

Scada негізіндегі жылу алмасу қондырғыларында Салқындату процесін басқару жүйесін әзірлеу және модельдеу

ЖАРИЯЛАНДЫ
02.06.2026СІЛТЕМЕ
<https://bilimger.kz/189104/>

Сагимбаев Д.А.

Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетикалық және байланыс университеті,
«Автоматтандыру және басқару» кафедрасы, Алматы, Қазақстан

Ғылыми жетекші: **Утепбергенов И.Т., т.ғ.к., профессор**

Аннотация. Бұл мақалада «құбыр ішіндегі құбыр» типті рекуперативті жылу алмастырғыштағы салқындату процесін автоматты басқарудың математикалық негіздері мен практикалық аспектілері зерттелген. Жылу балансының дифференциалдық теңдеулерінен бастап аналитикалық жолмен екінші ретті беріліс функциясы шығарылды. Тұрақты жұмыс нүктесі маңайындағы сызықтандыру нәтижесінде жүйенің апериодты сипаты анықталды (сөну коэффициенті $(\zeta=1.129)$). Басқару жүйесінің сапасын қамтамасыз ету мақсатында PID-реттегіш параметрлерін анықтаудың үш аналитикалық әдісі — IMC (Internal Model Control), Коэн-Кун (Cohen-Coon) және CHR (Chien-Hrones-Reswick) — салыстырмалы түрде зерттелді. MATLAB Simulink ортасында модельдеу жүргізіліп, уставкаға жауап беру және сыртқы бұзушы әсерге қарсы тұру жағдайлары талданды. Нәтижелер IMC әдісінің ең тиімді реттеу сапасын қамтамасыз ететінін — орнығу уақыты $(t_s=28.81\text{c})$, қайтареттелу $(\sigma=4\%)$ — дәлелдеді. Алынған нәтижелер өнеркәсіптік жылуалмасу жүйелерін автоматтандыру кезінде реттегіш таңдауда практикалық нұсқаулық ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: жылу алмастырғыш, PID-реттегіш, беріліс функциясы, математикалық модель, IMC, Коэн-Кун, CHR, MATLAB Simulink, автоматты басқару жүйесі, температуралық реттеу.

1. КІРІСПЕ

Жылу алмасу процестері заманауи өнеркәсіптің іргелі буыны болып табылады. Мұнай өңдеу, мұнай-химия, энергетика, тамақ өнеркәсібі, металлургия және фармацевтика салаларындағы технологиялық желілердің абсолютті көпшілігі жылу алмастырғыш аппараттарды міндетті компонент ретінде пайдаланады. Осы аппараттардағы температуралық режимді дәл ұстап тұру өнімнің сапасын, процестің қауіпсіздігін және энергетикалық тиімділікті тікелей анықтайды [1].

Жылу алмастырғыштағы температуралық процесті автоматты басқару инерциясы жоғары, уақыттық кідірісі бар және параметрлері жиі өзгертін объектімен жұмыс істеуді талап етеді. Дәстүрлі пропорционалды-интегралды-дифференциалды (PID) реттегіш осы кластағы объектілер үшін практикада кең тараған шешім болып қала береді — өнеркәсіптік реттегіштердің 90%-дан астамы PID алгоритмі негізінде жұмыс істейді [2]. Сондықтан PID-реттегіш параметрлерін оңтайлы баптау мәселесі өзектілігін жоғалтпайды.

Баптау сапасы реттегіш параметрлерін анықтау әдісіне тікелей байланысты. Классикалық Циглер–Никольс [3] және оның туындылары — Коэн–Кун [4], CHR [5] — тұйықталмаған жүйенің өтпелі сипаттамасынан параметрлерді идентификациялауға негізделген. Алайда соңғы онжылдықтарда объектінің математикалық моделін тікелей пайдаланатын модельдік тәсілдер, атап айтқанда Internal Model Control (IMC) [6], артықшылықтарын дәлелдеді.

Осы мақаланың мақсаты — нақты параметрлері бар «құбыр ішіндегі құбыр» типті жылу алмастырғыш үшін беріліс функциясын бірінші принциптерден аналитикалық жолмен шығару, одан кейін IMC, Коэн–Кун және CHR әдістерімен PID параметрлерін есептеп, MATLAB Simulink ортасындағы модельдеу нәтижелері бойынша жүйелі салыстырмалы талдау жүргізу.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы — екінші ретті апериодты жүйе үшін үш баптау әдісінің бірыңғай симуляциялық стенд негізінде сандық салыстырмасы, соның ішінде сыртқы бұзушы әсерге тұрақтылық критерийін ескеру болып табылады.

2. ЗЕРТТЕУ ОБЪЕКТИСІНІҢ СИПАТТАМАСЫ

Зерттеу объектісі ретінде қарсы ағынды схемамен жұмыс істейтін «құбыр ішіндегі құбыр» типті рекуперативті жылу алмастырғыш таңдалды (1-сурет). Бұл конструкция өнеркәсіпте кеңінен қолданылатын және жеткілікті зерттелген объект болғандықтан математикалық модель мен реттегіш параметрлерін тексеру үшін эталон ретінде ыңғайлы.



1-сурет. «Құбыр ішіндегі құбыр» типті жылу алмастырғыштың сызба-нұсқасы

Объектінің физикалық сипаттамасы: ыстық ағын (өнім) ішкі трубада, суық ағын (суытқыш) трубааралық кеңістікте қарсы бағытта қозғалады. Басқару әрекеті ретінде суытқыш шығыны $u(t) = F_c(t)$ [м³/с], ал реттелетін шама ретінде аппарат ішіндегі өнім температурасы $y(t) = T_h(t)$ [°C] алынды. Өнімнің кіріс шығыны $(F_h = \text{const})$ және кіріс температуралары $(T_{h, \text{in}} = \text{const})$, $(T_{c, \text{in}} = \text{const})$ деп қабылданды.

Математикалық модельдеу болжамдары

Модель жасау барысында келесі идеалдандырулар қабылданды: (1) әрбір аппарат көлемінде толық аралас ағын — температура бір айнымалымен сипатталады; (2) сұйықтықтардың жылу-физикалық қасиеттері (ρ , C_p) тұрақты; (3) қабырға арқылы жылу алмасу: $(Q = UA(T_h - T_c))$, мұндағы $(UA = \text{const})$; (4) труба қабырғасының жылулық инерциясы елеусіз; (5) сыртқы ортаға жылу шығыны жоқ. Бұл болжамдар аппараттың жұмыс нүктесі маңайындағы динамикасын адекватты сипаттайды деп дәлелдеген [7].

3. МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬ ЖӘНЕ БЕРІЛІС ФУНКЦИЯСЫ

3.1. Жылулық баланс теңдеулері

Энергияның сақталу заңынан ыстық және суық ағындар үшін дифференциалдық теңдеулер жазылды:

$$M_h C_{ph} \frac{dT_h}{dt} = F_h \rho_h C_{ph} (T_{h, \text{in}} - T_h) - UA(T_h - T_c) \tag{1}$$

$$\begin{aligned} & \backslash[\\ M_c C_{pc} \frac{dT_c}{dt} &= F_c \rho_c C_{pc} (T_{c, \text{in}} - T_c) + UA (T_h - T_c) \tag{2} \\ & \backslash] \end{aligned}$$

Мұндағы: $(M_h = \rho_h V_h)$, $(M_c = \rho_c V_c)$ — жылулық массалар [кг]; $(W_h = F_h \rho_h C_{ph})$, $(W_{c0} = F_{c0} \rho_c C_{pc})$ — конвективті жылу ағындары [Вт/К]; UA — жылу беру коэффициентінің ауданға көбейтіндісі [Вт/К].

