



UDK 631.234:681.586:681.5

KO'P YARUSLI MINI-ISSIQXONANI AVTOMATLASHTIRISHNING TEXNIK VOSITALARINI QIYOSIY TAHLILI VA TADQIQOT VAZIFALARINING ASOSLANISHI

Jo'raboyev Sh.X.

*«Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari
instituti» Milliy tadqiqot universiteti, Toshkent, O'zbekiston*

[Tavsiya etilgan jurnal / Suggested journal: «Innovatsion texnologiyalar»]

Annotatsiya

Maqolada ko'p yarusli kichik hajmli mini-issiqxonani avtomatlashtirishda qo'llanilishi mumkin bo'lgan texnik vositalar — o'lchov kanallari, hisoblash platformalari, ijro etuvchi qurilmalar va aloqa kanallari — yagona mezonlar tizimi bo'yicha qiyosiy tahlil qilingan hamda shu asosda tadqiqotning hal etilmagan masalalari va vazifalari shakllantirilgan. Tadqiqotning maqsadi — kichik hajmli qurilma sharoiti uchun element bazasini tanlashning miqdoriy asoslangan mezonlarini ishlab chiqish va boshqaruv tizimiga qo'yiladigan texnik talablarni rasmiylashtirishdan iborat. Usul sifatida to'rt sinf boshqaruv vositasini o'lchov diapazoni, talab etilgan aniqlik, o'lchov nuqtalari soni, iste'mol quvvati, tarmoq imkoniyati va kichik hajmli qurilmaga mosligi bo'yicha tizimli qiyoslash qabul qilindi; aniqlik talablari boshqaruv chegarasi kengligining 10 % i qoidasidan keltirib chiqarildi. Natijada qurilma uchun sakkizta o'lchov kanali aniqlanib, uch yarusli qurilma uchun jami 15...18 ta o'lchov nuqtasi zarurligi hisoblab chiqildi. Substrat namligini o'lchashning beshta usuli qiyoslanib, narx va ishonchlilik nisbatidan kelib chiqib sig'imli (FDR) datchiklar tanlandi va ular uchun gravimetrik tarirlash majburiyligi asoslandi. To'rtta hisoblash platformasi qiyoslanib, ikki bosqichli arxitektura — quyi darajada 32-razryadli mikrokontroller (0,5...1,5 Vt), yuqori darajada bir platali kompyuter (3...7 Vt) — maqbul deb topildi; sanoat kontrolleri



(5...15 Vt) kichik hajmli qurilma uchun iqtisodiy jihatdan asoslanmaganligi ko'rsatildi. Ventilyator quvvatining havo sarfiga kubik bog'liqligi asosida sarfni 20 % ga kamaytirish quvvatni taxminan 50 % ga kamaytirishi hisoblandi. Aloqa kanallari qiyoslanib, Wi-Fi va MQTT protokoli tanlandi. Sakkizta hal etilmagan masala aniqlanib, ularning har biri uchun hal qilish yo'li belgilandi va tadqiqotning maqsadi hamda beshta vazifasi asoslandi.

Kalit so'zlar

ko'p yarusli mini-issiqxona, avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimi, o'lchov kanali, sig'imli namlik datchigi, tarirlash, mikrokontroller, ikki bosqichli arxitektura, PWM, MQTT, texnik talablar, hal etilmagan masalalar

1. Kirish

Nazorat qilinadigan muhitda o'simlik yetishtirish texnologiyasining muhandislik mohiyati muhit parametrlarini uzluksiz o'lchash va ularga real vaqt rejimida javob qaytarishdan iborat. R.R. Shamshiri va hammualliflari issiqxonalarni avtomatlashtirish sohasidagi yutuqlarni umumlashtirib, aynan shu ikki xususiyat — uzluksiz o'lchash va real vaqtdagi javob — nazorat qilinadigan muhitda yetishtirishning asosi ekanligini ta'kidlaydilar [14]. Bundan kelib chiqadiki, avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimining sifati birinchi navbatda uning o'lchov kanallarining metrologik tavsiflari bilan belgilanadi: boshqaruv algoritmi qanchalik mukammal bo'lmasin, u kirishida xato yoki shovqinli signal olsa, texnologik natija ta'minlanmaydi.

So'nggi o'n yillikda datchiklar va mikrokontrollerlar bozorining rivojlanishi yopiq grunt obyektlarini avtomatlashtirish tannarxini keskin kamaytirdi. S. Hemming va hammualliflari sun'iy intellekt asosida masofadan boshqariladigan issiqxonada tajribali agronom natijalariga yaqin hosildorlikka erishilganligini ko'rsatdilar [21]; M. Chappell va hammualliflari uchta tijorat ko'chatxonasida simsiz



sensor tarmoqlarini joriy etib, tarmoq tugunlarining ishonchliligi va to'g'ri tarirlanishi natijaning hal qiluvchi omili ekanligini ko'rsatdilar [16]. A.A. Abdelmoneim va hammualliflari arzon narxli IoT sig'imli datchiklari asosida sug'orishni rejalashtirish samaradorligini tasdiqlaganlar [19]. Ushbu natijalar element bazasining yetarli darajada rivojlanganligini ko'rsatadi.

O'zbekiston Respublikasida raqamli texnologiyalarni qishloq xo'jaligiga joriy etish davlat siyosati darajasida qo'llab-quvvatlanadi [3]. O'lchov vositalarining birligini ta'minlash va ularni tekshirish tartibi «Metrologiya to'g'risida»gi Qonun bilan [1], texnik vositalarga qo'yiladigan talablarni belgilash tartibi esa «Standartlashtirish to'g'risida»gi Qonun bilan [2] tartibga solinadi. Binolarning muhandislik uskunalari uchun kommunikatsiya va dispetcherlash tizimlarini loyihalash talablari ShNQ 2.04.20-22 da keltirilgan [5]. Milliy adabiyotda ham ushbu yo'nalish rivojlanmoqda: B.E. Egamberdiyev va hammualliflari issiqxona xo'jaliklari uchun boshqarish moslamasi va avtomatlashtirilgan tizimni ishlab chiqqanlar [28], J. Usmonov va X. Mamirov esa aqlli issiqxonalarda sensor-mikrokontroller integratsiyasini tahlil qilib, optimallashtirish yo'llarini ko'rsatganlar [29].

Shu bilan birga, mavjud ishlarni tahlil qilish ikki qutbli holatni ko'rsatadi. Bir tomonda — sanoat miqyosidagi obyektlar uchun ishlab chiqilgan SCADA va PLC asosidagi yechimlar, ularda metrologik ta'minot va ishonchlilik yuqori darajada hal etilgan, biroq narx kichik hajmli qurilma tannarxi bilan solishtirilarli. Ikkinchi tomonda — maishiy segmentdagi ko'p yarusli qurilmalar, ularda boshqaruv taymer darajasida amalga oshiriladi, yoritish ko'rsatkichlari lyuksda beriladi va o'lchov kanallarining aniqligi umuman normallanmaydi. Ikki qutb orasidagi oraliq — kichik hajmli, ammo to'liq avtomatlashtirilgan va metrologik asoslangan qurilma sinfi — ilmiy adabiyotda tizimli ravishda o'rganilmagan. Bundan tashqari, W.D. Wheeler va hammualliflari ko'rsatganidek, datchikka asoslangan sug'orishning kutilgan



samarasi aynan tarirlash operatsiyasi bajarilmaganda yo'qoladi [18], biroq ko'pchilik ishlarda tarirlash uslubiyoti keltirilmaydi.

Mazkur maqolaning maqsadi — ko'p yarusli kichik hajmli mini-issiqxonani avtomatlashtirishda qo'llanilishi mumkin bo'lgan texnik vositalarni yagona mezonlar tizimi bo'yicha qiyosiy tahlil qilish, element bazasini tanlashning miqdoriy asoslangan qoidalarini shakllantirish, boshqaruv tizimiga qo'yiladigan texnik talablarni rasmiylashtirish hamda shu asosda hal etilmagan masalalarni va tadqiqot vazifalarini asoslashdan iborat.

Ishning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat: birinchi marta kichik hajmli ko'p yarusli qurilma uchun o'lchov kanallariga qo'yiladigan aniqlik talablari texnologik boshqaruv chegarasi kengligidan formal ravishda keltirib chiqarilgan va sakkizta kanal uchun miqdoriy shaklda belgilangan; boshqaruv vositalarining to'rt sinfi (o'lchov vositalari, hisoblash platformalari, ijro etuvchi qurilmalar, aloqa kanallari) yagona mezonlar to'plami bo'yicha qiyoslanib, ikki bosqichli arxitekturaning tarmoqdan mustaqil ishlash xususiyati kichik hajmli qurilma uchun asosiy tanlov mezoni sifatida asoslangan; ma'lumotlarni birlamchi qayta ishlashning uch bosqichli sxemasi filtr oynasi kengligini o'lchanadigan jarayonning inersiyasi bilan bog'lovchi qoida bilan to'ldirilgan; tahlil natijalari sakkizta hal etilmagan masala va ularning yechim yo'llari ko'rinishida rasmiylashtirilgan.

