МРНТИ 50.47.29; 52.47.15 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.31-1492**

МҰНАЙ ӨҢДЕУ ЗАУЫТЫНДА ӨНДІРІС ПРОЦЕСІН БАСҚАРУДЫ АВТОМАТТАНДЫРУ

Ж.К. Абдугулова, Н.Н. Сейт✉, Д.С. Жамангарин, А.А. Танирбергенова

Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

✉ *Корреспондент-автор: nurgulnurmash@gmail.com*

Бұл мақалада шикі мұнайды алғашқы өңдеу сатылары, оның ішінде механикалық және физика-химиялық бөлу үдерістері егжей-тегжейлі талданады. Үшфазалы вертикалды сепаратор-бұл процестің негізгі түйіндерінің бірі таңдалады. Бұл құрылғы мұнай құрамынан суды және ілеспе газдарды ажыратуға бағытталған және нәтижесінде өңдеудің келесі сатылары үшін мұнайдың сапасы мен тұрақтылығы қамтамасыз ететініне көз жеткіземіз. Мұнай зауытындағы үшфазалы мұнайды тазалау процесі зерттеледі, оның ішінде вертикалды сепараторлардың құрылымдық және функционалдық ерекшеліктері сипатталады.Үшфазалы сепаратордың математикалық моделін құрастырылады және MATLAB/Simulink платформасында автоматтандырылған басқару жүйесі модельденеді.

Басқару жүйесінің өтпелі процестерін талдау және классикалық ПИД-регулятордың әлсіз жақтары анықталады. Интеллектуалды басқару әдісін енгізу арқылы, PSO алгоритмі арқылы оңтайландырылған ПИД-регулятор синтезделеді. Әртүрлі басқару нұсқаларын салыстыру арқылы тиімді басқару стратегиясын таңдау және жүйенің жауап беру сапасын жақсарту қарастырылады.

Түйін сөздер: мұнай, ПИД-регулятор, үшфазалы вертикалды сепаратор, интеллектуалды басқару, өтпелі процестер, Smart-технологиялар, ройлық интеллект,модельдер.

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ЗАВОДЕ

Ж.К. Абдугулова, Н.Н. Сейт✉, Д.С. Жамангарин, А.А. Танирбергенова

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,
e-mail: nurgulnurmash@gmail.com

В данной статье подробно анализируются этапы первичной переработки сырой нефти, включая механические и физико-химические процессы разделения. В качестве одного из ключевых узлов данного процесса выбран трехфазный вертикальный сепаратор. Данное устройство предназначено для отделения воды и попутных газов из состава нефти, что в результате обеспечивает качество и стабильность нефти для последующих стадий переработки. Исследуется процесс трехфазной очистки нефти на нефтеперерабатывающем заводе, включая описание конструктивных и функциональных особенностей вертикальных сепараторов. Разрабатывается математическая модель трехфазного сепаратора и моделируется автоматизированная система управления на платформе MATLAB/Simulink.

Проводится анализ переходных процессов системы управления и выявляются недостатки классического ПИД-регулятора. Путем внедрения интеллектуального метода управления синтезируется ПИД-регулятор, оптимизированный с использованием алгоритма PSO. На основе сравнения различных вариантов управления выбирается эффективная стратегия управления и рассматриваются способы повышения качества отклика системы.

Ключевые слова: нефть, ПИД-регулятор, трехфазный вертикальный сепаратор, интеллектуальное управление, переходные процессы, Smart-технологии, роевой интеллект, модели.

AUTOMATION OF PRODUCTION PROCESS CONTROL AT AN OIL REFINERY

Zh.K. Abdugulova, N.N. Seit✉, D.S. Zhamangarin, A.A. Tanirbergenova

L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
e-mail: nurgulnurmash@gmail.com

This article provides a detailed analysis of the primary stages of crude oil processing, including mechanical and physico-chemical separation processes. A three-phase vertical separator is selected as one of the key units of this process. This device is designed to separate water and associated gases from crude oil, thereby ensuring the quality and stability of oil for subsequent processing stages. The three-phase oil treatment process at an oil refinery is investigated, including the structural and functional features of vertical separators. A mathematical model of the three-phase separator is developed, and an automated control system is modeled using the MATLAB/Simulink platform.

The transient responses of the control system are analyzed, and the weaknesses of the classical PID controller are identified. By implementing an intelligent control approach, a PID controller optimized using the PSO algorithm is synthesized. By comparing different control strategies, an effective control approach is selected, and improvements in system response quality are discussed.

Keywords: oil, PID controller, three-phase vertical separator, intelligent control, transient processes, smart technologies, swarm intelligence, models.

Кіріспе. Мұнайды тиімді өңдеу және одан алынатын өнімнің сапасын арттыру – тек химиялық-технологиялық жағынан ғана емес, сонымен қатар заманауи автоматтандыру жүйелерін енгізумен тікелей байланысты [1]. Бұл интеллектуалды алгоритмдер мен Smart-технологияларға негізделген әдістер, соның ішінде бөлшектер ройы (PSO-Particle Swarm Optimization) секілді оңтайландыру алгоритмдері кеңінен қолданыла бастады [2]. Мұнай өңдеу процестерінде айтарлықтай күрделі объектілердің бірі-үш фазалы сепараторлар болып табылады [3]. Олар мұнайды газдан және судан тиімді түрде бөлуге арналған және олардың жұмысын тұрақты ұстап тұру үшін басқару жүйелерінің сапасы өте жоғары болуы тиіс. Үшфазалы сепаратордың ішіндегі температура, қысым, деңгей және шығын секілді параметрлер нақты уақыт режимінде өлшеніп, соған сәйкес басқару әрекеті орындалуы қажет. Қазіргі таңда өндіріс орындарында қолданылып жүрген ПИД-регуляторлардың дәстүрлі баптау әдістері динамикасы күрделі жүйелерде жеткіліксіз нәтиже беріп отыр [4,5]. Осыған байланысты интеллектуалды әдістерге негізделген ПИД-регуляторларды оңтайландыру қажеттігі туындайды.

Мұнай өңдеу зауытында үшфазалы сепаратор жұмысын модельдеу негізінде интеллектуалды ПИД-регуляторды оңтайландыру және енгізу арқылы автоматтандыру жүйесінің тиімділігін арттыру. Автоматтандырылған басқару жүйесіндегі интеллектуалды ПИД-регулятордың математикалық моделін құрастыру және оны бағалау әдістемесі көзделеді. Мақалада келесі міндеттерді қарастырылады:

- үшфазалы сепаратордың математикалық моделін құрастыру және MATLAB/Simulink ортасында басқару жүйесін модельдеу;

- басқару жүйесінің өтпелі процестерін талдау және классикалық ПИД-регулятордың әлсіз жақтарын анықтау;

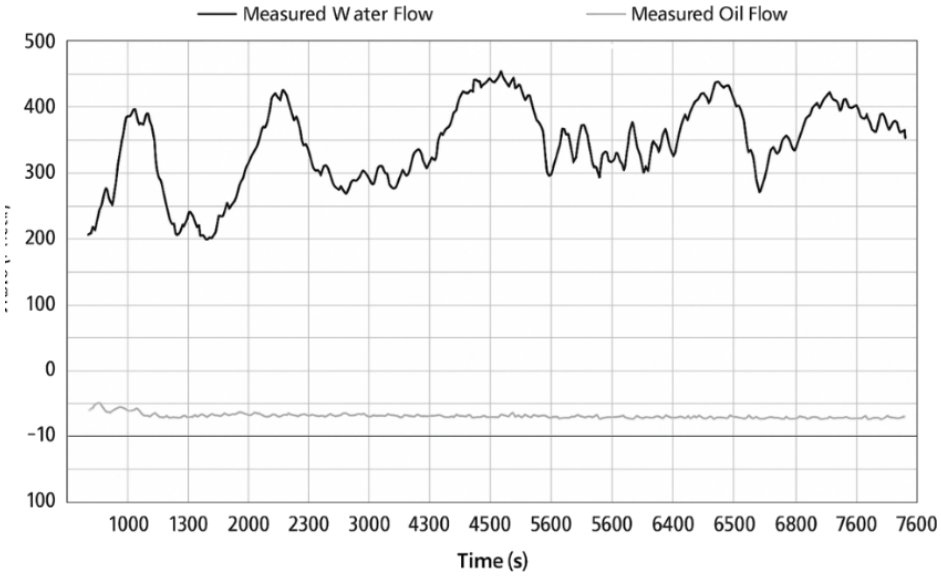
- интеллектуалды басқару әдісін енгізу: бөлшектер ройы алгоритмі (PSO) арқылы ПИД-регулятор параметрлерін оңтайландыру;

- модельдеу нәтижелерін салыстыру арқылы жүйе тұрақтылығын, дәлдігін және тиімділігін арттыру жолдарын қарастыру .

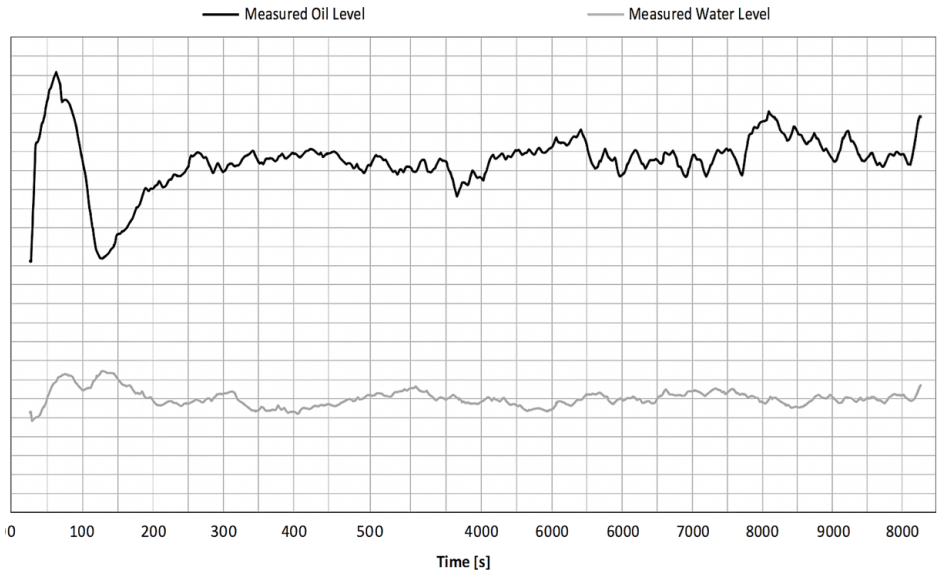
Мұнай кешенінде қолданылатын үшфазалы сепаратордағы су деңгейін басқару жүйесін егжей-тегжейлі талдай отырып, осы процестің негізінде нақты басқару контуры құрылғанын байқауға болады. Бұл көрсеткіш жүйенің кіріс су көлемін бағалау үшін және болашақта жаңа басқару алгоритмдерін тексеру және симуляциялық модельдеу кезінде маңызды ақпарат көзі бола алады. Ағынды өлшеу нәтижелері басқару жүйесінің тиімділігін арттыруға, сондай-ақ сепараторға түсетін су көлемі мен одан шығарыла-

тын судың мөлшерін салыстыру арқылы балансты талдауға мүмкіндік береді [6,7].

Материалдардар мен әдістер. Мұнай айдау станциясының сенімді және үздіксіз жұмысын қамтамасыз ететін маңызды инженерлік кешендердің бірі-майлау және ағып кету жүйелері, сондай-ақ қысымдық толқындардан қорғау тетіктері [8]. Бұл жүйелер орталықтан тепкіш насос қондырғыларының ұзақ мерзімді және қауіпсіз эксплуатациясына бағытталған. Гидродинамикалық модельдеу және басқару алгоритмдерін оңтайландыру үшін, мұнай кен орнында орнатылған үшфазалы сепараторда жүргізілген сынақтар нәтижесінде алынған кейбір пайдалану деректері 1-суретте келтірілген. Бұл диаграммада мұнай мен судың ағу жылдамдығы уақыт бойынша көрсетілген. Анализ нәтижесінде, әсіресе су ағынының жылдамдығында айқын тербелістер байқалады, бұл процестің тұрақтылығы мен жүйенің сезімталдығына әсер етеді [9].



1-сурет. Мұнай және судың ағу жылдамдығының уақыт бойынша өзгеруі



2-сурет. Су және мұнай деңгейлерінің уақыт бойынша өзгерісі

Осы график негізінде су деңгейінің тербелісі ағу жылдамдығындағы өзгеріске қарағанда әлдеқайда төмен пайызда өзгеретіні анық көрінеді. Бұл жағдай әсіресе алғашқы 1000 секундтан кейін айқын байқалады. Су деңгейі салыстырмалы түрде тұрақты болса да, оның ағу жылдамдығы айтарлықтай ауытқып тұрған. Мұндай өзгерістерге айдау қысымының тұрақсыздығы, кіріс фазалардың мөлшерлік қатынасының күрт өзгеруі, басқару клапандарының дұрыс жұмыс істемеуі, автоматтандырылған деңгей реттегіштің дәлсіздігі себеп болады. Бұл анализ сепаратор жұмысының нақты уақыттық мониторингі және бақылау алгоритмдерін оңтайландыру қажеттілігін көрсетеді.

