PID ROSTLAGICHNI SOZLASH USULLARINING QIYOSIY TAHLILI

Musurmonov Tokhirjon Fazliddin o‘g‘li,
Urishev Omadjon Musurmonqul o‘g‘li
texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent
Farg‘ona davlat texnika universiteti
e-mail: tokhirjon0501@gmail.com

Annotatsiya. *Kechikishli birinchi tartibli issiqlik obyekti (K = 2,0 °C/%, T = 120 s, L = 30 s) uchun PID rostlagichni sozlashning uchta usuli sonli modellashtirish orqali solishtirildi. IMC usuli topshiriqni 4,1 % o‘ta rostlash va 78 s rostlash vaqti bilan ishlab chiqdi; Ziegler–Nichols va Cohen–Coon usullarida o‘ta rostlash 58,2 % va 79,9 % ni tashkil etdi. Klassik usullar esa tashqi ta’sirni taxminan uch barobar kichik integral xatolik bilan bartaraf etadi. Qo‘shimcha ravishda boshqarish ta’siri, kechikish o‘zgarishi, λ parametri va L/T nisbatining ta’siri tekshirildi. IMC kechikish 50 % oshganda ham barqaror ishlaydi va L/T = 0,1–1,0 oralig‘ida o‘ta rostlashni 5 % dan oshirmaydi.*

Kalit so‘zlar: *PID rostlagich, sozlash usullari, Ziegler–Nichols, Cohen–Coon, IMC, kechikishli obyekt, haroratni rostlash, o‘ta rostlash.*

Аннотация. *В статье методом численного моделирования сравниваются три метода настройки ПИД-регулятора — Зиглера–Никольса, Коэна–Куна и метод внутренней модели (IMC) — для теплового объекта первого порядка с запаздыванием (K = 2,0 °C/%, T = 120 с, L = 30 с). Метод IMC отрабатывает изменение задания с перерегулированием 4,1 % и временем регулирования 78 с, тогда как при настройках Зиглера–Никольса и Коэна–Куна перерегулирование составляет 58,2 % и 79,9 %. Классические методы подавляют внешнее возмущение примерно с втрое меньшей интегральной ошибкой. Дополнительно исследовано влияние управляющего воздействия, изменения запаздывания, параметра λ и отношения L/T. Метод IMC сохраняет устойчивость при увеличении запаздывания на 50 % и обеспечивает перерегулирование не более 5 % в диапазоне L/T = 0,1–1,0.*

Ключевые слова: *ПИД-регулятор, методы настройки, Зиглер–Никольс, Коэн–Кун, IMC, объект с запаздыванием, регулирование температуры, перерегулирование.*

Abstract. *Three PID tuning methods — Ziegler–Nichols, Cohen–Coon and internal model control (IMC) — are compared by numerical simulation for a first-order-plus-dead-time thermal process (K = 2.0 °C/%, T = 120 s, L = 30 s). IMC tracks a setpoint step with 4.1 % overshoot and a settling time of 78 s, whereas the Ziegler–Nichols and Cohen–Coon settings give overshoots of 58.2 % and 79.9 %. The classical methods reject a load disturbance with roughly three times smaller integral absolute error. The control effort, the sensitivity to dead-time changes, the IMC parameter λ and the L/T ratio are also examined. IMC remains stable when the dead time grows by 50 % and keeps the overshoot below 5 % for L/T = 0.1–1.0.*

Keywords: *PID controller, tuning methods, Ziegler–Nichols, Cohen–Coon, IMC, dead-time process, temperature control, overshoot.*

Kirish

Sanoatdagi rostlash konturlarining 90 % dan ortig‘i PID turidagi rostlagichlar asosida qurilgan [1]. Shunga qaramay, amaliyotda ularning katta qismi qo‘lda, tajriba asosida sozlanadi va bu rostlash sifatining pasayishiga, energiya sarfining ortishiga olib keladi.

Issiqlik obyektlari (pechlar, quritgichlar, issiqlik almashtirgichlar) katta inersiya va transport kechikishiga ega. Bunday obyektlarda rostlagich parametrlarini noto‘g‘ri tanlash haroratning belgilangan qiymatdan oshib ketishiga yoki o‘tish jarayonining cho‘zilishiga sabab bo‘ladi. Shuning uchun sozlash usulini asosli tanlash dolzarb amaliy masala hisoblanadi.

