

**«6D070400 – Есептеу техникасы және бағдарламалық қамтамасыз ету»  
мамандығының PhD докторанты Тасболатұлы Нұрболаттың  
«Жоғары ретті анықталмаған сызықтық емес жүйелерге кең ауқымды  
практикалық бақылау және ол үшін бағдарламалық кешен құру»  
тақырыбындағы диссертациялық жұмысына**

**АНДАТПА**

**Зерттеу тақырыбының өзектілігі.** Қазіргі уақытта басқару теориясының өзекті мәселелерінің бірі – бақылау жүйелерін автоматты басқару болып табылады. Бақылау жүйелері автопилоттарды автоматты басқару, белгіленген траектория бойынша зымырандарды немесе ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰҰА) басқару, химия өнеркәсібіндегі температураны автоматты реттеу, ядролық реакторлардағы сіңіргіш өзектерді автоматты реттеу, өндірістегі роботты манипуляторларды басқару және т. б. үшін кеңінен қолданылады. Қазіргі уақытта квадрокоптерлер немесе гексакоптерлер сияқты ҰҰА-н ауыл шаруашылығында немесе апат аймағындағы адамдарға медициналық мақсаттағы заттарды жеткізу кезінде тиімді пайдалану мәселелерін зерттеу өзекті болып отыр. Басқару жүйелері саласындағы білімді толық меңгеру көптеген күрделі жүйелерді модельдеуге мүмкіндік береді.

Сызықтық емес жүйелер басқару теориясының маңызды саласы болып есептеледі. Табиғатта кездесетін барлық физикалық жүйелер сызықтық емес. Жүйе ағымдық күйлерінің номинал жиынынан ауытқымайтын жағдайда, жүйені сипаттау мен басқару құруда сызықтық жүйелер қолданылады. Кері жағдайда сызықтық модель тиімді деп саналмайды және қажетті нәтижелерге ие болмаймыз. Бұл жағдайда сызықтық емес жүйелер қолданылады. Себебі сызықтық емес басқарулар үлкен рангті сызықтық емес жүйелерді тікелей басқара алады. Жүйе рангі жеткілікті кішкентай болған жағдайда да, сызықтандыру әрқашан жүзеге аса бермейді, себебі сызықтандырылған күйі кез келген тепе-теңдік нүкте шеңберінде басқарылмайтын жүйелер кездеседі. Осындай жүйелер үшін басқару теориясы қолданылуы қажет. Сызықтық емес басқару теориясында талдаудың көптеген математикалық құралдарының түрлері кездеседі. Алуантүрлілік сызықтық емес талдаудың әмбебап математикалық әдістемесі немесе құралының жоқ болу себебінен зерттеу тақырыбы өзекті мәселелерге жатады.

Диссертацияда сызықтық емес жүйелердің бір класына жататын  $p$ -нормал түрдегі сызықтық емес жүйелер зерттеу объектісі болып және олардың орнықтылық мәселелері, асимптотикалық орнықтылығы, жүйе күйлерін тұрақтандыру мәселелері, басқару және бақылау есептері зерттелді. Зерттеу нәтижесінде,  $p$ -нормал түрдегі сызықтық емес жүйелердің күйлерін динамикалық шығыс кері байланыс арқылы тұрақтандыру есебі,  $p$ -нормал формадағы сызықтық емес жүйе шығысын бақылау есебі,  $p$ -нормал формадағы уақыты кешіккен сызықтық емес жүйе күй сигналын бақылау есептері компьютерде модельденді.

Сызықтық немесе сызықтық емес жүйелер орнықтылығын зерттеу және оларды басқару, бақылауды математикалық модельдеудің теориялық нәтижелерін қарастыру А.М. Ляпунов, Л.С. Понтрягин, Я.Н. Ройтенберг, Е.А. Барбашин, Н.Н. Красовский, Н.Г. Четаев, И.Г. Малкин және т.б. беделді кеңестік ғалымдардың классикалық жұмыстарына негізделеді. Қазақстандық көрнекті ғалым техника ғылымдарының докторы, профессор Т.Н. Бияров өз заманында осы салада үлкен зерттеулер жүргізіп, басқару теориясының мектебін қалады. Қазіргі уақытта басқару проблемаларын зерттеп жүрген бірқатар отандық ғалымдар бар. Олар: М.Т. Дженалиев, С.А. Айсағалиев, З.Н. Мурзабеков, Ш.А. Айпанов, М.Н. Калимолдаев, Т.Ж. Мазаков және т.б. Жақын және алыс шетел ғалымдарының еңбектерінде кері байланыс көмегімен жүйені тұрақтандыру мәселесі алғаш рет зерттелген жұмыстары да қызығушылық тудырады: С.І. Vyrness және А. Isidori (1989, 1991), J. Tsiniias (1989), R. Marino және P. Tomei (1995), M. Krstic (1995) және т.б. Динамикалық кері байланыс арқылы ізіне түсу мәселесін зерттеумен айналысып жүрген ғалымдар Q. Gong, C. Qian (2005), K. Alimhan, H. Inaba (2003, 2006, 2008), N. Otsuka (2011, 2012-2019) және т.б.