Бұл график сепаратор ішіндегі нақты қабаттық сұйықтық деңгейін өлшейтін LIT деңгей датчиктерінің тіркелген көрсеткіштерін көрсетеді (сурет 2). Уақыт аралығындағы салыстырмалы деңгейлер сепаратордағы қабаттасқан фазалардың динамикасын, яғни су/мұнай шекарасының нақты өзгерісін сипаттайды. Деректер бойынша, су деңгейіндегі тербелістер 0,5-1% шегінде ауытқып отырған, бұл оның өте сезімтал басқару жүйесі арқылы реттеліп отырғанын көрсетеді [10]. Мұнай кен орнында қолданылатын үшфазалы сепаратордың ішіндегі су көлемібұл сепаратор геометриясына тікелей байланысты айнымалы шама. Атап айтқанда, су көлемі h(t)-сепаратор ішіндегі су деңгейінің функциясы ретінде келесі өрнекпен сипатталады. Мұнайдағы су көлемінің толық геометриялық формуласы:

$$V(h) = (r^2 \cos^{-1}\left(\frac{r-h}{r}\right) - (r-h)\sqrt{2rh-h^2})L \quad (1)$$

мұндағы:

$V(h)$–су көлемі, h – су деңгейі, r – сепаратордың көлденең қимасының радиусы, L – сепаратор ішіндегі су қабатының ұзындығы. Сепаратор қалыпты жұмыс режимінде жұмыс істеп тұрған кезде, су деңгейі төменгі дабыл деңгейі (LAL) мен жоғарғы дабыл деңгейі (LAH) аралығында болады. Осы себепті, жоғарыдағы күрделі теңдеуді желілік аппроксимация арқылы жеңілдетуге болады: Желілік аппроксимацияланған формула:

$$V(h) = A * h(t), \quad A = \pi r^2 \quad (2)$$

яғни, сепаратордағы су көлемі мен деңгейінің арасындағы байланыс сызықты деп есептеледі.

Су көлемінің уақыт бойынша өзгерісі массаның сақталу заңына негізделеді. Дифференциалдық теңдеу: f

$$\frac{dV(t)}{dt} = A * \frac{dh(t)}{dt} = Q_i(t) - Q_{out}(t) \quad (3)$$

мұндағы:

$Q_i(t)$ - кіріс су ағынының жылдамдығы,

$Q_{out}(t)$ - шығыс су ағынының жылдамдығы.

Осы теңдеу сепаратор ішіндегі су деңгейінің өзгерісі ағын жылдамдықтарының айырмасына тікелей байланысты екенін көрсетеді. Клапан арқылы шығыс ағынын модельдеу. Шығыс су ағымы LCV-340018 клапаны арқылы реттеледі [11]. Бұл процесті ағын динамикасы тұрғысынан келесі түрде сипаттауға болады. Клапан арқылы ағынның формуласы:

$$Q_{out}(t) = c_v * f(u) * \sqrt{\frac{\Delta P_{out}(t)}{\rho_w}} \quad (4)$$

Бұл арнайы LCV-340018 клапаны сызықты сипаттамаға ие, сондықтан:

$$f(u) = u * U_{\max} \quad (5)$$

мұндағы $U_{\max}$ – клапанның максималды ашылу ауданы.

Қысым айырмашылығын есептеу. Шығарылатын клапанның екі жағындағы қысым айырмашылығы келесі түрде бағаланады. Қысым айырмашылығы формуласы:

$$\Delta P_{out}(t) = P_g(t) + \rho_0 g h_0(t) + \rho_w g h(t) - P_w(t) \quad (6)$$

мұндағы:

$P_g(t)$ – сепаратор ішіндегі газ қысымы, ρ_0, ρ_w-мұнай мен судың тығыздығы, $h_0(t)$, $h(t)$-мұнай

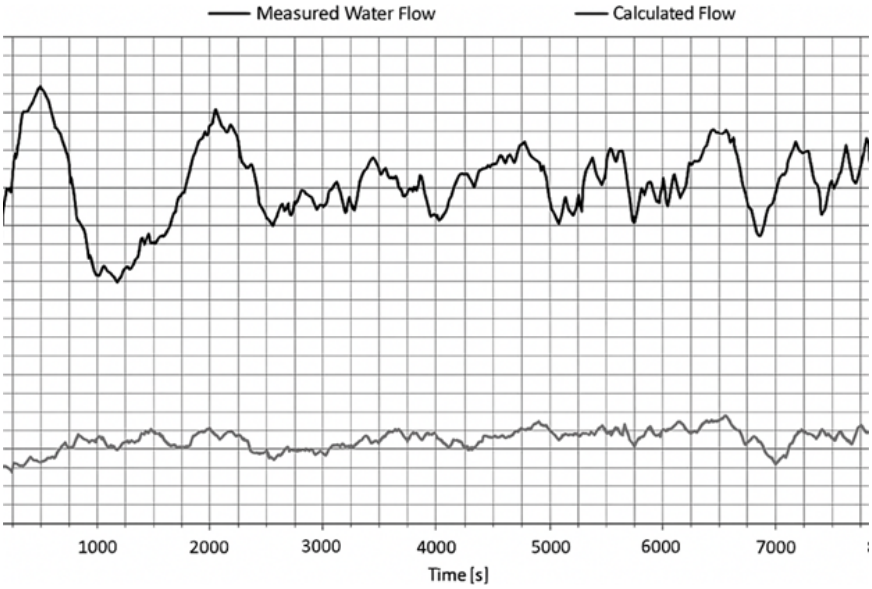
және су деңгейі, $P_w(t)$-клапаннан кейінгі қысым (төменгі ағын).

Клапанның C_v коэффициентін анықтау үшін эксперименттік өлшеу деректері пайдаланылады [11]. Бұл өлшеулерге: су және мұнай деңгейлері, сепаратор ішіндегі газ қысымы, клапанның ашылу пайызы, судың нақты ағыны кіреді.

Коэффициентті табу үшін наименьших квадраттар әдісі (least squares) қолданылады [12]. Міндет-есептелген Q_{out} пен нақты өлшенген ағын арасындағы ауытқуды азайту:

$$\min \sum_i Q_{out}(i) - C_v * u(i) * U_{\max} \sqrt{\frac{\Delta P_{out}(i)}{\rho_w}} \quad (7)$$

Құрылған модель 3-суретте тексерілді. Жалпы, болжау қатесі 10%-дан аспайды, бұл оның өндірістік қолданысқа жарамды екенін дәлелдейді. Сонымен қатар, сепаратордың қалыпты жұмыс режимінде мынадай қарапайымдылық енгізіледі: $P_g(t)$, $P_w(t)$, $h_0(t)$ мәндері тұрақты немесе баяу өзгеретін деп есептеледі. Төмендегі сурет 16-да модель валидациясы көрсетілген



3-сурет. Модель валидациясы

Мұндай жағдайда теңдеулер сызықтандырылып, жүйе жай дифференциалдық және алгебралық теңдеулер жүйесіне айналады. Бұл PI немесе PID-регуляторларды жобалау кезінде оңай есептелетін модель түрі болып табылады [12]. Сепаратордағы су деңгейін басқару және ағымның динамикасын бағалау үшін ұсынылған математикалық модель: нақты геометриялық құрылымға, масса балансына, клапан динамикасына және қысым айырмашылығына негізделеді. Келесі қадам ретінде бұл модель негізінде Simulink , MATLAB ортасында толық имитациялық модель құру ұсынылады. Мұнай кен орнындағы үшфазалы сепаратордың математикалық үлгісі нақты жағдайларда тиімді түрде сипатталуы үшін оның сызықтандырылған нұсқасы қарастырылады. Бұл процессте газ қысымы, клапанның төменгі жағындағы су қысымы және мұнай деңгейі тұрақты шама ретінде немесе олардың орташа мәндерден ауытқуы еленбейтіндей аз деп қабылданады. Осындай қабылдаулар негізінде бастапқы күрделі, бейсызық модель қалыпты жұмыс режимінде келесі түрде жеңілдетіледі [12-15].

Линеаризацияланған дифференциалдық теңдеу:

$$47,56 * \frac{d\Delta h(t)}{dt} = Q(t) - 1.812 * d\Delta h(t) - 10.8 d\Delta u(t) \quad (8)$$

Мұндағы: $\Delta h(t)$−су деңгейінің теңгерімді күйден ауытқуы, $\Delta u(t)$−клапанның ашылу пайызы-

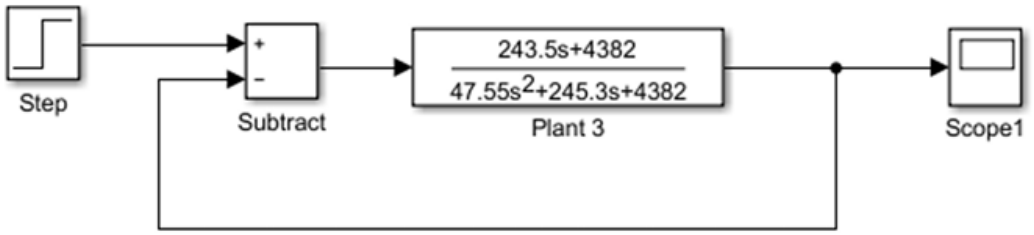
ның теңгерімді мәнінен ауытқуы, $Q(t)$–жүйеге түсетін судың белгісіз бұзушы әрекеті.

Бұл теңдеу су деңгейінің өзгерісі басқару сигналы мен ағын жылдамдығының өзгерісіне қалай тәуелді екенін көрсетеді. Жүйенің беріліс функциясы. Линеаризацияланған модель негізінде жүйенің беріліс функциясы $G(s)$ яғни Лаплас түрлендірмесімен сипатталған, келесі түрде болады:

$$G(s) = \frac{244.5s - 4382.1}{47.56s^2 + 245s + 4382.1} \qquad (9)$$

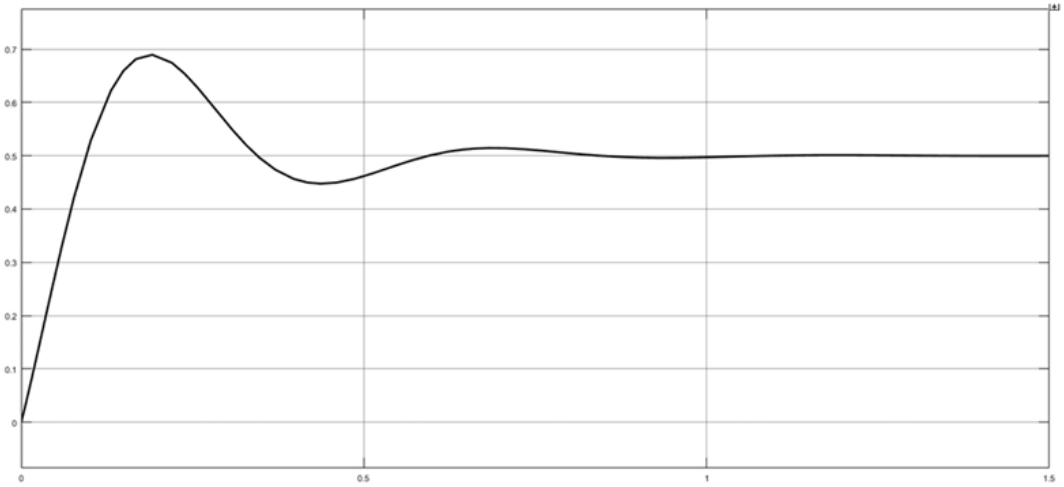
Бұл екінші ретті динамикалық жүйе болып табылады, мұнда: Сан алымында: жүйенің ескерілмейтін немесе ішкі бұзушы факторларға реакциясы сипатталған, жүйенің инерциялық қасиеттері, уақыттық жауап беру қабілеті, тұрақтылығы бейнеленеді.

Модельдің практикалық тексерісін жүргізу мақсатында, жоғарыда келтірілген беріліс функциясы MATLAB Simulink бағдарламалық ортасында құрылымдық блок-схема түрінде жүзеге асырылды. Төмендегі сурет 4-ші модельдің структуралық схемасы көрсетілген



4-сурет. Модельдің структуралық схемасы

Модельдің структуралық схемасы келесі негізгі блоктардан тұрады: Transfer Function (G(s))-жүйенің математикалық сипаттамасын орындайды; Step Input-бастапқы бірлік функциясы; Scope-жүйенің уақыт бойынша реакциясын визуализациялайды. Жабық контурлы автоматты басқару жүйесінің Simulink моделінің құрылымдық схемасы көрсетілген. Бұл схема линеаризацияланған сепаратор моделіне негізделіп жасалған және жүйенің динамикалық сипаттамаларын зерттеуге бағытталған. Соңғы маңызды элемент -кері байланыс контуры. ”Scope1”-ден шыққан сигнал қайтадан ”Subtract” блогына түседі, бұл жүйенің жабық контурлы (feedback control) екенін білдіреді.5- суретте Модельдеу нәтижелері ұсынылған.