Adabiyotlarda PID rostlagichlar uchun yuzlab sozlash qoidalari jamlangan [5], ammo ulardan qaysi biri muayyan obyektga mos kelishi oldindan ma’lum emas. Shu sababli eng ko‘p qo‘llaniladigan usullarni bir xil model va bir xil mezonlar bo‘yicha solishtirish amaliy ahamiyatga ega.

Ishning maqsadi kechikishli issiqlik obyekti uchun Ziegler–Nichols, Cohen–Coon va ichki model (IMC) usullarini bir xil sharoitda sonli modellashtirish orqali solishtirish hamda kechikish o‘zgarishi, λ parametri va L/T nisbatining ta’sirini baholab, har bir usulning qo‘llanish sohasini aniqlashdan iborat.

Boshqarish obyekti va rostlagich

Boshqarish obyekti sifatida elektr isitish pechining harorat kanali olindi va u kechikishli birinchi tartibli zveno bilan ifodalandi:

$$W(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-Ls} \quad (1)$$

Bu yerda K = 2,0 °C/% — uzatish koeffitsiyenti, T = 120 s — vaqt doimiysi, L = 30 s — kechikish vaqti. Parametrlar uchun namunaviy qiymatlar qabul qilindi; L/T = 0,25 nisbat o‘rtacha kechikishli obyektga mos keladi.

Rostlash qonuni sifatida standart (ideal) shakldagi PID qonuni qo‘llanildi:

$$u(t) = K_p\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau - T_d\frac{dy(t)}{dt}\right) \quad (2)$$

Bu yerda e(t) — topshiriq va o‘lchangan harorat orasidagi farq, y(t) — o‘lchangan harorat, K_p, T_i va T_d — rostlagichning sozlash parametrlari. Differensial tashkil etuvchi chiqish signali bo‘yicha hisoblandi va vaqt doimiysi $T_d/10$ bo‘lgan filtr orqali o‘tkazildi.

Amalda K, T va L qiymatlari ishlab turgan obyektning tajriba o‘tish xarakteristikasidan ikki nuqta usuli bilan aniqlanadi [6]:

1. Rostlagich qo‘l rejimiga o‘tkaziladi va haroratning barqarorlashishi kutiladi.
2. Boshqarish ta’siri Δu ga (masalan, 5–10 % ga) pog‘onali o‘zgartiriladi va harorat yangi barqaror qiymatga yetguncha yozib olinadi.
3. Uzatish koeffitsiyenti hisoblanadi: K = Δy / Δu.
4. Harorat o‘zgarishi to‘liq o‘zgarishning 28,3 % va 63,2 % iga yetgan t28 va t63 vaqtlar aniqlanadi.
5. Vaqt doimiysi va kechikish hisoblanadi: $T = 1{,}5\cdot(t_{63} - t_{28})$, L = t63 − T.

Qabul qilingan model uchun bu nuqtalar $t_{28} \approx 70$ s va $t_{63} = 150$ s ga to‘g‘ri keladi.

Sozlash usullari

Uchala usul ham rostlagich parametrlarini obyekt modelining K, T va L qiymatlari orqali to‘g‘ridan-to‘g‘ri hisoblaydi (1-jadval) [5]. Ziegler–Nichols [2] va Cohen–Coon [3] usullari tebranishlarning har davrda to‘rt marta so‘nishi mezoniga asoslangan. IMC usuli [4] esa berk tizimning istalgan vaqt doimiysi λ ni tanlashga asoslanadi; ishda λ = L qabul qilindi.

1-jadval. PID rostlagich parametrlarini hisoblash formulalari

Usul	K_p	T_i	T_d
Ziegler–Nichols	1,2·T / (K·L)	2·L	0,5·L
Cohen–Coon	T / (K·L) · (4/3 + L / (4·T))	L·(32 + 6·L/T) / (13 + 8·L/T)	4·L / (11 + 2·L/T)
IMC	(2·T + L) / (K·(2·λ + L))	T + L/2	T·L / (2·T + L)