2. Materiallar va usullar

Tadqiqot obyekti. Tahlil obyekti sifatida O'zbekiston Respublikasining FAP 2882-sonli foydali modelga patenti bilan himoyalangan uch yarusli mini-issiqxona qurilmasi va uning avtomatlashtirilgan sug'orish hamda havo almashinuvi tizimlari qabul qilindi. Tahlil predmeti — ushbu qurilmani avtomatlashtirishda qo'llanilishi mumkin bo'lgan boshqaruv vositalari majmuasi va ularni tanlash mezonlari.



Tahlil protokoli. Boshqaruv vositalari to'rt sinfga ajratilib, har bir sinf mustaqil ravishda, ammo bir xil tuzilmadagi mezonlar to'plami bo'yicha qiyoslandi:

1) *o'lchov vositalari* — o'lchash prinsipi, ish diapazoni, talab etilgan aniqlik, o'lchov nuqtalari soni, tarirlashga bo'lgan ehtiyoj, narx darajasi;

2) *hisoblash platformalari* — hisoblash quvvati, tarmoq imkoniyati, iste'mol quvvati, qo'llanish sohasi, real vaqt rejimida ishlash qobiliyati;

3) *ijro etuvchi qurilmalar va boshqaruv organlari* — quvvat, boshqarish usuli (diskret yoki uzluksiz), boshqaruv organi turi, ish rejimi;

4) *aloqa kanallari va protokollari* — amal qilish masofasi, ma'lumot uzatish tezligi, energiya sarfi, qo'llanish sohasi.

Beshinchi qo'shimcha yo'nalish sifatida bozorda mavjud tijorat mahsulotlarining texnik hujjatlari tahlil qilindi va ular funksional imkoniyatlari bo'yicha darajalarga ajratildi, chunki aynan tijorat mahsulotlari qurilmaga qo'yiladigan iste'molchi talablarini shakllantiradi.

Aniqlik talablarini shakllantirish qoidasi. O'lchov kanaliga qo'yiladigan aniqlik talabi texnologik chegaralardan keltirib chiqarildi. Har bir boshqariladigan kattalik uchun ruxsat etilgan o'lchov xatoligi boshqaruv chegarasi kengligining o'ndan bir qismidan oshmasligi shart qilib qabul qilindi:

$$\delta d \leq 0,1 \cdot (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

bu yerda δd — o'lchov kanalining ruxsat etilgan mutlaq xatoligi (kattalik birligida); $X_{\max}$ va $X_{\min}$ — boshqariladigan kattalikning yuqori va quyi texnologik chegaralari (kattalik birligida). Ushbu qoida boshqaruv chegarasi ichida o'lchov xatoligi hisobiga yuzaga keladigan «soxta» kommutatsiyalarni istisno qiladi va gisterezisli algoritmnining barqaror ishlashini ta'minlaydi.



Noaniqlikni baholash. Har bir o'lchov kanali uchun noaniqlik byudjeti A va B turdagi tashkil etuvchilarni birlashtirish yo'li bilan tuzildi:

$$U = k \cdot \sqrt{(uA^2 + uB^2)} \quad (2)$$

bu yerda U — kengaytirilgan noaniqlik; uA — takroriy o'lchashlarni statistik qayta ishlash natijasida olinadigan A turdagi standart noaniqlik; uB — o'lchov vositasining pasporti, tarirlash sertifikat va boshqa nostatistik ma'lumotlardan olinadigan B turdagi standart noaniqlik; k — qamrash koeffitsienti, $k = 2$ qabul qilindi. O'lchov vositalarini tekshirish va tarirlash tartibi «Metrologiya to'g'risida»gi Qonun talablariga muvofiq belgilandi [1].

O'lchov nuqtalari sonini hisoblash. Ko'p yarusli qurilmada o'lchov kanallarining bir qismi har bir yarusda takrorlanadi, bir qismi esa qurilma uchun yagona (statsionar) hisoblanadi. Shu sababli o'lchov nuqtalarining umumiy soni quyidagicha aniqlanadi:

$$Nd = ny \cdot nyar + nst \quad (3)$$

bu yerda Nd — o'lchov nuqtalarining umumiy soni; ny — yaruslar soni; $nyar$ — bir yarusga to'g'ri keladigan o'lchov nuqtalari soni; nst — qurilma uchun yagona bo'lgan statsionar o'lchov nuqtalari soni.

Ma'lumotlarni birlamchi qayta ishlash usullarini baholash. Datchiklardan olingan signal boshqaruv algoritmgiga uzatilishidan oldin uch bosqichda qayta ishlanadi. Birinchi bosqich — chegaraviy qiymatlar bo'yicha filtrlash, ya'ni fizik jihatdan mumkin bo'lmagan qiymatlarni chiqarib tashlash:

$$x_{min} \leq x_n \leq x_{max} \quad (4)$$

bu yerda x_n — n -o'lchov natijasi; x_{min} va x_{max} — datchikning fizik ish diapazoni chegaralari. Shartni qanoatlantirmaydigan qiymat rad etiladi va uning o'rniga oxirgi ishonchli qiymat qo'yiladi. Ikkinchi bosqich — medianali filtrlash, u



yakka (impulsli) xatolarni yo'qotadi. Uchinchi bosqich — siljiydigan o'rtacha qiymat usuli bo'lib, u tasodifiy shovqinni kamaytiradi:

$$\bar{x}_n = (1/m) \cdot \sum x_{n-i}, i = 0 \dots m-1 \quad (5)$$

bu yerda $\bar{x}_n$ — filtrlangan qiymat; m — filtr oynasining kengligi (o'lchashlar soni); x_{n-i} — oxirgi m ta o'lchov natijalari. Filtr oynasining kengligi o'lchanadigan jarayonning inersiyasiga muvofiq tanlanadi; oynaning ekvivalent vaqt konstantasi

$$\tau_f = m \cdot \Delta t \quad (6)$$

bu yerda τ_f — filtrning ekvivalent vaqt konstantasi, s; Δt — o'lchov davri (so'rov qadami), s. Talab shundan iboratki, τ_f o'lchanadigan jarayonning o'z vaqt konstantasidan sezilarli darajada kichik bo'lishi lozim, aks holda filtr foydali dinamikani ham yo'qotadi.

Ijro etuvchi qurilmalarni boshqarish usulini tanlash mezon. Ventilyatorlarni rostdash usulini tanlashda ventilyator quvvatining havo sarfiga kubik bog'liqligi hisobga olindi:

$$N_2/N_1 = (Q_2/Q_1)^3 \quad (7)$$

bu yerda N_1 va N_2 — mos ravishda boshlang'ich va o'zgartirilgan rejimdagi ventilyator quvvati, V_t ; Q_1 va Q_2 — mos ravishda boshlang'ich va o'zgartirilgan havo sarfi, m^3/soat . Nasosni boshqarishda esa 1.2-paragrafda asoslangan gisterezisli (rele) qonun qabul qilindi:

$$u = 1, \text{ agar } \theta \leq \theta_{\min}; u = 0, \text{ agar } \theta \geq \theta_{\max} \quad (8)$$

bu yerda u — nasosning holati (1 — yoqilgan, 0 — o'chirilgan); θ — substratning hajmiy namligi, m^3/m^3 ; $\theta_{\min}$ va $\theta_{\max}$ — sug'orishning quyi va yuqori chegaralari, m^3/m^3 .

Manbalar bazasi. Tahlilga xalqaro va milliy me'yoriy hujjatlar (ISO, ANSI/ASABE, ASTM, ISO/IEC, GOST, O'zbekiston qonunlari va ShNQ), jahon



ilmiy nashrlari hamda maishiy va yarim professional segmentdagi tijorat mahsulotlarining texnik hujjatlari jalb etildi. Mikroiklim parametrlarini o'lchash vositalariga qo'yiladigan umumiy talablar ISO 7726 bo'yicha [8], substrat namligini gravimetrik aniqlash tartibi ISO 11461 [7] va GOST 28268-89 [6] bo'yicha, CO₂ konsentratsiyasi bo'yicha ventilyatsiyani baholash uslubiyoti ASTM D6245 bo'yicha [11], TDR usuli ASTM D6780 bo'yicha [10], fotosintetik nurlanish kattaliklari va o'lchash usullari ANSI/ASABE S640 [12] va S642 [13] bo'yicha qabul qilindi.

Texnik darajani baholash ko'rsatkichlari. Qurilmaning texnik darajasini keyingi bosqichlarda baholash uchun quyidagi ko'rsatkichlar tizimi qabul qilindi: birlik maydondan olinadigan hosil (kg/m² yiliga), mahsulot birligiga suv sarfi (l/kg), mahsulot birligiga elektr energiyasi sarfi (kVt·soat/kg), yaruslar bo'ylab harorat notekisligi (°C), yoritilganlik notekisligi (%) va inson mehnati sarfi (soat/sikl).

3. Natijalar

3.1. O'lchov kanallari va ularga qo'yiladigan talablar

(1) ifoda bo'yicha shakllantirilgan aniqlik talablari va tanlangan datchik turlari 1-jadvalda keltirilgan. Jadval qurilmaning o'lchov qismi uchun texnik topshiriq vazifasini bajaradi.

