

Information about the authors

Kainizhamal Iklassova* – PhD, associate professor, Department of Information and Communication Technologies, Manash Kozybayev North Kazakhstan University; e-mail: keiklasova@ku.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8330-4282>.

Aigul Kairulaevna Shaikhanova – PhD, Acting Professor, Department of Information Security, L.N. Gumilyov Eurasian National University; e-mail: shaikhanova_ak@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6006-4813>.

Madina Zhomartovna Bazarova – PhD, associate professor of the Department of Computer Modeling and Information Technology, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University; e-mail: madina_vkgtu@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2580-6580>.

Rustem Maratovich Tashibayev – PhD student, Manash Kozybayev North Kazakhstan University; e-mail: rasll17@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2436-9584>.

Aliya Muratovna Aytymova – PhD, Senior lecturer, Department of Primary, Preschool and Special Education, Manash Kozybayev North Kazakhstan University; e-mail: aitimova_a_1985@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1128-6924>.

Поступила в редакцию 07.08.2025

Поступила после доработки 27.08.2025

Принята к публикации 28.08.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-16](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-16)



FTAXP: 50.53.19

Е.С. Талмурзин¹, Г.Д. Бәзіл¹, А.А. Абсатарова¹, Е.Ж. Оракбаев¹, Е.А. Оспанов^{2*}

¹Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Байтұрсынов к-сі, 126/1

²Шәкәрім университеті,
071404, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20а

*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

БИОЛОГИЯЛЫҚ СУДЫ ТАЗАРТУДЫ АВТОМАТТЫ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ӨЗІРЛЕУ

Аңдатпа: Бұл мақалада бұлыңғыр логиканы қолдана отырып, суды биологиялық тазарту жүйесін автоматтандыру қарастырылады. Жұмыстың негізгі мақсаты – тазалау процесінің өзгертін жағдайларына бейімделе алатын анық емес контроллерді өзірлеу. Бұлыңғыр логиканы енгізу тазалау процесіне әсер ететін көптеген факторларды ескере отырып, басқару тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Жұмыста сорғылардың, азрациялық жүйелердің жұмысын оңтайландыру және реагенттерді беру үшін басқарудың анық емес ережелері мен оларды жүзеге асыру тәсілдері ұсынылған.

Методология: Әдістеме қолданыстағы тазалау әдістерін талдауды, анық емес басқару жүйесін өзірлеуді, оны модельдеуді және эксперименттік тексеруді қамтиды. Алдымен заманауи технологиялар және олардың автоматтандыру әлеуеті зерттеледі. Содан кейін сараптамалық мәліметтер мен математикалық модельдерге негізделген анық емес басқару ережелері қалыптасады. Әрі қарай, жүйе өнімділікті тексеру үшін модельденеді, соңында зертханалық немесе өндірістік қондырғыларда эксперименттік тестілеуден өтеді.

Негізгі нәтижелер: Қоршаған орта параметрлерінің өзгеруіне бейімделуге мүмкіндік беретін бұлыңғыр логика негізінде суды биологиялық тазартуды басқарудың автоматтандырылған жүйесі жасалды. Жүйенің жұмысын модельдеу жүргізілді, бұл оның сорғылардың, азрациялық жүйелердің жұмысын және реагенттердің берілуін дұрыс реттеу қабілетін растады. Эксперименттік зерттеулер бұлыңғыр логиканы қолдану тазалау процесінің тұрақтылығын арттыруға, электр энергиясын тұтынуды азайтуға және оператордың араласуын азайтуға мүмкіндік беретінін көрсетті.

Негізгі тұжырымдар: Суды биологиялық тазартуды автоматтандыруда бұлыңғыр логиканы қолдану процестерді икемді және тиімді басқаруға мүмкіндік береді. Өзірленген бұлыңғыр контроллер өзгертін жағдайларға жоғары бейімделуді көрсетті және тазарту қондырғыларының жұмысын оңтайландыруға мүмкіндік берді. Әрі қарайғы зерттеулер анық емес ережелер базасын

кеңейтуге, жүйені басқарудың басқа технологияларымен интеграциялауға және оның өнеркәсіптік жағдайларда экономикалық орындылығын бағалауға бағытталатын болады.

Түйін сөздер: автоматты басқару, биологиялық суды тазарту, бұлыңғыр логика, бейімделу жүйелері, тазарту қондырғылары, модельдеу, экологиялық қауіпсіздік.

Кіріспе

Суды биологиялық тазарту су ресурстарының экологиялық қауіпсіздігі мен сапасын қамтамасыз етудегі маңызды кезең болып табылады. Бұл процестерді басқарудың дәстүрлі әдістері айтарлықтай шығындар мен тұрақты бақылауды қажет етеді, бұл олардың тиімділігін төмендетеді. Адаптивті әдістер мен анық емес логикаға негізделген автоматтандырылған басқару жүйелерін енгізу тазалаудың сапасы мен тұрақтылығын айтарлықтай жақсартуға қабілетті.

Ағынды суларды биологиялық тазартуды басқарудың автоматтандырылған жүйелері тазарту процестерінің тиімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік береді. [1] жұмыста аэротенктегі өндірістік ағынды суларды биологиялық тазарту процесін басқару жүйесі ұсынылған. Ұсынылған жүйені енгізу тазалау сапасының көрсеткіштерін тұрақтандыруды, динамикалық тербелістерді азайтуды және ластаушы заттардың концентрациясын басқарудағы статикалық қатені болдырмауды қамтамасыз етті.

Денитрификация процестері ағынды сулардағы биогендік элементтердің мөлшерін азайтуда маңызды рөл атқарады. [2] зерттеу бұл процесті автоматтандыру нитрат концентрациясын азайтуға мүмкіндік беретінін көрсетті, бұл су объектілерінің "гүлденуіне" жол бермеу үшін өте маңызды. Математикалық модельдерді әзірлеу және өтпелі процестерді жуықтау өзгермелі тазалау жағдайларына бейімделетін алгоритмдер жасауға мүмкіндік берді.