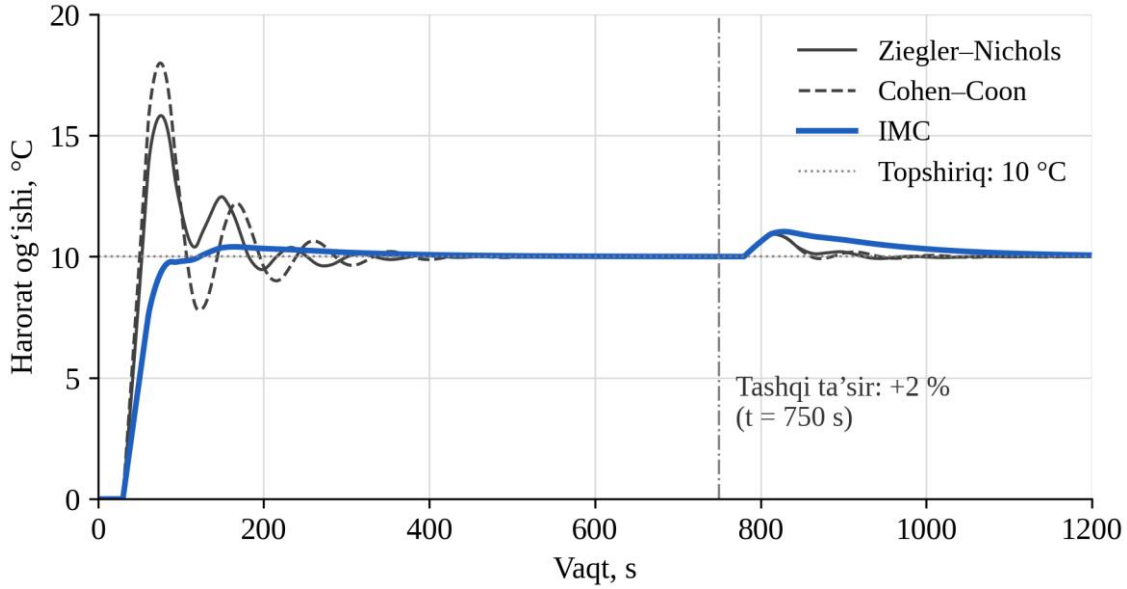
Modellashtirish natijalari

IMC usuli topshiriqni eng sifatli ishlab chiqdi: o‘ta rostlash 4,1 %, rostlash vaqti 78 s (1-rasm, 2-jadval). Tajribada topshiriq t = 0 da 10 °C ga pog‘onali o‘zgartirildi, t = 750 s da esa obyekt kirishiga 2 % li pog‘onali tashqi ta’sir berildi. Model Eyler usulida 0,01 s qadam bilan hisoblandi; ijro mexanizmining to‘yinishi hisobga olinmadi.

Ziegler–Nichols va Cohen–Coon usullarida o‘ta rostlash mos ravishda 58,2 % va 79,9 % ni tashkil etdi. Bunday qiymat harorat rejimi qat’iy bo‘lgan jarayonlar uchun odatda maqbul emas.

Biroq bu ikki usul tashqi ta’sirni tezroq bartaraf etadi. Tashqi ta’sir bo‘yicha IAE ularda 57–58 °C·s, IMC da esa 180 °C·s, ya’ni taxminan uch barobar katta.

Barqarorlik zaxiralari ham IMC da eng katta: amplituda bo‘yicha 2,18, faza bo‘yicha 69°, kechikish bo‘yicha 50,3 s.