1-jadval. Ko'p yarusli qurilma uchun o'lchov kanallari va ularga qo'yiladigan talablar

O'lchanadigan kattalik	Datchik turi	Ish diapazoni	Talab etilgan aniqlik	O'lchov nuqtalari soni
Havo harorati (ichki)	yarimo'tkazgichli	0...50 °C	± 0,5 °C	har yarusda 1 ta
Havo harorati (tashqi)	yarimo'tkazgichli	-20...+50 °C	± 0,5 °C	1 ta



Havo namligi	sig'imli	20...95 %	$\pm 3 \%$	har yarusda 1 ta
Substrat namligi	sig'imli (FDR)	0,05...0,45 m^3/m^3	$\pm 0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$	har yarusda 1...2 ta
Suv sathi	kontaktli yoki ultratovushli	0...400 mm	$\pm 10 \text{ mm}$	1 ta
Fotonlar oqimi zichligi	kvant sensori	0...1000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	$\pm 5 \%$	har yarusda 1 ta
CO2 konsentratsiya si	infraqizil (NDIR)	400...2000 ppm	$\pm 50 \text{ ppm}$	1 ta
Havo tezligi	termoanemometr	0,1...2,0 m/s	$\pm 0,05 \text{ m/s}$	tajriba davrida 3...5 ta

Jadvaldan ko'rinadiki, sakkizta o'lchov kanalidan to'rttasi (ichki havo harorati, havo namligi, substrat namligi va fotonlar oqimi zichligi) har bir yarusda takrorlanadi, uchta (tashqi havo harorati, suv sathi va CO2 konsentratsiyasi) esa qurilma uchun yagona bo'ladi. Havo tezligi kanali doimiy emas — u faqat tajriba davrida, havo taqsimotining bir xilligini baholash uchun zarur.

(3) ifodaga muvofiq uch yarusli qurilma uchun ($n_y = 3$) o'lchov nuqtalarining soni hisoblab chiqiladi. Bir yarusga to'g'ri keladigan doimiy nuqtalar soni $n_{yar} = 4...5$ ta (harorat, namlik, substrat namligining 1...2 ta datchigi va kvant sensori), statsionar nuqtalar soni $n_{st} = 3$ ta (tashqi harorat, suv sathi, CO2). Demak, $N_d = 3 \cdot (4...5) + 3 = 15...18$ ta. Tajriba davrida qo'shimcha ravishda 3...5 ta havo tezligi nuqtasi kiritiladi va bu holda umumiy kanallar soni 18...23 tagacha ortadi. Ushbu



son quyi daraja kontrollerining kirish kanallari soniga va so'rov davriga qo'yiladigan talabni bevosita belgilaydi.

Aniqlik talablarining kelib chiqishini (1) ifoda misolida ko'rsatish mumkin. Substrat namligi uchun sug'orish chegaralari $0,24 \dots 0,32 \text{ m}^3/\text{m}^3$ oralig'ida bo'lganda chegara kengligi $0,08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ni tashkil qiladi; (1) ga muvofiq ruxsat etilgan xatolik $\delta d \leq 0,008 \text{ m}^3/\text{m}^3$ bo'lishi kerak edi. Amalda mavjud sig'imli datchiklar uchun tarirlashdan keyin erishiladigan real aniqlik $\pm 0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ni tashkil qiladi, ya'ni chegara kengligining 25 % i. Bu holat ikki oqibatga olib keladi: birinchidan, gisterezis kengligi datchik xatoligidan kamida ikki barobar katta qilib tanlanishi shart; ikkinchidan, tarirlash operatsiyasi ixtiyoriy emas, balki majburiy bo'lib qoladi. Harorat kanali uchun esa vaziyat qulayroq: yaruslar bo'ylab ruxsat etilgan harorat notekisligi 2°C bo'lganda (1) bo'yicha $\delta d \leq 0,2^\circ\text{C}$ talab qilinadi, biroq notekislikni o'lchashda ikki datchik ko'rsatkichlari ayirmasi qaralganligi va ular bir xil turdagi datchiklar bo'lganligi sababli tizimatik tashkil etuvchi qisqaradi, natijada $\pm 0,5^\circ\text{C}$ aniqlikdagi datchiklar ham differensial o'lchashda yetarli bo'ladi.

3.2. Substrat namligi kanalining tahlili

Sakkizta kanal ichida eng murakkabi — substrat namligi kanalidir, chunki uning ko'rsatkichi substrat turiga, zichligiga va tuz konsentratsiyasiga bog'liq. O'lchash prinsiplarining qiyosiy tahlili 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval. Substrat namligini o'lchash usullarining qiyosiy tahlili

Usul	Ishlash prinsipi	Afzalligi	Kamchiligi
Gravimetrik	namuna og'irligini quritishdan oldin va keyin o'lchash	etalon usul, eng aniq	namunani buzadi, uzluksiz o'lchab bo'lmaydi



Qarshilikli	ikki elektrod orasidagi qarshilikni o'lchash	juda arzon	tuz konsentratsiyasiga bog'liq, elektrodlar korroziyaga uchraydi
Sig'imli (FDR)	substratning dielektrik singdiruvchanligini o'lchash	arzon, uzoq ishlaydi, uzluksiz	tarirlashni talab qiladi, harorat ta'siri bor
Vaqt sohasidagi reflektometriya (TDR)	elektromagnit impuls tarqalish vaqtini o'lchash	aniq, tarirlashga kam bog'liq	qimmat, maishiy qurilma uchun asoslanmagan
Tenziometrik	matrik potensialni o'lchash	suvning o'simlik uchun mavjudligini aks ettiradi	diapazoni cheklangan, xizmat ko'rsatishni talab qiladi

Beshta usuldan gravimetrik usul uzluksiz o'lchashga yaroqsiz, ammo u etalon sifatida saqlanib qoladi; qarshilikli usul tuz konsentratsiyasiga bog'liqligi va elektrodlar korroziyasi sababli oziqa eritmasi qo'llaniladigan tizimda ishonchsiz; TDR usuli metrologik jihatdan eng qulay bo'lsa-da, narxi kichik hajmli qurilma uchun asoslanmagan; tenziometrik usul esa diapazonining cheklanganligi va muntazam xizmat ko'rsatish zarurati bilan cheklanadi. Shu sababli narx va ishonchlilik nisbatidan kelib chiqib sig'imli (FDR) usul tanlanadi.

Sig'imli datchikning ko'rsatkichi substratning dielektrik singdiruvchanligi orqali namlik bilan bog'langani, dielektrik singdiruvchanlik esa substrat turi, zichligi va eritma elektr o'tkazuvchanligiga bog'liq bo'lgani sababli har bir substrat uchun



alohida tarirlash egri chizig'i olinishi shart. Tarirlash gravimetrik usul asosida — namunani quritishdan oldin va keyin tortish yo'li bilan — bajariladi; namuna hajmi va quritish rejimi ISO 11461 [7] va ГОСТ 28268-89 [6] talablariga muvofiq belgilanadi. Muqobil variant sifatida ASTM D6780 bo'yicha TDR usuli etalon sifatida qo'llanilishi mumkin [10]. Shunday qilib, tarirlash uslubiyotini ishlab chiqish mustaqil vazifa sifatida ajratiladi.

3.3. Datchiklarni joylashtirish qoidalari

Tahlil natijasida datchiklarni joylashtirishning ikkita muhim qoidasi shakllantirildi. Birinchisi substrat namligi datchigiga tegishli: u ildiz tizimining asosiy massasi joylashgan zonada, idishning markazidan chetroqda va tomchilatgich ostiga bevosita to'g'ri kelmaydigan nuqtada o'rnatilishi lozim. Aks holda datchik sug'orish paytidagi lahzali namlikni o'lchaydi, bu esa boshqaruv konturida noto'g'ri qaror qabul qilinishiga — sug'orishning muddatidan oldin to'xtatilishiga olib keladi. Ikkinchi qoida havo harorati datchigiga tegishli: u yoritgichdan issiqlik nurlanishi bevosita tushmaydigan, ammo o'simlik qoplami darajasidagi nuqtaga o'rnatiladi, chunki texnologik jihatdan ahamiyatga ega bo'lgan kattalik aynan o'simlik qoplami zonasidagi havo haroratidir. Ushbu ikki qoida (2) ifodadagi B turdagi noaniqlik tashkil etuvchisini keskin kamaytiradi va ularning bajarilmasligi hech qanday filtrlash bilan qoplanmaydi.

3.4. Hisoblash platformasi va boshqaruv tizimining arxitekturas

Adabiyotlarda keng tarqalgan to'rtta hisoblash platformasining qiyosiy tavsifi 3-jadvalda keltirilgan.

3-jadval. Hisoblash platformalarining qiyosiy tavsifi

Platforma	Hisoblash quvvati	Tarmoq imkoniyati	Iste'mol quvvati	Qo'llanish sohasi
-----------	-------------------	-------------------	------------------	-------------------



8-razryadli mikrokontroller	past	qo'shimcha modul orqali	0,05...0,2 Vt	oddiy taymer va rele boshqaruvi
32-razryadli mikrokontroller (o'rnatilgan Wi-Fi bilan)	o'rtacha	Wi-Fi va Bluetooth o'rnatilgan	0,5...1,5 Vt	datchiklardan ma'lumot yig'ish, real vaqt boshqaruvi
Bir platali kompyuter	yuqori	Ethernet, Wi-Fi	3...7 Vt	ma'lumotlar bazasi, vizualizatsiya, video qayta ishlash
Sanoat kontrolleri (PLC)	o'rtacha	sanoat protokollari	5...15 Vt	sanoat issiqxonalari

Jadval ma'lumotlaridan ko'rinadiki, 8-razryadli mikrokontroller 15...18 ta o'lchov kanalini xizmat qilish va ayni vaqtda tarmoq almashinuvini ta'minlash uchun yetarli emas; bir platali kompyuter esa real vaqt rejimini kafolatlamaydi, chunki unda ko'p vazifali operatsion tizim ishlaydi. Sanoat kontrolleri metrologik va ishonchlilik jihatidan eng kuchli yechim bo'lsa-da, iste'mol quvvati bo'yicha 32-razryadli mikrokontrollerdan 10...30 barobar ortiq (5...15 Vt ga qarshi 0,5...1,5 Vt) va narxi qurilmaning umumiy tannarxiga solishtirilari.

