

ограничиваются одним языком и имеют более широкие последствия для морфологически чувствительного NLP в низкоресурсных условиях.

Ключевые слова: вычислительная морфология, агглютинативные языки, морфологический анализ, языки с ограниченными ресурсами, формальные лингвистические модели, нейронные языковые модели.

Information about the authors

Aigerim Aitim – PhD, associate-professor of Information Systems Department, International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2982-214X>.

Сведения об авторах

Әйгерім Әйтiм – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Информационные системы», Международный Университет Информационных Технологий, Алматы, Казахстан; e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2982-214X>.

Авторлар туралы мәліметтер

Әйгерім Әйтiм – PhD, «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2982-214X>.

Received 30.03.2026

Revised 20.05.2026

Accepted 21.05.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-15](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-15)



FTAXP: 50.41.25, 50.41.29

Ж.Н. Ергазы*, Қ. Әлімхан, Н.С. Мукатаев

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтпаев көшесі, 2

*e-mail: yergaziyevaaa@gmail.com

СЫЗЫҚТЫ ЕМЕС СЫРТҚЫ ӘСЕРЛЕРІ БАР ЖҮЙЕЛЕРДІ ШЫҒЫС КЕРІ БАЙЛАНЫС АРҚЫЛЫ БЕКІТІЛГЕН УАҚЫТ ІШІНДЕ КЕҢАУҚЫМДЫ ОРНЫҚТАНДЫРУ

Аңдатпа: Екінші ретті сызықты емес динамикалық жүйелер үшін шығыс бойынша кері байланыс негізінде бекітілген уақыттағы орнықтандыру тұжырымдамасына сүйенген басқару алгоритмін синтездеудің жаңа әдісі ұсынылған. Зерттеу күй айнаымалыларына толық қолжетімділік жоқ кеңауқымды жазық сызықты емес объектілер класына бағытталған. Ұсынылған әдістеменің негізін би-шектік біртектілік теориясы мен орнықтандыруды классикалық Ляпуновтық талдау қағидаларын біріктіру құрайды. Осындай тәсіл бастапқы шарттар мен бағалау қателеріне тәуелсіз жүйенің өлшенбейтін күйін кепілді түрде бағалайтын, жинақталу уақыты бекітілген үздіксіз бақылаушыны жасауға мүмкіндік берді. Осы бағалау негізінде жүйені алдын ала берілген бекітілген уақытта орнықтандыруды қамтамасыз ететін үздіксіз реттегіш құрастырылды.

Әдіс бірқатар артықшылықтарға ие: орнықтандыру мен жинақталу бастапқы шарттардың шамасы мен таңбасына тәуелді емес; басқару сигналы үздіксіз болып қалады, бұл атқарушы құрылғылардың дірілін болдырмайды; шектелген сыртқы әсерлер мен өлшеу шударына жоғары робасттылық қамтамасыз етіледі. Алгоритмді жоғары жиілікті дискретизацияны талап етпей-ақ микроконтроллерлерде жүзеге асыруға болады, бұл оны практикалық қолдану үшін тартымды етеді. Мысал ретінде айқын сызықты емес электромеханикалық объект болып табылатын микромеханикалық айна (MEMS mirror) динамикасы қарастырылған. Сандық модельдеу жүргізіліп, оның нәтижелері ұсынылған басқару тиімділігін растайды. Қолданыстағы шекті уақыттағы реттегіштермен салыстырғанда өтпелі үдеріс уақыты төрт еседен артық қысқарған, ал жүйенің ауытқуы мен энергия шығындары шамамен екі есеге азайған. Алынған нәтижелер

©Ж.Н. Ергазы, Қ. Әлімхан, Н.С. Мукатаев, 2026

өзірленген әдісті микро- және макромеханикалық жетектерді жоғары дәлдікпен басқару міндеттерінде, сондай-ақ интеллектуалды робототехникалық және виброоптикалық жүйелерде қолдануға болатынын дәлелдейді.

Түйін сөздер: бекітілген уақыттағы орнықтандыру, би-шектік біртектілік, шығыс бойынша кері байланыс, MEMS-айна, Ляпунов бойынша орнықтылық, сызықты емес басқарылатын объектілер, бақылаушы.

Кіріспе

Соңғы онжылдықтарда сызықты емес динамикалық жүйелерді шекті уақытта орнықтандыру мәселесі басқару теориясы саласындағы мамандардың барған сайын үлкен назарын аударып келеді. Шекті уақыттағы орнықтылық классикалық асимптоталық орнықтылықпен салыстырғанда бірқатар маңызды артықшылықтарды қамтамасыз етеді. Олар: сыртқы әсерлерге жоғары робасттылық, қадағалаудың жоғары дәлдігі және айтарлықтай жоғары жинақталу жылдамдығы [1]. Бұл қасиеттер шекті уақытта қозғалатын реттегіштерді басқару жүйелерінен бастап күштік электроника мен өнеркәсіптік робототехникаға дейінгі кең ауқымды қолданбалар үшін тартымды етеді [2, 3].

Сонымен қатар, шекті уақыттағы орнықтандыру әдістерінің елеулі кемшілігі бар. Жинақталу уақыты бастапқы шарттарға тәуелді болады және бастапқы ауытқулар үлкен болған жағдайда қалағанынша үлкен болуы мүмкін. Бұл шектеу нақты уақыт жүйелерінде аса маңызды, өйткені өтпелі үдерістің алдын ала белгіленген уақытта аяқталуы кепілденуі тиіс. Осы кемшілікті жою үшін Поляков [4] бекітілген уақыттағы орнықтылық ұғымын енгізді: егер жүйе шекті уақытта орнықты болып, жинақталу уақыты бастапқы күйге тәуелсіз әмбебап $T_{\max}$ тұрақтысымен шектелсе, онда ол бекітілген уақытта орнықты деп аталады.

[5] жұмысында мульти-агентті жүйелер үшін сингулярды емес терминалды сырғымалы режим негізінде консенсус алгоритмі ұсынылған. [6] жұмысында алдын ала берілген уақытта қалыпты сызықты емес жүйелерді реттеу тәсілі қарастырылған. [7, 8] жұмыстарында бекітілген уақыттағы терминалды сырғымалы режим және үздіксіз жоғары ретті реттегіш синтезделген. Ауыспалы жүйелерді бекітілген уақытта орнықтандыру [9, 10] жұмыстарында, ал «жетекші-жетектемелі» типіндегі жүйелерді синхрондау [11] жұмысында зерттелген.