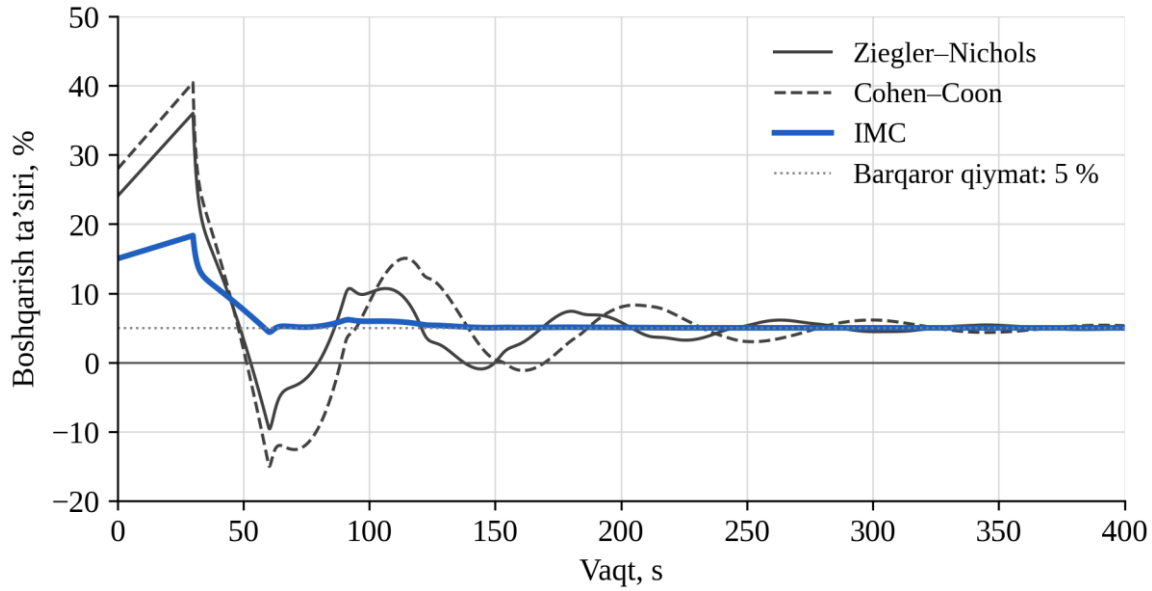
1-rasm. Uch sozlash usuli uchun o‘tish jarayonlari

2-jadval. Rostlagich sozlamalari va rostlash sifati ko‘rsatkichlari

Ko‘rsatkich	Ziegler–Nichols	Cohen–Coon	IMC
K_p, %/°C	2,40	2,79	1,50
T_i, s	60,0	67,0	135,0
T_d, s	15,0	10,4	13,3
O‘ta rostlash, %	58,2	79,9	4,1
Rostlash vaqti (±5 %), s	201	271	78
IAE, topshiriq bo‘yicha, °C·s	765	881	593
Tashqi ta’sirdagi eng katta og‘ish, °C	0,93	0,93	1,03
IAE, tashqi ta’sir bo‘yicha, °C·s	58	57	180
Amplituda bo‘yicha barqarorlik zaxirasi	1,34	1,31	2,18
Faza bo‘yicha barqarorlik zaxirasi, °	42	28	69
Kechikish bo‘yicha barqarorlik zaxirasi, s	17,5	10,3	50,3

Boshqarish ta’siri

Klassik usullar tezkorlikka katta boshqarish ta’siri evaziga erishadi (2-rasm). Cohen–Coon usulida signal barqaror qiymatdan (5 %) sakkiz marta katta cho‘qqiga (40,4 %) chiqadi, so‘ng −15 % gacha tushadi. Ziegler–Nichols usulida cho‘qqi 36,0 % ni tashkil etadi. IMC da signal 4,4–18,3 % oralig‘ida qoladi.



2-rasm. Rostlagich chiqish signalining o‘zgarishi (ish nuqtasidan og‘ish)

Ish nuqtasidagi quvvat zaxirasi kichik bo‘lsa, bunday keskin signal ijro mexanizmini to‘yinishga olib keladi va uning yeyilishini tezlashtiradi.

