

Г.Б. Бахадирова¹, Н. Тасболатұлы*, А.А. Танирбергенова², К.С. Бакенова²

¹Астана халықаралық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қабанбай батыр даңғылы, 8

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ., Пушкин көшесі, 11

*e-mail: tasbolatuly@gmail.com

PYTHON ТІЛІНДЕ КЕРІ БАЙЛАНЫС АРҚЫЛЫ ЖОҒАРЫ РЕТТІ СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІ БАСҚАРУДЫ КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа: Мақалада үшінші ретті сызықтық емес жүйе, бір буынды робот-манипулятор қозғалысын басқару, сызықтық емес жүйенің ПИТ контроллері, анықталмаған ауыспалы сызықтық емес жүйелер үшін шығыс сигналын басқару, уақыты кешіккен жоғары ретті ауыспалы сызықтық емес жүйелерді кері байланыс арқылы глобальды басқару атты бес түрлі мысалды біріктіріп, «Кері байланыс арқылы жоғары ретті сызықтық емес жүйелерді басқаруды компьютерлік модельдеу» атты бағдарламалық кешеннің құрылуы сипатталған. Мысалдың нәтижелері компьютерлік модельдеу арқылы нәтижеге қол жеткізіліп, тиімділігін дәлелдеудің ең тиімді құралы ретінде Python 3.12.1 нұсқасындағы бағдарламалау тілі таңдалып, осы бағдарламалау тілінің кітапханалары және модульдерінің қолдану мүмкіндігі көрсетілген. Python тілі ғылыми есептеулер, деректер ғылымы және машиналық оқыту салаларында әлі күнге дейін ең қолайлы бағдарламалау тілі болып қала береді. Ол төмен деңгейлі кітапханаларды және түсінікті жоғары деңгейлі API интерфейстерін пайдалану арқылы өнімділік пен тиімділікті арттырады. Құрылған бағдарламалық кешен жоғары ретті ауыспалы сызықтық емес жүйелердің орнықтылығын қамтамасыз етіп, нақты инженерлік жүйелердің орнықтылығы мен тиімділігі, басқару сапасын арттыруға жағдай жасайды. Жасалған кешен ғылыми-зерттеу жұмыстарында, оқу үдерісінде, өндірістік автоматтандыруда және робототехникада тиімді қолданылуға бейімделген. Бағдарламалық кешеннің қолданудың тиімділігі қолданушылар мысалда берілген параметрлерді өз қажеттіліктеріне сәйкес өзгертіп, мысалдың нәтижелерін дербес талдап, зерделеуге мүмкіндігі бар.

Түйін сөздер: Python, жоғары ретті сызықтық емес жүйе, бағдарламалық кешен, NumPy, Matplotlib, Tkinter.

Кіріспе. Python қазіргі кезде ең көп таралған жоғары дәрежелі, объектіге-бағытталған бағдарламалау тілі болып саналады. Python бағдарламалау тілі жүйелік бағдарламалау, графикалық интерфейсі бар бағдарламаларды әзірлеуде, ғылыми есептеулерде, деректерді талдауда, машиналық оқытуда, әртүрлі тапсырмаларды автоматтандыру үшін және т.б. бағдарламалық өнімді әзірлеуде кеңінен қолданылады. Сонымен қатар, Python файлдармен, желілермен, веб-қызметтермен және басқалармен жұмыс жасауға арналып, пайдалануға дайын көптеген мүмкіндіктер мен модульдерді ұсынатын кең стандартты кітапхананы құрайды және үлкен көлемді функцияларды қамтиды.

Атап айтқанда, Python Control Systems (python-control) кітапханасы – сызықтық емес жүйелерді модельдеу, талдау және басқару алгоритмдерін жобалауда да қолданылады. Бұл әрі ашық кодты Python тілі негізінде әзірленіп, басқару жүйелерін зерттеуге арналған тиімді бағдарламалық орта ретінде қалыптастыруға арналған әмбебап құрал.

Кері байланыс арқылы жоғары ретті сызықтық емес жүйелерді басқаруға арналған бағдарламалық кешенді қолдану арқылы басқару теориясындағы сызықтық емес жүйеге арналған есептерді шешуді едәуір жеңілдетіп, уақытты қысқартады. Бағдарламалық кешенде келтірілген мысалдар Python бағдарламалау тілінің стандартты (Tkinter, os, sys, threading, subprocess) және қосымша кітапханалары мен модульдері көмегімен құрылып, жасалды. Бағдарламалық кешенде әрбір компонент өзінің функционалдық міндеттеріне сай қолданылды: графикалық интерфейс құру үшін – Tkinter, кескіндерді өңдеуге арналған – Pillow, визуализациялау үшін – Matplotlib, ал сандық есептеулер үшін – NumPy кітапханасы қолданылған.

Tkinter бұл Python тіліне ендірілген, Graphical User Interface (GUI) графикалық пайдаланушы интерфейсін жобалауға арналған стандартты кітапхана. Бұл кітапхананың көмегімен біз бағдарламалық кешенде терезелер, батырмалар, мәтіндік өрістер және өзге де

басқару элементтерін құра аламыз [2].

OS `os.path.isfile` функциясы арқылы файлдың бар-жоғын тексеруге және файлдық жүйемен жұмыс істеуге арналған немесе операциялық жүйеге байланысты командаларды орындауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, `os` – файлдар мен жолдардың бар-жоғын тексеруге арналған [3].

Бағдарлама ішінде бірнеше ағын құру арқылы параллель есептеулер жүргізуге мүмкіндік беретін, бұл бағдарламалық кешеннің кодында қолданылмаған, бірақ импортталған *Threading* көп ағынды бағдарламалауға арналған модуль болып табылады [4].

Python ішінен сыртқы бағдарламаларды немесе скрипттерді орындауға мүмкіндік беретін (`call` функциясы) – бұл бағдарламалық кешеннің кодында қолданылмаған, бірақ импортталған *Subprocess* жүйелік командаларды орындауға арналған модуль болып табылады [5].

