

# Сызықтық емес жүйелерді кері байланыс арқылы робастты басқару мәселелерін компьютерге модельдеу

<sup>1</sup>\*АЛИШЕВА Сандугаш Салхудиновна, докторант, sandu\_alish@mail.ru,

<sup>1</sup>АЛИМХАН Килан, PhD, профессор, keylan@live.jp,

<sup>2</sup>ТАСБОЛАТҰЛЫ Нұрболат, PhD, деканның орынбасары, tasbolatuly@gmail.com,

<sup>3</sup>АХМЕДОВ Анваржон, PhD, профессор, anv.akhmed@gmail.com,

<sup>1</sup>«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Астана, Сәтпаев көшесі, 2,

<sup>2</sup>Астана халықаралық университеті, Қазақстан, Астана, Қабанбай батыр даңғылы, 8,

<sup>3</sup>Паханг Малайзия университеті, Малайзия, Паханг, Куантан,

\*автор-корреспондент.

**Аңдатпа.** Сызықтық емес жүйелерді кері байланыс арқылы робастты басқару мәселелері басқару теориясындағы ең негізгі мәселелердің бірі болып табылады. Соның ішінде, заманауи технологиялардың қатаң талаптарына сәйкес келетін кері байланыс арқылы контроллерді жобалау кезеңінде күрделі басқару заңдарын модельдеуді талап етеді. Кері байланыс арқылы басқару кезіндегі орнықтылық, ізге түсіру және ауытқуларды азайту мәселелеріне байланысты басқару заңының әмбебап тәсілінің болмауы, компьютерлік модельдеу кезінде әр түрлі әдістерді талап етеді. Мақалада шын мәнінде сызықтық емес жүйелерді күй немесе кері байланыс арқылы орнықтандыру мен робастты басқару есептерінің шешімін компьютерде моделдеу мәселелері қарастырылады. Matlab бағдарламалық кешені көмегімен қарастырылатын сандық мысал есептері орындалып, нәтижелер алынды.

**Кілт сөздер:** басқару теориясы, сызықтық емес жүйелер, робастты басқару, орнықтылық теориясы, контроллер, кең ауқымды басқару, кері байланыс әдісі, Ляпунов әдісі, блок-схема, бағдарламалық кешен, Matlab GUI.

## Кіріспе

Белгісіз сызықтық емес жүйелерді кері байланыс арқылы робастты басқару қазіргі басқару теориясындағы ең маңызды мәселелердің бірі болып саналады [1-3]. Жоғары кірісті кері байланыс арқылы үстемдік әдісі сызықтық емес басқару теориясындағы белгісіздіктерді сенімді түрде азайту үшін қолданылатын негізгі жобалау құралы болып табылады [3]. Дегенмен, әдетте, қолданыстағы робастты басқару тәсілдерінің көпшілігі ең нашар жағдайға негізделген дизайн ретінде сынға алынады, яғни контроллер дизайнының мақсаты ең нашар белгісіздіктер болған кезде жақсы өнімділікке қол жеткізу болып табылады [4, 5].

Қолданыстағы робастты басқаруды жобалау әдістемелерінің көпшілігін қамтитын мұндай дизайн философиясы оның практикалық қолданылуы үшін келесі екі негізгі кедергіге әкеледі [6].

Бір жағынан, робастты басқару үшін әдетте ең нашар жағдайдағы белгісіздіктерді басу үшін шамадан тыс басқару энергиясы қажет [5]. Бұл басқару энергиясының ысырап болуына, сондай-ақ жетекті негізсіз таңдауға әкеп соқтырады,

өйткені қуатты жетектер робастты контроллерлер талап ететін қажетсіз шамадан тыс басқару әрекетін орындауды талап етеді. Осы мақсатта практикалық инженерияда кәдімгі робастты контроллер әдетте кірісті қанықтыру мәселелеріне әкеледі [7-10].

