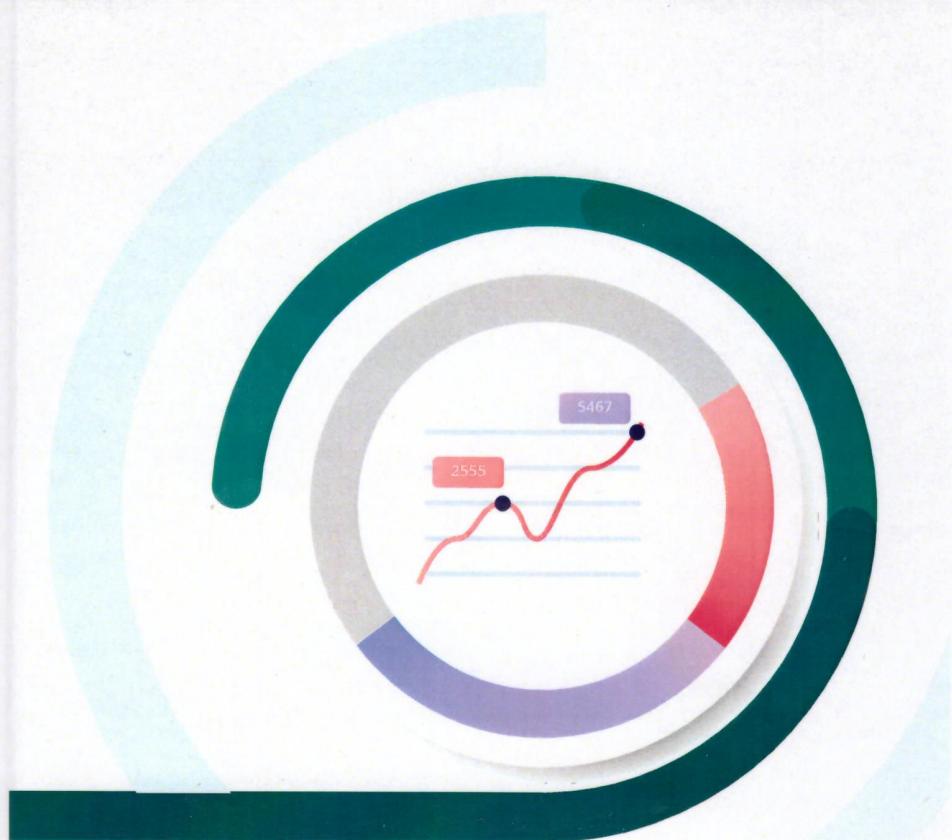


М.Н. Қалимолдаев, Қ. Әлімхан,
Н. Тасболатұлы



**ЖОҒАРЫ РЕТТІ АНЫҚТАЛМАҒАН ШЫН
МӘНІНДЕГІ СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖУЙЕЛЕРДІ
ГЛОБАЛЬДЫ ПРАКТИКАЛЫҚ БАҚЫЛАУ**

НҰР-СҮЛТАН
2021

ӘОЖ 510
КБЖ 22.1
Қ 26

Рецензенттер:

Искаков К.Т. – физика-математика ғылымдарының докторы, профессор
Ахмед-Заки Д.Ж. – техника ғылымдарының докторы, профессор

Қалимолдаев М.Н., Әлімхан Қ., Тасболатұлы Н.
Қ 26 Жоғары ретті анықталмаған шын мәніндегі сыйықтық емес жүйелерді глобальды практикалық бақылау.
Монография / Жауапты редактор: А.А. Абдилдаева. – Нұр-Сұлтан: ҚР БФМ «Астана» халықаралық университеті. – 2021. – 100 б.

ISBN 978-601-337-503-8

Монографияда сыйықтық емес жүйелердің орнықтылығы, сыйықтық емес жүйелердің күй кері байланысы және шығыс кері байланысы көмегімен бақылауды басқару проблемалары зерттелген. Атап айтқанда, р-нормал формадагы сыйықтық емес жүйелердің шығыс сигналын бақылау есебінің математикалық моделі құрылыш, Ляпуновтың тұра әдісі, біртекті үстемдік әдісі, «компенсатор-контроллер» біріккен әдісі, сигнум функция әдістері көмегімен басқару табылған. Теориялық зерттеу, дағелдеу нәтижесінде қол жеткізген жетістіктерді компьютерде модельдеу MatLab GUI қосымшасы арқылы жүзеге асырылған.

Монография басқару теориясының мәселелерімен айналысадын мамандарға, сондай-ақ жоғары оку орындарының математикалық және компьютерлік модельдеу мамандығының жоғары курс студенттеріне арналған.

