

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.16949242>

PIVO ISHLAB CHIQRISHNING DASTLABKI BOSQICHLARI UCHUN BASHORATLI BOSHQRISH TIZIM MODELLARI VA ALGORITMLARI

Yusupov Mirjalol Shovkat o'g'li

*Toshkent davlat texnika universiteti, Ishlab chiqarish jarayonlarini avtomatlashtirish kafedrasida
tayanch doktoranti*

m.yusupov@tkti.uz, +998942960111

Annotatsiya - Mazkur tadqiqotda pivo ishlab chiqarishning dastlabki bosqichlari bo'lgan zator tayyorlash va qaynatish jarayonlari uchun bashoratli boshqaruv tizim modellarini ishlab chiqish va ularning algoritmik yechimlarini yaratish masalasi ko'rib chiqildi. Tadqiqotning asosiy maqsadi shakar konsentratsiyasi, pH va harorat parametrlarini optimal darajada barqaror ushlab turish orqali fermentatsiya jarayonining sifatli va samarali kechishini ta'minlashdan iborat bo'ldi. Jarayonni matematik modellashtirish asosida holat-fazo modeli qurildi va u bashoratli boshqaruv algoritmgaga moslashtirildi. Olingan natijalar shuni ko'rsatdiki, bashoratli boshqaruv tizimi shakar konsentratsiyasini $\pm 0,1$ g/L, haroratni $\pm 0,3$ °C, pH ni esa 5,3–5,6 oralig'ida barqaror ushlab turdi. Bu ko'rsatkichlar an'anaviy PID rostlagich bilan taqqoslaganda yuqori aniqlik va barqarorlikni namoyon etdi. Shuningdek, energiya sarfi 12–15% ga kamayganligi qayd etildi. Natijalar bashoratli boshqaruv tizimining pivo ishlab chiqarish jarayonining dastlabki bosqichlarida samarali qo'llanishi mumkinligini tasdiqlaydi va amaliyotda sifat ko'rsatkichlarini oshirish bilan birga resurslardan oqilona foydalanishga imkon beradi.

Kalit so'zlar: Pivo ishlab chiqarish, zator tayyorlash, bashoratli boshqaruv, holat-fazo modeli, shakar konsentratsiyasi, harorat va pH rostlanishi, energiya samaradorligi

KIRISH

Pivo ishlab chiqarish texnologiyasi murakkab, ko'p bosqichli jarayonlardan tashkil topgan bo'lib, mahsulot sifatini belgilovchi eng muhim bosqichlar dastlabki jarayonlar — zator tayyorlash va qaynatish hisoblanadi [1]. Ushbu bosqichlarda xomashyo kimyoviy va fizikaviy jihatdan chuqur o'zgarishga uchraydi, oqsil va kraxmal parchalanadi, ekstraktiv moddalar ajratib olinadi va kelgusida fermentatsiya jarayonining barqaror kechishini ta'minlovchi optimal sharoit yaratiladi [2]. Jarayonlarning ushbu bosqichida harorat, vaqt va aralashtirish rejimlari kabi parametrlarning kichik og'ishi ham tayyor mahsulotning ta'mi, rangi, tiniqligi va xushbo'yligi kabi sifat ko'rsatkichlariga sezilarli darajada ta'sir ko'rsatadi [3]. Shu sababli mazkur jarayonlarning optimal boshqarilishi nafaqat texnologik jihatdan, balki iqtisodiy samaradorlik nuqtai nazaridan ham alohida ahamiyatga ega.

An'anaviy ishlab chiqarish korxonalarida boshqaruv ko'pincha PI (proporsional-integral) yoki PID (proporsional-integral-differensial) turidagi rostlagichlarga tayanadi [4]. Ushbu usullar amaliyotda keng qo'llanilishi, sodda tuzilishi va ishonchligi bilan ajralib turadi, lekin pivo ishlab chiqarishning dastlabki bosqichlari tabiatan noxiziqli, ko'p parametrlil va issiqlik hamda massa almashinuvi kechikishlari bilan tavsiflanadi [5]. Shunday sharoitda an'anaviy boshqaruv usullari samaradorligi cheklangan bo'lib, ular ko'pincha jarayonni optimal darajada

boshqarishga imkon bermaydi. Ayniqsa, zator tayyorlash jarayonida turli harorat bosqichlarini aniqlik bilan kuzatish yoki qaynatish jarayonida bug' sarfini optimal boshqarish vazifalarida bunday usullar o'z imkoniyatlarini to'liq namoyon eta olmaydi [6].