3.2. Сызықтандыру

(2) теңдеуіндегі $(F_c T_c)$ мүшесі сызықты емес болғандықтан, жүйені тұрақты жұмыс нүктесі $((T_{h0}, T_{c0}, F_{c0}))$ маңайында сызықтандыру қажет. Ауытқу айнымалылары: $(\theta_h = T_h - T_{h0})$, $(\theta_c = T_c - T_{c0})$, $(\Delta F_c = F_c - F_{c0})$. Кіші шамалардың көбейтіндісін алып тастап, тұрақты мүшелерді жойғаннан кейін:

$$\begin{aligned} & \backslash[\\ \tau_h \frac{d\theta_h}{dt} + \theta_h &= a \theta_c \tag{3} \\ & \backslash[\\ \tau_c \frac{d\theta_c}{dt} + \theta_c &= b \theta_h + K_u \Delta F_c \tag{4} \\ & \backslash] \end{aligned}$$

Мұндағы уақыт тұрақтылары мен коэффициенттер:

$$\begin{aligned} & \backslash[\\ \tau_h &= \frac{M_h C_{ph}}{W_h + UA}, \quad \tau_c = \frac{M_c C_{pc}}{W_{c0} + UA} \\ & \backslash[\\ a &= \frac{UA}{W_h + UA}, \quad b = \frac{UA}{W_{c0} + UA}, \quad K_u = \frac{\rho_c C_{pc} (T_{c0} - T_{c, \text{in}})}{W_{c0} + UA} \\ & \backslash] \end{aligned}$$

3.3. Лаплас түрлендіруі арқылы беріліс функциясын алу

(3) және (4) теңдеулеріне нөлдік бастапқы шарттарда Лаплас түрлендіруін қолданып, $(\theta_c(s))$ айнымалысын жою арқылы $(W(s) = \Theta_h(s) / \Delta F_c(s))$ беріліс функциясы шығарылды:

$$\begin{aligned} & \backslash[\\ W(s) &= \frac{a K_u}{\tau_h \tau_c s^2 + (\tau_h + \tau_c) s + (1 - ab)} \\ & \backslash] \end{aligned}$$

Стандартты нормаланған түрі (статикалық коэффициент $(K_p = a K_u / (1 - ab))$):

$$\begin{aligned} & \backslash[\\ W(s) &= \frac{K_p}{T^2 s^2 + 2 \zeta T s + 1} \\ & \backslash] \end{aligned}$$

$$T = \sqrt{\frac{\tau_h \tau_c}{1-ab}}, \quad \zeta = \frac{\tau_h + \tau_c}{2T(1-ab)}$$

3.4. Сандық есептеу

1-кесте. Жылу алмастырғыштың физикалық параметрлері

ПАРАМЕТР	МӘН	ӨЛШЕМ БІРЛІГІ	СИПАТТАМА
ρC_p (су)	4.18×10^6	Дж/(м ³ ·К)	Көлемдік жылу сыйымдылығы
$V_h = V_c$	0.01	м ³	Контурдың жұмыс көлемі
Fh	0.001	м ³ /с	Өнім шығыны (тұрақты)
F_{c0}	0.003	м ³ /с	Суытқыш шығыны (ж. н.)
UA	800	Вт/К	Жылу беру коэффициенті × аудан
$T_{c, \text{in}}$	15	°С	Кіріс суытқыш температурасы
T_{c0}	32	°С	Шығыс суытқыш температурасы (ж. н.)

Есептеу нәтижелері: $W_h = 4180$ Вт/К, $W_{c0} = 12540$ Вт/К;
 $\tau_h = 41800/4980 = 8.394$ с; $\tau_c = 41800/13340 = 3.133$ с;
 $a = 0.1606$; $b = 0.0600$; $ab = 0.00964$; $1 - ab = 0.9904$;
 $K_u = 5327$ К·с/м³; $K_p = -864.5$ К·с/м³.

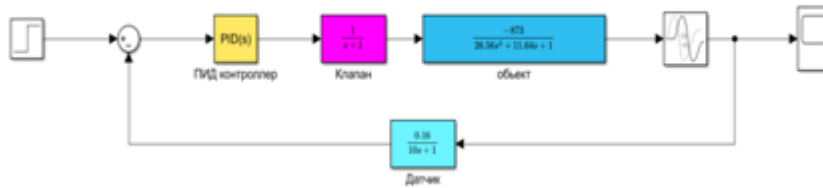
Бөлімнің коэффициенттері: $A_2 = \tau_h \tau_c = 26.30$ с²;
 $A_1 = \tau_h + \tau_c = 11.527$ с; $A_0 = 1 - ab = 0.9904$. Стандартты параметрлер:
 $T = 5.154$ с; $\zeta = 1.129 > 1$ — жүйе аperiodты. Түпкілікті нормаланған беріліс функциясы:

$$W(s) = \frac{-873.0}{26.56s^2 + 11.64s + 1}$$

$\zeta > 1$ болғандықтан, сипаттамалық теңдеудің екі нақты теріс түбірі бар: тербелістер болмайды, жүйе монотонды түрде орнықты күйге өтеді.

4. SIMULINK МОДЕЛІНІҢ ҚҰРЫЛЫМЫ

MATLAB Simulink ортасында тұйық басқару жүйесінің блок-сызбасы жасалды (2-сурет). Модель келесі элементтерден тұрады: берілген мән (уставка) генераторы; PID-реттегіш блогы (параллель түрі, үздіксіз уақыт); клапанның беріліс функциясы $1/(s+1)$; объектінің беріліс функциясы $-873/(26.56s^2 + 11.64s + 1)$; датчик моделі $0.16/(10s+1)$; осциллограф (Scope).



2-сурет. MATLAB Simulink ортасындағы тұйық басқару жүйесінің блок-сызбасы (IMC әдісі)

Датчик блогы өлшеуіш элементтің динамикасын ескеру үшін енгізілді — нақты өнеркәсіптік жүйелерде температура датчигінің өзіндік инерциясы $\backslash(5\text{-}15\text{-секунд}\backslash)$ диапазонында болады. Клапан блогы атқарушы механизмнің жылдамдығын шектейді.

Сыртқы бұзушы әсерді зерттеу үшін модельге кіріс температурасының өзгеруін имитациялайтын қосымша Step блогы енгізілді (3-сурет). Бұзушы әсер $\backslash(15\text{-ші секунда іске қосылды}\backslash$ — өнімнің кіріс температурасы $\backslash(10\text{-}^{\circ}\text{C}\backslash)$ -қа өзгерді.



3-сурет. Сыртқы бұзушы әсер бар MATLAB Simulink моделінің блок-сызбасы

5. PID-РЕТТЕГІШ ПАРАМЕТРЛЕРІН АНЫҚТАУ

5.1. IMC (Internal Model Control) әдісі

IMC әдісі объектінің математикалық моделін тікелей пайдаланатын жүйелік тәсіл болып табылады. Объект екі апериодтық буынның тізбекті қосылысы түрінде ұсынылды:

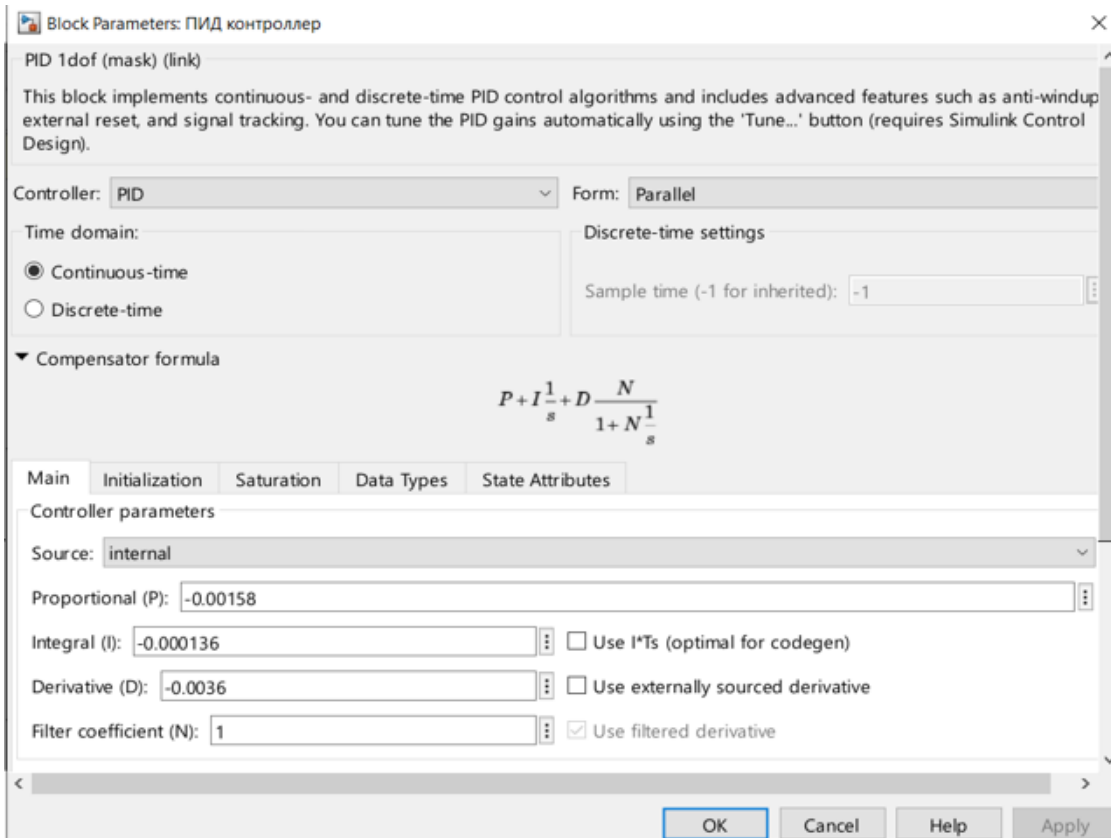
$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

Беріліс функциясын факторизациялау арқылы $\backslash(T_1 \approx 3.12\text{-секунда}\backslash)$, $\backslash(T_2 \approx 8.47\text{-секунда}\backslash)$ мәндері анықталды. IMC баптау параметрі $\backslash(\lambda) = \max(T_1, T_2) = \backslash(8.5\text{-секунда}\backslash)$. PID параметрлерінің есептеу формулалары [6]:

$$K_p = \frac{T_1 + T_2}{K\lambda}, \quad T_i = T_1 + T_2, \quad T_d = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$$

Сандық нәтижелер: $\backslash(K_p = -0.00158)\backslash$; $\backslash(T_i = 11.59\text{-секунда}\backslash)$; $\backslash(T_d = 2.28\text{-секунда}\backslash)$; $\backslash(K_i = K_p / T_i = -0.000136)\backslash$; $\backslash(K_d = K_p T_d = -0.0036)\backslash$.

4-суретте MATLAB Simulink ортасында IMC параметрлері енгізілген PID-реттегіш блогының параметрлер терезесі көрсетілген.



4-сурет. MATLAB Simulink: IMC әдісімен есептелген PID-реттегіш параметрлері

5.2. Коэн-Кун (Cohen-Coon) әдісі

Коэн-Кун әдісі бірінші ретті инерциялық буын және уақыттық кешігуі бар объектілер үшін арналған [4]. Объект моделі:

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

Тұйықталмаған жүйеге бірлік сатылы сигнал берілгенде stepinfo функциясы арқылы параметрлер анықталды (5-сурет). MATLAB нәтижелері: $\text{RiseTime} = 24.58 \text{ c}$; $\text{SettlingTime} = 44.55 \text{ c}$; $\text{Overshoot} = 0$; $\text{Peak} = 872.69$.

```
>> W_plant = tf(-864.5, [26.30 11.527 0.990]);
W_valve = tf(1, [5 1]);
W_full = W_valve * W_plant;
```

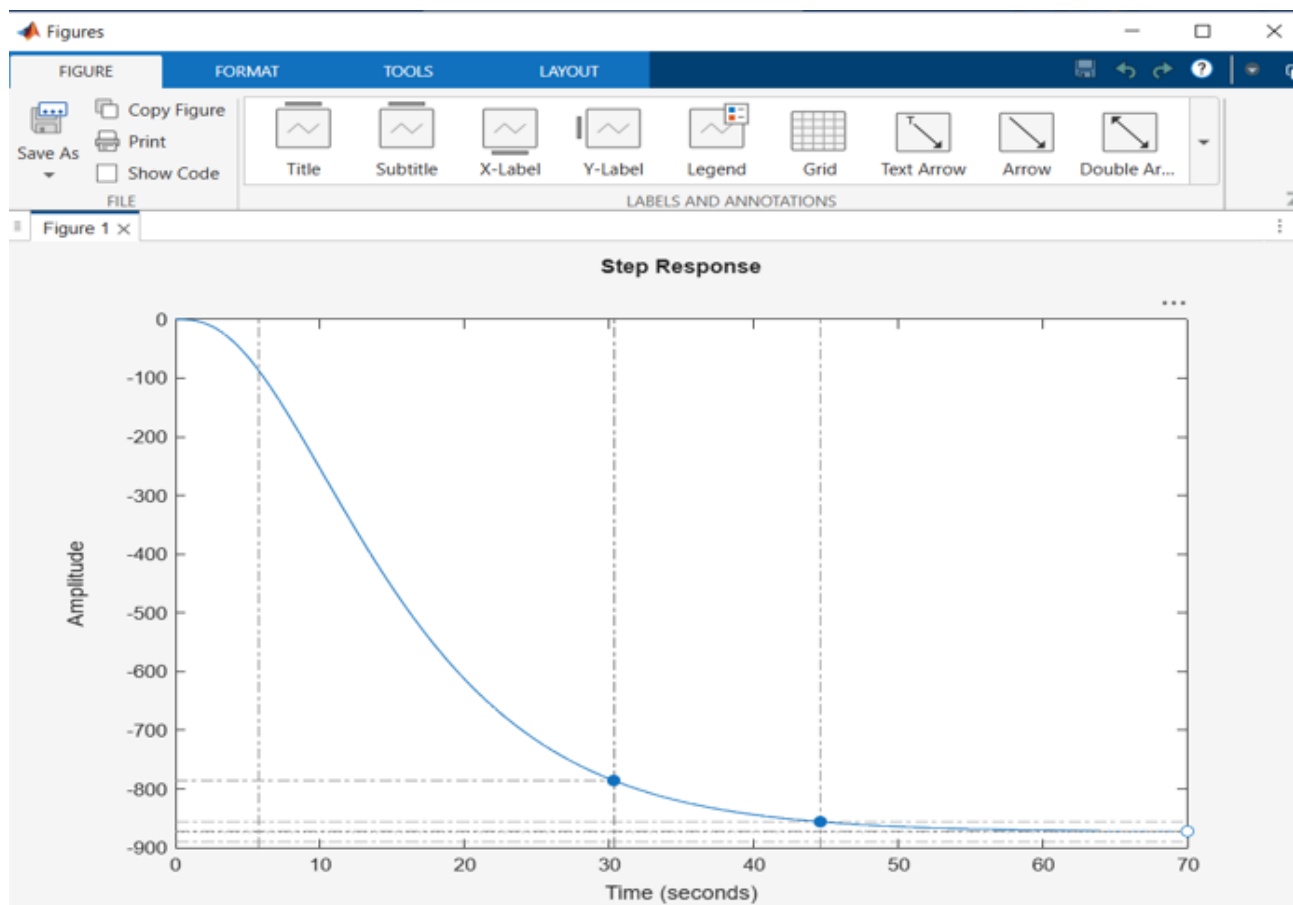
```
% Строим переходную с маркерами
stepinfo(W_full)
```

```
ans =
```

```
struct with fields:
```

```
    RiseTime: 24.5756
  TransientTime: 44.5543
    SettlingTime: 44.5543
    SettlingMin: -872.6865
    SettlingMax: -786.6632
    Overshoot: 0
    Undershoot: 0
        Peak: 872.6865
    PeakTime: 74.3058
```

5-сурет. MATLAB stepinfo командасының нәтижелері — тұйықталмаған жүйенің өтпелі сипаттамасы



6-сурет. Тұйықталмаған жүйенің өтпелі сипаттамасы (Step Response)

