

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті
Бүркітбаев ат.Өнеркәсіптік автоматтандыру және цифрландыру институты
Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

ОӘК 621.382

Қолжазба нұсқасында

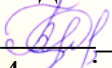
Тулен Алтынхан

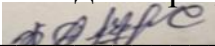
Магистрі академиялық дәрежесін іздену үшін

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Диссертация тақырыбы Борттық басқару кешенін құру

Мамандық 6М074600 – «Ғарыштық техника және технологиялар»

Ғылыми жетекші,
PhD докторы, сениор-лектор
 Қ.Н.Тайсариева
«24» шілде 2020 ж.

Оппонент,
PhD докторы, қауым-н профессор
 Әлібек Н.Б.
«24» шілде 2020 ж.

Нормобақылаушы:

Сениор-лектор, доктор PhD

 А.Хабай

«29» шілде 2020 ж.

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

ЭТжҒТ каф.менгерушісі

 И.Сырғабаев

« ____ » _____ 2020 ж.

Алматы 2020

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті
Бүркітбаев ат.Өнеркәсіптік автоматтандыру және цифрландыру институты
Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы
6М074600 – «Ғарыштық техника және технологиялар»

БЕКІТЕМІН

ЭТжҒТ каф.меңгерушісі

И.Сырғабаев

« ____ » _____ 2020 ж.

**магистерлік диссертация орындауға
ТАПСЫРМА**

Магистрант *Тулен Алтынхан*

Тақырыбы: *«Борттық басқару кешенін құру»*

Университет ректорының «29» қазан 2018 ж. №1194-м бұйрығымен
бекітілген

Аяқталған жобаны тапсыру мерзімі «03» шілде 2020 ж.

Жұмыстың бастапқы мәліметтері: *Борттық басқару кешендері,
математикалық және имитациялық модельдер.*

Диссертацияда өңделетін сұрақтар, диссертацияның қысқаша мазмұны:

а) Борттық басқару кешендерінің негізгі сипаттамалары

ә) Шағын ғарыш аппараттарының негізгі сипаттамалары

б) Шағын ғарыш аппараттарының басқарудың негізгі теориясы

*в) Сызықтық жүйелер үшін «шағын» басқарылатын және бақыланатын
тапсырмаларды шешу үшін мат.модель құру*

г) ШҒА басқаруды бағдарламалық кешенмен модельдеу

Сызбалық материалдар тізімі (міндетті сызбалар дәл көрсетілуі тиіс)

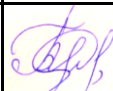

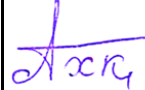
Сызбалық материалдар 18 слайдпен көрсетілген

Ұсынылатын негізгі әдебиет: 1) Ву, К.М. Управляемость «в малом» в задаче динамики микромеханического гироскопа [Текст] / К. М. Ву // 7-я международная научно-техническая конференция «К.Э. Циолковский - 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: Тез. докл. / Рязан. гос. радиотехн. университет. Рязань, 2017. – С. 190-195. 2) Фатеев В.Ф., Кругу Д.Л. Перспективная сеть передачи данных для локальной группировки малых космических аппаратов. Известия ВУЗов. Приборостроение. Тематический выпуск «Малые космические аппараты». Т. 52 . 2009. № 4.С. 46 3) Ключников В. Ю. Построение кластеров малых космических аппаратов // Изв. Вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 6. С. 423-428.

магистрлік диссертацияны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
«Шағын» жерсеріктің қол жетімді аймағын есептеу	1.09.2019 - 13.12.2019	орындалды
Бастапқы шарттарда «шағын» басқарылатын есепті шешудің сандық-аналитикалық әдісі	20.01.2020 - 25.02.2020	орындалды
ШҒА басқаруды модельдеудің бағдарламалық кешенінің жұмыс істеу мысалы	25.02.2020 – 24.04.2020	орындалды

Диссертациялық жұмыс бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған бөлімдерге қойған
қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диссертация жұмысының тақырыбын талдау	Тайсариева К.Н., ЭТжҒТ каф. сениор-лекторы, PhD докторы	25.02.2020 ж.	
Теориялық ақпарат	Тайсариева К.Н., ЭТжҒТ каф. сениор-лекторы, PhD докторы	24.04.2020 ж.	
Норма бақылау	Хабай А., ЭТжҒТ каф. сениор-лекторы, PhD докторы	29.07.2020 ж.	

Ғылыми жетекші 

К.Н. Тайсариева

Магистрант



А.Тулен

Мерзімі

«29» шілде 2020 ж.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	9
1 Ғарыш аппараттары борттық басқару кешендерінің сипаттамасы	10
1.1 Шағын ғарыш аппараттарының негізгі сипаттамалары	12
1.2 Модельдеу және басқару әдісі	24
1.3 Шағын қозғалыс кезіндегі ШҒА динамикалық моделін негіздеу	26
2 ШҒА қозғалысына арналған «шағын» басқарылатын және бақыланатын математикалық модельдеу	31
2.1 «Шағын» басқару теориясындағы негізгі анықтамалары	31
2.2 «Шағында» қол жетімділік ауданында құрудың сандық-аналитикалық әдісі	35
2.3 Коммутациялық басқару сәтін табудың сандық әдісі	37
2.4 Сызықтық жүйелер үшін «шағын» басқарылатын және бақыланатын мәселелерді шешу	41
2.5 Шағын толықтай байқау критерийі	45
2.6 Шағын қосарлылық принципі	48
2.7 «Шағын» ШС байқау есебін шешу әдісі	49
2.7.1 Шағын ШС-тің мүмкін болуын бағалау алгоритмдері	49
3 Ерекше жағдайларда ШҒА басқарылуы	56
3.1 Шағын ғарыш кемесінің ерекше нүктедегі басқарылуы	56
3.2 Шағын ғарыш аппараттарының «шағын» шартында алғашқы басқарылу	57
3.3 Берілген бастапқы шарттар үшін дифференциалдық теңдеулерді оператор әдісі арқылы шешу	60
3.4 Бастапқы шарттарда «шағын» басқарылатын есепті шешудің сандық-аналитикалық әдісі	63
4 Шағын ғарыш аппараттарын басқаруға және бақылауға арналған бағдарламалық кешен	66
4.1 ШҒА қозғалысын басқаруға болатын және бақыланатын модельдеуге арналған бағдарламалық кешеннің құрылымы	66
4.2 ШҒА басқаруды модельдеудің бағдарламалық кешенінің жұмыс істеу мысалы	85
Қорытынды	
Пайдаланылған әдебиеттер	

АҢДАТПА

Диссертациялық жұмыста басқарылатын қосалқы (спутниктік) типтегі ғарыш аппараттарын, яғни базалық ғарыш кемесінен (ғарыш кемесі) басталып, шектеулі басқару режимінде ғарыштық мақсатқа (FM) жететін ғарыш аппараттарын қарастырамыз.

Ғарыш технологиясын дамытудың қазіргі заманғы бағыттарының бірі – шағын ғарыш аппараттарын (ШҒА) құру және пайдалану. Жеке ғарыш кемесінің салыстырмалы түрдегі төмен құны ғарыштық жобаларды олардың сапасына нұқсан келтірместен іске асыру құнын едәуір төмендетеді. Сонымен, қазіргі шектеулі қаржыландыру аясында бір үлкен (ауыр) ғарыш кемесінің орнына жалпы проблеманы шешуге арналған аз шығынды ғарыш аппараттарының тобын құруға және орбитаға шығаруға мүмкіндік туды. Қазіргі уақытта ғарыш аппараттарының осындай негізгі міндеттеріне: оптикалық және радиодиапазондарда жерді қашықтықтан зондтау, ғарыштық байланыс, ғаламдық навигация, астрономиялық бақылаулар, космология, негізгі ғарыш аппараттары мен ғарыш станцияларын, ғарыш роботтары және т.б. жатады.

Ұсынылған диссертацияда келесі тапсырмалар шешіледі: ғарыштық мақсаттарды басқарудың есептелген төңірегіндегі БҒА қатысты ШҒА қозғалысын аналитикалық моделдеу; ғарыштық мақсат нүктесінен берілген кеңістіктік айналысының шегінен шықпастан, оның ұшуы кезінде ШҒА басқаруды сандық-аналитикалық моделдеу; FM-қа қол жеткізудің бүкіл процесі бойында ШҒА қозғалысының жағдайын сандық қалпына келтіру; басқару орталығының аумағын нақты есептеу; ШҒА қозғалысына талдау жасау үшін барлық міндеттерді шешуге арналған бағдарламалық пакет құру.

АННОТАЦИЯ

В диссертационной работе рассмотрим управляемые космические аппараты вспомогательного (спутникового) типа, то есть космические аппараты, начинающиеся с базового космического корабля (космического корабля) и достигающие космические цели (КЦ) в режиме ограниченного управления.

Одним из современных направлений развития космических технологий является создание и эксплуатация малых космических аппаратов (МКА). Сравнительно низкая стоимость отдельного космического судна значительно снижает стоимость реализации космических проектов без ущерба их качеству. Таким образом, в рамках существующего ограниченного финансирования вместо одного большого (тяжелого) космического корабля появилась возможность создать и вывести на орбиту группу малозатратных космических аппаратов для решения общей проблемы. В настоящее время к таким основным задачам космических аппаратов относятся: дистанционное зондирование Земли на оптических и радиодиапазонах, Космическая связь, глобальная навигация, астрономические наблюдения, космология, основные космические аппараты и космические станции, космические роботы и др.

В представленной диссертации решаются следующие задачи: аналитическое моделирование движения МКА относительно в области расчета управления космическими целями; количественно-аналитическое моделирование управления МКА при его полете, не выходя из точки космического назначения за пределы заданного пространственного оборота; количественное восстановление состояния движения МКА на протяжении всего процесса достижения КЦ; четкое подсчет территории Центра управления.; Создание программного пакета для решения всех задач для анализа движения, аналитическое моделирование движения МКА относительно в области расчета управления целями; количественно-аналитическое моделирование управления МКА при его полете, не выходя из точки космического назначения за пределы заданного пространственного вращения; количественное восстановление состояния движения МКА на протяжении всего процесса достижения КЦ ; четкий расчет территории Центра управления; создание программного пакета для решения всех задач для анализа движения МКА.

ANNOTATION

In this dissertation consider managed spacecraft auxiliary (satellite), i.e. the spacecraft, beginning with the base of the spacecraft and space reaching the target in the mode of limited control.

One of the modern directions of development of space technology is the creation and operation of small spacecraft. The relatively low cost of the vessel significantly reduces the cost of implementing space projects without compromising their quality. Thus, in the framework of the existing limited funding instead of one large (heavy) spacecraft have the opportunity to create and put into orbit a group of low-cost spacecraft for the solution of the overall problem. Currently, basic tasks of spacecraft attitude: remote sensing at optical and radio wavelengths, satellite communications, global navigation, astronomical observations, cosmology, the main spacecraft and space station, space robots, etc.

In the presented thesis the following tasks: analytical modeling of movement relative to small spacecraft in the calculation of control objectives; quantitative-analytical simulations of small spacecraft during its flight from the comfort of the point space assignment within a specified spatial turnover; quantitative recovery of the motion state of small spacecraft throughout the process of reaching; clear count of the centre of the control.; a clear calculation of the centre of the control. Creating a software package for the solution of all tasks for motion analysis, analytical modeling of movement relative to small spacecraft in the calculation of the control objectives; quantitative and analytical simulations of small spacecraft during its flight from the comfort of the point space assignment within a specified spatial rotation; quantitative recovery of the state of motion of the small spacecraft throughout the process of reaching; precise calculation of the centre of government; creating a software package for the solution of all tasks for motion analysis small spacecraft.

КІРІСПЕ

Жұмыстың өзектілігі. Ғарыш технологиясын дамытудың қазіргі заманғы бағыттарының бірі – шағын ғарыш аппараттарын (ШҒА) құру және пайдалану. Жеке ғарыш кемесінің салыстырмалы түрдегі төмен құны ғарыштық жобаларды олардың сапасына нұқсан келтірместен іске асыру құнын едәуір төмендетеді. Сонымен, қазіргі шектеулі қаржыландыру аясында бір үлкен (ауыр) ғарыш кемесінің орнына жалпы проблеманы шешуге арналған аз шығынды ғарыш аппараттарының тобын құруға және орбитаға шығаруға мүмкіндік туды. Қазіргі уақытта ғарыш аппараттарының осындай негізгі міндеттеріне: оптикалық және радиодиапазондарда жерді қашықтықтан зондтау, ғарыштық байланыс, ғаламдық навигация, астрономиялық бақылаулар, космология, негізгі ғарыш аппараттары мен ғарыш станцияларын, ғарыш роботтары және т.б. жатады.

Диссертациялық жұмыста басқарылатын қосалқы (спутниктік) типтегі ғарыш аппараттарын, яғни базалық ғарыш кемесінен (ғарыш кемесі) басталып, шектеулі басқару режимінде ғарыштық мақсатқа (ҒМ) жететін ғарыш аппараттарын қарастырамыз.

Әрине, ШҒА-ны басқарудың негізгі және шұғыл міндеттеріне осындай құрылғылардың басқарылуы және әр түрлі жағдайларда оларды бақылау мүмкіндігі және осы процесстің міндеттері кіреді. Сонымен қатар, басқарудың классикалық теориясын жетілдіру қажет, ШҒА мүмкіндіктері шектеулі болғандықтан қосымша шектеулер енгізу қажет.

