GAZLANGAN ICHIMLIKLARNI IDISHLARGA QUYISH JARAYONINI ADAPTIV BOSHQARISH MODELI VA ALGORITMINI ISHLAB CHIQISH

Yigitaliyev Bekzod To‘lanboy o‘g‘li
Namangan davlat texnika universiteti, magistrant

Annotatsiya: Maqolada gazlangan ichimliklarni, xususan kola mahsulotini idishlarga quyish jarayonida hajm aniqligini ta’minlash masalasi ko‘rib chiqiladi. Mahsulot harorati, karbonat angidrid (CO_2) miqdori, qarshi bosim va quyish tezligining o‘zaro ta’siri ko‘piklanish hamda quyish hajmidagi og‘ishlarga sabab bo‘ladi. Ushbu omillarni hisobga oluvchi adaptiv boshqaruv yondashuvi taklif etiladi: u klassik PID-regulyatorni parametrlar jadvali (gain scheduling), ko‘pik hajmini oldindan kompensatsiyalash va sikldan-sikla tuzatish bilan to‘ldiradi. Jarayonning kirish-chiqish kattaliklari, matematik modeli, datchiklar tarkibi va PLC/SCADA asosidagi amalga oshirish arxitekturasi bayon qilinadi. Taklif etilgan algoritm soddalashtirilgan model asosidagi 1000 siklli simulyatsiyada klassik PID bilan taqqoslangan: o‘rtacha mutlaq xato 1,22 ml dan 0,40 ml gacha kamaygan, ko‘piklanish holatlari ulushi 21,7 % dan 0,1 % gacha tushgan, o‘rtacha quyish vaqti esa taxminan 4,4 % ga ortgan. Natijalar real liniyadagi o‘lchovlarga emas, taxminiy model parametrlariga asoslanadi, shu sababli ular algoritmning ishlash tamoyilini ko‘rsatadi va keyingi tajriba tekshiruvlari uchun asos bo‘ladi.

Kalit so‘zlar: gazlangan ichimlik, quyish jarayoni, adaptiv boshqaruv, PID-regulyator, ko‘piklanish, CO_2, matematik model, PLC, SCADA.

Abstract: The paper considers volume accuracy in filling carbonated soft drinks (cola) into containers. Product temperature, dissolved CO_2, counter-pressure and filling rate interact and cause foaming and fill-volume deviations. An adaptive control approach is proposed that extends a classical PID controller with gain scheduling, model-based foam feed-forward compensation and run-to-run correction. The process model, sensor set, multi-stage algorithm and PLC/SCADA implementation architecture are described. In a 1000-cycle simulation of a simplified model, the mean absolute fill error decreased from 1.22 ml to 0.40 ml, the share of foaming events decreased from 21.7 % to 0.1 %, while the mean fill time increased by about 4.4 %. The results are simulation-based and do not replace experimental validation on a real filling line.

Keywords: carbonated beverage, filling process, adaptive control, PID controller, foaming, CO_2, mathematical model, PLC, SCADA.

Аннотация: Рассматривается задача обеспечения точности дозирования при розливе газированных напитков (в частности, колы) в ёмкости. Температура продукта, содержание диоксида углерода (CO_2),

противодавление и скорость розлива взаимосвязаны и вызывают пенообразование и отклонения объёма налива. Предложен адаптивный подход к управлению, дополняющий классический ПИД-регулятор планированием коэффициентов, модельной компенсацией пены по прямой связи и коррекцией от цикла к циклу. Описаны математическая модель, состав датчиков, многоэтапный алгоритм и архитектура реализации на ПЛК/SCADA. По результатам имитационного моделирования (1000 циклов) средняя абсолютная ошибка объёма снизилась с 1,22 до 0,40 мл, доля случаев пенообразования — с 21,7 до 0,1 %, среднее время налива возросло примерно на 4,4 %. Результаты получены на модели и не заменяют экспериментальной проверки на реальной линии.

Ключевые слова: газированный напиток, розлив, адаптивное управление, ПИД-регулятор, пенообразование, CO_2, математическая модель, ПЛК, SCADA.

1. KIRISH

Gazlangan ichimliklarni idishlarga quyish liniyaning mahsulot sifati, ishlab chiqarish unumdorligi va xomashyo yo‘qotishlariga bevosita ta’sir qiluvchi bosqichidir. Quyish vaqtida suyuqlikdagi CO_2 ning ajralishi, bosimning keskin o‘zgarishi va ko‘pik hosil bo‘lishi idishning belgilangan hajmda to‘lmasligiga, mahsulotning toshib ketishiga yoki sikl vaqtining uzayishiga olib kelishi mumkin [8]. Hajmning me’yordan kam bo‘lishi iste’molchi va me’yoriy talablar nuqtai nazaridan, ortiqcha quyish esa xomashyo isrofi sifatida maqbul emas, shu sababli quyish aniqligi ham sifat, ham iqtisodiy ko‘rsatkich hisoblanadi.

O‘zbekiston Respublikasida raqamli texnologiyalarni iqtisodiyot tarmoqlariga, jumladan real sektor korxonalaridagi ishlab chiqarish va logistika jarayonlariga joriy etish yo‘nalishi “Raqamli O‘zbekiston — 2030” strategiyasida belgilangan [1]. Bu umumiy yo‘nalish ishlab chiqarish jarayonlarida o‘lchash, ma’lumotlarni qayta ishlash va avtomatik boshqaruv yechimlarini takomillashtirish uchun tashkiliy asos yaratadi.

Gazlangan mahsulotning o‘ziga xos jihati shundaki, CO_2 ning suyuqlikda erishi harorat va bosimga bog‘liq bo‘lib (Genri qonuni), quyish paytida bosim pasayganda gaz fazaga o‘ta boshlaydi va ko‘pik hosil qiladi [7, 8]. Ko‘pik sath datchigi hamda gaz pufakchalari bilan to‘yingan oqimni o‘lchovchi asboblar ko‘rsatkichiga xato kiritadi, natijada nazorat qilinayotgan ko‘rinma hajm bilan idishda cho‘kkandan keyingi haqiqiy hajm o‘rtasida farq paydo bo‘ladi. Amaliyotda mahsulot haroratining bir necha gradusga ko‘tarilishi yoki qarshi bosimning bar ulushlarida tebranishi ko‘pik amplitudasini sezilarli o‘zgartiradi; bu ta’sirning miqdoriy bahosi ushbu maqolada keltirilgan modelda 6-bo‘limda ko‘rsatiladi.

Klassik PID-regulyator parametrlari odatda bir marta, nominal rejim uchun sozlanadi [2, 10]. Quyish jarayoni esa nochiziqli (sarf bosimlar farqining kvadrat

ildiziga bog‘liq), vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan (ko‘pik hosil bo‘lish intensivligi haroratga, gazlanganlikka va bosimga bog‘liq) hamda qisqa muddatli (sikl bir necha soniya davom etadi). Bunday sharoitda sozlamalari o‘zgarmas regulyator faqat sozlash nuqtasi yaqinida yaxshi ishlaydi; adaptiv yondashuvlar esa regulyator parametrlarini yoki topshiriq qiymatini rejim o‘zgarishiga qarab moslashtirishga imkon beradi [3, 6].