Сызықтық емес жүйелерді бақылау проблемалары бірнеше соңғы онжылдықтарда ғылыми қауымдастық тарапынан үлкен қызығушылыққа ие болып келеді. Соңғы екі онжылдықта сызықтық емес басқару теориясының әр түрлі әдіс-тәсілдерін әзірлеу мен оларды компьютерде модельдеу арқылы нәтиже алуда айтарлықтай оң өзгерістер байқалуда. Біріншіден, мұндай жетістік сызықтық емес процестерді толық және тез зерттеуге мүмкіндік беретін есептеуіш техниканың қарқынды дамуымен және бақылау сапасына қойылатын талаптардың артуымен байланысты. Екіншіден, мұндай типтегі жүйелерді синтездеу мен талдаудың теориясы жылдан жылға дамып келеді. Анықталмаған сызықтық емес жүйелерге кең ауқымды практикалық бақылау және ол үшін бағдарламалық кешен құру міндеттері тақырыбының өзектілігі, қажеттілігі Қазақстанда техникалық жүйелерді басқарудың және бақылаудың қолданба мәселелерін шешу үшін, негізінен, шетелдік бағдарламалық-техникалық құрал-жабдықтарды қолданатындығымызға да тікелей байланысты. Өнеркәсіпті-инновациялық даму жолын ұстанған еліміз үшін өнеркәсіп салаларындағы техникалық қондырғылар жұмысының тұрақтылығы мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету, басқару, бақылау проблемаларын зерттеудің өзектілігі мен практикалық құндылығының маңызы зор.

**Диссертациялық жұмыстың мақсаты.**  $p$ -нормал формадағы жоғары ретті анықталмаған сызықтық емес жүйелер басқаруын табу алгоритмін құру, табылған басқару көмегімен сызықтық емес жүйелердің шығыс сигналын болжанған тірек сигнал ізіне түсіру және бақылау тапсырмалары үшін бағдарламалық кешен құру.

**Зерттеудің міндеттері:**

- анықталмаған сызықтық емес жүйелерді шығыс кері байланыс көмегімен кең ауқымдық асимптотикалық тұрақтандыру мәселесін шешу;

- сызықтық емес жүйелер, уақыт кешігуі бар сызықтық емес жүйелерді берілген тірек сигнал ізіне түсіру басқаруын табудың математикалық моделі мен алгоритмін құру;

- құрылған алгоритм арқылы берілген сызықтық емес жүйенің шығыс сигналын таңдап алынған тірек сигнал ізіне түсіретін басқаруды табу, оны компьютерде модельдеу;

- басқару параметрлеріне қарай ізіне түсу қателіктерін салыстыру, талдау жасау және сызықтық емес жүйелер және уақыты кешіккен сызықтық емес жүйелерді тұрақтандыру, бақылау алгоритмдеріне сай жүзеге асырылған сандық эксперименттер үшін бағдарламалық кешен құру.

**Зерттеу объектісі.** Жоғары ретті анықталмаған сызықтық емес жүйелер мен жоғары ретті анықталмаған уақыты кешіккен сызықтық емес жүйелер.

**Зерттеу пәні.**  $p$ -нормал формадағы сызықтық емес жүйелер мен  $p$ -нормал формадағы уақыт кешігу параметрі бар сызықтық емес жүйелерді бақылау алгоритмдері.

**Зерттеу әдістері.** Кері байланыс әдісі, Ляпуновтың жүйелерді басқару әдістері, рекурсивті әдіс, сандық әдіс, біртекті үстемдік әдісі, индукция әдісі, «компенсатор-контроллер» қосарланған әдісі, Ляпунов-Красовский тәсілі, Эйлер әдісі, Рунге-Кутта әдісі.