Биологиялық тазалаудың тиімділігін арттыру үшін айналмалы аппараттарды қолдану мүмкіндігі [3] жұмыста қарастырылған. Әзірленген функционалды автоматты басқару схемасы оттегімен қанықтыруды және микроорганизмдердің белсенділігін жақсартады, бұл энергия шығындарын төмендету кезінде жоғары тазарту стандарттарына қол жеткізуге ықпал етеді.

Ағынды сулардағы pH-ны реттеу оларды тазартудың маңызды аспектісі болып табылады. [4] жұмыста бұлыңғыр логикаға негізделген тәсіл ұсынылған, бұл процестің сызықтық емес және күрделі динамикалық сипаттамаларын ескеруге мүмкіндік береді. Бұл әдіс әсіресе ағынды сулардың өзгеруіне және құрамына пайдалы.

Адаптивті басқару әдістері нейрондық желілерді қолдану арқылы тазарту процестерін басқаруда қолданылады. [5] зерттеу тазарту жүйелерінің бейімделуі мен тұрақтылығын арттыратын толық емес ақпарат жағдайында процестерді модельдеу және оңтайландыру әдістемесін ұсынады.

Гибридті нейрондық желілерді пайдалану ағынды суларды биологиялық тазартуды басқаруда тиімді екендігі дәлелденді. [6] жұмыс мұндай модельдер есептеу көлемін азайтуға және күрделі басқару алгоритмдерін жүзеге асыруды жеңілдетуге мүмкіндік беретіндігін көрсетеді.

Инновациялық автоматты тазалау жүйелерін жобалау [7] зерттеуде қарастырылады. Заманауи аэрация технологиялары және тазарту процестерін көп деңгейлі басқару пайдалану шығындарын азайтуға және тазарту қондырғыларының тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Жаңа [8] жұмысты талдау автоматтандырылған ағынды суларды тазарту жүйелеріне бұлыңғыр логиканы енгізу энергия шығынын азайту кезінде шығыс ағынының сапасын жақсартуға мүмкіндік беретінін көрсетті. Зерттеу ағынды сулардағы аммоний мен жалпы азот деңгейін бақылауға негізделген басқару жүйесін ұсынады, бұл энергияны тұтынуды азайтады және биологиялық тазарту тиімділігін арттырады.

[9] зерттеу өнеркәсіптік ағынды суларды тазарту процестерінде ион алмасу шайырларын қолдануды қарастырады. Бұлыңғыр логика әдістеріне негізделген әзірленген басқару жүйесі шайырларды қалпына келтіру процестерін автоматтандыруға, қуат тұтынуды азайтуға және ағынды суларды тазарту қондырғыларының тұрақтылығын жақсартуға мүмкіндік береді.

Ағынды суларды аэробты тазарту процесін бақылау үшін түсініксіз логикаға негізделген басқару жүйелерін сәтті қолдануды [10] жұмыс көрсетеді. Зерттеу көрсеткендей, интеллектуалды жүйелер өзгертін жағдайларға бейімделуге және ластаушы заттарды кетіру тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Әдістеме

Ағынды суларды биологиялық тазарту процестері органикалық қосылыстарды ыдырататын және құрамында азот бар ластаушы заттарды кетіретін микроорганизмдердің белсенділігіне негізделген. Мұндай жүйелердің тиімді жұмыс істеуінің негізгі аспектілерінің бірі аэрацияны басқару болып табылады, өйткені оттегімен қамтамасыз ету бактериялардың тіршілік әрекетіне және тазарту сапасына әсер етеді. Алайда, биологиялық жүйелердегі процестердің динамикасы күрделі, сызықты емес және сыртқы бұзылуларға бейім. Осыған байланысты дәстүрлі басқару әдістерін қолдану әрдайым оңтайлы нәтиже бермейді.

Суды биологиялық тазарту процесін басқаруды зерттеу үшін бұлыңғыр логика таңдалды, өйткені ол жүйенің икемділігі мен бейімделуін қамтамасыз ете алады, көптеген факторлар мен олардың өзара әсерін ескеруге мүмкіндік береді. Белгісіздікпен жұмыс лингвистикалық айнымалылар мен анық емес ережелерді қолдану арқылы мүмкін болады, бұл басқару алгоритмдерін тазарту қондырғылары операторларының сараптамалық тәжірибесіне жақындатады. Дәстүрлі аналитикалық басқару модельдерін сызықтық емес және динамикалық параметрлердің өзгеруіне байланысты жүзеге асыру қиын, ал бұлыңғыр логика егжей-тегжейлі математикалық модельдеуді қажет етпестен жүйенің күйлерінің кең ауқымын ескеруге мүмкіндік береді.

Басқару жүйесін дамыту үшін үш кіріс параметрі таңдалды: еріген оттегі деңгейі, аммоний концентрациясы және тотығу-тотықсыздану потенциалы. Бұл параметрлер биологиялық тазартудың тиімділігін бағалау үшін өте маңызды және нақты уақыт режимінде аэрация процесін реттеуге мүмкіндік береді (1 сурет).

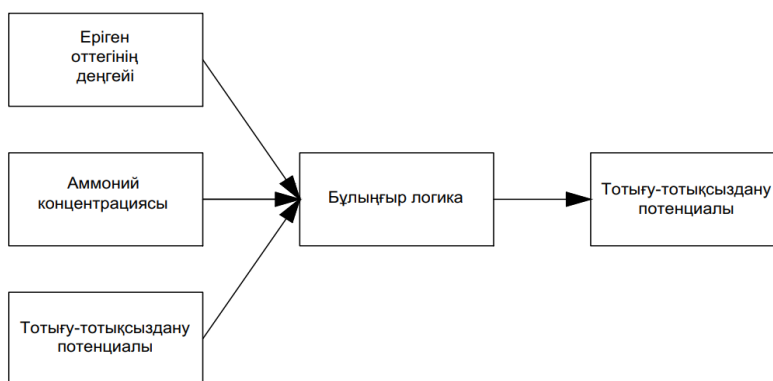
1. *Еріген оттегі деңгейі*: бұл параметр биологиялық тазарту күйінің негізгі көрсеткіші болып табылады. Оттегінің төмен деңгейі органикалық заттар мен аммонийдің тотығу процесінің баяулауына немесе толық тоқтауына әкелуі мүмкін, бұл тазарту тиімділігін төмендетеді. Оттегінің тым жоғары деңгейі энергияны шамадан тыс тұтынуға әкелуі мүмкін, бұл аэрацияны реттеуді өте маңызды етеді. Оттегінің оңтайлы деңгейі Ағынды суларды тазартудың жоғары сапасын қамтамасыз ете отырып, аэробты бактериялардың белсенділігін сақтайды.