So'nggi yillarda ilmiy adabiyotlarda pivo ishlab chiqarish jarayonlarini boshqarish samaradorligini oshirish uchun zamonaviy boshqaruv nazariyasi yondashuvlaridan foydalanish bo'yicha izlanishlar olib borilmoqda. Shulardan eng istiqbolli usullardan biri bashoratli boshqaruv tizimlari hisoblanadi [7]. Bashoratli boshqarish modellari jarayonning matematik modelidan foydalanib, kelajakdagi dinamikani oldindan baholash va boshqaruv signallarini optimallashtirishga asoslanadi [8]. Bu usulning eng muhim jihati shundaki, u joriy xatolikni kamaytirish bilan bir qatorda, kelajakda yuz berishi mumkin bo'lgan og'ishlarni ham inobatga oladi [9]. Natijada tizim boshqaruvi nafaqat aniqroq, balki barqarorroq va energetik jihatdan samaraliroq bo'ladi.

Pivo ishlab chiqarishning dastlabki bosqichlarida bashoratli boshqarish usulidan foydalanish bir necha ilmiy va amaliy afzalliklarga ega. Avvalo, u harorat profilining qat'iy kuzatilishini ta'minlaydi va fermentatsiya jarayonining sifatli kechishini kafolatlaydi [7]. Shu bilan birga, ushbu model energiya sarfini optimallashtirishga yordam beradi, chunki qaynatish jarayonida bug' yoki elektr energiyasidan foydalanish ortiqcha sarflarni kamaytirishga qaratiladi. Bundan tashqari, boshqaruv algoritmlarining bashoratli xususiyati jarayonni xavfsiz va barqaror yuritish imkonini beradi, issiqlik va massa almashinuvi jarayonlarida yuzaga keladigan nojo'ya tebranishlarni kamaytiradi hamda mahsulot sifatining yuqori darajada ushlab turilishiga zamin yaratadi.

Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi pivo ishlab chiqarishning dastlabki bosqichlaridan bo'lgan zator tayyorlash va qaynatish jarayonlari uchun bashoratli boshqaruv tizim modellarini ishlab chiqish va ularning algoritmik yechimlarini yaratishdan iboratdir. Tadqiqotda, xususan, texnologik jarayonning eng muhim parametrlaridan bo'lgan shakar konsentratsiyasi, pH darajasi va haroratni barqaror boshqarish vazifasi qo'yiladi. Mazkur parametrlarning optimal diapazonda ushlab turilishi fermentatsiya jarayonining to'g'ri kechishini ta'minlab, yakuniy mahsulot sifatiga bevosita ta'sir ko'rsatadi.

Bashoratli boshqaruv tizimi yordamida shakar konsentratsiyasining vaqt bo'yicha o'zgarishini oldindan prognoz qilish, uni belgilangan trajektoriyaga muvofiq tartibga solish va fermentatsiyaga tayyor zator tarkibida maqsadli ekstraktiv moddalarning shakllanishini nazorat qilish ko'zda tutiladi. pH ko'rsatkichini boshqarish orqali fermentlar faoliyati uchun optimal muhit yaratiladi hamda oksidlanish va nojo'ya reaksiyalarning oldi olinadi. Haroratning bashoratli boshqaruvi esa ko'p bosqichli isitish va qaynatish rejimlarini qat'iy kuzatish, issiqlik kechikishlarini kompensatsiya qilish va energiya sarfini kamaytirish imkonini beradi.

METODOLOGIYA

Tadqiqot metodologiyasi pivo ishlab chiqarishning zator tayyorlash va qaynatish jarayonlarida shakar konsentratsiyasi, pH va harorat parametrlarini boshqarish masalasini hal etishga qaratilgan bo'lib, u nazariy modellashtirish va raqamli hisoblash

usullariga asoslanadi.

