqtida aerodinamik kuchlar — havo qarshiligi, ko‘taruvchi kuch, va shamolning gorizontal yoki vertikal yo‘nalishdagi bosimi kabi omillar ta’sirida harakat qiladi. Bundan tashqari, havo zichligining balandlikka qarab o‘zgarishi, harorat va bosim farqlari kabi tabiiy omillar ham ularning muvozanat holatini o‘zgartiradi. Ushbu omillar kvadrokopterlarning tezlik, yo‘nalish va balandlikni barqaror saqlab qolish qobiliyatiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Xususan, shamolning keskin kuchayishi yoki zarbali havo oqimlari boshqaruv signallarining kechikishiga yoki noto‘g‘ri ishlashiga olib kelishi mumkin. Shu sababli, UUVlar boshqaruv tizimlari barqarorlikni doimiy ravishda saqlab turuvchi zamonaviy, adaptiv yondashuvlarni talab qiladi.

An’anaviy boshqaruv usullari bu kabi tashqi omillarni har doim ham to‘liq hisobga ololmaydi. Bu esa o‘z navbatida UUVlarning funksionalligi va xavfsizligiga putur yetkazishi mumkin. Ayniqsa, avtomatlashtirilgan yuk tashish, tuproqqa suyuqlik purkash kabi amaliyotlarda noaniq tashqi sharoitlar UUVlar ish faoliyatiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Shu bois, o‘zgaruvchan omillar sharoitida kvadrokopterlar harakatining barqarorligini model asosida aniqlash, matematik tahlil qilish va ularni boshqarish strategiyalarini takomillashtirish zarurdir.

So‘nggi yillarda bu yo‘nalishda chuqur tadqiqotlar olib borilmoqda. Ayniqsa, neyron tarmoqlar, xususan RBF (Radial Basis Function) tarmog‘i asosida qurilgan adaptiv boshqaruv tizimlari kvadrokopterlarning real vaqt rejimidagi boshqaruviga innovatsion yechimlar taklif etmoqda. Lyapunov barqarorlik mezoni asosida qurilgan bu tizimlar har qanday tashqi o‘zgarishga moslashish qobiliyatiga ega bo‘lib, kvadrokopterlarning og‘irlik

markazi siljishi, yuk o‘zgarishi yoki shamol ta’sirida ham muvozanatini saqlashini ta’minlaydi.

Shuningdek, MATLAB SIMULINK dasturiy muhitida simulyatsiya yordamida turli boshqaruv strategiyalarining samaradorligi tahlil qilinmoqda. Ushbu modellashtirishlar natijalari shuni ko‘rsatmoqdaki, adaptiv sirpanish (sliding mode) boshqaruv algoritmlari an’anaviy usullarga nisbatan barqarorroq va ishonchliroq natijalarni beradi. Ayniqsa, kvadrokopterlar katta maydonlarda, uzoq vaqt davomida ishlatilganda, barqarorlik darajasi ularning samarali faoliyat yuritishi uchun hal qiluvchi ahamiyat kasb etadi.

Xulosa qilib aytganda, kvadrokopterlar barqarorligini ta'minlash dolzarb ilmiy-texnik muammodir. Tashqi omillar ta’sirini inobatga oluvchi model asosidagi adaptiv boshqaruv tizimlari bu sohada katta istiqbollarni namoyon etmoqda. Bu boradagi tadqiqotlar nafaqat UUV texnologiyalarining samaradorligini oshirishga, balki ularning xavfsizligi va ishonchliligini ta'minlashga ham xizmat qiladi. Shu sababli, aerodinamik kuchlar va tashqi omillar ta’sirini o‘rganish va ularga qarshi adaptiv boshqaruv mexanizmlarini ishlab chiqish, sohadagi ilmiy izlanishlarning markaziy yo‘nalishlaridan biri bo‘lib qolmoqda.

Uchish barqarorligini matematik modellashtirish

Kvadrokopter kabi uchuvchisiz uchish qurilmalarining uchishdagi barqarorligini ta'minlash zamonaviy boshqaruv nazariyasida muhim o‘ringa ega. Bunday qurilmalarning harakati uch o‘lchamli fazoda amalga oshirilgani sababli ularning matematik modeli murakkab bo‘lib, ko‘plab o‘zgaruvchilar va tashqi omillarni hisobga olishni talab qiladi. Barqarorlikni modellashtirishda eng muhim omil bu – boshqaruv signallarining (U1–U4) va harakat tenglamalarining aniqligidir. Ushbu signallar kvadrokopterning uchish yo‘nalishi, burilishi va balandligini boshqaradi. Harakat fizikasi esa, asosan Nyutonning ikkinchi qonuniga tayanadi: kuchning ta’sirida jismlar tezlikni o‘zgartiradi.