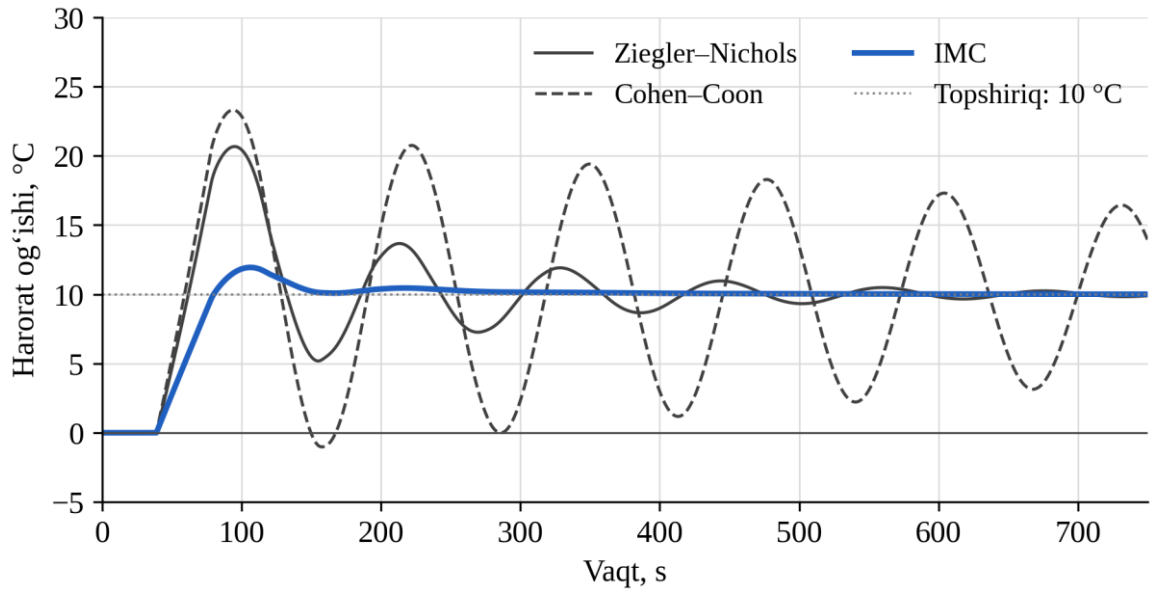
Kechikish o‘zgarishiga chidamlilik

Obyekt kechikishi sozlashda qabul qilingan qiymatdan oshganda faqat IMC rostlash sifatini saqlaydi (3-jadval). Tajribada rostlagich sozlamalari o‘zgartirilmadi, obyekt kechikishi esa 21 s dan 45 s gacha o‘zgartirildi. Jadvalda Z–N — Ziegler–Nichols, C–C — Cohen–Coon.

3-jadval. Kechikish o‘zgarganda o‘ta rostlash va rostlash vaqti

Obyekt kechikishi	Z–N: o‘ta rostlash, %	C–C: o‘ta rostlash, %	IMC: o‘ta rostlash, %	Z–N: rostlash vaqti, s	C–C: rostlash vaqti, s	IMC: rostlash vaqti, s
21 s (−30 %)	27,6	28,6	2,6	186	171	107
30 s (hisobiy)	58,2	79,9	4,1	201	271	78
39 s (+30 %)	106,7	133,1	19,4	516	2974	142
45 s (+50 %)	140,0	nobarqaror	33,6	2093	nobarqaror	273

Cohen–Coon sozlamalari kechikish 34 % dan ko‘proq oshsa barqarorlikni yo‘qotadi. Ziegler–Nichols uchun bu chegara 58 %, IMC uchun 168 %.



3-rasm. Kechikish 30 % ga oshgandagi o‘tish jarayonlari

Cohen–Coon usulida tebranish amplitudasi 700 s dan keyin ham 6 °C dan yuqori. Issiqlik obyektlarida kechikish mahsulot yuklamasi va ish rejimiga qarab o‘zgarishi sababli bu xossa amaliy jihatdan muhim.

IMC usulida λ parametrining ta’siri

λ = L qiymati eng qisqa rostlash vaqtini (78 s) beradi va bu adabiyotdagi tavsiyaga mos keladi [7] (4-jadval). Tajribada faqat λ o‘zgartirildi, obyekt modeli va sinov sharoiti avvalgidek qoldirildi.

4-jadval. λ ning turli qiymatlarida IMC rostlagichning ko‘rsatkichlari

λ / L	K_p, %/°C	O‘ta rostlash, %	Rostlash vaqti, s	IAE, topshiriq bo‘yicha, °C·s	IAE, tashqi ta’sir bo‘yicha, °C·s	Amplituda bo‘yicha zaxira
0,8	1,73	6,2	170	566	156	1,89
1,0	1,50	4,1	78	593	180	2,18
1,5	1,13	2,2	129	698	240	2,91
2,0	0,90	1,2	166	808	299	3,64
3,0	0,64	0,2	251	1060	417	5,09

λ kamaytirilganda tashqi ta’sir tezroq bostiriladi, lekin o‘ta rostlash 5 % lik chegaradan chiqadi va rostlash vaqti 170 s gacha uzayadi. λ oshirilganda barqarorlik zaxirasi ortadi, biroq jarayon sekinlashadi: λ = 3L da tashqi ta’sir bo‘yicha IAE 2,3 marta katta.