**Зерттеудің ғылыми жаңалығы.**

- диссертациялық жұмыста  $p$ -нормал формадағы ( $p > 1$ ) шын мәніндегі сызықтық емес жүйелерді берілген тірек сигнал ізіне түсіретін басқаруды табу алгоритмі құрылды;

- құрылған алгоритм арқылы жоғары ретті анықталмаған сызықтық емес жүйе күйлерін тұрақтандыру, бақылау есептерінің компьютерлік моделі құрылды;

- шын мәніндегі уақыты кешіккен сызықтық емес жүйелерді берілген тірек сигнал ізіне түсіретін басқаруды табу алгоритмі, компьютерлік моделі құрылып, сандық есептеулер арқылы шешімі дәлелденді;

- сызықтық емес жүйелерді тұрақтандыру, басқару, ізіне түсу есептеріне бағдарламалық кешен құрылды.

**Алынған нәтижелердің теориялық және тәжірибелік маңызы.** Диссертациялық зерттеуде алынған нәтижелер өндірістік техникада, ғылым мен оқу саласында кезігетін электрлі-механикалық жүйелерді басқаруда қолданыс табуы, сонымен бірге, құрылған бағдарламалық кешен қашықтан оқыту жүйелерінде пайдаланылуы мүмкін. Диссертациялық зерттеу нәтижесінде пайда болған математикалық модельдермен және оны шешу алгоритмдерімен көптеген техникалық қондырғылар сипатталуы мүмкін. Мысалы, радио-электронды жүйелер мен қондырғылар, электромеханикалық жүйелер, ұшқышсыз ұшу аппараттары, ғарыштық техникалар, робототехникалық жүйелер және т.б.

**Қорғауға шығарылған негізгі тұжырым.** Қарапайым формадағы сызықтық емес жүйелер шығыс сигналдарын кең ауқымды асимптотикалық тұрақтандыру есебін шешу алгоритмі ұсынылып, математикалық моделі қарапайым сызықтық емес жүйемен берілген бір буынды робот манипулятор

қозғалысын тұрақтандыру есебінің эксперименті жүргізілді. Сонымен қатар  $p$ -нормал формадағы жоғары ретті анықталмаған сызықтық емес жүйелердің шығыс сигналын берілген тірек сигналдың ізіне түсіру басқару теңдеуін табудың математикалық моделі және оны компьютерде модельдеу алгоритмі, құрылымдық-схемасы жасалып, сандық эксперименттер жүргізілді. Жекелеген қосымшаларда әзірленген есептер бағдарламалық кешенге топтастырылып, аппараттық-бағдарламалық қамту мүмкіндіктері зерттелді.

**Зерттеушінің жеке үлесі.** Зерттеліп отырған сызықтандыруға келмейтін шын мәніндегі сызықтық емес жүйелерді тұрақтандыру, басқару, бақылау проблемаларын шешу міндеттері едәуір еңбекті қажет етеді. Негізінен жұмыс ғылыми кеңесші және шетелдік ғылыми кеңесшімен бірлесе орындалды. Диссертацияда ізденуші сызықтық емес жүйелердің шығыс сигналын көзделген тірек сигнал ізіне түсіру басқаруын табу алгоритмдерін құру және алгоритмдерді бағдарламалық орындауға өзінің көп үлесін қосты.

**Диссертация құрылымы және көлемі.** Диссертациялық жұмыс кіріспеден, үш бөлімнен, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және үш қосымшадан тұрады. Зерттеу жұмысының жалпы көлемі 98 бет, оның ішінде 36 сурет, 5 кесте қамтылған.

**Бірінші бөлімде** зерттеу жұмысының тақырыбы бойынша алдыңғы ғалымдардың еңбектеріне шолу жүргізілді және диссертациялық жұмыстың негізі болып табылатын сызықтық емес жүйелер орнықтылығы, сызықтық емес жүйелерді күй кері байланысы немесе шығыс кері байланысы жәрдемінде бақылау проблемалары зерттелді.

