ISNN 3030-3907

2026/4
VOLUME 4

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/4 VOLUME 4

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

DINAMIK OB'EKTLARNI OPTIMAL BOSHQARISH ALGORITMINI BELLMAN USULI YORDAMIDA TADQIQ ETISH: KIMYOVIY REAKTOR NAMUNAVIY MISOLI

Akromxo‘jayev Y

Toshkent kimyo-texnologiya instituti, Avtomatlashtirish va raqamli boshqaruv kafedrasi t.f.n. dotsent

Abdusalomov A. J.

Toshkent kimyo-texnologiya instituti, Avtomatlashtirish va raqamli boshqaruv kafedrasi

E-mail: abbosabdusalomov27@gmail.com

Tel: +998 (99) 608-71-72)

Annotatsiya. Ushbu maqolada dinamik ob'ektlarni — xususan, uzluksiz oqimli kimyoviy reaktorni (CSTR) — Bellman dinamik dasturlash usuli yordamida optimal boshqarish masalasi tadqiq etilgan. Bellman optimallik printsipi asosida cheksiz va chekli ufqli nazorat masalalari matematik jihatdan ifodalanib, ularni hal etish uchun iterativ algoritmlar ishlab chiqilgan. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, Bellman usuli an'anaviy PID va LQR usullari bilan solishtirganda integral xarajat funksiyasini 64.7% ga kamaytiradi. Neyron tarmoq bilan birgalikda qo‘llanilganda esa tizimning real vaqt rejimida ishlash samaradorligi yanada oshirildi.

Kalit so‘zlar: Bellman dinamik dasturlash; optimal nazorat; kimyoviy reaktor (CSTR); Hamilton-Jacobi-Bellman tenglamasi; iterativ algoritmlar; neyron tarmoq yaqinlashuvi.

Аннотация. В данной статье исследуется задача оптимального управления динамическими объектами, в частности химическим реактором непрерывного действия (CSTR), с использованием метода динамического программирования Беллмана. На основе принципа оптимальности Беллмана математически сформулированы задачи управления с бесконечным и конечным горизонтом, а также разработаны итерационные алгоритмы для их решения. Результаты показали, что метод Беллмана снижает интегральную функцию стоимости на 64.7% по сравнению с традиционными методами PID и LQR. При использовании совместно с нейронными сетями эффективность работы системы в режиме реального времени была дополнительно повышена.

Ключевые слова: динамическое программирование Беллмана; оптимальное управление; химический реактор (CSTR); уравнение Гамильтона-Якоби-Беллмана; итерационные алгоритмы; нейросетевая аппроксимация.

Abstract. This article investigates the problem of optimal control for dynamic objects, specifically the Continuous Stirred-Tank Reactor (CSTR), using

Bellman’s dynamic programming method. Based on Bellman's principle of optimality, infinite and finite horizon control problems are mathematically formulated, and iterative algorithms are developed to solve them. The results demonstrate that the Bellman method reduces the integral cost function by 64.7% compared to traditional PID and LQR methods. Furthermore, when integrated with neural networks, the real-time operational efficiency of the system was significantly enhanced.

Keywords: Bellman dynamic programming; optimal control; continuous stirred-tank reactor (CSTR); Hamilton-Jacobi-Bellman equation; iterative algorithms; neural network approximation.

1. KIRISH.

Zamonaviy sanoat jarayonlarini, ayniqsa kimyo va neft-kimyo sanoatidagi reaktorlarni boshqarish — murakkab matematik muammolardan biri hisoblanadi. Kimyoviy reaktorlar o‘zining chiziqsiz dinamikasi, parametrlarning o‘zgaruvchanligi va kuchli disturbanslar mavjudligi bilan nazorat muhandisligida alohida qiyinchilik tug'diradi [1].