Екінші жағынан, сол контроллерлердің сенімділік көрсеткіштері жүйені басқарудың номиналды тиімділігін құрбан ету бағасымен алынады, өйткені номиналды жағдайдағы басқару тиімділігі әдетте робастты басқарудың мақсаттық функциясында қарастырылмайды [4, 6]. Дегенмен, практикалық жүйелердің көпшілігі әдетте номиналды жұмыс нүктесінің айналасында жұмыс істейді және өздерінің номиналды жұмыс нүктесінен алыс жұмыс істеу мүмкіндігі шектеулі. Мысал ретінде ұшуды басқару жүйесін алатын болсақ, ұшу аппаратының ұшу диапазоны әдетте оның номиналды ұшу шарттарына сәйкес келеді. Өте ауыр ұшу ортасы бүкіл ұшу процесінде сирек пайда болады. Ең нашар жағдайға негізделген робастты басқару жобасы консервативті дизайнға әкеледі. Осылайша, перспективалы және практи-

калық робасттық контроллер белгісіздіктердің ең нашар жағдайында орнықтылықты ғана емес, сонымен қатар номиналды жұмыс нүктелерінің айналасындағы басқару тиімділігін де ескеруі керек.

Сонымен қатар, сызықтық емес жүйелердің кері байланыс арқылы робастты басқару мәселелерін математикалық және компьютерлік моделін жасау кезінде басқару теориясының негізгі әдістемелік ережелерін ескеру қажет. Басқару жүйелерін толық білу көптеген күрделі жүйелерді имитациялауға мүмкіндік береді.

**Зерттеу әдістері және ғылыми нәтижелер.**

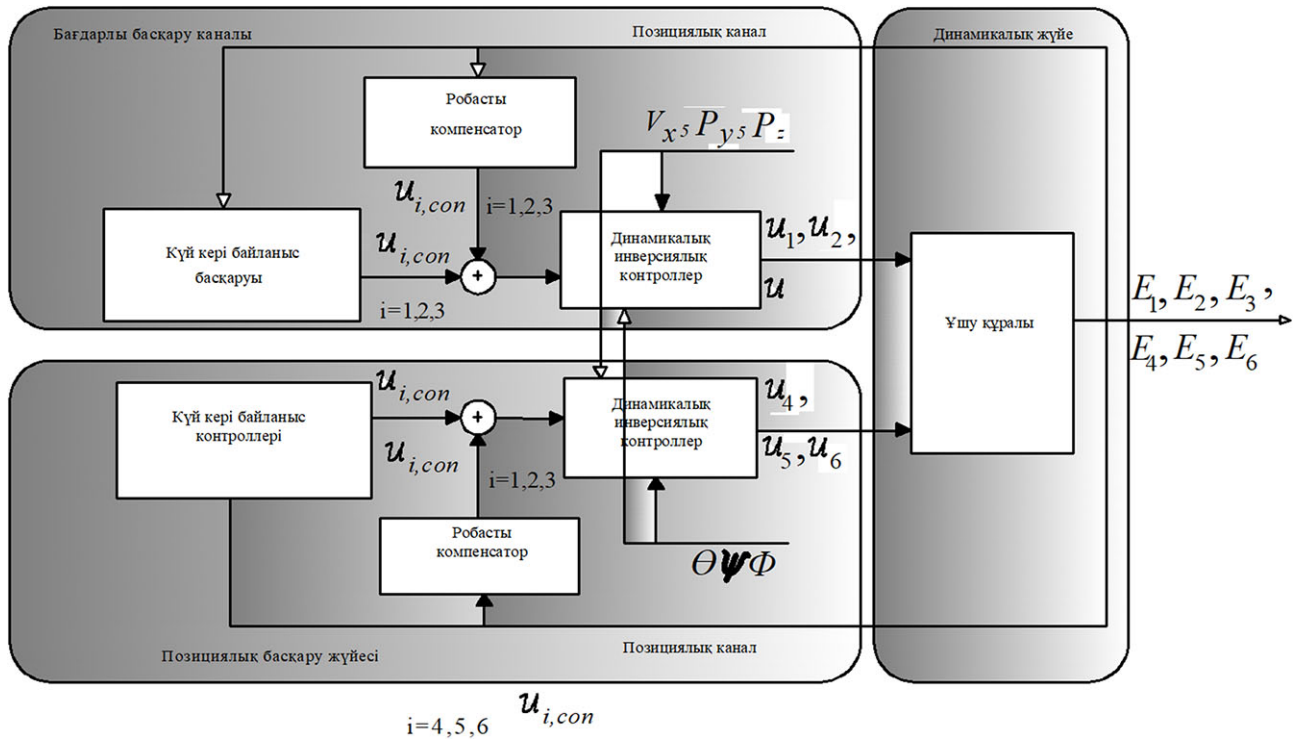
Кең ауқымды орнықтылыққа қол жеткізу, берілген траекторияларды ізге түсіру немесе ауытқуларды асимптотикалық басу үшін күйкері байланыс (егер барлық күйлер белгілі болса) немесе шығыс кері байланыс (егер тек шығыс векторы белгілі болса) арқылы сызықтық емес жүйелерді робастты басқару мәселесі басқару теориясындағы ең негізгі мәселелердің бірі болып табылады.