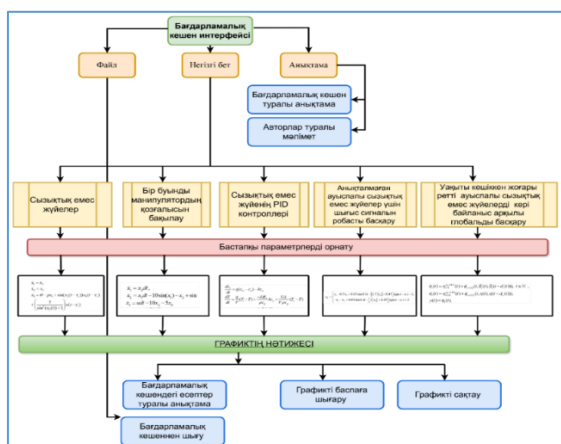
NumPy үлкен сандық есептеулерге арналған көп өлшемді массивтермен (`n-dimensional arrays`) және матрицалармен жұмыс жасауға арналған, сандық талдау, векторлық және математикалық, матрицалық операциялардың кең ауқымын қолдайтын, негізгі есептеулерді орындауға арналған кітапхана.

Matplotlib – (`matplotlib.pyplot` модулі) кітапханасы жоғары сапалы сюжеттер мен визуализацияларды жасауға арналған құралдардың үлкен мүмкіндігін ұсынады, есептеулер нәтижелерін, графиктерді сызу, құру, визуализациялауға, `tkinter` терезесінде графиктерді көрсетуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, бұл сыртқы кітапхана болып табылады, оны *pip install matplotlib* командасы арқылы орнатуға болады [6].

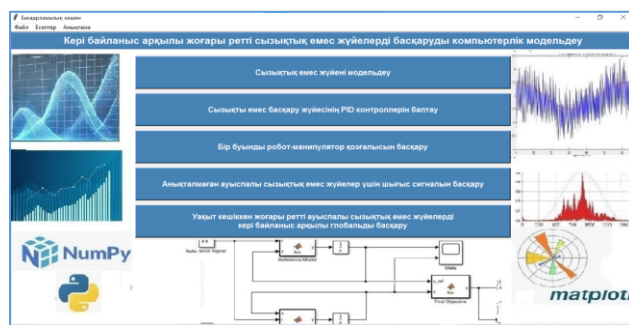
Pillow PIL (Python Imaging Library, қазіргі атауы Pillow) суреттерді ашу, көрсетуге (`Image`, `ImageTk`) өңдеуге арналған сыртқы кітапхана. `Tkinter` терезесінде суреттерді көрсетуде `ImageTk.PhotoImage` қолданылады [7]. Сызықтық емес жүйелердің ПИТ контроллеріне арналған есепте дифференциалдық теңдеулерді шешу үшін *SciPy* кітапханасының `odeint()` функциясы қолданылады. `Odeint()` функциясын пайдалана отырып, параметрлер мәндерін енгізуге мүмкіндік беретін интерфейс құрылады [8].

Зерттеу шарттары мен әдістері

Бағдарламалық кешеннің негізгі зерттеу шарттары кері байланыс арқылы жоғары ретті сызықтық емес жүйелерді басқаруды компьютерлік модельдеу болып табылады. Бағдарламалық кешеннің алғашқы беті негізгі мәзірден: Файл, Негізгі бет, Анықтама туралы ақпараттан тұрады; бағдарламалық кешенде қарастырылған есептер: сызықтық емес жүйе, бір буынды робот-манипулятор қозғалысын басқару, сызықтық емес жүйенің ПИТ контроллері, анықталмаған ауыспалы сызықтық емес жүйелер үшін шығысын басқару, уақыт кешігуі бар жоғары ретті ауыспалы сызықтық емес жүйелерді кері байланыс арқылы глобальды басқару [9] (1 сурет).



а



ә

Сурет 1 – «Кері байланыс арқылы жоғары ретті сызықтық емес жүйелерді басқару» атты бағдарламалық кешеннің жұмыс жасау алгоритмі мен негізгі терезесі

Нәтижелер мен талқылаулар.

1-мысал: Үшінші ретті сызықтық емес жүйе берілген болса:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = x_3$$

(1.1)

$$\dot{x}_3 = \theta - px_3 + \sin(x_2(t - \tau_s))x_3(t - \tau_s) + \left(\frac{5}{\sin^2(x_2(t)) + 1} \right) u(t - \tau_i)$$

$\theta=2$ және $p=5$, $u_i(t) @ -\mu u(t) - kr(t)$ – дан алынған басқару заңы және берілген жүйенің

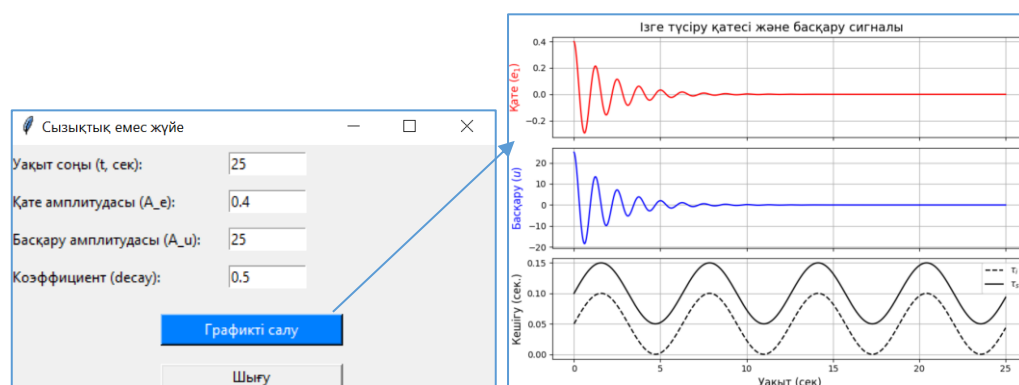
қалаған траекториясын ізге түсіру үшін іске асырылады: $x_{1d}(t) = \left\{ \left(\sin\left(\frac{t}{4}\right) + 0.3 \right) \left(1 - e^{-0.01t^3} \right) \right\}$

Үшінші ретті сызықтық емес жүйенің динамикасын модельдеу (1.1)-де берілген синусоидалық күй және кіріс кідірістерімен орындалады. Бастапқы күй мәндері ретінде [0.5 0.2 - 0.8] алынады. Кіріс және күй кешігулері келесідей анықталады:

$$\tau_i(t) = 0.05 + 0.05\sin(t) \text{ сек және } \tau_s(t) = 0.05 + 0.05\sin(t) \text{ сек}$$

Берілген жүйе үшін ізге түсіру мен басқару сигналының жауаптары төмендегі суретте келтірілген. $u_i(t) @ -\mu u(t) - kr(t)$ – да берілген басқару заңын қолдану арқылы 0.01 мәніне тең RMS қатесі (Root Mean Square) алынады.