5-сурет. Модельдеу нәтижелері

Бұл графикте жүйенің уақыт бойынша реакциясы (step response) көрсетілген. Қорытынды төмендегідей: Жүйе тұрақты-яғни, уақыт өте келе тепе-теңдік күйге ұмтылады;

қалаған мәнге толығымен жетпейді, бұл статикалық қателіктің болуын көрсетеді; Сонымен қатар, бастапқыда басқару сигналы мәнінен асып кету-байқалады. Жүйенің динамикасын жақсарту және тұрақты күйге жылдамырақ жету, қателер мен перерегулирование көлемін азайту үшін типтік PID немесе PI регуляторын синтездеу қажет. Бұл реттегіштер: жауап беру уақытын, қателік көлемін, тұрақтылық маржасын оптималды түрде реттеуге мүмкіндік береді.

Келесі кезеңде PID-регуляторды жобалау және оны Simulink моделіне қосып, динамикалық сипаттамаларды жақсарту ұсынылады. Жүйенің тұрақтылық қасиеттерін, жиілікке қатысты реакциясын және басқару сапасын бағалау үшін ашық жүйенің амплитудно-фазалық сипаттамасын (АФЧХ) құру қажет. Бұл процедура жүйенің беріліс функциясына негізделеді және кешенді жиілік айнымалысы енгізіледі.

1-қадам: Ашық жүйенің беріліс функциясы. Зерттелетін жүйенің ашық контурдағы (разомкнутый контур) беріліс функциясы келесідей болады:

$$T(s) = \frac{243.51s + 4382.2}{47.56s^2 + 490.61s + 8764.5} \tag{10}$$

2-қадам: Оператор s-ті жиіліктік айнымалыға ауыстыру (s = jω) АФЧХ құру үшін Лаплас операторы s орнына комплекстік жиілік айнымалысы jω қойылады:

$$T(jw) - \frac{243.51jw + 4382.2}{j^2 * 47.56w^2 + j * 490.61w + 8764.5} \tag{11}$$

Бірнеше түрлендіруден кейін мынандай көрініс алады:

$$T(jw) = \frac{-11579jw^3 - 88903.1w^2 - 157753wj + 38403849}{76807697 - 592768.045w^2 + 2261.0026w^4} \tag{12}$$

3-қадам: Действительная және мнимая бөлікке бөлу. Комплекстік бөлшекті нақты (Re) және жорамал (Im) бөліктерге бөлінеді:

$$T(jw) = Re(w) + j * Im(w) \tag{13}$$

Мұндағы:

- Нақты бөлік:

$$Re(w) = \frac{-88903.1w^2 + 38403849}{76807697 - 592768.05w^2 + 2261.026w^4} \tag{14}$$

Жорамал бөлік:

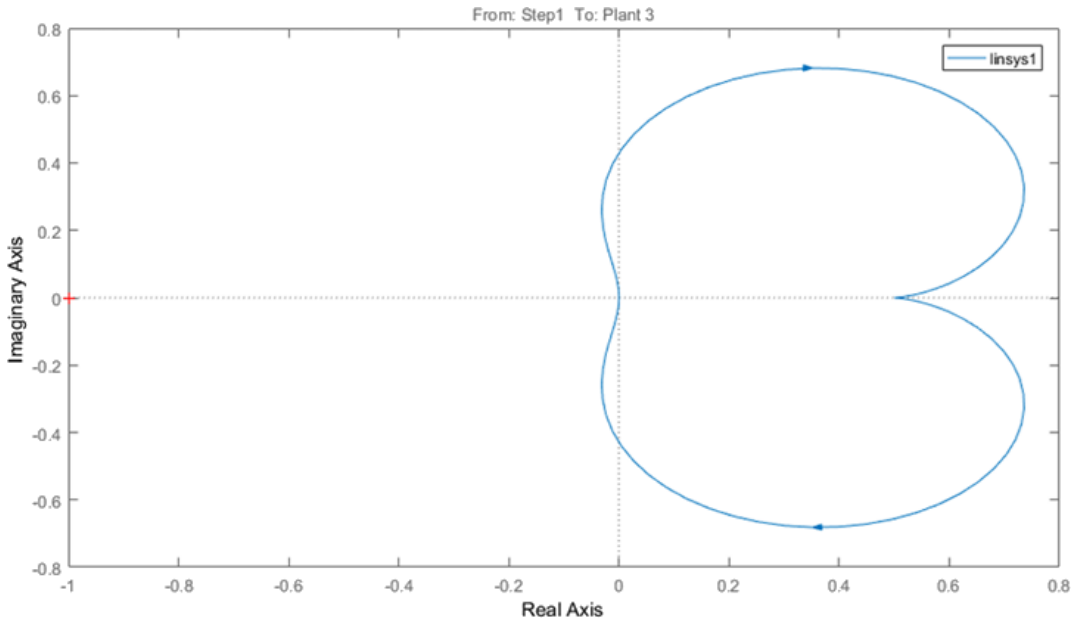
$$Im(w) = -\frac{11578.426w^3 + 157753w}{76807969.4 - 592768.05w^2 + 2261.0026w^4} \tag{15}$$

4-қадам: Әртүрлі жиіліктер үшін есептеу. АФЧХ тұрғызу үшін түрлі жиілік мәндеріне сәйкес нақты және жорамал бөліктер есептеледі. Ол нәтижелер төмендегі кесте 1-те келтірілген

5-қадам: АФЧХ тұрғызу. Осы кестелік мәліметтер негізінде жүйенің амплитудно-фазалық сипаттамасы тұрғызылады. Бұл график жиіліктің өзгеруіне байланысты жүйе шығысының қалай өзгеретінін көрсетеді. Төмендегі сурет 6-да АФЧХ графигі көрсетілген

1-кесте. Нақты бөлік және жорамал мәндердің w бойынша мәндері

ω (рад/с)	Re(ω)	Im(ω)
0	15	0
5	0.5	0.321
10	0.57	∞
15	0.735	-0.0239
∞	0	-0.296



6-сурет. АФЧХ графигі

Жорамал ось бойынша $Im(w)$, нақты ось бойынша $Re(w)$ мәндері белгіленеді. Нәтижесінде комплекстік жазықтықтағы қисық алынады-бұл Николс немесе Найквист диаграммасы ретінде танымал. Ол жүйенің тұрақтылығын, резонанстық қасиеттерін және басқаруға бейімділігін бағалау үшін қолданылады. Берілген әдіс-жүйені жиіліктік аймақта анализдеу тәсілдерінің бірі. АФЧХ негізінде жүйе: тұрақты ма, әлде тұрақсыз ба, жиілік бойынша күшеюі немесе бәсеңдеуі, фазалық жылжуы қанша екенін білуге мүмкіндік береді. Келесі кезеңде регулятордың әсерін енгізу арқылы жабық жүйенің АФЧХ-сы тұрғызылады.

Амплитудалық-жиілік сипаттамасы (АЖС) және фаза-жиілік сипаттамасы (ФЖС) жүйенің жиіліктік динамикасын зерттеу үшін қолданылады. Бұл сипаттамалар жүйенің жиіліктік сигналдарға қалай жауап беретінін, күшейту/бәсеңдету дәрежесін және фазалық ығысуын көрсетеді. АЖС келесі формула арқылы анықталады:

$$A(w) = \sqrt{Re^2(w) + Im^2(w)} \qquad (16)$$

Мұнда $Re(w)$ және $Im(w)$ – жиілік w үшін берілген жүйенің нақты және жорамал бөліктері. Бұл формула бойынша әр w мәніне сәйкес амплитудалық реакция есептеліп, 2-кестеге енгізіледі.

Бұл кесте 1-дегі мәндерге сүйене отырып, амплитудалық-жиілік сипаттамасының графигі тұрғызылады. График горизонталь осьте-w

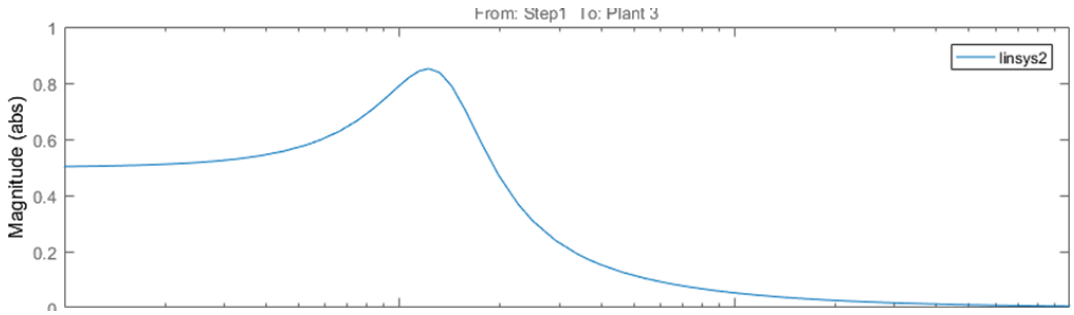
(жоғарыға логарифмдік масштабта), вертикаль осьте-A(ω) мәндері бейнеленеді. Сурет 7-де амплитудалық-жиілік сипаттамасының графигі көрсетілген.

2-кесте. Ашық жүйенің АЖС мәндері

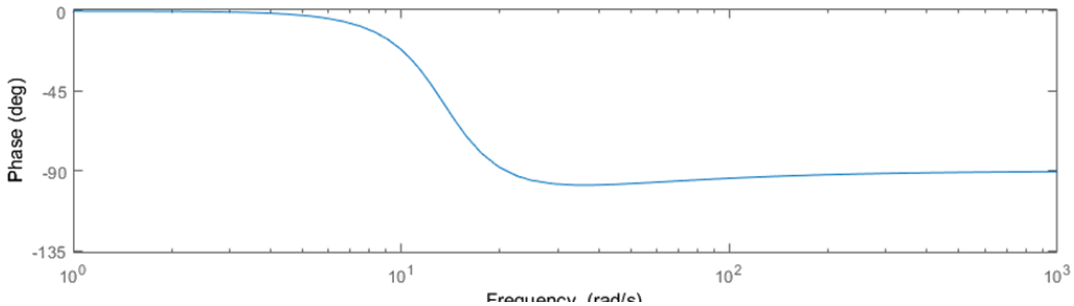
ω (рад/с)	A(ω)
0	∞
10	∞
100	0.794
∞	0.05
–	0

3-кесте. Ашық жүйенің фазалық сипаттамасы

ω (рад/с)	$\sigma(\omega)$,°
0	0
1	-0.0447
10	-24.1
100	-94.2
1000	-90
∞	-90



7-сурет. Амплитудалық-жиілік сипаттамасының графигі



8-сурет. Фазалық-жиілік сипаттамасының графигі

Фаза-жиілік сипаттаманы (ФЖС) есептеу:

$$\varphi(\omega) = arctan(\frac{Im(\omega)}{Re(\omega)}) \qquad (17)$$

Бұл формула фазалық ығысу бұрышын көрсетеді, яғни жүйе кіріс және шығыс сигналдарының арасындағы уақытша ығысу (φ) жиілікке байланысты қалай өзгеретінін анықтайды (кесте 3).

Жоғарыда келтірілген деректер негізінде фаза-жиілік сипаттамасының графигі тұрғызылады. Бұл графикте фазаның ω жиілігіне байланысты градус түрінде өзгерісі көрсетіледі. Бұл сипаттама жүйенің уақытша жауап беру жылдамдығын

және резонанстық қасиеттерін бағалауға мүмкіндік береді. Жүйе жоғары жиіліктерде (ω → ∞) әлсіз жауап береді (A → 0.05), бұл оның фильтрлік қасиетке ие екенін көрсетеді. Сонымен қатар, фаза -90°-қа жуықтайды, бұл-классикалық инерциялық сипатқа сай. Төмендегі сурет 8-де фазалық-жиілік сипаттамасының графигі көрсетілген.

Жиіліктік сипаттамаларды логарифмдік түрде көрсету жүйе динамикасын Боде диаграммасы арқылы талдауға мүмкіндік береді. Бұл әдіс инженерлік практикада басқару жүйелерін жобалау кезінде жиі қолданылады.

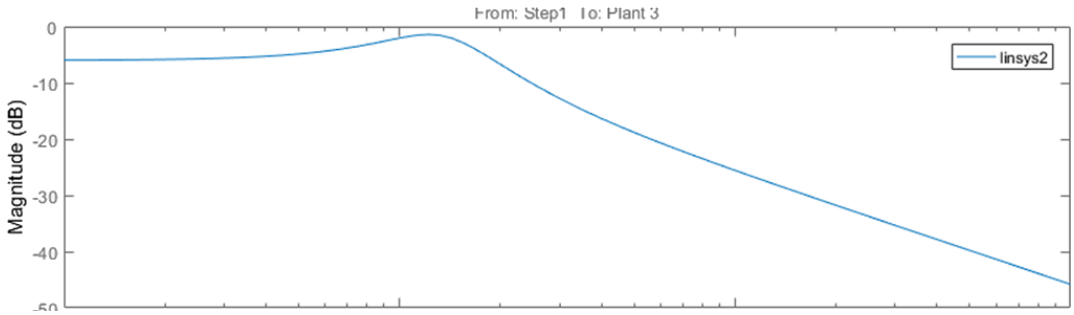
1. Логарифмдік амплитудалық-жиілік сипаттаманы (ЛАЖС) есептеу. АЖС мәндерін логарифмдік масштабқа ауыстыру үшін келесі формула қолданылады:

$$L(\omega) = 20 \cdot \log_{10} A(\omega) \qquad (18)$$

Мұндағы: $L(\omega)$ – жиілік ω үшін логарифмдік амплитудалық жауап, децибелмен (dB) өлшенеді,

$A(\omega)$ – ω жиілігіне сәйкес алынған амплитуда мәні.