Заманауи техникалық құрылғыларды робаст-

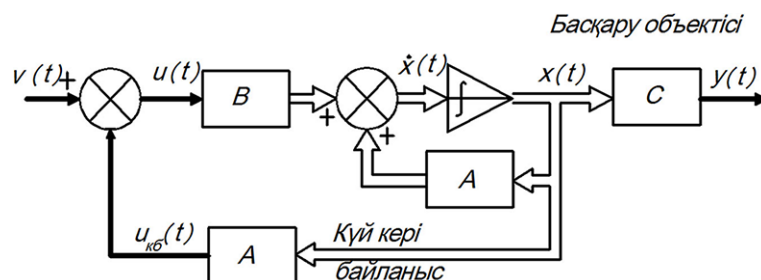
ты басқару процесінде белгілі берілген эталондық шамалармен басқару практикада кең қолданылу-да. Мысалы, сервомоторлы механизмнің әрекетін келтірсек болады, оның міндеті – бұрыштық күйін қашықтықта орналасқан екіншісімен басқаруды қамтамасыз ету болып табылады. Төмендегі 4-суретте сервомоторлы жүйенің схемасы суреттелген. Бұл суретте бейнеленген процестегі басқару объектісі де біз зерттеп отырған сызықтық емес жүйені басқаруға, орнықтандыруға мысал бола алады.

Басқару теориясы және басқару инженериясы ұшақтар, ғарыш кемелері, кемелер, пойыздар және автомобильдер сияқты динамикалық жүйелермен, химиялық және өндірістік процестермен, қозғалтқыштар, генераторлар және қуат жүйелері сияқты электр жүйелерімен, сандық бағдарламамен басқарылатын өндірістік машиналармен, роботтармен айналысады. Әрбір жағдайда басқару есебінің қойылуы:

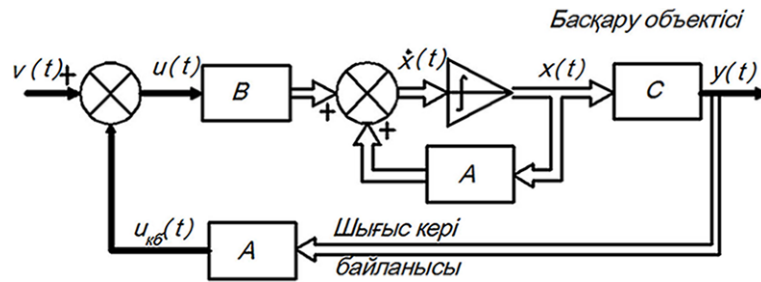
1. Белгілі бір тәуелді айнымалылар болып ке-