Объект параметрлерін анықтау:

```
\[
\tau=\frac{t_{\mathrm{rise}}}{1.8}=\frac{24.58}{1.8}=13.65\,\text{c}
\]
\[
L=t_{\mathrm{set}}-2.16\tau=44.55-2.16\times 13.65=15.07\,\text{c},\quad
\frac{L}{\tau}=1.104
\]
```

Коэн-Кун формулалары бойынша PID параметрлері [4]:

```
\[
K_p=\frac{1}{K}\frac{\tau}{L}\left[1.35+0.25\left(\frac{L}{\tau}\right)\right]=-0.001688
\]
\[
T_i=\frac{L\left[2.5-0.5\left(\frac{L}{\tau}\right)\right]}{1+0.6\left(\frac{L}{\tau}\right)}=17.66\,\text{c}
\]
\[
T_d=\frac{0.37L}{1+0.2\left(\frac{L}{\tau}\right)}=4.57\,\text{c}
\]
\[
K_i=\frac{K_p}{T_i}=-0.0000956,\quad K_d=K_pT_d=-0.007714
\]
```

5.3. CHR (Chien-Hrones-Reswick) әдісі — 0% қайтареттелу режимі

CHR әдісі өтпелі процестің қажетті сапасына байланысты параметрлерді таңдауға мүмкіндік береді [5]. 0% қайтареттелу режимінде (монотонды реттеу):

```
\[
K_p=\frac{0.6\tau}{KL}=\frac{0.6\times 13.65}{-872.69\times 15.07}=-0.000623
\]
\[
T_i=4L=4\times 15.07=60.28\,\text{c},\quad T_d=0.5L=0.5\times 15.07=7.53\,\text{c}
\]
\[
K_i=-0.0000456,\quad K_d=-0.004697
\]
```

5.4. CHR әдісі — 20% қайтареттелу режимі

20% қайтареттелу режимі жылдамырақ реттеуге мүмкіндік береді [5]:

$$K_p = \frac{0.95\tau}{KL} = -0.000986$$

$$T_i = \frac{1.357\tau L}{\tau + 0.5L} = 13.17, \text{c}, \quad T_d = 0.473L = 7.13, \text{c}$$

$$K_i = -0.0000749, \quad K_d = -0.007030$$

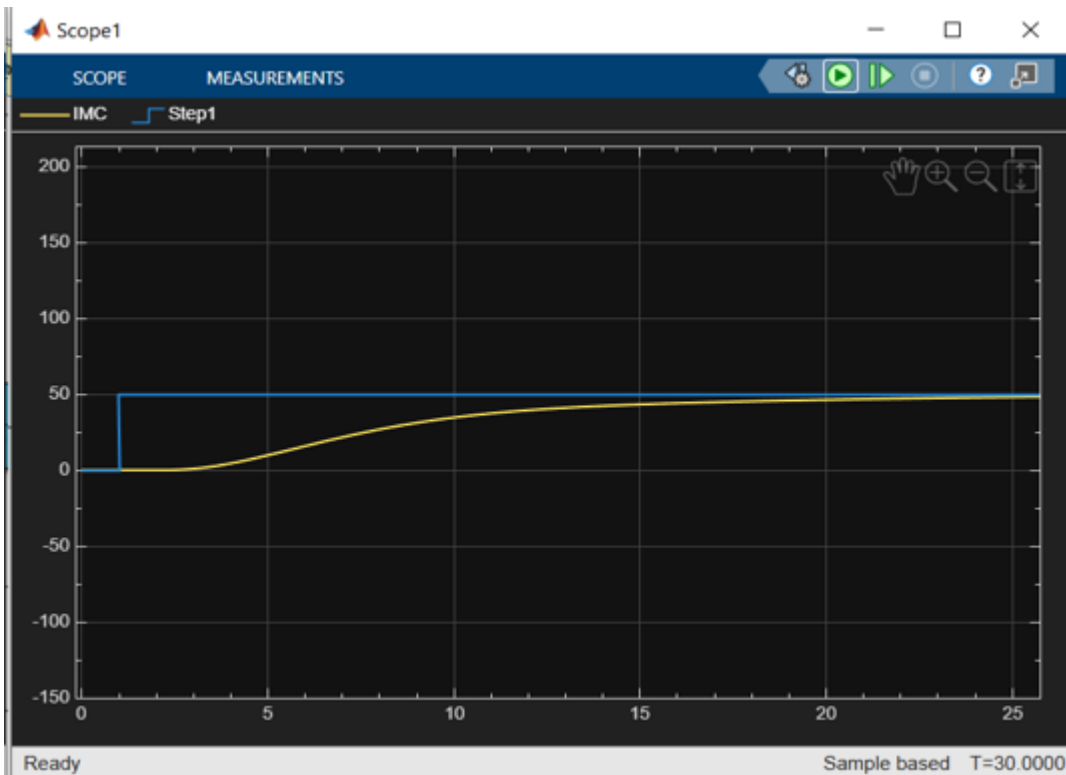
2-кесте. Есептелген PID-реттегіш параметрлерінің жиынтығы

ПАРАМЕТР	ІМС	КОЭН-КУН	СНР 0%	СНР 20%
K_p	-0.00158	-0.001688	-0.000623	-0.000986
T_i, c	11.59	17.66	60.28	13.17
T_d, c	2.28	4.57	7.53	7.13
K_i	-0.000136	-0.0000956	-0.0000456	-0.0000749
K_d	-0.0036	-0.007714	-0.004697	-0.007030

6. MATLAB SIMULINK ОРТАСЫНДАҒЫ МОДЕЛЬДЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ

6.1. ІМС әдісі: уставкаға жауап

Жүйеге $(50, \text{c})$ температура уставкасы берілді. 7-суретте ІМС реттегішімен жабық жүйенің өтпелі процесі көрсетілген. Сары сызық — жүйенің нақты шығыс температурасы; көк сызық — берілген уставка.

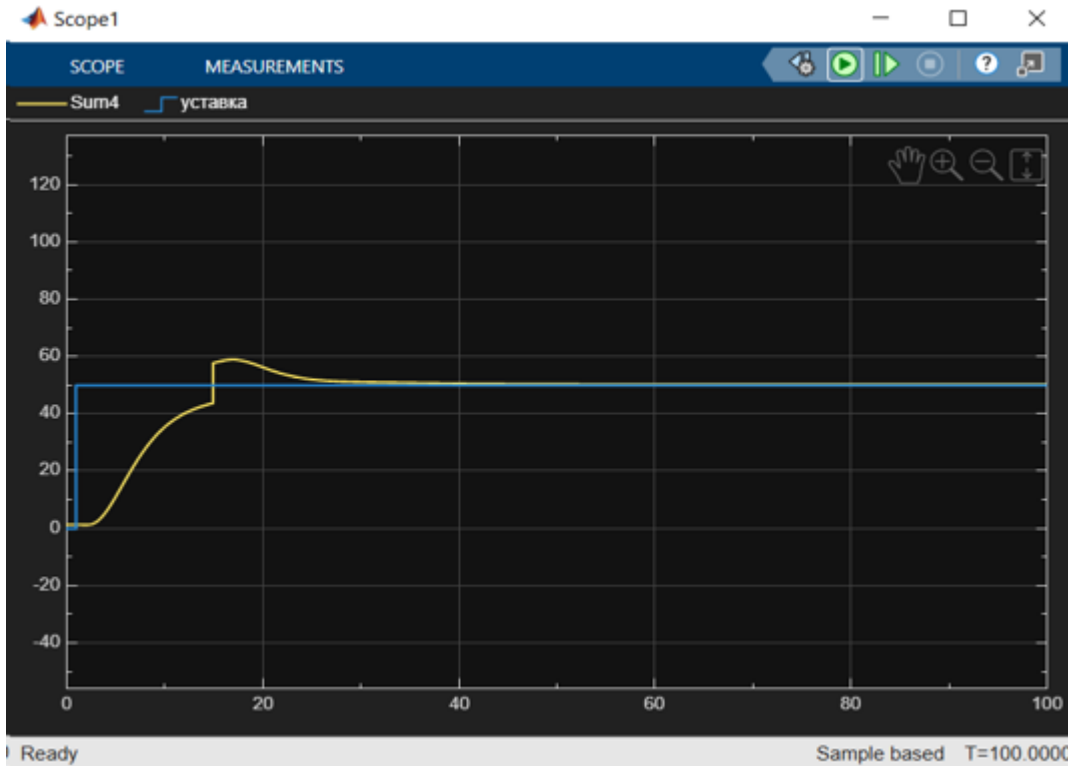


7-сурет. ИМС әдісі: уставкаға жүйенің өтпелі процесі ($T=30\text{ c}$)

Графикті талдау: жүйе монотонды түрде уставкаға жақындайды; тербелістер байқалмайды; перереттелу шамалы ($\sigma \approx 4\%$); орнығу уақыты $t_s \approx 28.81\text{ c}$. Жүйенің жауабы тегіс болуы ($\zeta > 1$) жағдайына сәйкес — аperiodты динамика.