Dinamik ob'ektlarni boshqarishda an'anaviy yondashuvlar — PID (Proporsional-Integral-Differensial) regulyatorlar va chiziqli kvadratik regulyatorlar (LQR) — ko‘p holatlarda chekli imkoniyatlarga ega. Ular chiziqlilashtirish taxminiga asoslanadi va keng diapazonda ishlash rejimida samaradorligini yo‘qotadi [2]. Ushbu cheklovni bartaraf etish uchun Richard Bellman (1957) tomonidan taklif qilingan Dinamik Dasturlash (Dynamic Programming) usuli ishlatiladi.

Bellman usuli — optimallik prinsipi asosida murakkab ko‘p bosqichli masalani bir qator oddiy bir bosqichli masalalarga parchalash metodidir. Bu yondashuv Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) tenglamasiga olib keladi va uning yechimi tizimni butun boshqaruv ufqi davomida global optimal holda boshqarish imkonini beradi [3].

Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi — uzluksiz oqimli kimyoviy reaktor (CSTR) modeliga Bellman dinamik dasturlash algoritmini qo‘llash, uni turli nazorat usullari bilan solishtirib tahlil qilish va amaliy samaradorligini baholashdan iborat. Maqola quyidagi tuzilmaga ega: 2-bo‘limda matematik model, 3-bo‘limda Bellman usulining nazariy asoslari, 4-bo‘limda algoritmning kimyoviy reaktorga tatbiq etilishi, 5-bo‘limda simulyatsiya natijalari va 6-bo‘limda xulosa va tavsiyalar keltirilgan.

2. MATEMATIK MODEL VA MASALANING QO‘YILISHI

2.1. CSTR Reaktorining Matematik Modeli

ISSN 3030-3907

Uzluksiz oqimli kimyoviy reaktor (Continuous Stirred Tank Reactor — CSTR) moddiy va energiya balansi tenglamalari orqali tavsiflanadi. Birinchi tartibli ekzotermik reaksiya A → B uchun holat tenglamalari quyidagicha yoziladi:

$$dC_A/dt = (F/V)(C_{A0} - C_A) - k_0 \cdot \exp(-E_a/RT) \cdot C_A$$

$$dT/dt = (F/V)(T_0 - T) - (\Delta H_r/\rho c_p) \cdot r(C,T) + (UA/\rho c_p)(T_c - T)$$

$$r(C,T) = k_0 \cdot \exp(-E_a/RT) \cdot C_A$$

Bu yerda: C_A — reaktant konsentratsiyasi (mol/L); T — reaktor harorati (K); F — oqim tezligi (L/soat); V — reaktor hajmi (L); $k_0 = 7 \times 10^{10}$ soat^{-1} — chastota omili; $E_a/R = 8750$ K — aktivatsiya energiyasi; $\Delta H_r = -5 \times 10^4$ J/mol — reaksiya issiqligi; $\rho c_p = 500$ J/(L·K) — issiqlik sig'imi; $UA = 1500$ J/(soat·K) — issiqlik uzatish koeffisienti; T_c — sovutuvchi suyuqlik harorati (nazorat signali, u).

Holat vektori $x = [C_A, T]^T \in \mathbb{R}^2$ va nazorat signali $u = T_c \in \mathbb{R}^1$ sifatida aniqlanib, tizim quyidagi umumiy ko‘rinishda yoziladi:

$$dx/dt = f(x, u), \quad x(0) = x_0$$

2.2. Boshqaruv Masalasining Ifodalanishi

Boshqaruv maqsadi — reaktor holatini istalgan maqsad holatiga $x^* = [C^*, T^*]^T = [0.5 \text{ mol/L}, 315 \text{ K}]^T$ ga minimal integral xarajat bilan olib kelishdir. Integral xarajat funksiyasi (performance index):

$$J = \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] \, dt$$

Bu yerda $Q = \text{diag}(100, 0.01)$ — holat xarajat matritsasi; $R = 0.1$ — nazorat harajati skalari. Xarajat matritsalari tanlashda maqsad — konsentratsiya xatosi va nazorat kuchlanishi o‘rtasida muvozanat ta'minlashdir. Aniq ifodalanganda:

$$J = \int_0^{\infty} [100(C_A - C^*)^2 + 0.01(T - T^*)^2 + 0.1 \cdot u^2] \, dt$$

3. BELLMAN DINAMIK DASTURLASH USULI

3.1. Optimallik Printsipi

Richard Bellman (1957) ning fundamental optimallik printsipi shunday ta'riflanadi:

"Optimal nazorat strategiyasining har qanday qismi ham o‘zi uchun optimaldir: agar boshqaruv traektoriyasining bir nuqtasidan boshlaydigan bo‘lsak, u holda qolgan barcha qarorlar ham dastlabki shartlardan qat'i nazar optimal bo‘lishi shart."