Ұсынылған диссертацияда келесі тапсырмалар шешіледі: ғарыштық мақсаттарды басқарудың есептелген төңірегіндегі БҒА қатысты ШҒА қозғалысын аналитикалық моделдеу; ғарыштық мақсат нүктесінен берілген кеңістіктік айналысының шегінен шықпастан, оның ұшуы кезінде ШҒА басқаруды сандық-аналитикалық моделдеу; ҒМ-қа қол жеткізудің бүкіл процесі бойында ШҒА қозғалысының жағдайын сандық қалпына келтіру; басқару орталығының аумағын нақты есептеу; ШҒА қозғалысына талдау жасау үшін барлық міндеттерді шешуге арналған бағдарламалық пакет құру.

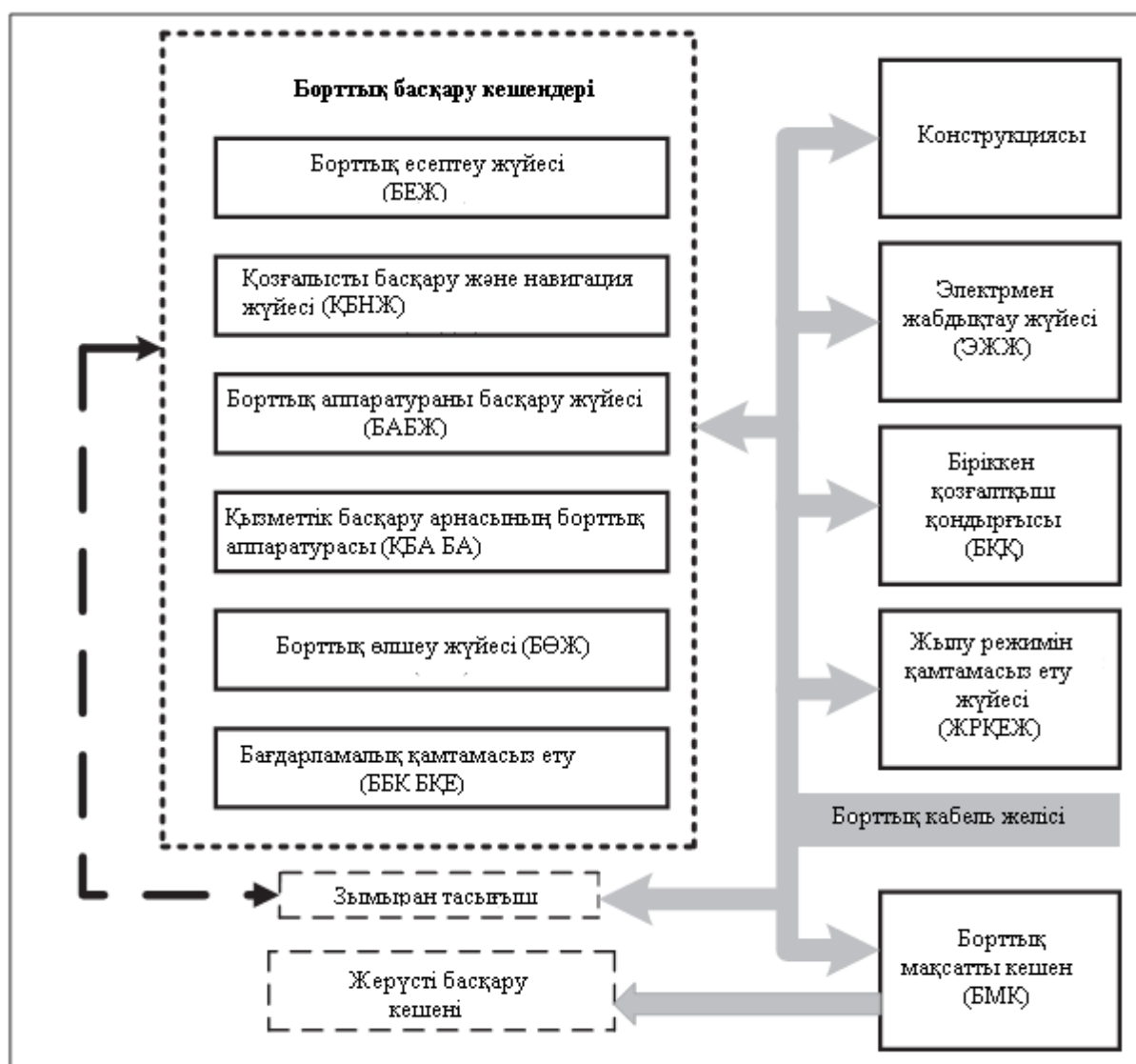
Субспутниктің маневрі және қозғалыс уақыты үшін кеңістіктің шектелу шарты "шағын" терминімен көрсетілген басқару және бақылау теориясында жаңа тәсіл тудырды.

Жұмыстың мақсаты. Минималды уақыт өлшемі бойынша мақсатқа тиімді жету үшін "шағын" субспутникті басқару моделін әзірлеу. Субспутниктің қозғалысын бақылау үшін мақсатқа жету процесінде "шағын" субспутникті бақылау моделін әзірлеу. Есептерді автоматты шешудің бағдарламалық кешенін құру үшін сандық-аналитикалық және алгоритмдік әдістермен әзірленген әдістерді жүзеге асыру. Қойылған міндеттерді автоматты түрде шешу үшін борттық басқару кешенін құру.

1 Ғарыш аппараттары борттық басқару кешендерінің сипаттамасы

Ғарыш аппараттарын (ҒА) басқарудың борттық кешендерін (ББК) жобалау және әзірлеу кезінде олардың аппараттық-бағдарламалық кешендерінің өнімділігін негіздеу міндеттерін шешу және шешілетін міндеттердің құрамын, еңбек сыйымдылығының жиіліктері мен сипаттамаларын ескере отырып, ББК-ның жұмыс істеуінің талап етілетін жеделдігін қамтамасыз ету аса маңызды болып табылады. ББК құру принциптері және оларды әзірлеудің жалпы тәсілдері [1-2] жұмыстарында қарастырылған. [3-4] жұмыста сапаны мониторингілеу, бақылау және диагностикалау құралдарын құрудың стандарттары қарастырылған.

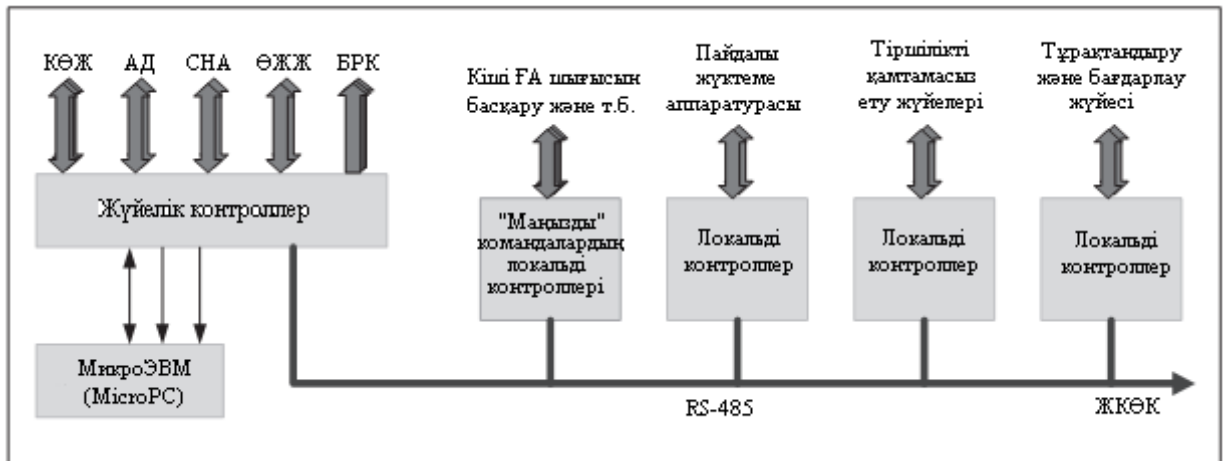
ЖҚЗ ҒА ББК жұмыс істеу моделін әзірлеу кезінде ең алдымен борттық жүйелердің құрамын, олар шешетін міндеттердің тізбесі мен сипаттамаларын ескеру орынды. ҒА борттық жүйелерінің құрамы 1.1-суретте келтірілген [1].



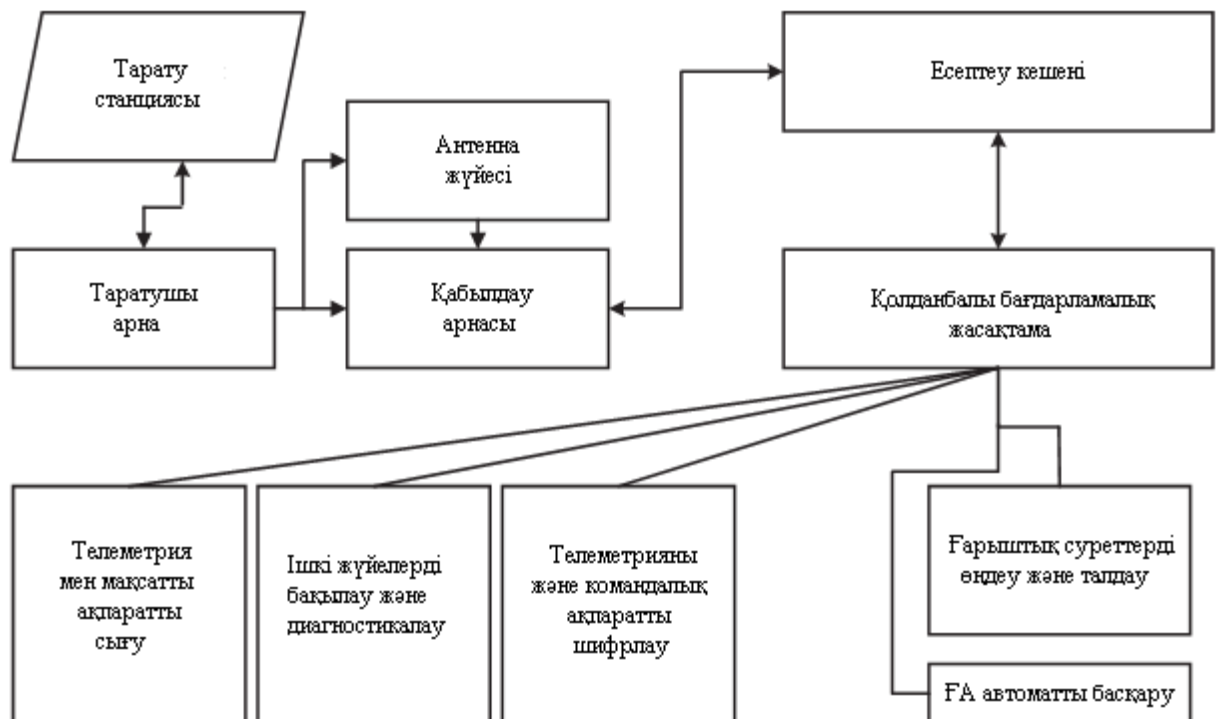
1.1 Сурет – ҒА борттық жүйесінің құрамы

Қазіргі заманғы шетелдік және отандық жобалардағы үрдістерді есепке алатын унифицирленген борттық есептеу кешені (БЕК) жүйелік контроллерді, жоғары өнімді микроЭВМ MicroPC және мамандандырылған контроллерлерді қамтитын бөлінген есептеу жүйесін білдіреді.

ҒА борттық есептеу кешенінің перспективті құрылымы 1.2 суретте келтірілген, онда мынадай қысқартулар пайдаланылған: КӨЖ – командалық өлшеу жүйесі; АД – астродатчик; СНА – спутниктік навигация аппаратурасы; ӨЖЖ – өлшемдерді жинау жүйесі; БРК — бір реттік командалар.



1.2 Сурет – ҒА БЕК перспективалық құрылымы



1.3 Сурет – Ақпаратты өңдеу жүйесінің типтік архитектурасы

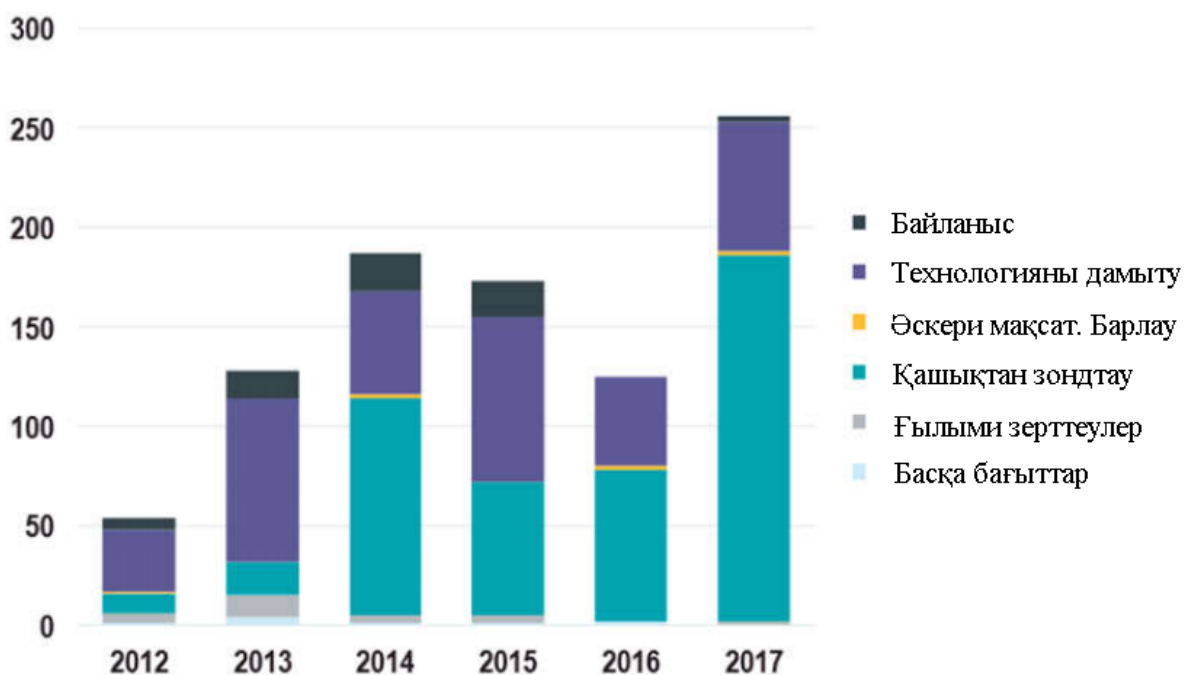
Қазіргі заманғы үрдістер мен стандарттарды ескере отырып, ғарыш жүйелерін зияткерлік қолдау жүйесінің архитектурасын құру, соның ішінде жоғары өнімді есептеу әдістерін қолдану негізіндегі тұжырымдамасы ұсынылды.