6.2. ИМС әдісі: сыртқы бұзушы әсер

15-ші секундта кіріс температурасының 10°C -қа өзгеруі имитацияланды. 8-суретте жүйенің бұзушы әсерге реакциясы көрсетілген.

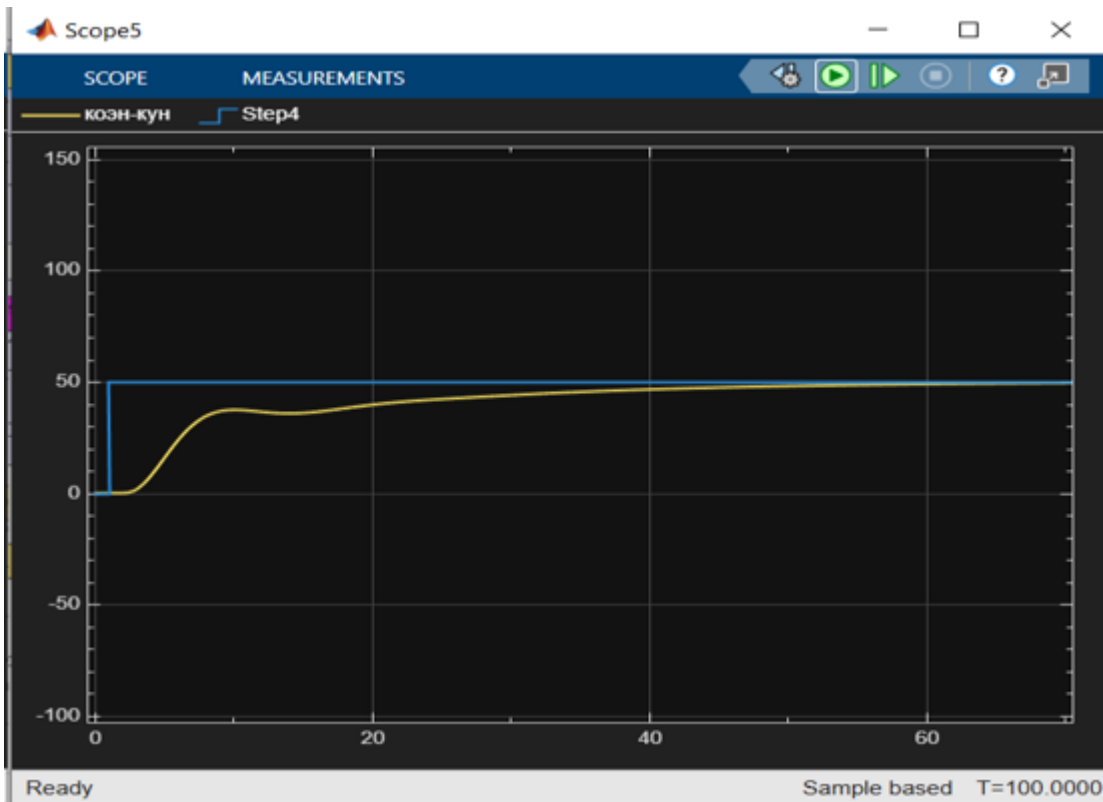


8-сурет. ИМС әдісі: сыртқы бұзушы әсер кезіндегі өтпелі процес ($T=100\text{c}$)

Бұзушы әсер берілген кезде шығыс температурасы алғашқы кезде тербеліске ұшырайды, алайда PID-реттегіш жылдамды компенсациялайды. Жүйе шамамен 30 секундта берілген мәнге қайта оралады. Қайтареттелу байқалады, бірақ тұрақты күйге тез жетеді.

6.3. Коэн-Кун әдісі: уставкаға жауап

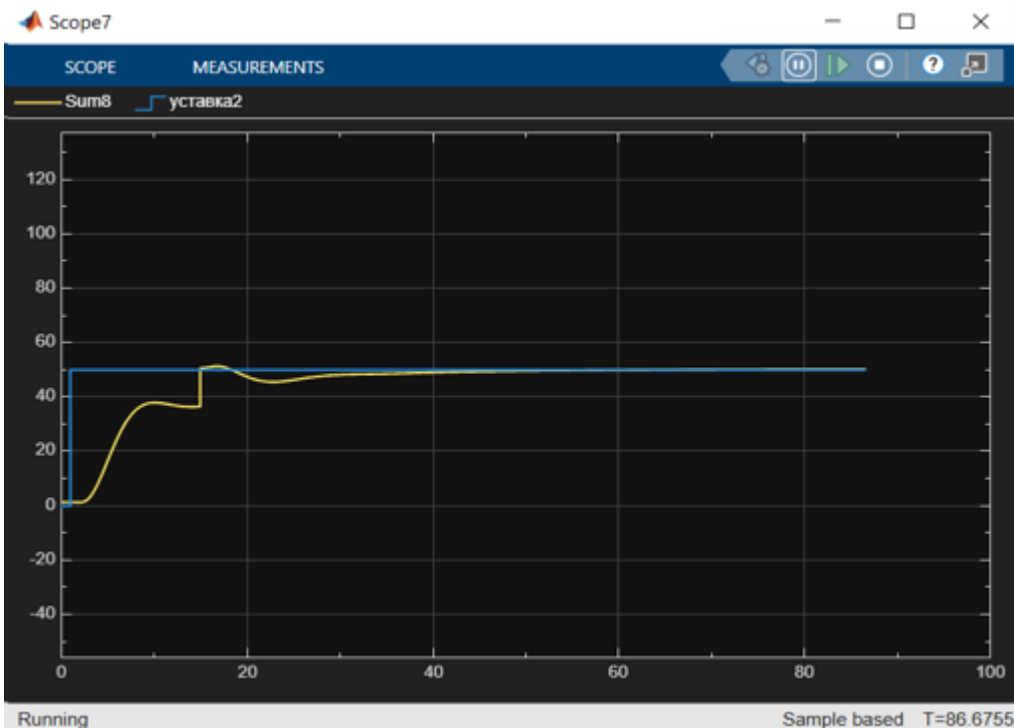
9-суретте Коэн-Кун реттегішінің сатылы уставкаға жауабы көрсетілген. Жүйе баяуырақ жақындайды, бірақ перереттелусіз орнықты жұмыс жасайды.



9-сурет. Коэн-Кун әдісі: уставкаға жүйенің өтпелі процесі ($T=100\text{ c}$)

Коэн-Кун нәтижелері: $t_r=29.49\text{ c}$, $t_s=60.09\text{ c}$, $\sigma=0\%$.
 ИМС-ге қарағанда орнығу уақыты екі есе ұзын, бірақ перереттелу толықтай жоқ. Бұл баяу инерциялық жүйелер үшін ИМС-тен артықшылық болуы мүмкін.