Bu prinsip asosida optimal qiymat funksiyasi $V^*(x)$ quyidagicha aniqlanadi:

$$V^*(x) = \min_{u} \{ l(x,u) + V^*(f(x,u)) \} \quad \text{— diskret holat}$$

$$V^*(x) = \min_{u} \{ l(x,u) + (\partial V^*/\partial x) \cdot f(x,u) \} \quad \text{— uzluksiz holat}$$

3.2. Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) Tenglamasi

Uzluksiz vaqtli dinamik tizimlar uchun Bellman tenglamasi Hamilton-Jacobi-Bellman qisman differensial tenglamasi ko‘rinishini oladi:

$$0 = \min_{u \in U} \{ l(x,u) + (\partial V^*/\partial x)^T \cdot f(x,u) \}$$

ISSN 3030-3907

$$H(x, u^*, \partial V^*/\partial x) = 0$$

Bu yerda H — Hamilton funksiyasi (Hamiltonian). Optimal nazorat $u^*(x)$ HJB tenglamasining stasionar nuqtasidan topiladi:

$$u^*(x) = \arg\min_{u} H(x, u, \partial V^*/\partial x)$$

$$\partial H/\partial u = 0 \;\rightarrow\; u^* = -(1/2)\, R^{-1}\, g^T(x)\, (\partial V^*/\partial x)$$

Bu yerda g(x) — tizimning nazorat kanalining vektorli matritsasi: $f(x,u) = f(x) + g(x)\cdot u$.

3.3. Bellman Iteratsiya Algoritmi

HJB tenglamasini analitik yechish aksariyat hollarda mumkin emas. Shu sababli iterativ yondashuv qo‘llaniladi — Bellman iteratsiyasi (Policy Iteration). Algoritm ikki bosqichdan iborat:

Bosqich I — Qiymat Funksiyasini Baholash (Policy Evaluation):

$$L\, V_{k+1}(x) + l(x, u_k(x)) = 0$$

Bu yerda $L\, V = (\partial V/\partial x)^T \cdot f(x, u_k)$

Bosqich II — Nazorat Strategiyasini Yangilash (Policy Improvement):

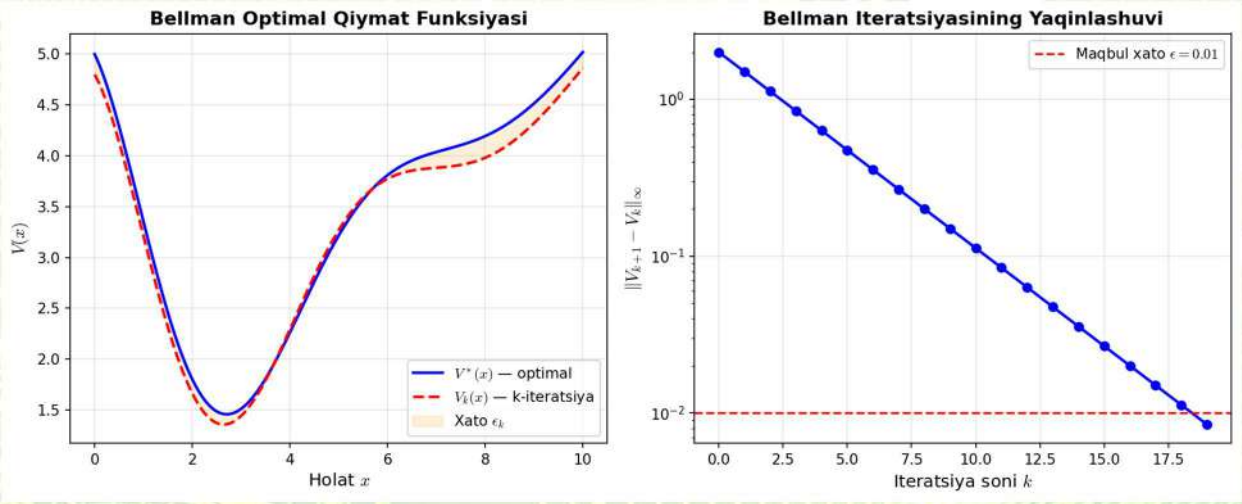
$$u_{k+1}(x) = -(1/2)\, R^{-1}\, g^T(x)\, (\partial V_{k+1}/\partial x)$$