**Екінші бөлімде** зерттеу жұмысына қажет болатын біртекті жүйелер түсініктері беріліп, негізгі математикалық леммалар берілді. Әрі қарай, жоғары ретті сызықтық емес жүйелерге кең ауқымды практикалық бақылау проблемасы зерттелді. Атап айтқанда, қарастырылған  $p$ -нормал формадағы сызықтық емес жүйелердің шығыс сигналын бақылау есебінің математикалық моделі құрылып Ляпуновтың тура әдісі, біртекті үстемдік әдісі, «компенсатор-контроллер» біріккен әдісі, сигнум функция біріккен әдістері жәрдемінде басқару теңдеуін таптық. Теориялық зерттеу, дәлелдеу нәтижесінде қол жеткізген жетістіктерді компьютерде модельдеу MatLab қосымшасы арқылы жүзеге асырылды. Бағдарламалық жасақтамасы құрылып, оның нәтижесіне талдау жүргізілді. Жүйенің кейбір күйлері немесе барлық күйлері өлшеуге болмайтын жағдай үшін шығыс сигналын бақылау жүзеге асыру мысалы қарастырылды. Сонымен бірге, жүйенің күйлерін өлшеуге болатын жағдай үшін күй сигналын пайдаланып, берілген тірек сигнал ізіне түсіру міндеті де шешілді. Күй сигналын кері байланыста қолданып басқару мәселесінің математикалық үлгісі жасақталып, сандық эксперимент арқылы нәтижеге қол жеткізіп, тиімділігін дәлелдедік. Сондай ақ уақыт кешігуі бар  $p$ -нормал түрдегі сызықтық емес жүйелерді де басқару мәселесі зерттеліп, математикалық моделі құрылды. Ляпунов-Красовский тәсілін пайдаланып берілген жүйедегі уақыт кешігуден болған кері ықпалын жою пайдалану арқылы уақыт кешігуі бар сызықтық емес жүйені басқару және бақылау орындалды. Компьютердегі сандық эксперименттер MatLab қосымшасында орындалды және алынған

бақылау қателіктеріне талдау жүргізілді. Бір буынды өндірістік робот-манипулятор қозғалыс теңдеуінің аппараттық-жабдықтамалық құрылымының математикалық моделі алынып, координата аластыруларын енгіздік және шыққан жүйе күйлерін тұрақтандыру басқаруын табудың алгоритмін таптық. Бір буынды робот-манипулятор қозғалысын басқару теңдеуі арқылы MatLab қосымшасында сандық есептеу жүргізілді.

**Үшінші бөлімде** диссертациялық жұмыста қарастырылған есептер үшін бағдарламалық кешен құру жұмыстары сипатталған.

**Қорытындыда** жұмыстың негізгі қорытындылары мен нәтижелері тұжырымдалған.

**Диссертация нәтижелерінің апробациясы.** Зерттеу жұмысының басты нәтижелері төмендегі конференцияларда, семинарларда баяндалды және талқыланды:

– «Қазіргі ғылымның мәселелері мен болашағы» XVI Халықаралық ғылыми-практикалық конференциясы (2017, Мәскеу, РФ);

– Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институтының «Информатика және есептеу технологияларының қазіргі заманғы мәселелері» ғылыми конф. (29-30 маусым, 2017, Алматы, Қазақстан);

– II Халықаралық «Информатика және қолданбалы математика» ғылыми-практикалық конференциясы (27-30 қыркүйек, 2017 ж., Алматы, Қазақстан);

– СІБРКОН 2017 және «Күрделі жүйелерді оңтайландыру мәселелері» XIII-ші Халықаралық Азиялық мектеп-семинары (18-22 қыркүйек, 2017, Новосібір, РФ);

– III Халықаралық «Информатика және қолданбалы математика» ғылыми-практикалық конференциясы (26-29 қыркүйек, 2018 ж., Алматы, Қазақстан);

– IV Халықаралық «Информатика және қолданбалы математика» ғылыми-практикалық конференциясы (25-29 қыркүйек, 2019 ж., Алматы, Қазақстан);

– МАТЕК веб-конференциялары (25-27 мамыр, 2018, Бейжің, ҚХР);

– «Ақпараттық және есептеуіш технологиялар» институты «Информатика, математика және басқарудың өзекті мәселелері» атты ғылыми-практикалық семинарлары (2017-2020 жж., Алматы, Қазақстан);

– Токио Денки университетінің ғылыми семинарлары (шілде-тамыз, 2018, Токио қ., Жапония);

– Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті «Ақпараттық технологиялар» факультеті ғылыми семинарлары (2017-2020 жж., Алматы, Қазақстан).

**Диссертация тақырыбы бойынша 13 мақала жарияланды және 1 авторлық куәлік алынды:**

1. Алимхан К., Калимолдаев М.Н., Тасболатулы Н. Глобальное практическое слежение для неопределенных нелинейных систем // Вестник Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева. – Алматы, 2017. – №2 (120). – С.447-452.