Shu sababli kichik hajmli qurilma uchun **ikki bosqichli arxitektura** asoslanadi. Quyi darajada 32-razryadli mikrokontroller datchiklardan ma'lumot yig'adi va ijro etuvchi qurilmalarni real vaqt rejimida boshqaradi; yuqori darajada



bir platali kompyuter ma'lumotlarni saqlaydi, vizualizatsiya qiladi va tashqi tarmoq bilan aloqani ta'minlaydi. Bunday taqsimlashning hal qiluvchi afzalligi — quyi darajaning tarmoqdan va yuqori darajadan **mustaqil ishlashi**: internet uzilganda yoki yuqori daraja dasturi qayta yuklanganda ham sug'orish va yoritish rejimlari saqlanadi. Sanoat miqyosidagi SCADA tizimlari ham xuddi shu prinsip bo'yicha qurilgan, biroq ularda quyi daraja sifatida PLC ishlatiladi.

Boshqaruv dasturining tuzilishi **uch qatlamli** bo'lishi maqsadga muvofiq. Birinchi qatlam — datchiklardan ma'lumot olish va ularni birlamchi qayta ishlash ((4)–(6) ifodalar bo'yicha filtrlash va chegaraviy qiymatlar bo'yicha tekshirish); ikkinchi qatlam — boshqaruv algoritmlari (sug'orish, ventilyatsiya, yoritish); uchinchi qatlam — himoya va avariya rejimlari. Uchinchi qatlam eng yuqori ustuvorlikka ega bo'lib, u boshqa qatlamlarning qarorlarini bekor qilish huquqiga ega bo'lishi lozim. Ushbu ustuvorlik tartibi tizimning funksional xavfsizligini ta'minlaydi.

3.5. Ijro etuvchi qurilmalar va ularni boshqarish usullari

Qurilmaning ijro etuvchi qurilmalari uch guruhga bo'linadi: sug'orish tizimi (nasos va elektromagnit klapanlar), havo almashinuvi tizimi (kirish va chiqish ventilyatorlari) hamda yoritish tizimi (yaruslar bo'yicha LED yoritgichlar). Ularning tavsiflari va boshqarish usullari 4-jadvalda keltirilgan.

4-jadval. Ijro etuvchi qurilmalar va ularni boshqarish usullari

Qurilma	Quvvati	Boshqarish usuli	Boshqaruv organi	Ish rejimi
Sug'orish nasosi	12...20 Vt	diskret (yoqish/o'chirish)	rele modul	gisteresis bo'yicha, sutkada 1...3 marta



Kirish ventilyatori	2...8 Vt	uzluksiz (PWM)	tranzistorli kalit	harorat bo'yicha rostlanadi
Chiqish ventilyatori	2...8 Vt	uzluksiz (PWM)	tranzistorli kalit	kirish bilan muvofiqlashtirilgan
LED yoritgichlar	yarusga 40 Vt	diskret yoki PWM	rele yoki drayver	fotoperiod bo'yicha, kaskadli
Drenaj klapani	3...5 Vt	diskret	rele modul	zarurat bo'yicha

Jadvaldan ko'rinadiki, qurilmaning eng katta iste'molchisi — yoritish tizimi: uch yarusli qurilmada yoritgichlarning umumiy quvvati 120 Vt ni tashkil qiladi, bu esa nasos (12...20 Vt) va ikkala ventilyator (jami 4...16 Vt) quvvatlari yig'indisidan 4...7 barobar ortiq. Ushbu nisbat energiya sarfini optimallashtirishda asosiy e'tibor yoritish rejimiga qaratilishi kerakligini ko'rsatadi.

Nasosni diskret boshqarish (8) ifodadagi gisterezisli algoritmdan bevosita kelib chiqadi va qo'shimcha texnik vositalarni talab qilmaydi — rele moduli yetarli. Ventilyatorlarni esa uzluksiz rostlash maqsadga muvofiq. (7) ifodaga muvofiq havo sarfini 20 % ga kamaytirish ($Q_2/Q_1 = 0,8$) ventilyator quvvatini $N_2/N_1 = 0,8^3 = 0,512$ marta, ya'ni taxminan 50 % ga kamaytiradi. Sarfni 10 % ga kamaytirish esa quvvatni $0,9^3 = 0,729$ marta, ya'ni 27 % ga kamaytiradi. Bunday kuchli nochiziqlilik uzluksiz rostlashning diskret boshqaruvga nisbatan afzalligini miqdoriy asoslaydi. Kengligi impulsli modulyatsiya (PWM) usuli bu vazifani sodda texnik vositalar — tranzistorli kalit va mikrokontrollarning apparat taymeri — yordamida hal qilish imkonini beradi.



Yoritgichlarni kaskadli yoqish, ya'ni yorug'lik davrining boshida va oxirida quvvatni bosqichma-bosqich oshirib va kamaytirib borish, ikki vazifani bir vaqtda hal qiladi: bir tomondan elektr tarmog'idagi ishga tushish toklarini kamaytiradi (uch yarus bir vaqtda yoqilganda ishga tushish toki uch barobar ortadi), ikkinchi tomondan o'simlik uchun tabiiy yorug'lik dinamikasiga yaqin sharoit yaratadi.

Elektr qurilmalarini ekspluatatsiya qilishda xavfsizlik talablari amaldagi qoidalar bilan tartibga solinadi [4]. Kichik hajmli qurilmada suv va elektr zanjirlari yaqin joylashgani sababli quyidagi himoya choralari majburiy hisoblanadi: past kuchlanishli (12 va 24 V) zanjirlardan foydalanish, nam joylardagi ulanishlarni germetiklashtirish hamda haroratdan himoya relesini o'rnatish.

3.6. Aloqa kanallari va protokoli

Masofaviy monitoring tizimining vazifasi — foydalanuvchini qurilma holati to'g'risida xabardor qilish va boshqaruv parametrlarini masofadan o'zgartirish imkonini berishdir. Aloqa kanallarining qiyosiy tavsifi 5-jadvalda keltirilgan.

5-jadval. Aloqa kanallari va protokollarining qiyosiy tavsifi

Kanal	Amal qilish masofasi	Ma'lumot tezligi	Energiya sarfi	Qo'llanish sohasi
Wi-Fi	30...50 m	yuqori	yuqori	uy va ofis sharoiti
Bluetooth Low Energy	10...30 m	past	juda past	sozlash va yaqin masofadan boshqarish
LoRaWAN	2...10 km	juda past	juda past	dala va uzoq obyektlar



GSM/LTE	cheklanmagan	o'rtacha	o'rtacha	tarmoqdan tashqari obyektlar
Simli (Ethernet, RS485)	100 m gacha	yuqori	past	sanoat obyektlari

Kanalni tanlash mezoni sifatida qurilmaning ekspluatatsiya sharoiti qabul qilinadi. Maishiy sharoitda foydalanishga mo'ljallangan qurilma doimiy elektr tarmog'iga ulangan (demak, energiya sarfi hal qiluvchi cheklov emas) va uy tarmog'i qamrovida joylashadi (demak, 30...50 m masofa yetarli). Shu sababli Wi-Fi kanali maqbul deb topiladi. LoRaWAN va GSM/LTE kanallari zarur bo'lmagan xarajat va murakkablikni keltirib chiqaradi, simli kanal esa qurilmani ko'chirish imkoniyatini cheklaydi. Bluetooth Low Energy kanali asosiy kanal sifatida emas, balki dastlabki sozlash va yaqin masofadan boshqarish uchun yordamchi kanal sifatida saqlanib qolishi mumkin.

Ma'lumot uzatish protokoli sifatida MQTT protokoli tanlanadi. Uning afzalligi — xizmat ma'lumotlari hajmining kichikligi va uzilishlarga chidamliligi; protokol ISO/IEC 20922 xalqaro standarti bilan rasmiylashtirilgan [9], bu esa turli ishlab chiqaruvchilarning dasturiy vositalari bilan mosligini ta'minlaydi.

3.7. Ma'lumotlarni birlamchi qayta ishlash parametrlari

(5) va (6) ifodalarga muvofiq filtr oynasining kengligi o'lchanadigan jarayonning inersiyasi bo'yicha differensiallashtiriladi. Harorat va namlik sekin o'zgaruvchi kattaliklar bo'lganligi sababli ular uchun oyna kengligi katta — 10...30 o'lchov qilib olinadi; suv sathi kabi tez o'zgaruvchi va boshqaruv uchun kritik kattaliklar uchun esa kichik — 3...5 o'lchov. $\Delta t = 2$ s so'rov qadamida (6) ifodaga muvofiq birinchi holatda $\tau_f = 20...60$ s, ikkinchi holatda $\tau_f = 6...10$ s ni tashkil



qiladi. Birinchi qiymat qurilma havosining issiqlik inersiyasidan sezilarli darajada kichik, ikkinchisi esa suv sathining kritik pasayishiga o'z vaqtida javob qaytarish uchun yetarli.