Бағдарламалық кешеннің «Сызықтық емес жүйелер» мәзірі таңдалған жағдайда, үшінші ретті сызықтық емес жүйенің графикасы төменде келтірілген (2 сурет).



Сурет 2 – Үшінші ретті сызықтық емес жүйенің графигі

Мысал 2. Бір буынды робот-манипулятордың математикалық моделі болса, жүйенің динамикасын сипаттайтын теңдеу төменде келтірілген:

$$D\ddot{q} + B\dot{q} + N\sin(q) = \tau + \tau_d, \quad M\ddot{\tau} + H\tau = u - K_m\dot{q} \quad (2.1)$$

мұнда q – робот буынының позициясы, $\dot{q}$ – робот буынындағы жылдамдығы, $\ddot{q}$ – робот буынындағы үдеу, τ – электрлік ішкі жүйеден бұралуы, $\Delta\tau$ – бұралу уақыттағы ауытқу, u – электромеханикалық сәтті белгілеуге арналған басқару немесе кіріс шама; $D = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ – механикалық инерция; $B = 1 \text{ Nms/rad}$ – робот буынының үйкеліс коэффициенті; $N = 10$ – жүктің массасы мен гравитация коэффициентіне қатысты оң тұрақтысы; $M = 0.2 \text{ H}$ – ротор индуктивтілігі; $H = 0.2 \Omega$ – ротор кедергісі, $K_m = 10 \text{ Nm/A}$ – кері электр қозғалтқышындағы күш коэффициенті [10].

$$x_1 = q,$$

$$x_2 = \dot{q}$$

Тегіс координат түрлендіру төмендегідей болады: $x_3 = \tau$ (2.2)

$$(2.2) \text{ жүйе келесі түрге ауысады: } \dot{x}_1 = x_2 dt, \quad (2.3)$$

Бұл теңдеу бірінші күй айнымалысы x_1 -дің уақыт бойынша өзгеруін сипаттаса, мұнда x_1 күй айнымалысының жылдамдығы x_2 -ге пропорционал екені байқалады:

$$\dot{x}_2 = x_3 dt - 10 \sin(x_1) - x_2 + \sin \quad (2.4)$$

Екінші күй айнымалысы x_2 -нің уақыт бойынша өзгеруі болса, теңдеуде x_3 -ке байланысты терм x_2 -нің өзгеруі басқарылады, сонымен қатар $\sin(x_1)$ және $x_1(t-d)$ секілді сызықтық емес элементтер арқылы жүйенің күрделілігін көрсетсе, уақыт кешігуін сипаттайтын d – параметрі маңызды рөл атқарады.

$$\dot{x}_3 = u dt - 10x_2 - 5x_3 \quad (2.5)$$

Үшінші күй айнымалысы x_3 -тің уақыт бойынша өзгеруін сипаттайды. Бұл жерде басқару кіріс болып табылады және x_2 мен x_3 -ке қатысты термдер арқылы жүйенің динамикасына әсер етеді.

Сызықтық емес элементтер жүйенің күрделілігін көрсетсе, нақты жүйелердің күйін дәл компьютерде модельдеуге мүмкіндік береді, мұндағы x_1, x_2, x_3 - жүйе күйі және u -басқару немесе кіріс сигнал болып табылады [11]. Контроллер келесі түрде болады:

$$z_1 = x_1, \quad z_2 = x_2 - \alpha_2, \quad z_3 = x_3 - \alpha_3$$

мұнда $\alpha_2 = -z_1 \beta_1, \quad \alpha_3 = -z_2 \beta_2$. Робот-манипулятор үшін басқару заңының жалпы түрі төмендегідей болады. Ол жүйенің күй қателіктеріне пропорционал сигналдарды қамтып,

$$\text{траекторияны дәл ізге түсуді қамтамасыз етеді: } u = -z_3 \beta_3, \quad \beta_i = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} \Gamma |z_i|^3 \quad (2.6)$$

мұндағы, $\beta_1 = c_1 + \Phi_1(\hat{\theta}), \beta_2 = c_2 + \Phi_2(\hat{\theta}), \beta_3 = c_3 + \Phi_3(\hat{\theta}), \Gamma > 0, c_1 > 0, c_2 > 0$ мәндері конструкциялық константалар болып табылады. $i = 1, 2, 3$ үшін $0 < \varepsilon_i < 1$ және $\xi_i > 0$

тұрақтылар, $\Phi_i(\cdot) = (3\psi_i / 4)^{4/3} (1 / 3\xi_i)^{1/3}$ және $\psi_i(\cdot) = (3\psi_i / 4)^{4/3} (1 / 3\xi_i)^{1/3}$ және

$$\psi_i(\cdot) = 1 + \left(\sqrt{1 + \hat{\theta}^2 / 2} \right) + (\varepsilon_i^2 / 2) \quad \beta_i (i = 1, 2, 3) \quad \text{параметрлер, және олар } c_i \text{ және } \Phi_i(\hat{\theta})$$

қосындылары ретінде анықталса, $c_i (i = 1, 2, 3)$ - оң тұрақтылар, $\Phi_i(\hat{\theta}) (i = 1, 2, 3)$ – айнымалылар $(\hat{\theta})$ арқылы анықталады. $(\hat{\theta})$ – кейбір параметрдің бағалануы. $\Gamma > 0$ – оң мәнді тұрақты.

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – бұл жүйенің динамикасы немесе басқару параметрлерін анықтайтын айнымалылар.

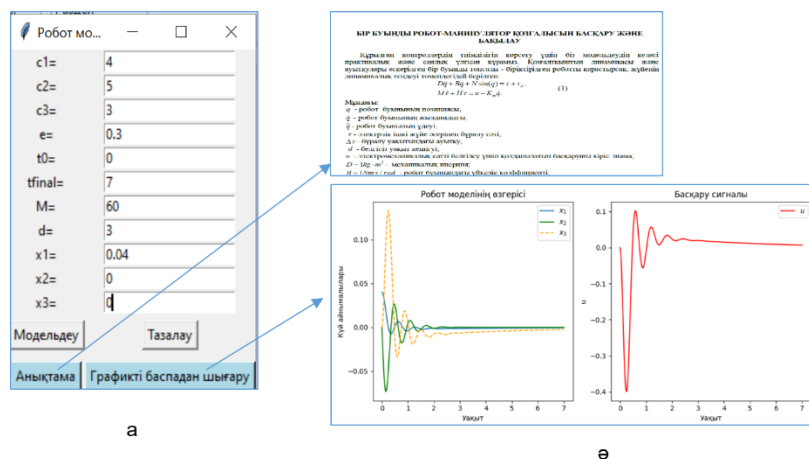
$\Phi_i(\hat{\theta})$ – функция $(\hat{\theta})$ арқылы анықталады, мұнда $(\hat{\theta})$ – кейбір жүйе параметрінің бағалауы. Бұл

бағалаулар жүйенің динамикасын немесе басқаруды түзету үшін қолданылады. c_i - оң тұрақтылар, олар мәндерін белгілі бір шектерде ұстау үшін қажет. Жүйенің динамикасын модельдеуде жоғарыда келтірілген формулалар қолданылады.