Алайда қолданыстағы нәтижелердің басым бөлігі күй векторының толық қолжетімділігі туралы жорамалға негізделген. Нақты техникалық жүйелерде бұл жорамал жиі орындалмайды: күй айнымалыларының бір бөлігі датчиктердің істен шығуына, конструктивтік шектеулерге немесе экономикалық себептерге байланысты өлшеуге қолжетімсіз болуы мүмкін.

Сызықты емес жүйелер үшін күй бойынша басқарудан шығыс бойынша басқаруға көшу анағұрлым күрделі мәселе болып табылады. Жүйенің сызықты емес табиғаты жалпы жағдай үшін әмбебап бақылаушының болуын жоққа шығарады, сондықтан сызықты емес жүйелердің әрбір класы үшін бақылаудың арнайы әдістерін әзірлеу қажет.

Әдебиеттерді талдау көрсеткендей, осы жұмыс жазылған уақытқа дейін тек жекелеген зерттеулер ғана [12, 13] елеулі сызықты емес жүйелер үшін шығыс бойынша бекітілген уақыттағы орнықтандыруға арналған, ал тіпті екіөлшемді жағдайдың өзі жеткілікті деңгейде зерттелмеген.

Бұл жұмыс аталған олқылықтың орнын толтырады және шектелген сыртқы әсерлері бар жазық сызықты емес жүйелер класы үшін шығыс бойынша бекітілген уақытта кең ауқымды орнықтандыру есебін шешуге арналған. Мысал ретінде екінші ретті елеулі сызықты емес модельмен сипатталатын микроэлектромеханикалық айна (МЭМС) жүйесі қарастырылады. Бұл жүйе қалыпты және тұрақты қос интеграторлар үшін әзірленген әдістермен орнықтандырылмайды, бұл ұсынылған тәсілдің практикалық маңыздылығын көрсетеді.

Ұсынылған тәсіл [12] және [13] жұмыстарынан айырмашылығы - жалпы сызықты емес жүйелер класын қамтиды (қос интеграторлар жеке жағдай ретінде кіреді). [11] жұмысындағы стандартты және [14] жұмысындағы C^1 -тегістік шарттарымен салыстырғанда, 1-жорамал бойынша тек f_2 -нің екінші аргументі бойынша біржақты Липшиц шарты ғана талап етіледі.

Ұсынылған бақылаушы [16-19] жұмыстарынан $r_i < 1$ мүшелер нөл маңында, ал $g_i > 1$ мүшелер нөлден алыс аймақта жинақталуды қамтамасыз ете отырып ерекшеленеді.

Жұмыстың негізгі нәтижелері төмендегідей:

Қалыпты [12] және тұрақты [13] қос интеграторларды жеке жағдайлар ретінде қамтитын жазық сызықты емес жүйелердің жалпы класы қарастырылған. Қабылданған жалпыланған Липшиц шарты [11] жұмысындағы стандартты шарттан және [14] жұмысындағы C^1 тегістік шартынан әлсіз болып табылады.

Би-шектік біртектілік техникасын [15] қолдану негізінде жинақталу уақыты бекітілген үздіксіз бақылаушыны құруға сүйенген шығыс бойынша реттегішті синтездеудің жүйелі әдісі ұсынылған. Бақылаушының масштабтау коэффициенті жүйенің сызықты емес сипаттамаларына басым болуын қамтамасыз ету үшін реттеледі.

Теориялық нәтижелер бұрыштық жылдамдық туралы ақпаратты пайдаланбай, МЭМС-айна үшін бекітілген уақыттағы басқару есебіне қолданылған.

Есептің қойылымы.

Сыртқы әсерлері жазық сызықты емес жүйелердің келесі класы қарастырылады:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + f_1(x_1), \\ \dot{x}_2 = u + f_2(x_1, x_2) + \delta, \end{cases} \quad (1)$$

мұнда: $x = (x_1, x_2)^T \in \mathbb{R}^2$ – жүйенің күй векторы, $u \in \mathbb{R}$ – басқару кірісі, f_1 және f_2 – сызықты емес функциялар, $\Delta \in \mathbb{R}$ – шектелген сыртқы әсер, $|\Delta| \leq M$ – кейбір белгілі $M > 0$ үшін.

Басқару мақсаты – тұйық жүйенің кеңауқымды (практикалық) бекітілген уақыттағы орнықтылығын қамтамасыз ететін шығыс бойынша реттегішті құру. Негізгі шектеу – күй айнымалысы x_2 (мысалы, жылдамдық) тікелей өлшеуге қолжетімсіз болып табылады.

Жорамал 1. $c > 0$ тұрақтысы және $\varphi \geq 0$ тегіс функциясы бар болсын, олар үшін келесі шарттар орындалады:

$$|f_1(x_1)| \leq c|x_1|, \quad |f_2(x_1, 0)| \leq \varphi(x_1), \quad |f_2(x_1, x_2) - f_2(x_1, \hat{x}_2)| \leq c|x_2 - \hat{x}_2|. \quad (2)$$

Ескерту 1. 1-жорамал жалпыланған Липшиц шартын білдіреді. Ол [11]-да қолданылған стандартты $|f_2(x_1, x_2) - f_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2)| \leq c(|x_1 - \hat{x}_1| + |x_2 - \hat{x}_2|)$ шартынан, сондай-ақ [14]-дағы C^1 тегістік шартынан әлсіз. Шектеулердің осылайша әлсіретілуі (1) жүйесіне қатысты шығыс бойынша бекітілген уақыттағы басқарудың қолданыстағы әдістерін қолдануды мүмкін емес етеді, бұл жаңа тәсілді әзірлеу қажеттілігін негіздейді.

Мысал 1. $f_1(x_1) = \sin(x_1)$, $|f_1(x_1)| = |\sin(x_1)| \leq |x_1|$ яғни $c = 1$ кезінде (2) шарты орындалады. Бұл мысал: стандартты Липшиц шарты да орындалады, бірақ (2) тек x_1 бойынша сызықтық өсімді ғана талап етеді.