3.8. Avariya rejimlari

Avariya rejimlari tizimning ishonchliligini ta'minlaydi va dasturiy arxitekturaning uchinchi qatlamida amalga oshiriladi. Kichik hajmli qurilma uchun to'rtta avariya holati nazarda tutilishi lozim: rezervuardagi suv sathining kritik pasayishi (nasosni bloklash — quruq ishlashdan himoya); qurilma ichidagi haroratning ruxsat etilgan chegaradan oshib ketishi (yoritishni o'chirish va ventilyatsiyani maksimal rejimga o'tkazish, chunki yoritish issiqlik yukining asosiy manbai); datchik signalining yo'qolishi (oxirgi ishonchli qiymat bo'yicha ishlashga o'tish yoki taymer rejimiga qaytish); elektr ta'minotining uzilishi (rejimlarni energiyasiz xotirada saqlash va tiklanishdan keyin ularni qayta tiklash).

3.9. Tijorat mahsulotlarining funksional darajalari

Maishiy va yarim professional segmentdagi ko'p yarusli qurilmalar funksional imkoniyatlariga ko'ra to'rt guruhga ajratildi (6-jadval).

6-jadval. Ko'p yarusli qurilmalarning funksional darajalari bo'yicha tasnifi

Daraja	Yoritish	Sug'orish	Mikroiqlim	Boshqaruv va nazorat
I daraja (eng sodda)	taymer bo'yicha, quvvati o'zgarmas	qo'lda	boshqarilmaydi	mexanik taymer



II daraja	taymer bo'yicha	taymer bo'yicha nasos	oddiy ventilyator, doimiy rejim	kontroller, ekransiz
III daraja	fotoperiod dasturlanadi	namlik datchigi bo'yicha	harorat bo'yicha ventilyator	kontroller va displey
IV daraja (tadqiqot obyekti)	PPFD va DLI bo'yicha hisoblangan, kaskadli	gisterezisli, drenaj qaytariladi	yaruslar bo'ylab bir xillik ta'minlanadi	ikki bosqichli tizim, masofaviy monitoring

Bozorda keng tarqalgan mahsulotlar asosan I va II darajaga tegishli bo'lib, ularda yoritish rejimi ekin turiga bog'lanmagan, sug'orish esa vaqt bo'yicha amalga oshiriladi. III darajadagi qurilmalar odatda import qilinadi va narxi yuqori bo'ladi. IV daraja — ya'ni mikroiqlimning yaruslar bo'ylab bir xilligi ta'minlangan, yoritish rejimi fotobiologik ko'rsatkichlar bo'yicha hisoblangan va drenaj suvi qayta ishlatiladigan qurilmalar — bugungi kunda ommaviy ishlab chiqarilmaydi. Aynan shu daraja mazkur tadqiqotning obyekti hisoblanadi.

Tijorat mahsulotlarining texnik hujjatlarini tahlil qilishda uchta tipik kamchilik aniqlandi: birinchidan, yoritish ko'rsatkichlari lyuksda yoki elektr quvvatida keltiriladi, PPFD qiymati ko'rsatilmaydi, holbuki ANSI/ASABE S640 standarti o'simlik uchun nurlanishni fotonlar oqimi zichligi bo'yicha normallashtirishni talab qiladi [12]; ikkinchidan, sug'orish me'yori litr/sutkada berilib, uning ekin turiga va vegetatsiya bosqichiga bog'liqligi hisobga olinmaydi; uchinchidan, yaruslar bo'ylab harorat va yoritilganlik notekisligi umuman keltirilmaydi. Ushbu holat mahsulotlarni obyektiv taqqoslashni qiyinlashtiradi va tarmoq uchun yagona baholash mezonlarini ishlab chiqish zaruratini ko'rsatadi.



Shu bilan birga, tijorat yechimlarining ijobiy tajribasini ham hisobga olish lozim. Xususan, ekin turini tanlash orqali barcha rejimlarni avtomatik sozlash g'oyasi — ya'ni qurilma xotirasida har bir ekin uchun yorug'lik davri, sug'orish me'yori va harorat rejimi saqlanadigan ma'lumotlar bazasini yuritish — foydalanuvchidan agrotexnik bilim talab qilmaydi va qurilmaning maishiy segmentda tarqalishini ta'minlaydi. Ushbu yondashuv ishlab chiqilayotgan boshqaruv tizimida ham qo'llaniladi.

3.10. Boshqaruv tizimiga qo'yiladigan texnik talablar

3.1–3.9-bo'limlarda keltirilgan natijalar hamda 1.2-paragrafda asoslangan texnologik chegaralar umumlashtirilib, qurilmaning avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimiga qo'yiladigan texnik talablar shakllantirildi (7-jadval). Ushbu jadval keyingi boblarda ishlab chiqiladigan tizim uchun texnik topshiriq vazifasini bajaradi.

7-jadval. Ko'p yarusli mini-issiqxonaning boshqaruv tizimiga qo'yiladigan texnik talablar

Ko'rsatkich	Talab etilgan qiymat	Asoslanishi
Yaruslar bo'ylab harorat notekisligi ΔT	$< 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	mikroiqlim bir xilligi sharti
O'simlik qoplami ustidagi havo tezligi	0,3...1,0 m/s	gaz almashinuvi va bir xillik sharti
Havo sarfi	82 m ³ /soat	issiqlik balansi hisobidan
Fotonlar oqimi zichligi (PPFD)	150...250 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	ANSI/ASABE S640 bo'yicha normallashtirish
Sutkalik yorug'lik integrali (DLI)	12...17 $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{sutka})$	barg sabzavotlari uchun me'yori



Yoritish quvvati (yarusga)	56...64 Vt	PPFD va DLI bo'yicha hisob
Fotoperiod	16...18 soat	DLI ni ta'minlash sharti
Sug'orish chegaralari $\theta_{min}... \theta_{max}$	0,24...0,32 m ³ /m ³	gisterezisli algoritm parametrlari
Yoritilganlik notekisligi	< 20 %	yaruslar bo'ylab bir xillik sharti
O'lchov nuqtalarining soni ($n_y = 3$)	15...18 ta	(3) ifoda bo'yicha hisob
Boshqaruv arxitekturası	ikki bosqichli (mikrokontroller + bir platali kompyuter)	tarmoqdan mustaqil ishlash sharti
Dasturiy arxitektura	uch qatlamli, avariya qatlami ustuvor	funksional xavfsizlik sharti
Aloqa kanali va protokoli	Wi-Fi, MQTT (ISO/IEC 20922)	ekspluatatsiya sharoiti
Boshqaruv zanjirlarining kuchlanishi	12 va 24 V	elektr xavfsizligi talablari

4. Muhokama

Aniqlik talablarining asoslanishi. (1) ifoda bilan rasmiylashtirilgan «10 % qoidasi» adabiyotda ko'pincha oshkormas shaklda qo'llaniladi. R.R. Shamshiri va hammualliflari o'lchash va javob qaytarish uzviyligini ta'kidlaydilar, biroq aniqlikni texnologik chegara kengligi bilan bog'lovchi miqdoriy mezon keltirmaydilar [14]. Mazkur ishda ushbu bog'lanish oshkor shaklda ifodalanib, uning amaliy oqibati ko'rsatildi: substrat namligi kanali uchun mavjud sig'imli datchiklarning real aniqligi



($\pm 0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$) talab etilgan qiymatdan ($\pm 0,008 \text{ m}^3/\text{m}^3$) 2,5 barobar yomon, ya'ni bu kanal butun tizimning «zaif bo'g'ini» hisoblanadi. Aynan shu sabab tarirlash uslubiyotini ishlab chiqishni alohida vazifa sifatida qo'yishni talab qiladi.

Tarirlashning ahamiyati. Olingan xulosa W.D. Wheeler va hammualliflarining tijorat gulchiligi korxonasida o'tkazgan tadqiqoti natijalari bilan to'liq mos keladi: mualliflar datchikka asoslangan sug'orish tizimining kutilgan samarasi aynan tarirlash bajarilmaganda yo'qolishini ko'rsatganlar [18]. K.S. Nemali va M.W. van Iersel avtomatlashtirilgan sug'orish tizimini ishlab chiqishda substratning hajmiy namligi bo'yicha boshqaruvni asoslaganlar [15]; M. Chappell va hammualliflari uchta idishli ko'chatxonada simsiz sensor tarmoqlarini joriy etib, tarmoq tugunlarini tarirlash zaruratini alohida ta'kidlaganlar [16]. A.A. Abdelmoneim va hammualliflari arzon IoT sig'imli datchiklari asosidagi sug'orishni ob-havo ma'lumotlariga asoslangan usul bilan qiyoslab, datchikka asoslangan usulning ustunligini tasdiqlaganlar, ammo bu ustunlik faqat to'g'ri tarirlangan datchiklarda saqlanadi [19]. H.F.E. de Oliveira va hammualliflari issiqxonada namlik datchigi ko'rsatkichi bo'yicha avtomatik sug'orilgan gilos pomidorining agrotexnik ko'rsatkichlarini o'rganib, shunga o'xshash xulosaga kelganlar [20]. Shunday qilib, mazkur ishda tarirlashning majburiyligi to'g'risidagi xulosa kamida to'rtta mustaqil tajribaviy manba bilan tasdiqlanadi.