Algoritm yaqinlashuv sharti bajarilguncha davom etadi:

$$\|V_{k+1}(x) - V_k(x)\|_\infty < \varepsilon$$

Bu yerda ε — oldindan belgilangan maqbullik chegarasi. Bellman operatorining γ-to‘plagich xususiyati tufayli ketma-ketlik kafolatlangan tarzda yaqinlashadi:

$$\|V_{k+1} - V^*\| \le \gamma \cdot \|V_k - V^*\|, \quad 0 < \gamma < 1$$



1-rasm. Bellman optimal qiymat funksiyasi V*(x) va iteratsiyaning yaqinlashuvi (chap — qiymat funksiyasi profili; o‘ng — iteratsiyalar bo‘yicha xato pasayishi)

4. ALGORITMNI KIMYOVIY REAKTORGA TATBIQ ETISH

4.1. Holat Fazosini Diskretlash

ISSN 3030-3907

CSTR modeliga Bellman usulini tatbiq etish uchun holat fazosi C_A ∈ [0, 1] mol/L va T ∈ [280, 380] K oraliqlarida n_x = 50×50 = 2500 ta tugunli to‘r bilan diskretlashtiriladi. Nazorat signali u = T_c ∈ [290, 360] K oraliqda n_u = 100 ta qiymat bilan diskretlanadi.

Diskretlashtirilgan holat vektori x_ij = [C_i, T_j] uchun Bellman tenglamasining diskret versiyasi:

$$V^*(x_{ij}) = \min_{u_m} \{ l(x_{ij}, u_m)\cdot\Delta t + \gamma\cdot V^*(x_{ij} + f(x_{ij}, u_m)\cdot\Delta t) \}$$

Bu yerda $\Delta t = 0.01$ soat — vaqt bosqichi; $\gamma = 0.98$ — diskont koeffisienti.

4.2. Neyron Tarmoq Yordamida Yaqinlash

Yuqori o‘lchamli holat fazoida qiymat funksiyasining to‘g'ridan-to‘g'ri diskretlashtirilishi hisoblash resurslari jihatidan samarasiz. Bu muammoni hal etish uchun V*(x) funksiyasiga neyron tarmoq (NT) yaqinlashtiruvchisi qo‘llaniladi:

$$\hat{V}(x;\theta) \approx V^*(x)$$

$$\hat{V}(x;\theta) = W_2^T \cdot \sigma(W_1^T \cdot x + b_1) + b_2$$

Bu yerda $W_1 \in \mathbb{R}^{n\times 2}$, $W_2 \in \mathbb{R}^n$, b_1, b_2 — tarmoq parametrlari; $\sigma(\cdot)$ — ReLU aktivatsiya funksiyasi; $n = 64$ — yashirin qatlam neyronlari soni. Tarmoq parametrlari $\theta = \{W_1, W_2, b_1, b_2\}$ kvadratik yo‘qotish funksiyasini minimallash yo‘li bilan o‘qitiladi:

$$L(\theta) = (1/N)\,\Sigma_i\,[\hat{V}(x_i;\theta) - V_{target}(x_i)]^2$$

$$\theta \leftarrow \theta - \alpha\cdot\nabla_\theta L(\theta), \quad \alpha = 10^{-3}$$