Tadqiqotning maqsadi — gazlangan ichimlikni quyish jarayonida hajm aniqligini oshirish va ko‘piklanishni cheklash uchun adaptiv boshqaruv modeli va algoritmini ishlab chiqish. Maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar qo‘yildi:

1) quyish jarayonining kirish-chiqish kattaliklarini aniqlash va ko‘pik hosil bo‘lishini hisobga oluvchi soddalashtirilgan dinamik modelni tuzish;

2) klassik PID asosidagi ko‘p bosqichli adaptiv boshqaruv algoritmini ishlab chiqish;

3) algoritmni PLC/SCADA muhitida amalga oshirish arxitekturasini va xavfsizlik blokirovkalarini asoslash;

4) taklif etilgan algoritmni klassik PID bilan kompyuter simulyatsiyasida taqqoslash.

Maqola konseptual-uslubiy xarakterga ega. Real ishlab chiqarishdagi o‘lchovlar va tajriba natijalari hozircha mavjud emas, shu sababli 6-bo‘limdagi ko‘rsatkichlar haqiqiy liniyaning emas, taxminiy parametrlar bilan tuzilgan modelning natijalaridir va ularni tajribada tekshirish zarur.

2. TADQIQOT MATERIALI VA USULLARI

Tadqiqot obyekti sifatida kola ishlab chiqarish liniyasidagi filler (quyish qurilmasi) jarayoni qaraladi. Tadqiqot predmeti — quyish jarayonining matematik modeli, boshqaruv algoritmi hamda ularni PLC/SCADA asosida dasturiy-texnik amalga oshirish usullari. Metodik asos sifatida avtomatik boshqarish nazariyasi [9], tizimlarni identifikatsiyalash, matematik modellashtirish, statistik tahlil va kompyuter simulyatsiyasi olinadi.

Boshqaruv tizimiga quyidagi o‘lchovlar kiritilishi maqsadga muvofiq: mahsulot harorati T, quyish klapaniga yaqin nuqtadagi bosim P, CO_2 konsentratsiyasi yoki gazlanganlikni tavsiflovchi o‘lchov C, idishdagi joriy hajm V va quyish vaqti t. Boshqariladigan chiqish kattaligi — yakuniy quyish hajmi V_f. Kattaliklarning to‘liq ro‘yxati 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval. Quyish jarayonining asosiy kattaliklari

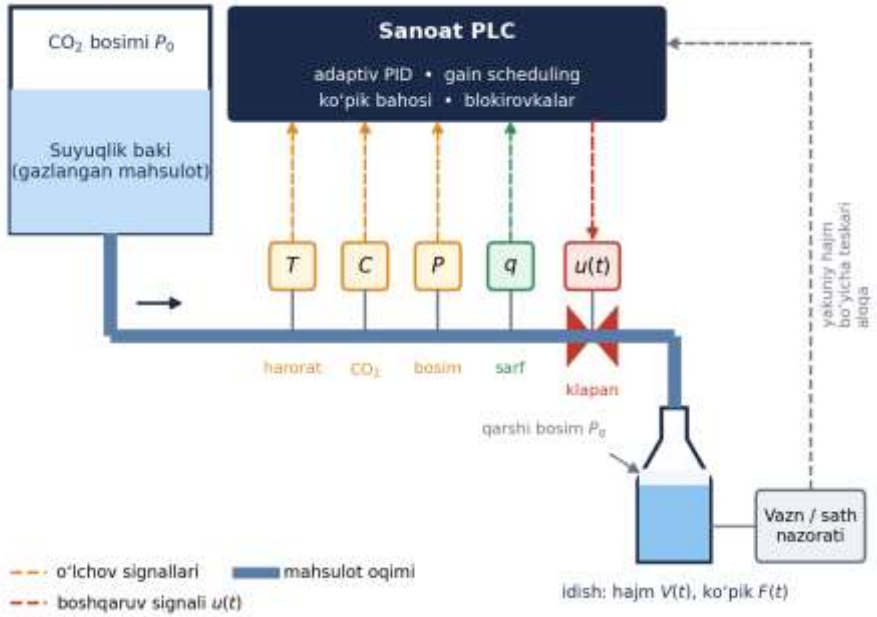
Belgi	Kattalik	Birligi	Vazifasi
T	Mahsulot harorati	°C	o‘lchanadigan kirish
C	CO_2 miqdori (gazlanganlik)	hajm	o‘lchanadigan kirish
P_q	Idishdagi qarshi bosim	bar	o‘lchanadigan kirish
ΔP	Klapan bo‘yicha bosimlar farqi	bar	o‘lchanadigan g‘alayon
u	Klapan ochilishi buyrug‘i	0…1	boshqaruv ta’siri
q	Hajmiy sarf	ml/s	oraliq kattalik
V	Idishga quyilgan suyuqlik hajmi	ml	holat
F	Ko‘pikda ushlanib qolgan hajm	ml	holat (to‘g‘ridan-to‘g‘ri o‘lchanmaydi)
V_m	O‘lchangan (ko‘rinma) hajm	ml	teskari aloqa signali
V_f	Yakuniy (cho‘kkan) hajm	ml	boshqariladigan chiqish
V_{ref}	Belgilangan quyish hajmi	ml	topshiriq

Modellashtirishda quyidagi taxminlar qabul qilindi: (i) jarayon jamlangan parametrli model bilan ifodalanadi; (ii) suyuqlik zichligi o‘zgarmas deb olinadi; (iii) ko‘pik hajmi birinchi tartibli dinamika bilan tavsiflanadi; (iv) bitta quyish klapani qaraladi, karuselning boshqa klapanlari bilan o‘zaro ta’sir hisobga olinmaydi; (v) datchik signallari tasodifiy shovqin bilan buziladi.

3. QUYISH JARAYONINING TEXNIK SXEMASI VA MATEMATIK TAVSIFI

3.1. Funksional sxema

Quyish klapani va idish o‘rtasidagi bosim hamda oqim dinamikasini aniq tasavvur qilish uchun 1-rasmda muhandislik-funksional sxema keltirilgan. Bakdagi mahsulot CO_2 bosimi ostida bo‘ladi, harorat T, gazlanganlik C, bosim P va sarf q datchiklari signallari PLC ga uzatiladi, PLC esa klapan ochilishi u(t) ni shakllantiradi. Yakuniy hajm vazn yoki sath nazorati orqali o‘lchanib, keyingi sikl uchun tuzatish kiritishda ishlatiladi.



1-rasm. Gazlangan ichimlikni quyish apparati (filler) oqimlarining texnik va datchiklar funksional sxemasi.