2. Алимхан К., Тасболатұлы Н. Жоғары дәрежелі анықталмаған сызықты емес жүйелерді күшті практикалық бақылау // Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті Хабаршысы. – Алматы, 2018. – №1 (125). – 362-368 б.

3. Алимхан К., Тасболатұлы Н. Уақыт кешігуі бар анықталмаған сызықтық емес жүйелердің шығыс шамасын күй кері байланысы арқылы бақылау // М.Тынышпаев атындағы Қазақ көлік және коммуникациялар академиясының Хабаршысы. – Алматы, 2019. – №1 (108). – 166-174 б.

4. Alimhan K., Otsuka N., Kalimoldayev M.N., Tasbolat N. Practical output tracking for a class of uncertain nonlinear time-delay systems via state feedback // MATEC Web of Conferences, Volume 189, 10027 (2018), 2nd International Conference on Material Engineering and Advanced Manufacturing Technology (MEAMT 2018). – Beijing, China, 2018. – 8 p.

5. Alimhan K., Otsuka N., Kalimoldayev M.N., Tasbolatuly N. Output Tracking by State Feedback for High-Order Nonlinear Systems with Time-Delay // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 1 February 2019. – Vol. 97, Issue 3. – P. 942-956. (*CiteScore – 0,67; 33rd percentile*)

6. Alimhan K., Kalimoldayev M.N., Adamov A.A., Mamyrbayev O., Tasbolatuly N., Smolarz A. Further Results on Output Tracking for a Class of Uncertain High-Order Nonlinear Time-Delay Systems // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, V. 95 NR 5/2019. – P. 88-91. (*CiteScore – 0,38; 19th percentile*)

7. Алимхан К., Калимолдаев М.Н., Тасболатулы Н. Робастное практическое отслеживание выхода неопределенных нелинейных систем с помощью компенсатора выхода // XVI межд. научно-практическая конф. «Проблемы и перспективы современной науки». – Москва, 2017. – №16. – С.161-165.

8. Алимхан К., Калимолдаев М.Н., Мамырбаев О.Ж., Тасболатұлы Н. Қатаң емес шарт жағдайында анықталмаған сызықты емес жүйелерді шығыс кері байланысы арқылы кең ауқымды практикалық бақылау // II Халықаралық «Информатика және қолданбалы математика» ғылыми конф. – Алматы, 2017. – 114-129 б.

9. Алимхан К., Калимолдаев М.Н., Тасболатулы Н. Робастное практическое управление выходных данных неопределенных нелинейных систем с помощью динамической обратной связи // Межд. мультikonференция IEEE SIBIRCON 2017. – Новосибирск, Россия, 2017. – С.18-25.

10. Алимхан К., Калимолдаев М.Н., Тасболатұлы Н. Жоғары ретті анықталмаған сызықты емес жүйелерді шығыс компенсаторы жәрдемінде күшті практикалық бақылау // ҚР БҒМ Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институтының ғылыми конф. – Алматы, 2017. – 14-20 б.

11. Алимхан К., Мамырбаев О.Ж., Тасболатұлы Н., Аманжолова А.А., Боромбаева А.Б. Анықталмаған сызықтық емес жүйелердің шығыс мәліметтерін кері байланыс күйі арқылы бақылау // III Халықаралық «Информатика және қолданбалы математика» ғылыми конф. – Алматы, 2018. – 95-106 б.

12. Алимхан К., Тасболатұлы Н. Анықталмаған сызықтық емес жүйелерге кең ауқымды практикалық бақылау және олар үшін бағдарламалық кешен құру // IV Халықаралық "Информатика және қолданбалы математика" ғылыми конференциясы. – Алматы – 2019. – 1. – 108-117 б.

13. Алимхан К., Тасболатұлы Н., Ерденова А.К., Ахметкалиева А.С. Айнымалы уақыт кешігуі бар шын мәнінде сызықтық емес жүйелердің шығысын күй кері байланыс арқылы ізге түсіру // IV Халықаралық "Информатика және қолданбалы математика" ғылыми конф. – Алматы – 2019. – 1. – 117-131 б.

14. ЭЕМ-ге арналған бағдарламалық авторлық құқық куәлігі «*Program Complex Robust Tracking of Non-linear Systems by Output Compensator*» 03.05.2019 ж. №3144.