2. *Аммоний концентрациясы*: аммоний (NH_4^+) – органикалық қосылыстардың ыдырау өнімі және ағынды сулардың ластануының көрсеткіші. Жоғары концентрация аммонийдің нитриттерге және одан әрі нитраттарға айналу процесіне жауап беретін нитрификатор бактерияларының жеткіліксіз белсенділігін көрсетеді. Аммоний концентрациясын бақылау биологиялық тазартудың тұрақты процесін қамтамасыз ету және ластаушы заттардың қоршаған ортаға шығарылуын болдырмау үшін қажет.

3. *Тотығу-тотықсыздану потенциалы (ТТП)*: бұл параметр тотығу процестерінің қарқындылығын және қоршаған ортаның аэробтылық деңгейін сипаттайды. Тотығу-тотықсыздану потенциалы төмен мәндері оттегінің жетіспеушілігін және анаэробты процестердің басым болуын көрсетеді, бұл күкіртсутек сияқты қажетсіз қосылыстардың пайда болуына әкелуі мүмкін. Жоғары мәндер тиімді тазартуға ықпал ететін ортаның жеткілікті оттегімен қанықтылығын көрсетеді. OVP оңтайлы диапазоны аэрацияны реттеуге және аэробты және анаэробты процестер арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Басқару жүйесінің шығысы – *аэрация жүйесіне оттегінің берілу қарқындылығы*. Ол кіріс параметрлеріне байланысты реттеледі және бұлыңғыр ережелерді ескере отырып есептеледі. Нәтижесінде жүйе тиімді биологиялық процестерді қолдау үшін оттегінің оңтайлы мөлшерін қамтамасыз ете отырып, өзгертін жағдайларға бейімделеді. Осылайша, Шығыс әр уақытта аэрация деңгейін анықтайтын динамикалық өзгертін мән болып табылады.

Лингвистикалық айнымалыларды қолдану бас инженер, технолог, тазарту қондырғысының операторы және су сапасын бақылау жөніндегі маман сияқты тазарту қондырғысы мамандарының сараптамалық пікірін ескеруге мүмкіндік береді. Бұлыңғыр мәндерді қолдану биологиялық тазартудың динамикалық процестерін дәл сипаттаудың күрделілігіне, сондай-ақ сыртқы факторлардың әсерінен параметрлердің жоғары өзгергіштігіне байланысты.



Сурет 1 – Параметрлердің өзара әсері

Әрбір кіріс параметрі үшін тиістілік функциялары анықталды (1 кесте):

1. *Еріген оттегінің деңгейі* (DO , мг/л) – аэробты микроорганизмдердің белсенділігіне әсер ететін негізгі фактор. Оның концентрациясына байланысты келесі жағдайлар бөлінеді:

– Төмен (0-3 мг/л) – оттегінің жеткіліксіз қанығуы, нитрификация процестерінің баяулауы.

$$\mu_{\text{төмен}}(DO) = \begin{cases} 1, & DO \leq 1 \\ \frac{3 - DO}{2}, & 1 < DO < 3 \\ 0, & DO \geq 3 \end{cases};$$

– Орташа (2-6 мг/л) – тиімді биологиялық тазартуды қолдайтын оңтайлы диапазон.

$$\mu_{\text{орта}}(DO) = \begin{cases} 0, & DO \leq 2 \text{ немесе } DO \geq 6 \\ \frac{DO - 2}{2}, & 2 < DO \leq 4 \\ \frac{6 - DO}{2}, & 4 < DO \leq 6 \end{cases};$$

– Жоғары (5-10 мг/л) – артық оттегі, бұл артық қуат тұтынуға әкелуі мүмкін.

$$\mu_{\text{жоғары}}(DO) = \begin{cases} 0, & DO \leq 5 \\ \frac{3 - DO}{2}, & 5 < DO < 7 \\ 1, & DO \geq 7 \end{cases}.$$

2. *Аммоний концентрациясы* (NH_4^+ , мг/л) – судың азот қосылыстарымен ластану дәрежесінің және нитрификация процесінің тиімділігінің көрсеткіші:

– Төмен (0-2 мг/л) – Ағынды суларды сапалы тазартуды көрсетеді.

$$\mu_{\text{төмен}}(NH_4^+) = \begin{cases} 1, & NH_4^+ \leq 1 \\ \frac{2 - NH_4^+}{2}, & 1 < NH_4^+ < 2 \\ 0, & NH_4^+ \geq 2 \end{cases};$$

– Орташа (1-5 мг/л) - жүйенің қалыпты жұмысын көрсететін рұқсат етілген деңгей.

$$\mu_{\text{орта}}(NH_4^+) = \begin{cases} 0, & NH_4^+ \leq 1 \text{ немесе } NH_4^+ \geq 5 \\ \frac{NH_4^+ - 1}{2}, & 1 < NH_4^+ \leq 3 \\ \frac{5 - NH_4^+}{2}, & 3 < NH_4^+ \leq 5 \end{cases};$$

– Жоғары (4-10 мг/л) – нитрификация тиімділігі жеткіліксіз, аэрацияны түзету қажет.

$$\mu_{\text{жоғары}}(NH_4^+) = \begin{cases} 0, & NH_4^+ \leq 4 \\ \frac{NH_4^+ - 4}{2}, & 4 < NH_4^+ < 6 \\ 1, & NH_4^+ \geq 6 \end{cases}.$$