Мысал 2. $f_2(x_1, x_2) = \varphi(x_1)\text{sat}(x_2)$, мұнда $\text{sat}(\cdot)$ – қанығу функциясы, $\varphi(x_1) = \kappa_0 + \kappa_1 x_1^2$. $|f_2(x_1, x_2) - f_2(x_1, \hat{x}_2)| \leq \varphi(x_1)|x_2 - \hat{x}_2| \leq c|x_2 - \hat{x}_2|$ шектелген аймақта орындалады. $x_1 \rightarrow \infty$ кезінде $\varphi(x_1)$ шектелмейтіндіктен стандартты екіжақты Липшиц шарты орындалмайды.

Мысал 3. $f_2(x_1, x_2) = -\frac{b}{J}x_2 - \frac{1}{J}(\kappa_0 x_1 + \kappa_1 x_1^3)$ -MEMS-айна моделінің нелинейлігі. $\kappa_1 x_1^3$ мүшесі f_2 -нің x_1 бойынша туындысын шектемейтіндіктен C^1 -тегістік [14] шарты орындалмайды. Бірақ $c = \frac{b}{J}$, $\varphi(x_1) = \frac{\kappa_0 + \kappa_1 x_1^2}{J} \sqrt{1 + x_1^2}$ кезінде (2) шарты орындалады.

Бақылаушы параметрін таңдау нұсқауы. $L = 1,5$ мәнінде бақылаушы жинақталуы кепілдендірілмейді (доминирование шарты орындалмайды). $L = 2$ мәнінде барлық тексерілген жиындарда бекітілген уақыттағы жинақталу қамтамасыз етілді. $L = 3,4,5$

мәндерінде жинақталу жылдамырақ, бірақ бастапқы пик артады. Тәжірибелік ұсыным:
 $L = 2, L = 3$.

Ескерту 2. (2) шарттарынан:

$$|f_2(x_1, x_2)| \leq \varphi(x_1) + c|x_2|$$

бағалауы шығады. $r_i = 1 + (i-1)\tau > 0$ деп анықтайық, мұнда

$$\tau \in (-0.5, 0), \quad e_i = x_i - \hat{x}_i \quad (i=1, 2), \quad \Omega = \{e: |e| < 1\}$$

Онда кез келген $\gamma \geq 1$ үшін келесі бағалар орындалады:

$$|f_2^0| \leq c|e_2|^{\frac{r_2+\tau}{r_2}}, \quad e \in \Omega; \quad |f_2^0| \leq 2^{\frac{\gamma+2}{2}} c(|e_1|^\gamma + |e_2|^\gamma), \quad e \notin \Omega \quad (3)$$

мұнда $f_2^0 = f_2(x_1, x_2) - f_2(x_1, \hat{x}_2)$. Бұл бағалаулар бақылаушыны жобалау кезінде негізгі рөл атқарады.

Лемма 1 [4]. $\dot{x} = f(x)$ жүйесі үшін C^1 класына жататын, оң анықталған және радиалды шектелмеген $V(x): \dot{Y}^n \rightarrow \dot{Y}$ Ляпунов функциясы, сондай-ақ $c, d > 0, 0 < \alpha < 1, \gamma > 1$ тұрақтылары бар болып, келесі шарт орындалсын:

$$\dot{V}(x) \leq -cV^\alpha(x) - dV^\gamma(x), \quad \forall x \in \dot{Y}^n \quad (4)$$

Онда жүйенің координаталар басы кеңауқымды бекітілген уақытта орнықты болып табылады, ал жинақталу уақыты келесі бағалаумен шектеледі:

$$T_{\max} \leq \frac{1}{c(1-\alpha)} + \frac{1}{d(\gamma-1)}.$$

Зерттеу шарттары мен әдістері

Күй бойынша реттегіш кері қадамдық жобалау әдісімен құрылады. Келесі

айнымалыларды енгізейік: $\xi_1 = x_1, \quad \xi_2 = x_2^{\frac{1}{r_2}} - \alpha_1^{\frac{1}{r_2}}$

мұнда α_1 – бірінші қадамның виртуалды реттегіші.

1-қадам. Ляпунов функциясы ретінде:

$$V_1 = \frac{r_1}{2-\tau} |x_1|^{\frac{2-\tau}{r_1}}$$

таңдалады.

V_1 -ді есептеп және f_1 үшін (2) шектеуді ескере отырып, келесіні аламыз:

$$\dot{V}_1 \leq \xi_1^{2-r_2} (x_2 - \alpha_1) + \xi_1^{2-r_2} \alpha_1 + |\xi_1|^2 \varphi_1 \quad (5)$$

мұнда $\varphi_1 \geq c|x_1|^{1-r_2}$ -тегіс функция.

Виртуалды реттегіш келесі түрде таңдалады:

$$\alpha_1 = -(n-1+l_1+l_2|\xi_1|^q + \varphi_1) \cdot \xi_1^{r_1+\tau} := -\beta_1 \xi_1^{r_2} \quad (6)$$

мұнда $l_1, l_2 > 0, \quad q > -\tau$ - жобалау параметрлері.

(6)-ны (5)-ке қойғанда, келесі бағалау алынады:

$$\dot{V}_1 \leq -(l_1+1)|\xi_1|^2 - l_2|\xi_1|^{2+q} + \xi_1^{2-r_2} (x_2 - \alpha_1). \quad (7)$$

2-қадам. Ляпунов функциясын түрлендіреміз: $V_2 = V_1 + W_2$, мұнда:

$$W_2 = \int_{\alpha_1}^{x_2} \left| s^{\frac{1}{r_2}} - \alpha_1^{\frac{1}{r_2}} \right|^{2-\tau-r_2} ds \quad (8)$$

V_2 -ні жүйенің (1) траекториялары бойымен дифференциалдап және көмекші теңсіздіктерді қолдана отырып, келесіні аламыз:

$$V_2 \leq -l_1(|\xi_1|^2 + |\xi_2|^2) - l_2(|\xi_1|^{2+q} + |\xi_2|^{2+q}) + \xi_2^{2-\tau-r_2}(u + \Delta) \quad (9)$$

Нәтижесінде күй бойынша реттегіш келесі түрде беріледі:

$$u_s = -M \operatorname{sign}(\xi_2) - \beta_2 \xi_2^{r_3}, \quad \beta_2 = l_1 + l_2 |\xi_2|^q + h_{21} + h_{22} \quad (10)$$

мұнда $r_3 = 1 + 2\tau$, ал h_{21} және h_{22} – жобалау барысында анықталатын теріс емес тегіс функциялар.

Бұл реттегіш Лемма 1-дегі (4) теңсіздіктің орындалуын қамтамасыз етеді, соның нәтижесінде координаталар басының кеңауқымды бекітілген уақыттағы орнықтылығы кепілденеді.