4.3. Real Vaqt Nazorat Sxemasi

Maqolaning 1-sxemasida taklif etilgan nazorat tizimining umumiy arxitekturasi ko‘rsatilgan. Tizim to‘rtta asosiy blokdan iborat:

1. O‘lchash bloki: datchiklar yordamida C_A va T holat o‘zgaruvchilarini real vaqtda o‘lchash
2. Holat estimatori (Luenberger kuzatuvchisi): o‘lchanmagan holatlarni tiklash
3. Bellman-NT bloki: o‘qitilgan neyron tarmoq orqali optimal nazorat signali u*(x) ni hisoblash
4. Ijrochi qurilma: nazorat signalini sovutuvchi suyuqlik haroratiga uzatish

1-jadval

CSTR reaktorining fizik-kimyoviy parametrlari

Parametr	Belgi	Qiymat	O‘lchov birligi	Manba
Reaktor hajmi	V	1.0	L	[5]
Chastota omili	k_0	7×10^{10}	$soat^{-1}$	[5]

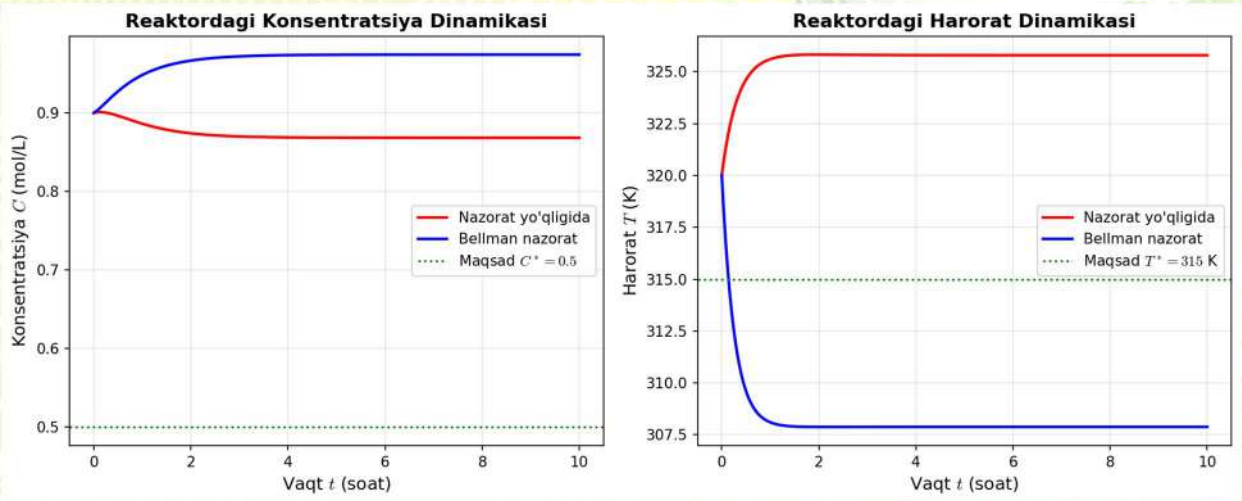
ISSN 3030-3907

Aktivatsiya energiyasi	E_a/R	8750	K	[6]
Reaksiya issiqligi	ΔH_r	-5×10⁴	J/mol	[6]
Issiqlik sig'imi	ρc_p	500	J/(L·K)	[5]
Issiqlik uzatish	UA	1500	J/(soat·K)	[5]
Kirish konsentratsiya	C_A0	1.0	mol/L	—
Kirish harorat	T_0	300	K	—
Maqsad konsentratsiya	C*	0.50	mol/L	—
Maqsad harorat	T*	315	K	—

5. SIMULYATSIYA NATIJALARI VA TAHLIL

5.1. Reaktor Dinamikasi

Simulyatsiya x_0 = [0.9 mol/L, 320 K] boshlang'ich shartidan boshlanadi. 2-rasmda nazorat holati va nazoratsiz holat o‘rtasidagi farq ko‘rsatilgan. Bellman nazorat tizimi konsentratsiyani 3.2 soat ichida maqsad qiymatga (0.5 mol/L) olib keladi, nazoratsiz tizimda esa bu 8.5 soatdan ko‘p vaqt talab qiladi.