Жүйенің жұмысы интеллектуалдық басқару, когнитивтік графика, нейрондық желілер сияқты перспективалық бағыттарды қамтуға бағытталған. Автоматты басқару құралдарын ендіруді басқарушы ЭЕМ-ге арнайы бағдарламалық жасақтама орнату жолымен іске асырылады.

1.3-суретте ақпаратты өңдеу жүйесінің типтік архитектурасы келтірілген. ҒА басқару антенналық жүйе қамтамасыз ететін жақсы реттелген, тұрақты екі жақты радиобайланыс арқылы іске асырылады.

1.1 Шағын ғарыш аппараттарының негізгі сипаттамалары

Қазіргі уақытта жаңа заманғы ғарыш техникасын дамытудың негізгі үрдістерінің бірі шағын ғарыш аппараттарын (ШҒА), атап айтқанда субспутниктерді (немесе орбитерлерді) құру және пайдалану болып табылады. Бірнеше осындай аппараттарды топтық ұшыруды ұйымдастыру мүмкіндігімен бірге жеке ШҒА құрудың біршама аз құны әртүрлі ғарыштық жобаларды іске асыру құнын айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді. Таяу жылдарда шағын ҒА ұшырудың айтарлықтай өсуі болжануда. 1.4-суретте 2012-2017 жылдардағы іске қосылған ШҒА саны туралы мәліметтер келтірілген. Бұл процестің жалпы үрдістерін [17, 18, 19, 20, 21, 22] дереккөздерден байқауға болады.



1.4 Сурет – 2012-2017 жылдары іске қосылған ШҒА нысаналы мақсаты

ШҒА үлкен аппараттардың алдында артықшылықтарға ие. Сонымен қатар, олар салыстырмалы түрде арзан, белгілі бір тапсырманы шешу үшін оңай модификацияланады, радио кедергілерін аз жасайды. ШҒА-ны қолдану мұндай спутниктің істен шығуы немесе жоғалуы жағдайында шығынның ауыртпалығын төмендете отырып, олардың ұшыруына және ғарышта жұмыс істеуіне байланысты қауіп-қатердің азаюына ықпал етеді. Олар жоғары технологияларды зерттеу үшін ұшатын зертханалар бола алады және интернационалдық топтардың бірлескен аппаратпен жұмыс істеуге кеңірек қатысуына мүмкіндік береді.

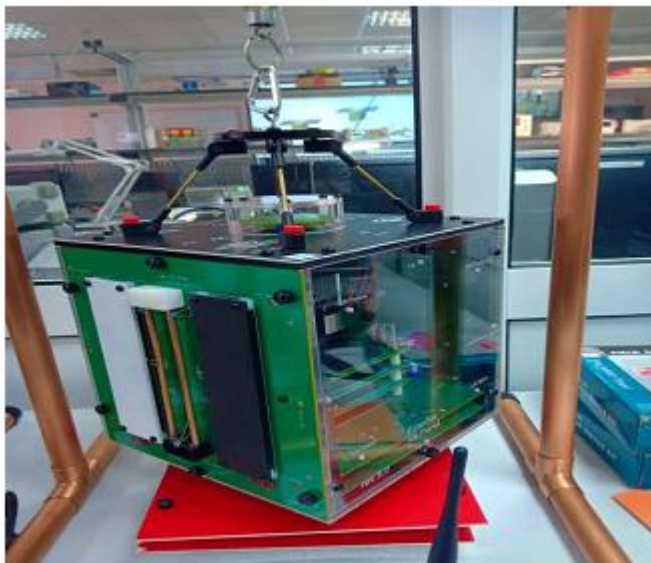
"Аурига" ШҒА-ның жалпы түрі және оның борттық элементтерінің орналасуы 1.5-суретте көрсетілген. "Аурига" ШҒА-ның пайдалы жүктемесі көрінетін диапазонда жерді түсіру үшін жоғары кеңістіктік рұқсат камерасын білдіретін оптикалық-электрондық жүйе болып табылады.



1.5 Сурет – "Аурига" ШҒА-ның сыртқы түрі мен ішкі кеңістігі

XX ғасырдың соңында жасалған алғашқы ШҒА үлгілері студенттердің, аспиранттардың және жас ғалымдардың тәжірибе жинау нысаны ретінде құрылған университеттің эксперименттік жұмыстары болды.

1.6-суретте гироскопиялық бағдарлау жүйесі мен басқару жүйесі бар ШҒА көрсетілген.



1.6 Сурет – Гироскопиялық бағдарлау жүйесі бар ШҒА

Ірі ғарыш аппараттарымен салыстырғанда шағын ғарыш аппараттарының қысқа мерзімге және кемеңің мақсатты тиімділігіне байланысты кемшіліктерін көптеген шағын ғарыш аппараттарын кластерлік орбиталық құрылымдарға біріктіру арқылы еңсеруге болады. Ғарыш аппараттарын одан әрі микроминиатюризациялаудың және "рөлдік" интеллект әдістері мен құралдарын енгізудің арқасында шағын ғарыш аппараттарының кластерлері кейбір үлкен ғарыш аппараттары алдында, ең алдымен, іргелі ғарыштық зерттеулер саласында және, мүмкін, жерді және ғарышты қашықтықтан зондтау саласында сапалы артықшылықтар алуы мүмкін.

Қабылданған халықаралық классификацияға сәйкес шағын ғарыш аппараттарына салмағы 500 кг дейінгі ғарыш аппараттары (жер серіктері) кіреді [23, 24]. ШҒА классификациясы 1.1 кесте түрінде келтірілген.

1.1 Кесте – ШҒА классификациясы және техникалық параметрлері

ШҒА классы	Массасы, кг	Өлшемі, м	Пайдалану ұзақтығы, жылдар
Мини-спутник	100 - 500	3 - 10	5 - 10
Микро-спутник	10 - 100	1 - 5	2 - 6
Нано-спутник	1 - 10	0.1 - 0.1	1 - 3
Пико-спутник	0.1 - 1	0.05 - 0.1	1 - 3
Фемто-спутник	0.05 - 0.1	< 0.05	< 1

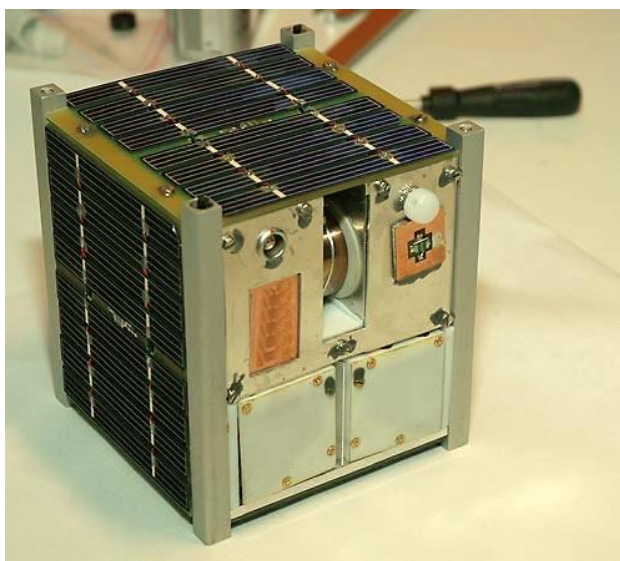
Кейбір ұйымдарда ШҒА-ның тағы бір ауыр класы АШҒА ерекшеленеді - 500 кг-нан 1000 кг-ға дейін (кейде тіпті ауыр) спутниктер.

Қазіргі уақытта CubeSat — 1999 жылы АҚШ-та ұсынылған микро және наноспутниктердің өлшемді стандарты кеңінен қолданылады.

CubeSat ерекшелігі — бірнеше рет өзгертілетін бекітілген габариттер, яғни CubeSat 1U (unit) - бұл 10x10x10 см ғарыш текше, 2U-екі текше, яғни 10x10x20 см, 3U-10x10x30 см. Үнемі жаңа нәрсе ойлап табылады, мысалы сублимациялық қозғалтқыш, электромагниттік желкен, плазмалық қозғалтқыш т.б. Қазір кезде нағыз күн желкендерімен жабдықталған CubeSat-тарды іске қосуға дайындалуда.

CubeSat ерекшелігі - бірнеше рет өзгертін тұрақты өлшемдері, яғни CubeSat 1U (блок) - бұл 10 × 1 × 10 см кеңістік кубы, 2U - бұл қазірдің өзінде екі текше 10x10x20 см, 3U-10×10×30 см, осы уақытқа дейін жеткен шек - 6U немесе 10x20x30 см. CubeSat стандарттары үшін көптеген құрылымдық элементтер, батареялар, тақталар, датчиктер, байланыс жүйелері жасалған. Олар үнемі сублимация қозғалтқышы немесе электромагниттік парус немесе плазмалық қозғалтқышпен бірге жаңа бір нәрсені ойлап табады. Нағыз күн желкендерімен жабдықталған кубаттар ұшырылымға дайындалуда.

"ExoplanetSat" деп аталатын Нано-КА көлемі 30×10×10 см. бір спутниктің құны шамамен 5 млн АҚШ долларын құрайды. Салыстыру үшін: телескоптың құны - \$ 600 млн. "ExoplanetSat" жерге жақын жұлдыздарды зерттейтін болады. Олар 60-100 бұрыштық секундқа дейін көрме дәлдігімен аса дәлдікпен гироскоппен, олардың металл-оксидті жартылай өткізгіш элементтердің матрицасында сандық камерамен жабдықталған. Матрицаны пьезоэлектрлік жетек басқарады, оны екі оське ауыстырады. Конструкцияның барлық қарапайымдылығында бұл камераны 60-тан бірнеше бұрыштық секундқа дейін жеткізуге мүмкіндік береді.



1.7 Сурет – CubeSat стандарты бойынша құрылған норвегиялық NCUBE2

Микроспутниктің бірегей ерекшеліктері оның жинақы габариттері және оптикалық - электрондық жүйенің (ОЭЖ) өнімділігімен және жоғары кеңістіктік рұқсатпен үйлескен шағын массасы болып табылады. ҒА 250x250x450x450 мм габариттік өлшемі және 18 кг салмағы кезінде ол тәулігіне 550 мың км² дейінгі көлемде ЖҚЗ деректерін қабылдауға және жер үсті құралдарына беруге қабілетті. Бұл ретте 600 км биіктіктегі мақсатты күн-синхронды орбитасы бар БЭЖ кеңістіктік рұқсаты 30 км т қармау жолағы бар надирдегі пикселге 2,8 м құрайды.

Геометриялық, "Аурига" ҒА ішкі кеңістігін 2 аймаққа бөлуге болады: қызметтік аппаратура аймағы және ОЭЖ аймағы. Бұл ретте ОЭЖ микроспутник көлемінің 75 % - дан астамын алады, бұл оның жинақылығын қамтамасыз етеді. "Аурига" ҒА негізгі тактикалық-техникалық сипаттамалары 1.2-кестеде берілген.

1.2 Кесте – "Аурига" ШҒА негізгі техникалық сипаттамалары»

Параметр	мәні
Орбита	Синхронды күн, 600 км
Өлшемдері	CubeSat 16U (250×250×450 мм)
Массасы	18 кг
Орташа қуаттылық	26 Вт
АКБ сыйымдылығы	96 Вт*с
Бағдарлау жүйесі	Нақты триаксиалды
Бағдарлау дәлдігі	< 6 мин/бұрыш
Бағдарлау дәлдігі	< 3.5 мин/бұрыш
Орбитадағы орнын білу	20 м (GPS/ГЛОНАСС)
Қисаю бұрышы бойынша ауытқу	±30°
Қызметтік радиобайланыс	УКВ; 9.6-38.4 кбит/с
Деректерді қалпына келтіру арнасы	Ка-диапазон; 160 Мбит/с
Пайдалы жүктеме	Опико-электронды жүйе
Іске қосу түрі	Іске қосу контейнерінен

Жерді басқару сегменті

ШҒА -ны басқару үшін олар өздерінің ұшуды басқару орталығы (ҰБО) және жердегі станциялардың желісін (ЖС) пайдаланады. Түсіру үшін ШҒА басқармасына бақылау командалары мен ұшу тапсырмаларын беру, сондай-ақ ШҒА -дан ресми телеметрия туралы ақпаратты қабылдауды екі жерүсті станциясы жүзеге асырады, олардың біреуі Сколково инновациялық орталығының аумағында Мәскеуде, ал екіншісі - Новгород, Академгородок аумағында орналасқан. ЖС - бұл тез құрастырылған қарапайым дизайн, ал ғаламдық Интернет ҰБО-мен байланыс жасау үшін қолданылады, бұл топтастыру станцияларының санын көбейтуді жеңілдетеді.