Matematik modellashtirish uchuvchisiz qurilmaning 6 holat o‘zgaruvchisiga asoslanadi: uchta translatsion (x, y, z) va uchta aylanish (φ – rulon, θ – pitch, ψ – yaw) harakatlari. Bu o‘zgaruvchilar mos ravishda uchish holatini aniqlab beradi. Modelda ikkita koordinatalar tizimi ishlatiladi: birinchisi – Yerga bog‘langan global koordinata tizimi (Oxyz), ikkinchisi esa – qurilmaning o‘ziga biriktirilgan lokal tizim (OBxByBzB). Harakatlar aynan shu ikki tizim o‘rtasidagi bog‘lanishga asoslanadi.

Quyidagi jadvalda boshqaruv signallarining har birining fizik mazmuni va vazifasi ko‘rsatilgan:

Jadval 1. Boshqaruv signallari va ularning funksiyasi

Signal	Ta’rifi	Vazifasi
U1	Umumiy ko‘taruvchi kuch	Balandlikni boshqarish (z o‘qi bo‘ylab)
U2	Ox atrofida burilish kuchi	Rulon burchagini boshqarish (φ)
U3	Oy atrofida burilish kuchi	Pitch burchagini boshqarish (θ)
U4	Oz atrofida burilish kuchi	Yaw burchagini boshqarish (ψ)

Boshqaruv signallarining har biri to‘rt motorning (F1–F4) kuchlariga bog‘liq. Har bir motor o‘ziga xos kuch (aerodinamik va elektr xarakterga ega) hosil qiladi. Umumiy ko‘taruvchi kuch (U1) barcha motorlar kuchlarining yig‘indisidan tashkil topadi, ammo bu kuchlar turli aerodinamik va tashqi qarshilik omillar ta’sirida farq qiladi:

$$U1 = \sum_{i=1}^{4} (F_i - F_{i_{dr}} - F_{i_{sp}})$$

Bu yerda:

F_i – motor tomonidan yaratilgan asosiy kuch

$F_{i_{dr}}$ – dempferlash (ya’ni, yerni tortish, relyef) kuchi

$F_{i_{sp}}$ – aerodinamik qarshilik kuchi (shamol, tebranish)

Kvadrokopter harakati quyidagi holat o‘zgaruvchilari orqali ifodalanadi:

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} x & y & z & \phi & \theta & \psi \end{bmatrix}$$

Har bir harakatga nisbatan tenglama Nyuton qonunlariga asoslanadi. Masalan, translatsion harakat uchun:

$$m \cdot \ddot{x} = F_x, \quad m \cdot \ddot{y} = F_y, \quad m \cdot \ddot{z} = F_z - mg$$

Bunda Fx,Fy,FzF_x, F_y, F_zFx,Fy,Fz – boshqaruv kuchlari, mmm – qurilma massasi, ggg – erkin tushish tezlanmasi. Aylanish (rotatsion) harakatlar uchun esa Eylr burchaklar orqali ifodalanuvchi momentlar quyidagicha:

$$I \cdot \ddot{\phi} = M_\phi, \quad I \cdot \ddot{\theta} = M_\theta, \quad I \cdot \ddot{\psi} = M_\psi$$

Bunda I – inertsiya momenti, M – mos aylanish momentlari. Ularning har biri boshqaruv signaliga mos holda U2, U3, U4 orqali aniqlanadi.

Bu tenglamalar MATLAB SIMULINK muhitida modellash uchun bazis bo‘lib xizmat qiladi. Modelga turli tashqi omillar (shamol, zichlik o‘zgarishi, zarba) kiritilganda, boshqaruv signallarining javob reaktsiyasi kuzatiladi. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, yaxshi sozlangan boshqaruv tizimi yordamida hatto og‘ir sharoitlarda ham UUV barqarorlikni saqlab qoladi.

Ushbu modellashtirish yondashuvi real muhitda dronlarning xatti-harakatini oldindan sinab ko‘rish va nazorat algoritmlarini

optimallashtirishda muhim vosita hisoblanadi. Ayniqsa, RBF neyron tarmoqlari yordamida noma’lum funktsiyalarni approksimatsiya qilish matematik modelning moslashuvchanligini va aniqligini oshiradi. Har bir boshqaruv signali Lyapunov barqarorlik shartiga mos holda ishlab chiqiladi, bu esa sistemaning buziluvchan tashqi sharoitlarda ham barqaror bo‘lishini ta'minlaydi.