Ұсыныс 1. 1 – жорамал орындалған жағдайда, күй бойынша (10) реттегіш (1) тұйық жүйесінің координаталар басының бекітілген уақыттағы кеңауқымды орнықтылығын қамтамасыз етеді. Жинақталу уақытының жоғарғы шегі T_s, l_1, l_2 параметрлерімен анықталады және бастапқы күйге тәуелді емес.

Бекітілген уақыттағы бақылаушыны синтездеу

x_2 айнымалысы өлшеуге қолжетімсіз болғандықтан, (10) реттегішті тікелей жүзеге асыру мүмкін емес. Сондықтан x_2 -ні бекітілген уақытта бағалайтын бақылаушы қажет. Қолданыстағы бекітілген уақыттағы бақылаушылардың [16-19] көпшілігі негізінен сызықтық немесе кеңауқымды Липшиц жүйелері үшін әзірленген және (1) жүйесіне қолдануға келмейді.

Би-шектік біртектілік техникасын [15] пайдалана отырып, келесі үздіксіз бақылаушы құрылады:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + k_1 L |x_1 - \hat{x}_1|^{r_2} \operatorname{sign}(x_1 - \hat{x}_1) + k_1 L |x_1 - \hat{x}_1|^{g_2} \operatorname{sign}(x_1 - \hat{x}_1) + f_1(x_1), \\ \dot{\hat{x}}_2 &= u + k_2 L^2 |x_1 - \hat{x}_1|^{r_3} \operatorname{sign}(x_1 - \hat{x}_1) + k_2 L^2 |x_1 - \hat{x}_1|^{g_3} \operatorname{sign}(x_1 - \hat{x}_1) + f_2(x_1, \hat{x}_2). \end{aligned} \quad (11)$$

мұнда $L \geq 1$ - масштабтау коэффициенті, $g_i = 1 + (i-1)\nu$, мұнда $\nu \in (0, \frac{1}{2})$ ал $k_i > 0$ коэффициенттері $s^2 + k_1 s + k_2$ көпмүшесі Гурвиц болатындай таңдалады.

r_i көрсеткіштері бар қосылғыштар нөлдің кіші маңында шекті уақыттағы жинақталуды (жергілікті біртектілік) қамтамасыз етеді, ал g_i көрсеткіштері бар қосылғыштар нөлден алыс аймақтарда шекті уақыттағы жинақталуды (кеңауқымды біртектілік) қамтамасыз етеді.

Екі біртектілік құрылымының үйлесуі күй кеңістігінің бүкіл аймағында бекітілген уақыттағы жинақталуды қамтамасыз етеді.

Бағалау қатесінің динамикасы $e_i = x_i - \hat{x}_i$ келесі жүйемен сипатталады:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 - k_1 L |e_1|^{r_2} \operatorname{sign}(e_1) - k_1 L |e_1|^{g_2} \operatorname{sign}(e_1), \\ \dot{e}_2 &= -k_2 L^2 |e_1|^{r_3} \operatorname{sign}(e_1) - k_2 L^2 |e_1|^{g_3} \operatorname{sign}(e_1) + \rho_2^0 \delta. \end{aligned} \quad (12)$$

Ұсыныс 2. 1-жорамал орындалған жағдайда τ, ν, L, k_i ($i = 1, 2$) параметрлері бар болып, келесі шарттар орындалады:

– $\Delta = 0$ кезінде (12) қателік динамикасының координаталар басы бекітілген уақытта кеңауқымды орнықты болады;

– $\Delta \neq 0$ кезінде (12) қателік динамикасының координаталар басы бекітілген уақытта кеңауқымды практикалық орнықты болады.

Дәлелдеу. 2-ұсынысты дәлелдеу екі кезеңде жүргізіледі.

I кезең ($e \notin \Omega$ - нөлдің кіші маңынан тыс аймақ). [15] жұмысындағы гомогенді теорияға

сүйене отырып, $\omega = \nu$ кезіндегі U_1 Ляпунов функциясы үшін: $\frac{dU_1}{dt} \leq -d_4 U_1^{\rho_1^0}$, мұнда

$\rho_1^0 = \frac{\gamma + \nu}{\gamma} > 1, d_4 > 0$. L жеткілікті үлкен таңдалғанда сызықты емес мүшелер басым болады.

Бұдан $T_1 > 0$ мезеті бар: $T_1 \leq \frac{U_1(0)^{1-\beta_0}}{d_4(\beta_0-1)}$. $U_1(0) \leq \beta_0 \|e(0)\|^\gamma$ болғандықтан T_1 бастапқы шарттардан тәуелсіз шектелген.

II кезең ($e \in \Omega$ нөлдің кіші маңы, $\delta = 0$). $\omega = \tau$ кезіндегі U_2 функциясы: $\frac{dU_2}{dt} \leq -c_2 U_2^{\beta_0}$
мұнда $\beta_0 = \frac{\gamma + \tau}{\gamma} < 1$. $T_2 - T_1 \leq \frac{U_2(T_1)^{1-\beta_0}}{c_2(1-\beta_0)}$, $U_2(T_1) \leq \beta_0 \cdot 2^{\gamma/2}$ тұрақты болғандықтан $T_2 - T_1$ бастапқы шарттардан тәуелсіз.

Жалпы: $T_2 = T_1 + (T_2 - T_1)$ бастапқы шарттардан тәуелсіз шектелген.

Параметрлерді таңдау рәсімі: $\tau \in \left(-\frac{1}{2}, 0\right) \Rightarrow \beta_0 < 1$; $\nu \in \left(0, \frac{1}{2}\right) \Rightarrow \beta_0 > 1$; k_1, k_2 - Гурвиц полиномы шартынан. Тәжірибелік ұсыным: $L = 2 - 5 \cdot 2$ -ұсыныс дәлелденді.