ӘОЖ 510
КБЖ 22.1

«Астана» халықаралық университетінің ғылыми кеңесінде қарастырылып, бекітілді (№4 хаттама, 29.03.2021 ж.)

ISBN 978-601-337-503-8

© Қалимолдаев М.Н., Әлімхан Қ.,
Тасболатұлы Н., 2021
© Ақпараттық және есептеуіш
технологиялар институты, 2021
© Л.Н. Гумилев атындағы
Еуразия ұлттық университеті, 2021
© «Астана» халықаралық университеті, 2021
© әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық
университеті, 2021

МАЗМУНЫ

АЛҒЫС СӨЗ	4
1 СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕР ОРНЫҚТЫЛЫҒЫ, СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІ БАСҚАРУ ПРОБЛЕМАЛАРЫ	9
1.1 Басқару теориясының даму тарихы, сыйықтық емес жүйелер орнықтылығын зерттеу, тұрғандастыру, басқару проблемаларының көзіргі зерттелу деңгейі	9
1.2 Анықталмаған сыйықтық емес жүйелер орнықтылығы	19
1.3 Уақыты кешіккен сыйықтық емес жүйелердегі орнықтылық проблемасы	24
1.4 Заманауи техникалық жүйелерді басқаруда сыйықтық емес жүйелерді басқару әдістерін қолдану	27
2 ЖОҒАРЫ РЕТТІ АНЫҚТАЛМАҒАН СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІ ГЛОБАЛЬДЫ ПРАКТИКАЛЫҚ БАҚЫЛАУ	34
2.1 Біртекті жүйелер үгімі және негізгі математикалық леммалар	34
2.2 Сыйықтық емес жүйелердің шығыс сигналын практикалық бақылау	36
2.3 Уақыты кешіккен сыйықтық емес жүйелерді бақылау	57
2.4 Бір буынды робот-манипулятор қозғалысын басқару және бақылау	70
2.4.1 Бір буынды робот-манипулятордың аппараттық-жабдықтамалық құрылымы	71
2.4.2 Бір буынды робот-манипулятор қозғалысын басқару алгоритмін және математикалық моделін құру	72
3 СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІ БАҚЫЛАУ ЕСЕПТЕРИНЕ БАГДАРЛАМАЛЫҚ КЕШЕН ҚҰРУ	75
3.1 Әзірленген алгоритмдерді компьютерлік модельдеудің артықшылығы	75
3.2 Бағдарламалық кешен архитектурасы	77
3.3 Бағдарламалық кешен құру	78
ҚОРЫТЫНДЫ	85
ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ	87
ҚОСЫМША А	96

АЛҒЫС СӨЗ

Басқару теориясының ең негізгі мәселелерінің бірі болып табылатын бақылау жүйелерін автоматты басқару қазіргі кезеңде тұрмыста, өнеркәсіпте және басқа да салаларда кең қолданысқа ие. Мысалы, автопилоттарды автоматты басқару, зымырандарды басқару немесе ұшқышсыз ұшу аппараттарын берілген траектория бойынша қозғалту, химия өнеркәсібінде температуралың автоматты реттеу, ядролық реакторлардагы сініргіш стержендердің позицияларын автоматты реттеу, өндірістегі робот-манипуляторлар қозғалысын басқару және т.б. Сонымен қатар, заманауи квадрокоптер немесе гексакоптер сынды ұшқышсыз ұшу аппараттарын ауылшаруашылығында тиімді пайдалану немесе аталған ұшқышсыз ұшу аппараттарын пайдаланып, төтенше апат аймағындағы адамдарға медициналық дәрі-дәрмектерді берілген траектория бойынша жеткізу мәселелерін зерттеу еліміз үшін өзекті болып табылады.

Бақылау жүйелері дегеніміз – күнделікті өмірде кездесетін көптеген техникалық жүйелерге баламалық сыйықтық емес тендеулер түрінде сипатталған жүйелер. Автоматты бақылау жүйелерінің тұрмыста және өндірісте кең қолданысқа ие болуы басқару саласын зерттеуге деген қызығушылықты одан әрі арттыруда. Басқару теориясын терең менгеру нәтижесінде көптеген тұрмыстағы, өндірістегі күрделі жүйелерді модельдеуге болады. Берілген зерттеу жұмысында сыйықтық емес жүйелердің бір класына жататын p -нормал түрдегі сыйықтық 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 сыйықтық емес жүйелердің күйлерін динамикалық шығыс кері байланыс арқылы тұрақтандыру есебі, p -нормал формадағы сыйықтық емес жүйе шығысын бақылау есебі, p -нормал формадағы уақыты кешіккен сыйықтық емес жүйе күй сигналын бақылау есептері компьютерде модельденді.