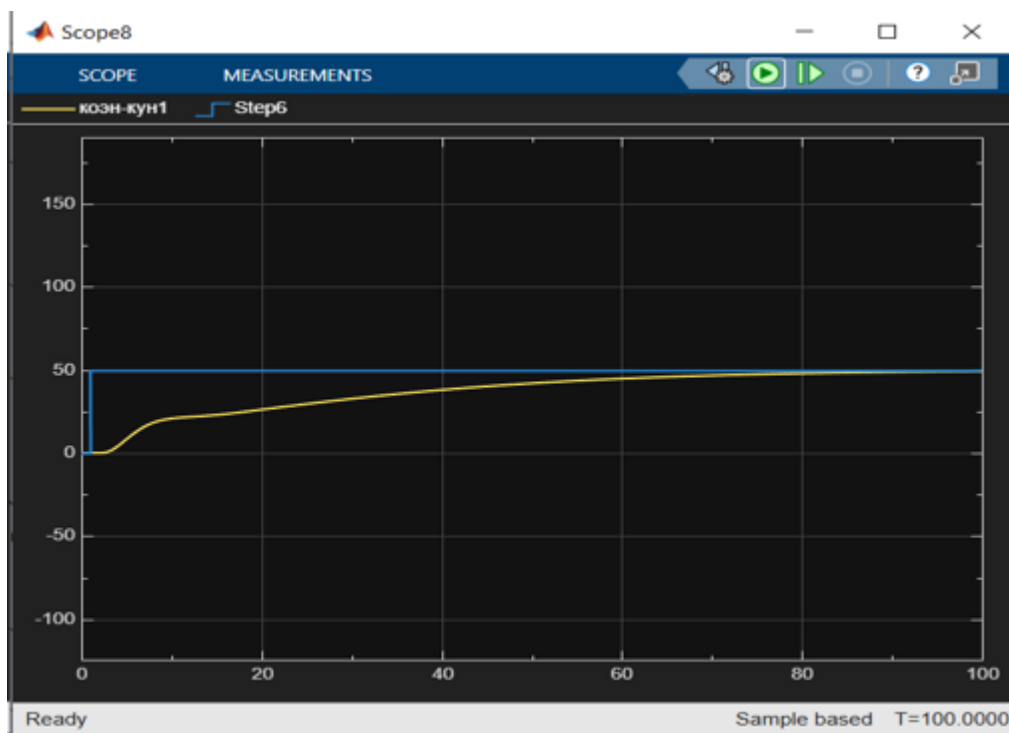
6.4. Коэн-Кун әдісі: сыртқы бұзушы әсер



10-сурет. Коэн-Кун әдісі: сыртқы бұзушы әсер кезіндегі өтпелі процес

Бұзушы әсер кезінде жүйе уақытша ауытқиды. Реттеу процесі 45 секундта аяқталады. Аздаған тербелістер пайда болатынын график көрсетеді.

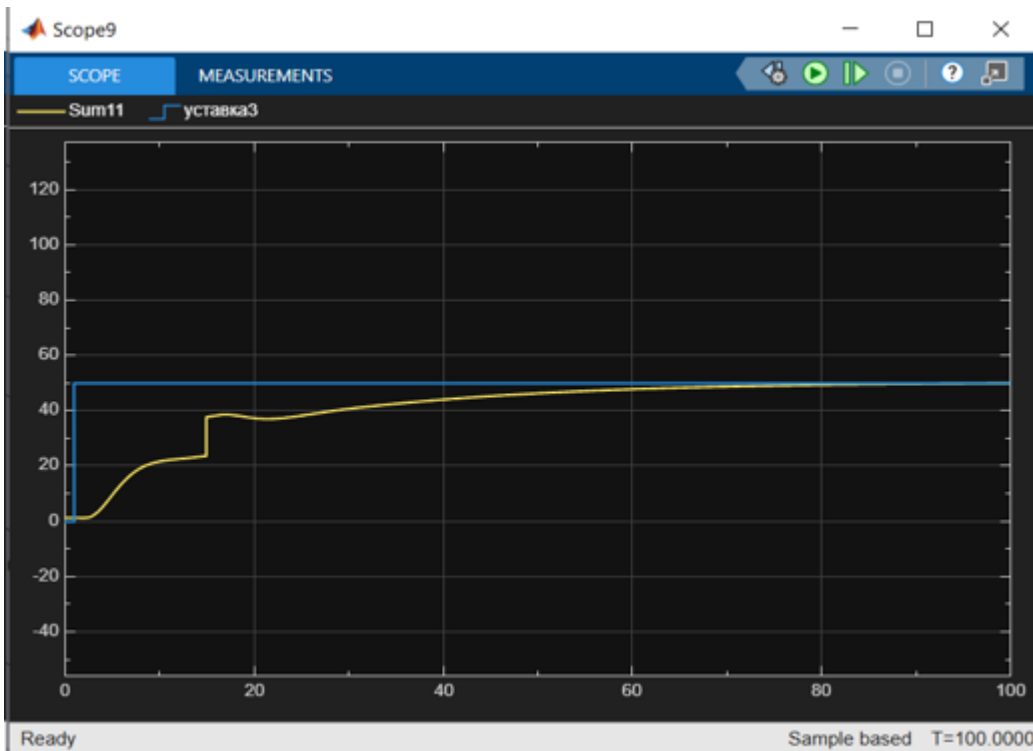
6.5. CHR 0%: уставкаға жауап



11-сурет. CHR 0% қайтареттелу: уставкаға жүйенің өтпелі процесі ($T=100\text{c}$)

CHR 0% режимінде жүйе ең баяу, бірақ ең тегіс өтпелі процесті береді. ($t_r=53.86\text{c}$), ($t_s=83.54\text{c}$). Перереттелу толықтай болмайды. Бұл режим жоғары дәлдік және тербеліссіздік талап ететін процестер (фармацевтика, тамақ өнеркәсібі) үшін тиімді.

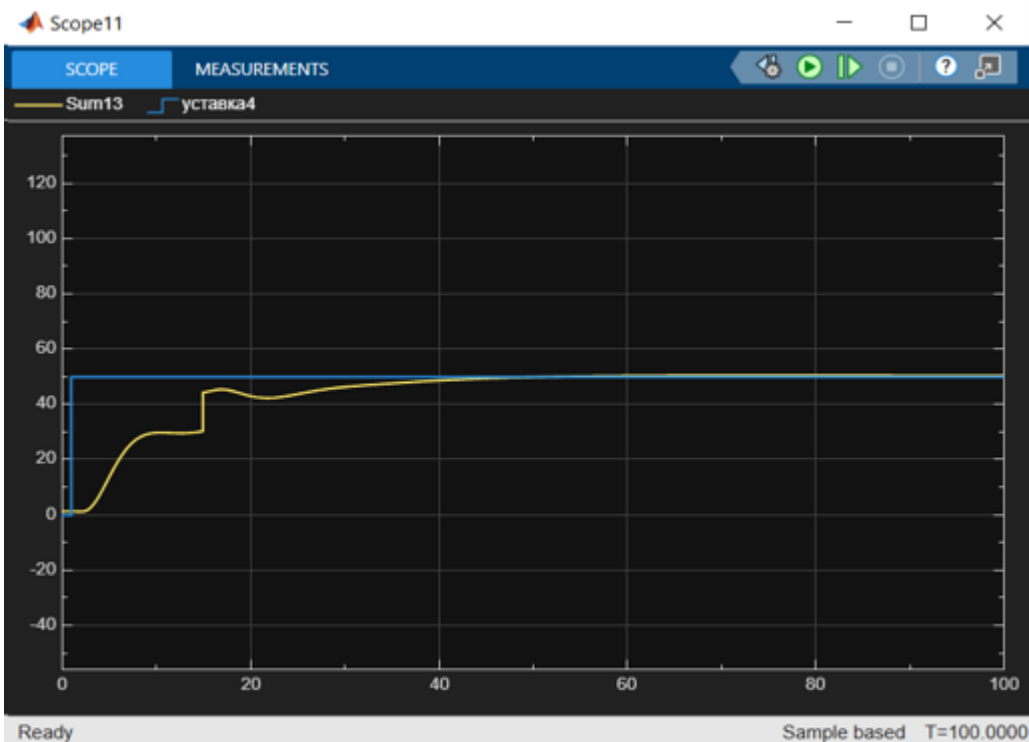
6.6. CHR 0%: сыртқы бұзушы әсер



12-сурет. CHR 0%: сыртқы бұзушы әсер кезіндегі өтпелі процес

Бұзушы әсер кезінде жүйе баяу, бірақ тегіс түрде бастапқы мәнге оралады. Компенсациялау уақыты шамамен $(80\text{-}90)\text{c}$. Жылдам бұзушы әсерлерге жауап беру жеткіліксіз болғандықтан, бұл режим жай өзгеретін технологиялық жағдайларда қолданылуы тиімді.