Зерттеу нәтижелері

Бақылаушыдан алынған $\hat{x}_2$ бағасын (11) күй айнымалысы x_2 -нің орнына (10) күй бойынша реттегіш өрнегіне қойып, шығыс бойынша реттегішті аламыз

$$u_o = -M \operatorname{sign}(\xi_2(x_1, \hat{x}_2)) - \beta_2 \left(\frac{1}{\hat{x}_2^{\beta_2}} + \beta_1^{\beta_2} x_1 \right)^{\beta_3} \quad (13)$$

Теорема 1. 1-ұсыныс орындалған жағдайда (11) бақылаушыдан және (13) реттегіштен тұратын шығыс бойынша реттегіш келесіні қамтамасыз етеді:

– $\Delta = 0$ кезінде: тұйық жүйенің күйі бекітілген уақытта кеңауқымды орнықты болады, мұнда жинақталу уақыты $T \leq T_2 + T_s$;
– $\Delta \neq 0$ кезінде: тұйық жүйе күйі бекітілген уақытта кеңауқымды практикалық орнықтанады.

Дәлелдеу ($\Delta = 0$ жағдайы). Үш қадам орындалады.

I кезең: бақылаушының жинақталу уақытын бағалау (T_1 алу). Бақылаушы қатесін $e_1 = x_1 - \hat{x}_1$, $e_2 = x_2 - \hat{x}_2$ деп белгілейік. (1) жүйесі мен (11) бақылаушысын шегеріп, қате

динамикасын (12) аламыз. Ляпунов функциясы ретінде $V_{\text{obs}} = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2$ таңдаймыз. 1-жорамалдан және масштабтау коэффициентін L жеткілікті үлкен таңдағанда мынаны аламыз:

$$\dot{V}_{\text{obs}} \leq -\alpha_1 V_{\text{obs}}^{5/6} - \alpha_2 V_{\text{obs}}^{7/6},$$

мұнда $\alpha_1, \alpha_2 > 0$ - L, k_1, k_2 параметрлеріне байланысты оң тұрақтылар; $\frac{5}{6} < 1$ - шекті $\frac{7}{6} > 1$ уақыттағы жергілікті жинақталуды, $\frac{7}{6}$ - нөлден алыста жылдам жинақталуды қамтамасыз етеді. Лемма 1-ді осы теңсіздікке қолданып, аламыз:

$$T_1 \leq \frac{1}{\alpha_1 \left(1 - \frac{5}{6}\right)} + \frac{1}{\alpha_2 \left(\frac{7}{6} - 1\right)} = \frac{6}{\alpha_1} + \frac{6}{\alpha_2} =: T_1^*.$$

T_1^* тек α_1, α_2 арқылы (яғни L, k_1, k_2 параметрлеріне байланысты) анықталатындықтан, $(e_1(0), e_2(0))$ бастапқы шарттарынан тәуелсіз. Демек: $t \geq T_1$ болғанда $e_1(t) = e_2(t) = 0$, яғни $\hat{x}_2(t) = x_2(t)$.

II кезең: реттегіштің жинақталу уақытын бағалау (T_2 алу). $t \geq T_1$ болғанда $\hat{x}_2 = x_2$ болғандықтан, шығыс бойынша реттегіш (13) күй бойынша реттегішпен (10) дәл сәйкес келеді. Сондықтан $t \geq T_1$ болғандағы тұйық жүйе 1-ұсыныста талданған жүйемен бірдей. 1-ұсыныс бойынша бұл жүйенің координаталар басы бекітілген уақытта кеңауқымды орнықты болады, ал жинақталу уақытының жоғарғы шегі:

$$T_2 \leq T_2^*(\beta_1, \beta_2, l_1, l_2),$$

мұнда T_2^* тек жобалау параметрлеріне $(\beta_1, \beta_2, l_1, l_2)$ байланысты, $x_1(T_1), x_2(T_1)$ бастапқы күйіне тәуелсіз (1-ұсыныс кеңауқымды нәтиже береді).

III кезең: жалпы жинақталу уақытының шегі. $[0, T_1]$ аралығында бақылаушы жинақталады, x шектелген болып қалады. $[T_1, T_1 + T_2]$ аралығында $\hat{x}_2 = x_2$ болғандықтан реттегіш жүйені T_2 уақытта нөлге жинақтайды. Демек:

$$T_{\max} := T_1 + T_2 \leq T_1^* + T_2^* = \text{const},$$

яғни $T_{\max}$ тек жобалау параметрлеріне байланысты және $(x_1(0), x_2(0), \hat{x}_1(0), \hat{x}_2(0))$ бастапқы шарттарынан мүлде тәуелсіз. Теорема ($d = 0$ жағдайы) дәлелденді. $\square$

$d \neq 0, |d| \leq \bar{d}$ жағдайы. $d \neq 0$ кезінде Ляпунов функциясының туындысында қосымша мүше пайда болады: $\dot{V} \leq -\alpha_1 V^{p_1} - \alpha_2 V^{p_2} + \gamma \bar{d}$, мұнда $\gamma > 0$. Стандартты практикалық

орнықтылық теориясынан жүйе $T_{\max}$ уақытынан кешіктірмей

$\Omega_d = \left\{ (x_1, x_2) : V \leq \left(\frac{\gamma \bar{d}}{\min(\alpha_1, \alpha_2)} \right)^{\frac{1}{\min(p_1, p_2)}} \right\}$ қалдық аймаққа жинақталады. Бұл аймақ $\bar{d} \rightarrow 0$

болғанда нөлге жинақталады. Жинақталу уақыты $T_{\max}$ бастапқы шарттарға тәуелсіз болып қала береді. Теорема толық дәлелденді. $\square$

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Ұсынылған әдісті тексеру үшін [7] жұмысында келтірілген МЭМС-айна динамикалық моделі қарастырылады, ол келесі теңдеулермен сипатталады:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = x_2, \\ \ddot{x}_2 = u - \frac{b}{J} x_2 - \frac{1}{J} \tau_s(x_1) + \Delta, \end{cases} \quad (14)$$

мұнда x_1 – айнаның ауытқу бұрышы (өлшенетін айнымалы), x_2 – бұрыштық жылдамдық (бақыланбайтын айнымалы), $\tau_s(x_1) = \kappa_0 x_1 + \kappa_1 x_1^3$ – сызықты емес серпімді момент, J – айнаның инерция моменті, b – тұтқыр демпфирлеу коэффициенті, u – басқару кірісі, Δ – сыртқы әсер (мысалы, акустикалық шу немесе негіздің тербелісі).

Кубтық сипаттағы τ_s сызықты емес функциясы (14) жүйесін елеулі түрде сызықты емес етеді, бұл сызықтық интеграторлық құрылымдар үшін әзірленген [18, 19] әдістерін қолдануды жоққа шығарады.