3. *Тотығу-тотықсыздану потенциалы* (ORP , мВ) – тотығу процестерінің дәрежесін және қоршаған ортаның аэробтық деңгейін көрсетеді:

– Төмен (<100 мВ) – анаэробты жағдайлардың басым болуы, қажетсіз қосылыстардың пайда болуы.

$$\mu_{\text{төмен}}(\text{ORP}) = \begin{cases} 1, & \text{ORP} \leq 80 \\ \frac{120 - \text{ORP}}{40}, & 80 < \text{ORP} < 120 \\ 0, & \text{ORP} \geq 120 \end{cases};$$

– Орташа (100-200 мВ) – биохимиялық процестердің қалыпты ағымына сәйкес келетін теңдестірілген күй.

$$\mu_{\text{орта}}(\text{ORP}) = \begin{cases} 0, & \text{ORP} \leq 100 \text{ немесе } \text{ORP} \geq 200 \\ \frac{\text{ORP} - 100}{50}, & 100 < \text{ORP} \leq 150 \\ \frac{200 - \text{ORP}}{50}, & 150 < \text{ORP} \leq 200 \end{cases};$$

– Жоғары (200-300 мВ) – биологиялық тазарту үшін қолайлы аэробты жағдайлар.

$$\mu_{\text{жоғары}}(\text{ORP}) = \begin{cases} 0, & \text{ORP} \leq 180 \\ \frac{\text{ORP} - 180}{50}, & 180 < \text{ORP} < 230 \\ 1, & \text{ORP} \geq 230 \end{cases};$$

– Өте жоғары (>300 мВ) – артық аэрация, бұл негізсіз энергия шығындарына әкелуі мүмкін.

$$\mu_{\text{өте жоғары}}(\text{ORP}) = \begin{cases} 0, & \text{ORP} \leq 250 \\ \frac{\text{ORP} - 250}{50}, & 250 < \text{ORP} < 300 \\ 1, & \text{ORP} \geq 300 \end{cases}.$$

Шығу параметрі – *аэрация қарқындылығы (%)*, жүйеге оттегінің берілуін анықтайды және кіріс негізінде реттеледі:

- Төмен (0-25%) – жақсы тазалау сапасымен оттегінің минималды жеткізілуі.
- Орташа (20-50%) – теңдестірілген аэрациялық әсер.
- Жоғары (40-70%) – тазарту процестерін қолдау үшін қарқындылықты арттыру.
- Өте жоғары (60-90%) – жоғары ластану деңгейінде оттегімен қарқынды қанықтыру.
- Максималды (80-100%) – ластаушы заттардың өте жоғары концентрациясында шұғыл аэрация режимі.

Кесте 1 – Айнымалылардың тиістілік функциясы

Лингвистикалық айнымалы	Тиістілік функциясы
Төмен	$\mu_{\text{төмен}}(A) = \begin{cases} 1, & A \leq 10 \\ \frac{25 - A}{15}, & 10 < A < 25 \\ 0, & A \geq 25 \end{cases}$
Орташа	$\mu_{\text{орта}}(A) = \begin{cases} 0, & A \leq 20 \text{ немесе } A \geq 50 \\ \frac{A - 20}{15}, & 20 < A \leq 35 \\ \frac{50 - A}{15}, & 35 < A \leq 50 \end{cases}$
Жоғары	$\mu_{\text{жоғары}}(A) = \begin{cases} 0, & A \leq 40 \\ \frac{A - 40}{15}, & 40 < A < 55 \\ 1, & A \geq 55 \end{cases}$
Өте жоғары	$\mu_{\text{өте жоғары}}(A) = \begin{cases} 0, & A \leq 60 \\ \frac{A - 60}{15}, & 60 < A < 75 \\ 1, & A \geq 75 \end{cases}.$
Максималды	$\mu_{\text{өте жоғары}}(A) = \begin{cases} 0, & A \leq 80 \\ \frac{A - 80}{10}, & 80 < A < 90 \\ 1, & A \geq 90 \end{cases}.$

Лингвистикалық айнымалылар мен анық емес мүшелік функцияларын пайдалану тазарту жүйесіндегі белгісіздіктер мен динамикалық өзгерістерді ескеруге мүмкіндік береді. Бұл тәсіл басқару алгоритмдерін сараптамалық шешім қабылдау әдістеріне жақындатады және жүйенің бейімделуін қамтамасыз етеді, минималды энергия шығындарымен тазарту процестерінің тиімділігін арттырады (2 кесте).

Одан кейін аэрация процесін басқарудың бұлыңғыр ережелерінің негізі қалыптасады. Әрбір ереже кіріс параметрлерін шығыс параметрімен байланыстырады, бұл жүйеге нақты уақыт режимінде өзгертін жағдайларға бейімделуге мүмкіндік береді. Ережелерді қалыптастыру сараптамалық мәліметтер мен технологиялық процесті талдауға негізделген.

Мысалы, егер еріген оттегінің (DO) деңгейі төмен болса, аммоний концентрациясы (NH_4^+) жоғары болса және тотығу-тотықсыздану потенциалы (ORP) төмен болса, онда аэрация қарқындылығы максималды болуы керек.