Компьютерлік модельдеудегі тұрақтылары:

$$c_1 = 4, c_2 = 5, c_3 = 3, \varepsilon_i = 0.2, \xi_i = 0.01 (i = 1, 2, 3) \quad \text{және} \quad M = 60 \quad \text{Бастапқы шарттар}$$

$x_1(0) = 0.04 \quad x_2(0) = 0 \quad x_3(0) = 0$ және $\hat{\theta}(0) = 0. \quad d = 2$ басқарудың нәтижесі, басқару график арқылы дәлелденіп, төмендегі 1.4.3-суретте келтірілген [11] (3 сурет).



Сурет 3 – Бір буынды робот-манипулятордың қозғалысын басқару есебінің анықтама және параметрлер мәндерін енгізу интерфейсі, графикі

Мысал 3. Жүйеде температура деңгейі салқындату суының ағыны мен оның температурасына тәуелді түрде бақыланып, температура мәні салқындатқыш қаптаманың ішіндегі химиялық реакция жылдамдығына тікелей әсер етеді. Реакция нәтижесінде алынатын химиялық материал маңызды өнім ретінде қарастырамыз. Осыған байланысты, салқындатқыш судың ағыны мен температурасы өндірілетін өнімнің сапасын анықтайтын негізгі факторлар болса, ПИД контроллерін қолдану арқылы аталған параметрлерді дәл реттеу өнім сапасын арттыруда тиімді болып табылады.

Салқындатқыш жүйенің сипаттамалық параметрлері төмендегі суретте берілген. ПИД контроллерін тиімді баптаудың маңыздылығын көрсету үшін жүйенің динамикалық теңдеулерін қарастырсақ, бұл жүйе салқындатқыш су мен химиялық реактор арасындағы энергия алмасу процесіне негізделген модель арқылы сипатталатынын байқауға болады (4 сурет).

$$\text{Энергия балансының теңдеуі төмендегідей: } \frac{dc_a}{dt} = q(c_{ai} - c_a) - Vkc_a \quad (3.1)$$

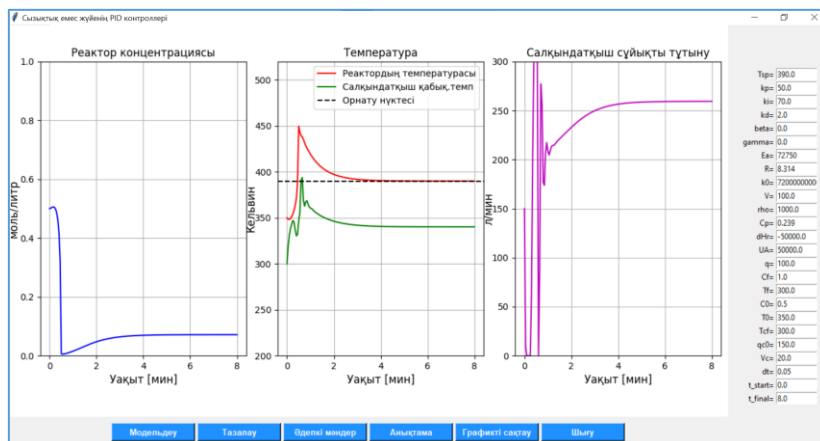
$$V\rho c_p \frac{dT}{dt} = \omega c_p (T_i - T) + (-\sigma H_r Vkc_a + UA(T_c - T)) \quad (3.2)$$

Осыдан кейін бұл жүйе басқару құрылғысын жобалау үшін нормализациялануы қажет:

$$\frac{dc_a}{dt} = q(c_{ai} - c_a) - kc_a \quad (3.3)$$

осы динамиканың нәтижесінде алынатын шығыс шамасын сипаттайтын теңдеу:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q}{V} (T_i - T) + \frac{-\delta H_r}{\rho c_p} kc_a + \frac{UA}{V\rho c_p} (T_c - T) \quad (3.4)$$



Сурет 4 – Сызықтық емес жүйенің ПИД контроллері есебінің параметрлер мәндерін енгізу интерфейсі және графиктің нәтижесі

Химиялық реакцияның жүру процесі салқындатқыш қаптама арқылы реттеледі, мұндағы басқарушы параметр – салқындатқыш сұйықтықтың температурасы, реакция өнімдерінің сипаттамалары жылу алмасу ортасының температурасы мен ағу жылдамдығына тікелей тәуелді болады. Химиялық реакцияның жүруіне салқындатқыш қаптамадағы судың температуралық режимі әсер етіп, реакция өнімдерінің параметрлері жылу алмасушы ортаның ағу жылдамдығы мен температуралық шамаларына тәуелді болады [12].

D-функциясының мәнін көбейтсек, жүйе динамикасына әсері басқа параметрлермен салыстырғанда көбірек екені салыстырылады. Бұл аталған функцияның шу процесі кезінде мәнінің тез артуымен және жүйедегі кенеттен өзгерістерге жауап берудегі маңыздылығымен түсіндіруге болады. Сонымен қатар, ол сыртқы ықпалдарды басу және басқару жүйесінің тұрақтылығын қамтамасыз ету тұрғысынан шешуші рөл атқарады.