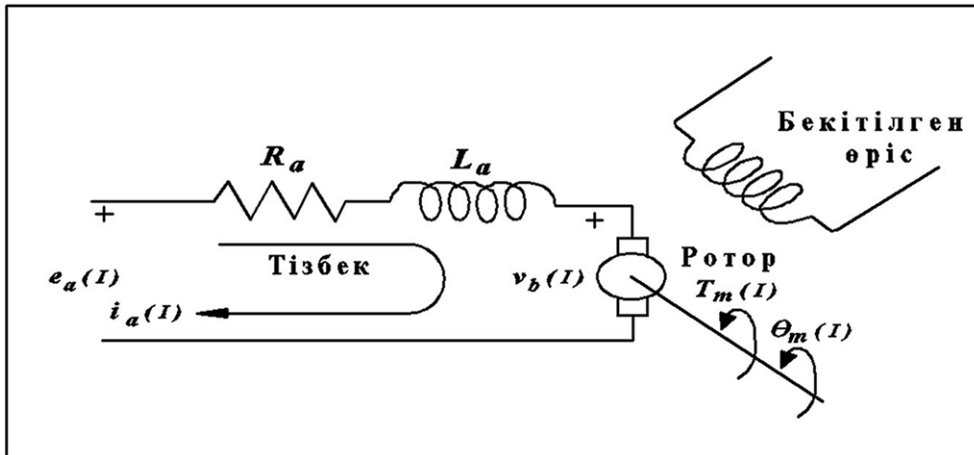
1-сурет – Ұшу құралын робастты басқару жүйесінің блок-схемасы



2-сурет – Күй кері байланыс арқылы робастты басқару блок схемасы



3-сурет – Шығыс кері байланыс арқылы робастты басқару блок схемасы



4-сурет – Сервомоторлы жүйенің схемасы

летін шығыстардың қажетті жоспарланған түрде болуын бақылау керек. Мысалы, жүйенің басқа нүктелеріндегі бақыланбайтын және белгісіз ауытқуларына қарамастан, процестің әр түрлі нүктелеріндегі температурасы мен қысымын немесе жүйенің қуатындағы кернеу мен жиілікті берілген қажетті тұрақты мәндерге тағайындау қажет болуы мүмкін.

2. Кіріс деп аталатын тәуелсіз айнымалылардың жүйенің жұмысын басқару мен реттеуге қол жетімді болуы. Басқа тәуелді айнымалылар, мысалы жылдамдық пен температура сияқты, жүйедегі динамикалық өлшемдер ретінде қол жетімді.

3. Жүйеге белгісіз ауытқулардың әсер етуі. Мысалы, желдің күші сияқты сыртқы жағдайлар немесе тағы да басқа әсерлер.

4. Нысанның динамикасын сипаттайтын теңдеулер мен ондағы параметрлердің белгісіз немесе нақты емес болуы. Бұл белгісіздік басқарылатын физикалық заңдылықтар мен теңдеулер белгілі болса да туындауы мүмкін, себебі бұл теңдеулер сызықтық емес жүйенің жұмыс нүктесінің айналасында сызықтандыру арқылы алынған. Жұмыс нүктесі өзгерген кезде жүйенің параметрлері де өзгереді.

Сервомоторлы басқару жүйесі сияқты қозғалыс траекториясы сызықтық еместік қасиеті бар бір шама қазіргі заманғы жүйелердің басты сипаттамаларында басқару объектісі, тірексигналы,

сәйкессіздік (қате, басқару қателігі), бақылаушы, кері байланыс әдісі, контроллер, басқару (басқару әрекеті, реттеу), орындаушы құрал элементтері болады.

**Компьютерде модельдеу.** Алдымен сызықтық емес жүйелерді кең ауқымды робастты басқару алгоритмінің блок-схемасын қарастырайық.

**Алгоритм сипаттамасы:**

- Шын мәніндегі сызықты емес жүйені робастты басқаруды табу үшін ең алдымен координаталық түрлендіруді енгіземіз;