3.2. Hajm va sarf modeli

Quyish jarayonining soddalashtirilgan dinamik modeli suyuqlik oqimi va idishdagi hajm o‘zgarishini ifodalashdan boshlanadi. Idishga kirayotgan hajmiy sarf q(t) ma’lum bo‘lsa, quyilgan hajm quyidagicha ifodalanadi:

$$V(t) = \int_0^t q(\tau)\,d\tau, \qquad \frac{dV}{dt} = q(t) \tag{1}$$

Amaliy tizimda q(t) klapan ochilishi, bosimlar farqi ΔP(t), suyuqlik xususiyatlari va quvur geometriyasiga bog‘liq. Soddalashtirilgan oqim munosabati sifatida quyidagi ifoda ishlatiladi:

$$q(t) = K_v\, u_a(t) \sqrt{\frac{\Delta P(t)}{\rho}} \tag{2}$$

bunda K_v — klapan va oqim yo‘lining ekvivalent koeffitsiyenti, ρ — suyuqlik zichligi, u_a — klapanning haqiqiy ochilish darajasi. Ijro mexanizmi inersiyaga ega bo‘lgani uchun u_a buyruq u dan birinchi tartibli kechikish bilan farq qiladi:

$$\tau_v \frac{du_a}{dt} + u_a = u(t), \qquad 0 \le u \le 1 \tag{3}$$

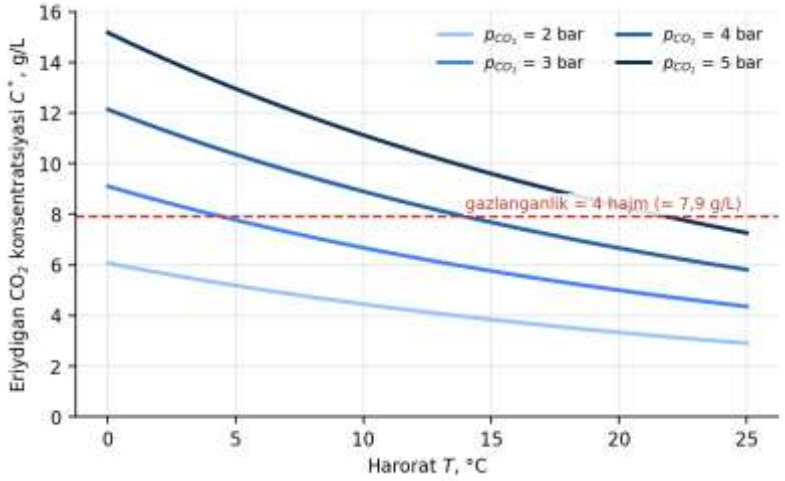
bunda τ_v — klapan ijro mexanizmining vaqt doimiysi. Bu kechikish sababli yopish buyrug‘i berilgandan keyin ham idishga ma’lum hajm quyilishda davom etadi; algoritm bu hajmni oldindan hisobga olishi lozim (4.4-band).

3.3. CO_2 ning suyuqlikda erishi

CO_2 ning suyuqlikda erishi bosim va harorat bilan bog‘liq bo‘lib, Genri qonunining soddalashtirilgan ko‘rinishi quyidagicha yoziladi:

$$C^* = k_H(T)\,p_{CO_2}, \qquad k_H(T) = k_H^{\ominus}\exp\left[B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^{\ominus}}\right)\right] \tag{4}$$

bunda C^* — muvozanatdagi erigan gaz konsentratsiyasi, p_{CO2} — CO_2 ning parsial bosimi, $k_H(T)$ — Genri koeffitsiyenti, $T^{\ominus}$ = 298,15 K, B — haroratga bog‘liqlikni tavsiflovchi doimiy. Suvdagi CO_2 uchun $k_H^{\ominus} \approx 3{,}3\cdot10^{-4}$ mol/(m^3·Pa) va B ≈ 2400 K qiymatlari keltiriladi [7]. Ushbu ma’lumotlar bo‘yicha hisoblangan erish egri chiziqlari 2-rasmda ko‘rsatilgan: harorat ortishi bilan bir xil bosimda eriydigan gaz miqdori kamayadi, ya’ni issiqroq mahsulot quyish vaqtida CO_2 ni osonroq ajratadi va ko‘pikka moyilroq bo‘ladi.



2-rasm. CO_2 ning suvda erish konsentratsiyasining harorat va parsial bosimga bog‘liqligi (Genri qonuni bo‘yicha hisob). Qizil chiziq — taxminan 4 hajmli gazlanganlikka mos qiymat (1 hajm ≈ 1,977 g/L).

3.4. Ko‘pik modeli va o‘lchov signali

Ko‘pik hajmi F oqim bilan hosil bo‘ladi va vaqt o‘tishi bilan so‘nadi. Birinchi tartibli yaqinlashishda:

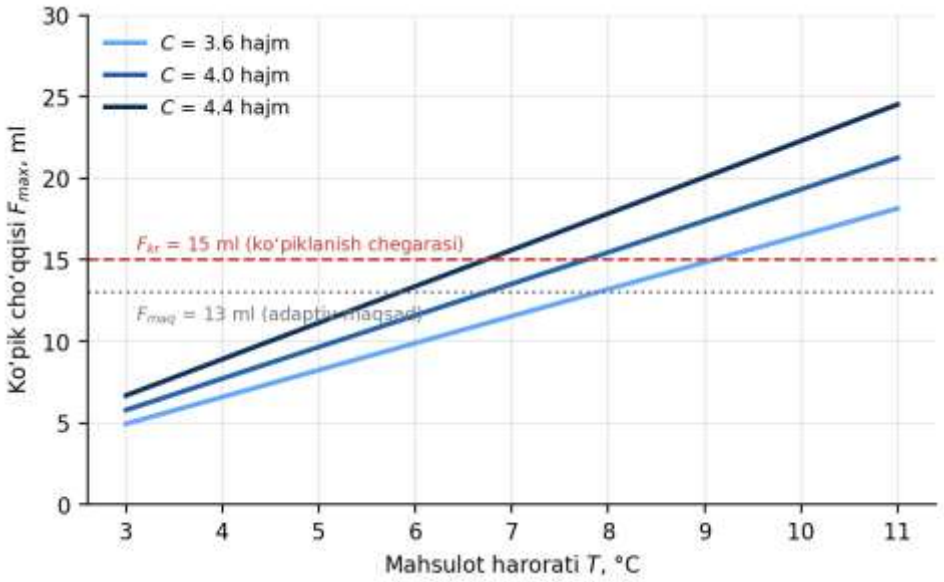
$$\frac{dF}{dt} = a(T, C, P_q)\,q(t) - \frac{F(t)}{\tau_f} \tag{5}$$

bunda a(T, C, P_q) — ko‘pik hosil bo‘lish koeffitsiyenti (haroratga va gazlanganlikka ortib, qarshi bosim oshganda kamayuvchi), τ_f — ko‘pikning so‘nish vaqt doimiysi. Ko‘pik gaz pufakchalari tufayli o‘lchov signaliga qo‘shiladi, idish to‘ldirilib ko‘pik cho‘kkandan keyin esa uning faqat bir qismi suyuqlik sifatida qoladi:

$$V_m(t) = V(t) + F(t) + \nu(t), \qquad V_f = V(t_s) + \beta F(t_s) \tag{6}$$

bunda V_m — o‘lchangan (ko‘rinma) hajm, ν — o‘lchov shovqini, β — ko‘pikning suyuqlikka qaytuvchi ulushi, t_s — klapan to‘liq yopilgan vaqt. (6) dan ko‘rinadiki,

regulyator V_m ni topshiriqqa tenglashtirsa, yakuniy hajm $V_f \approx V_{ref} - (1 - \beta)F$ ga teng bo‘ladi, ya’ni idish ko‘pik hajmiga bog‘liq ravishda kam to‘ladi. Bu kamchilik sozlash nuqtasidan chetga chiqilganda ortadi, chunki F harorat va gazlanganlikka sezgir (3-rasm).