Quyida (1.1 va 2.22 tenglamalarda) zator tayyorlash jarayoni modelining barcha tenglamalari keltirilgan [10]. Ushbu model chiziqli deb qaralishi mumkin, chunki unda harorat T doimiy deb faraz qilingan (bu esa kinetik parametr k ning ham doimiylikini anglatadi), shuningdek pH , don zarralari o'lchami Gr , suyultirish darajasi Di , hamda A , B , C , D va E tajribaviy parametrlar ham o'zgarmas deb olinadi. Shu bilan birga, suyultirish tezligi Dm ham model ishlatilayotgan ish nuqtasida doimiy bo'lgani uchun, u ham o'zgarmaydi. Shunday ekan, zator tayyorlash jarayoni modeli uchun chiziqshastirish talab etilmaydi.

$$\frac{dC_{A_1}(t)}{dt} = D_{m_i} \cdot (C_{A_0}(t) - C_{A_1}(t)) - k_1 \cdot C_{A_1}(t) \quad (1)$$

$$\frac{dC_{A_2}(t)}{dt} = D_{m_i} \cdot (C_{A_1}(t) - C_{A_2}(t)) - k_2 \cdot C_{A_2}(t) \quad (2)$$

$$\frac{dC_{A_3}(t)}{dt} = D_{m_i} \cdot (C_{A_2}(t) - C_{A_3}(t)) - k_3 \cdot C_{A_3}(t) \quad (3)$$

$$\frac{dC_{A_4}(t)}{dt} = D_{m_i} \cdot (C_{A_3}(t) - C_{A_4}(t)) - k_4 \cdot C_{A_4}(t) \quad (4)$$

$$\frac{dC_{g_1}(t)}{dt} = D_{m_i} \cdot (C_{g_0}(t) - C_{g_1}(t)) + \frac{k_1}{C_{A_{boshl}}} \cdot (A \cdot T_1 + B \cdot pH + C \cdot Gr + D \cdot Di + E) \cdot C_{A_1} \quad (5)$$

$$\frac{dC_{g_2}(t)}{dt} = D_{m_i} \cdot (C_{g_1}(t) - C_{g_2}(t)) + \frac{k_2}{C_{A_{boshl}}} \cdot (A \cdot T_2 + B \cdot pH + C \cdot Gr + D \cdot Di + E) \cdot C_{A_2} \quad (6)$$

$$\frac{dC_{g_3}(t)}{dt} = D_{m_i} \cdot (C_{g_2}(t) - C_{g_3}(t)) + \frac{k_3}{C_{A_{boshl}}} \cdot (A \cdot T_3 + B \cdot pH + C \cdot Gr + D \cdot Di + E) \cdot C_{A_3} \quad (7)$$

$$\frac{dC_{g_4}(t)}{dt} = D_{m_i} \cdot (C_{g_3}(t) - C_{g_4}(t)) + \frac{k_4}{C_{A_{boshl}}} \cdot (A \cdot T_4 + B \cdot pH + C \cdot Gr + D \cdot Di + E) \cdot C_{A_4} \quad (8)$$

Shunday qilib, tenglamalar chiziqli ekani aniqlangach, holat fazosi modeli quriladi.

Dastlabki uzlukli model shakar konsentratsiyasining vaqt davomida qanday o'zgarishini ifodalagan bo'lib, holat fazosi modeliga mos kelishi uchun u shakar konsentratsiyasi hosilasini ifodalovchi differensial tenglama shakliga keltirildi. Shu orqali holat o'zgaruvchilari, kirish va chiqishlar aniq va mantiqiy asosda oldindan belgilandi. Uzluksiz zator tayyorlash jarayoni modelida ushbu elementlar 1-jadvalda tizimli tarzda bayon etilgan.

Jadval 1.

Uzluksiz zator tayyorlash jarayoni holat-fazo modeli komponentlari.

| | |
|-----------------------|--|
| Holat o'zgaruvchilari | $C_{A_1}, C_{A_2}, C_{A_3}, C_{A_4}, C_{g_1}, C_{g_2}, C_{g_3}, C_{g_4}$ |
| Kirish | C_{A_0} |
| Chiqish | C_{g_4} |

C_{A_0} qiymati kirish sifatida, C_{g_4} esa chiqish sifatida tanlangan bo'lishi bevosita texnologik jarayon mohiyatidan kelib chiqadi. Tizimga berilayotgan oqim issiq suv va maydalangan don aralashmasidan iborat bo'lib, uning boshlang'ich shakar konsentratsiyasi C_{A_0} bilan ifodalanadi. Tizim chiqishida shakarining yakuniy konsentratsiyasi C_{g_4} hosil bo'ladi, va bu qiymat keyingi fermentatsiya bosqichida asosiy parametr sifatida foydalaniladi.