Төмендегі сурет 9-да ашық жүйе ЛАЧХ мен мәндері кесте 4-де көрсетілген .



9-сурет. Ашық жүйе ЛАЧХ

4-кесте.Ашық жүйенің ЛАЖС мәндері

ω (рад/с)	L(ω), дБ
0	0
1	-5.97
10	-2.01
100	-25.6
1000	-45

Жүйенің тұрақтылығын Ляпуновтың бірінші әдісімен зерттеу. Жабық жүйенің беріліс функциясы төмендегідей түрде беріледі:

$$G(s) = \frac{244.5s - 4382.1}{47.56s^2 + 245s + 4382.1} \qquad (19)$$

$$47.56s^2 + 245s + 4382.1 = 0 \qquad (20)$$

$$s_1 = -2.5822 + 9.2516j \quad s_2 = -2.582 - 9.2516j \qquad (21)$$

Ляпуновтың бірінші теоремасына сәйкес тұйық жүйенің орнықтылығы, автоматтандырылған басқару жүйелерінің тұрақтылығын бағалау кезінде жиі қолданылатын әдістердің бірі болып табылады. Бұл теоремаға сәйкес, егер

жүйенің сипаттамалық теңдеуінің барлық түбірлерінің нақты бөліктері теріс болса, онда жүйе асимптоталық түрде орнықты болып есептеледі. Жүйенің күйі тұрақты мәнге жақындайды, бұл автоматтандырылған басқару жүйесі үшін қажетті талаптардың бірі болып саналады. Жүйе динамикасын сипаттайтын дифференциалдық теңдеулер негізінде сипаттамалық теңдеу алынады, ал оның түбірлері арқылы орнықтылық талданады. Жүйенің алгебралық модельдері мен беріліс функциясы. Жүйенің динамикалық сипаттамаларын зерттеу үшін оның беріліс функциясы пайдаланылады. Бұл функция Лаплас түрлендіруін қолдану арқылы алынады және жүйенің кіріс пен шығыс сигналдарының қатынасын сипаттайды.

$$T(s) = \frac{244.5s + 4382.1}{47.56s^2 + 490.7s + 8765} \qquad (22)$$

Ляпуновтың бірінші теоремасына сәйкес, басқару жүйесінің орнықтылығын анықтау үшін сипаттамалық теңдеудің түбірлерін талдау жеткілікті. Егер сипаттамалық теңдеудің барлық түбірлерінің нақты бөліктері теріс мәнге ие болса, онда жүйе асимптоталық түрде орнықты деп танылады. Мұнай өңдеу зауытындағы ашық басқару жүйесі де орнықты болып есептеледі, себебі оның сипаттамалық теңдеуінің түбірлері теріс нақты бөліктерге ие.

Гурвиц тұрақтылық критерийі бойынша талдау. Жүйенің орнықтылығын тексерудің тағы бір тиімді әдісі-Гурвиц критерийі. Бұл әдіс сипаттамалық теңдеудің коэффициенттері арқылы жүйенің орнықтылығын бағалауға мүмкіндік береді. Гурвиц критерийіне сәйкес, жүйенің барлық нөлден өзгеше сипаттамалық коэффициенттері белгілі бір детерминанттар жүйесі арқылы тексеріледі.

$$a_0 = 47.56 \quad a_1 = 490.7 \quad a_2 = 8765$$

Гурвиц тұрақтылық критерийі бойынша:

$$\begin{vmatrix} 490.7 & 0 \\ 47.56 & 8764 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1 = 490.6 \Delta_2 = 4298743$$

Гурвиц орнықтылық критерийіне сәйкес, жүйе орнықты деп танылады, егер оның сипаттамалық теңдеуінің Гурвиц матрицасына сәйкес есептелетін барлық бас диагональдық минорларының анықтауыштары нөлден үлкен болса. Бұл – жүйенің параметрлік тұрақтылығы мен динамикалық сенімділігін математикалық түрде дәлелдейтін нақты әдіс. Осыған сүйене отырып, ашық басқару жүйесі орнықты болып саналады, себебі оның барлық Гурвиц минорлары оң мәнге ие.

$$a_0 = 47.56, \qquad a_1 = 243.6, \qquad a_2 = 4383,$$

$$\begin{vmatrix} 243.6 & 0 \\ 47.56 & 4383 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_1 = 243.6, \qquad \Delta_2 = 1067018.$$

Гурвиц орнықтылық критерийі бойынша, тұйық жүйе орнықты болып есептеледі, егер оның сипаттамалық теңдеуінен алынған барлық бас диагональдық минорлардың анықтауыштары нөлден үлкен болса. Мұнай өңдеу зауытында технологиялық процестерді тұрақты режимде ұстап тұру-өнім сапасын арттыру мен қауіпсіздікті қамтамасыз етудің негізі. Тұйық жүйені күшейту коэффициентінің шекті мәні бойынша зерттеу. Басқару жүйесінің тұрақтылығы тек параметрлік деңгейде ғана емес, сонымен бірге күшейту коэффициентінің (K) белгілі бір шекте сақталуы арқылы қамтамасыз етілуі мүмкін. Бұл жағдайды зерттеу үшін тұйықталған жүйенің орнықтылығын күшейтудің шекті критерийі бойынша талдау қолданылады. Жүйе орнықтылығын қамтамасыз ететін күшейту коэффициентінің (K) мәндерінің диапазоны анықталады. Егер бұл мән белгіленген шектен асып кетсе, онда жүйе орнықсыз болып кетуі мүмкін.

$$\begin{aligned} T(s) &= \frac{243.6s + 4383}{47.56s^2 + 490.6s + 8765}, \\ T(s) &= \frac{235.6s + 4383}{(s + 10.38)(47.56s + 665.1)}, \\ T(s) &= \frac{81.4(0.181s + 1)}{(s + 10.38)(47.56s + 665.1)}, \\ T(s) &= \frac{k(0.18s + 1)}{(s + 10.38)(47.56s + 665.1)}. \end{aligned} \qquad (23)$$

Алдыңғы қарастырылған ашық контурдағы жүйенің беріліс функциясы негізінде, тұйық

жүйенің беріліс функциясы күшейту коэффициентінің шекті мәні k жағдайында келесі түрде өрнектеледі. Ашық жүйе үшін беріліс функциясы төмендегідей берілсін:

$$(s + 10.371)(47.56s + 665.1) + k(0.18s + 1) = 0$$

$$47.56s^2 + (712.32 + 0.18k)s + 689.31 + k = 0$$

$$\begin{vmatrix} 712.32 + 0.18k & 0 \\ 47.56 & 698.31 + k \end{vmatrix}$$

$$\Delta = 0.18k^2 + 208.32k + 30.1.1 > 0$$

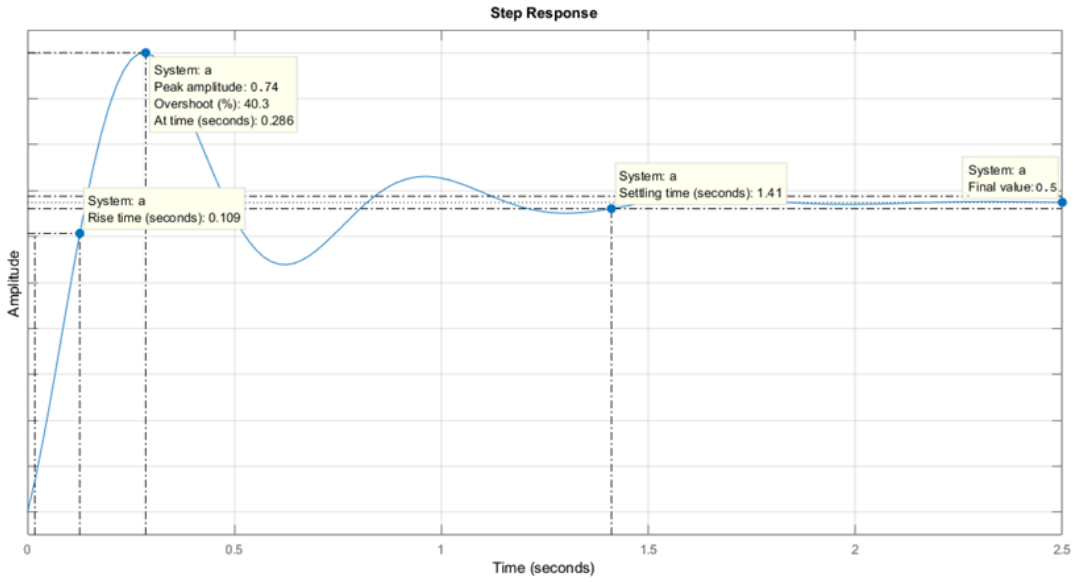
$$k_1 > 0$$

$$k_2 \epsilon (-32.81; 23.31)$$

$$k \epsilon (0; 28.32)$$

Жоғарыда жүргізілген талдау нәтижесінде, тұйықталған басқару жүйесінің орнықтылығын қамтамасыз ететін күшейту коэффициентінің мәндер аймағы анықталды. Яғни жүйе тұрақты күйде жұмыс істеуі үшін, күшейту коэффициенті ККК алдын ала есептелген шектерден аспауы немесе тым аз болмауы тиіс. Зерттеу барысында жүйенің екі шекті күшейту коэффициенті табылды: $k_{np1} = 0$, $k_{np2} = 28.32$.

Нәтижелер және талқылау. Өндіріс күрделеніп, автоматтандыру тереңдеген сайын, мұндай параметрлердің рөлі артып келеді. Өтпелі процесті дұрыс бағалап, жүйені оңтайлы күйде ұстау-кәсіби жауапкершіліктің маңызды бөлігі болып табылады. Төмендегі сурет 10-да жабық жүйенің өтпелі сипаттамасының графиктік көрінісі көрсетілген.

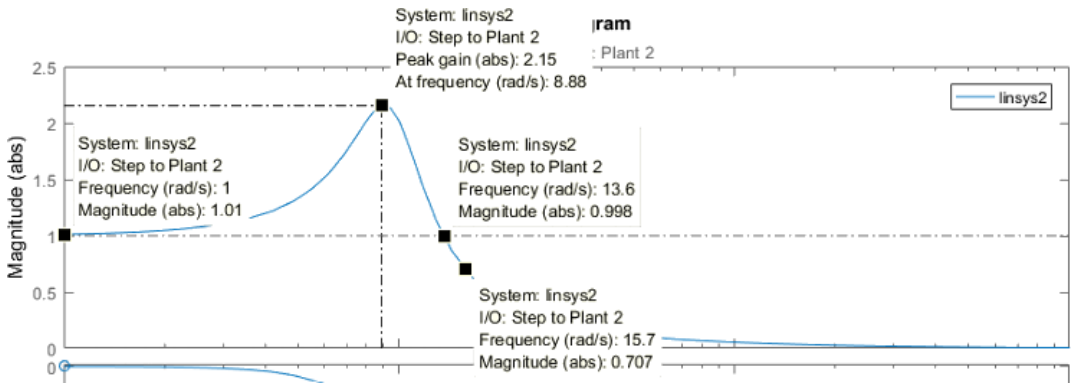


10-сурет. Жабық жүйенің өтпелі сипаттамасының графиктік көрінісі

Автоматтандырылған басқару жүйесінің тиімділігі-оның сыртқы әсерге беретін жауабымен тікелей байланысты. Өтпелі процесс-дәл осы жауаптың динамикалық бейнесі. Жоғарыда берілген график-тұйық жүйенің бірқадамдық (step input) кіріс әсеріне берген жауабын көрсетеді және жүйенің негізгі сипаттамалық көрсеткіштерін анықтауға мүмкіндік береді. Графиктен байқағанымыздай, жүйенің шың амплитудасы (Peak amplitude)-0.74, ал жоғарғы артық өсуі (Overshoot) 40.3% құрайды. Бұл-жүйенің алғашқы әсерге реакциясы тым белсенді екенін көрсетеді. Мұндай шамадан тыс өсу өндірістік процестерде қауіпті жағдайларға алып келуі мүмкін, әсіресе мұнай өңдеу сияқты жылу мен қысымға тәуелді процестерде. Жүйенің көтерілу уақыты (Rise time)-0.109 секунд. Бұл көрсеткіш жүйенің қаншалықты жылдам әрекет ететінін сипаттайды [16]. Жылдам көтерілгенімен, оның артық тербеліс тудыруы жүйенің демпфирлеу

дәрежесінің жеткіліксіз екенін білдіреді. Орнығу уақыты (Settling time)-1.41 секундқа тең, бұл жүйенің шамамен осы уақыт ішінде тұрақты мәнге жететінін көрсетеді. Графиктің соңында жүйе 0.5 тұрақты мәніне орнығады. Бұл - жүйенің финалдық күйі, яғни ұзақ уақыт бойы өзгермейтін көрсеткіші. Өндірістік жағдайда бұл мән-технологиялық параметрдің тұрақты күйде бақыланатын шамасы болады. Осы графикке қарап, жүйенің басқару сапасы бойынша мынандай қорытынды шығаруға болады: жүйе жылдам әрекет етеді, бірақ бастапқы кезеңде артық тербеліс байқалады. Нақты өндірістік ортада мұндай жүйе үшін демпфирлеу коэффициентін арттыру немесе күшейту коэффициентін оңтайландыру қажет болады.