Өз кезегінде ҰБО бағдарламалық қамтамасыздандыруында ШҒА-мен байланыс сеанстарын жоспарлау мен өткізуге арналған модульдер ғана емес, сонымен қатар әртүрлі жерүсті станциялары арасында жұмысты бөлу үшін жедел және ұзақ мерзімді жоспарлауға арналған бағдарламалық жүйелер бар.

Бағдарламаларды қабылдау үшін алынған мақсатты ақпаратты түсіру және өңдеуді жоспарлау үшін жердегі сегментке келесі бағдарламалық модульдер кіретін, қабылдауға, өңдеуге және таратуға арналған жерүсті кешен кіреді (ҚӨЖТАЖК):

- тұтынушымен кешенді өзара әрекеттесуі (ТКӨӨ);
 - Автоматтандырылған жерге жоспарлау кешені (АЖЖК);
 - АСССР (ВР АСССР) жұмысын визуализациялау кешені;
 - Ұшуды калибрлеу кешені (ҰКК);
 - Визуализацияны алғашқы өңдеу және сапаны бағалау кешені (ВАӨК).
- 1.8 суретте ҚӨЖТАЖК - ннің жеңілдетілген диаграммасы көрсетілген.



1.8 Сурет – ҚӨЖТАЖК схемасы

Ғарыштық аппараттарға бағдарлау жүйесі атап айтқанда ШҒА, БО-на қол жеткізуде маңызды рөл атқарады. Ғарыш аппараттарын дамытудағы маңызды міндеттердің бірі - бұрышты қозғалысты басқару жүйесін құру. Ғарыш аппараттарының жұмыс қабілеттілігі функционалдылыққа, сондай-ақ осы жүйелердің техникалық және пайдалану сипаттамаларына байланысты. Спутниктік қозғалысты басқару жүйелерін белсенді және енжар деп бөлуге болады. Сонымен қатар, ШҒА ұзақ және сәтті жұмыс істеуі үшін бағдарлау жүйелері тиімділігін жоғалтпай, мүмкіндігінше аз қуат тұтынуы керек.

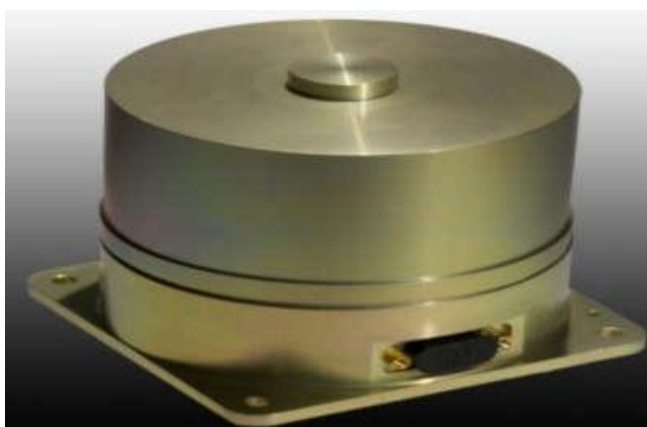
Жұмыс процесінде сұйықтықтың массасы тұтынылатын жүйелер белсенді болады. Нәтижесінде, белсенді жүйелердің, сондай-ақ ІСА-ның жұмыс уақыты шектеулі. Керісінше, пассивті жүйелер дегеніміз - жұмыс кезінде сұйықтықты тұтынбайтын жүйелер. Бақылау моменттерін құру үшін пассивті жүйелер ғарыш аппараттарына сыртқы факторларды, атап айтқанда гравитациялық және магниттік өрістерді, күн радиациясының қысымын, аэродинамикалық күштерді және т.б. пайдаланады.

Қозғалысты басқару жүйелерінің типтері [25]:

- Магниттік жүйелер
- Жетектің қозғалтқыш жүйелері
- Күн желкені жүйелер
- Гравитациялық бағдарлау жүйелері
- Ұшқыштары бар жүйелер

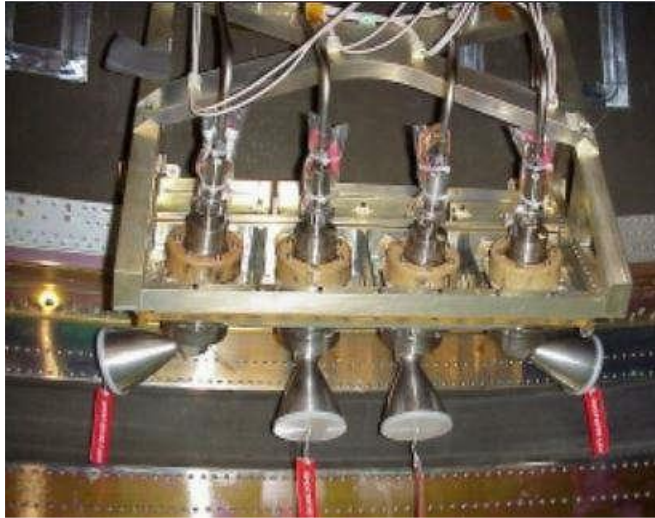
ШҒА бағдарлау жүйелері және олардың орналасуы мөлшері, энергиясы және есептеу ресурстары бойынша ШҒА шектеулі болуына байланысты ерекше талаптарға сәйкес келеді. Егер ШҒА бағдарлау дәлдігіне жоғары талаптар қойылмаса, онда магниттік бағдарлау жүйелерін қолдануға болады. Олардың жұмыс принципі МКА-ның ішкі магниттік моментінің сыртқы геомагниттік өріспен әсерлесуіне негізделген, нәтижесінде басқарылатын механикалық момент пайда болады. Магниттік момент тұрақты емес магниттер мен гистерезис өзекшелерін қолдана отырып немесе магниттелетін ядросы бар немесе онсыз ағымдағы катушкаларды белсенді түрде жүзеге асырылуы мүмкін. Мұндай жүйелер құрылымдық жағынан сенімді және салыстырмалы түрде қарапайым. Спутникте магнит өрісін құру және басқару мүмкіндігі оның бұрыштық қозғалысын басқаруда магниттік моменттерді қолданатын әртүрлі жүйелер мен алгоритмдердің дамуына әкелді.

Бағдарлауды қамтамасыз етудің тағы бір кең таралған әдісі - бұл ұшқыштарды пайдалану (1.9-сурет). Ұшқыштардың артықшылығы - жоғары дәлдік пен жылдамдық. Бірақ шыбындарды пайдалану кезінде қанықтыру проблемасы туындайды. Ұшақ максималды айналу жылдамдығына жетуі мүмкін, бірақ МСА әлі номиналды бағдарлау режиміне жете алмайды. Бұл жағдайда ұшақты тежеу керек, сонымен қатар оны тежеу кезінде пайда болатын өтемді жасайды. Әдетте, түсіру үшін магниттік катушкалар қолданылады.



1.9 Сурет – ШҒА-дағы маховиктің иллюстрациясы

Спутниктік жүйе спутниктік бағдарлау үшін жиі қолданылады (1.7 сурет). Бұл әдістің бір кемшілігі бар - жұмыс сұйықтығын пайдалану. Қозғалыс жүйесі, егер ол үлкен болса, ұшыру машинасынан бөлінгеннен кейін бастапқы жылдамдықты өшіру үшін қолдануға болмайды.



1.10 Сурет – Қозғалтқыш қондырғысындағы бағдарлау жүйесі

Алайда, магниттік катушкаларды қолдану тиімдірек. Жерсеріктерге бағдарлаудың үш тәсілі - ұшу, қозғағыш, магниттік катушкалар - қазіргі кезде ең кең таралған. Көп жағдайда олар міндетті түрде бірге қолданылады. Бағалау және тұрақтандыру жүйесі ШҒАосы жұмыста зерттелген реактивті шыбық (механикалық бағдарлау және тұрақтандыру жүйесі) және бағдарлау үшін Жердің электромагниттік өрісін қолданатын екі индуктивті катушкалар (электромагниттік жүйе). Пассивті басқару жүйелерінің арасында магниттік электронды датчиктар мен магниттік жетектері бар магниттік басқару жүйелері ерекше орын алады. Осы ток катушкаларынан басқа тұрақтандыру жүйесіне басқару тақтасы, акселерометр, магнитометр, ток реттегіші, жарық датчигі және қуат көзі кіреді.

Спутниктің бұрыштық жылдамдығын және индукциялық сызықтан спутниктің айналу бұрыштарын анықтау үшін акселерометр мен гироскоп қолданылады. Бұл екі құрылғы да спутниктің белгілі бір позицияға қатысты бұрылу бұрышын анықтауға мүмкіндік береді.

Жұмыста, ғарыш кемесінің (1.11-сурет) ғарыш кеңістігінде қозғалысын тұрақтандыру үшін гироскопиялық жүйені қолдану туралы мәселе қаралды (ғарыш аппараттары мен ғарыш аппараттарын «тұрақты» қондыру мақсатымен). Жүйе гироскопиялық тұрғыдан басқарылады деп болжанады. Гироскопты бақылау мәселелері өте жақсы зерттелген [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35].



1.11 Сурет – ШҒА үшін гироскопиялық жүйенің иллюстрациясы

Жарық датчигі жарық көзінің бағытын анықтау үшін қолданылады. Жарық көзі күн, ай немесе жұлдыз болуы мүмкін. Күн бағытында күн сәулесінің сәулелері датчиктің сынақ бетіне түсіп, модульдің кедергісін өзгертеді. Спутниктің айналуы кезінде датчик өлшенген мәндерді ұстана отырып, сіз қай бағытта күшті жарық көзін және жер серігін қай жерге бұруға болатындығын анықтай алады.

ШҒА бөлу кезінде электромеханикалық жүйе элементтерінің синхронды емес жұмысына байланысты крутящий бар. Сондықтан, бөлінудің алғашқы сәтінде спутник барлық үш ортогональды осьтер бойымен секундына бір радианның бастапқы бұрыштық жылдамдығымен айнала бастайды. Егер ұшыру аппараттарының электромеханикасы сәтсіз болса, ШҒА-ның бұрыштық жылдамдығы секундына бірнеше ондаған радианға жетуі мүмкін. Белгілі бір бұрышта ШҒА позициясын тұрақтандыру міндеттерін келесі кезеңдерге бөлуге болады [36]:

1. Спутниктің кеңістіктік бағдарын компас және гироскоп арқылы анықтау.

2. Қажетті бұрышты анықтаңыз (фото-датчик, жұлдыз датчигі.) Және қажетті айналу бұрыштарын есептеу.

3. Қажетті руль бұрыштарын ұстап тұру үшін катушкалар мен контроллерді қосу.

4. Датчиктердің өлшеу мәліметтері бойынша жерсеріктің орнын нақтылау.

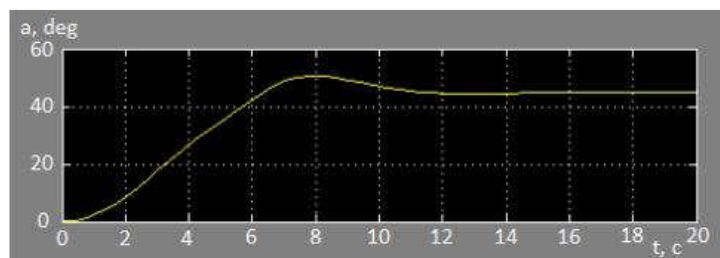
Автоматты басқару теориясына сәйкес [37, 38], тұрақтандыру және бағдарлау жүйесінің блок-схемасы 1.12 суретте келтірілген.



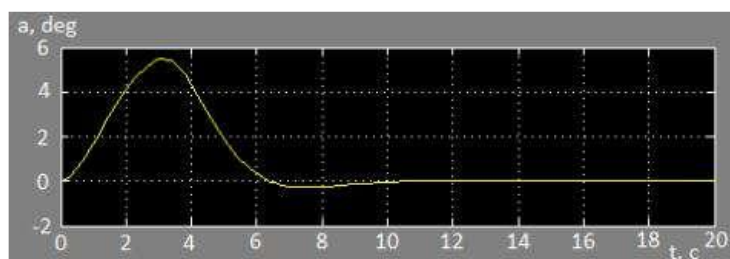
1.12 Сурет – Автоматты басқару жүйесінің блок-схемасы

Бұл жүйенің кіріс параметрі (тапсырма) ШҒА моделінің бұрылу бұрышы, жетегі – реактивті маховик және аппараттың электр қозғалтқышы болып табылады. Реттеуіш бұрыштық жылдамдық датчиктерінен және бұрылу бұрышынан (әдетте күн датчиктерінен) алынған деректерді маховиктің Электр қозғалтқышын басқару сигналына түрлендіруді жүзеге асырады. Басқару объектісі ШҒА Өзі болып табылады, ал сыртқы ауытқулар ШҒА қозғалысына әсер ететін әртүрлі факторлармен анықталады (күн қысымы, гравитация, атмосфераның жанасуы және т.б.). Берілген бұрышқа бұрылу есебі (1.13-сурет) жүйенің кіруіне бұрылу бұрышының сандық мәнін (бұл жағдайда 45 градус бұрышының мәні) нөл градус ретінде берілген бастапқы жағдайға немесе жағдайға қатысты беру жолымен іске асырылады. Жүйемен берілген бұрылыс бұрышына қол жеткізгеннен кейін жүйені тұрақтандыру жүзеге асырылады, яғни жүйенің қол жеткізген жай-күйін (бұрылу бұрышын) сақтау.