Кесте 2 – Айнымалылардың тиістілік функциясы

Ереже № № правил	Кіріс шамалар			Шығыс шамала р	Ереже № № правил	Кіріс шамалар			Шығыс шамалар
	Еріген оттегінің деңгейі	Аммоний концентра- циясы	Тотығу- тотықсыз дану потен- циалы	Еріген оттегінің деңгейі		Еріген оттегінің деңгейі	Аммоний концентра- циясы	Тотығу- тотықсыздану потенциалы	Еріген оттегінің деңгейі
1	Төмен	Төмен	Төмен	Жоғары	19	Орта	Орта	Жоғары	Орта
2	Төмен	Төмен	Орта	Жоғары	20	Орта	Орта	Өте жоғ	Орта
3	Төмен	Төмен	Жоғары	Орта	21	Орта	Жоғары	Төмен	Өте жоғ
4	Төмен	Төмен	Өте жоғ	Орта	22	Орта	Жоғары	Орта	Жоғары
5	Төмен	Орта	Төмен	Өте жоғ	23	Орта	Жоғары	Жоғары	Жоғары
6	Төмен	Орта	Орта	Өте жоғ	24	Орта	Жоғары	Өте жоғ	Орта
7	Төмен	Орта	Жоғары	Жоғары	25	Жоғары	Төмен	Төмен	Төмен
8	Төмен	Орта	Өте жоғ	Жоғары	26	Жоғары	Төмен	Орта	Төмен
9	Төмен	Жоғары	Төмен	Максимал	27	Жоғары	Төмен	Жоғары	Төмен
10	Төмен	Жоғары	Орта	Өте жоғ	28	Жоғары	Төмен	Өте жоғ	Төмен
11	Төмен	Жоғары	Жоғары	Жоғары	29	Жоғары	Орта	Төмен	Орта
12	Төмен	Жоғары	Өте жоғ	Жоғары	30	Жоғары	Орта	Орта	Орта
13	Орта	Төмен	Төмен	Орта	31	Жоғары	Орта	Жоғары	Төмен
14	Орта	Төмен	Орта	Орта	32	Жоғары	Орта	Өте жоғ	Төмен
15	Орта	Төмен	Жоғары	Төмен	33	Жоғары	Жоғары	Төмен	Жоғары
16	Орта	Төмен	Өте жоғ	Төмен	34	Жоғары	Жоғары	Орта	Орта
17	Орта	Орта	Төмен	Жоғары	35	Жоғары	Жоғары	Жоғары	Төмен
18	Орта	Орта	Орта	Жоғары	36	Жоғары	Жоғары	Өте жоғ	Төмен

Технологиялық қолдану

Ағынды суларды биологиялық тазартуды басқаруда бұлыңғыр логиканы қолдану Ағынды суларды тазарту қондырғыларында болып жатқан процестердің күрделілігі мен сызықтықпеностігіне байланысты. Қатты математикалық модельдерге негізделген дәстүрлі автоматты басқару әдістері әрқашан қоршаған орта параметрлеріндегі барлық мүмкін өзгерістерді есепке ала бермейді. Олардан айырмашылығы, бұлыңғыр логика басқару процесін сараптамалық тәжірибеге жақындата отырып, белгісіздік жағдайында тиімді жұмыс істейді.

Аэрацияны басқаруда бұлыңғыр логиканы қолданудың негізгі артықшылықтары:

- Жүйенің икемділігі: нақты уақыттағы өзгертін жағдайларға бейімделу мүмкіндігі.
- Модельдеуді жеңілдету: күрделі математикалық есептеулердің қажеті жоқ.
- Ресурстарды үнемдеу: оттегімен қамтамасыз етуді оңтайландыру аэрацияның энергия шығынын азайтады.
- Мазасыздыққа төзімділік: жүйе ағынды сулардың параметрлерінің өзгеруімен тиімді күреседі.

Басқа технологиялармен салыстыру

Дәл баптауды қажет ететін және сызықтық емес процестерге жақсы бейімделмейтін дәстүрлі PID реттегіштерінен айырмашылығы, бұлыңғыр логика икемділікке ие және қатаң

математикалық модельдеуді қажет етпейді. Нейрондық желілермен салыстырғанда, оны жүзеге асыру оңайырақ және күрделі көп параметрлік тәуелділіктерде дәл олардан төмен болса да, оқу деректерінің үлкен көлемін қажет етпейді. Модельдік болжамды басқарумен (MPC) салыстырғанда, бұлыңғыр логика ресурстарды аз қажет етеді және өзгерістерге тезірек жауап береді, бұл оны ағынды суларды биологиялық тазартуды басқарудың тиімді және қол жетімді құралы етеді.

Пайдалану перспективалары

Ағынды суларды биологиялық тазартуды басқару жүйелерінде бұлыңғыр логиканы қолдану белсенді дамуды жалғастыруда. Жетілдірудің мүмкін бағыттары:

- Тарихи деректерге негізделген анық емес ережелерді автоматты түрде оңтайландыру үшін нейрондық желілермен және машиналық оқыту әдістерімен интеграция.
- Бұлыңғыр логика мен болжау әдістерін біріктіретін гибриді жүйелерді әзірлеу, бұл тазалау параметрлерінің өзгеруін дәлірек болжауға мүмкіндік береді.
- Ақылды қалаларда және сумен жабдықтау жүйелерінде қолдануды кеңейту, мұнда жүктемеге байланысты тазарту процестерін динамикалық реттеу маңызды.

Мұндай технологияларды енгізу экологиялық қауіпсіздікті арттыруға, энергия шығынын азайтуға және суды тазарту сапасын жақсартуға мүмкіндік береді, бұл процестерді тиімдірек және тұрақты етеді.