3-rasm. To‘liq ochiq klapanda ko‘pik cho‘qqisi F_{max} ning mahsulot haroratiga va gazlanganlikka bog‘liqligi (modeldan, u = 1).

3.5. Umumlashtirilgan holat tenglamasi

Yuqoridagi munosabatlar umumlashtirilgan holat tenglamasi ko‘rinishida yoziladi:

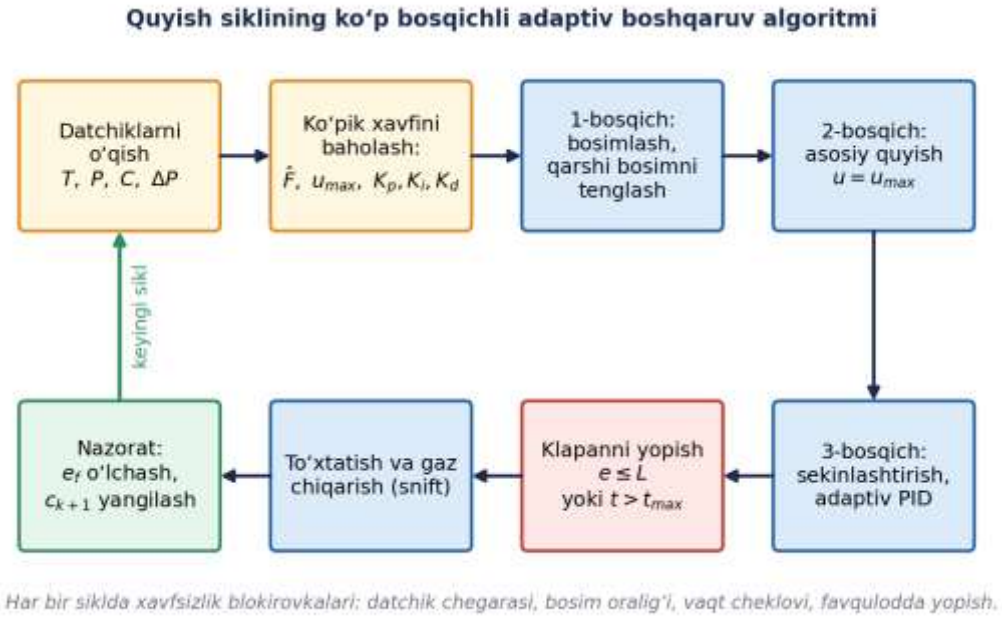
$$\dot{x} = f(x, u, d, \theta), \qquad y = h(x, u, d, \theta) + \varepsilon \tag{7}$$

bunda $x = [V, F, u_a]^T$ — holat vektori, u — boshqaruv, $d = [T, C, P_q, \Delta P]^T$ — o‘lchanadigan g‘alayonlar, θ — model parametrlari (K_v, a, τ_f, β), $y = V_m$ — chiqish, ε — o‘lchov xatosi.

4. TAKLIF ETILAYOTGAN ADAPTIV BOSHQARUV ALGORITMI

4.1. Ko‘p bosqichli tuzilma

Taklif etilayotgan yechim klassik PID boshqaruvini texnologik rejimga moslashtiruvchi ko‘p bosqichli algoritmga asoslanadi. Boshqaruv jarayoni ketma-ket texnologik bosqichlarni o‘z ichiga oladi (4-rasm, 2-jadval): bosimlash, asosiy quyish, sekinlashtirish, klapanni yopish va gaz chiqarish, so‘ngra yakuniy hajmni nazorat qilish va keyingi sikl uchun parametrlarni yangilash.



4-rasm. Quyish jarayonining ko‘p bosqichli adaptiv boshqaruv algoritmi sikli.

2-jadval. Quyish siklining bosqichlari

Bosqich	Maqsad	Boshqaruv ta’siri	Keyingi bosqichga o‘tish sharti
0. Tayyorlash	Datchiklarni o‘qish; $\hat{F}$, u_{max} va PID koeffitsiyentlarini hisoblash	—	o‘lchovlar ruxsat etilgan oraliqda
1. Bosimlash	Idish va bak bosimini tenglash	klapan yopiq	$\lvert P_q - P_0 \rvert \le \delta_P$
2. Asosiy quyish	Maksimal xavfsiz tezlik	$u = u_{max}$	$K_p \cdot e < u_{max}$
3. Sekinlashtirish	Hajmni aniq yakunlash	adaptiv PID	$e \le L$ yoki $t > t_{max}$
4. Yopish, snift	Klapanni yopish, gaz chiqarish	$u \to 0$	bosim tenglashdi
5. Nazorat	V_f ni o‘lchash, c_{k+1} ni yangilash	—	keyingi sikl

4.2. Adaptiv PID qonuni

Hajm xatosi quyidagicha aniqlanadi:

$$e(t) = V_{ref} + c - V_m(t) \tag{8}$$

bunda V_{ref} — belgilangan quyish hajmi, c — ko‘pik uchun kiritiladigan topshiriq tuzatmasi (4.4-band). PID regulyatorining qonuni:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\, d\tau - K_d \frac{dV_m}{dt} \tag{9}$$

Hosila tashkil etuvchisi shovqinni kuchaytirmasligi uchun o‘lchov signalidan birinchi tartibli filtr orqali olinadi, integral tashkil etuvchi esa faqat xato kichik ($|e| <$

30 ml) bo‘lganda to‘planadi (integral to‘yinishga qarshi himoya). Klassik variantda K_p, K_i, K_d o‘zgarmas; adaptiv variantda ular o‘lchanadigan T, P, C ga bog‘liq: $K_p(T, P, C)$, $K_i(T, P, C)$, $K_d(T, P, C)$. Parametrlar oldindan aniqlangan rejimlar jadvali bo‘yicha yoki model parametrlarini real vaqt rejimida baholash natijasiga ko‘ra o‘zgartirilishi mumkin [3, 6]; ushbu maqolada jadval usuli va modelga asoslangan baholash birlashtirilgan.

4.3. Parametrlar jadvali va ko‘pikni cheklash

Klapan orqali sarf bosimlar farqining kvadrat ildiziga proporsional bo‘lgani uchun (2) bosim o‘zgarganda regulyatorning halqa kuchaytirishi ham o‘zgaradi. Buni kompensatsiyalash uchun koeffitsiyentlar o‘lchangan bosimlar farqi bo‘yicha normallashtiriladi:

$$K_{p,i,d} = K^0_{p,i,d}\sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta \hat{P}}} \tag{10}$$

bunda ΔP_0 — sozlash rejimidagi, $\Delta \hat{P}$ — o‘lchangan bosimlar farqi. Ko‘piklanish xavfi ortganida algoritm asosiy bosqichdagi quyish tezligini pasaytiradi, ya’ni u_{max} ni modeldagi kutilayotgan ko‘pik cho‘qqisi $\hat{F}_{max}(T, C, P_q)$ bo‘yicha cheklaydi:

$$u_{max} = \min\left\{1,\ \max\left[u_{min},\ \frac{F_{maq}}{\hat{F}_{max}(T, C, P_q)}\right]\right\} \tag{11}$$

bunda F_{maq} — ruxsat etilgan ko‘pik cho‘qqisi, u_{min} — quyish unumdorligini saqlash uchun pastki chegara. Bunday cheklash ko‘pikni kamaytiradi, ammo sikl vaqtini uzaytiradi; bu kelishuv 6-bo‘limda miqdoriy baholanadi.