Demak, λ bitta sozlash parametri sifatida tezkorlik va chidamlilik orasidagi muvozanatni boshqarish imkonini beradi. Klassik usullarda bunday imkoniyat yo‘q.

L/T nisbatining ta’siri

IMC da o‘ta rostlash L/T ning butun tekshirilgan oralig‘ida 5 % dan oshmadi (5-jadval). Tajribada T = 120 s o‘zgarmas saqlandi, kechikish 12 s dan 120 s gacha o‘zgartirildi va har bir holat uchun rostlagich qayta sozlandi (IMC da λ = L).

5-jadval. L/T nisbatining turli qiymatlarida o‘ta rostlash va rostlash vaqti

L/T	L, s	Z–N: o‘ta rostlash, %	C–C: o‘ta rostlash, %	IMC: o‘ta rostlash, %	Z–N: rostlash vaqti, s	C–C: rostlash vaqti, s	IMC: rostlash vaqti, s
0,10	12	77,5	93,8	2,6	88	112	43
0,25	30	58,2	79,9	4,1	201	271	78
0,50	60	33,4	61,9	3,8	458	514	142
1,00	120	5,6	38,3	4,7	706	803	259

Ziegler–Nichols usuli faqat L/T ≈ 1 da maqbul natija beradi (5,6 %). Kechikishi kichik obyektlarda esa o‘ta rostlash 77,5 % gacha ortadi. Cohen–Coon usulida o‘ta rostlash barcha holatlarda 38 % dan yuqori.

IMC da rostlash vaqti Ziegler–Nichols usuliga nisbatan barcha holatlarda 2,0–3,2 marta qisqa. Bu IMC ning afzalligi bitta model bilan cheklanmasligini ko‘rsatadi.

Xulosa

1. Topshiriq o‘zgarishini ishlab chiqishda IMC usuli eng yaxshi natija berdi: o‘ta rostlash 4,1 %, rostlash vaqti Ziegler–Nichols usuliga nisbatan 2,6 marta qisqa.
2. Ziegler–Nichols va Cohen–Coon usullari tashqi ta’sirni taxminan uch barobar kichik IAE bilan bartaraf etadi. Buning evaziga o‘ta rostlash 58–80 % ga yetadi, barqarorlik zaxirasi kichik (1,31–1,34) va boshqarish ta’sirining cho‘qqisi ikki barobar katta.
3. Kechikish hisobiy qiymatdan 30 % oshganda IMC da o‘ta rostlash 19,4 % ni tashkil etadi. Cohen–Coon usuli esa barqarorlik chegarasiga yaqinlashadi: uning kechikish bo‘yicha zaxirasi atigi 34 %.
4. IMC ning afzalligi L/T = 0,1–1,0 oralig‘ida saqlanadi: o‘ta rostlash 5 % dan oshmaydi, rostlash vaqti Ziegler–Nichols usuliga nisbatan 2,0–3,2 marta qisqa.
5. λ parametri tezkorlik va chidamlilik orasidagi muvozanatni bitta son bilan boshqaradi; boshlang‘ich qiymat sifatida λ = L tavsiya etiladi.
6. Harorat oshib ketishi mumkin bo‘lmagan va obyekt parametrlari o‘zgaruvchan bo‘lgan issiqlik jarayonlari uchun IMC usuli tavsiya etiladi.
7. Keyingi tadqiqotlarda obyekt parametrlarini ishlab turgan pechning tajriba o‘tish xarakteristikasidan aniqlash va ijro mexanizmining to‘yinishini hisobga olish rejalashtirilgan.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Åström K.J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. – 2nd ed. – Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1995. – 343 p.
2. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // Transactions of the ASME. – 1942. – Vol. 64. – P. 759–768.
3. Cohen G.H., Coon G.A. Theoretical consideration of retarded control // Transactions of the ASME. – 1953. – Vol. 75. – P. 827–834.

4. Rivera D.E., Morari M., Skogestad S. Internal model control. 4. PID controller design // Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. – 1986. – Vol. 25, No. 1. – P. 252–265.
5. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. – 3rd ed. – London: Imperial College Press, 2009.
6. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A., Doyle F.J. Process Dynamics and Control. – 3rd ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.
7. Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning // Journal of Process Control. – 2003. – Vol. 13, No. 4. – P. 291–309.