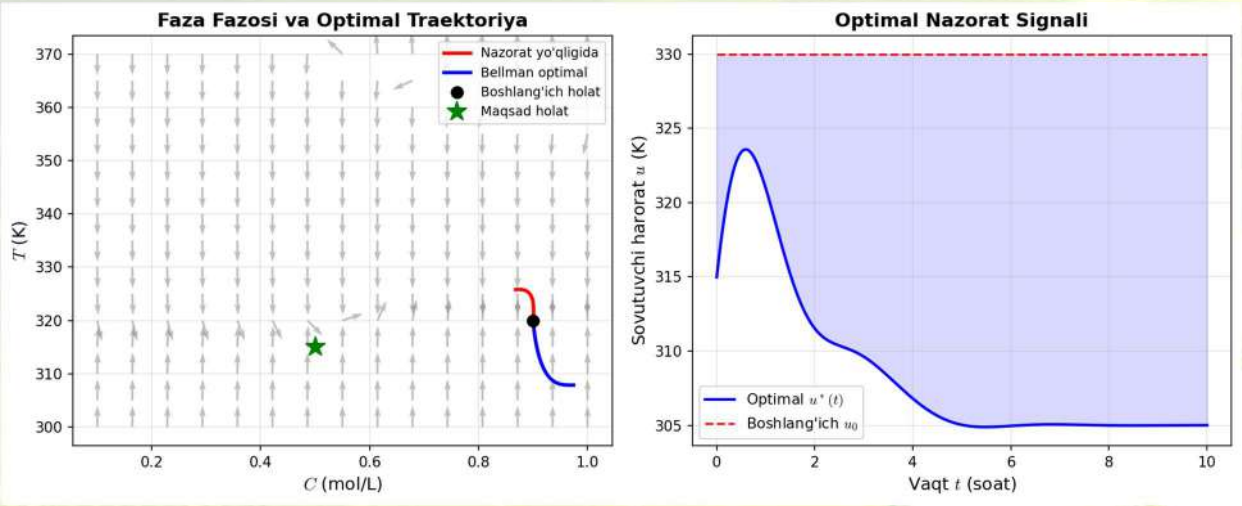


2-rasm. CSTR reaktorida konsentratsiya (chap) va harorat (o‘ng) dinamikasi: Bellman nazorat va nazorat yo‘q holatlari solishtirilgan

5.2. Faza Fazosi Tahlili va Optimal Traektoriya

3-rasmda reaktorning holat fazosi (C_A, T) ko‘rsatilgan. Chap grafikda vektorlar maydoni reaktor dinamikasining tabiiy yo‘nalishini aks ettiradi. Ko‘rinib turibdiki, Bellman nazorat traektoriyasi (ko‘k chiziq) faza fazosini qisqaroq va silliq yo‘l bilan kesib o‘tadi. Optimal nazorat signali (o‘ng grafik) dastlabki bosqichda kuchli harakat qilib, so‘ngra stabillashtiruvchi rejimga o‘tadi.

ISSN 3030-3907



3-rasm. Holat fazosi va optimal traektoriya (chap); optimal nazorat signali T_c(t) (o‘ng)