4.4. Ko‘pik uchun topshiriq tuzatmasi va sikldan-sikla moslashtirish

(6) ga ko‘ra V_m ni V_{ref} ga tenglashtirish idishning kam to‘lishiga olib keladi. Shu sababli topshiriq oldindan ko‘tariladi: tuzatma c ikki qismdan iborat — modeldan hisoblangan ko‘pik tuzatmasi $(1 - \beta)\hat{F}_c$ va tajribadan o‘rganiladigan c_k. Yakuniy hajm vazn yoki sath nazoratida o‘lchangach, c_k sikldan-sikla yangilanadi [11]:

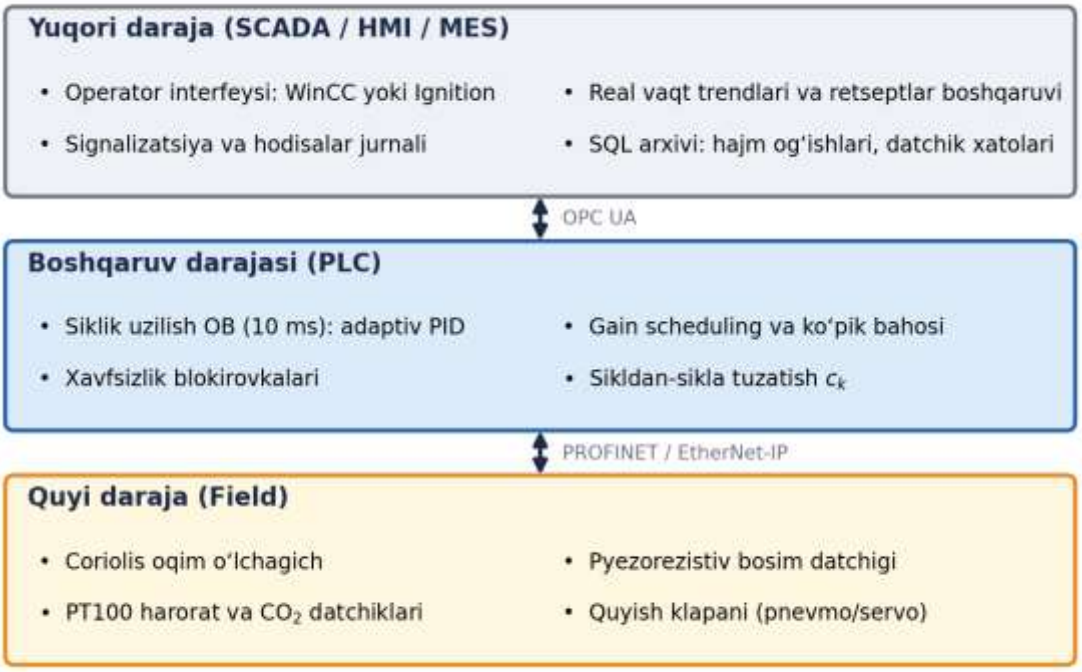
$$c = (1-\beta)\hat{F}_c + c_k, \qquad c_{k+1} = c_k + \lambda(V_{ref} - V_{f,k}) \tag{12}$$

bunda $\hat{F}_c$ — klapan yopilish paytidagi kutilayotgan ko‘pik hajmi, λ — o‘rganish koeffitsiyenti, $V_{f,k}$ — k-siklda o‘lchangan yakuniy hajm. Modelning aniqmasligi (masalan, a koeffitsiyenti bahosining xatosi) shu usul bilan yo‘qotiladi. Yopish buyrug‘i $e \le L$ shart bajarilganda beriladi; adaptiv variantda $L = q \cdot \tau_v$ (joriy sarf bo‘yicha), klassik variantda L — nominal rejimda aniqlangan o‘zgarmas qiymat. Vaqt cheklovi t_{max} dan oshilsa, klapan majburiy yopiladi.

Shunday qilib, taklif etilgan adaptiv algoritm uch mexanizmdan iborat: (a) bosim bo‘yicha parametrlar jadvali va ko‘pik bo‘yicha tezlik cheklovi; (b) modeldan hisoblanadigan ko‘pik tuzatmasi (oldindan kompensatsiya); (c) sikldan-sikla tuzatish. 6-bo‘limda ularning hissasi alohida baholanadi.

5. DASTURIY-TEXNIK AMALGA OSHIRISH (SCADA/PLC)

Taklif etilayotgan arxitektura uchta sanoat darajasini o‘z ichiga oladi (5-rasm): quyi daraja (datchiklar va ijro qurilmalari), boshqaruv darajasi (PLC) va yuqori daraja (SCADA/HMI hamda ma’lumotlar bazasi).



5-rasm. Adaptiv boshqaruv tizimining uch darajali arxitekturasi.

5.1. Quyi va boshqaruv darajasi

Quyi darajada Coriolis oqim o‘lchagich, piezorezistiv bosim va PT100 harorat datchiklari hamda CO_2 miqdorini o‘lchovchi inline asbob ishlatiladi. PLC (Siemens S7-1500, Allen-Bradley/Rockwell yoki ekvivalent) adaptiv PID va xavfsizlik blokirovkalarini siklik uzilish organida (masalan, OB30, davri 10 ms) bajaradi; PID qonuni IEC 61131-3 talablariga mos tilda (SCL yoki Structured Text) yoziladi [5]. Qisqa sikl davomida o‘lchov va buyruqning kechikishi (3) dagi τ_v bilan taqqoslanadigan bo‘lmasligi kerak, shuning uchun datchiklar signallari tezkor kirish modullari orqali o‘qiladi. 3-jadvalda asosiy elementlar keltirilgan.

3-jadval. Tizimning texnik tarkibi

Element	Turi	Vazifasi
Oqim o‘lchagich	Coriolis (massa/hajm)	q va zichlikni o‘lchash
Bosim datchigi	Piezorezistiv	ΔP va P_q ni o‘lchash
Harorat datchigi	PT100	T ni o‘lchash
Gazlanganlik o‘lchagichi	inline CO_2 asbobi	C ni o‘lchash
Ijro mexanizmi	Pnevmatik yoki servo klapan	u ni amalga oshirish
Vazn/sath nazorati	Checkweigher yoki sath datchigi	V_f ni o‘lchash, c_k uchun teskari aloqa
PLC	Siemens S7-1500 / Allen-Bradley	Adaptiv PID, blokirovkalar
SCADA/HMI	WinCC yoki Ignition	Trendlar, retseptlar, signalizatsiya
Ma’lumotlar bazasi	SQL	Hajm og‘ishlari va xatolarni arxivlash

5.2. Yuqori daraja va xavfsizlik

Yuqori darajada operator interfeysi (WinCC yoki Ignition) real vaqt rejimidagi trendlarni, retseptlar boshqaruvini (har bir mahsulot uchun V_{ref}, F_{maq}, u_{min}, K^0) va signalizatsiyani ta’minlaydi. Barcha hajm og‘ishlari va datchik xatolari SQL ma’lumotlar bazasiga vaqt belgisi bilan yoziladi; bu keyingi bosqichda modelni identifikatsiyalash va tendensiyalarni tahlil qilish uchun asos bo‘ladi. Algoritmning ishonchli ishlashi uchun 4-jadvalda keltirilgan blokirovkalar nazarda tutiladi (chegaralar namunaviy bo‘lib, obyektda sozlanadi).