MATLAB ортасында бұл талдау LTI Viewer (Linear Time-Invariant Viewer) құралын пайдалану арқылы жүзеге асырылады. Бұл параметрлер тікелей уақыт функциясымен емес, жүйенің жиіліктік реакциясымен байланысты. Сондықтан олар өтпелі процестің жасырын мәселелерін анықтауға көмектеседі [17]. Мысалы, тікелей бағалау барысында байқалмаған тербелістер немесе орнығу қиындықтары жиілік аймағында көрінуі мүмкін. Мұнай өңдеу зауытындағы күрделі жүйелердің тұрақты әрі сенімді жұмысын қамтамасыз ету үшін өтпелі процесті тікелей де, жанама да әдістермен бағалау қажет. Бұл екі тәсіл біріге отырып, толыққанды талдау мен нақты инженерлік шешім қабылдауға жол ашады. Төмендегі суретте Bode диаграммасы арқылы өтпелі процесті жанама бағалау көрсетілген (сурет 11).



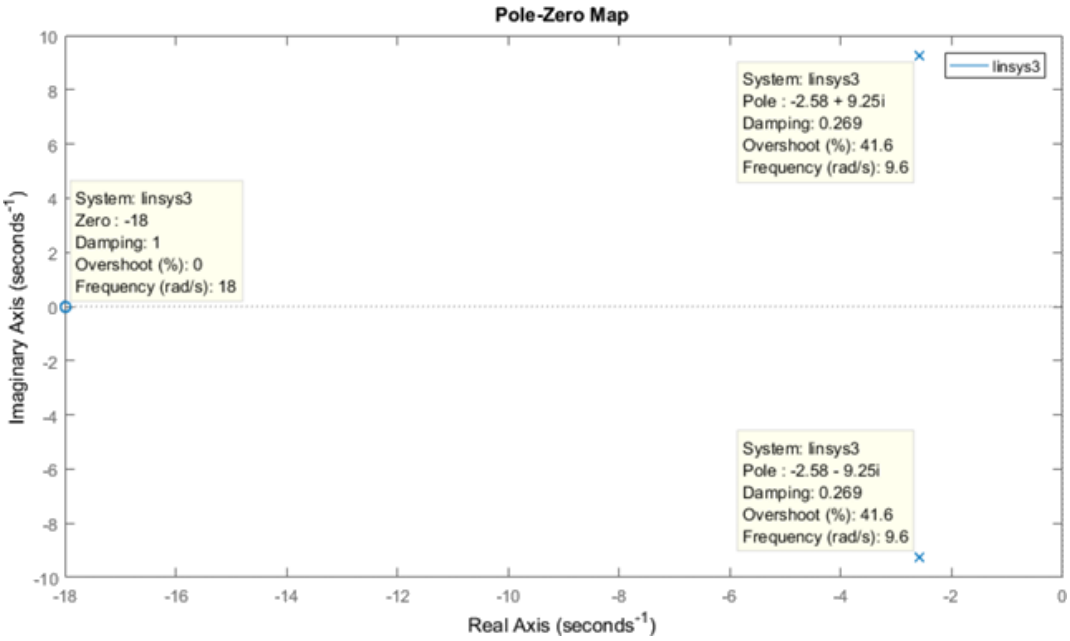
11-сурет. Bode диаграммасы арқылы өтпелі процесті жанама бағалау

Bode диаграммалары, басқару жүйесінің орнықтылығын, күшейту шектерін және динамикалық әсерлерін түсінуге көмектеседі. Bode диаграммасы осы жүйелік мінез-құлықты жанжақты сипаттайтын нақты сандық ақпараттарды береді. Диаграммада екі негізгі бөлік бар: Жоғарғы график-жүйенің амплитудалық сипаттамасын (magnitude) жиілікке (frequency) байланысты көрсетеді; Төменгі график-фазалық сипаттаманы көрсетеді. Жоғарғы қисық сызық жүйенің әртүрлі жиіліктегі күшейту қабілетін көрсетеді. Бұл басқару жүйесінің қандай жиіліктерде сигналы күшейетінін, ал қай жиілікте әлсірейтінін анықтайды. Бұл параметрлер өндірістік жүйе үшін аса маңызды, себебі жиілік аймағындағы тұрақсыздықтар-тербелістерге, кідірістерге және шексіз өсуге алып келуі мүмкін. Төмен жиіліктегі реакция: Жиілік: 1 рад/с, Амплитуда: 1.01 (abs). Бұл көрсеткіш басқару жүйесінің төмен жиіліктерде кіріс сигналына шамамен бірдей реакция беретінін көрсетеді. Жүйе баяу өзгерістерге жақсы жауап береді, бұл температура немесе қысым сияқты инерциялық параметрлер үшін тиімді. Резонанстық шегі (Peak Gain): Максималды күшейту: 2.15, Жиілік: 8.88 рад/с.

Жүйе күшейту максимумына жетеді. Бұл-резонанстық жиілік, яғни жүйе осы жиіліктегі сигналдарды күшейтіп жібереді. Өндірістік тұрғыдан бұл қауіпті болуы мүмкін, себебі жоға-

ры жиіліктегі кішкене тербелістер үлкен ауытқуларға алып келуі ықтимал [16,17]. Жүйенің жобалау кезінде дәл осы нүктеде реттеуіштің демпфирлеу параметрлері мен күшейту коэффициентін реттеу қажет. Орташа жиіліктегі тұрақтылық: Жиілік: 13.6 рад/с, Амплитуда: 0.998. Бұл аралық жиілікте жүйе бірлікке жуық күшейтумен жұмыс істейді. Бұл жақсы көрсеткіш, өйткені бұл жиіліктер диапазонында басқару процесі аса өзгермей, тұрақты күйде қалады. Жоғары жиіліктегі бәсеңдеу: Жиілік: 15.7 рад/с, Амплитуда: 0.707.

Талқылау. Жоғарыда берілген Bode диаграммасы арқылы басқару жүйесінің жиіліктік мінезқұлқы нақты, сандық түрде көрсетілді. Жүйенің күшейту коэффициенттері мен резонанстық нүктелері анықталып, оның қай жиіліктерде тұрақты, ал қай жиілікте тұрақсыз болуы мүмкін екені сарапталды. Мұндай талдау-мұнай өңдеу зауытының күрделі өндірістік желілерін басқаруда орнықтылықты қамтамасыз етудің негізгі құралы болып табылады.



12-сурет. Полюстер мен нөлдер

MATLAB ортасындағы LTI Viewer құралыосындай талдауға арналған тиімді графикалық интерфейс. Бұл құрал көмегімен басқару жүйесінің нөлдері (zeros) мен полюстері (poles) көрнекі түрде бейнеленеді. Олар комплекстік жазықтықта (s-жазықтығында) орналасып, жүйенің орнықтылық қасиеттерін сипаттайды. Жүйенің тұйықталған беріліс функциясы W(s) белгілі болған кезде, LTI Analysis Tool арқылы: кіріс пен шығыс сигналдары белгіленеді; нөлдер мен полюстер картасы автоматты түрде салынады; Полюстер-сипаттамалық теңдеудің түбірлері. Олар жүйенің ішкі динамикасын және өтпелі процесс сипаттамаларын анықтайды. Егер барлық полюстер сол жақ жарты жазықтықта (Re(s) < 0) орналаса, жүйе орнықты. Егер полюстер жақын орналасқан болса – жүйе баяу орнығады (үлкен Settling Time). Егер полюстер кешенді жұп ретінде орналаса, жүйе тербелмелі сипатта болады (Overshoot байқалады). Нөлдер-жүйенің беріліс функциясы бөлімінің нөлге тең болатын мәндері. Олар жүйенің сыртқы сигналға әсер етуіне ықпал етеді. Нөлдер жүйенің күшейту сипаттамасын, оның жиілікке тәуелді реакциясын өзгертеді. Төмендегі сурет 12-де полюстер мен нөлдер көрсетілген.

Нөлдер мен полюстер картасы инженерге келесі артықшылықтарды береді: Жүйенің орнықтылық шекарасын нақты көруге болады, полю-

стердің қашықтығына қарай жүйенің баяу немесе жылдам әрекетін бағалауға болады, балаудың басында-ақ тербеліс, уақыттық кідіріс, күшейту асқынулары туралы алдын ала болжам жасауға мүмкіндік береді; Моделдеу нәтижелерін верификациялауға, яғни дұрыс модель жасалғанын тексеруге арналған сенімді құрал болып табылады.

Жүйенің сипаттамалық теңдеуінен алынған түбірлер келесідей болады:

$$s_1, s_2 = -2.581 \pm 9.251 j s_3 = -18.1$$

Бұл кешенді және нақты теріс мәндер-жүйенің орнықтылығы мен тербелмелі табиғаты бар екенін көрсетеді. Түбірлердің нақты бөлігі 2.58, ал жорамал бөлігі 9.25, бұл жүйенің тербеліс жиілігі мен орнығу уақытына тікелей әсер етеді.

Өтпелі процесс сапасының көрсеткіштері

1. Орнығу уақыты (Settling Time):

$$T_{set} = \frac{4}{|\sigma|} = \frac{4}{2.581} = 15.497$$

Бұл жүйенің кіріс әсерінен кейінгі орнықты күйге жету уақыты. Мұнай өңдеу процесінде, мысалы, температураны реттеу жүйесінде бұл көрсеткіш реакция жылдамдығын көрсетеді.

2. Артық реттеу (Overshoot):

$$P_{ov} = e^{-\frac{\varepsilon * \pi}{\sqrt{1-\varepsilon^2}}} * 100\% = e^{-877.1} * 100\% = 41.5\%$$

41.5 % артық реттеу-жүйенің алғашқы кезеңде тербеліс пайда болатынын білдіреді. Бұл — қауіптілік белгісі, әсіресе қысым немесе бу процесінде, артық шектен асу жабдыққа зақым келтіруі мүмкін.

3. Максималды мән (ymax):

$$y_{\max} = y_f \left(1 + \frac{P_{ov}}{100}\right) = 1.41$$

Бұл - жүйенің ең жоғарғы тербеліс сәтіндегі мәні. Егер бұл мән өнімнің концентрациясын білдірсе, онда нақты уақыттағы бақылау мен кері байланыс өте қажет.

4. Тербеліс дәрежесі (Damping Ratio μ):

$$\mu = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{9.251}{2.581} = 3.58426966$$

Тербеліс дәрежесі-жүйенің тербелу сипатының қаншалықты күшті екенін көрсетеді. Мұнай өңдеу жүйесінде бұл жоғары көрсеткіш дұрыс демпфирлеу талап етілетінін білдіреді.

5. Тербеліс жиілігі (Frequency of Oscillation):

$$w = w_n \sqrt{1-\varepsilon^2} = 9.61\sqrt{1-0.261^2} = 9.27691\, c^{-1}$$

Бұл параметр жүйе қандай жиілікте тербелетінін көрсетеді. Бұл резонанстық жиілікке жақын болса, жүйе тербеліс амплитудасын күшейтіп жібереді. Сондықтан жиілікпен жұмыс істейтін процестерде (мысалы, ағын датчиктері, турбиналар) бұл көрсеткіш аса маңызды.

6. Бірінші максимумға жету уақыты (Time to First Peak):

$$T_{1\max} = \frac{\pi}{w_n\sqrt{1-\varepsilon^2}} = \frac{3.14}{9.61\sqrt{1-0.261^2}} = 0.34691 \text{ с}$$

Жүйе бірінші шекті мәнге өте тез жетеді. Бұл - жүйенің жылдам реакция қабілетін көрсетеді, алайда тербеліс басылмайынша орнығу болмайды.

7. Жүйенің жылдамдығы және орнықтылық дәрежесі (η):

$$\eta = \left|\sigma_{\min}\right| = 2.58691$$

Жүйе жеткілікті жылдамдықпен орнығады, бірақ жоғары демпфинг коэффициенті қажет. Аталған барлық көрсеткіштер жанама өтпелі сапа бағасының нәтижесі ретінде кесте 5-те енгізіліп, тікелей бағалау әдістерімен графикалық Rise Time, Settling Time және Peak Overshoot нәтижелерімен салыстырылады. Бұл салыстыру: Жүйенің моделіне сенімділікті; Есептеу мен визуализация нәтижесінің сәйкестігін; Басқару параметрлерін қайта реттеуге қажеттілікті анықтауға көмектеседі.