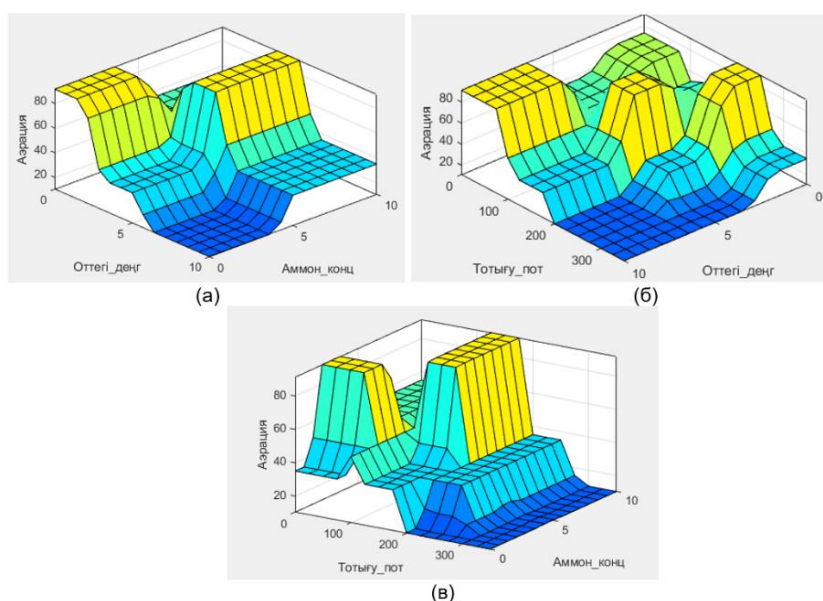
Нәтижелер

Мамдани алгоритмін модельдеудің және қолданудың барлық кезеңдерін орындағаннан кейін ағынды суларды биологиялық тазарту процесінде азрацияны басқарудың бұлыңғыр жүйесі құрылды. Есептеулер барысында кіріс параметрлерінің тиесілік деңгейлері (еріген оттегі, аммоний концентрациясы, тотығу-тотықсыздану потенциалы) анықталды және оттегінің берілу қарқындылығын динамикалық реттеуге мүмкіндік беретін басқару ережелері әзірленді.

Модель белгілі бір кезеңдегі тазарту қондырғыларының жұмысын сипаттайтын мәліметтерге тексерілді. Нәтижелер жүйенің су параметрлерінің өзгеруіне байланысты азрацияны дұрыс бейімдейтінін көрсетті, бұл микроорганизмдердің тиімді жұмыс істеуі үшін оттегінің оңтайлы деңгейін қамтамасыз етеді.

Жекелеген жағдайларды талдау кезінде аммонийдің жоғары концентрациясында және еріген оттегінің төмен деңгейінде жүйе нитрификация процестерінің тиімді жүруіне ықпал ете отырып, оттегінің берілуін арттыратыны анықталды. Керісінше, аммоний концентрациясы төмен және тотығу-тотықсыздану потенциалы жоғары болған кезде азрация қарқындылығы төмендейді, бұл тазарту сапасының нашарлауынсыз энергия шығынын азайтады.

Бұлыңғыр азрацияны басқару жүйесінің жұмысын көрнекі түрде көрсету үшін кіріс параметрлерінің шығыс сигналымен – оттегінің берілу қарқындылығымен байланысын көрсететін үш өлшемді графиктер салынды (2 сурет).



Сурет 2 – Кіріс параметрлерінің шығыс сигналымен байланысы

Атап айтқанда, азрация деңгейінің кіріс айнымалыларының әртүрлі комбинацияларына тәуелділігін көрсететін үш график ұсынылған:

– азрацияның еріген оттегі деңгейіне және аммоний концентрациясына тәуелділігі (2 а – сурет);

– азрацияның еріген оттегі деңгейіне және тотығу-тотықсыздану потенциалына тәуелділігі (2 б – сурет);

– азрацияның аммоний концентрациясына және тотығу-тотықсыздану потенциалына тәуелділігі (2 в – сурет).

Бұл визуализациялар негізгі параметрлердің әртүрлі мәндерінде азрация қарқындылығының қалай өзгередінін бағалауға және әзірленген анық емес басқару моделінің сәйкестігін растауға мүмкіндік береді.

Талқылау

Бұлыңғыр логикаға негізделген азрацияны басқарудың дамыған жүйесі Ағынды суларды биологиялық тазартудың өзгертін жағдайларына бейімделуде өзінің тиімділігін көрсетті. Қатаң математикалық модельдер мен нақты деректерді қажет ететін дәстүрлі реттеу әдістерінен айырмашылығы, бұлыңғыр логика белгісіздіктерді ескеруге және параметрлердің шамамен мәндерімен жұмыс істеуге мүмкіндік береді.

Нәтижелер ұсынылған тәсіл еріген оттегінің деңгейіне, аммоний концентрациясына және тотығу-тотықсыздану потенциалына байланысты оттегінің берілу қарқындылығын реттеуге қабілетті екенін растайды. Нәтижелердің графикалық көрінісі қабылданған басқарушы шешімдердің қисындылығы мен дұрыстығын көрсетеді.

Дегенмен, әдістің шектеулері де бар. Бұлыңғыр жүйенің дәлдігі көбінесе дұрыс қалыптасқан ережелер базасына және тиістілік функцияларына байланысты. Нақты жағдайда модельде ескерілмеген жағдайлар туындауы мүмкін, бұл жүйені қосымша конфигурациялауды қажет етеді. Жинақталған мәліметтер негізінде ережелер базасын автоматты түрде жаңарту үшін машиналық оқыту әдістерін біріктіру одан әрі дамудың мүмкін бағыты болып табылады.

Қорытынды

Бұл жұмыста ағынды суларды биологиялық тазарту процесінде азрацияны басқарудың бұлыңғыр жүйесі жасалды. Үш кіріс параметріне негізделген-еріген оттегі деңгейі, аммоний концентрациясы және тотығу-тотықсыздану потенциалы – жүйе минималды энергия шығынымен тиімді тазартуды қамтамасыз ете отырып, оттегінің оңтайлы берілу қарқындылығын анықтайды.

Салынған үш өлшемді графиктер модельдің жұмысының жеткіліктілігін көрсетті, ал алынған деректерді талдау жүйенің өзгертін жағдайларға бейімделу қабілетін растады. Бұлыңғыр логиканы қолдану тазарту процестерінің күрделі динамикасын ескеруге және күрделі математикалық есептеулердің қажеттілігін болдырмауға мүмкіндік берді.