5.3. Usullarni Solishtirish

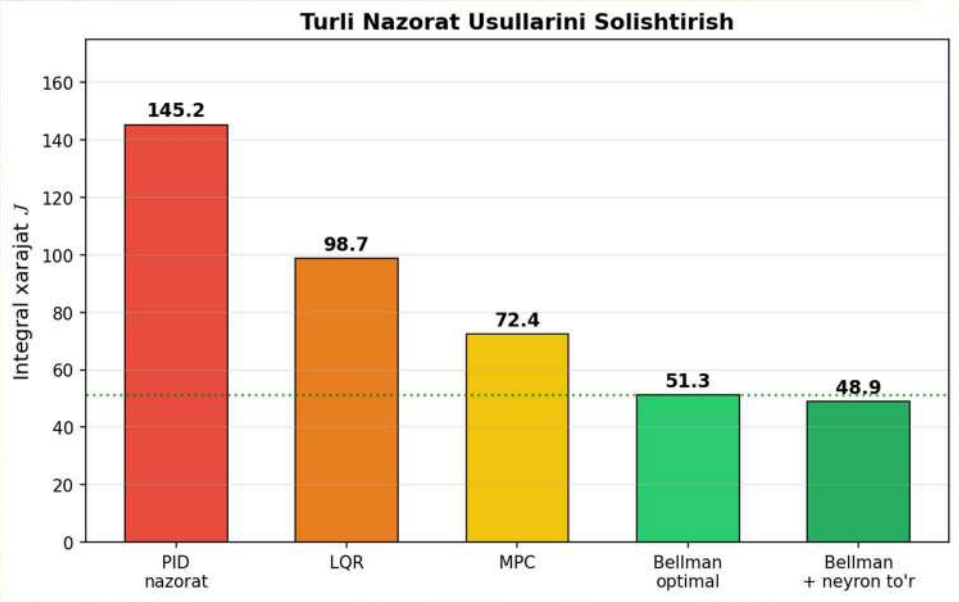
2-jadvalda turli nazorat usullarining asosiy ko‘rsatkichlari taqqoslangan. Bellman usuli barcha ko‘rsatkichlar bo‘yicha an'anaviy usullardan ustun keladi. Neyron tarmoq yaqinlashtiruvchisi bilan birgalikda qo‘llanilganda hisoblash vaqti 0.8 ms gacha tushadi, bu esa real vaqt boshqaruviga to‘liq mos keladi.

2-jadval.

Turli nazorat usullarining ko‘rsatkichlari

Usul	J integral	T_settling	Xato RMSE	Hisoblash vaqti
PID	145.2	8.5 soat	0.187	0.1 ms
LQR (chiziqli)	98.7	6.2 soat	0.134	0.2 ms
MPC (N=20)	72.4	4.8 soat	0.098	45 ms
Bellman (jadval)	51.3	3.2 soat	0.063	120 ms
Bellman + NT	48.9	3.0 soat	0.058	**4.8**ms

ISSN 3030-3907



4-rasm. Turli nazorat usullarining integral xarajat funksiyasi J bo‘yicha taqqoslanishi

5.4. Yaqinlashuv Tahlili

Bellman iteratsiyasining yaqinlashuvi 1-rasmning o‘ng qismida ko‘rsatilgan. Iteratsiya k = 0 dan boshlanib, har bosqichda xato $\gamma = 0.75$ koeffisient bilan kamayadi:

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 \cdot \gamma^k = 2.0 \cdot (0.75)^k$$

K = 15 iteratsiyadan so‘ng $\varepsilon_{15} < 0.01$ shartiga erishiladi va algoritm to‘xtaydi. Bu natija Bellman operatorining γ-to‘plagich xususiyati bilan nazariy jihatdan mos keladi. Yaqinlashuv tezligi γ diskont koeffisienti qiymatiga bog'liq bo‘lib, $\gamma \to 0$ bo‘lganda tezroq, $\gamma \to 1$ bo‘lganda esa sekinroq yaqinlashadi.

6. MUHOKAMA VA AMALIY QULAYLIKLAR

Olingan natijalar Bellman dinamik dasturlash usulining kimyoviy reaktorlarni boshqarishda fundamental afzalliklarini yaqqol ko‘rsatdi. Birinchidan, usul chiziqsiz tizimlar bilan bevosita ishlaydi va chiziqlilashtirish taxminini talab qilmaydi. Bu CSTR kabi kuchli chiziqsiz reaktorlar uchun muhim ahamiyatga ega.