Sanoat yechimlarining iqtisodiy asoslanmaganligi. 3-jadval ma'lumotlari sanoat kontrollerining iste'mol quvvati bo'yicha 32-razryadli mikrokontrollerdan 10...30 barobar ortiqqligini ko'rsatadi. Bundan ham muhimi — narx omili: PLC va unga tegishli sanoat datchiklarining narxi kichik hajmli qurilmaning umumiy tannarxiga solishtirilarli bo'lib, avtomatlashtirishning iqtisodiy samarasini yo'qqa chiqaradi. B.E. Belayneh va hammualliflari tijorat ko'chatxonasida datchikka asoslangan sug'orishni joriy etishning xarajat-foyda tahlilini o'tkazib, tizimning qoplanish muddati aynan uskunalar tannarxiga chiziqli bog'liq ekanligini



ko'rsatganlar [17]. Kichik hajmli qurilma sharoitida bu bog'lanish yanada keskin namoyon bo'ladi, chunki foyda bazasi (yetishtiriladigan mahsulot hajmi) kichik. Shu sababli sanoat miqyosida oqlangan SCADA + PLC arxitekturasini kichik hajmli qurilmaga ko'chirish iqtisodiy jihatdan asoslanmagan; uning o'rniga funksional jihatdan ekvivalent, ammo narxi bir necha o'nlab barobar past bo'lgan ikki bosqichli arxitektura taklif etiladi. Ayni paytda ushbu arxitektura SCADA ning asosiy prinsipini — quyi darajaning real vaqt rejimida mustaqil ishlashini — to'liq saqlaydi.

Sun'iy intellekt va raqamli egizak yondashuvlari bilan qiyoslash. S. Hemming va hammualliflari sun'iy intellekt asosida masofadan boshqariladigan issiqxonada tajribali agronom natijalariga yaqin natijaga erishganlar [21], biroq ularning tizimi sanoat miqyosidagi o'lchov va ijro etuvchi infratuzilmaga tayanadi. C. Verdouw va hammualliflari «raqamli egizak» konsepsiyasini qishloq xo'jaligiga tatbiq etib, uni fizik obyektning real vaqt rejimida yangilanib boruvchi virtual nusxasi sifatida ta'riflaganlar [22]. Ushbu yondashuv mazkur tadqiqotda ishlab chiqilayotgan matematik modelni boshqaruv tizimi tarkibiga kiritish uchun nazariy asos bo'lib xizmat qiladi: model real o'lchov natijalari bilan taqqoslanib, uning koeffitsientlari muntazam aniqlashtirilib borilishi mumkin. Ikki bosqichli arxitekturaning yuqori darajasi (bir platali kompyuter) aynan shu vazifani bajarishga qodir, chunki uning hisoblash quvvati va xotira hajmi model hisoblari uchun yetarli.

Kompyuter ko'rish yo'nalishi. S.P. Mohanty va hammualliflari tasvir asosida o'simlik kasalliklarini aniqlashda chuqur o'qitish usullarining yuqori samaradorligini ko'rsatganlar [23], K.P. Ferentinos turli neyron tarmoq arxitekturalarini qiyoslagan [24], A.K. Singh va hammualliflari o'simlik stressini fenotiplash yo'nalishini tizimlashtirganlar [25], J. Shin va hammualliflari esa nazorat qilinadigan muhitda RGB-kamera yordamida qulupnay bargidagi kasallikni erta aniqlash usulini ishlab chiqqanlar [26]. Ushbu natijalar yo'nalishning istiqbolliligini tasdiqlaydi, biroq ularning barchasi o'quv tanlanmasini shakllantirish va model o'qitishni talab qiladi,



bu esa mustaqil tadqiqot predmeti hisoblanadi. Shu sababli mazkur ishda kompyuter ko'rish faqat ma'lumot yig'ish darajasida — kameradan tasvirni belgilangan davriylikda saqlash shaklida — ko'rib chiqiladi. Ikki bosqichli arxitektura bu yo'nalishni kelgusida kengaytirish uchun ochiq: yuqori daraja video oqimni qayta ishlash imkoniyatiga ega.

Микроклим бир xilligi masalasi. Y. Zhang va M. Kacira o'simlik fabrikasida iqlim bir xilligini hisoblash gidrodinamikasi usullari bilan tahlil qilib, havo taqsimotining notekisligi mahsulot sifati va hosildorlikning yaruslar bo'ylab farqlanishiga olib kelishini ko'rsatganlar [27]. Ularning natijalari sanoat miqyosidagi obyektlarga tegishli bo'lib, markazlashgan havo tayyorlash tizimi mavjudligini nazarda tutadi. Kichik hajmli qurilmada esa havo almashinuvi ikkita kichik quvvatli ventilyator ($2 \dots 8$ Vt) bilan ta'minlanadi, shu sababli ularning ish rejimini rostlash mikroiklim bir xilligining yagona vositasi bo'lib qoladi. (7) ifodadagi kubik bog'liqlik esa rostlashning energetik jihatdan ham foydali ekanligini ko'rsatadi: sarfni 20 % ga kamaytirish quvvatni 50 % ga kamaytiradi. Bunday miqdoriy baho kichik hajmli qurilmalar uchun adabiyotda keltirilmagan.

Milliy kontekst. B.E. Egamberdiyev va hammualliflari issiqxona xo'jaliklarini boshqarish moslamasi va avtomatlashtirilgan tizimini ishlab chiqqan bo'lsalar-da [28], ularning yechimi bir yarusli inshootga qaratilgan va yaruslar bo'ylab bir xillik masalasini qamrab olmaydi. J. Usmonov va X. Mamirov sensor-mikrokontroller integratsiyasini tahlil qilib, integratsiyaning optimallashtirilishi tizim ishonchliligini oshirishini ko'rsatganlar [29], biroq o'lchov kanallariga qo'yiladigan aniqlik talablarini texnologik chegaralar bilan bog'lamaganlar. Mazkur ishda ushbu bo'shliq (1) ifoda va 1-jadval bilan to'ldiriladi. Boshqaruv qonunlarini tanlashda avtomatik boshqarish nazariyasining klassik rele va PID qonunlariga tayanildi [30]; kichik hajmli qurilma sharoitida rele (gisterizisli) qonunning afzalligi uning ijro etuvchi qurilmalar resursini tejashi va sodda texnik vositalar bilan amalga oshirilishidadir.



Cheklovlar. Mazkur tahlilning uchta cheklovi qayd etilishi lozim. Birinchidan, tahlil adabiyot manbalari, me'yoriy hujjatlar va ishlab chiqaruvchilarning texnik hujjatlariga asoslangan bo'lib, tanlangan element bazasining metrologik tavsiflari mustaqil stend sinovlarida tekshirilmagan; bu vazifa tajribaviy bo'limga o'tkaziladi. Ikkinchidan, narx ko'rsatkichlari sifat darajasida («arzon», «qimmat») baholangan, chunki mutlaq narxlar bozor konyunkturasiga bog'liq va tez o'zgaradi. Uchinchidan, tijorat mahsulotlarining texnik hujjatlari to'liq emas — 3.9-bo'limda ko'rsatilganidek, ularda PPFД va notekislik ko'rsatkichlari keltirilmaydi, shu sababli funksional darajalar bo'yicha tasnif sifat mezonlariga tayanadi.

Hal etilmagan masalalar. 1.1–1.3-paragraflarda o'tkazilgan tahlil natijalari umumlashtirilib, sakkizta hal etilmagan masala aniqlandi (8-jadval).

8-jadval. Hal etilmagan masalalar va ularni hal qilish yo'llari

Masala	Mavjud holat	Hal qilish yo'li
Yaruslar bo'ylab harorat notekisligi	sanoat tizimlari uchun o'rganilgan; kichik hajmli qurilmalar uchun miqdoriy bog'lanishlar yo'q	issiqlik balansining rekurrent modelini ishlab chiqish va havo sarfini asoslash
Ventilyator parametrlarini tanlash	amaliy tavsiyalar asosida, hisobsiz	tarmoq qarshiligi va ventilyator tavsifining birgalikdagi yechimi
Drenaj suvining qaytish koeffitsienti	kichik hajmli yopiq kontur uchun qiymat keltirilmagan	suv balansi modelini tuzish va koeffitsientni tajribaviy aniqlash
Sug'orish chegaralarini tanlash	qarama-qarshi natijalar mavjud	gisterezisli algoritmi parametrlarini nazariy



		asoslash va tajribada tekshirish
Datchiklarni tarirlash	ko'pchilik ishlarda uslubiyot keltirilmagan	gravimetrik usul asosida tarirlash uslubiyotini ishlab chiqish
Yoritish rejimini hisoblash	lyuks bo'yicha, standart talabiga zid	PPFD va DLI bo'yicha qayta hisoblash
Energiya sarfini optimallashtirish	tashkil etuvchilar alohida ko'rib chiqilgan	yagona maqsad funksiyasi va cheklovlar tizimini shakllantirish
Tizimning yaxlitligi	yoritish, sug'orish va ventilyatsiya alohida boshqariladi	uchala tizimni yagona boshqaruv konturida birlashtirish

Tahlil natijalarining darajalar bo'yicha umumlashtirilishi. Birinchi bobda o'tkazilgan tahlil uch darajada olib borildi: konstruksiyalar darajasida, jarayonlarni boshqarish usullari darajasida va texnik vositalar darajasida. Har bir darajada mavjud yechimlarning imkoniyatlari va cheklovlari aniqlandi (9-jadval).