Мысал 4. Сыртқы кедергілері бар, анықталмаған желілік басқару жүйесін төмендегідей қарастырсақ: Басқару мақсатына қол жеткізуге арналған жүйеге кері байланыс принципіне негізделген басқару заңы енгізілсе, $\sigma: [0, \infty) \rightarrow \{1, 2\}$, номиналды ішкі жүйелер келесідей өрнектеледі:

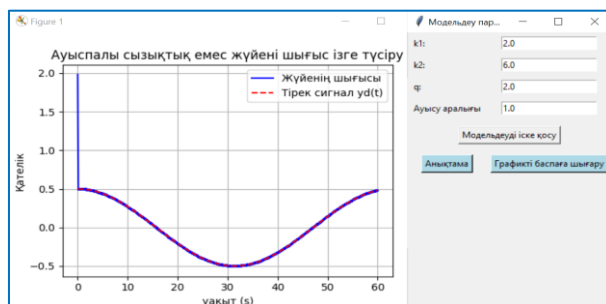
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 + \frac{1}{2} x_2^3, & \dot{x}_1 &= x_1 - x_2, \\ \dot{x}_2 &= -x_1 - 0.5x_2 + u_1, & \dot{x}_2 &= -x_1 + x_2 + u_2, \\ y &= x_2 & y &= x_2, \end{aligned}$$

$u_1 = x_1 + v_1$ және $u_2 = -x_1 + v_2$ болса, анықталмаған сыртқы кедергілер келесідей болады: $\sum_1 = \sin t/2$, $\sum_2 = \cos t/2$, $F_1 = \sin t$, $F_2 = 0.5 \cos t$, және $D=E=1$. Тірек сигналының траекториясы $y_d(t) = 0.5 \cos 0.1t$. Сыртқы кедергілері бар анықталмаған ішкі жүйелер төмендегідей өрнектеледі:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_1 + \frac{1}{2} x_2^3, & \dot{x}_1 &= x_1 - x_2, \\ \dot{x}_2 &= (-0.5 + \Delta A_1)x_2 + v_1 + F_1, & \dot{x}_2 &= (1 + \Delta A_2)x_2 + v_2 + F_2, \\ y &= x_2, & y &= x_2 \end{aligned}$$

Келесі орташа орнықтану уақытын қолдана отырып, өзгермелі құрылымды контроллер құрастырылып, шығыс сигналын ізге түсіру есебінің шешімі құрылды. $v=1$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$ болса, $P=1$, $K=-7/2$ мәндері табылды. $k_1=1$, $k_2=5$ және $\rho(t)=1$ бастапқы күйі: $[-2 \ 2]^T$, ал қателік $e = x_2 - y_d$ түрінде анықталды. X_1 айнымалысына арналып, келесі түрде болады: $W_1(x_1) = x_1^2$, $W_2(x_1) = 2x_1^2$, $\lambda_s=1$, $\lambda_u=2.5$, $\gamma_{01}(\|x_1\|) = 16x_2^6$, $\gamma_{02}(\|x_1\|) = 4x_2^2$, және $\mu=2$. $\tau_0 = \tau = 0$ және $\rho=0.15$ таңдалса, орташа күту уақыты $\tau_a \geq \tau_a^* = 1.725$ болады. Айнымалы құрылымды контроллерлер төмендегідей келтірілді (5 сурет): [13]

$$u_i = \begin{cases} x_1 - 0.5x_2 + 0.05 \sin 0.1t - [1.5\|x_2\| + 6.05] \operatorname{sgn} e - e, & i=1, \\ -x_1 - x_2 + 0.05 \sin 0.1t - [2\|x_2\| + 6.05] \operatorname{sgn} e - e, & i=2 \end{cases}$$



Сурет 5 – Ауыспалы сызықтық емес жүйені шығыс ізге түсірудің графигі және параметрлер

Мысал 5. Уақыт кешігуі бар жоғары ретті ауыспалы сызықтық емес жүйе төмендегідей берілген болсын:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \eta_2^{p_{1,\sigma(t)}} + \varphi_{1,\sigma}(t)(\bar{\eta}_1, \bar{\eta}_1(t-d_1(t))), \\ \dot{x}_2 &= u_{\sigma(t)}^{p_{2,\sigma(t)}} + \varphi_{2,\sigma}(t)(\eta, \eta(t-d_2(t))), \\ y &= \eta_1, \end{aligned} \quad (5.1)$$

мұнда $\sigma(t): [0, \infty) \rightarrow M = \{1, 2\}$, $p_{1,1} = 1$, $p_{1,2} = \frac{7}{5}$,

$$p_{2,1} = 4, p_{2,2} = \frac{7}{5}, d_1(t) = \frac{\cos(t)+3}{5}, d_2(t) = \frac{\sin(t)+1}{2},$$

$$\varphi_{1,1}(\cdot) = \frac{3}{5} \eta_1^{\frac{2}{3}} \sin(\eta_1) + (\eta_1(t-d_1(t)))^{\frac{2}{3}}, \varphi_{1,2}(\cdot) = \frac{1}{2} \eta_1^{\frac{14}{15}} + \frac{2}{9} (\eta_1(t-d_1(t)))^{\frac{14}{15}},$$

$$\varphi_{2,1}(\cdot) = \eta_1^{\frac{1}{3}} \sin(\eta_2) + \eta_2^{\frac{1}{2}} \sin(\eta_1) + \frac{2}{11} (\eta_1(t-d_1(t)))^{\frac{1}{3}} - (\eta_2(t-d_2(t)))^{\frac{1}{2}},$$

$$\varphi_{2,2}(\cdot) = -\eta_1^{\frac{3}{5}} \sin(\eta_2) + \eta_2^{\frac{9}{2}} \sin(\eta_1) + (\eta_1(t-d_1(t)))^{\frac{3}{5}} - \frac{5}{9} (\eta_2(t-d_2(t)))^{\frac{9}{10}}.$$

$$\tau_1 = -\frac{1}{3}, \tau_2 = -\frac{1}{15}, r_1 = 1, q_{1,1} = q_{1,2} = 0, \text{ мұнда } r_2 = \frac{2}{3}, r_3 = \frac{1}{9}, q_{2,1} = 1, q_{2,2} = \frac{5}{7} \text{ таңдалса,}$$

$$q_{3,1} = \frac{2}{3}, q_{3,2} = \frac{20}{21} \text{ және } |\varphi_{1,1}(\cdot)| \leq \frac{3}{5} |\eta_1|^{\frac{2}{3}} + |\eta_1(t-d_1(t))|^{\frac{2}{3}}, |\varphi_{1,2}(\cdot)| \leq \frac{1}{2} |\eta_1|^{\frac{14}{15}} + \frac{2}{9} |\eta_1(t-d_1(t))|^{\frac{14}{15}},$$

$$|\varphi_{2,1}(\cdot)| \leq |\eta_1|^{\frac{1}{3}} + |\eta_2|^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{11} |\eta_1(t-d_1(t))|^{\frac{1}{3}} + |\eta_2(t-d_2(t))|^{\frac{1}{2}}, |\varphi_{2,2}(\cdot)| \leq |\eta_1|^{\frac{3}{5}} + |\eta_2|^{\frac{9}{10}} + |\eta_1(t-d_1(t))|^{\frac{3}{5}} + \frac{5}{9} |\eta_2(t-d_2(t))|^{\frac{9}{10}},$$