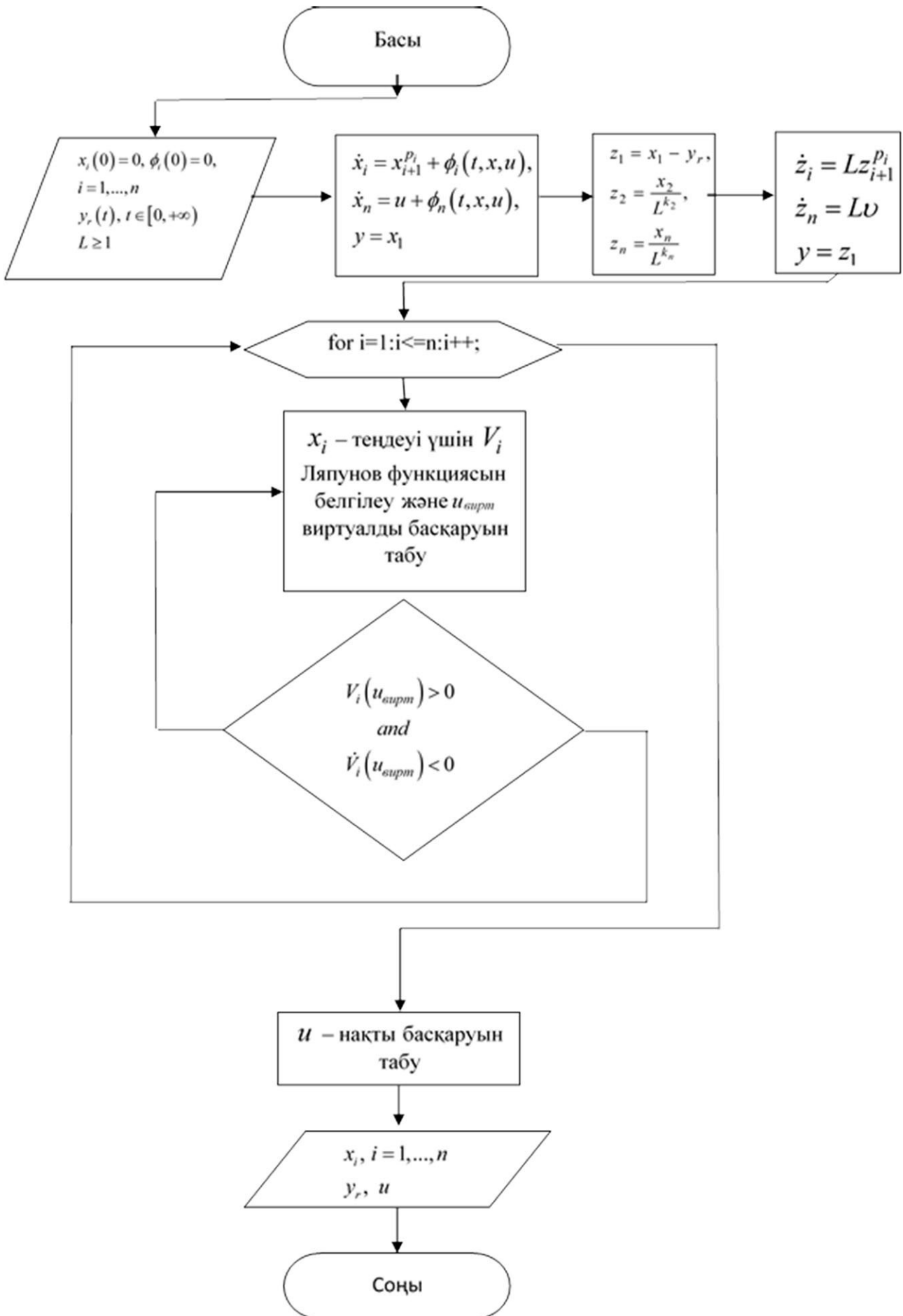
- Түрлендірілген жүйенің номинал бөлігін асимптотикалық орнықтандыратын басқаруды табамыз;

- Қарастырып отырған жүйенің 1-ші күй теңдеуі бойынша Ляпуновтың кандидат функциясын тауып, табылған функция туындысын теріс ете алатындай «виртуалды» контроллерді жобалау керек;

- Жоғарыда қарастырылған этапта жобаланған виртуал контроллер жәрдеміңде 2-ші күй теңдеуіне Ляпуновтың кандидат функциясын тауып және ол функция туындысын теріс ете алатындай виртуал контроллерді жобалаймыз;

- Аталған іс-әрекеттерді нақты контроллері бар теңдеуге шейін қайталап, әрі қарай толық жүйе үшін соңғы контроллерді жобалау, құру керек;

- Соңғы кезеңде, жобаланған контроллерді



сандық мысалдар арқылы компьютерде модельдеу қажет болады.