Тұрақтандырудың есебін жүзеге асыру үшін сыртқы әсер ету ретінде жүйеге бұрыштық жылдамдық хабарланады, содан кейін ол біраз уақыт өткеннен кейін қайтадан тепе-теңдікке келеді (сурет 1.13).



1.13 Сурет – Бағдарлау кезінде уақыттың бастапқы жағдайына қатысты ШҒА моделінің бұрылу бұрышының тәуелділігі



1.14 Сурет – Тұрақтандырған кезде уақыттың бастапқы жағдайына қатысты МКМ моделінің бұрылу бұрышының тәуелділігі

ШҒА борттық түзеткіш қозғалтқыштары (БТҚ). ШҒА-ны басқару үшін ксенонда жұмыс істейтін және осындай міндеттер үшін неғұрлым перспективалы деп саналатын стационарлық плазмалық қозғалтқыштар (СПҚ) пайдаланылады. Қозғалтқыштардың ШҒА сопла массасының орталығына катысты орталық симметриялы.

ШҒА-на әдетте БТҚ – ның келесі үш түрін орнатады:

- 1) стационарлық плазмалық қозғалтқыш (ксенонмен жұмыс істейтін СПҚ және әрі қарай дамыту үшін ең перспективалы деп саналады),
- 2) Электр-термокаталитикалық гидразинді қозғалтқыш,
- 3) аммиакты электр қыздырғыш қозғалтқыш.

Тұрақты плазмалық қозғалтқыштың жұмыс принципі жұмыс сұйықтығының иондарын электростатикалық өріс арқылы үдетуге негізделген. ШҒА-да СПҚ қондырғыларының орналасуының орталық симметриясына назар аударайық, бұл дизайн диссертацияда әзірленген осындай ШҒА-ны басқару алгоритмінде маңызды рөл атқарады.

ШҒА-ның сипаттамасы борттық жабдықтың, атап айтқанда, БТҚ -нің энергия тұтынуын шектеуі болып табылады. Ғарыштық тәжірибеде шамамен 40 Вт/г төмен қозғалтқыштар ғарыш кемесінде қоздыру жүйелері ретінде қолданылады, ал БТҚ -нің жалпы тұтынуы 200 - 250 ватт құрайды. Массалық және жалпы өлшемдердің шектелуі БҚД құрылымдық көрінісіне де әсер етеді. БТҚ -ны жақсы басқаруға мүмкіндік беру үшін қозғалтқыштың векторы ғарыш кемесінің массасының центрінен өтуі керек, ал оның мөлшері мен массасының төмендеуімен осы жағдайдың дәлдігіне талап жоғарылайды.

Бүкіл әлемде ШҒА жүйесін енгізу мәселесі.

Жалпы алғанда, ШҒА жүйелерін әртүрлі елдерде (әсіресе Ресейде, АҚШ-та, Еуропада, Қытайда) орналастыруға көп көңіл бөлінеді және алғашқы вьетнамдық ШҒА 2019 жылдың қаңтарында іске қосылды). Шағын ғарыш аппараттарының 2012-2017 жылдары мемлекеттік тапсырыс бойынша ұшырылу нәтижелері:

1. Мемлекеттік тапсырыс бойынша 200-ден астам шағын ғарыш кемесі ұшырылды.
2. Мемлекеттік шағын ғарыш аппараттарының 39% -ында CubeSat форма-факторы болған.
3. Америка Құрама Штаттары Ресейден екі есе көп шағын әскери ғарыш кемесін ұшырды (АҚШ-тың мәліметіне сәйкес).
4. Шағын әскери ғарыш аппараттарының 60% -ы жаңа технологияларды сынау үшін қолданылды (Америка Құрама Штаттарының мәліметтері бойынша).
5. Азаматтық шағын ғарыш аппараттарының үштен бірінен көбін Америка Құрама Штаттары ұшырды (негізінен NASA).

2005 жылы Ресейдің ғарышкері Салижан Шарипов Халықаралық ғарыш станциясының бортынан салмағы 4,5 кг болатын бірінші ТНС-1 ресейлік наносатерсті ғарышқа лақтырды (1.12-сурет). ТНС-1 үлкен жетістік болды. Оның ұзындығы 250–300 км, пиксельге 50–100 м құрайды, бұл өте жақсы көрсеткіш. Ол тәулігіне 1-2 рет деректерді тікелей тұтынушыдағы шағын қабылдау станцияларына автоматты түрде қалпына келтіре алады. Жерсеріктің кең спектрі бар: экология, табиғи ресурстарды басқару, теңіз, ауылшаруашылық, өндірістік бақылау, төтенше жағдайларды бақылау. Оған Миссияны басқару орталығы, үлкен таратқыш антенналар, телеметрия анализі және басқалары қажет емес. Сіз оны кез-келген жерден ноутбук арқылы басқара аласыз.



1.15 Сурет – Бірінші ресейлік наноспутник ТНС-1

Өкінішке орай, спутниктің негізгі базасы негізінен импортталады, бірақ бағдарламалық жасақтама отандық болып табылады. Мұндай спутниктерді қолданудың ең айқын саласы - жерді қашықтықтан зондтау. Өйткені, тіпті қарапайым сандық камералар Жерді суретке түсіруге мүмкіндік береді, қарау мүмкіндігі 290 км, 50 м немесе одан да көп, ал 1,7 ГГц жиілік диапазонында алынған «суреттерді» осы зерттеулерді тұтынушылар орналасқан шағын жердегі қабылдау станцияларына жібереді.

Ғарыш саласындағы азиялық ел Вьетнам - жақында ғарыш аппараттарын зерттеу мен ұшыруға үлкен назар аударды. 2019 жылдың 18 қаңтарында Жапон уақыты бойынша Жапонияның аэроғарыштық зерттеу агенттігі (JAXA) Вьетнамның «Micro Dragon» жер серігін орбитаға шығарды (1.13-сурет).



1.16 Сурет – «Micro Dragon» вьетнамдық жер серігі орбитаға шығарылған кезі

Спутниктің ұшырылымы Утинура (Жапония) ғарыш орталығында өтті. Epsilon зымыран тасығышы жеті спутникті, оның ішінде алты жапондық жер серігі мен вьетнамдық Micro Dragon спутнигін ұшырды. Micro Dragon миссиясы - судың сапасын бағалау, су ресурстарының орналасқан жерін анықтау, жағалаулардағы өзгерістерді бақылау және т.б. жағалаудағы суларды бақылау.

Micro Dragon - бұл Вьетнамның ұлттық спутниктік орталығы (VNSC) жасаған Жерді қашықтықтан зондтаудың микросателеті. Micro Dragon - 50 кг 50 см × 50 см өлшейтін жер серігі, ғарыш кемесі судың сапасын бағалау, теңіздегі азық-түлік ресурстарын шарлау және Вьетнамның аквакультура секторын хабардар ету үшін жағалаудағы аудандардағы өзгерістерді бақылау үшін елдің жағалау аудандарын бақылайды.

Micro Dragon Вьетнамның Ұлттық ғарыш орталығының (VNSC), Жапонияда ғарыш технологияларын зерттеген вьетнамдық ғылым және технология академиясының 36 вьетнамдық инженерлерінің қатысуымен жасалды. Спутник Жерді бақылау спутниктерін қолдана отырып, табиғи апаттар мен климаттың өзгеруіне жол бермеу жөніндегі вьетнам-жапон бірлескен жобасының аясында жасалды. Ғарыш аппаратын жасау 2013 жылы басталып, 2017 жылы сәтті аяқталып, сыналды.

Спутник табиғи апаттар мен климаттың өзгеруінің алдын-алу және азайту, сондай-ақ табиғи ресурстарды басқару құралы ретінде пайдаланылады.

1.2 Модельдеу және басқару әдісі

Модельдеу әдістері. Бұл тезисте қолданылған ММА-ны қозғалысты модельдеудің негізгі принциптері классикалық еңбектерде жақсы сипатталған [40, 41, 42, 43, 44, 45]. Осы нәтижелерге сүйене отырып, нақты мамандар нақты мақсаттар үшін арнайы тәжірибелердегі нақты мәселелерді шеше отырып, қозғалыс моделіне немесе ММҚ жұмысына нақты өзгерістер енгізеді.

Сонымен, [46, 47, 48, 49] әр түрлі априори ақпараттарды ескере отырып, функционалды МКА-ның әр түрлі модельдері жасалды. Соның ішінде:

- атмосфералық процестердің динамикасын, түрлі микрофизикалық құрамдағы бұлттардың оптикалық қасиеттерін, сондай-ақ жер бетінің жағдайын ескере отырып, табиғи нысандарды байқау кезінде шағын ғарыш аппараттарының оптикалық жабдықтарының кіріс ақпаратын құру үшін модель ұсынылады;

- шағын ғарыш аппараттарын пайдалануға негізделген радиолокациялық жүйеде сигналдарды өңдеу моделі ұсынылған. Негізгі қатынастар мен модельдеу нәтижелері келтірілген;

- ШҒА қозғалысымен бірге болатын құбылыстардың модельдерін қалыптастырудың кейбір принциптері, оның ішінде эксперимент мақсаттарына байланысты жасалды

- ШҒА жұмысының басқа нақты модельдері. Сонымен қатар, қазіргі заманғы еңбектерде басқа ғарыш кемесіне негізделген ҒА моделін жеңілдету туралы мәселе назардан тыс қалған. Бұл сұрақ диссертацияда қарастырылады.

Басқару әдістері:

1. Объектілерді немесе жүйелер жүйесін оңтайлы басқару міндеті, нақтырақ айтсақ, әртүрлі жағдай мен қосалқы бөлімдерден тұрады. Сонымен қатар, оңтайлы басқарудың осы «шексіз» қосалқы міндеттерінде олардың дәйекті, жалпыға бірдей танылған және бір мәнді жіктелуі де, жалпы қабылданған терминология да жоқ.

Математика немесе механика саласындағы мамандар немесе бағдарламашылар, практикалық инженерлер немесе экономистер осы мәселелерді шешуде әртүрлі, кейде нашар үйлестірілген мақсаттарға ұмтылады.

Осы объективті (және көбінесе субъективті) себептердің нәтижесінде оңтайлы процестер теориясының фундаменталды және қайталама бағыттары көлемді де, сансыз да, сондықтан шатастыратын (басымдықтар мен хронология тұрғысынан) библиография бар.

Осыған байланысты диссертациялық тақырып бойынша нәтижелерді қарастыру, әсіресе ғарыш аппараттарының қозғалысында қолданылатын кезде, уақытша және интеллектуалдық қиындықтарға тап болғандығын атап өтеміз.

2. Бағдарламалық басқарудың негізгі міндеттері. Объектінің бастапқы күйі, атап айтқанда, ШҒА (параметр мәні $t=0$) берілген. $u(t), 0 \leq t \leq T$. басқару процесінің $t=T$ соңында белгілі бір берілген күйге әкелетін және $J[x(t), u(t)]$. Сапаның белгілі бір экстремум функционалына әкелетін объектіні табу қажет.

Мұндай бағдарламаны басқару мәселесінің мысалдары іргелі жұмыстарда қойылған және ішінара шешілген мәселелер болып табылады [1, 11, 12, 50, 51, 52].

3. Ең толық зерттеулер мен түпкілікті нәтижелер детерминирленген жүйенің бағдарламалық басқаруын беру үшін оңтайлылықтың қажетті белгілеріне жатады.

Өткен ғасырдың ортасында басқару теориясы мен тәжірибесі бойынша мамандар басқарудың Вариациялық мәселелеріне көп көңіл бөлді. Әдетте

мұндай есептер классикалық вариациялық есептеу әдістерімен шешілді, олар әдетте басқарудың классикалық міндеттеріне айналды. мемлекеттің бекіткен бола алады жұмыс а. А. Фельдбаума [53] және Р. Беллмана [1] мәселе бойынша тез.

Соңғы уақытта жылдамдық мәселесі бойынша көптеген жұмыстар пайда болды. Алайда, жүйенің кең класында тиімді нәтижелерді көрсету қиын, барлық нәтижелер жергілікті әділдікке ие.

Жұмыс нәтижелері [9] және олардың кейінгі қарқынды дамуы тек қана теоретиктердің ғана емес, сонымен қатар инженер-практиктердің де оларды басқару мүмкіндігі бар ағынды объектілер.

Бүгінгі күні көптеген авторлар негізгі мәселенің көптеген модификациялары мен жалпылауына максималды принцип пен осы критерийдің дамуы туралы әртүрлі түсінік берді. Алайда бұл жолда түбегейлі жаңа нәтижелерге қол жеткізілген жоқ [55]. ШҒА - ның классикалық өнімділігі мәселесі, сонымен қатар белгілі бір нүктеге ШҒА алу үшін отынды минималды тұтынудың классикалық мәселесі диссертацияда қатаң емес, жартылай шешілген. инженерлік өнімділікте және «максималды қағидаттан» басқа идеяларға қатысты қатаң шешім ғана көрсетілген.

Модельдеудің сандық әдістері. Жоғарыда айтылғандай оңтайлы басқару теориясы және оның көптеген қосымшалары, оның ішінде ғарыштық тәжірибелерде, соның ішінде ШҒА бақылау мәселелерінде, белгілі бір күйге (немесе белгілі бір нүктеге) дейін ШҒА қамтамасыз етуді бақылау міндеті өте маңызды.

Сондықтан оңтайлы басқару мәселесі бүгінгі күнге дейін дамыған сандық әдістерді қолдану арқылы шешіледі. Сонымен, кейбір қолданбалы есептерде оңтайлы басқару мен қозғалыс осы шекаралық есепті шешетін кейбір рұқсат етілген бақылаудан түсудің сандық әдісі арқылы табылған [73, 74].