Әрі қарайғы зерттеулердің перспективалық бағыты адаптивті алгоритмдер мен машиналық оқыту арқылы модельді жетілдіру, сондай-ақ тазарту параметрлерін дәлірек реттеу үшін жүйенің су сапасын бағалаудың болжамды әдістерімен интеграциясы болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Баулин Е.С. Автоматизация процесса биологической очистки промышленных сточных вод в аэротенке-вытеснителе / Е.С. Баулин, М.А. Назаров // Материалы конференции. – Самара, 2023. – С. 388-389.
2. Мухетов Д.В. Автоматизация процесса денитрификации при биологической очистке сточных вод / Д.В. Мухетов, М.А. Назаров // Материалы конференции. – Самара, 2023. – С. 392-393.
3. Денисов С.Е. Автоматизация и управление процессом биологической очистки сточных вод / С.Е. Денисов, С.П. Максимов, Т.А. Микляева // Естественные и математические науки в современном мире: сб. ст. по матер. XXX междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СИБАК. – 2015. – № 5(29).
4. Иванов П.П. Автоматизация процесса регулирования pH в схеме очистки карьерных сточных вод угледобывающих предприятий / П.П. Иванов, С.Г. Пачкин, В.П. Иванова // Научно-технический и производственно-экономический журнал «Уголь». – 2024. – № 07- /1182/. – С. 84-90.

5. Воробьева М.Д. Интеллектуальные системы управления очисткой сточных вод с применением нейронных сетей, 2023.
6. Мурачев Е.Г. Методика построения системы управления технологическим процессом биологической очистки сточных вод на основе гибридных нейронных сетей / Е.Г. Мурачев, Г.М. Холодов, О.И. Солопова // Известия МГТУ «МАМИ» – 2009. – № 2(8). – С. 231-234.
7. Проектирование и разработка инновационной автоматической системы биологической очистки сточных вод / Ю.В. Бебихов и др. // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 7. – С. 136-142.
8. Плехов В.Г. Автоматизация процессов биологической очистки сточных вод предприятий нефтяной промышленности / В.Г. Плехов, В.В. Дьяченко, И.Л. Дьяченко // Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2024. – С. 22-33.
9. Kumar S. A supervisory fuzzy logic control scheme to improve effluent quality of a wastewater treatment plant / S. Kumar, K. Latha // Water Science & Technology. – 2021. – Vol. 84, № 10-11. – P. 3415-3420.
10. Control of Wastewater Treatment Processes Using a Fuzzy Logic Approach / J. Eshbobaev et al // Engineering Proceedings. – 2024. – Vol. 69. – P. 39.

References

1. Baulin E.S. Avtomatizatsiya protsessa biologicheskoi ochistki promyshlennykh stochnykh vod v aehrotenke-vytesnitate / E.S. Baulin, M.A. Nazarov // Materialy konferentsii. – Samara, 2023. – S. 388-389. (In Russian).
2. Mukhetov D.V. Avtomatizatsiya protsessa denitrifikatsii pri biologicheskoi ochistke stochnykh vod / D.V. Mukhetov, M.A. Nazarov // Materialy konferentsii. – Samara, 2023. – S. 392-393. (In Russian).
3. Denisov S.E. Avtomatizatsiya i upravlenie protsessom biologicheskoi ochistki stochnykh vod / S.E. Denisov, S.P. Maksimov, T.A. Miklyaeva // Estestvennye i matematicheskie nauki v sovremennom mire: sb. st. po mater. XXX mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – Novosibirsk: SiBAK. – 2015. – № 5(29). (In Russian).
4. Ivanov P.P. Avtomatizatsiya protsessa regulirovaniya RN v skheme ochistki kar'ernykh stochnykh vod ugledobyvayushchikh predpriyatii / P.P. Ivanov, S.G. Pachkin, V.P. Ivanova // Nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvenno-ehkonomicheskii zhurnal «Ugol». – 2024. – № 07- /1182/. – S. 84-90. (In Russian).
5. Vorob'eva M.D. Intel'ktual'nye sistemy upravleniya ochistkoi stochnykh vod s primeneniem neironnykh setei, 2023. (In Russian).
6. Murachev E.G. Metodika postroeniya sistemy upravleniya tekhnologicheskim protsessom biologicheskoi ochistki stochnykh vod na osnove gibridnykh neironnykh setei / E.G. Murachev, G.M. Kholodov, O.I. Solopova // Izvestiya MGTU «MA MI» – 2009. – № 2(8). – S. 231-234. (In Russian).
7. Proektirovanie i razrabotka innovatsionnoi avtomaticheskoi sistemy biologicheskoi ochistki stochnykh vod / YU.V. Bebikhov i dr. // Innovatsii i investitsii. – 2023. – № 7. – S. 136-142. (In Russian).
8. Plekhov V.G. Avtomatizatsiya protsessov biologicheskoi ochistki stochnykh vod predpriyatii neftyanoi promyshlennosti / V.G. Plekhov, V.V. D'yachenko, I.L. D'yachenko // Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet. – 2024. – S. 22-33. (In Russian).
9. Kumar S. A supervisory fuzzy logic control scheme to improve effluent quality of a wastewater treatment plant / S. Kumar, K. Latha // Water Science & Technology. – 2021. – Vol. 84, № 10-11. – P. 3415-3420. (In English).
10. Control of Wastewater Treatment Processes Using a Fuzzy Logic Approach / J. Eshbobaev et al // Engineering Proceedings. – 2024. – Vol. 69. – P. 39. (In English).

Е.С. Талмурзин¹, Г.Д. Базил¹, А.А. Абсатарова¹, Е.Ж. Оракбаев¹, Е.А.Оспанов^{2*}

¹Алматинский Университет Энергетики и Связи имени Гумарбека Даукеева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Байтурсынова, 126/1.

²Университет Шакарим,
071404, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глиники, 20а.

*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКОЙ ВОДЫ

Аннотация: В данной статье рассматривается автоматизация системы биологической очистки воды с использованием нечеткой логики. Основной целью работы является разработка нечеткого контроллера, способного адаптироваться к изменяющимся условиям процесса очистки. Внедрение нечеткой логики позволяет улучшить эффективность управления, учитывая множество факторов, влияющих на процесс очистки. В статье предложены нечеткие правила управления для оптимизации работы насосов, аэрационных систем и подачи реагентов, а также методы их реализации.

Методология: Методология включает в себя анализ существующих методов очистки, разработку нечеткой системы управления, ее моделирование и экспериментальную проверку. Сначала исследуются современные технологии и их потенциал для автоматизации. Затем на основе экспертных данных и математических моделей разрабатываются нечеткие правила управления. Далее система моделируется для проверки производительности, а в конце проходит экспериментальное тестирование на лабораторных или производственных установках.