### Мысал

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + \frac{x_1}{(1 - c_1 x_2)^2 + x_2^2}, \\ \dot{x}_2 &= u + \ln(1 + (x_2^2)^{c_2}), \\ y &= x_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Содан кейін келтірілген компенсаторды келесі түрде аламыз:

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \hat{x}_2 + r(y - \hat{x}_1), \\ \hat{x}_2 &= u + r^2(y - \hat{x}_1), \\ u &= -r(b_2 r \hat{x}_1 + b_2 \hat{x}_2). \end{aligned} \quad (2)$$

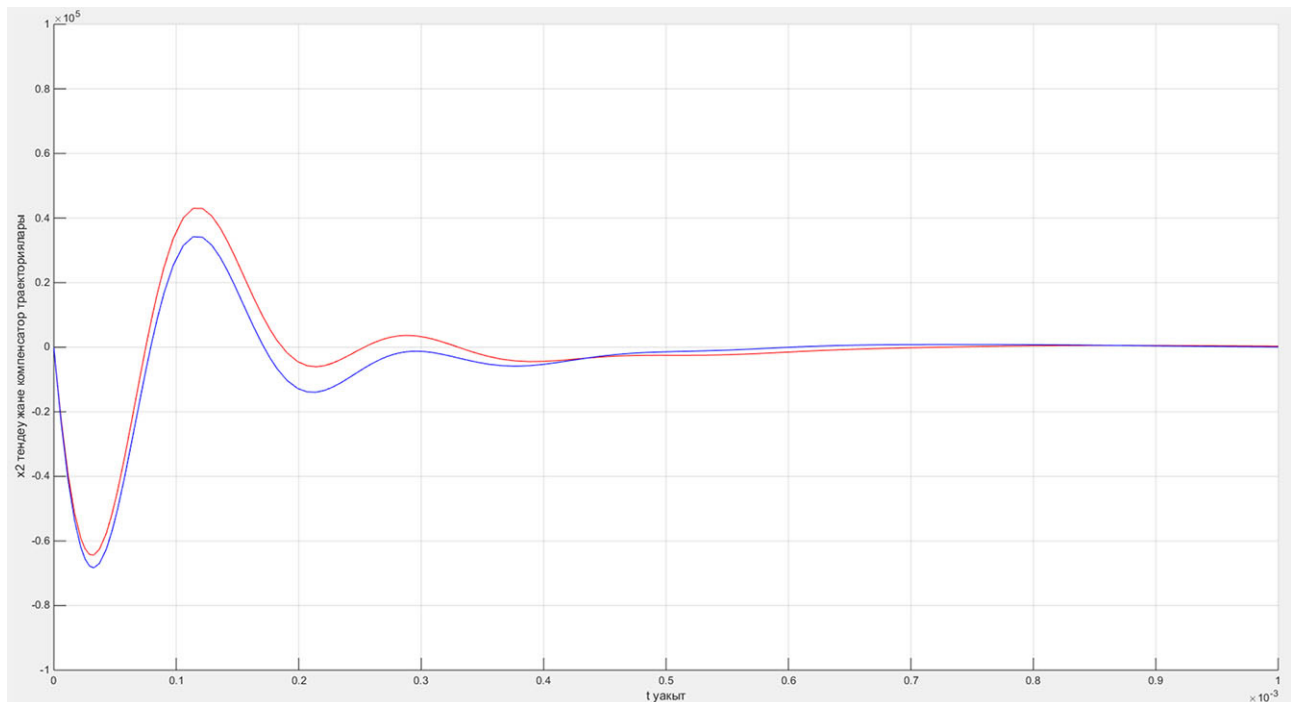
MatLab ортасында сандық модельдеу үшін біз  $r \geq 8339$ , ал бастапқы мәнін  $(x_1(0), x_2(0), \hat{x}_1(0), \hat{x}_2(0)) = (1, 5, 3, 5)$  аламыз.

Модельдеу нәтижесі 6-суретте көрсетілген.

Ол бойынша динамикалық шығыс компенсаторы әсерінің нәтижесінде берілген жүйе шығыс сигналдарының (6-суретте көк және қызыл түсті) тұрақтандырылғанын көреміз.