1.3 Шағын қозғалыс кезіндегі ШҒА динамикалық моделін негіздеу

Шағын ғарыш аппараттарының қозғалысын басқару жүйесі (ҚБЖ) сипатталған. Заттарды, оның ішінде ғарыш объектілерін басқарудың классикалық жалпы міндеті тұжырымдалған. Арнайы мобильді орбиталық координаттар жүйесінде ғарыш кемесінің динамикалық модельдері және ғарыш кемесінің басқару моделі құрылды. ШҒА жұмыс режимін және БТҚ (бортты түзету қозғалтқыштары) жағынан ШҒА-ттың басқару әрекеттерінің класын (бақыланатын тұрақты, түзу сызықты, үзіліссіз және т.б.) таңдау арқылы бақыланады. Талдау көрсеткендей, ШҒА басқару процесі таңдалған мобильді КЖ-де (координат жүйесі) қозғалыс бағытын жылдам өзгерту операцияларынан тұруы керек.

Әзірленген техникада ШҒА қозғалтқыштары оның шығатын ағындарының ШҒА массасына центріне (қарама-қарсы бағытта) центрлік

симметриялы бағытта болатындай етіп орналастырылған. ШҒА қозғалтқыштарының техникалық сипаттамаларын басқару моделіне кіріспе ШҒА жұмысының заманауи теориясы мен тәжірибесінің өзекті мәселесі болып табылады [84, 85, 86, 87, 88] және осы жалпы идеяларды модернизациялауға және жүзеге асыруға деген табиғи ынтаны тудырады.

Ғарыштық дененің, оның ішінде ғарыш аппараттарының қозғалысының классикалық математикалық үлгілерін, мысалы, монографиялардан табуға болады [40, 41, 42]. ШҒА қозғалысының математикалық моделін сипаттау үшін (бұл жұмыстың негізгі мақсаттарының бірі) алдымен координаттар жүйесін анықтау керек. Дәстүрлі түрде осы мақсаттар үшін келесі негізгі координат жүйелері қолданылады [41].

Жүйе (S1) - абсолютті тікбұрышты OXYZ жер координаттар жүйесі - нүктесі - Жердің орталығында, OY осі Жердің айналу осі бойымен бағытталған [кейде оның кеңістіктік жылжуын ескере отырып (Жер осінің прецессиясы), дәлірек ШҒА координаттарын анықтауда, кейде жоқ. оның ығыстырылуы], OX және OZ осьтері Жердің экваторлық жазықтығында жатыр, ал OZ осі вернальдық теңдік нүктесіне бағытталған.

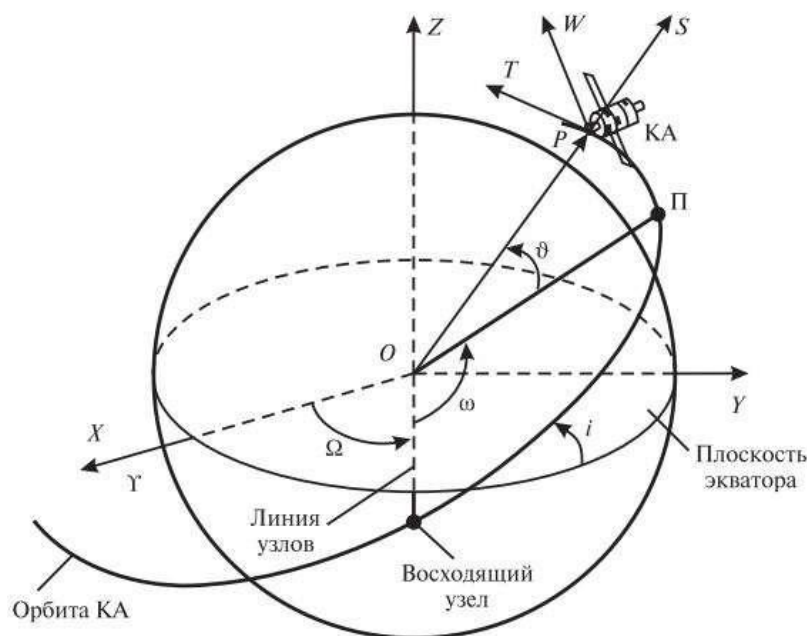
Жүйе (S2) - O_{xyz} жүйесі - басталуы - нүктесі бар қозғалмалы тікбұрышты декарттық координаталар жүйесі - бақылау нысаны массасының центрінде (кейде БТҚ), O_y осі Жердің айналу осі бойымен бағытталған (кейде оның жылжуын ескере отырып, кейде оның жылжуын ескермей), O_x , O_x және O_z жері экваторлық жазықтықта жатыр, OZ осі вернальды күндізгі теңестіруге бағытталған.

Осы жұмыста ұсынылған ШҒА басқару моделі екі координат жүйесіне негізделген: геоцентрлік жер үсті (S1) және жылжымалы орбиталь (S2). Әр түрлі СЖ қолдану қажеттілігі:

1) Жердің жақын орбитасында ШҒА-ның траекториясын модельдеудің қиындауы әсер ететін күштерді сипаттауда қиын болады (Жердің геоид пішіні, Жердің тартылыс күші, жарық қысымы, атмосфералық қарсылық және т.б.);

2) ғарыш кемесінің қозғалыс моделін жеңілдету мүмкіндігі (диссертацияда қарастырылған), ғарыш кемесін арнайы ұшырғыш АІҚҚ (арнайы іске қосу қондырғысы) базалық ғарыштан (БТҚ) ұшырып, басқару нысанасына ауысады, ол ғарыш кемесіне қатысты ғарышта «тоңазытылған» болады.

1.17-суретте (S1) және (S2) координат жүйелерінің орналасуы көрсетілген.



1.17 – (S1) және (S2) координат жүйелерінің салыстырмалы жағдайы

M массасы бар Жердің айналасындағы орбитадағы шамалы массасы бар ғарыштық дененің (атап айтқанда, МСА) қозғалысының классикалық (Кеплериялық) моделі келесі формада болады:

$$\ddot{\vec{r}}(t) = -\frac{\mu}{|\vec{r}(t)|^3} \vec{r}(t) + \sum_i 1(t) \cdot \vec{j}_i(t), \quad (1.1)$$

мұндағы $\vec{r}(t) = -\frac{\mu}{|\vec{r}(t)|^3} \vec{r}(t) + \sum_i 1(t) \cdot \vec{j}_i(t)$, - (S1) жүйедегі ШҒА радиусы

векторы және α кеплер элементтері: жартылай үлкен ось, эксцентриктілік, бейімділік, өсіп келе жатқан түйіннің ұзындығы, перцентрлық аргумент, орташа аномалия, $\mu = g M$, g – гравитациялық тұрақты, $\vec{j}_i, 1(t)$ - уақытқа байланысты және көптеген (әрдайым дәл есепке алынбайтын) факторларға байланысты, тыныштық үдеуінің векторы, t параметрінің мәніне байланысты 0 (алаңдаушы фактор ескерілмейді) немесе 1 (алаңдату факторы ескеріледі) мәндерін қабылдай алатын функция. Мысалы, егер ШҒА Жердің көлеңкесіне енсе, онда ШҒА-да жарық қысымының коэффициенті жоқ. Бұл жағдайда (1.1) модельде сәйкес коэффициент ШҒА көлеңкеден шыққанға дейін, содан кейін $1_k(t) = 1$ болады. Дәл осындай қағида Жердің потенциалындағы гармоникалардың санын ескере отырып, оның қолданылуын таба алады. Екпін векторы \vec{J} өте күрделі сипатқа ие және сыртқы күштерге тәуелді.

Массасы M -мен Жердің айналасындағы перпендикуляр Кеплер орбитасындағы аз массасы бар ғарыштық дененің (атап айтқанда, ШҒА) қозғалысының классикалық моделі (1.1) теңдеу түрінде болады. Жердің орталығында және қандай да бір бағытта бағытталған координаталық осьтерде

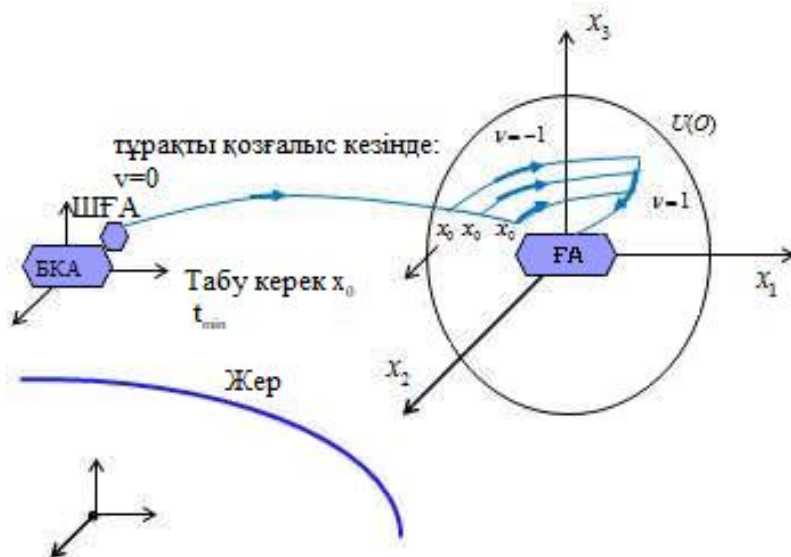
(геоцентрлік координаттар жүйелері) координаталар жүйесіндегі ШҒА қозғалыс теңдеулері күрделі сызықтық емес құрылымға ие екендігі белгілі. Мұндай жүйелерді шешу, ғарыш аппараттарының Жерден қозғалысын болжау және бақылау өте қиын. Егер қозғалыс траекториясының параметрлерімен қатар, олардың жылдамдығы мен үдеуі ескерілсе, міндет күрделене түседі.

ШҒА ғарышқа екі жолмен ұшырылады:

1) тікелей ракета тасымалдаушы (РТ) арқылы, әдетте, бірнеше құрылғылар, олар бірден тапсырманы орындайды;

2) біріншіден, РТ базалық ғарыш кемесінің (БТҚ) бортына ШЖС (шағын жер серік) жеткізеді, және дәл уақытта ШЖС алдын-ала есептелген траектория және басқару ережелеріне сәйкес іске қосылады. Сонымен қатар, барлық есептеулер БТҚ-мен тығыз байланысты координаттар жүйесінде жүзеге асырылады, сондықтан әлдеқайда қарапайым (барлық «қиындықтар» жер бетінен қуатты есептеу жүйелерімен есептелген БТҚ траекториясына енгізілді).

Диссертациялық жұмыста ШҒА БТҚ-ға зымыран-тасымалдаушымен жеткізілетін жағдай қаралады. АҚҚ (арнайы іске қосу қондырғысы) қондырғысы басқару мақсатына (БМ) "жағына" ШҒА-ШЖС іске қосады (сурет.1.18).



1.18 Сурет – Мақсатқа жету үшін минималды уақытты таңдау арқылы ШЖС БҒА-на БМ (басқару мақсаты)-на дейінгі қозғалыс сызбасы

Диссертациялық жұмыста Жерге жақын кеңістіктегі ШҒА қозғалысының моделі жер үсті басқару кешенімен (ЖҮК) геоцентрлік жүйеден (S1) жүйеге (S2) АҚҚ мүмкіндіктерін ескере отырып және қайта есептеледі, сондықтан ұшу нысанасына қатысты ШҒА – ШЖС қозғалысы белгілі бір деңгейге жетеді, жүйеде сызықтық автономды емес дифференциалдық теңдеулер жүйесімен сипатталады (S2). Диссертацияда қолданылатын жоспарда қарастырылған координаталар жүйесіндегі жағдай.

Жұмыста жылжымалы КЖ-нің (координаталар жүйесі) негіздемесін ескере отырып, басқару орталығы БО мен БҒА-қа қатысты ШҒА-ның басқарылатын қозғалысының моделі автономды емес дифференциалдық теңдеулер түрінде ұсынылған:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + v(t)u, \\ y(t) &= C(t)x(t), \end{aligned} \quad (1.2)$$

мұндағы $x(t)$ - уақытына байланысты фазалық күйдің 3 өлшемді векторы; u - p -өлшемді бақылау векторы ($1 \leq p \leq 3$) u - координаталар арқылы берілген тұрақты вектор u_1, u_2, u_3 (координатаның осьтері бойымен басқару факторлары); $A(t), C(t)$ - үшін нақты және үздіксіз элементтері бар тиісті өлшемдердің матрицалары, мұндағы $t \in [0, +\infty)$ аумағы $v(t)$ үзіліссіз тұрақты функция, ШҒА үшін рұқсат етілген басқару деп аталады және шартты қанағаттандырады.

$$(\forall t) |v(t)| \leq 1 \quad (1.3)$$

Ғарыш кемесінің кеңістіктегі және уақыттағы маневрлік аумағының мөлшеріне ШҒА шектеулерге байланысты, ғарыш кемесін бақылаудың және бақылаудың жаңа әдістері қажет. Мұндай жаңа әдістер диссертацияда ұсынылатын «шағын» бақылау және бақылаудың жалпы әдістерін қамтиды, олар жалпы басқару теориясының ерекше жағдайы болып табылады. Бұдан әрі БО-на жету үшін келесі мәселелерді шешу қажет:

1. ШС қозғалысының тұрақтылығын қалай қамтамасыз етуге болады (V) (O) - БО қол жетімділігі

2. Басқару орталығының V (O) жететін аймағын қалай табуға болады және V (O) ішіндегі ШС-ны қалай басқаруға болады? Бұл мәселелер 2-тарауда қарастырылады.