4-jadval. Xavfsizlik blokirovkalari va alarmlar (namunaviy)

Holat	Shart	Harakat
Datchik nosozligi	Signal o‘lchov oralig‘idan tashqarida	Oxirgi ishonchli qiymat, xavfsiz (sekin) rejim, alarm
Bosimlar farqi me’yordan tashqarida	ΔP ruxsat etilgan oraliqdan chiqdi	Quyishni boshlamaslik, alarm
Vaqt cheklovi	$t > t_{max}$	Klapanni yopish, idishni rad etish
Ko‘pik xavfi yuqori	$\hat{F}_{max} > F_{kr}$ (u_{min} da ham)	Sekin rejim, operatorga ogohlantirish
Tuzatma chegaradan oshdi	$\lvert c_k \rvert$ ruxsat etilgan qiymatdan katta	Avtomatik moslashtirishni to‘xtatish, texnik xizmat
Aloqa uzilishi	PLC–SCADA aloqasi yo‘q	PLC lokal retsept bilan ishlaydi

6. NATIJALARNI BAHOLASH MEZONLARI VA TAQQOSLAMA TAHLIL

6.1. Simulyatsiya sharoitlari

Adaptiv algoritmning samaradorligini baholash uchun klassik PID hamda taklif etilayotgan adaptiv PID usullari 3-bo‘limdagi model asosida, bir xil tashqi harorat va bosim tebranishlari sharoitida solishtirildi. Klassik regulyator nominal sharoitda (T = 6,5 °C, C = 4,0 hajm, qarshi bosim nominalda) ishga tushirish paytida bir marta sozlangan (o‘zgarmas c tuzatma va L qiymati aniqlangan) va keyinchalik o‘zgartirilmagan. Simulyatsiya parametrlari 5-jadvalda keltirilgan. Ular real liniyadan olinmagan, tipik tartibdagi taxminiy qiymatlardir, shu sababli natijalar miqdoriy emas, sifat jihatidan ahamiyatli.

5-jadval. Simulyatsiya parametrlari

Parametr	Qiymat	Parametr	Qiymat
V_{ref}	500 ml	τ_f, β	0,8 s; 0,35
Maksimal sarf (u = 1)	300 ml/s	a_0 (T = 5 °C, C = 4)	0,045
ΔP_0	0,80 bar	K_p^0, K_i^0, K_d^0	0,04; 0,010; 0,002
τ_v	0,05 s	F_{kr}; F_{maq}; u_{min}	15 ml; 13 ml; 0,55
V_m shovqini (σ)	0,25 ml	λ; vazn nazorati shovqini	0,4; 0,30 ml
Integrallash qadami	5 ms	a bahosining xatosi	+10 %
T o‘zgarishi	6,5 ± 2,5 °C + shovqin (σ = 0,3)	C, ΔP, δP_q (σ)	0,12 hajm; 0,07; 0,10 bar
Sikllar soni	1000	Ko‘piklanish chegarasi	F_{max} > 15 ml

Ko‘pik hosil bo‘lish koeffitsiyenti $a = a_0[1 + 0{,}20(T - 5)](C/4)^{1,5}(1 - 1{,}5\delta P_q)$ ko‘rinishida olingan; bunda δP_q — qarshi bosimning nominaldan og‘ishi (bar). Har bir sikl uchun T, C, ΔP va δP_q tasodifiy g‘alayon sifatida beriladi, harorat esa 1000 sikl davomida ikki marta 4 °C dan 9 °C gacha sekin o‘zgaradi (issiq va sovuq partiyalar). Uchala usul ham aynan bir xil g‘alayonlar ketma-ketligida sinaldi. Yakuniy hajm xatosi $e_f = V_f - V_{ref}$ bo‘yicha o‘rtacha mutlaq xato (MAE) va o‘rtacha kvadratik xato (RMSE) hisoblandi:

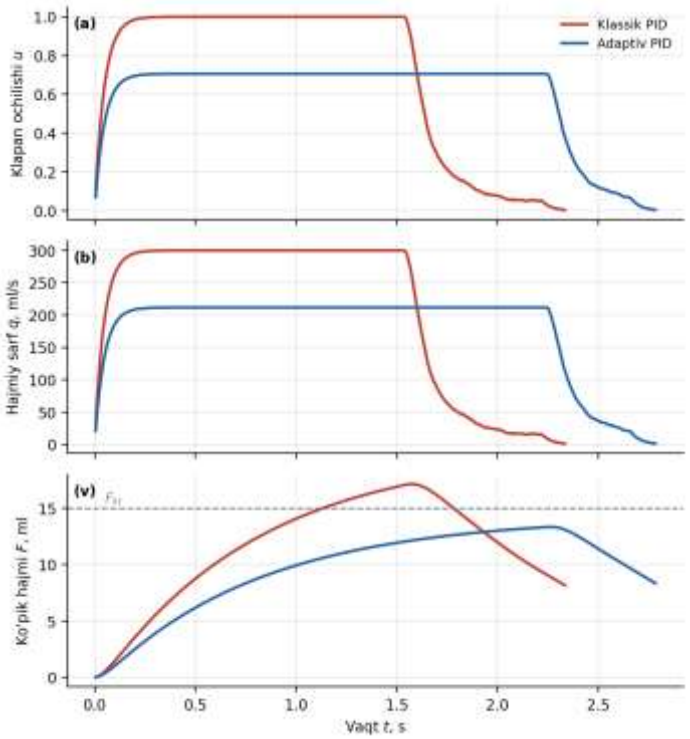
$$e_f = V_f - V_{ref}, \quad MAE = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}|e_{f,k}|, \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}e_{f,k}^2} \tag{13}$$

Bundan tashqari, e_f ning ±2 ml ruxsat etilgan chegarada bo‘lgan sikllar ulushi (ruxsat chegarasi shartli qabul qilingan), ko‘piklanish holatlari ulushi (F_{max} > F_{kr}) va sikl vaqtining o‘rtacha qiymati hamda standart og‘ishi baholandi. Uchta variant taqqoslandi: klassik PID; adaptiv PID, faqat 4.3-band cheklovi va oldindan

kompensatsiya bilan (sikldan-sikla tuzatmasiz); to‘liq adaptiv PID (uchala mexanizm bilan).