### Қорытынды

Шын мәніндегі сызықтық емес жүйелерді күй немесе кері байланыс арқылы орнықтандыру мен робастты басқару есептерінің шешімін компьютерде моделдеу мәселелері қарастырылды. Сызықтық емес жүйелерді робастты басқарудың алгоритміне арналған блок схема жасалды. Matlab GUI бағдарламасының көмегімен қарастырылған алгоритмнің тиімділігі қарапайым мысал арқылы дәлелденіп, нәтижелер алынды. Кері байланыс көмегімен сызықтық емес жүйені робастты басқару, орнықтандыру және бақылау проблемалары қарастырылды.



6-сурет – Мысалда берілген жүйенің шығыс сигналдары

### ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Atassi, A.N., and Khalil, H.K., 1999, «A separation principle for the stabilization of a class of nonlinear systems», IEEE Trans. Autom. Control, 44, pp. 1672-1687.
2. Freidovich, L.B., and Khalil, H.K., 2008, «Performance recovery of feedback-linearization based designs», IEEE Trans. Autom. Control, 53, pp. 2324-2334.
3. Qian, C., and Lin, W., 2002, «Output feedback control of a class of nonlinear systems: a nonseparation principle paradigm», IEEE Trans. Autom. Control, 47, pp. 1710-1715.
4. Yang, J., Chen, W.-H., and Li, S., 2011, «Non-linear disturbance observer-based control for systems with mismatched disturbances/uncertainties», IET Control Theory and Application, 5, pp. 2053-2062.
5. Guo, B.-Z., and Zhao, Z.-L., 2013, «On convergence of the nonlinear active disturbance rejection control for MIMO systems», SIAM Journal of Control and Optimization, 51, pp. 1727-1757.

6. Li, S., Yang, J., Chen, W.-H., and Chen, X., 2014, Disturbance Observer-Based Control: Methods and Applications, CRC Press, Boca Raton, USA.
7. Chen, H., 2014, «Robust stabilization for a class of dynamic feedback uncertain nonholonomic mobile robots with input saturation», International Journal of Control, Automation and Systems, 12, pp. 1216-1224.
8. Chen, H., Wang, C., Liang, Z., Zhang, D., and Zhang, H., 2014, «Robust Practical Stabilization of Nonholonomic Mobile Robots Based on Visual Servoing Feedback with Inputs Saturation», Asian Journal of Control, 16, pp. 692-702.
9. Xu, B., Shi, Z., and Yang, C., 2015, «Composite fuzzy control of a class of uncertain nonlinear systems with disturbance observer», Nonlinear Dynamics, 80, pp. 341-351.
10. Qian, C.J., Lin, W. 2006, Recursive observer design, homogeneous approximation, and nonsmooth output feedback stabilization of nonlinear systems. IEEE Trans Autom Control, 5: pp. 1457-1471.

### **Компьютерное моделирование задач робастного управления нелинейными системами с помощью обратной связи**

<sup>1</sup>\*АЛИШЕВА Сандугаш Салхудиновна, докторант, sandu\_alish@mail.ru,

<sup>1</sup>АЛИМХАН Килан, PhD, профессор, keylan@live.jp,

<sup>2</sup>ТАСБОЛАТУЛЫ Нурболат, PhD, зам. декана, tasbolatuly@gmail.com,

<sup>3</sup>АХМЕДОВ Анваржон, PhD, профессор, anv.akhmed@gmail.com,

<sup>1</sup>НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», Казахстан, Астана, ул. Сатпаева, 2,

<sup>2</sup>Международный университет Астана, Казахстан, Астана, пр. Кабанбай батыра, 8,

<sup>3</sup>Университет Малайзии Паханг, Малайзия, Паханг, Куантан,

\*автор-корреспондент.

**Аннотация.** Задача управления нелинейными системами с помощью обратной связи является одной из важнейших проблем теории управления. В частности, требуется моделирование сложных законов управления на этапе проектирования регулятора с обратной связью, отвечающее жестким требованиям современной технологии. Отсутствие универсального подхода к закону управления, связанного с вопросами устойчивости, слежения и уменьшения отклонений при управлении с помощью обратной связи, требует иных методов при компьютерном моделировании. В статье рассматриваются проблемы компьютерного моделирования робастного управления и стабилизации действительно нелинейных систем с помощью обратной связи по состоянию или по выходу. С помощью программного комплекса Matlab GUI были выполнены рассмотренные примерные задачи и получены результаты.