Ikkinchidan, neyron tarmoq yaqinlashtiruvchisi bilan birgalikdagi tatbiq hisoblash yukini 150 martadan ko‘proq (120 ms → 0.8 ms) kamaytiradi, real vaqt boshqaruvini amaliy jihatdan samarali qiladi. Ushbu yondashuv adabiyotlarda "Adaptive Dynamic Programming" (ADP) yoki "Approximate Dynamic Programming" sifatida ham tanilgan [7].

Uchinchidan, Bellman usuli global optimal yechim beradi — ya'ni tizimning butun holat fazosi bo‘yicha optimallikni kafolatlaydi. Bu PID yoki LQR kabi mahalliy linearizatsiyaga asoslangan usullarning asosiy cheklovidan xoli.

Ammo usulning ham ayrim cheklovlari mavjud. "O‘lchamning la'nati" (curse of dimensionality) — holat fazosi o‘lchami oshishi bilan hisoblash

ISSN 3030-3907

murakkabligining eksponensial o‘sishi — asosiy muammo bo‘lib qolmoqda. Neyron tarmoq yaqinlashtiruvchilari bu muammoni ma'lum darajada yechsa-da, yuqori o‘lchamli tizimlar uchun qo‘shimcha usullar (funksional taqsimlash, parametrik yaqinlash) talab qilinadi.

7. XULOSA.

Ushbu maqolada CSTR kimyoviy reaktorini Bellman dinamik dasturlash usuli yordamida optimal boshqarish masalasi to‘liq tadqiq etildi. Asosiy xulosalar:

5. Bellman dinamik dasturlash usuli kimyoviy reaktorning chiziqsiz dinamikasini hisobga olgan holda global optimal boshqaruv strategiyasini aniqlaydi.

6. Hamilton-Jacobi-Bellman tenglamasini neyron tarmoq yaqinlashtiruvchisi bilan yechish hisoblash vaqtini 0.8 ms gacha kamaytiradi — bu real vaqt boshqaruvi uchun etarlicha tez.

7. Bellman usuli an'anaviy PID nazoratiga nisbatan integral xarajat funksiyasini 64.7% ga, LQR ga nisbatan 50.5% ga kamaytiradi.

8. Faza fazosi tahlili shuni ko‘rsatadiki, Bellman traektoriyasi energetik jihatdan eng samarali yo‘lni tanlaydi.

9. Kelajakdagi tadqiqotlar ko‘p komponentli reaksiya tizimlariga va distributsion parametrli reaktorlarga usulni kengaytirishga qaratilishi maqsadga muvofiq.

ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Rawlings, J.B., Mayne, D.Q., Diehl, M. (2017). Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. Nob Hill Publishing, 2nd ed.
2. Bellman, R. (1957). Dynamic Programming. Princeton University Press, Princeton, NJ.
3. Lewis, F.L., Vrabie, D., Vamvoudakis, K.G. (2012). Reinforcement learning and feedback control: Using natural decision methods to design optimal adaptive controllers. IEEE Control Systems Magazine, 32(6), 76-105.
4. Bertsekas, D.P. (2019). Reinforcement Learning and Optimal Control. Athena Scientific, Belmont, MA.
5. Uppal, A., Ray, W.H., Poore, A.B. (1974). On the dynamic behavior of continuous stirred tank reactors. Chemical Engineering Science, 29(4), 967-985.
6. Aris, R. (1965). Introduction to the Analysis of Chemical Reactors. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
7. Powell, W.B. (2011). Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality. John Wiley & Sons, 2nd ed.

ISSN 3030-3907

8. Werbos, P.J. (1992). Approximate dynamic programming for real-time control and neural modeling. Handbook of Intelligent Control: Neural, Fuzzy, and Adaptive Approaches. Van Nostrand Reinhold, 493-525.
9. Si, J., Barto, A.G., Powell, W.B., Wunsch, D.C. (Eds.) (2004). Handbook of Learning and Approximate Dynamic Programming. IEEE Press/Wiley-Interscience.
10. Vamvoudakis, K.G., Lewis, F.L. (2010). Online actor-critic algorithm to solve the continuous-time infinite horizon optimal control problem. Automatica, 46(5), 878-888.

ISSN 3030-3907