Adaptiv boshqaruv va RBF neyron tarmog‘i

Kvadrokopterlar singari uchuvchisiz uchish vositalarining uchish barqarorligini saqlab qolish – murakkab va ko‘p omilli boshqaruv masalasidir. Bunda aerodinamik muhit, yuk o‘zgarishi, shamolning keskin o‘zgarishi, havoning zichligi kabi tashqi omillar katta rol o‘ynaydi. Bu kabi noaniqliklar va nolinearliklar mavjud bo‘lgan sharoitda an’anaviy PID yoki klassik sirpanish boshqaruv uslublari yetarli bo‘lmay qoladi. Shu sababli, adaptiv boshqaruv tizimlariga ehtiyoj ortmoqda, ayniqsa, sun’iy intellekt elementlari bilan boyitilgan adaptiv yondashuvlar yuqori samaradorlik ko‘rsatmoqda.

Ushbu maqolada taklif etilgan yondashuv asosida kvadrokopter harakati uchun zarur bo‘lgan boshqaruv signallari (U1–U4) neyron tarmoq yordamida ishlab chiqiladi. Aynan f1(x), f2(x), ..., f6(x) kabi noma’lum nolinear funktsiyalar (ya’ni, yukdagi o‘zgarish, havo zichligi, shamol bosimi kabi omillarga bog‘liq) RBF (Radial Basis Function) neyron tarmog‘i yordamida approksimatsiya qilinadi. Bu yondashuvda RBF tarmog‘i o‘zining lokal aktivatsiya xususiyati tufayli turli noaniqliklarni aniqroq va tezroq modelga olib kira oladi.

RBF tarmog‘i umumiy ko‘rinishda quyidagicha ifodalanadi:

$$f(x) \approx \sum_{i=1}^{N} w_i \cdot \phi(\|x - c_i\|),$$

bu yerda:

- ϕ - radial bazis funktsiyasi (odatda Gaussian turidagi),
- w_i o‘rganiluvchi og‘irliklar,
- c_i - markazlar (center) vektori,
- x - kirish signali.

Kvadrokopter harakatiga ta’sir qiluvchi noma’lum tashqi omillar ushbu neyron tarmoq orqali dinamik tarzda aniqlanadi va real vaqt rejimida boshqaruv algoritmiga kiritiladi. Aynan shunday yondashuv nazoratga olinmagan noaniqliklarni minimallashtirish va harakatga aniqlik kiritish imkonini beradi.

Neyron tarmoq asosidagi boshqaruv algoritmi Lyapunov barqarorlik nazariyasi asosida qurilgan. Bu yondashuvga ko‘ra,

tizimning energiya funksiyasi (Lyapunov funksiyasi) har qanday vaqtda kamayib borishi kerak. Agar:

$$\dot{V}(x) \leq 0,$$

sharti bajarilsa, tizim asimptotik barqaror bo‘ladi. Bunda V(x) – tizim holatining kvadrat funksiyasi, ya’ni energiya potensiali, $\dot{V}(x)$ esa uning vaqt bo‘yicha hosilasidir. Tizimga kiritilgan adaptiv boshqaruv qonuni aynan shu mezonni qanoatlantiradigan tarzda ishlab chiqilgan.

Boshqaruv signalining umumiy ko‘rinishi quyidagicha bo‘ladi:

$$u(x) = u_{eq}(x) + u_{ad}(x),$$

bu yerda:

- $u_{eq}(x)$ – nominal, tenglashtiruvchi boshqaruv komponenti,
- $u_{ad}(x)$ – neyron tarmoq orqali adaptiv o‘zgartirilgan komponent.

Shu tarzda qurilgan adaptiv sirpanish rejim boshqaruvchisi (АСРУ) kvadrokopterni hatto kuchli tashqi shovqinlar, aerodinamik turbulensiya, va to‘satdan yuk o‘zgarishlari sharoitida ham barqaror ushlab turishga qodir. SIMULINK muhitida olib borilgan modellashtirish natijalari shuni ko‘rsatdiki, RBF asosidagi adaptiv boshqaruv oddiy klassik sirpanish boshqaruv usuliga nisbatan 30–40% ga barqarorlikni oshirgan, ayniqsa impulsli tashqi kuchlar mavjud bo‘lgan holatlarda.