Основные результаты: Разработана автоматизированная система управления биологической очисткой воды на основе нечеткой логики, которая позволяет адаптироваться к изменениям параметров окружающей среды. Моделирование работы системы подтвердило ее способность правильно регулировать работу насосов, аэрационных систем и подачу реагентов. Экспериментальные исследования показали, что применение нечеткой логики способствует повышению стабильности процесса очистки, снижению потребления электроэнергии и уменьшению вмешательства оператора.

Основные выводы: Использование нечеткой логики в автоматизации биологической очистки воды позволяет гибко и эффективно управлять процессами. Разработанный нечеткий контроллер продемонстрировал высокую адаптивность к изменяющимся условиям и способствовал оптимизации работы очистных сооружений. Будущие исследования будут направлены на расширение базы нечетких правил, интеграцию с другими технологиями управления системой и оценку экономической целесообразности его применения в промышленных условиях.

Ключевые слова: автоматическое управление, биологическая очистка воды, нечеткая логика, адаптивные системы, очистные сооружения, моделирование, экологическая безопасность.

E.S. Talmurzin¹, G.D. Bazil¹, A.A. Absatarova¹, E.Zh. Orakbayev¹, Y.A. Ospanov^{*}

¹Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev, 050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baytursynov St., 126/1

²Shakarim University,

071404, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinki St., 20a.

*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROL OF WATER BIOLOGICAL TREATMENT

Abstract: This paper deals with the automation of biological water treatment system using fuzzy logic. The main objective of the work is to develop a fuzzy controller capable of adapting to the changing conditions of the purification process. The implementation of fuzzy logic can improve the control efficiency by considering many factors affecting the purification process. The paper proposes fuzzy control rules for optimising the operation of pumps, aeration systems and reagent supply, as well as methods for their implementation.

Methodology: The methodology includes analysis of existing cleaning methods, development of a fuzzy control system, its modelling and experimental validation. First, current technologies and their potential for automation are investigated. Then fuzzy control rules are developed based on expert data and mathematical models. Next, the system is modelled to verify the performance and at the end it is experimentally tested on laboratory or production units.

Main results: An automated control system for biological water treatment based on fuzzy logic has been developed to adapt to changes in environmental parameters. Modelling of the system operation confirmed its ability to properly regulate the operation of pumps, aeration systems and reagent supply. Experimental studies have shown that the use of fuzzy logic helps to increase the stability of the purification process.

Key words: automatic control, biological water treatment, fuzzy logic, adaptive systems, treatment facilities, modelling, environmental safety.

Авторлар туралы мәліметтер

Ерхан Сайранұлы Талмурзин – «Автоматтандыру және басқару» кафедрасының магистранты; Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Қазақстан; e-mail: y.talmurzin@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4917-1345>.

Гулмира Дүйсенбекқызы Бәзіл – PhD, «Автоматтандыру және басқару» кафедрасының профессор-оқытушы, Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Қазақстан; e-mail: g.bazil@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9563-0352>.

Ақерке Алтынбекқызы Абсатарова – «Автоматтандыру және басқару» кафедрасының докторанты; Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Қазақстан; e-mail: a.absatarova@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5316-1768>.

Ербол Жумагельдиевич Оракбаев – PhD, қауымд. профессор (доцент) «Автоматтандыру және басқару» кафедрасының профессор-оқытушы, Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Қазақстан; e-mail: e.orakbaev@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3100-7419>.

Ербол Амангазович Оспанов* – PhD, қауымд. профессор (доцент) «IT технологиялар» кафедрасының ауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университет, Қазақстан; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-274X>.

Сведения об авторах

Ерхан Сайранұлы Талмурзин – магистрант кафедры «Автоматизация и управление», Университет энергетики и связи имени Гумарбек Даукеев, Казахстан; e-mail: y.talmurzin@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4917-1345>.

Гулмира Дуйсенбекқызы Базил – PhD, профессор-преподаватель кафедры «Автоматизации и управления», Университет энергетики и связи имени Гумарбек Даукеев, Казахстан; e-mail: g.bazil@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9563-0352>.

Акерке Алтынбекқызы Абсатарова – докторант кафедры «Автоматизация и управление», Университет энергетики и связи имени Гумарбек Даукеев, Казахстан; e-mail: a.absatarova@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5316-1768>.

Ербол Жумагельдиевич Оракбаев – PhD, ассоц. профессор (доцент) кафедры «Автоматизации и управления», Университет энергетики и связи имени Гумарбек Даукеев, Казахстан; e-mail: e.orakbaev@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3100-7419>.

Ербол Амангазович Оспанов* – PhD, ассоц. профессор (доцент) кафедры «IT технологии», Университет Шакарима, Казахстан; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-274X>.

Information about the authors

Yerhan Sayranuly Talmurzin – Master's student of the Department of «Automation and Control», Gumarbek Daukeev University of Energy and Telecommunications, Kazakhstan; e-mail: y.talmurzin@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4917-1345>.

Gulmira Duyssenbekkyzy Bazil – PhD, professor-teacher of the Department of «Automation and Control», Gumarbek Daukeev University of Energy and Telecommunications, Kazakhstan; e-mail: g.bazil@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9563-0352>.

Akerke Altynbekkizy Absatarova – PhD student of the Department of «Automation and Control», Gumarbek Daukeev University of Energy and Telecommunications, Kazakhstan; e-mail: a.absatarova@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5316-1768>.

Erbol Zhumageldievich Orakbaev – PhD, Associate Professor of the Department of «Automation and Control», Gumarbek Daukeev University of Energy and Telecommunications, Kazakhstan; e-mail: e.orakbaev@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3100-7419>.

Yerbol Amangazovich Ospanov* – PhD, Associate Professor, Shakarim University, Kazakhstan; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5342-274X>.

Редакцияға енуі 02.06.2025

Өңдеуден кейін түсуі 20.08.2025

Жариялауға қабылданды 21.08.2025