Координаттарды түрлендірсек, жүйе келесі түрде болады:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \eta_2^{p_{1,\sigma(t)}} + \varphi_{1,\sigma}(t)(\bar{\eta}_1, \bar{\eta}_1(t-d_1(t))), \\ \dot{x}_2 &= u_{\sigma(t)}^{p_{2,\sigma(t)}} + \varphi_{2,\sigma}(t)(\eta, \eta(t-d_2(t))), \\ y &= \eta_1, \end{aligned}$$

$$\dot{x}_1 = \bar{L}_{1,\sigma(t)} x_2^{p_{1,\sigma(t)}} + \frac{\phi_{1,\sigma(t)}(\cdot)}{\varpi_1},$$

$$\dot{x}_2 = \bar{L}_{2,\sigma(t)} v_{\sigma(t)}^{p_{2,\sigma(t)}} + \frac{\phi_{2,\sigma(t)}(\cdot)}{\varpi_2}, \quad (5.2)$$

$$y = x_1,$$

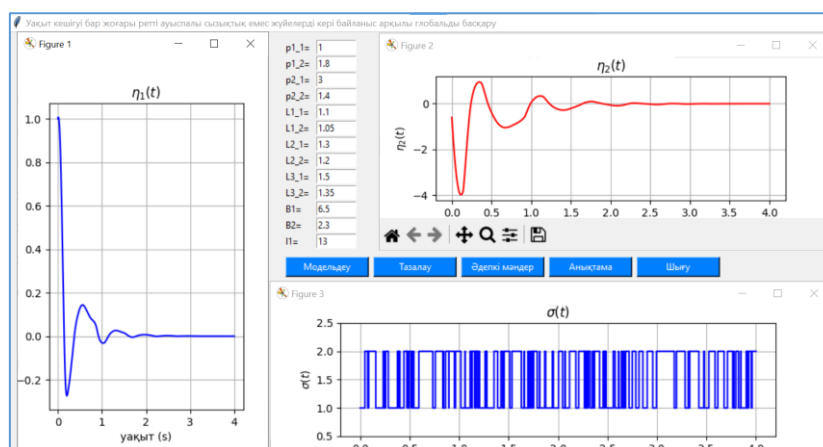
мұнда $\varpi_i = L_{i,\sigma(t)}^{q_i, \sigma(t)}$, $\bar{L}_{i,\sigma(t)} = L_{i+1,\sigma(t)}^{q_i, \sigma(t)+1} / L_{i,\sigma(t)}^{q_i, \sigma(t)}$ $i=1, 2$.

$$\begin{aligned} \xi_2 &= \bar{L}_{1,\sigma(t)} l_1 \hat{x}_2^{p_{1,\sigma(t)}}, \hat{x}_2 = (\xi_2 + l_1 x_1)^{\frac{r_2}{r_1}} \\ u_{\sigma(t)} &= -L_{3,\sigma(t)}^{q_{3,\sigma(t)}} \beta_2 \left(\hat{x}_2^{\frac{1}{r_2}} + \beta_1^{\frac{1}{r_2}} x_1 \right)^{r_3} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Компьютерде модельдеп, жауабын алу үшін жобалау параметрлері келесідей: $\beta_1 = 2.7$, $\beta_2 = 1.8$, $l_1 = 14$, $L_{1,1} = 1.2$, $L_{1,2} = 1.07$, $L_{2,1} = 1.3$, $L_{2,2} = 1.2$, $L_{3,1} = 1.6$, $L_{3,2} = 1.36$. Модельдеу

нәтижелері төмендегідей бастапқы мәндермен көрсетіледі: $\eta_1(0) = 1$, $\eta_2(0) = -0.6$, $\xi_2(0) = 0$.

$\eta_1(t), \eta_2(t)$ жүйе күйлерінің және ξ_2 бақылаушы күйінің уақыт бойынша қалай өзгеретін жауаптары график түрінде төмендегі суреттерде келтірілген, осыдан біз мысалдың дұрыстығын байқауымызға болады [14] (6 сурет).



Сурет 6 – 4 мысалдың параметрлерінің мәндерін енгізу, графиктің нәтижесін шығару терезесі