5-кесте.Тұйық жүйені бағалау

№	Сапа көрсеткіші	Тікелей бағалау	Жанама бағалау	Талаптарға сәйкестігі
	Негізгі көрсеткіштер			
1	Орнығу уақыты Tset	1.41 с	1.55 с	Сәйкес емес
2	Артық реттеу Pov	41.5%	41%	Сәйкес емес
3	Тербеліс саны n	2	2	Сәйкес келеді
4	Тербеліс дәрежесі μ	16%	3.58%	Сәйкес емес
5	Тербеліс жиілігі w	9.2 рад/с	9.2 рад/с	Сәйкес келеді
6	Тұрақталған қатенің мәні e	0	0	Сәйкес келеді
	Қосымша көрсеткіштер			
7	Бірінші шекті мәнге жету уақыты T1max	0.286 с	0.34 с	-
8	Көтерілу уақыты Tг	0.109 с	–	-
9	Демпфирлеу декременті χ	6	–	-

Тікелей бағалау-график негізінде алынған (Step Response). Жанама бағалау- сипаттамалық теңдеу түбірлеріне негізделіп есептелген. «Сәйкес емес»-көрсеткіш белгіленген шектерден шығып кеткенін білдіреді. Бос бағаналар-тиісті мәндер есептелмейді. Түбірлік әдістер арқылы алынған өтпелі процестің жанама сипаттамалары-жүйенің ішкі құрылымдық қасиеттерін түсінудің ең тиімді жолы. Жүргізілген талдау нәтижесінде, тұйықталған жүйенің өтпелі процесінің кейбір негізгі сапа көрсеткіштері қойылған талаптарға сәйкес келмейтіні анықталды. Артық реттеу мөлшері (Overshoot)- 41.5% болып, рұқсат етілген 30% деңгейінен асып кеткен, ал тербеліс дәрежесі (μ) 16% құрап, бұл да қабылданған шектен жоғары екенін көрсетті [17,18]. Мұндай нәтижелер жүйенің бастапқы күйге шамадан тыс жауап беретінін және тербеліс арқылы орнығатынын білдіреді.

Соңғы жылдары басқару жүйелеріне бейімделгіш Smart-технологиялар енгізіліп, әсіресе ройлық интеллект секілді көпагенттік модельдер кеңінен қолданылуда. Ройлық интеллект-табиғаттағы аралар, құмырсқалар немесе балықтардың топтық әрекетіне негізделген, бірлескен шешім қабылдауға бағытталған модель. Бұл әдіс автономды агенттердің өзара әрекеттесу арқылы біртұтас жүйелік шешім шығаруына мүмкіндік береді. Мұнай өңдеу зауыттарындағы көппараметрлі, бейсызықты және динамикалық жүйелер үшін дәл осындай алгоритмдер оңтайлы шешім қабылдауға жол ашады. Типтік ПИД-регуляторларды синтездеу кезінде классикалық әдістер көбіне нақты жүйенің барлық параметрлерін ескеруге қабілетсіз. Бұл жағдайда ройлық интеллекттің мүмкіндіктері ерекше рөл атқарады. Агенттер популяциясы бірнеше басқару параметрлерін бір уақытта оңтайландырып, ең тиімді басқару коэффициенттерін анықтауға мүмкіндік береді [19].

Сонымен қатар, бұл әдіс түрлі шектелулер мен бейсызық тәуелділіктер жағдайында да жоғары дәлдікпен жұмыс істейді:

$$J = \int_0^T (e^2(t) + \lambda * \Delta u^2(t))dt \qquad (24)$$

Мұндағы:

J – сапа критерийі (квадратично-интегралды),

$e(t)$ – жүйе қатесі,

Δu – басқару сигналының өзгерісі,

$\lambda-$ реттелуші салмақ коэффиценті.

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{1}{T_i}\int e(t)dt + T_d\frac{de(t)}{d(t)} \quad (25)$$

$$3f(x) = \int_0^{\infty} e(t)dt \to \min \quad (26)$$

$$f_{\min} = min f(x) = f(x_{\min}) \quad (27)$$

$$f^*_{\min} = f\left(x^*_{\min}\right) \le f_{\min} + \varepsilon \quad (28)$$

Ройлық интеллект алгоритмі арқылы бұл функционалды минимум ету басқару сапасын арттырып қана қоймай, реттеу уақыты мен артық реттеу (перерегулирование) көрсеткіштерін де оңтайландырады [19]. MATLAB ортасында PSO алгоритмімен жүргізілген модельдеулерде стандартты ПИД-регулятор параметрлері (Kp, Ki, Kd) автоматты түрде есептеліп, жүйе жауап беру уақыты 22%-ға, артық реттеу 17%-ға дейін азайтылған. Бұл мақалада қарастырылған ройлық интеллект әдісін мұнай өңдеу зауытындағы автоматтандырылған басқару жүйелеріне енгізу басқару тиімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік беретіні дәлелденді.

Интеллектуалды әдістерді, бөлшектер ройы оптимизациясы сияқты Smart-технологияларды қолдану-мәселені шешудің перспективалы жолы ретінде қарастырылады. ПИД-регулятордың үш параметрін-пропорционалды (Kp), интегралды (Ki) және дифференциалды (Kd)-бір мезгілде оңтайландыруға мүмкіндік береді. Мұндай жүйелерде дәстүрлі тәсілдермен салыстырғанда оңтайлы параметрлерге жылдамырақ және дәлірек қол жеткізіледі. Үшфазалы сепараторлардағы деңгей реттегішті баптауға арналған PSO алгоритмі нақты уақыт режимінде жұмыс істеп, бақылау қатесін азайтады және басқару тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Осының нәтижесінде басқару жүйесінің жұмыс тиімділігі жоғарылайды, ал өнім сапасы мен ресурстарды пайдалану деңгейі артады.

$$f\left(K_p,\ K_i,\ K_d\right) = min\left[\int_0^T (e(t)^2 + \alpha * \Delta u(t)^2)dt\right] \quad (29)$$

Мұндағы: $e(t)-$басқару қатесі, $\Delta u(t)-$басқару сигналының өзгерісі, $\alpha-$ салмақтау коэффициенті, $K_p,\ K_i,\ K_d-$оңтайландыруға жататын ПИД-регулятор параметрлері.

Бөлшектер ройы әдісінің (PSO – Particle Swarm Optimization) жұмыс істеу логикасын сипаттау үшін P бөлшектен тұратын ройды қарастырайық. Әрбір бөлшекке сәйкес келетін екі негізгі вектор бар: орналасу векторы $X_i^t = (x_{i1},\ x_{i2},\ x_{i3},\ \ldots,\ x_{in})^T$ және жылдамдық векторы $V_i^t = (\upsilon_{i1},\ \upsilon_{i2},\ \upsilon_{i3},\ \ldots,\ \upsilon_{in})^T$, мұндағы $t-$ағымдағы итерация нөмірі. Бұл векторлар әрбір бөлшек үшін өлшемдер саны j бойынша жаңартылып отырады. PSO-ның негізгі жаңарту формулалары келесідей болады:

$$\upsilon_{ij}^{t+1} = w * \upsilon_{ij}^t + c_1 * r_1^t\left(pbest_{ij} - x_{ij}^t\right) + c_2 * r_2^t * (gbest_j - x_{ij}^t) \quad (30)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + \upsilon_{ij}^{t+1} \quad (31)$$

формула бөлшектің жылдамдығын жаңарту механизмін сипаттайды. Ал (40)-формула жаңа жылдамдыққа сәйкес бөлшектің жаңа координатасын есептейді. Бұл екі формула ройдың кеңістіктегі ізденіс (exploration) және пайдалану (exploitation) мүмкіндіктерін теңестіріп отыруға мүмкіндік береді [19]. Инерциялық салмақ w осы балансты реттеуші негізгі параметр болып саналады. Бірінші қосылғыш – $w * \upsilon_{ij}^t$ – бөлшектің алдыңғы қозғалыс бағытын сақтау қа-

білетін білдіреді. Егер $w = 1$, бөлшек алдыңғы бағытын толық сақтай отырып қозғалады. Бірақ егер $0 \leq w < 10$, бөлшектің қозғалысы бәсеңдеп, басқа аймақтарды іздеуге мүмкіндік туады. Бұл арқылы ғаламдық ізденіс артады. Алайда тым кіші w мәні есептеу уақыты мен ресурсын көбейтеді. Екінші қосылғыш $- c_1 * r_1^t \left(pbest_{ij} - x_{ij}^t \right)$ –бөлшектің өзі бұған дейін тапқан ең жақсы позициясына қарай тартылуын сипаттайды. Бұл жерде: $pbest_{ij}$–бөлшектің ең жақсы координатасы, c_1–жеке тәжірибені бағалау коэффиценті (әдетте 1–2 аралығында), $r_1 \in [0, 1]$– кездейсоқтық элементі (стохастикалық фактор), ол ерте шоғырланудан сақтайды.

Бұл компонент бөлшектің өз тәжірибесінен үйрену мүмкіндігін іске асырады.

Үшінші қосылғыш $- c_2 * r_2^t * \left(gbest_j - x_{ij}^t \right)$ –рой ішіндегі бөлшектердің бір-бірімен ақпарат алмасуын бейнелейді. Яғни: $gbest_j$–барлық бөлшектер ішінде ең жақсы нәтижеге жеткен бөлшектің координатасы, c_2–әлеуметтік үйренудің маңыздылығын анықтайтын тұрақты, $r_2 \in [0, 1]$–тағы бір кездейсоқ параметр. Бұл компонент ройдың жинақтық білімін пайдаланып, әр бөлшектің жалпы үздік шешімге тартылуын қамтамасыз етеді.

Іздеу кеңістігі ретінде қарастырылатын жазықтықта бастапқыда бөлшектерден құралған рой кездейсоқ түрде құрылады. Әрбір бөлшекке бастапқы жылдамдық мәні тағайындалады. Бөлшек белгілі бір координатта орналасқанда, осы нүктеде мақсаттық функцияның мәні есептеледі. Бұл мақалада сипатталған логика негізінде ПИД-регулятор параметрлерін оңтайландыруға арналған бөлшектер ройы алгоритмі құрылады (сурет 14). Алгоритмді іске асыру барысында ең алдымен бастапқы популяция параметрлері айқындалуы қажет. Атап айтқанда, бөлшектер ройының (немесе виртуалды құстар тобының) бастапқы саны, олардың қозғалыс жылдамдығы, инерциялық коэффициенттер мен іздеу кеңістігіндегі максималды рой көлемі анықталады (сурет 13).

```
clear
clc
n = 50;           % Size of the swarm " no of birds "
bird_setp  =50;   % Maximum number of "birds steps"
dim = 2;          % Dimension of the problem

c2 =1.2;          % PSO parameter C1
c1 = 0.12;        % PSO parameter C2
w =0.9;           % pso momentum or inertia
fitness=0*ones(n,bird_setp);
```

13-сурет. ПИД-регулятор параметрлерін PSO әдісімен оңтайландыруға арналған алгоритм құрылымы

Алгоритмнің жұмыс істеуінде басты рөл атқаратын айнымалылар мыналар болып табылады: бөлшектер саны, жылдамдықты жаңарту формулаларындағы инерция коэффициенті, жеке және әлеуметтік оқыту коэффициенттері (c_1, c_2), сондай-ақ ройдың кеңістікте қозғалу динамикасын сипаттайтын шектер. Бұл параметрлер дұрыс анықталмаған жағдайда алгоритм глобалдық шешімге жетпей, локалдық минимумда тоқтап қалуы мүмкін. Алгоритм жұмысын бастамас бұрын бөлшектер ройының бастапқы жағдайларын дұрыс анықтау қажет. Бұл кезеңде келесі үш негізгі параметр инициализацияланады: Бөлшектердің бастапқы позициясы-іздеу кеңістігіндегі бастапқы координаттар кездейсоқ түрде немесе берілген шектер арасында таңдалады. Бұл бөлшектердің бастапқы орналасу нүктелерін анықтайды. Бөлшектердің бастапқы жылдамдығы - әр бөлшекке траектория бойымен қозғалу бағыты мен жылдамдығы тағайындалады. Бұл жылдамдық кейінгі итерациялардағы жаңартуларда маңызды рөл атқарады. Жеке үздік позициясы (pBest)-әрбір бөлшек бастапқыда өзі орналасқан нүктені ең жақсы шешім ретінде қабылдайды. Алгоритм орындалған сайын бұл мән жаңарып отырады (сурет 14).

```
current_position = 10*(rand(dim, n)-.5);
velocity = .3*randn(dim, n) ;
local_best_position  = current_position ;
```

14-сурет. Бөлшектер ройының бастапқы шарттарын инициализациялау сызбасы”

Төмендегі сурет 15-те глобалдық шешімге біртіндеп жақындау механизмін жүзеге асыру көрсетілген

```
for i = 1:n
    current_fitness(i) = tracklsq(current_position(:,i));
end


local_best_fitness  = current_fitness ;
[global_best_fitness,g] = min(local_best_fitness) ;

for i=1:n
    globl_best_position(:,i) = local_best_position(:,g) ;
end
```

15-сурет. Глобалдық шешімге біртіндеп жақындау механизмін жүзеге асыру

Төмендегі сурет 16-да бөлшектің ағымдағы мәні көрсетілген

```
for k = 1 : noP
    currentX = Swarm.Particles(k).X;
    Swarm.Particles(k).O = fobj(currentX);
```