Соған қарамастан, (14) жүйесі (1) жүйесінің жеке жағдайы болып табылады, мұнда

$$f_2 = -\frac{b}{J} x_2 - \frac{1}{J} \tau_s(x_1) \quad \text{және} \quad 1\text{-жорамал} \quad c = \frac{b}{J}, \quad \varphi(x_1) = \left(\frac{\kappa_0}{J} + \frac{\kappa_1 x_1^2}{J} \right) \sqrt{1 + x_1^2} \quad \text{болғанда}$$

орындалады. Осылайша, ұсынылған әдіс бұл жүйеге тікелей қолданылады.

Реттегіш параметрлері

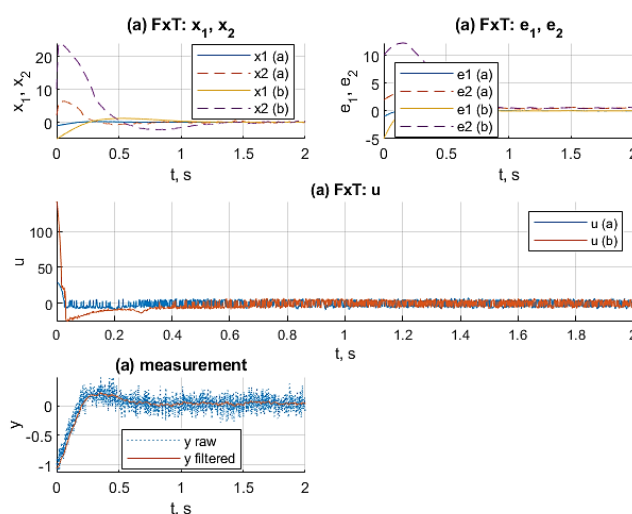
Сандық модельдеу модель параметрлерінің $J = b = \kappa_0 = \kappa_1 = 1$ мәндерінде және $\Delta = 0,5 \sin(t)$ әсері кезінде жүргізілді.

Өлшенетін шығыс гаусстық шумен бұзылған: $y = x_1 + 0.1N$, $N \sim N(0,1)$. Моделдеу Matlab бағдарламалық ортасында жүзеге асырылды. Реттегіш пен бақылаушы 1-кестеде келтірілген параметрлермен синтезделді.

Кесте 1 – Синтезделген реттегіш пен бақылаушының параметрлері

Параметр	Белгіленуі	Мәні
Реттегіш көрсеткіші	τ	4/3
Бақылаушы көрсеткіші	ν	2/3
Масштабтау коэффициенті	L	5
Бақылаушы коэффициенттері	k_1, k_2	2; 1
Реттегіш коэффициенті	$l_1 = l_2$	1
Сыртқы әсерге шектеу	M	0,5
Виртуалды реттегіш параметрі	β_1	$2 + x_1^2$

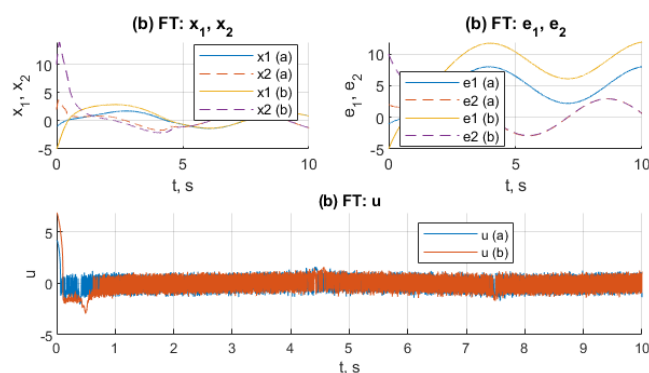
1 суретте ұсынылған FxT-алгоритмнің модельдеу нәтижелері екі бастапқы шарттар жиынтығы үшін көрсетілген: (a) жиынтығы: $(x_1(0), x_2(0), \hat{x}_1(0), \hat{x}_2(0)) = (-1, 2, 0, 0)$ және (b) жиынтығы: $(-5, 10, 0, 0)$, (c) жиынтығы $(-10, 20, 0, 0)$.



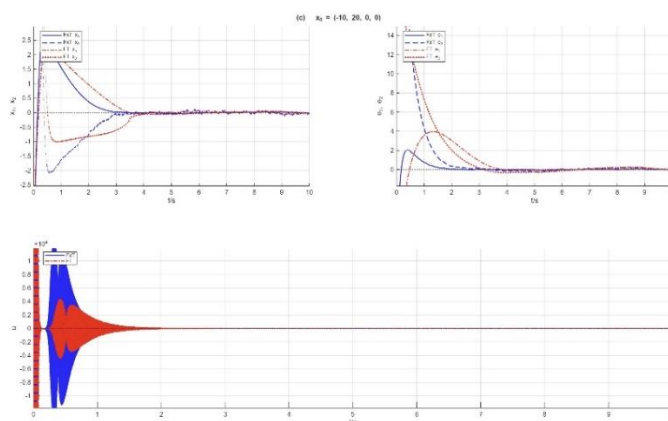
Сурет 1 – FxT-алгоритмді модельдеу нәтижелері

2-суретте $l_1 = l_2 = k_1 = k_2 = 0$ болғанда алынатын дәстүрлі шекті уақыттағы (FT) алгоритмнің нәтижелері көрсетілген. Уақыт осі 10 с-қа дейін кеңейтілген, өйткені (b) бастапқы шарттар жиынтығында жинақталу едәуір баяулайды.

3-суретте (c) жиыны үшін $(x_1(0), x_2(0)) = (-10, 20, 0, 0)$ алынған нәтижелер көрсетілген. Бастапқы ауытқу (a) және (b) жиындарымен салыстырғанда он есе үлкен болған жағдайда да FxT реттегіші жинақталу уақытын шамамен 3 секундта қамтамасыз етеді, ал FT реттегішінің жинақталу уақыты ~5 секундқа дейін ұзарады. Бұл FxT алгоритмінің бекітілген уақытта орнықтылық қасиетін растайды.