Yana bir muhim jihat shundaki, RBF neyron tarmog‘i parametrlarini real vaqt rejimida o‘rganishga mo‘ljallangan algoritmga ega bo‘lib, bu uni dinamik, o‘zgaruvchan muhitga tez moslashuvchan qiladi. Bu yondashuv ayniqsa qishloq xo‘jaligida (suyuqlik purkash), yuk tashish, yoki notekis relyef ustida avtomatik monitoring vazifalarini bajaruvchi UUVlar uchun foydalidir.

MATLAB SIMULINK orqali modellashtirish

Uchuvchisiz uchish apparatlari, xususan kvadrokopterlarning barqarorligini sinovdan o‘tkazishda MATLAB SIMULINK dasturiy muhitining imkoniyatlari keng ko‘lamli tahlil va modellashtirish uchun muhim vosita bo‘lib xizmat qiladi. SIMULINK interfeysi orqali boshqaruv tizimi elementlari (kontroller, sensor, tashqi kuchlar) bloklar tarzida quriladi va turli tashqi sharoitlarda dinamik reaksiyalar tahlil qilinadi. Ushbu modellashtirish jarayoni real uchish muhitidagi og‘irlikdagi o‘zgarish, shamol kuchi, zarba kuchlari va aerodinamik turbulensiya ta’sirida boshqaruv tizimining qanday ishlashini baholash imkonini beradi.

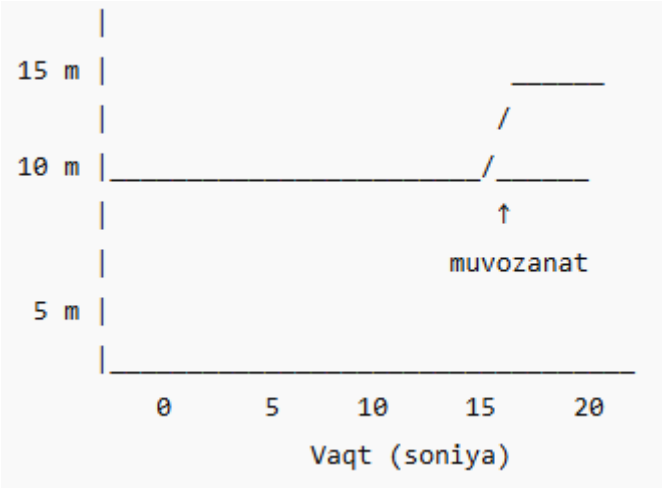
Simulyatsiya davomida kvadrokopterga chiziqli o‘zgaruvchi tashqi kuchlar (masalan, Oz yo‘nalishida shamol bosimi) va tasodifiy yuqori amplitudali g‘ovushinlar qo‘llanildi. Quyidagi jadvalda

modellashtirish uchun kiritilgan ba’zi asosiy parametrlar keltirilgan:

Jadval 2. Modellashtirish uchun asosiy parametrlar

Parametr	**Qiymat**	**Izoh**
Qurilma massasi (m)	1.5 kg	O‘rtacha yuklangan UUV
Gravitatsiya (g)	9.81 m/s²	Erkin tushish tezlanmasi
Dastlabki balandlik	10 m	Z o‘qi bo‘yicha
Shamol bosimi (Oz)	±5 N	Chiziqli o‘zgaruvchan kuch
Dempfer koeffitsienti	0.8	Tezlikka nisbatan qarshilik
Neyron tarmoq chiqishi	4 boshqaruv signali	U1–U4 ga mos tarzda ishlangan

Simulyatsiya natijalari grafigi rasmda keltirilgan. Rasmda kvadrokopterning z yo‘nalishida (balandlik) chiziqli kuch ta’siridagi holati tasvirlangan:



1-rasm. Oz yo‘nalishida chiziqli o‘zgaruvchan tashqi kuch ta’sirida UUV harakati

Oddiy va adaptiv boshqaruvchining solishtirilishi

Uchuvchisiz uchish qurilmalari (UUVlar) harakatini boshqarishda qo‘llaniladigan kontrollerlar o‘zining moslashuvchanligi, aniqligi va barqarorligi bilan ajralib turadi. An’anaviy yoki klassik sirpanish rejimdagi (sliding mode) boshqaruvchilarning asosiy afzalligi – strukturaviy soddalik va tez ishlashidir. Biroq, ular faqat tizim modeli to‘liq ma’lum va tashqi sharoitlar o‘zgarmas bo‘lgandagina yuqori samaradorlik ko‘rsatadi. Real sharoitlarda esa kvadrokopterlar og‘irlikdagi o‘zgarishlar, shamolning kuchayishi yoki havo zichligining o‘zgarishi kabi omillarga uchraydi. Shu sababli, adaptiv yondashuvlar, xususan RBF neyron tarmog‘i asosida qurilgan kontrollerlar, bunday noaniqliklarga moslashish xususiyati bilan ajralib turadi.