Қорытынды. Python тілін қолдана отырып, «Кері байланыс арқылы жоғары ретті сызықтық емес жүйелерді басқару» тақырыбына жүргізілген компьютерлік модельдеу жоғары ретті ауыспалы сызықтық емес жүйелердің динамикасын зерттеуге мүмкіндік береді. Бұл бағдарламалық кешенде мысалдарды компьютерлік модельдеуде NumPy, Matplotlib кітапханалары қолданылады, олар деректерді өңдеуді, графикалық бейнелеуді және жүйенің түрлі параметрлерін салыстыруды қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, графикалық модельдер арқылы (мысалы, PID-контроллерді баптау, робот-манипулятордың қозғалысын басқару) нақты инженерлік есептердің сандық шешімдері алынады. Дегенмен, бұл құралдарға сұраныс жоғары, себебі сызықтық емес жүйенің шешімін табу, сондай-ақ бұл шешімдерді іздеудің ерекшеліктерін білу – мұндай жағдайлар жиі кездесетін көптеген ғылыми және практикалық есептерді шешуде ғана емес, сонымен қатар сызықтық емес есептерін шешудің алгоритмдері мен орнықтылық әдістерін және компьютерлік моделін білім беру жүйесінде қолдану барысында да аса маңызды болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Control of nonlinear system by means of feedback using the Python-control library / B.G. Bekulykyzy et al // Proceedings of the IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). – Astana, 2024. – P. 164-168.
2. Hunt J. Advanced guide to Python 3 programming. – Berlin / J. Hunt; Springer, 2019. – P. 35-42.
3. Язык программирования Python / Россум Г., и др. пер. с англ. – М.; СПб., 2001. – 454 с.
4. Matloff N. Tutorial on Threads Programming with Python / N. Matloff, F. Hsu; Davis: University of California, 2009. – 25 p.
5. Ortega J.M. Python for Security and Networking / J.M. Ortega // Leverage Python modules and tools in securing your network and applications. – Packt Publishing, 2023.
6. Васильев Ю. Python для Data Science / Ю. Васильев; – СПб.: Питер, 2023. – 272 с.
7. Sundnes J. Solving ordinary differential equations in Python / J. Sundnes; – Oslo, 2024. – 124 с.
8. Борзунов С.В., Кургалин С.Д. Языки программирования. Python: решение сложных задач / С.В. Борзунов, С.Д. Кургалин. – СПб., 2023. – 192 с.
9. Бахадирова Г.Б., Тасболатұлы Н., Кері байланыс арқылы жоғары ретті сызықтық емес жүйелерді басқару : ЭЕМ-ге арналған бағдарлама / Куәлік № 54131; тіркелген 03.02.2025 ж. ҚР Әділет министрлігі Ұлттық зияткерлік меншік институты. – 10 б.
10. Spong M.W. Robot modeling and control / M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar; New York: Wiley, 2006. – 478 p.
11. Bakhadirova G.B. Control of the movement of a single-link robot manipulator in Python / G.B. Bakhadirova, N. Tasbolatuly // Abstracts of the International Scientific Conference of Young Scientists «Informatics. Mathematics. Automation (IMA: 2024)». – Sumy; Astana, 2024. – P. 317-319
12. Kim D.H. Advanced Lecture for PID Controller of Non-linear systems in Python / D.H. Kim // International Journal of Recent Engineering and Technology. – 2021. – T. 9, № 6. – P. 20-29.

13. Бахадирова Г.Б. Анықталмаған ауыспалы сызықтық емес жүйелер класы үшін шығыс сигналын басқарудың компьютерлік моделі / Г.Б. Бахадирова, Н. Тасболатұлы // Қазақстан Республикасы Ұлттық инженерлік академиясының Хабаршысы. – 2025. – № 1(95). – Б. 49-58.
14. Jiang Y. Global output feedback control for a class of high-order switched nonlinear systems with time-varying delays / Y. Jiang, J. Zhai // International Journal of Systems Science. – 2020. – T. 51, № 6. – P. 1053-1065.

References

1. Control of nonlinear system by means of feedback using the Python-control library / B.G. Bekualykyzy et al // Proceedings of the IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). – Astana, 2024. – P. 164-168. (In English).
2. Hunt J. Advanced guide to Python 3 programming. – Berlin / J. Hunt; Springer, 2019. – P. 35-42. (In English).
3. Yazyk programirovaniya Python / Rossum G., i dr. per. s angl. – M.; SPb., 2001. – 454 s. (In Russian).
4. Matloff N. Tutorial on Threads Programming with Python / N. Matloff, F. Hsu; Davis: University of California, 2009. – 25 p. (In English).
5. Ortega J.M. Python for Security and Networking / J.M. Ortega // Leverage Python modules and tools in securing your network and applications. – Packt Publishing, 2023. (In English).
6. Vasil'ev YU. Python dlya Data Science / YU. Vasil'ev; – SPb.: Piter, 2023. – 272 s. (In Russian).
7. Sundnes J. Solving ordinary differential equations in Python / J. Sundnes; – Oslo, 2024. – 124 s. (In English).
8. Borzunov S.V., Kurgalin S.D. Yazyki programirovaniya. Python: reshenie slozhnykh zadach / S.V. Borzunov, S.D. Kurgalin. – SPb., 2023. – 192 s. (In Russian).
9. Bakhadirova G.B., Tasbolatuly N., Keri bailansy arkyly zhorary retti syzyktyk emes zhyielerdi basqaru : EHEM-ge arnalğan bardarlama / Kuәlik № 54131; tirkelgen 03.02.2025 zh. ҚР Әділет министрлігі Ұлттық зияткерлік меншік институты. – 10 б. (In Kazakh).
10. Spong M.W. Robot modeling and control / M.W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar; New York: Wiley, 2006. – 478 p. (In English).
11. Bakhadirova G.B. Control of the movement of a single-link robot manipulator in Python / G.B. Bakhadirova, N. Tasbolatuly // Abstracts of the International Scientific Conference of Young Scientists «Informatics. Mathematics. Automation (IMA: 2024)». – Sumy; Astana, 2024. – P. 317-319. (In English).
12. Kim D.H. Advanced Lecture for PID Controller of Non-linear systems in Python / D.H. Kim // International Journal of Recent Engineering and Technology. – 2021. – T. 9, № 6. – P. 20-29. (In English).
13. Bakhadirova G.B. Anyқталмаған ауыспалы сызықтық емес жүйелер класы үшін шығыс сигналын басқарудың комп'ютерлік моделі / Г.Б. Бахадирова, Н. Тасболатұлы // Қазақстан Республикасы Ұлттық инженерлік академиясының Хабаршысы. – 2025. – № 1(95). – Б. 49-58. (In Kazakh).
14. Jiang Y. Global output feedback control for a class of high-order switched nonlinear systems with time-varying delays / Y. Jiang, J. Zhai // International Journal of Systems Science. – 2020. – T. 51, № 6. – P. 1053-1065. (In English).

Г.Б. Бахадирова¹, Н. Тасболатұлы^{1*}, А.А. Танирбергенова², К.С. Бакенова²

¹Международный университет Астана,

Республика Казахстан, г. Астана, проспект Кабанбай батыра 8

²Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,

Республика Казахстан, г. Астана, улица Пушкина 11;

*e-mail: tasbolatuly@gmail.com

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ НА ЯЗЫКЕ PYTHON

В статье описывается создание программного комплекса «Компьютерное моделирование управления высокоординатными нелинейными системами посредством обратной связи», в состав которого объединены пять различных примеров: управление нелинейной системой третьего порядка, управление движением однозвенного робота-манипулятора, ПИД-контроллер нелинейной системы, управление выходным сигналом неопределённых переключающихся нелинейных систем, а также глобальное управление высокого порядка переключающимися нелинейными системами с

запаздыванием по времени посредством обратной связи. Результаты примеров получены на основе компьютерного моделирования, при этом в качестве наиболее эффективного инструмента была выбрана версия языка программирования Python 3.12.1. В работе продемонстрированы возможности применения библиотек и модулей данного языка. Python продолжает оставаться одним из наиболее удобных языков программирования в области научных вычислений, науки о данных и машинного обучения. Он сочетает в себе высокую производительность и эффективность за счёт использования как низкоуровневых библиотек, так и понятных высокоуровневых API-интерфейсов. Разработанный программный комплекс обеспечивает устойчивость высокого порядка переключающихся нелинейных систем, что создаёт условия для повышения устойчивости, эффективности и качества управления реальными инженерными системами. Комплекс адаптирован для эффективного применения в научно-исследовательской деятельности, учебном процессе, производственной автоматизации и робототехнике. Эффективность его использования заключается в возможности изменения пользователем параметров, представленных в примерах, в соответствии с собственными потребностями, а также в самостоятельном анализе и изучении полученных результатов.