Сыйықтық емес жүйелерді күй сигналы немесе шығыс сигналы көмегімен басқару көптеген жұмыстарда, сонын ішінде, осы саланы зерттеп жүрген белгілі ғалымдар еңбектерінде жарық көрді. Сыйықтық немесе сыйықтық емес жүйелер орнықтылығын зерттеу және оларды басқару, бақылауды математикалық модельдеудің теориялық нәтижелерін қарастыру А.М. Ляпунов, Л.С. Понtryгин, Я.Н.

Ройтенберг, Е.А. Барбашин, Н.Н. Красовский, Н.Г. Четаев, И.Г. Малкин сынды көңестік ғалымдардың классикалық жұмыстарына негізделеді. Еліміздің көрнекті ғалымы Т.Н. Бияров 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. Айсагалиев, З.Н. Мурзабеков, Ш.А. Айпанов, М.Н. Калимoldаев, Т.Ж. Мазаков және т.б. Ал алыс-жақын шетелдерде күй кері байланыс арқылы жүйені тұрақтандыру мәселесін ең алғаш зерттеген ғалымдар: С.І. Byrness және A. Isidori (1989, 1991), J. Tsinias (1989), R. Marino және P. Tomei (1995), M. Krstic (1995) және т.б.; шығыс кері байланысы арқылы жүйені тұрақтандыру мәселесін ең алғаш зерттеген ғалымдар: F. Mazenc, L. Praly және W. Dayawansa (1994), C. Qian және W. Lin (2002, 2003), L. Praly (2003), C. Qian (2003), K. Alimhan және H. Inaba (2004, 2005, 2006, 2008) және т.б.; ізіне тұсу (бақылау) мәселесімен ең алғаш айналысқан ғалымдар (сызықтық жүйелер үшін): E.J. Davison (1976), B.A. Francis (1976); (сызықтық емес жүйелер үшін): J.S.A. Neuburn және W.A. Wonham (1984), V. Anantharam және C.A. Desoer (1985), A. Isidori және C.I. Byrnes (1990, 2000) және т.б.; шығыс сигналын практикалық бақылау мәселесімен ең алғаш айналысқан ғалымдар (күй кері байланыс арқылы): S. Celikovsky және J. Huang (1999), C. Qian және W. Lin (2002, 2006) және т.б.; қазіргі кезде динамикалық шығыс кері байланысы арқылы тұрақтандыру мәселесін зерттеп жүрген ғалымдар: B. Yang және W. Lin (2004, 2005), C. Qian (2005), J. Polendo және C. Qian (2007) және т.б.; динамикалық кері байланыс арқылы ізіне тұсу мәселесін зерттеумен айналысып жүрген ғалымдар Q. Gong, C. Qian (2005), K. Alimhan, H. Inaba (2003, 2006, 2008, 2019-2021), N. Otsuka (2011, 2012-2021) және т.б.

Жалпы жүйе деп ортақ функционалдық міндетті орындастын өзара әрекеттестікте болатын объектілер жиынтығы түсіндіріледі. Сыйықтық емес жүйелер деп сыйықтық шарттарды қанағаттандырайттын жүйелерді айтамыз. Басқаша айтар болсақ, табиғаттағы барша нақты физикалық жүйелерге сыйықтық еместік тән. Сыйықтық емес болмыстық жүйелердегі тендеулер өзгерісі сыйықтық емес дифференциалдық тендеулермен сипатталады. Сыйықтық емес жүйелерді бақылау проблемалары бірнеше соңғы онжылдықтарда ғылыми қауымдастық тарапынан үлкен қызығушылыққа ие болып келеді. Соңғы екі онжылдықта сыйықтық емес басқару теориясының әр түрлі әдіс-тәсілдерін әзірлеу мен оларды компьютерде модельдеу

арқылы нәтиже алуда айтарлықтай оң өзгерістер байқалуда. Біріншіден, мұндай жетістік сыйықтық емес үрдістерді толық және тез зерттеуге мүмкіндік беретін есептеуіш техниканың қарқынды дамуымен және бақылау сапасына қойылатын талаптардың артуымен байланысты. Екіншіден, мұндай типтегі жүйелерді синтездеу мен талдаудын да теориясы жылдан жылға дамып келе жатқандығымен түсіндіруге келеді. Анықталмаған сыйықтық емес жүйелерге кең ауқымды практикалық бақылау және ол үшін бағдарламалық кешен күру 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 қондырылғылар жұмысының тұрақтылығы мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету және басқару/бақылау проблемаларын зерттеудің өзектілігі мен практикалық құндылығының маңызы зор.