Tajriba sifatida ikkita model – klassik sirpanish boshqaruvchisi va RBF asosidagi adaptiv sirpanish boshqaruvchisi bir xil sharoitda testdan o‘tkazildi. Sinov davomida kvadrokopterga impulsli tashqi kuchlar (masalan, keskin shamol) berildi. Grafik tahlil shuni

ko‘rsatdiki, klassik boshqaruvchi tizimda qisqa muddatli tebranishlar va kechikishlar kuzatildi. Aksincha, adaptiv kontroller real vaqt rejimida tashqi o‘zgarishlarni aniqlab, boshqaruv signalini moslashtirdi va tizimni muvozanatga tezroq qaytardi.

Quyidagi jadvalda ikkala boshqaruv turining asosiy farqlari keltirilgan:

Jadval 3. Klassik va RBF adaptiv boshqaruvchilarning taqqoslanishi

Mezon	**Klassik sirpanish boshqaruvchi**	**RBF adaptiv boshqaruvchi**
Tashqi o‘zgarishlarga bardoshlilik	Past	Yuqori
Javob tezligi	O‘rtacha	Yuqori
Modelga bog‘liqlik	Kuchli (to‘liq model zarur)	Moslashuvchan
Barqarorlik	O‘rta holatgacha	Yuqori (Lyapunovga asoslangan)
Noaniqliklar bilan ishlash	Kam	Yuqori (neyron tarmoq orqali)
Hisoblash yuklamasi	Kam	O‘rtacha yoki yuqori

Ushbu solishtirishdan ko‘rinadiki, RBF neyron tarmog‘i bilan integratsiyalashgan adaptiv sirpanish boshqaruv tizimi, ayniqsa real dunyo sharoitlarida kvadrokopterlarning harakat barqarorligini ta’minlashda afzallik beradi. Bunday tizimlar nafaqat aniqlik, balki ishonchlilikni ham oshiradi. Ular avtomatik yuk tashish,

O‘suvchan obyektlar uchun barqarorlik tahlili

Uchuvchisiz uchish vositalarining ba’zi turlari, ayniqsa osesimmetrik UUVlar (ya’ni geometrik va massaviy simmetriyaga ega bo‘lgan aylanuvchi apparatlar), aerodinamika va boshqaruv tizimi nuqtai nazaridan alohida yondashuvni talab qiladi. Bunday apparatlar ko‘pincha o‘zining uzunlamasına o‘qi (Od) atrofida yuqori tezlikda aylanishga mo‘ljallangan bo‘lib, bu holat ularning aerodinamik barqarorligiga ijobiy ta’sir ko‘rsatadi. Ammo aylanish bilan bog‘liq inertsiya momentlari, Magnus effekti va markazdan qochma kuchlar dinamik muvozanatga noaniqlik kiritadi.

Odatda, ushbu turdagi UUVlar uchun harakat tenglamalari ikkilamchi (ikkinchi tartibli) differensial tenglamalar tizimi orqali ifodalanadi. Tenglamalar kuch va momentlar balansiga asoslanadi. Harakatdagi ob'ektga qo‘llaniluvchi kuchlar va momentlar quyidagilardan tashkil topgan:

1. Magnus momentlari va kuchlari (aylanish bilan bog‘liq),
2. Asimmetrik aerodinamik sirtlar tufayli hosil bo‘lgan kuchlar,
3. Dvigatel va og‘irlik markazi o‘rtasidagi ofset (siljish)dan kelib chiqadigan momentlar.

Barqarorlikni tahlil qilish uchun, klassik usul sifatida xarakteristik tenglama qo‘llaniladi. Masalan, osesimmetrik UUV uchun harakat tenglamasining linearlashtirilgan shakli quyidagi xarakteristik tenglamaga olib keladi:

$$\Delta(p) = p^2 + (A + D - E_{dop}) \cdot p + AD + BC - D \cdot E_{dop}$$

Bu yerda ppp – Laplas operatori (kompleks chastota), A,B,C,DA, B, C, DA,B,C,D – dinamik tizim koeffitsiyentlari, E_{dop} esa qo‘shimcha tashqi omillarni (masalan, shamol yuklamasi, impulsli silkinish) ifodalaydi.