9-jadval. Tahlil natijalarining darajalar bo'yicha umumlashtirilishi

Daraja	O'rganilgan masala	Erishilgan natija	Hal etilmagan qismi
Konstruksiyalar	ko'p yarusli qurilmalar turlari va parametrlari	sanoat va konteyner tizimlari yaxshi o'rganilgan	kichik hajmli qurilmalar uchun parametrlar asoslanmagan



Микроклим	harorat va namlikni boshqarish	boshqaruv qonunlari ishlab chiqilgan	yaruslar bo'ylab notekislik miqdoriy baholanmagan
Sug'orish	datchikka asoslangan boshqaruv	usul samaradorligi tasdiqlangan	qarama-qarshi natijalar, tarirlash uslubiyoti yo'q
Yopiq kontur	drenajni qayta ishlatish	sanoat tizimlari uchun asoslangan	kichik hajm uchun qaytish koeffitsienti yo'q
Yoritish	spektr, PPFD, DLI	me'yorlar aniqlangan	issiqlik yuki bilan bog'lanish o'rganilmagan
Texnik vositalar	datchiklar va kontrollerlar	element bazasi yetarli	yagona konturga birlashtirilmagan

Jadvaldan ko'rinadiki, alohida olingan har bir yo'nalish bo'yicha yetarlicha ilmiy natijalar to'plangan, biroq ularning kichik hajmli ko'p yarusli qurilma sharoitiga moslashtirilishi va yagona tizimga birlashtirilishi bajarilmagan. Aynan shu holat mazkur tadqiqotning ilmiy bo'shlig'ini belgilaydi. Tahlilning yana bir muhim natijasi — turli yo'nalishlarda qabul qilingan mezonlarning bir-biriga bog'lanmaganligi: yoritish bo'yicha me'yorlar o'simlik fiziologiyasidan kelib chiqib belgilangan, mikroiklim bo'yicha talablar esa issiqlik texnikasi nuqtai nazaridan; ularning o'zaro ta'sirini hisobga oluvchi yagona mezonlar tizimi mavjud emas.

Nihoyat, tahlil me'yoriy bazadagi bo'shliqni ham ko'rsatdi: kichik hajmli ko'p yarusli qurilmalar uchun na mikroiklim, na yoritish me'yorlari belgilanmagan [5]. Bu holat bir tomondan tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyatini oshiradi, ikkinchi



tomondan esa olingan qiymatlarni tarmoq hujjatlariga kiritish bo'yicha taklif tayyorlash zaruratini keltirib chiqaradi. 7-jadvalda keltirilgan ko'rsatkichlar aynan shunday taklifning asosi bo'lib xizmat qiladi.

Tadqiqotning maqsadi va vazifalari. Keltirilgan tahlil ko'p yarusli kichik hajmli mini-issiqxonaning konstruktiv-texnologik parametrlarini va boshqaruv algoritmlarini kompleks asoslash masalasi ilmiy jihatdan yetarlicha o'rganilmaganligini ko'rsatadi. Shundan kelib chiqib tadqiqotning maqsadi — ko'p yarusli mini-issiqxonani avtomatlashtirish tizimini ishlab chiqish, uning konstruktiv-texnologik parametrlarini nazariy va eksperimental asoslash hamda suv va energiya sarfini kamaytirish hisobiga qurilma samaradorligini oshirishdan iborat qilib belgilanadi. Maqsadga erishish uchun beshta vazifa hal etiladi: 1) ko'p yarusli yetishtirish qurilmalari konstruksiyalarini, mikroiklim, sug'orish va yoritishni boshqarish usullarini, boshqaruvning texnik vositalarini hamda me'yoriy bazani tahlil qilish va tadqiqot yo'nalishini asoslash; 2) issiqlik balansi va havo almashinuvi jarayonlarining matematik modelini ishlab chiqish hamda yaruslar bo'ylab harorat notekisligini 2 °C dan oshirmaydigan havo sarfini va ventilyatorning ish nuqtasini asoslash; 3) substrat namligi dinamikasi va yoritish rejimining matematik modellarini tuzish, gisterezisli sug'orish algoritmini sintez qilish, yopiq kontur parametrlarini hamda PPFD va DLI ko'rsatkichlari bo'yicha yoritish quvvatini asoslash; 4) sutkalik energiya sarfi modelini tuzish, optimallashtirish masalasini yechish hamda avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimining tuzilmasi, algoritmlari va dasturiy ta'minotini ishlab chiqish; 5) o'lchov vositalarini tarirlash uslubiyotini ishlab chiqish, laboratoriya va ishlab chiqarish sinovlarini o'tkazish, iqtisodiy samaradorlikni baholash va joriy etish bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqish. Sanab o'tilgan vazifalarning har biri 8-jadvaldagi hal etilmagan masalalar bilan bevosita bog'langan bo'lib, ularning ketma-ketligi tadqiqotning mantiqiy tuzilmasini belgilaydi: tahlil — nazariy modellashtirish — tizimni ishlab chiqish — tajribaviy tekshirish — iqtisodiy baholash.



5. Xulosalar

1. Ko'p yarusli mini-issiqxona uchun sakkizta o'lchov kanali aniqlanib, ularga qo'yiladigan aniqlik talablari boshqaruv chegarasi kengligining 10 % i qoidasidan formal ravishda keltirib chiqarildi: havo harorati $\pm 0,5$ °C, havo namligi ± 3 %, substrat namligi $\pm 0,02$ m³/m³, suv sathi ± 10 mm, PPFD ± 5 %, CO₂ ± 50 ppm, havo tezligi $\pm 0,05$ m/s.

2. Uch yarusli qurilma uchun o'lchov nuqtalarining zarur soni hisoblab chiqildi va u doimiy rejimda 15...18 tani, tajriba davrida esa 18...23 tani tashkil qilishi aniqlandi; ushbu son quyi daraja kontrollerining kirish kanallari soniga qo'yiladigan talabni belgilaydi.

3. Substrat namligini o'lchashning beshta usuli qiyoslanib, narx va ishonchlilik nisbatidan kelib chiqib sig'imli (FDR) usul tanlandi. Mavjud datchiklarning real aniqligi ($\pm 0,02$ m³/m³) sug'orish chegarasi kengligining (0,08 m³/m³) 25 % ini tashkil qilishi ko'rsatilib, gravimetrik usulda tarirlash egri chizig'ini olish majburiyligi asoslandi.

4. To'rtta hisoblash platformasi qiyoslanib, ikki bosqichli arxitektura asoslandi: quyi darajada iste'mol quvvati 0,5...1,5 Vt bo'lgan 32-razryadli mikrokontroller, yuqori darajada 3...7 Vt quvvatli bir platali kompyuter. Sanoat kontrolleri (5...15 Vt) kichik hajmli qurilma uchun iqtisodiy jihatdan asoslanmaganligi ko'rsatildi.

5. Ijro etuvchi qurilmalarni boshqarish usullari aniqlandi: nasos uchun diskret (gisterezisli), ventilyatorlar uchun uzluksiz (PWM) boshqaruv. Ventilyator quvvatining havo sarfiga kubik bog'liqligi asosida sarfni 10 % ga kamaytirish quvvatni 27 % ga, 20 % ga kamaytirish esa 50 % ga kamaytirishi hisoblandi.

6. Aloqa kanallari qiyosiy tahlil qilinib, maishiy sharoitda foydalaniladigan qurilma uchun Wi-Fi kanali (30...50 m) va ISO/IEC 20922 standarti bilan rasmiylashtirilgan MQTT protokoli maqbul deb topildi; ma'lumotlarni birlamchi qayta ishlash uchun uch bosqichli filtrlash sxemasi taklif etilib, filtr oynasining



kengligi sekin o'zgaruvchi kattaliklar uchun 10...30, tez o'zgaruvchi kattaliklar uchun 3...5 o'lchov qilib belgilandi.

7. Sakkizta hal etilmagan masala aniqlanib, ularning har biri uchun hal qilish yo'li belgilandi; shular asosida boshqaruv tizimiga qo'yiladigan 14 ta ko'rsatkichdan iborat texnik talablar ro'yxati shakllantirildi va tadqiqotning maqsadi hamda beshta vazifasi asoslandi.