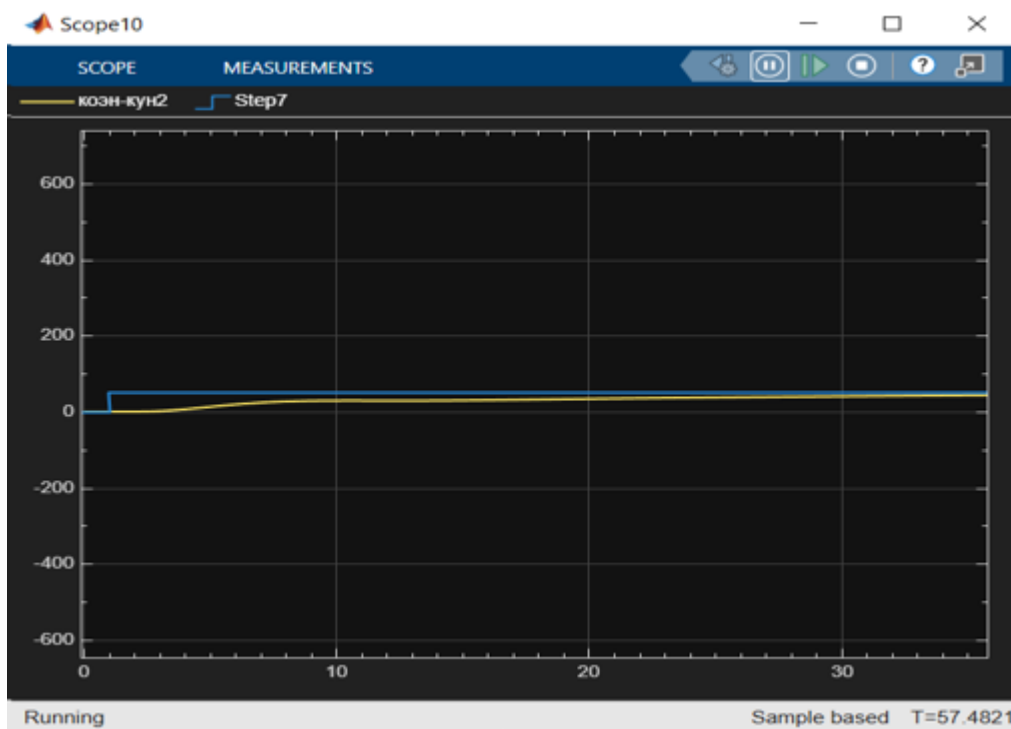
6.7. CHR 20%: уставкаға жауап



13-сурет. CHR 20% қайтареттелу: уставкаға жүйенің өтпелі процесі ($T=100\text{c}$)

CHR 20% режимінде жүйе уставкаға жылдам жақындайды ($t_r=36.96\text{c}$), алайда шағын перереттелу ($\sigma=5.29\%$) байқалады. Орнығу уақыты ($t_s=60.05\text{c}$) — Коэн-Кун мен CHR 0% аралығында орналасады.

6.8. CHR 20%: сыртқы бұзушы әсер



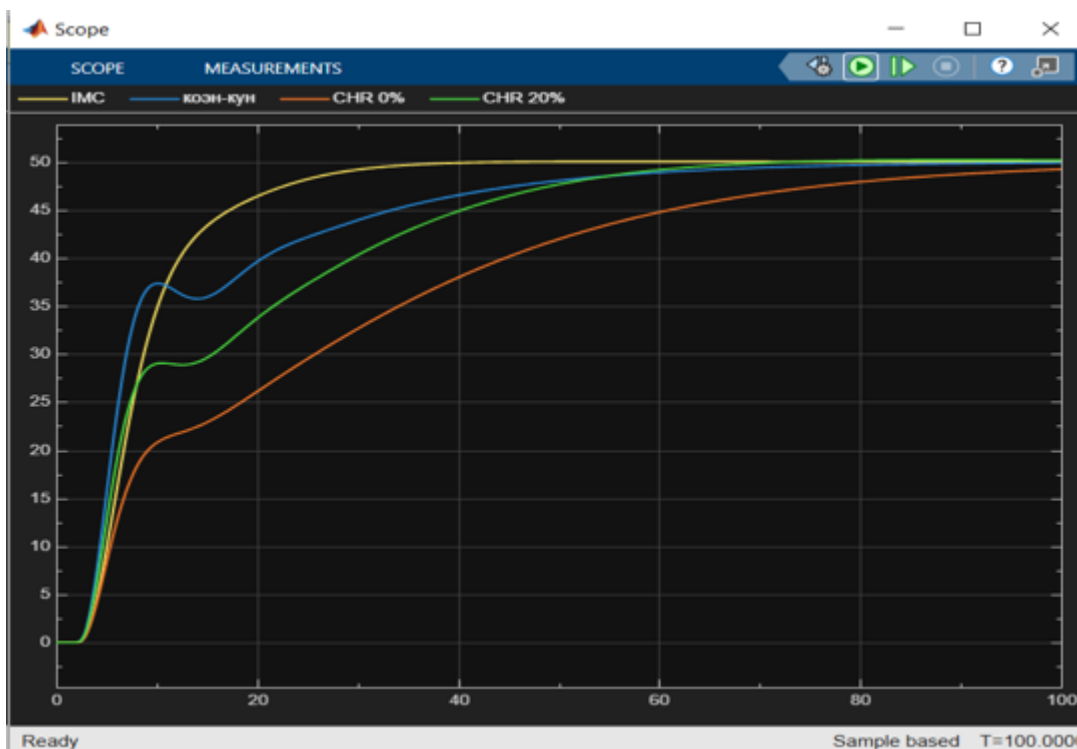
14-сурет. CHR 20%: сыртқы бұзушы әсер кезіндегі өтпелі процес

Бұзушы әсер кезінде жүйе жылдам реакция береді, кішігірім тербелістермен бастапқы мәнге оралады. Компенсациялау уақыты CHR 0%-дан айтарлықтай қысқа.

7. ӘДІСТЕРДІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ

7.1. Өтпелі процестердің салыстырмалы графигі

15-суретте барлық төрт PID-реттегіштің уставкаға жауаптары бір графикте салыстырылған.



15-сурет. Барлық әдістер бойынша өтпелі процестердің салыстырмалы графигі (IMC — сары, Коэн-Кун — көк, CHR 0% — қызыл, CHR 20% — жасыл)

Графикте айқын байқалатын ерекшеліктер: (1) IMC (сары) ең жылдам — 15-20 секундта уставкаға жақын мәнге жетеді; (2) Коэн-Кун (көк) жылдамдықпен екінші орында — шағын перереттелумен; (3) CHR 20% (жасыл) орташа жылдамдықты, ал (4) CHR 0% (қызыл) ең баяу, бірақ тербеліссіз өтпелі процесті береді.