Сурет 2 – FT-алгоритмді модельдеу нәтижелері



Сурет 3 – FxT және FT алгоритмдерін модельдеу нәтижелері: (с) $x_0 = (-10, 20, 0, 0)$

Қорытынды

Бұл жұмыста сыртқы әсерлері бар екінші ретті жазық сызықты емес жүйелер класы үшін шығыс бойынша бекітілген уақытта кең ауқымды орнықтандыру есебі шешілді. Үш негізгі элементтен тұратын конструктивті синтез әдісі әзірленді: қадамдық жобалау әдісімен және кезеңдік Ляпунов функциялары арқылы құрылған күй бойынша реттегіш; би-шекті біртектілік техникасына негізделген, масштабтау коэффициенті реттелетін үздіксіз бекітілген уақыттағы бақылаушы; күй бағаларын күй бойынша реттегішке қою арқылы алынатын шығыс бойынша реттегіш. Тұйық жүйенің орнықтылығы би-шектік біртектілік техникасы мен Ляпунов функциялары әдісін қолдану арқылы қатаң дәлелденді.

Қабылданған жалпыланған Липшиц шарты алдыңғы жұмыстардағы шарттарға қарағанда әлсіз болып табылады және шығыс бойынша бекітілген уақыттағы орнықтандыруға жататын жүйелер класын кеңейтеді. Атап айтқанда, ұсынылған әдіс МЭМС-айна моделіне қолдануға жарамды, ал бұрынғы тәсілдер бұл жүйе үшін тиімсіз болған. Сандық модельдеу теориялық нәтижелерді растады.

Әдебиеттер тізімі

1. Bhat S.P. Finite-time stability of continuous autonomous systems / S.P. Bhat, D.S. Bernstein // SIAM J. Control Optim. – 2000. – Vol. 38, № 3. – P. 751-766.
2. Fast adaptive finite-time voltage regulation control algorithm for a buck converter system / Cheng Y. et al // IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Brief. – 2017. – Vol. 64, № 6. – P. 1082-1086.
3. Su Y. Global finite-time stabilization of planar linear systems with actuator saturation / Y. Su, C. Zheng, P. Mercorelli // IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs. – 2017. – Vol. 64, № 8. – P. 947-951.
4. Polyakov A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems / A. Polyakov // IEEE Trans. Autom. Control. – 2012. – Vol. 57, № 8. – P. 2106-2110.

5. Zuo Z. Nonsingular fixed-time consensus tracking for second-order multi-agent networks / Z. Zuo // *Automatica*. – 2015. – Vol. 54. – P. 305-309.
6. Time-varying feedback for regulation of normal-form nonlinear systems in prescribed finite time / Y. Song et al // *Automatica*. – 2017. – Vol. 83. – P. 243-251.
7. Fast fixed-time nonsingular terminal sliding mode control and its application to chaos suppression in power system / J. Ni et al // *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Brief.* – 2017. – Vol. 64, № 2. – P. 151-155.
8. Mishra J.P. Arbitrary-order continuous finite-time sliding mode controller for fixed-time convergence / J.P. Mishra, X. Yu, M. Jalili // *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Brief.* – 2018. – Vol. 65, № 12. – P. 1988-1992.
9. Global fixed-time stabilization for a class of switched nonlinear systems with general powers and its application / F. Gao et al // *Nonlinear Anal. Hybrid Syst.* – 2019. – Vol. 31. – P. 56-68.
10. Gao F. Global fixed-time stabilization of switched nonlinear systems: a time-varying scaling transformation approach / F. Gao, Y. Wu, Z. Zhang // *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs.* – 2019. – Vol. 66, № 11. – P. 1890-1894.
11. Fixed-time synchronization control for a class of master-slave systems based on homogeneous method / D. Wu et al // *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs.* – 2019. – Vol. 66, № 9. – P. 1547-1551.
12. A fixed-time output feedback control scheme for double integrator systems / B. Tian et al // *Automatica*. – 2017. – Vol. 80. – P. 17-24.
13. Su Y. Global fixed-time output feedback stabilization for a class of double integrator systems / Y. Su, C. Zheng // *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs.* – 2020. – Vol. 67, № 6. – P. 1031-1035.
14. Su Y. Robust finite-time output feedback control of perturbed double integrator / Y. Su, C. Zheng // *Automatica*. – 2015. – Vol. 60. – P. 86-91.
15. Andrieu V. Homogeneous approximation, recursive observer design, and output feedback / V. Andrieu, L. Praly, A. Astolfi // *SIAM J. Control Optim.* – 2008. – Vol. 47, № 4. – P. 1814-1850.
16. Menard T. Fixed-time observer with simple gains for uncertain systems / T. Menard, E. Moulay, W. Perruquetti // *Automatica*. – 2017. – Vol. 81. – P. 438-446.
17. Fixed-time output stabilization and fixed-time estimation of a chain of integrators / F. Lopez-Ramirez et al // *Int. J. Robust Nonlinear Control*. – 2018. – Vol. 28, № 16. – P. 4647-4665.
18. Fixed-time disturbance observer design for Brunovsky systems / J. Ni et al // *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Brief.* – 2018. – Vol. 65, № 3. – P. 341-345.
19. Fixed-time consensus tracking for multiagent systems with high-order integrator dynamics / Z. Zuo et al // *IEEE Trans. Autom. Control*. – 2018. – Vol. 63, № 2. – P. 563-570.

Ж.Н. Ергазы*, Қ. Әлімхан, Н.С. Мукатаев

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
010000, Республика Казахстан, г.Астана., ул.Сәтпаева, 2
*e-mail: yergaziyevaaa@gmail.com

ГЛОБАЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ВЫХОДУ С ФИКСИРОВАННЫМ ВРЕМЕНЕМ ДЛЯ ВОЗМУЩЕННЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Представлен новый метод синтеза алгоритма управления нелинейными динамическими системами второго порядка на основе концепции фиксированно-временной стабилизации с выходной обратной связью. Исследование ориентировано на широкий класс планарных нелинейных объектов, для которых невозможен полный доступ к переменным состояниям. Основу предложенной методики составляет объединение теории билимитной однородности и принципов классического ляпуновского анализа устойчивости. Такой подход позволил разработать непрерывный наблюдатель с фиксированным временем сходимости, который гарантированно оценивает неизмеряемое состояние системы независимо от начальных условий и начальных ошибок оценивания. На основе этой оценки построен непрерывный регулятор, обеспечивающий стабилизацию системы в фиксированное наперед заданное время. Метод обладает рядом преимуществ: устойчивость и сходимость не зависят от величины и знака начальных условий; управление остаётся непрерывным, что исключает дрожание исполнительных устройств; достигается высокая робастность к ограниченным внешним возмущениям и шумам измерений. Алгоритм может быть реализован на микроконтроллерах без необходимости в высокочастотной дискретизации, что делает его привлекательным для практического использования. В качестве

примера рассмотрена динамика микромеханического зеркала (MEMS mirror), представляющего собой яркий пример высоконелинейного электромеханического объекта. Проведено численное моделирование, результаты которого подтверждают эффективность предложенной схемы управления. По сравнению с существующими конечноременными регуляторами время переходного процесса уменьшено более чем в четыре раза, а отклонение и энергетические затраты системы снижены почти вдвое. Полученные результаты подтверждают возможность применения разработанного метода в задачах высокоточного управления микро и макромеханическими приводами, а также в интеллектуальных робототехнических и виброоптических системах.