Jarayon modelini bashoratli boshqarish algoritmiga moslashtirish uchun yuqorida keltirilgan modellar holat fazo modellari ko'rishiga o'tkazilib

diskretlashtiriladi:

$$x[k + 1] = A_d x[k] + B_d u[k], \quad y[k] = Cx[k] \quad (9)$$

bu yerda $x(k)=[T(k), S(k)]^T$ holat vektori, $u(k)=Q_{kir}(k)$ boshqarish signali kirishi, $y(k)$ esa chiqish harorati.

Model asosidagi bashoratli boshqarishda har bir vaqt bosqichida tizimning joriy holatini (ya'ni $x[k]$) baholaydi va shu asosda kelajakdagi chiqishlarni (ya'ni $y[k+1]$, $y[k+2]$,... bashoratlaydi. U bashorat qilingan chiqishlar kerakli topshiriq qiymatlarga yaqinlashadigan qilib optimal boshqarish signallarini topadi. Bu optimallashtirish jarayoni maqsad funksiyasi orqali ifodalanadi. Bashoratli boshqarish algoritmi N_p bashorat ufqi va N_c boshqarish ufqi bo'yicha optimallashtirishni amalga oshiradi. Har bir vaqt qadamida quyidagi maqsad funksiyasi minimallashtiriladi: Diskret vaqt oralig'ida k -qadamda optimallashtiriladigan mezon quyidagicha aniqlanadi:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} (y_{topsh}[k+i|k] - r[k+i])^T Q (y_{topsh}[k+i|k] - r[k+i]) + \sum_{i=0}^{N_u-1} \Delta u[k+j]^T R \Delta u[k+j] \quad (10)$$

bu yerda $r(k+i)$ – zarur harorat profili, Q – chiqish xatoliklarining vazn matritsasi, R – boshqarish harakatlarini silliqlash matritsasi, $\Delta u(k+j)=u(k+j)-u(k+j-1)$ – boshqarish kirishidagi o'zgarish.

Cheklovlar quyidagi ko'rinishda kiritiladi:

$$u_{min} \leq u[k+j] \leq u_{max}, \quad T_{min} \leq T[k+i|k] \leq T_{max} \quad (11)$$

Shuningdek, energiya sarfini ham hisobga olish uchun qo'shimcha integral ko'rinishdagi cheklov kiritiladi:

$$\int_0^{t_f} Q_{kir}(t) dt \leq E_{max} \quad (12)$$

bu yerda E_{max} – umumiy energiya limiti.

Energiya sarfini hisoblash uchun qo'shimcha integral ko'rinishdagi cheklov kiritish jarayonda optimal harorat profilini saqlash bilan birga, energiya samaradorligini oshirishga imkon beradi.

Kelajakdagi chiqishlar quyidagi matritsa ko'rinishida yoziladi:

$$Y = \Phi x[k] + \Gamma \Delta U \quad (13)$$

Bu yerda Y – kelajakdagi chiqishlar vektori, ΔU – boshqaruvdagi o'zgarishlar vektori, Φ va Γ – tizim dinamikasini ifodalovchi bashorat matritsalarini.

Bashoratli boshqarishni optimallashtirishda ΔU ni shunday topish kerakki, Y kerakli signal R ga yaqin bo'lsin. Bunda optimallashtirish kvadratik dasturlash (QP) masalasiga aylanadi:

$$\min_{\Delta U} \left\| \Phi x[k] + \Gamma \Delta U - R \right\|_Q^2 + \left\| \Delta U \right\|_R^2 \quad (14)$$

Bashoratlovchi boshqarish har bir vaqt bosqichida bu optimallashtirishni bajaradi, natijada eng yaxshi boshqaruv $u[k]$ qiymatini beradi va faqat birinchi signalni real tizimga yuboradi. Keyingi bosqichda jarayon yangilanib, boshqarish ta'siri yangidan hisoblanadi.

Tuzib chiqilgan jarayon modeli va bashoratli boshqarish tizimi algoritmi Pythonda numpy, matplotlib va control kutubxonalaridan foydalanib imitatsion modellashtirildi.