6.2. Bitta sikl dinamikasi

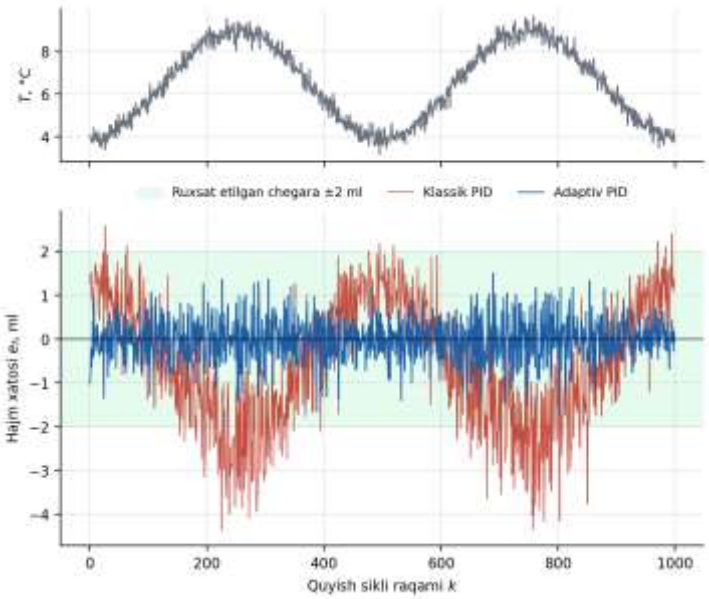
6-rasmda issiq mahsulot (T = 9,0 °C, C = 4,1 hajm) uchun bitta sikl dinamikasi keltirilgan. Klassik PID klapanni to‘liq ochadi, ko‘pik cho‘qqisi 17,2 ml ga yetib, 15 ml chegarasidan oshadi, yakuniy xato −1,8 ml ni tashkil etadi. Adaptiv algoritm u_{max} ni taxminan 0,71 gacha pasaytiradi, ko‘pik cho‘qqisi 13,3 ml da qoladi, xato −0,7 ml ga kamayadi; buning narxi — sikl vaqtining 2,33 s dan 2,79 s gacha (taxminan 19 %) uzayishi.



6-rasm. Issiq mahsulot sharoitida bitta quyish siklining dinamikasi: (a) klapan ochilishi; (b) hajmiy sarf; (v) ko‘pik hajmi.

6.3. Sikllar ketma-ketligi bo‘yicha natijalar

7-rasmda harorat o‘zgarishi sharoitida hajm xatosining 1000 sikl davomidagi o‘zgarishi ko‘rsatilgan. Klassik PID sozlash nuqtasi (~6,5 °C) atrofida yaxshi ishlaydi, lekin mahsulot qiziganda ko‘pik ortib, idish kam to‘ladi (xato manfiy tomonga siljiydi), sovuqda esa ko‘pik kamayib, teskari yo‘nalishda xato paydo bo‘ladi. Adaptiv algoritm xatoni nol atrofida ushlab turadi, ruxsat etilgan ±2 ml chegaradan chiqish kuzatilmadi.



7-rasm. Harorat o‘zgarishi sharoitida yakuniy hajm xatosining dinamik tebranish grafigi (simulyatsiya tahlili).

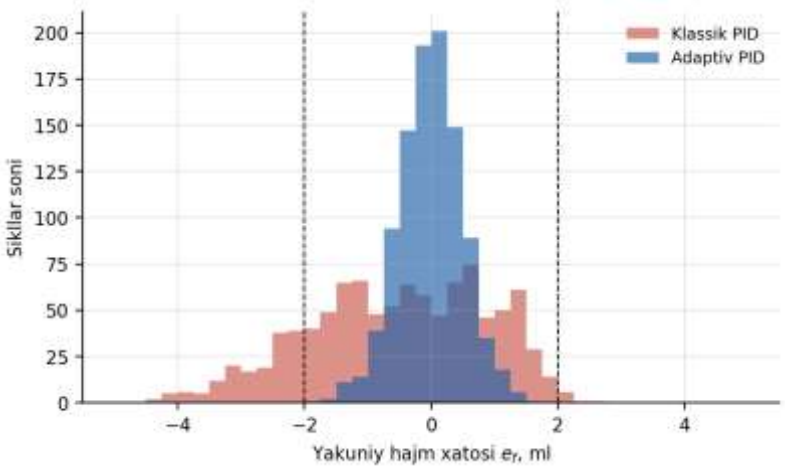
6-jadval. Boshqaruv usullarining taqqoslama ko‘rsatkichlari (1000 sikl)

Ko‘rsatkich	Klassik PID	Adaptiv (tuzatmasiz)	To‘liq adaptiv PID
O‘rtacha mutlaq xato (MAE), ml	1,22	1,79	**0,40**
Kvadratik xato (RMSE), ml	1,50	1,91	**0,50**
O‘rtacha siljish, ml	−0,52	−1,79	**−0,01**
Standart og‘ish e_f, ml	1,40	0,65	**0,50**
Maksimal $\|e_f\|$, ml	4,37	4,15	**1,76**
±2 ml chegarasida, %	82,9	64,2	**100,0**
Ko‘piklanish holatlari, %	21,7	0,1	**0,1**
O‘rtacha sikl vaqti, s	**2,24**	2,33	2,34
Sikl vaqtining st. og‘ishi, s	**0,09**	0,31	0,31

To‘liq adaptiv PID MAE ni 1,22 ml dan 0,40 ml gacha (taxminan 67 %), RMSE ni 1,50 ml dan 0,50 ml gacha kamaytirdi; ko‘piklanish holatlari ulushi 21,7 % dan 0,1 % gacha pasaydi (1000 sikldan bittasi). Beshta mustaqil g‘alayon va shovqin ketma-ketligida takrorlanganda natija barqaror chiqdi: MAE klassik uchun 1,23 ± 0,02 ml, to‘liq adaptiv uchun 0,40 ± 0,01 ml (o‘rtacha ± standart og‘ish), ±2 ml chegarasidagi sikllar ulushi mos ravishda 81,4 ± 1,3 % va 100 %.

Ablyatsiya natijasi (adaptiv, tuzatmasiz) muhim: ko‘pik uchun oldindan kompensatsiya va tezlik cheklovi xatoning tarqoqligini (standart og‘ish 1,40 dan 0,65 ml gacha) va ko‘piklanishni kamaytiradi, ammo modelning taxminiy xatosi sababli

doimiy siljish (−1,79 ml) qoladi, shu sababli MAE klassik usuldan yomonroq bo‘ladi. Siljish faqat sikldan-sikla tuzatma qo‘shilgandagina yo‘qoladi. Demak, modelga asoslangan kompensatsiya o‘lchangan teskari aloqa bilan birgalikda ishlatilishi kerak.