Ключевые слова: фиксированное время стабилизации, би-лимитная однородность, выходная обратная связь, MEMS-зеркало, устойчивость по Ляпунову, нелинейные управляемые объекты, наблюдатель.

Zh. Yergazy*, K. Alimhan, N. Mukatayev

L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2
*e-mail: yergazyevaaaa@gmail.com

GLOBAL OUTPUT FEEDBACK STABILIZATION WITH FIXED TIME FOR DISTURBED NONLINEAR SYSTEMS

A new method is presented for synthesising a control algorithm for second-order nonlinear dynamic systems based on the concept of fixed-time stabilisation with output feedback. The study focuses on a broad class of planar nonlinear systems for which full access to state variables is not possible. The proposed methodology is based on a combination of the theory of bi-limit homogeneity and the principles of classical Lyapunov stability analysis. This approach has enabled the development of a continuous observer with a fixed convergence time, which reliably estimates the unmeasurable state of the system regardless of initial conditions and initial estimation errors. Based on this estimation, a continuous controller is constructed that ensures system stabilisation within a predetermined time.

The method has a number of advantages: stability and convergence do not depend on the magnitude and sign of the initial conditions; control remains continuous, which eliminates oscillation of the actuators; high robustness to limited external disturbances and measurement noise is achieved. The algorithm can be implemented on microcontrollers without the need for high-frequency sampling, making it attractive for practical use. As an example, the dynamics of a microelectromechanical system (MEMS) mirror are considered, which is a striking example of a highly non-linear electromechanical object. Numerical simulations were carried out, the results of which confirm the effectiveness of the proposed control scheme. Compared to existing finite-time controllers, the transient response time is reduced by more than a factor of four, whilst the system error and energy consumption are reduced by almost half. The results obtained confirm the applicability of the developed method to high-precision control of micro- and macro-mechanical actuators, as well as in intelligent robotic and vibro-optical systems.

Key words: fixed-time stabilization, bi-limit homogeneity, output feedback, MEMS mirror, nonlinear control systems, Lyapunov stability, observer design.

Авторлар туралы мәліметтер

Жансая Нұрғазықызы Ерғазы* – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Математикалық және компьютерлік моделдеу» кафедрасының PhD докторанты, Астана, Қазақстан; e-mail: yergazyevaaaa@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8070-0970>.

Қилан Әлімхан – PhD, Doctor of science (Japan), Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Математикалық және компьютерлік моделдеу» кафедрасының профессоры, Астана, Қазақстан; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0766-2229>.

Нурлан Серикович Мукатаев – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының доценті, Астана, Қазақстан; e-mail: mukatayev_ns@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3570-4676>.

Сведения об авторах

Жансая Нұрғазықызы Ерғазы* – PhD-докторант кафедры «Математическое и компьютерное моделирование» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан; e-mail: yergazyevaaaa@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8070-0970>.

Қилан Әлімхан – PhD, Doctor of science (Japan), профессор кафедры «Математическое и компьютерное моделирование» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0766-2229>.

Нурлан Серикович Мукатаев – PhD, доцент кафедры «Системного анализа и управления» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан; e-mail: mukatayev_ns@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3570-4676>.

Information about the authors:

Zhansaya Yergazy* – PhD doctoral student of the Department of Mathematical and Computer Modelling, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: yergazyevaaaa@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8070-0970>.

Keylan Alimhan – PhD, Doctor of science (Japan), Professor of the Department of Mathematical and Computer Modelling, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0766-2229>.

Нурлан Серикович Мукатаев – PhD, Associate Professor of the Department of Systems Analysis and Management, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: mukatayev_ns@enu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3570-4676>.

Редакцияға енуі 30.03.2026

Өңдеуден кейін түсуі 20.05.2026

Жариялауға қабылданды 21.05.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-16](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-16)



IRSTI: 20.23.17

Zh.Zh. Bagisov*, T.K. Dushaeva, A.Kh. Vakhitova, A.B. Akhmetova, A.Kh. Kassymova

West Kazakhstan Agricultural and Technical University named after Zhangir Khan,
090009, Republic of Kazakhstan, Oral, Zhangir khan street, 51

*e-mail Bag_8585@mail.ru

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN TEACHING SPECIALIZED DISCIPLINES: OPPORTUNITIES AND RISKS

Abstract: The article examines the methodological foundations of applying artificial intelligence technologies in the teaching of specialized disciplines, with a focus on identifying both their pedagogical potential and associated risks. The relevance of the study is determined by the ongoing digital transformation of education and the growing demand for innovative tools that enhance the effectiveness and adaptability of the learning process. The paper analyzes key directions of AI integration into educational practice, including adaptive learning systems, intelligent tutoring, automated assessment, and personalized learning pathways. Particular attention is given to the methodological principles that ensure the effective implementation of these technologies, such as alignment with learning objectives, didactic appropriateness, and the role of the instructor in a technology-enhanced environment.

At the same time, the study highlights a range of challenges and risks related to the use of artificial intelligence, including potential bias in algorithmic decision-making, issues of academic integrity, reduced critical thinking, and increased dependence on digital tools. The importance of maintaining a balance between technological innovation and pedagogical control is emphasized. The results of the study contribute to the development of a structured approach to integrating artificial intelligence into higher education, aimed at improving the quality of teaching specialized disciplines while minimizing potential negative impacts.

Key words: artificial intelligence, higher education, specialized disciplines, teaching methodologies, adaptive learning, intelligent tutoring systems, automated assessment, educational technologies, academic integrity, learning personalization.

Introduction

The contemporary stage of higher education development is characterized by the rapid integration of digital technologies into the teaching and learning process. Among these technologies, artificial intelligence (AI) is gaining particular significance as a tool capable of transforming traditional pedagogical approaches and enhancing the effectiveness of knowledge transfer [1]. This is