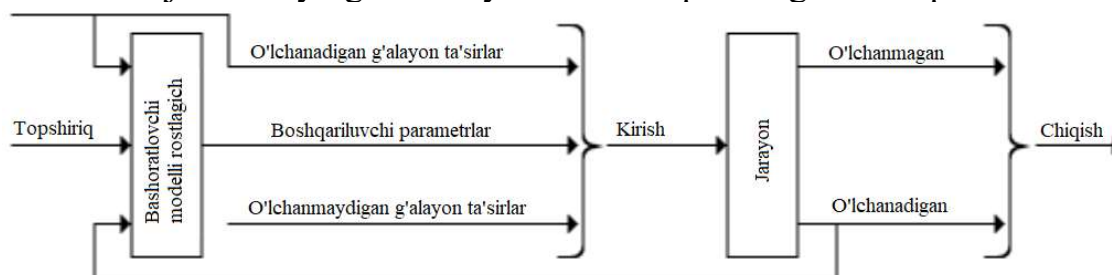
TAHLIL VA NATIJALARI

Tadqiqot davomida ishlab chiqilgan bashoratli boshqaruv tizimi yordamida pivo ishlab chiqarishning dastlabki bosqichlariga xos bo'lgan uchta asosiy parametr (shakar

konsentratsiyasi, harorat va pH) rostlanishi ko'rib chiqildi qilindi. Olingan imitatsion modellashtirish natijalar jarayonning dinamik barqarorligi va belgilangan trajektoriyalarga intilish darajasini baholash imkonini berdi.

1-rasmda jarayonni bashoratli boshqarish tizimining funksional sxemasi keltirilgan. Tizimning kirish qismida boshqaruv ob'ekti uchun belgilangan topshiriq signali mavjud bo'lib, u jarayonning optimal chiqish qiymatiga erishishni ta'minlashga qaratilgan. Shu bilan birga, jarayonga ta'sir etuvchi o'lchanadigan g'alayonlar hamda bevosita qayd qilib bo'lmaydigan o'lchanmaydigan g'alayonlar ham nazarda tutilgan.

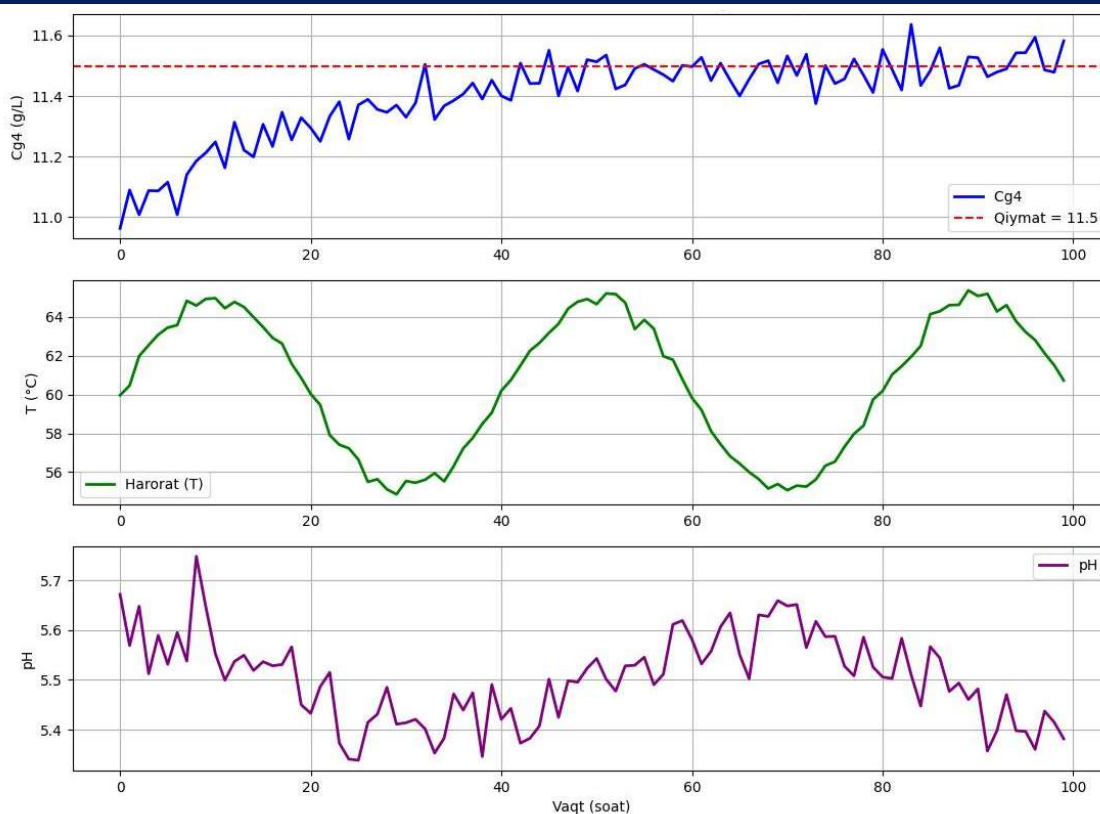
Boshqaruvchi qismda joylashgan modeli rostlagich jarayonning matematik modelidan foydalanib, kelgusidagi dinamikani prognozlaydi va optimal boshqaruv harakatlarini shakllantiradi. U kiruvchi signal sifatida topshiriq, g'alayon ta'sirlari va o'lchovlardan olingan ma'lumotlarni qabul qiladi hamda boshqaruvchi parametrlarni hosil qilib jarayonga uzatadi. Jarayon blokida boshqaruvchi parametrlar ta'siri ostida chiqish kattaligi shakllanadi. Bu chiqishlar ikki toifaga ajraladi: o'lchanadigan chiqishlar, ya'ni nazorat qilinishi va rostlagichga qayta uzatilishi mumkin bo'lgan signallar, hamda o'lchanmaydigan chiqishlar, ya'ni bilvosita hisobga olinadigan yoki model orqali baholanishi mumkin bo'lgan signallar. Qayta aloqa mexanizmi asosida o'lchanadigan chiqishlar rostlagichga yuboriladi va ularning topshiriq bilan solishtirilishi natijasida keyingi iteratsiyalarda boshqaruv signallari optimallashtiriladi.