**Ключевые слова:** теория управления, нелинейные системы, робастное управление, теория устойчивости, контроллер, глобальное управление, метод обратной связи, метод Ляпунова, блок-схема, программное обеспечение, графический интерфейс Matlab.

### **Computer Modeling of Robust Control Problems for Nonlinear Systems Using Feedback**

<sup>1</sup>\*ALISHEVA Sandugash, Doctoral Student, sandu\_alish@mail.ru,

<sup>1</sup>ALIMHAN Kilan, PhD, Professor, keylan@live.jp,

<sup>2</sup>TASBOLATULY Nurbolat, PhD, Deputy Dean, tasbolatuly@gmail.com,

<sup>3</sup>AKHMEDOV Anvarjon, PhD, Professor, anv.akhmed@gmail.com,

<sup>1</sup>NPJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2,

<sup>2</sup>Astana International University, Kazakhstan, Astana, Kabanbay Batyr Avenue, 8,

<sup>3</sup>University of Malaysia Pahang, Malaysia, Pahang, Kuantan,

\*corresponding author.

**Abstract.** The control problem of nonlinear systems with feedback is one of the most important problems in the theory of control. In particular, it requires modeling of complex control laws at the design stage of the controller with feedback that meets the strict requirements of modern technologies. The lack of a universal approach to the control law, due to the problems of stability, tracking and reduction of deviations in feedback control, requires different methods in computer modeling. The article discusses the computer modeling of robust control problems and stabilization of inherently nonlinear systems with state or output feedback. With the help of the Matlab GUI software package, the sample examples under consideration were performed and the results were obtained.

**Keywords:** control theory, nonlinear systems, robust control, stability theory, controller, global control, feedback method, Lyapunov method, block diagram, software, Matlab GUI.

## REFERENCES

1. Atassi, A.N., and Khalil, H.K., 1999, «A separation principle for the stabilization of a class of nonlinear systems», *IEEE Trans. Autom. Control*, 44, pp. 1672-1687.
2. Freidovich, L.B., and Khalil, H.K., 2008, «Performance recovery of feedback-linearization based designs», *IEEE Trans. Autom. Control*, 53, pp. 2324-2334.
3. Qian, C., and Lin, W., 2002, «Output feedback control of a class of nonlinear systems: a nonseparation principle paradigm», *IEEE Trans. Autom. Control*, 47, pp. 1710-1715.
4. Yang, J., Chen, W.-H., and Li, S., 2011, «Non-linear disturbance observer-based control for systems with mismatched disturbances/uncertainties», *IET Control Theory and Application*, 5, pp. 2053-2062.
5. Guo, B.-Z., and Zhao, Z.-L., 2013, «On convergence of the nonlinear active disturbance rejection control for MIMO systems», *SIAM Journal of Control and Optimization*, 51, pp. 1727-1757.
6. Li, S., Yang, J., Chen, W.-H., and Chen, X., 2014, *Disturbance Observer-Based Control: Methods and Applications*, CRC Press, Boca Raton, USA.
7. Chen, H., 2014, «Robust stabilization for a class of dynamic feedback uncertain nonholonomic mobile robots with input saturation», *International Journal of Control, Automation and Systems*, 12, pp. 1216-1224.
8. Chen, H., Wang, C., Liang, Z., Zhang, D., and Zhang, H., 2014, «Robust Practical Stabilization of Nonholonomic Mobile Robots Based on Visual Servoing Feedback with Inputs Saturation», *Asian Journal of Control*, 16, pp. 692-702.
9. Xu, B., Shi, Z., and Yang, C., 2015, «Composite fuzzy control of a class of uncertain nonlinear systems with disturbance observer», *Nonlinear Dynamics*, 80, pp. 341-351.
10. Qian, C.J., Lin, W. 2006, Recursive observer design, homogeneous approximation, and nonsmooth output feedback stabilization of nonlinear systems. *IEEE Trans Autom Control*, 5: pp. 1457-1471.