Ключевые слова: Python, нелинейная система высшего порядка, программный комплекс, NumPy, Matplotlib, Tkinter.

G.B. Bakhadirova¹, H. Tasbolatuly^{1*}, A.A. Tanirbergenova², K.S. Bakenova²

¹Astana International University,
Republic of Kazakhstan, Astana, 8Kabanbai Batyr Avenue

²L.N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana, Pushkin street 11

*e-mail: tasbolatuly@gmail.com

COMPUTER SIMULATION OF HIGH-ORDER NONLINEAR SYSTEMS CONTROL VIA FEEDBACK IN PYTHON

The article describes the development of a software package entitled «Computer Simulation of High-Order Nonlinear Systems Control via Feedback», which integrates five illustrative examples: a third-order nonlinear system, motion control of a single-link robotic manipulator, a PID controller for a nonlinear system, output regulation of uncertain time-varying nonlinear systems, and global feedback control of high-order time-delayed time-varying nonlinear systems. The results of the examples are obtained through computer simulation, with Python version 3.12.1 chosen as the primary programming language due to its proven effectiveness as a tool for demonstrating and validating system performance. The paper highlights the applicability of Python libraries and modules, emphasizing that Python remains one of the most suitable programming languages for scientific computing, data science, and machine learning. It enhances efficiency and performance by combining low-level libraries with clear high-level APIs. The developed software package ensures the stability of high-order time-varying nonlinear systems, thereby contributing to the stability, efficiency, and control quality of real engineering systems. It is designed for effective use in scientific research, educational processes, industrial automation, and robotics. The adaptability of the package allows users to modify example parameters according to their requirements, independently analyze the outcomes, and explore the results in detail.

Key words: Python, high-order nonlinear system, software package, NumPy, Matplotlib, Tkinter.

Information about the authors

Gulnaz Bekualykyzy Bakhadirova – PhD student. Astana International University, Kazakhstan; e-mail: gulnaz.bakhadirova.84@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9464-9809>.

Nurbolat Tasbolatuly* – associate professor, Astana International University, Kazakhstan; e-mail: tasbolatuly@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0511-7000>.

Alua Amirkhanovna Tanirbergenova – PhD. L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: Alua_15_1982@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8555-7315>.

Kamila Serikovna Bakenova – PhD student. L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: bakenova.k@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2567-173X>.

Сведения об авторах

Гулназ Бекуалыкызы Бахадирова – PhD студент. Международный университет Астана, Казахстан; e-mail: gulnaz.bakhadirova.84@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9464-9809>.

Нұрболат Тасболатұлы* – ассоциированный профессор, Международный университет Астана, Казахстан; e-mail: tasbolatuly@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0511-7000>

Алуа Амирхановна Танирбергенова – PhD. Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: Alua_15_1982@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8555-7315>.

Камила Сериковна Бакенова – PhD студент. Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: bakenova.k@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2567-173X>.

Авторлар туралы мәліметтер

Гулназ Бекуалықызы Бахадирова – PhD студент, Астана халықаралық университеті, Қазақстан; e-mail: gulnaz.bahadirova.84@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9464-9809>.

Нұрболат Тасболатұлы* – ассоциированный профессор, Астана халықаралық университеті, Қазақстан; e-mail: tasbolatuly@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0511-7000>.

Алуа Амирхановна Танирбергенова – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: Alua_15_1982@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8555-7315>.

Камила Сериковна Бакенова – PhD студент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; e-mail: bakenova.k@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2567-173X>.

Редакцияға енуі 07.08.2025

Өңдеуден кейін түсуі 02.09.2025

Жариялауға қабылданды 03.09.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-18](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-18)



МРНТИ: 27.47.19

Б. Асанова¹, Б. Оразбаев^{2*}, Ж. Молдашева¹, Ж. Шангитова¹, А. Кушубаева³

¹Атырауский университет имени Х. Досмухамедова,
E01Y6P0, Республика Казахстан, г. Атырау, пр. Студенческий, 212

²Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Z01A3D7, Республика Казахстан, г. Астана, ул. К. Сатпаева, 2

³Торайгыров Университет,
S14P3K7, Республика Казахстан, г. Павлодар, улица Ломова, 64

*e-mail: batyr_or@mail.ru

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА НЕФТЯНОГО КОКСА

Аннотация. В данном исследовании создана система поддержки принятия решений с элементами интеллектуализации для управления процессом производства нефтяного кокса основанная на разработанные модели основных агрегатов установки замедленного коксования (УЗК) с учетом нечеткой информации от экспертов. Дано описание основных интерфейсов созданной интеллектуализированной системы поддержки принятия решений (ИСППР) с помощью которых пользователь системы моделирует различные режимы работы основных агрегатов УЗК, оптимизирует их параметров и эффективно управляет процессом производства кокса. Пользователь с помощью созданной ИСППР по разным критериям может управлять процессом производства кокса в зависимости от спроса на объем и требований к качеству кокса. Используя ИСППР пользователь системы может максимизировать объемы производимого кокса с требуемыми качественными показателями или обеспечить требуемый объем кокса с наилучшими качественными показателями. В отличие от других систем, основанные на известные детерминированные модели УЗК, созданная ИСППР позволяет более адекватно моделировать, эффективно оптимизировать и управлять режимами работы УЗК. На основе сравнение результатов моделирования для оптимизации режимов работы УЗК с использованием созданной ИСППР, известных систем детерминированного моделирования и оптимизации установлены преимущества созданной системы по сравнению известными аналогичными системами.

Ключевые слова: нечеткая среда, нечеткие модели, система поддержки принятия решений, процесс коксования, интерфейс пользователя.