1-rasm. Pivo ishlab chiqarish jarayonining dastlabki bosqichlarini bashoratli boshqarish tizimining funksional strukturasi.

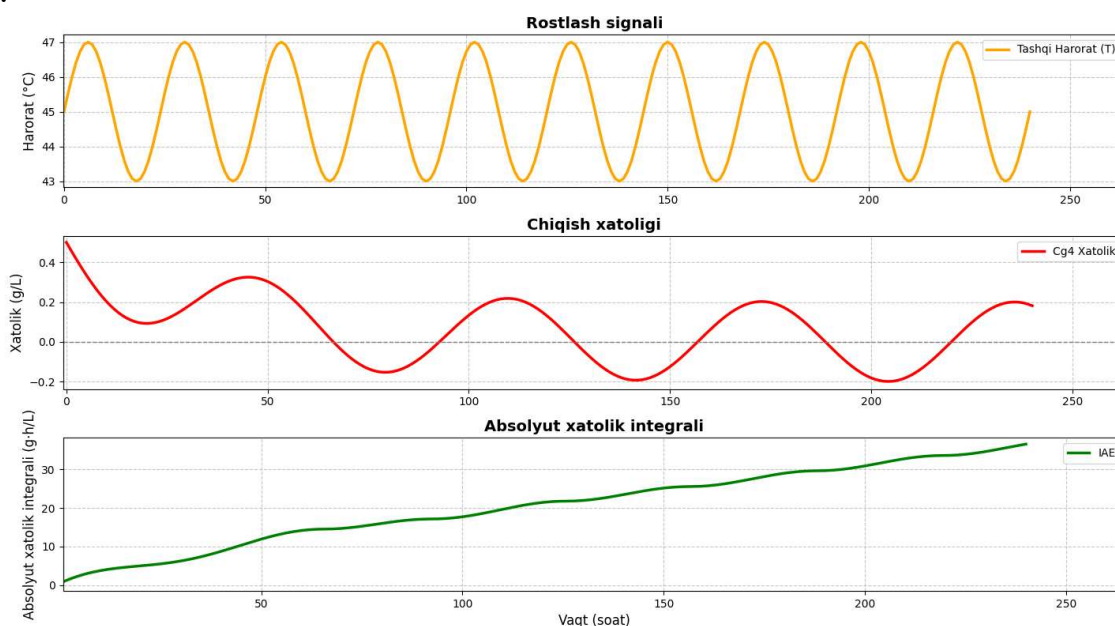
Shakar konsentratsiyasi bo'yicha natijalar (2-rasm, yuqori grafik) C_{g4} qiymatining boshlang'ich bosqichda 11,0 g/L atrofida bo'lganini va boshqaruv tizimi ta'sirida 11,5 g/L qiymatiga yaqinlashganini ko'rsatmoqda. Maqsadli qiymatga intilish davomida kichik tebranishlar mavjud bo'lsa-da, ular $\pm 0,1$ g/L diapazonda saqlanib qoldi. Bu esa bashoratli boshqarish algoritmining jarayon dinamikasini oldindan prognoz qilish va nazorat signallarini optimallashtirish imkoniyatiga ega ekanligini ko'rsatadi. Natijada shakar konsentratsiyasi fermentatsiya uchun zarur bo'lgan darajada barqaror saqlangan.