Бірінші тарауда ШҒА негізгі сипаттамалары (ШҒА жіктелуі, жерді басқару сегменті, ШҒА-ның бұрыштық қозғалысының магниттік жүйесі, борттық түзету қозғалтқыштары) қарастырылды. Космостық жүйелерді Жерге жақын жерге орналастыру мәселесі қарастырылады.

Диссертация тақырыбы бойынша алдыңғы нәтижелерге модельдеу, оңтайлы бақылау, сандық әдістер мен алгоритмдер тұрғысынан шолу жасалды. Диссертациялық жұмыста «шағын» ШҒА қозғалысын зерттеудің негізгі міндеттері қойылған. Нысандардың динамикалық моделі, атап айтқанда, ШҒА және бақылау «бақылау» моделі негізделген.

ШҒА үшін модель басқару нысанасына (КЖ) немесе БҒА-ға бағытталған қозғалмалы орбитальды координаталар жүйесінде (КЖ) салынған, ал координаталық осьтер белгілі бір тапсырма үшін ең ыңғайлы бағытта бағытталған.

2 ШҒА қозғалысына арналған «шағын» бақыланатын және бақыланатын математикалық модельдеу

Бұл тарауда ШҒА-ның сызықтық автономды емес қозғалыс модельдері жағдайында объектілерді «шағын» бақылау мен бақылау мүмкіндігі мәселесін шешу үшін әдісті (және алгоритмді) терең модернизациялау ұсынылады. Басқару орталығының шектелген аумағы үшін ШҒА-ның басқарылатын аймағын табудың сандық әдісін өзгерту ұсынылады. Коммутатордың моменттерін табудың сандық әдісін модификациялау ұсынылады, бұл уақытты басқару орталығының шағын орналасуына және ШҒА қозғалыс моделінің тұрақтылығына байланысты.

БҒА-ШҒА жүйесіндегі «шағын» басқарылатын және бақыланатын арасында байланыс табылды. Бақылау мен бақылану арасындағы байланыс «шағын» белгілі бір ШҒА қозғалысын талдауда қолданылады.

2.1 «Шағын» басқару теориясындағы негізгі анықтамалары

Келесі жүйені қарастырайық:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + v(t)u, \\ y(t) &= C(t)x(t), \end{aligned} \quad (2.1)$$

мұндағы $x(t)$ - уақытына байланысты фазалық күйдің 3 өлшемді векторы; u - p -өлшемді бақылау векторы ($1 \leq p \leq 3$) u - координаталар арқылы берілген тұрақты вектор u_1, u_2, u_3 (координатаның осьтері бойымен басқару факторлары); $A(t), C(t)$ - үшін нақты және үздіксіз элементтері бар тиісті өлшемдердің матрицалары, мұндағы $t \in [0, +\infty)$ аумағы $v(t)$ үзіліссіз тұрақты функция, U аумағынан бөлінетін тұрақты функция, МСА үшін рұқсат етілген басқару деп аталады және $(\forall t) |v(t)| \leq 1$ шартын қанағаттандырады.

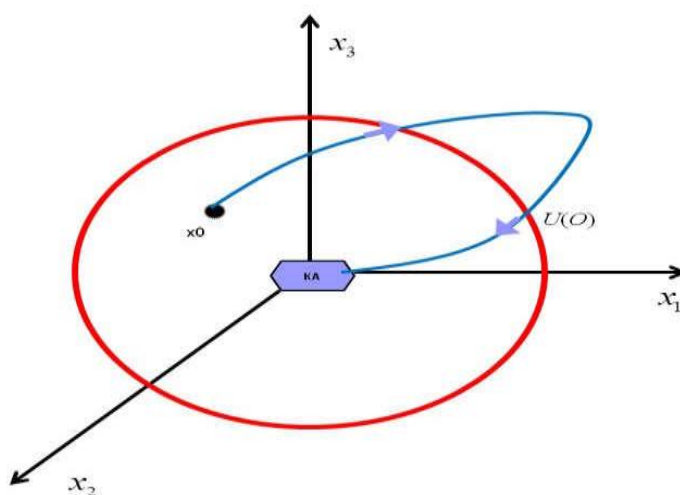
Нәтижені толық түсіну және оны қабылдау ыңғайлылығы үшін осы "жалпы" анықтамаларды нақты міндетімізге бейімдей отырып, жұмыстан [89] алынған "шағын" басқару теориясының негізгі анықтамаларын келтіреміз.

Келесі белгіні енгіземіз: O - фазалық кеңістігінің шығу тегі R^3 ; $x(x_0, t_0, t, v, u)$ - нүктесінде x_0 нүктесінен өтетін жүйенің (2.1) траекториясы.

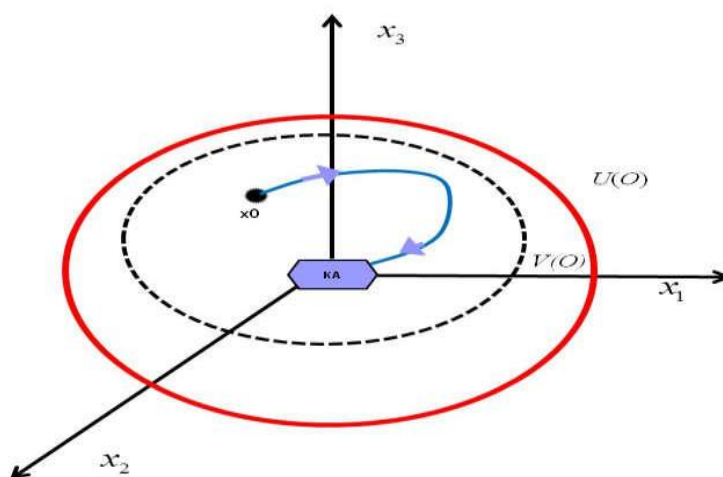
Ескерту 1. ШҒА-тын бақылаудың және бақылаудың мақсаты - ШҒА-ны x_1 нүктесінен x_0 нүктеге келтіру, содан кейін $y(t)$ бақылау векторын қолдана отырып, x_1 нүктеге жету процесінде ШҒА $x(t)$ күйін анықтау.

Бастапқы айнымалылардың сызықтық өзгеруі - O нүктесі, x_1 нүктесін аламыз. Содан кейін қозғалыс траекториясы үшін $x(x_0, t_0, t, v, u)$ мәні $x(t_0) = x(x_0, t_0, t_0, v, u) = x_0$.

Анықтама 1. (1.2) теңдеуімен сипатталған детерминистік жүйе (сәйкесінше (2.1) теңдеулер жүйесі бақыланатын «шағын» уақытта O шығу үшін $T^0 \in [t_0, T]$ O деп аталады, егер $U(O)$ қасында болса $V(O) \subset U(O)$ кез-келген нүктесі үшін $x_0 \in V(O)$ x_0 нүктесін тастап, жүйенің оң жарты полиграфиясы (2.1) болатын рұқсат етілген бақылауды көрсетуге болады. шығу нүктесіне - O нүктесіне $[T^0, T^1]$ соңғы уақытта жетеді $v(t)$ маңайынан шықпай [бұл ретте $(T^1 \geq T)$]. Бұл сонымен қатар жүйеге (2.1) «шағын» қол жеткізуге болатындығын білдіреді.



2.1 Сурет – ШҒА классикалық басқару

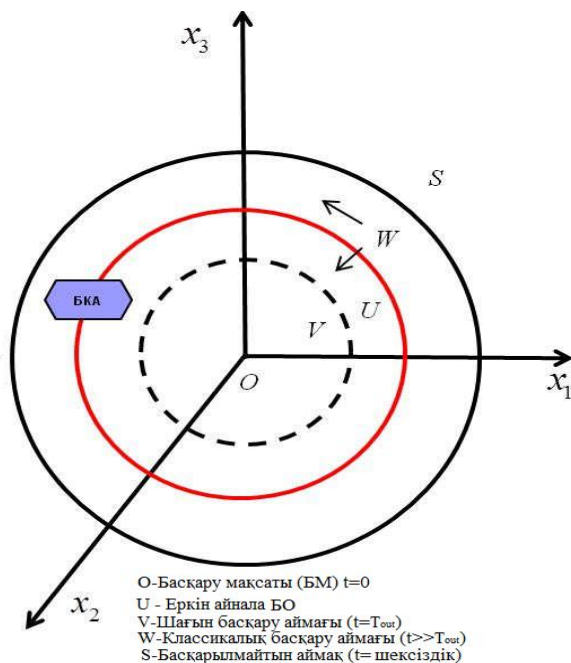


2.2 Сурет – ШҒА «шағында» басқару

2.1 2.2 және 2.3 суреттерде «шағында» классикалық басқару және басқару ұғымдарының суреттері көрсетілген.

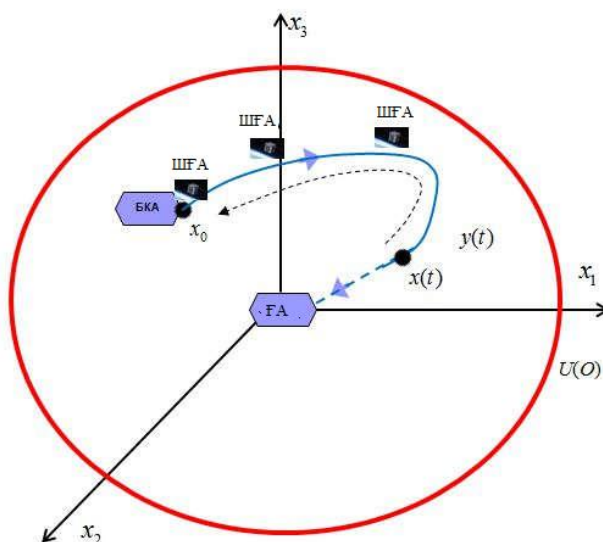
Анықтама 1*. O координаттарының шығу тегі (1.2) жүйесі үшін «шағын» қол жетімді деп аталады, егер кез-келген кездейсоқ кіші оң сан болса, ε кез келген $x_0 | x_0 | < \delta$ үшін теңсіздік барлық δ болатындай оң санды көрсете алады. $t, t_0 \leq t \leq t_0 + h_{x_0}$ және $x(x_0, t_0, t_0 + h_{x_0}, v, u) = 0$ орындалады. (h_{x_0} сағ уақыты x_0 таңдауына байланысты болады).

Анықтама 2. Жүйе (2.1) егер ол уақыттың әр уақытында "шағын" басқарылатын болса $[t_0, T]$, онда "шағын" бөлімінде $T^0 \in [t_0, T]$ басқарылады.



2.3 Сурет – Ғарыштық кеңістікті басқару аймағындағы бөлу схемасы

Анықтама 3. (2.1) теңдеуімен сипатталған детерминистік жүйе (сәйкесінше (2.1) теңдеулер жүйесі белгілі бір уақытта “шағын” бақыланатын деп аталады) шығу тегі үшін $T^0 \in [t_0, T]$, егер $U(O)$ қасында болса, кез келген нүктесі үшін рұқсат етілген бақылауды көрсете алатын $V(O) \subset U(O)$ қасында орналасқан, ол үшін жүйенің оң жартылай сызбасы (2.1) $x_0 \in V(O)$ нүктесін қалдырады. шығу тегі - O нүктесін соңғы уақытта $[T^0, T^1]$ $U(O)$ жоғарғысынан шықпай (мүмкін $T^1 \geq T$), және c кез келген бастапқы нүктесін нәтижелерден ерекше қалпына келтіруге болады шығу функцияларын өлшеу $y(t)$ және басқару $v(t)$. Бұл сонымен қатар, жүйенің (2.1) O шығу үшін «шағында» байқалатындығын білдіреді (2.4-сурет).



2.4 Сурет – Бақылау иллюстрациясы «шағында»

Анықтама 4. Коммутация қисығын l қисығы деп атаймыз, оның барлық нүктелері заңға сәйкес қозғалады (2.1), ақырғы оң уақытта пайда болады. Жұмыстың мақсаты - қол жетімділік аймағын ШРА үшін шағын ауданда табу және жүйеге арналған «кішкентай» шығу аймағының болуы туралы теореманы дәлелдеу (2.1).

Бірінші тараудың соңында айтылғандай, МД жету үшін келесі мәселелерді шешуіміз керек:

Анықтау 4. Барлық нүктелері (2.1) заң бойынша қозғалып, соңғы оң уақытта координаттардың басталуына жетеді. Жұмыстың мақсаты – ШФА үшін шағын БО-да қол жетімділік саласын табу және жүйе үшін координаттардың "шағын" бастамасындағы қол жетімділік саласының бар екендігі туралы теореманы дәлелдеу (2.1). 1-тараудың соңында айтылғандай, БО-на жету үшін келесі мәселелерді шешу қажет:

1. ШС қозғалысының тұрақтылығын қалай қамтамасыз етуге болады ($V(O)$) – БО ?

2. Басқару орталығының $V(O)$ жететін аймағын және $V(O)$ ішіндегі ШС басқару әдісін қалай табуға болады. Бұл сұрақтар 2-тарауда шешіледі. Математикалық сұрақтар келесі мәселелерге сәйкес келеді.