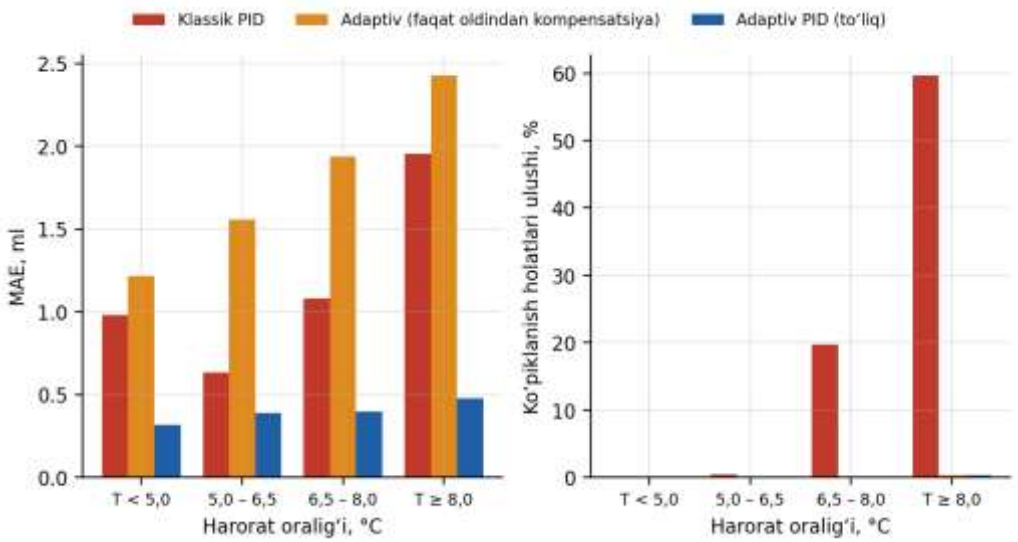
8-rasm. Yakuniy hajm xatosi e_f ning taqsimoti (punktir chiziqlar — ±2 ml chegarasi).

6.4. Harorat oralig‘i bo‘yicha tahlil

Natijalar harorat oraliqlari bo‘yicha 7-jadvalda va 9-rasmda ajratilgan. Klassik PID xatosi sozlash nuqtasidan har ikki tomonga chetlanganda ortadi: eng issiq oraliqda (T ≥ 8 °C) MAE 1,96 ml, ko‘piklanish holatlari ulushi esa 59,7 % ga yetadi. Adaptiv PID da MAE barcha oraliqlarda 0,32–0,48 ml ni tashkil etadi, ko‘piklanish deyarli kuzatilmaydi. Biroq issiq oraliqda o‘rtacha sikl vaqti 2,28 s dan 2,66 s gacha (taxminan 17 %) ortadi: ko‘pikni cheklashning narxi — unumdorlikning pasayishi.

7-jadval. Harorat oraliqlari bo‘yicha taqqoslash (klassik / to‘liq adaptiv)

T, °C	Sikllar	MAE klass., ml	MAE adapt., ml	Ko‘pik klass., %	Ko‘pik adapt., %	t klass., s	t adapt., s
< 5,0	294	0,98	0,32	0,0	0,0	2,21	2,13
5,0 – 6,5	208	0,64	0,39	0,5	0,0	2,22	2,17
6,5 – 8,0	203	1,08	0,40	19,7	0,0	2,24	2,34
≥ 8,0	295	1,96	0,48	59,7	0,3	2,28	2,66



9-rasm. Harorat oraliqlari bo‘yicha o‘rtacha mutlaq xato va ko‘piklanish holatlari ulushi.

6.5. Muhokama va cheklovlar

Olingan natijalar quyidagi cheklovlar doirasida talqin qilinishi kerak. Birinchidan, model parametrlari (ko‘pik koeffitsiyenti, so‘nish vaqti, β) tipik tartibdagi taxminiy qiymatlar; real mahsulot va liniyada ular boshqacha bo‘ladi, shuning uchun absolyut xato qiymatlari (masalan, 1,22 va 0,40 ml) real ko‘rsatkichlar sifatida qabul qilinmasligi lozim. Ikkinchidan, bosimlash bosqichi, klapanlar o‘rtasidagi o‘zaro ta’sir, karusel kinematikasi va gidravlik to‘lqin hodisalari modelga kiritilmagan. Uchinchidan, sikl vaqtining uzayishi karuselning belgilangan quyish oynasiga sig‘ishi kerak; aks holda u_{min} va F_{maq} ni birgalikda tanlash zarur. To‘rtinchidan, sikldan-sikla tuzatma ishlashi uchun yakuniy hajmni ishonchli o‘lchash (nazorat vazni yoki sath) talab etiladi. Shunga qaramay, natijalar taklif etilgan uch mexanizmning rolini ko‘rsatadi: tezlik cheklovi ko‘pikni, oldindan kompensatsiya tarqoqlikni, sikldan-sikla tuzatma esa doimiy siljishni kamaytiradi.

7. XULOSA

Gazlangan ichimliklarni idishlarga quyish jarayonida hajm aniqligiga harorat, bosim, CO_2 miqdori va oqim rejimining o‘zaro ta’siri ta’sir ko‘rsatadi. Shu sababli faqat o‘zgarmas sozlamalarga tayangan boshqaruv har qanday ishlab chiqarish sharoitida bir xil natijani kafolatlay olmaydi. Maqolada quyidagilar bajarildi:

1) quyish jarayonining oqim, CO_2 erishi, ko‘pik hosil bo‘lishi va o‘lchov signalini hisobga oluvchi soddalashtirilgan dinamik modeli tuzildi;

2) klassik PID ni bosim bo‘yicha parametrlar jadvali, ko‘pikni cheklash, oldindan kompensatsiya va sikldan-sikla tuzatma bilan to‘ldiruvchi ko‘p bosqichli adaptiv algoritm taklif etildi;

3) algoritmning PLC/SCADA arxitekturasi, datchiklar tarkibi va xavfsizlik blokirovkalari asoslandi;

4) 1000 siklli simulyatsiyada taklif etilgan algoritm klassik PID ga nisbatan o‘rtacha mutlaq xatoni 1,22 dan 0,40 ml gacha, ko‘piklanish holatlari ulushini 21,7 % dan 0,1 % gacha kamaytirdi, o‘rtacha sikl vaqti taxminan 4,4 % ga ortdi.

Natijalar taxminiy model parametrlariga asoslangan. Keyingi bosqichlarda MATLAB/Simulink muhitida model parametrlari real ma’lumotlar asosida to‘liq identifikatsiya qilinib, algoritm real liniyada tajriba sinovlaridan o‘tkazilishi rejalashtirilgan.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 5-oktabrdagi PF-6079-son Farmoni. “Raqamli O‘zbekiston — 2030” strategiyasi.
2. Åström K. J., Hägglund T. Advanced PID Control. Research Triangle Park: ISA, 2006.
3. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. Process Dynamics and Control. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2016.
4. Luyben W. L. Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
5. IEC 61131-3:2013. Programmable controllers — Part 3: Programming languages. Geneva: IEC, 2013.
6. Åström K. J., Wittenmark B. Adaptive Control. 2nd ed. Reading, MA: Addison-Wesley, 1995.
7. Sander R. Compilation of Henry’s law constants (version 4.0) for water as solvent // Atmospheric Chemistry and Physics. 2015. Vol. 15, No. 8. P. 4399–4981.
8. Steen D. P., Ashurst P. R. (eds.). Carbonated Soft Drinks: Formulation and Manufacture. Oxford: Blackwell Publishing, 2006.
9. Ogata K. Modern Control Engineering. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.
10. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers // Transactions of the ASME. 1942. Vol. 64. P. 759–768.
11. Wang Y., Gao F., Doyle F. J. Survey on iterative learning control, repetitive control, and run-to-run control // Journal of Process Control. 2009. Vol. 19, No. 10. P. 1589–1600.