Монографияда қарастырылып жатқан жүйе белгілі бір шарттар қойып, оны қанағаттандырган жағдайда сыйықтық емес жүйелер тобының аффиндік жүйесімен тең болатын жүйе. Олай болса, бұл жұмыста зерттелген жүйеде жеткен ғылыми жетістіктерді және нәтижелерді сол шарттарды қанағаттандыратын басқа да сыйықтық емес болған аффиндік жүйелерге де пайдалануға болады деген сөз. p -нормал формада ие жүйедегі p мәні бірге тең болған жағдайдағы сыйықтық емес жүйелердің орнықтылығы, бақылау мәселелерінің басым көпшілігі өз шешімін тапқан. Егерде сыйықтық емес жүйелердегі p мәні бірге тең болса, ол жүйенің бір болігін сыйықтандыруға болады, ал екінші болігі сыйықтық емес болып келген жүйе деген сөз. Ал біз зерттеген сыйықтық емес жүйеде p мәні әр уақытта бірден үлкен. Мұндай сыйықтық емес жүйелер шын мәніндегі сыйықтандыруға келмейтін жүйелер деп тұжырымдалады. Мұндай сыйықтандыруға келмейтін шын мәніндегі сыйықтық емес жүйелерді тұрақтандыру, басқару, бақылау проблемасы $p=1$ болған жайдайдағы жүйелерге қарағанда күрделірек. Әсіресе, жоғарыда берілгендей $p>1$ жүйелерде уақыт кешігуі бар болған жағдайда бақылау есебі әлі шешімін таппаған күрделі проблемалардың бірі. Осы проблемаларды назарға алып, шешу алгоритмі ұсынылып, біршама жаңа жетістіктерге қол жеткізіп, ол ғылыми нәтижелер жоғары рейтингті журналдарда жарияланды.

Карапайым формадагы сыйықтық емес жүйелер шығыс сигналдарын кең ауқымды асимптотикалық тұрақтандыру есебін шешу алгоритмі ұсынылып, математикалық моделі қарапайым сыйықтық емес жүйемен берілген бір буынды робот манипулятор қозғалысын тұрақтандыру есебінің эксперименті жүргізілді. Сонымен қатар p -нормал формадагы жоғары ретті анықталмаған сыйықтық емес жүйелердің шығыс сигналын берілген тірек сигналдың ізіне түсіру басқару тендеуін 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.

Монографияның алғысозінде зерттеу жұмысы тақырыбының өзектілігі және негізгі мақсат-міндеттері анықталған. Орындалған зерттеулердің нәтижелері көрсетіліп, зерттеу жұмысының ғылыми-практикалық жаңалығы баяндалды. Сонымен бірге, зерттеу жұмысында кол жеткізген негізгі жетістіктердің апробациясы, жарияланымдар туралы мәліметтер берілді.

Монографияның бірінші бөлімінде зерттеу жұмысының тақырыбы бойынша алдыңғы ғалымдардың еңбектеріне шолу жасалды және ғылыми жұмыстың негізі болып табылатын сыйықтық емес жүйелердің орнықтылығы, сыйықтық емес жүйелердің күй кері байланысы және шығыс кері байланысы көмегімен бақылау проблемалары зерттелді.

Екінші белімде зерттеу жұмысына қажет болатын біртекti жүйелер түсініктері беріліп, негізгі математикалық леммалар берілді. Әрі қарай, жоғары ретті сыйықтық емес жүйелерге кең ауқымды практикалық бақылау проблемасы зерттелді. Атап айтқанда, қарастырылған p -нормал формадагы сыйықтық емес жүйелердің шығыс сигналын бақылау есебінің математикалық моделі құрылыш Ляпуновтың тұра әдісі, біртекti үстемдік әдісі, «компенсатор-контроллер» біріккен әдісі, сигнум функция біріккен әдістері көмегімен басқару табылды. Теориялық зерттеу, дәлелдеу нәтижесінде кол жеткізген жетістіктерді компьютерде модельде MaLab қосымшасы арқылы жүзеге асырылды. Бағдарламалық жасақтамасы құрылыш, 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 кешігүі бар p -нормал түрдегі сзықтық емес жүйелерді де басқару мәселесі зерттеліп, математикалық моделі құрылды. Ляпунов-Красовский тәсілін пайдаланып, берілген жүйедегі уақыт кешігүен болған кері ықпалын жою арқылы уақыт кешігүі бар сзықтық емес жүйені басқару және бақылау орындалды. Компьютердегі сандық эксперименттер MatLab қосымшасында орындалды және алынған бақылау қателіктеріне талдау жасалды. Одан әрі жұмыстар сзықтық емес жүйелердің күйлерін тұрақтандыру және бақылау проблемаларына құрылған алгоритмдерді компьютерде тестілеумен байланысты жүргізілді. Бір буынды өндірістік робот-манипулятор қозғалыс тендеуінің аппаратуралық-жабдықтамалық құрылымының математикалық моделі алынып, координата аудыстуруларын енгіздік және шықкан жүйе күйлерін тұрақтандыратын басқаруды табудың алгоритмі құрылды. Бір буынды робот-манипулятор қозғалысын басқару тендеуі арқылы MatLab қосымшасында сандық есептеу жүргізілді.