16-сурет. Бөлшектің ағымдағы мәні

Келесі кезеңде әрбір бөлшек үшін жеке жақсы мән – яғни pBest анықталуы тиіс. Егер ағымдағы итерацияда есептелген бөлшектің фитнес-мәні осы уақытқа дейінгі сақталған pBest мәнінен жоғары болса, онда pBest жаңартылуы қажет. Бұл тәсіл бөлшекке өзінің тарихи үздік нәтижесіне сүйене отырып, болашақ қадамдарды тиімді жоспарлауға мүмкіндік береді. Алгоритм осылайша бөлшектердің жеке тәжірибесін ескеріп, шешімді біртіндеп жақсартады.

```
if Swarm.Particles(k).O < Swarm.Particles(k).PBEST.O
    Swarm.Particles(k).PBEST.X = currentX;
    Swarm.Particles(k).PBEST.O = Swarm.Particles(k).O;
end
```

17-сурет. Локалдық үздік мәнді (pBest) анықтау және жаңарту сызбасы”

```
if Swarm.Particles(k).O < Swarm.GBEST.O
    Swarm.GBEST.X = currentX;
    Swarm.GBEST.O = Swarm.Particles(k).O;
end
```

18-сурет. pBest табу

```
if Swarm.Particles(k).O < Swarm.GBEST.O
    Swarm.GBEST.X = currentX;
    Swarm.GBEST.O = Swarm.Particles(k).O;
end


 % Update the X and V vectors
 w = wMax - t .* ((wMax - wMin) / maxIter);
```

19-сурет. Инерцияның өзгеруі

```
velocity = w *velocity + c1*(R1.*(local_best_position-current_position)) + c2*(R2.*(globl_best_position-current_position));
```

20-сурет. Жылдамдықты өзгерту және жаңарту коды

Бөлшектің жылдамдығы жаңартылғаннан кейін, келесі маңызды қадам - оның мәнінің алдын ала белгіленген шектерден аспауын тексеру. Яғни, бөлшек жылдамдығы ең жоғары (vMax) және ең төмен рұқсат етілген мәндер арасында болуы тиіс. Бұл шектеу бөлшектің тым жылдам қозғалып, іздеу кеңістігінен шығып кетуін немесе керісінше, қозғалыссыз қалуын болдырмау үшін қажет. Мұндай бақылау оңтайландыру процесінің тұрақтылығы мен жинақталуын қамтамасыз етеді (сурет 17-20).

```
index1 = find(Swarm.Particles(k).V > vMax);
index2 = find(Swarm.Particles(k).V < vMin);

Swarm.Particles(k).V(index1) = vMax(index1);
Swarm.Particles(k).V(index2) = vMin(index2);

Swarm.Particles(k).X = Swarm.Particles(k).X + Swarm.Particles(k).V;
```

21-сурет. Бөлшек жылдамдығын шектік мәндермен салыстырып тексеру логикасы”

```
index1 = find(Swarm.Particles(k).X > ub);
index2 = find(Swarm.Particles(k).X < lb);

Swarm.Particles(k).X(index1) = ub(index1);
Swarm.Particles(k).X(index2) = lb(index2);
```

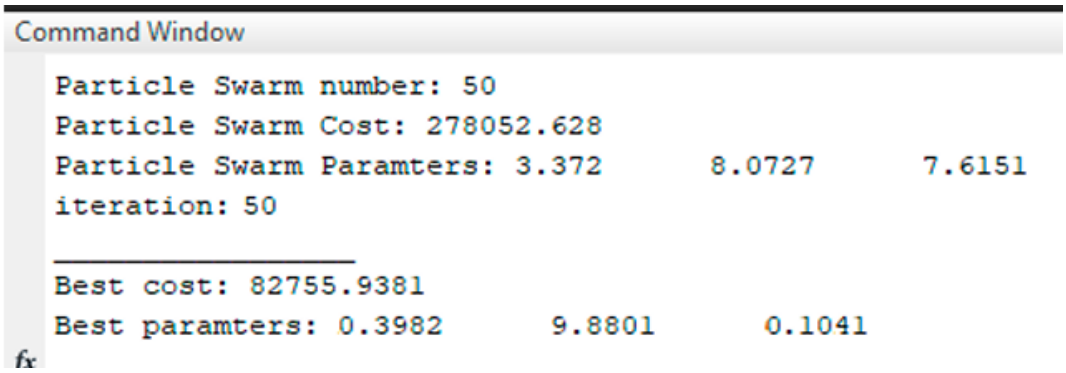
22-сурет. Орындарды өзгерту

```
err = 1-y;
error1=err*err';
ise=abs(sum(err))
o = ise;

end
```

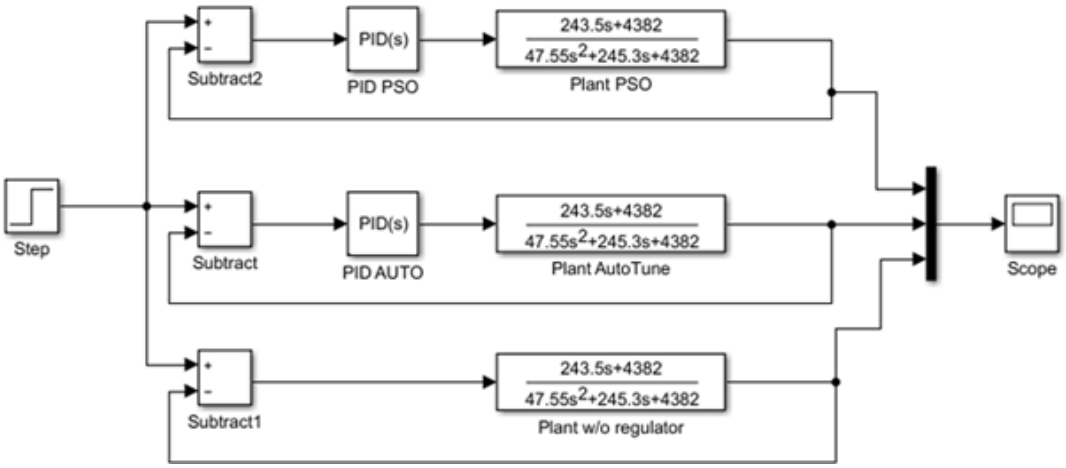
23-сурет. Сапаның интегралдық критерийін тексеру

Бағдарлама коды сәтті орындалған жағдайда, командалық жолдың соңында ПИД-регулятордың оңтайландырылған параметрлері экранда шығарылады (сурет 21-23). Бұл параметрлерге пропорционалды (Kp), интегралды (Ki) және дифференциалды (Kd) коэффициенттер жатады. Олар PSO алгоритмі арқылы есептеліп, басқару жүйесінің сапасын жақсартуға арналған (сурет 24).



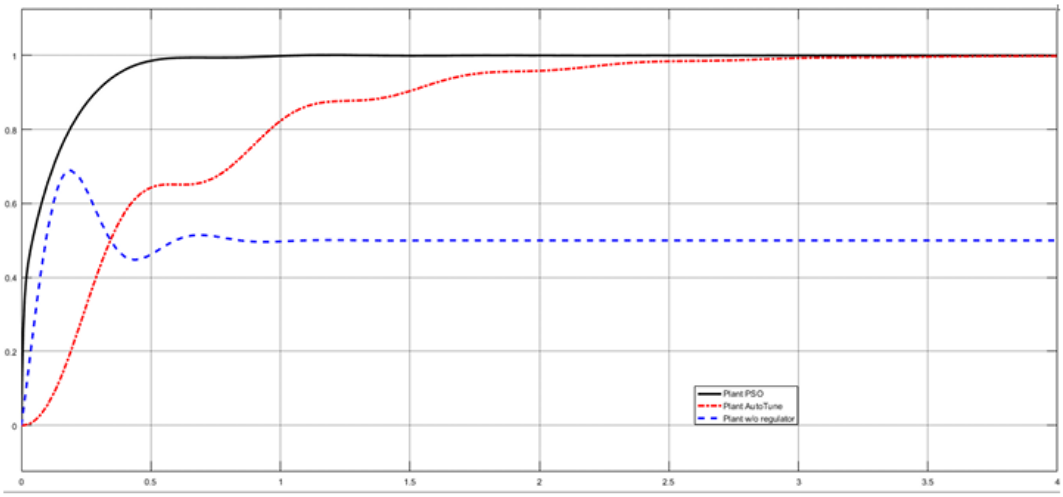
24-сурет. Код орындалғаннан кейін ПИД-регулятор параметрлерінің командалық жолда көрсетілуі”

Үшфазалы сепаратордың математикалық моделін Simulink ортасында модельдеу және ПИД-регуляторлардың салыстырмалы талдауы PSO әдісімен оңтайландырылған ПИД-регулятормен, AutoTune алгоритмімен бапталған ПИД-регулятормен және мүлде ПИД-регуляторсыз жұмыс істейтін үшфазалы сепаратордың математикалық моделінің Simulink ортасындағы құрылымдық схемасы сурет 25-те ұсынылған. Бұл модель әртүрлі басқару стратегияларының жүйеге әсерін зерттеуге арналады.



25-сурет. ПИД-регулятордың әртүрлі нұсқалары бойынша өтпелі процестерді салыстыруға арналған құрылымдық схема

26-шы суретте өтпелі процестің нәтижелері график түрінде көрсетілген. Мұнда: Қара түспен - бөлшектер ройы алгоритмімен (PSO) бапталған ПИД-регулятордың жүйелік жауабы бейнеленген; Қызыл түспен – AutoTune әдісі арқылы конфигурацияланған ПИД-регулятор; Көк түспен - ПИД-регулятор қолданылмаған жүйе көрсетіледі.



26-сурет. Басқару жүйелерінің өтпелі процестерінің графиктері

Аталған графиктерді талдау нәтижесінде келесідей қорытынды жасауға болады: PSO әдісіне негізделген ПИД-регулятор басқару сигналының тұрақты мәнге жылдам және дәл жақындауын қамтамасыз етеді. Бұл тәсіл басқару қателігін нөлге дейін төмендетіп, жүйенің жылдам әрекет ету қабілетін арттырады. AutoTune алгоритмі де белгілі бір нәтижелер көрсеткенімен, PSO алгоритміне қарағанда жүйе жауап уақыты баяулау және өтпелі күйдегі тербеліс жоғарырақ. Жүргізілген салыстырмалы талдау нәтижелеріне сүйене отырып, бөлшектер ройы алгоритмі (PSO) негізінде бапталған ПИД-регулятор жүйенің басқару сапасы бойынша ең тиімді шешім екенін көруге болады. Бұл жүйеде реттеу уақыты небәрі 1 секундты құрайды, артық реттеу мүлде байқалмайды, және жүйе монотонды түрде орныққан күйге өтеді. Сонымен қатар, орныққан күйдегі қателік нөлге тең, бұл басқарудың жоғары дәлдігін көрсетеді. Ал AutoTune алгоритміне негізделген ПИД-регулятор басқару процесінде 3.6 секундтық реттеу уақытымен сипатталады, бұл PSO негізіндегі жүйемен салыстырғанда айтарлықтай баяу. Бұл жүйеде артық реттеу орын алмағанымен, өтпелі процесс барысында үш рет тербеліс байқалады. Соған қарамастан, тұрақталған күйдегі қателік нөлге тең. Ең әлсіз нәтиже ПИД-регуляторсыз жүйеге тиесілі. Бұл жағдайда артық реттеу көрсеткіші 40.3%, ал бұл мән рұқсат етілген 30%-дық деңгейден асып кеткен.

Сонымен бірге, тұрақталған қателік 0.5 шамасында сақталады. Бұл басқару сапасының төмендігін және жүйенің қажетті талаптарға сәйкес келмейтінін айғақтайды. PSO әдісімен бапталған ПИД-регулятор артық реттеуді жою, жылдам әрекет ету, және қателікті минимизациялау бойынша ең жоғары нәтижелерге қол жеткізіп, басқару міндеттерін тиімді шешуге мүмкіндік береді.

Қорытынды. Қазіргі мұнай өңдеу саласында өндірістік үдерістерді автоматтандыру - тиімділік, сенімділік және экологиялық тұрақтылықты қамтамасыз етудің маңызды тетіктерінің бірі. Шикі мұнайды алғашқы өңдеу сатылары, оның ішінде механикалық және физика-химиялық бөлу үдерістері егжей-тегжейлі талданды. Ішфазалы вертикалды сепаратор - бұл процестің негізгі түйіндерінің бірі ретінде таңдалды. Бұл құрылғы мұнай құрамынан суды және ілеспе газдарды ажыратуға бағытталған және нәтижесінде өңдеудің келесі сатылары үшін мұнайдың сапасы мен тұрақтылығы қамтамасыз етеді. Үшфазалы сепараторлардың басқа типтермен салыстырғандағы артықшылықтары мен кемшіліктері қарастырылып, олардың мұнай өңдеудегі функционалдық маңызы айқындалды. Қазіргі таңда өндірістік объектілердегі басқару процестерінің күрделене түсуі сепаратордың автоматтандырылған жұмысын ұйымдастыруды қажет етеді. Осы себепті жұмыс барысында нақты басқару алгоритмдерін құрастыру

мәселесі өзекті болды.