Harorat boshqaruvi (2-rasm, o'rta grafik) sinusoidal xarakterga ega tebranishlar shaklida namoyon bo'ldi. Harorat qiymati 56 °C va 64 °C oralig'ida saqlanib, jarayon davomida belgilangan texnologik diapazondan chiqib ketmadi. pH qiymatlarining o'zgarishi (2-rasm, pastki grafik) 5,7 dan 5,3 oralig'ida tebrangan bo'lib, umumiy tendensiya bo'yicha asta-sekin pasayish qayd etildi.



2-rasm. Konsentratsiya, harorat va pH parametrlarining bashoratlovchi rostlagich ta’sirida rostlanishi.

3-rasmда rostlash signali (tashqi harorat), chiqish xatoliklari va absolyut xatolik integralining o’zgarishi tasvirlangan. Rostlash signali sifatida tashqi harorat davriy tebranish shaklida berilgan bo’lib, tizimga tashqi buzilish sifatida qaralgan. Model asosidagi bashoratlovchi boshqarish algoritmi ushbu tashqi tebranishlarga moslashib, chiqish parametrlaridagi xatoliklarni keskin kamaytirishga erishganini ko’rish mumkin.



3-rasm. Rostlash signali va xatoliklar tahlili

Chiqishdagi xatoliklar vaqt o'tishi bilan sezilarli darajada pasayib, kichik amplituda chegarasida ushlab turildi. Bu esa model asosidagi bashoratlovchi boshqarish algoritmining oddiy PID yoki pozitsion rostlash tizimlariga nisbatan ustunligini namoyish qiladi. Shuningdek, absolyut xatoliklari integrali qiymatining sekin va barqaror o'sishi tizimning umumiy barqarorligini ta'minlaydi hamda nazoratning samarali olib borilayotganini ko'rsatadi.

MUHOKAMA

Bashoratli boshqarish algoritmining samaradorligini baholash uchun an'anaviy PID rostlagich bilan qiyoslanib ko'rildi. Qiyoslash natijalari 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval.

PID va bashoratli boshqarish tizimining qiyoslanishi.

| Ko'rsatkichlar | PID | Bashoratli boshqaruv | Muhokama |
|---------------------------------|--|---|--|
| Bashoratli boshqarish algoritmi | $\pm 0,25$ og'ish, barqarorlashish sekin | $\pm 0,10$ og'ish, tezroq barqarorlashish | Bashoratli boshqarish trajektoriyani aniqroq kuzatib, fermentatsiya uchun optimal sharoit yaratdi. |
| Bashoratli boshqarish algoritmi | $\pm 1,2$ og'ish | $\pm 0,3$ og'ish, | Bashoratli boshqarish algoritmi kechikishlarini kompensatsiya qilib, energiya sarfini 12–15% ga kamaytirdi. |
| Bashoratli boshqarish algoritmi | 5,7–5,2 oralig'idan chiqib ketdi | 5,6–5,3 oralig'ida barqaror saqlandi | Bashoratli boshqarish algoritmi pH ni optimal diapazonda ushlab, fermentlar faoliyatini samarali ta'minladi. |
| Bashoratli boshqarish algoritmi | Uzoq, ko'p tebranish bilan | Qisqa, silliq boshqaruv signallari bilan | Bashoratli boshqarish algoritmi boshqarish jarayonida oldindan prognozlash imkoniyatini ko'rsatdi. |
| Bashoratli boshqarish algoritmi | 0% (bazaviy) | ~12–15% yaxshilanish | Bashoratli boshqaruv energiya sarfini optimallashtirish imkonini berdi. |

Taqqoslash natijalari shuni ko'rsatadiki, bashoratli boshqaruv tizimi an'anaviy PID rostlagichga nisbatan uchala parametrni ham yuqori aniqlikda nazorat qildi. Shakar konsentratsiyasi bashoratli rostlagichda $\pm 0,1$ g/L diapazonda barqaror saqlangan bo'lsa, PID rostlagichda og'ishlar kattaroq bo'ldi. Harorat rostlanishida bashoratli rostlagich og'ishni $\pm 0,3$ °C darajasida ushlab qoldi. An'anaviy PID rostlagichda esa bu ko'rsatkich $\pm 1,2$ °C tebranishga ega bo'ldi. Jarayonning eng muhim parametri hisoblagan pH darajasining rostlanishi ham bashoratli boshqarish algoritmi yordamida optimal 5,3–5,6 oralig'ida barqaror saqlanib, fermentlar faoliyatiga qulay sharoit yaratildi. Energiya samaradorlik jihatida bashoratli rostlagich algoritmi energiya sarfini 12–15% ga kamaytirgani qayd etildi.