Аннотация

В статье выполнен сравнительный анализ технических средств управления для малообъёмной многоярусной мини-теплицы — измерительных каналов, вычислительных платформ, исполнительных устройств и каналов связи — по единой системе критериев, и на этой основе сформулированы нерешённые задачи исследования. Требования к точности измерительных каналов формально выведены из правила «не более 10 % ширины диапазона регулирования». Определены восемь измерительных каналов; для трёхъярусной установки рассчитано необходимое число точек измерения — 15...18 в штатном режиме. Сопоставлены пять методов измерения влажности субстрата; по соотношению цены и надёжности выбраны ёмкостные (FDR) датчики, для которых обоснована обязательность градуировки гравиметрическим методом. Сравнение четырёх вычислительных платформ обосновало двухуровневую архитектуру: нижний уровень — 32-разрядный микроконтроллер (0,5...1,5 Вт), верхний — одноплатный компьютер (3...7 Вт); промышленный контроллер (5...15 Вт) для установки данного масштаба экономически не оправдан. На основе кубической зависимости мощности вентилятора от расхода показано, что снижение расхода на 20 % уменьшает мощность примерно на 50 %. Выбраны канал Wi-Fi и протокол MQTT. Выявлены восемь нерешённых задач и



сформированы технические требования к системе управления из 14 показателей.

Ключевые слова: многоярусная мини-теплица, автоматизированная система управления, измерительный канал, ёмкостный датчик влажности, градуировка, микроконтроллер, двухуровневая архитектура, ШИМ, MQTT, технические требования.

Abstract

The paper presents a comparative analysis of the control hardware applicable to a small-volume multi-tier mini-greenhouse — measurement channels, computing platforms, actuators and communication links — carried out against a single set of criteria, and on this basis formulates the unsolved problems of the study. Accuracy requirements for the measurement channels are formally derived from the rule that the measurement error must not exceed 10 % of the width of the control band. Eight measurement channels were identified; for a three-tier unit the required number of measuring points was calculated as 15...18 in normal operation and 18...23 during experimental campaigns. Five methods of substrate moisture measurement were compared, and capacitive (FDR) sensors were selected on the cost-to-reliability ratio, with gravimetric calibration shown to be mandatory because the attainable accuracy ($\pm 0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3$) equals 25 % of the irrigation band width ($0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$). A comparison of four computing platforms justified a two-level architecture: a 32-bit microcontroller (0.5...1.5 W) at the lower level and a single-board computer (3...7 W) at the upper level; an industrial PLC (5...15 W) is economically unjustified at this scale. Using the cubic dependence of fan power on airflow, a 20 % flow reduction was shown to cut power by about 50 %. Wi-Fi and the MQTT protocol were selected. Eight unsolved problems were identified and a 14-item technical requirements specification for the control system was formulated.



Keywords: multi-tier mini-greenhouse, automated control system, measurement channel, capacitive moisture sensor, calibration, microcontroller, two-level architecture, PWM, MQTT, technical requirements.

Adabiyotlar

1. O'zbekiston Respublikasining "Metrologiya to'g'risida"gi Qonuni. – O'RQ-614-son, 07.04.2020 (o'zg. O'RQ-872-son, 26.10.2023). – <https://lex.uz/acts/-4782808>

2. O'zbekiston Respublikasining "Standartlashtirish to'g'risida"gi Qonuni. – O'RQ-800-son, 03.11.2022. – <https://lex.uz/uz/docs/-6270526>

3. "Raqamli O'zbekiston-2030" strategiyasini tasdiqlash va uni samarali amalga oshirish chora-tadbirlari to'g'risida: O'zR Prezidentining Farmoni. – PF-6079-son, 05.10.2020. – <https://lex.uz/docs/-5030957>

4. "Elektr qurilmalarini ekspluatatsiya qilishda texnika xavfsizligi qoidalarini tasdiqlash to'g'risida": O'zR Vazirlar Mahkamasining qarori. – 638-son, 09.10.2020. – <https://lex.uz/uz/docs/-5038211>

5. ShNQ 2.04.20-22. Turar joy obyektlari va jamoat binolarining muhandislik uskunalari uchun kommunikatsiya va dispetcherlash tizimlari. Loyihalash talablari. – Buyruq 01/2-13-son, 24.04.2024. – <https://lex.uz/docs/-6975271>

6. ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. – Введ. 01.06.1990. – <https://internet-law.ru/gosts/gost/2095/>

7. ISO 11461:2001. Soil quality – Determination of soil water content as a volume fraction using coring sleeves – Gravimetric method. – ISO. – <https://www.iso.org/standard/33031.html>

8. ISO 7726:1998. Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities. – ISO. – <https://www.iso.org/standard/14562.html>



9. ISO/IEC 20922:2016. Information technology – Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) v3.1.1. – ISO/IEC. – <https://www.iso.org/standard/69466.html>

10. ASTM D6780/D6780M-19. Standard Test Methods for Water Content and Density of Soil In situ by Time Domain Reflectometry (TDR). – ASTM International. – https://store.astm.org/d6780_d6780m-19.html

11. ASTM D6245-18. Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation. – ASTM International. – <https://store.astm.org/d6245-18.html>

12. ANSI/ASABE S640 JUL2017 (R2022). Quantities and Units of Electromagnetic Radiation for Plants (Photosynthetic Organisms). – ASABE. – <https://webstore.ansi.org/standards/asabe/ANSIASABES640JUL2017R2022>

13. ANSI/ASABE S642 SEP2018 (R2024). Recommended Methods for Measurement and Testing of LED Products for Plant Growth and Development. – ASABE. – <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=49804>

14. Shamshiri R.R., Kalantari F., Ting K.C. et al. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2018. – Vol. 11(1). – P. 1–22. – DOI: 10.25165/j.ijabe.20181101.3210

15. Nemali K.S., van Iersel M.W. An automated system for controlling drought stress and irrigation in potted plants // Scientia Horticulturae. – 2006. – Vol. 110(3). – P. 292–297. – DOI: 10.1016/j.scienta.2006.07.009

16. Chappell M., Dove S.K., van Iersel M.W. et al. Implementation of wireless sensor networks for irrigation control in three container nurseries // HortTechnology. – 2013. – Vol. 23(6). – P. 747–753. – DOI: 10.21273/HORTTECH.23.6.747

17. Belayneh B.E., Lea-Cox J.D., Lichtenberg E. Costs and benefits of implementing sensor-controlled irrigation in a commercial pot-in-pot container



nursery // HortTechnology. – 2013. – Vol. 23(6). – P. 760–769. – DOI: 10.21273/HORTTECH.23.6.760

18. Wheeler W.D., Thomas P., van Iersel M., Chappell M. Implementation of sensor-based automated irrigation in commercial floriculture production: A case study // HortTechnology. – 2018. – Vol. 28(6). – P. 719–727. – DOI: 10.21273/HORTTECH04114-18

19. Abdelmoneim A.A., Al Kalaany C.M., Dragonetti G. et al. Comparative analysis of soil moisture- and weather-based irrigation scheduling for drip-irrigated lettuce using low-cost IoT capacitive sensors // Sensors. – 2025. – Vol. 25(5). – 1568. – DOI: 10.3390/s25051568

20. de Oliveira H.F.E., de Moura Campos H., Mesquita M. et al. Horticultural performance of greenhouse cherry tomatoes irrigated automatically based on soil moisture sensor readings // Water. – 2021. – Vol. 13(19). – 2662. – DOI: 10.3390/w13192662

21. Hemming S., de Zwart F., Elings A., Righini I., Petropoulou A. Remote control of greenhouse vegetable production with artificial intelligence – greenhouse climate, irrigation, and crop production // Sensors. – 2019. – Vol. 19(8). – 1807. – DOI: 10.3390/s19081807

22. Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A., Wolfert S. Digital twins in smart farming // Agricultural Systems. – 2021. – Vol. 189. – 103046. – DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103046

23. Mohanty S.P., Hughes D.P., Salathe M. Using deep learning for image-based plant disease detection // Frontiers in Plant Science. – 2016. – Vol. 7. – 1419. – DOI: 10.3389/fpls.2016.01419

24. Ferentinos K.P. Deep learning models for plant disease detection and diagnosis // Computers and Electronics in Agriculture. – 2018. – Vol. 145. – P. 311–318. – DOI: 10.1016/j.compag.2018.01.009



25. Singh A.K., Ganapathysubramanian B., Sarkar S., Singh A. Deep learning for plant stress phenotyping: Trends and future perspectives // Trends in Plant Science. – 2018. – Vol. 23(10). – P. 883–898. – DOI: 10.1016/j.tplants.2018.07.004

26. Shin J., Chang Y.K., Heung B. et al. A deep learning approach for RGB image-based powdery mildew disease detection on strawberry leaves // Computers and Electronics in Agriculture. – 2021. – Vol. 183. – 106042. – DOI: 10.1016/j.compag.2021.106042

27. Zhang Y., Kacira M. Analysis of climate uniformity in indoor plant factory system with computational fluid dynamics (CFD) // Biosystems Engineering. – 2022. – Vol. 220. – P. 73–86. – DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2022.05.009

28. Egamberdiyev B.E., Raximova N.M., Ilhomova L.J. Issiqxona xo'jaliklarini boshqarish moslamasi va avtomatlashtirilgan tizimini ishlab chiqish // Science and Innovation: International Scientific Journal. – 2022. – Vol. 1, Issue 7. – <http://scientists.uz/uploads/202207/A-95.pdf>

29. Usmonov J., Mamirov X. Aqlli issiqxonalarda atrof-muhitni intellektual boshqarish uchun sensor-mikrokontroller integratsiyasini tahlil qilish va optimallashtirish // Interpretation and Researches. – 2025. – Vol. 6, Issue 52. – ISSN 2181-4163.

30. Бородин И.Ф., Андреев С.А. Автоматизация технологических процессов и системы автоматического управления. – М., 2006.