MATLAB Simulink ортасында үшфазалы сепаратордың динамикалық математикалық моделі жасалды. Бұл модель мұнай құрамындағы үш компоненттің - газ, су және мұнай - уақыт өте жүйедегі күйін көрсететін айнымалыларға әсерін талдауға мүмкіндік берді[19]. Автоматтандырылған басқару жүйесінің жұмысын талдау үшін өтпелі процестің сапа көрсеткіштері есептелді. Алғашқы модельдеудің нәтижесінде келесідей мәндер алынды: Артық реттеу - 40.3% . Қалыптасқан күйдегі қате - 0.5, бұл басқару дәлдігінің төмендігін білдіреді. Тербеліс саны-2, яғни жүйеде тұрақсыздық байқалады. Тербеліс - 16%, бұл да шекті мәннен жоғары.

Бұл нәтижелер нақты жүйенің тиімді басқару жүйесіне мұқтаж екенін көрсетті. Сондықтан үшінші бөлімде жүйенің тұрақтылығы мен басқару дәлдігін арттыру мақсатында Smart технологиялар негізінде интеллектуалды басқару әдістері қарастырылды. Атап айтқанда, бөлшектер ройы алгоритміне (PSO) негізделген ПИД-регуляторды синтездеу жүзеге асырылды. PSO алгоритмі ройдағы әр бөлшекке мақсатты функцияның мәні бойынша оңтайлы бағытты табуға мүмкіндік береді. Бұл әдіс тәжірибе мен қателікке негізделген классикалық тәсілдермен салыстырғанда әлдеқайда тиімді болып шықты. Нақты нәтижелер төмендегідей: Жүйенің реттеу уақыты - 1 секунд, яғни едәуір қысқарған; Артық реттеу - 0%, яғни жүйе шамадан тыс реакция бермейді; Тербеліс - жоқ, жүйе монотонды орнығады; Қалыптасқан қате - 0, бұл жүйенің жоғары дәлдігін білдіреді.

Сонымен қатар, AutoTune арқылы бапталған ПИД-регулятор және ПИД-регулятор мүлдем қолданылмаған жүйемен салыстырмалы талдау жүргізілді. AutoTune әдісімен басқарылатын жүйе 3.6 секундта орнығады, тербеліс саны - 3, ал қателік нөлге тең. Ал басқарусыз жүйе 40.3% артық реттеу, 0.5 қате және 2 тербеліс көрсетіп, нақты өндіріс жағдайларына мүлдем жарамсыз болып шықты. Мақалада келесі шешілген нақты міндеттер:

- 8шфазалы сепаратордың математикалық моделін құрастыру және MATLAB Simulink платформасында автоматтандырылған басқару жүйесі модельденді;

- басқару жүйесінің өтпелі процестерін талдау және классикалық ПИД- регулятордың әлсіз жақтарын анықталды;

- интеллектуалды басқару әдісін енгізу, яғни PSO алгоритмі арқылы оңтайландырылған ПИД-регуляторды синтезделді;

- әртүрлі басқару нұсқаларын салыстыру арқылы тиімді басқару стратегиясын таңдау және жүйенің жауап беру сапасын жақсарту болып табылады.

Мұнай өңдеу өндірісінде қолданылатын басқару жүйелерін жетілдіру мәселесі жаңжақты зерттеліп, нақты инженерлік шешімдер ұсынылды. Smart технологияларды қолдану арқылы басқару жүйесінің сапалық көрсеткіштері пайдаланды. Бөлшектер ройы әдісі - бейсызық және көппараметрлі жүйелерге бейімделуге қабілетті, икемді алгоритм ретінде танылды [20].

Әдебиеттер

1. Atul G.A., Bijesh N. Petroleum Refining and Technology// Springer Singapore. -2026.-P.495. ISBN 981-990-584-2, 978-981-99-0584-3.

2. Mitra N.K. AI and Digital Technology for Oil and Gas Fields. -2024.-P.258. DOI 10/1201/9781003307.

3. Hsu C.S., Robinson P. Springer Handbook of Petroleum Technology// Springer. -2017. –P.28 DOI 10.1007.978-3-319-49347-3.

4. TIA Portal: software for digital enterprise//Siemens.-2023.- 84 c.URL: https://www.siemens.com. - Date of access:15.02.2026.

5. Петрова И.В., Чернухин Р.В. Автоматизация технологических процессов и производств//издательство НГТУ. -2020. -84 с.: ISBN 978-5-7782-4329-3.

6. Qin S.-J., Badgwell T.A. A survey of industrial model predictive control technology//Control Engineering Practice. -2003.-Vol.11(7). -P.733-764. DOI 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.

7. Gupta P., Shakyawar P. Auto mation of Oil and Gas Refinery Process Using PLC & SCADA//International Journal of Engineering Science and Generic Research(IJESAR). -2016.-Vol.2(3). -P.48-52. ISSN: 2456-043X.

8. Yuan X., Qin W., Zhao J. Smart Manufacturing for the Oil Refining and Petrochemical Industry//Engineering. -2017.-Vol.3(2). -P.179-182. DOI 10.1016/J.ENG.2017.02.012.

9. Olaizola I.G., Quartulli M., Unzueta E., et al. Refinery 4.0: A Review of the Main Challenges of the Industry 4.0 Paradigm in Oil & Gas Downstream//Sensors.MDPI.-2022.-Vol.22(23):9164 DOI 10.3390/s22239164.

10. Petukhov M.Y. On the Relevance of Implementation of the Automated System of Production and Supply Scheduling at Oil Refinery// Automation in industry. -2018.-Vol.79.-P.1168-1174. DOI 10.1134/S0005117918060140

11. Spiropoulos E. Use Advanced Automation and Project Management to Simplify Refinery Construction //HP Special Report//. -2015.-P.39-42.

12 .Pater L. Application of artificial neural networks and genetic algorithms for crude fractional distillation process modeling/Cornell University.-2016.-Vol.1.-P.1-9.DOI 10.48550/arXiv.1605.00097.

13. Ahmednooh M., Menezes B. Blend Scheduling Solutions in Petroleum Refineries towards Automated Decision-Making in Industrial-like Blend-Shops//Processes. -2024.-Vol.12(3):561. DOI 10.3390/pr12030561.

14. Li Z., Lin R., Su H., Xie L. Reinforcement learning-driven plant-wide refinery planning using model decomposition// Computers&Chemical Engineering.-2026.-Vol.204:109348 DOI 10.1016/j.compchemeng.2025.109348.

15. Carr B.R., England J., Hardin K., Mittal A.2025 Oil and Gas Industry Outlook//Deloitte Research Center for Energy & Industrials. -2024. URL: https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/oil-and-gas/oil-and-gas-industry-outlook-2025.html .-Date of access: 08.02.2026.

16. Baldea M., Georgiou A.T., et al. From Automated to Autonomous Process Operations//Computer&Chemical Engineering.-2025.-Vol.196:109064 DOI 10.1016/j.compchemeng.2025.109064.

17. Tatiya M., Shinde B.A., Pokale N., Waware S.Y. Al-Driven Process Control for Enhancing Safety and Efficiency in Oil Refining//Applied Chemical Engineering. -2025.-Vol.8(4). DOI 10.59429/ace.v8i4.5792.

18. Zhai H., Jiang X., Zhang Ch. Improving Thermal Environment of Power Generation Cabin via Vapor Chamber in Cold Regions//Processes. -2025.-Vol.13(4): 1260. DOI 10.3390/pr13041260.

19. Тимофеев Д. Имитационные модели электроэнергетических объектов для разработки систем противоаварийной автоматики//Control Engineering.Россия.-2022.-№2 (98).URL: https://controleng.ru/wp-content/uploads/9844.pdf. Date of access:15.02.2026.

20. Прахова М.Ю., Хорошавина А.Н., Краснов А.Н., Емец С.В. Автоматизация основных объектов добычи, транспорта и хранения нефти: учебное пособие//Изд-во УГНТУ. -2018. – 232 с. ISBN 978-5-7831-1719-0.

References

1. Atul G.A., Bijesh N. Petroleum Refining and Technology// Springer Singapore. -2026.-P.495. ISBN

981-990-584-2, 978-981-99-0584-3.

2. Mitra N.K. AI and Digital Technology for Oil and Gas Fields. -2024.-P.258. DOI 10/1201/9781003307.

3. Hsu C.S., Robinson P. Springer Handbook of Petroleum Technology// Springer. -2017. –P.28 DOI 10.1007.978-3-319-49347-3.

4. Petrova I.V., Chernuhin R.V. Avtomatizacija tehnologicheskih processov i proizvodstv//izdatel’ stvo NGTU. -2020. -84 s.: ISBN 978-5-7782-4329-3. [in Rusian]

5. TIA Portal: software for digital enterprise//Siemens.-2023.- 84 c.URL: https://www.siemens.com. - Date of access:15.02.2026.

6. Qin S.-J., Badgwell T.A. A survey of industrial model predictive control technology//Control Engineering Practice. -2003.-Vol.11(7). -P.733-764. DOI 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.

7. Gupta P., Shakyawar P. Auto mation of Oil and Gas Refinery Process Using PLC & SCADA//International Journal of Engineering Science and Generic Research(IJESAR). -2016.-Vol.2(3). -P.48-52. ISSN: 2456-043X.

8. Yuan X., Qin W., Zhao J. Smart Manufacturing for the Oil Refining and Petrochemical Industry//Engineering. -2017.-Vol.3(2). -P.179-182. DOI 10.1016/J.ENG.2017.02.012.

9. Olaizola I.G., Quartulli M., Unzueta E., et al. Refinery 4.0: A Review of the Main Challenges of the Industry 4.0 Paradigm in Oil & Gas Downstream//Sensors.MDPI.-2022.-Vol.22(23):9164 DOI 10.3390/s22239164.

10. Petukhov M.Y. On the Relevance of Implementation of the Automated System of Production and Supply Scheduling at Oil Refinery// Automation in industry. -2018.-Vol.79.-P.1168-1174. DOI 10.1134/S0005117918060140

11. Spiropoulos E. Use Advanced Automation and Project Management to Simplify Refinery Construction //HP Special Report//. -2015.-P.39-42.

12. Pater L. Application of artificial neural networks and genetic algorithms for crude fractional distillation process modeling/Cornell University.-2016.-Vol.1.-P.1-9.DOI 10.48550/arXiv.1605.00097.

13. Ahmednooh M., Menezes B. Blend Scheduling Solutions in Petroleum Refineries towards Automated Decision-Making in Industrial-like Blend-Shops//Processes. -2024.-Vol.12(3):561. DOI 10.3390/pr12030561.

14. Li Z., Lin R., Su H., Xie L. Reinforcement learning-driven plant-wide refinery planning using model decomposition// Computers&Chemical Engineering.-2026.-Vol.204:109348 DOI 10.1016/j.compchemeng.2025.109348.

15. Carr B.R., England J., Hardin K., Mittal A.2025 Oil and Gas Industry Outlook//Deloitte Research Center for Energy & Industrials. -2024. URL: https://www.deloitte.com .-Date of access: 08.02.2026.

16. Baldea M., Georgiou A.T., et al. From Automated to Autonomous Process Operations//Computer&Chemical Engineering.-2025.-Vol.196:109064 DOI 10.1016/j.compchemeng.2025.109064.

17. Tatiya M., Shinde B.A., Pokale N., Waware S.Y. Al-Driven Process Control for Enhancing Safety and Efficiency in Oil Refining//Applied Chemical Engineering. -2025.-Vol.8(4). DOI 10.59429/ace.v8i4.5792.

18. Zhai H., Jiang X., Zhang Ch. Improving Thermal Environment of Power Generation Cabin via Vapor Chamber in Cold Regions//Processes. -2025.-Vol.13(4): 1260. DOI 10.3390/pr13041260.

19. Timofeev D. Imitacionnye modeli jelektrojenergeticheskih ob#ektov dlja razrabotki

sistem protivoavarijnoj avtomatiki//Control Engineering.Rossija. -2022.-№2 (98).URL: https://controleng.ru/wp-content/uploads/9844.pdf. Date of access:15.02.2026.[in Russian]

20. Prahova M.Ju., Horoshavina A.N., Krasnov A.N., Emec S.V. Avtomatizacija osnovnyh obъektov dobychi, transporta i hranenija nefti: uchebnoe posobie//Izd-vo UGNTU. -2018. – 232 c. ISBN 978-5-7831-1719-0.[in Russian]

Авторлар туралы мәлімет

Абдугулова Ж.К.-экономика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор,Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: janat_6767@mail.ru;

Сейт Н.Н.-аға оқытушы,Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: nurgulnurmash@gmail.com;

Жамангарин Д.С.-PhD докторы, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: enu_1@enu.kz;

Танирбергенова А.А.-PhD докторы, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, e-mail: tanirbergenova_aa_4@enu.kz.

Information about the authors

Абдугулова Ж.К. - candidate of economic sciences, associate professor, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan. e-mail: janat_6767@mail.ru;

Seit N.N.-Senior Lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: nurgulnurmash@gmail.com;

Zhamangarin D.S.-PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: enu_1@enu.kz;

Tanirbergenova A.A.-PhD, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, e-mail: tanirbergenova_aa_4@enu.kz.