7.2. Сандық сапа көрсеткіштері

3-кесте. Өтпелі процестің сапа көрсеткіштері (stepinfo нәтижелері)

ӘДІС	КӨТЕРІЛУ УАҚЫТЫ TR, С	ОРНЫҒУ УАҚЫТЫ TS, С	ҚАЙТАРЕТТЕЛУ Σ , %	БҰЗУШЫҒА РЕАКЦИЯ, С
IMC	13.17	28.81	4.00	~ 30
Коэн-Кун	29.49	60.09	0	~ 45
CHR 0%	53.86	83.54	0	~ 85
CHR 20%	36.96	60.05	5.29	~ 50

7.3. Әдістердің артықшылықтары мен шектеулері

4-кесте. PID баптау әдістерінің салыстырмалы сипаттамасы

ӘДІС	АРТЫҚШЫЛЫҚТАРЫ	ШЕКТЕУЛЕРІ	ҰСЫНЫЛАТЫН ҚОЛДАНУ
IMC	Ең жылдам ts; модель параметрлерімен тікелей байланыс; λ арқылы жылдамдықты реттеу	Модель дәлдігіне тәуелді; $\sigma \neq 0$	Математикалық модель белгілі болғанда

ӘДІС	АРТЫҚШЫЛЫҚТАРЫ	ШЕКТЕУЛЕРІ	ҰСЫНЫЛАТЫН ҚОЛДАНУ
Коэн-Кун	Перереттелусіз; аналитикалық формулалар; модельсіз идентификация	t_r, t_s ұзын; $L/\tau > 1$ кезінде дәлдік төмендейді	Жай процестер; кешігуі бар объектілер
CHR 0%	Тербеліссіз; ең монотонды процес; жоғары дәлдік	Ең ұзын t_s ; бұзушы әсерге баяу реакция	Жоғары дәлдік, тербелісті болдырмау керек
CHR 20%	Жылдамдық/тербеліс компромисі; аналитикалық	Шағын перереттелу; t_s орташа ұзын	Жылдамдық маңызды, шағын тербеліс рұқсат

Жалпы алғанда, дұрыс баптау әдісін таңдау нақты технологиялық процестің талаптарына байланысты. Температураның жылдам бақылануы маңызды болса (энергетика, металлургия) — IMC; тербеліссіздік басымдық алса (фармацевтика, тамақ өнеркәсібі) — CHR 0%; жылдамдық пен тербелісті теңестіру керек болса — CHR 20% немесе IMC (λ) -ны үлкейту арқылы.

8. НӘТИЖЕЛЕРДІ ТАЛДАУ

Алынған нәтижелерді талдаған кезде бірнеше маңызды аспект байқалды.

Біріншіден, $(\zeta=1.129)$ мәні аperiодты режимге жақын, бірақ критикалық сөнуден $(\zeta=1)$ сәл жоғары. Бұл жағдайда IMC-тің шағын перереттелуі $(\sigma=4\%)$ (λ) параметрін үлкейту арқылы жоюға болады. Мысалы, $(\lambda=1.5T_2=12.75\text{c})$ қойса, перереттелу толықтай жойылады, бірақ $t_s \approx 40$ с-қа дейін ұлғаяды.

Екіншіден, Коэн-Кун $(L/\tau=1.104)$ мәні 1-ден асқандықтан, бұл әдіс тиімділігі бойынша шектеулерге жақындайды. Классикалық теорияда $(L/\tau < 0.5)$ болғанда Коэн-Кун жақсы нәтиже береді деп есептеледі. Мұны ескере отырып, осы объект үшін Коэн-Кун идеалды таңдау болмайды — $(t_s=60.09\text{c})$ IMC-тен 2.1 есе ұзын.

Үшіншіден, IMC әдісінің маңызды артықшылығы — жалғыз баптау параметрі (λ) . Инженер тек осы параметрді өзгертіп, жылдамдық пен тұрақтылық арасындағы компромисті тікелей басқара алады. Бұл өнеркәсіптік қызметкерлер үшін маңызды практикалық пайда береді [6].

Төртіншіден, сыртқы бұзушы әсерге (кіріс температурасының өзгеруі) жауап беру бойынша IMC жүйесі ең жылдам болды $(\sim 30\text{c})$. Өнеркәсіптік процестерде шикізат температурасының толқуы жиі кездесетіндіктен, бұл параметр практикалық тұрғыдан өте маңызды.

Бесіншіден, барлық зерттелген әдістер жүйенің орнықтылығын қамтамасыз ете алды. Бұл математикалық модельдің дұрыс жасалғанын және $(\zeta > 1)$ шарты есептеулердің дұрыс аймақта орналасқанын растайды.

9. ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде келесі ғылыми және практикалық маңызды қорытындылар алынды:

1. «Құбыр ішіндегі құбыр» типті жылу алмастырғыш үшін жылу балансының дифференциалдық теңдеулерінен бастап, тұрақты нүкте маңайындағы сызықтандыру және Лаплас түрлендіруі арқылы аналитикалық жолмен екінші ретті беріліс функциясы шығарылды: $W(s)=\frac{-873}{26.56s^2+11.64s+1}$. Сөну коэффициенті $\zeta=1.129$ жүйенің аperiodты сипатын анықтады.

2. PID-реттегіш параметрлерін анықтаудың үш аналитикалық әдісі — IMC, Коэн-Кун және CHR (0% және 20%) — нақты сандық есептеулермен орындалды. Есептелген коэффициенттер MATLAB Simulink ортасында тексерілді.

3. Салыстырмалы модельдеу нәтижелері IMC әдісінің уставкаға жауап беру жылдамдығы бойынша айқын артықшылығын дәлелдеді: орнығу уақыты $t_s=28.81\text{c}$, яғни Коэн-Кун мен CHR 0%-дан 2.1 және 2.9 есе тезірек.

4. Сыртқы бұзушы әсерге (кіріс температурасының (10°C) -қа өзгеруі) барлық реттегіштер тұрақтылықты сақтады. IMC ең жылдам компенсациялауды ($\sim 30\text{c}$) қамтамасыз етті.

5. Нақты технологиялық процесс талаптарына сәйкес келесі ұсыныстар берілді: жылдам реттеу үшін — IMC ($\lambda \approx T_2$); тербеліссіз монотонды процес үшін — CHR 0%; жылдамдық пен тербелісті теңестіру үшін — CHR 20%.

6. Алынған нәтижелер өнеркәсіптік жылуалмасу жүйелерін автоматтандыру кезінде PID-реттегіш параметрлерін таңдауда практикалық нұсқаулық ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Болашақ зерттеу бағыты ретінде модельдің параметрлері өзгерген жағдайда жұмыс істейтін бейімделетін (adaptive) немесе нечеткі логикаға (fuzzy logic) негізделген реттегіштер тиімділігін IMC-пен салыстыру перспективті болып табылады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Abdullah A.A., Khalaf A.N., Bachache N. Design of Optimal Fuzzy Controller for Heat Exchanger Temperature // Journal of Engineering Science & Technology Review. — 2022. — Vol. 15. — No. 5. — P. 1-9.
2. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID Control. — ISA Press, 2006. — 460 p.
3. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum Settings for Automatic Controllers // Transactions of the ASME. — 1942. — Vol. 64. — P. 759-768.
4. Cohen G.H., Coon G.A. Theoretical Consideration of Retarded Control // Transactions of the ASME. — 1953. — Vol. 75. — P. 827-834.
5. Chien I.L., Hrones J.A., Reswick J.B. On the Automatic Control of Generalized Passive

- Systems // Transactions of the ASME. — 1952. — Vol. 74. — P. 175-185.
6. Rivera D.E., Morari M., Skogestad S. Internal Model Control. 4. PID Controller Design // Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. — 1986. — Vol. 25. — P. 252-265.
 7. Sahoo A., Radhakrishnan T.K., Rao C.S. Modeling and control of a real time shell and tube heat exchanger // Resource-Efficient Technologies. — 2017. — Vol. 3. — No. 1. — P. 124-132.
 8. Olana F.D., Abose T.A. PID temperature controller design for shell and tube heat exchanger // International Journal of Engineering and Manufacturing. — 2021. — Vol. 11. — No. 1. — P. 1-5.
 9. Padhee S. Controller design for temperature control of heat exchanger system: simulation studies // WSEAS Transactions on Systems and Control. — 2014. — Vol. 9. — No. 1. — P. 485-491.
 10. Srivastava N., Tanti D.K., Ahmad M.A. Matlab simulation of temperature control of heat exchanger using different controllers // Automation, Control and Intelligent Systems. — 2014. — Vol. 2. — No. 1. — P. 1-5.

ҚМ АА Күәлік нөмірі: **KZ45VPY00102718** — ҚР Мәдениет және Ақпарат министрлігі

© 2026 **Bilimger.kz** Ақпараттық-танымдық білім порталы. Барлық мазмұн авторлық құқықпен қорғалған.