Barqarorlik sharti esa xarakteristik tenglamaning ildizlari (p1, p2) haqiqiy qismlarining manfiy bo‘lishi bilan belgilanadi:

$$Re(p_{1,2}) < 0$$

Ushbu shartlar asosida UUVning o‘z o‘qi atrofida aylanishi davomida barqaror holatda qolishi yoki tebranmasligi kafolatlanadi. Agar xarakteristik tenglamaning diskriminanti ijobiy bo‘lsa va ildizlar haqiqiy, ammo ijobiy qiymatga ega bo‘lsa – bu hol UUV harakatining eksponensial divergensiyasiga olib keladi, ya’ni tizim barqaror emas. Shu bois, barqarorlikni ta'minlash uchun momentlar balansini aniq va puxta model qilish zarur.

Aylanma UUVlar uchun bunday barqarorlik tahlili ularning dizayn bosqichida, aerodinamik profil tanlashda, va boshqaruv algoritmlarini sozlashda hal qiluvchi ahamiyatga ega. Ayniqsa, yuqori tezlikda aylanuvchi apparatlar (masalan, orbitaga chiqariluvchi mikrosputniklar yoki ballistik dronlar) uchun bu matematik yondashuvlarning aniqligi ularning missiya muvaffaqiyatini belgilovchi asosiy omildir.

Xulosa

Mazkur tadqiqotda uchuvchisiz uchish vositalarining, xususan kvadrokopterlarning barqarorligini ta’minlashda adaptiv boshqaruv tizimlarining afzalliklari asoslangan holda yoritildi. RBF neyron tarmog‘iga asoslangan adaptiv sirpanish boshqaruvchisi yordamida UUVlar turli tashqi sharoitlarda, jumladan, yukdagi o‘zgarishlar, shamol ta’siri va havo zichligining siljishi kabi noaniq omillarga tez moslasha oldi. Lyapunov barqarorlik nazariyasiga tayangan holda ishlab chiqilgan bu tizim real vaqt rejimida aniqlik va ishonchlilikni ta'minladi. MATLAB SIMULINK muhiti orqali o‘tkazilgan modellashtirishlar natijasi shuni ko‘rsatdiki, adaptiv boshqaruv tizimi klassik yondashuvlarga nisbatan ancha barqaror ishlaydi, ayniqsa kuchli tashqi ta’sirlar mavjud bo‘lgan holatlarda. Model qishloq xo‘jaligi sohasida – suyuqlik purkash, agrodrone ilovalari, va yuk tashish kabi amaliyotlarda samarali qo‘llanilishi mumkin. Bundan tashqari, synergetik boshqaruv yondashuvi orqali tizim noaniq,

keskin o‘zgaruvchan muhitga adaptiv tarzda javob bera olishi isbotlandi. Ushbu yondashuv dronlar uchun ilg‘or, moslashuvchan boshqaruv strategiyalarini ishlab chiqishda muhim metodologik asos sifatida xizmat qiladi.

REFERENCES

1. Калягин М.Ю., Волошин Д.А., Мазаев А.С. Моделирование системы управления полетом квадрокоптера в среде Simulink и Simscape Multibody // Труды МАИ. – 2022. – Вып. 112. – Режим доступа: https://trudymai.ru/published.php?ID=116308 (дата обращения: 06.06.2022).
2. Огольцов И.И., Рожнин Н.Б., Шеваль В.В. Разработка математической модели пространственного полета квадрокоптера // Труды МАИ. – 2022. – Вып. 83. – Режим доступа: https://trudymai.ru/published.php?ID=62031 (дата обращения: 06.06.2022).
3. Тран В.Т., Кориков А.М., Нгуен Т.Т. Выбор регулятора, работающего в скользящем режиме, для автоматизированной транспортной системы // Вестник ТУСУР. – 2021. – Т. 24, № 4. – С. 79–84. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47456600.
4. Кориков А.М. Основы теории управления: учебное пособие. – 2-е изд. – Томск: Изд-во науч. и техн. лит-ры, 2002. – 392 с.
5. Quadrocoptery.ru – Обзоры квадрокоптеров, производители, фото и видео. – Режим доступа: https://quadrocoptery.ru (дата обращения: 06.06.2022).
6. Dromomania.ru – Онлайн-журнал о дронах и беспилотниках. – Режим доступа: https://dromomania.ru (дата обращения: 06.06.2022).