Қарастырылған есептер үшін бағдарламалық кешен құру жұмыстары монографияның үшінші бөлімінде сипатталды.

М.Н. Қалимoldаев, Қ. Әлімхан, Н. Тасболатұлы

1 СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕР ОРНЫҚТЫЛЫҒЫ, СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІ БАСҚАРУ ПРОБЛЕМАЛАРЫ

1.1 Басқару теориясының даму тарихы, сзықтық емес жүйелер орнықттылығын зерттеу, тұрақтандыру, басқару проблемаларының қазіргі зерттегу деңгейі

Басқару теориясы XX ғасырдың соңғы онжылдықтарынан бастап жылдам дамып келе жатқан ғылым саласы болып табылады. Оның қағидаттары адам еңбек-күшін автоматтандыру әлеуетін айтартықтай көбейтуге мүмкіндік беретін әртүрлі жүйелерді, үрдістерді компьютерлік үлгілеудің мәселелерін шешу нәтижесінде дүниеге келді. Басқару теориясы қазіргі заманғы технологияларда кеңінен қолданылады. Мысалы, заманауи техникаларды, әлеуметтік-экономикалық салаларды, робототехникалық жүйелерді қазіргі кезде автоматты басқарусыз елестету ойга қоныссыз. Осылайша, басқару жүйелері мен қосымшаларының кең қолданысқа ие болуы басқару жүйелерін зерттеуге деген қызығушылықты одан әрі арттырды. Басқару теориясының негізін қалаушылардың бірі орыс математигі және механигі Ляпуновтың анықтamasы бойынша, математикалық модельдеу – бұл объектінің жанама практикалық немесе теориялық зерттеу.

Басқару міндеті нақты пайдалану жағдайында басқару объектісі талап етілетін функцияларды орындауды қамтамасыз ету болып саналады. Басқару объектісінің ағымдағы күйін $y(t)$ шығыс сигналымен белгілейміз. Шығыс сигналдарының физикалық мағынасы – электр тогының кернеуі, температура, жылдамдық, бұрыштық орын аудыстурулар және т.б. Ал нақты мәселелерде басқару объектісіне $z(t)$ кері әсер етуші – сыртқы әсерлер деп аталағын шулардың ықпалына ұшырайды. Бұл кері ықпал етуші әсер басқару объектісінің қалыпты күйін және сәйкесінше шығыс сигналын өзгертуге ұшыратады. Осы кедергі келтіруші әсерден туындаған бұзылуларды ескерсек, шығыс сигналды берілген алгоритмдер бойынша орындау үшін басқару объектісіне и басқарушы кіріс әсерін беруді орындау қажеттілігі туындаиды (1.1 сурет).

Бұл алгоритм әдетте шығыс сигналын белгілі немесе белгісіз заң бойынша уақыт өзгеруі жағдайында да тұрақты ұстап тұруды көздейді. Басқару міндеті – қоздырғыш әсерлер болған кезде берілген алгоритм қамтамасыз етілетін басқарушы әсерді өзгертудің заңын қалыптастыру

```
set(ax_new,'Position','auto')
print(f_new,'PrintAxesOnly','-dpng')
```

М.Н. Қалимолдаев, К. Әлімхан,
Н. Тасболатұлы

ЖОГАРЫ РЕТТІ АНЫҚТАЛМАҒАН ШЫН МӘНІНДЕГІ
СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІ ГЛОБАЛЬДЫ ПРАКТИКАЛЫҚ
БАҚЫЛАУ

МОНОГРАФИЯ

Басуға 29.03.2021 қол қойылды. Форматы А5.
Офсеттік түрлі-түсті басылым.
Шартты баспа табагы 5.81.
Таралым 500 дана. Тапсырыс № 65100.