XULOSA

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, bashoratli boshqaruv tizimi pivo ishlab chiqarishning dastlabki bosqichlarida an'anaviy PID rostlagichlarga nisbatan yuqori

samaradorlikka ega. Shakar konsentratsiyasi belgilangan qiymatdan minimal og‘ish bilan boshqarildi, harorat profilida issiqlik kechikishlari kompensatsiya qilindi va pH fermentlar faoliyati uchun optimal intervalda saqlandi.

Bashoratli boshqaruv algoritmi jarayonni nafaqat aniq va barqaror boshqara oldi, balki energiya sarfini ham kamaytirdi. Bu esa pivo ishlab chiqarish texnologiyasida sifatni barqarorlashtirish, mahsulot bir xilligini ta’minlash va iqtisodiy samaradorlikni oshirish uchun muhim omil hisoblanadi.

Umuman olganda, ishlab chiqilgan bashoratli boshqaruv tizimi ilmiy va amaliy jihatdan istiqbolli yechim bo‘lib, uni sanoat sharoitlariga tatbiq etish pivo ishlab chiqarish jarayonini raqamlashtirish va avtomatlashtirishning yangi bosqichiga olib chiqadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

- [1] G. G. Hornink, *Principles of Beer Production and Enzymes in Mashing*, 2nd ed. Alfenas-MG, 2024.
- [2] C. W. Bamforth and G. P. Fox, ‘Malting and brewing’, in *ICC Handbook of 21st Century Cereal Science and Technology*, Elsevier, 2023, pp. 363–368. doi: 10.1016/B978-0-323-95295-8.00013-7.
- [3] C. Lasanta, E. Durán-Guerrero, A. B. Díaz, and R. Castro, ‘Influence of fermentation temperature and yeast type on the chemical and sensory profile of handcrafted beers’, *J. Sci. Food Agric.*, vol. 101, no. 3, pp. 1174–1181, Feb. 2021, doi: 10.1002/jsfa.10729.
- [4] A. N. Yusupbekov and M. Sh. Yusupov, ‘DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR AN INTELLIGENT PROCESS CONTROL SYSTEM IN BREWING INDUSTRY’, *Chem. Technol. Control Manag.*, vol. 2024, no. 5, pp. 60–62, Oct. 2024, doi: 10.59048/2181-1105.1630.
- [5] N. F. Abunde, N. Y. Asiedu, and A. Addo, ‘Modeling, simulation and optimal control strategy for batch fermentation processes’, *Int. J. Ind. Chem.*, vol. 10, no. 1, pp. 67–76, Mar. 2019, doi: 10.1007/s40090-019-0172-9.
- [6] J. M. Zamudio Lara, L. Dewasme, H. Hernández Escoto, and A. Vande Wouwer, ‘Parameter Estimation of Dynamic Beer Fermentation Models’, *Foods*, vol. 11, no. 22, p. 3602, Nov. 2022, doi: 10.3390/foods11223602.
- [7] T. Eslami and A. Jungbauer, ‘Control strategy for biopharmaceutical production by model predictive control’, *Biotechnol. Prog.*, vol. 40, no. 2, p. e3426, Mar. 2024, doi: 10.1002/btpr.3426.
- [8] E. Bolmanis, K. Dubencovs, A. Suleiko, and J. Vanags, ‘Model Predictive Control—A Stand Out among Competitors for Fed-Batch Fermentation Improvement’, *Fermentation*, vol. 9, no. 3, p. 206, Feb. 2023, doi: 10.3390/fermentation9030206.
- [9] M. Schwenzler, M. Ay, T. Bergs, and D. Abel, ‘Review on model predictive control: an engineering perspective’, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 117, no. 5–6, pp. 1327–1349, Nov. 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07682-3.
- [10] A. Yusupbekov and M. Yusupov, ‘PIVO ISHLAB CHIQRISHDA FERMENTLASH JARAYONINI MODELLASHTIRISH’, *Dev. Sci.*, vol. 3, no. 5, pp. 342–346, 2025.