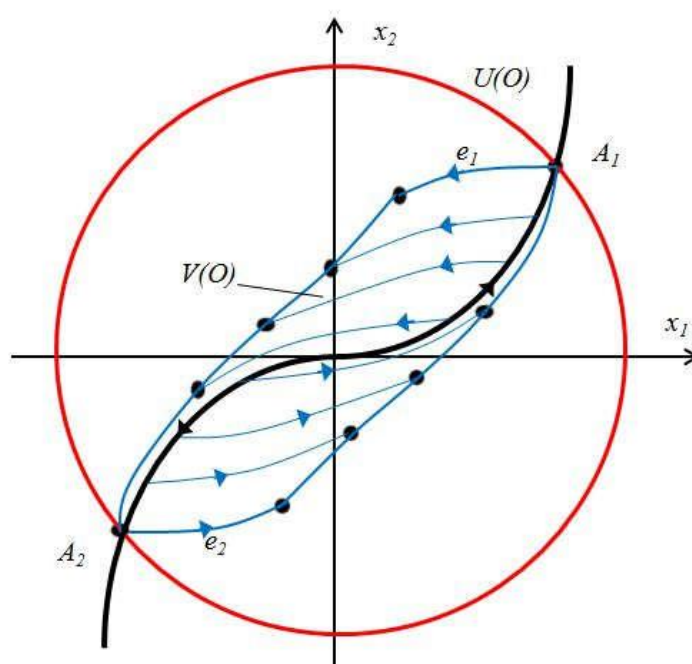
Тапсырма 1. (Шығу үшін «шағын» ШФА тұрақтылығы туралы). Жүйеге (2.1) жүктелген қандай жағдайларда ШФА жүйесі тұрақты?

Тапсырма 2. (Шығу үшін «аз мөлшерде» ШФА-ның болуы және бақылануы туралы). (2.1) жүйеге қандай шарттар қойылса, жүйе (атап айтқанда, ШФА) $[t_0, T]$ интервалында шығу үшін «шағын» бақыланатын және бақыланатын болады?

2.2 «Шағында» қол жетімділік ауданында құрудың сандық-аналитикалық әдісі

Диссертациялық жұмыста «шағын» қол жетімділік ауданын құрудың сандық әдісі келтірілген:

1. Коммутация қисығын құру.
2. A_1 және A_2 қиылысу нүктелерін $U(O)$ аймағымен қосу қисығы анықтау.
3. A_1 және A_2 -тен e_1 және e_2 теріс семитекторларын тұрғызыңыз.
4. A_1 және A_2 қиылысу нүктелеріне алынған коммутация қисығының барлық нүктелерінен теріс жартылай траекторияларды құрастыру.
5. ШС-тің «басталуының» барлық x_0 нүктелерінің дөңес корпусын тұрғызу.



2.5 Сурет – Шағын ауданында «жетістік саласын құру»

Жоғарыда аталған әдіспен қол жетімділік ауданда «шағында» құру алгоритмін береміз (2.5 сурет).

1. Сандық әдісті қолдана отырып, бақылау мақсатында коммутация қисығын тұрғызу.
2. A_1 және A_2 нүктелерін санмен табу.
3. ШҒА қозғалысына қажетті уақытты белгілеу.
4. A_1 нүктесінен бастап A_1 нүктесіне дейінгі қозғалыс t_1 уақытын табу.
5. Ақырлы уақыт ішінде $t_1=T-t_1$ теріс семитраекториясын A_1 -ден A_1 -ге тұрғызу.
6. Коммутация қисығының барлық нүктелері үшін A_1 нүктесінің орнына 4, 5 қадамдарды қайталау.

7. ШС-тің «басталуының» барлық x_0 нүктелерінің дөңес корпусын тұрғызу.

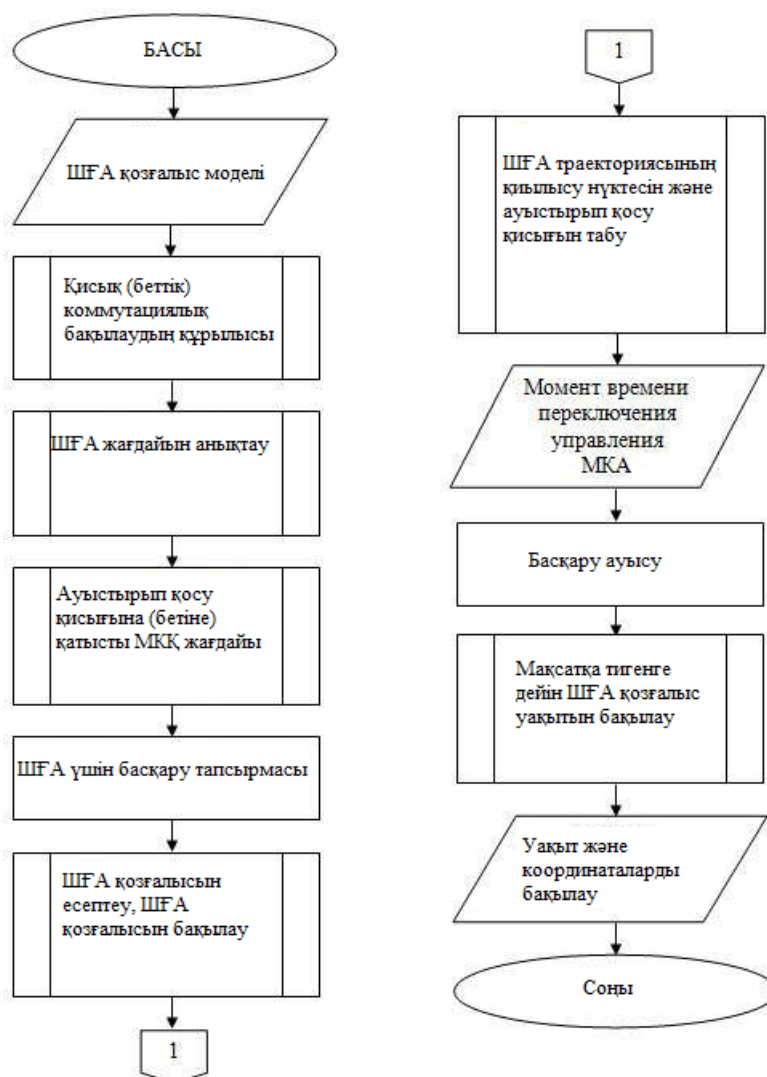
8. Қол жетімділік аймағын $V(O)$ табу.

«Шағын» басқару орталығында $V(O)$ қол жетімділік аймағын тапқаннан кейін, олар $V(O)$ ауданына тұрақтылықты қамтамасыз етуі керек. Стационарлық емес сызықтық модель үшін (2.1) қатып қалған коэффициенттер әдісін қолдануға болады.

Бастапқы дифференциалдық теңдеудің коэффициенттерін қатуға уақыттың өзгермелі параметрлерін кез-келген бекітілген сәтте қатыру арқылы қол жеткізіледі. Сонда стационарлық емес жүйе стационарға дейін азаяды. Мұздату коэффициенттері әдісі уақыттың әртүрлі нүктелері үшін дәйекті түрде жүргізілуі керек. Егер объектілердің, соның ішінде ШҒА-ның барлық жұмыс уақытында жүйенің сапасы қолайлы болса, онда ол теңдеулер жүйесінің параметрлерін өзгерткен кезде де тиімді болып саналады. Белгіленген нүктелерді уақытында дұрыс таңдау - бұл әдіс тиімділігінің негізгі факторы. Әдетте, мәндері параметрлік мәндердің барлық мүмкін нұсқаларын қамтитын сәттерді таңдау керек. Болашақта бұл әдісті қолданудың мысалы ШҒА қозғалысының моделінде келтіріледі.

2.3 Коммутациялық басқару сәтін табудың сандық әдісі

2.6 суретте басқару коммутаторының уақытын іздеудің ұсынылған алгоритмі көрсетілген.



2.6 Сурет – ШҒА басқаруды ауыстырып қосу моменттерін сандық іздеу алгоритмі

Коммутация моменттерін табудың сандық әдісі келтірілген:

1. Кері уақыт әдісін қолдана отырып, бақылау қисығын (беті) тұрғызыңыз.
2. Коммутация қисығына қатысты ШҒА-ның орнын анықтаңыз.
3. ШҒА траекториясын құру үшін сандық әдісті қолдану.
4. Коммутация қисығымен траекторияның қиылысу нүктесін анықтаңыз.
5. Коммутациялық басқару сәтін анықтаңыз. Классикалық бақылау көмегімен «шағын» бақылау әдісінің тиімділігін көрсету үшін модуляция

мысалын келтіреміз, оның нәтижесі басқару жүйесінде «шағын» ШҒА-пен есептеледі.

ШҒА тұрақсыз сызықтық заңға сәйкес қозғалады:

$$\dot{x} = A(t)x(t) + v(t)u$$

2.2

мұнда

$$\begin{bmatrix} -2t & 0 \\ t & -t^2 \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}, -1 \leq v \leq 1$$

2.3

Сипаттама: ШҒА БҒА -нан координаттармен (-20 км; 20 км) басқару нысанасына (шығу нүктесіне) көшуді бастайды. Оңтайлы нүктені $U(O)$ (радиусы 4 км болатын шеңбер) табыңыз, осылайша ШҒА x_0 шеңберінен шықпай қысқа мерзімде мақсатқа жетеді.

t_1 - ШҒА-ны БҒА-нан x_0 ге жақын орналасқан нүктесіне жылжыту уақыты. (тұрақты қозғалыспен).

t_2 - МСА-нің 0 х нүктесінен коммутациялық қисыққа дейінгі қозғалыс уақыты ($v=1$).

t_3 - бақылаудың ауысу сәтінен бастап нысананы соққыға ауыстыру кезіндегі ШҒА қозғалысының уақыты ($v=-1$).

T - ШҒА-ның БҒА-нан бақылау нысанасына өтуінің жалпы уақыты.

Қатып қалған коэффициент әдісін қолданып, ауыспалы коэффициенттері бар сызықтық жүйеде басқаруды модельдеу.

2.1 Кесте – Уақыт кезеңіндегі «шағын» тұрақтылық және бақылау мүмкіндігі [0; 30]

t , мин	λ_1	λ_2	Тұрақтылық	Басқару «шағында»
1	-2	-1	+	+
2	-4	-4	+	+
3	-6	-9	+	+
4	-8	-16	+	+
5	-10	-25	+	+
6	-12	-36	+	+
7	-14	-49	+	+
8	-16	-64	+	+
9	-18	-81	+	+
10	-20	-100	+	+
15	-30	-225	+	+
20	-40	-400	+	+
25	-50	-625	+	+
30	-60	-900	+	+

Сонымен қатар, $-2t, t, -t^2$ функциялары уақыт аралықтарында мәндерін кезең-кезеңмен өзгертпейді $[0; 30]$. Сондықтан жүйе тұрақты және басқарылатын «шағын» сегментте $[0; 30]$. ШҒА қозғалысының сипаттамасы 1-жағдайда ұқсас, 2.2 кестесін құрастырамыз.

2.2 Кесте – Мақсатты шағында жету үшін ШҒА қозғалысының уақытын есептеу

№ п/п	x_0 , км	t_1 , мин	t_2 , мин	t_3 , мин	T , мин
1	(3.53; -1.34)	8.67	15.93	2.03	26.63
2	(-2.89; -1.82)	9.67	15.19	1.78	26.64
3	(-2.36; -2.14)	10.67	14.42	1.3	26.39
4	(-1.98; -2.34)	11.67	13.99	1.5	27.16
5	(-1.59; -2.46)	12.67	13.37	2.02	28.06
6	(-1.3; -2.5)	13.67	13.11	2.03	28.81
7	(-1.06; -2.49)	14.67	11.75	1.45	27.87
8	(-0.87; -2.43)	15.67	11.50	1.89	29.06
9	(-0.71; -2.35)	16.67	11.28	2.34	30.29
10	(-0.58; -2.25)	17.67	11.02	2.06	30.75
11	(-0.48; -2.13)	18.67	9.67	1.59	29.93
12	(-0.42; -2.06)	19.33	9.46	1.93	30.72
13	(-0.37; -1.97)	20	9.24	2.17	31.41

2.2-кестеден $x_0(-0.83; 3.03)$ екінші нұсқасы ШҒА-дан БҒА-на нысанаға өту уақытының минималды уақытына сәйкес келеді ($T = 24.89$ мин).

Қозғалтқыш режимі қосылған кезде сәйкес уақыт $(t_2+t_3) = 5.62 + 1.42 = 7.04$ мин.

Классикалық бақылау нәтижелерімен «кішкентай» қол жетімділік аймағынан тыс жерде алынған нүктелермен салыстырыңыз (2.3 кесте).

2.3 Кесте – Классикалық бақылаудағы мақсатқа жету үшін МКА қозғалысының уақытын есептеу

№ п/п	x_0 , км	t_1 , мин	t_2 , мин	t_3 , мин	T , мин
1	(-1.12; 3.93)	17.32	6.73	1.27	25.32
2	(-1.47; 4.87)	16.16	7.51	1.31	24.98
3	(-2.41; 7.17)	14.54	7.92	1.36	23.82
4	(-4.16; 10.39)	12.52	8.46	1.82	22.8
5	(-7.21; 13.39)	10.1	8.95	1.93	20.98
6	(-13.17; 18.28)	6.43	9.3	4.54	20.27
7	(20; 20)	0	9.76	9.1	18.86

Қозғалтқыш режимі қосулы кезде мақсатқа жету үшін қажетті уақыт арақатынасын жасаймыз:

$$\frac{(t_2 + t_3)_1}{(t_2 + t_3)_{opt}} = \frac{6.73 + 17.27}{7.04} = 1.3$$

2.4

$$\frac{(t_2 + t_3)_7}{(t_2 + t_3)} = \frac{9.76 + 9.1}{7.04} = 2.7$$

Сызықтық модель үшін жылдамдықтағы оптималдылық критерийіне (қозғалтқыш режимі қосулы болғанда) рұқсат етілген басқару $v = 1$ және $v = -1$ болады. Мұны дәлелдеу үшін жоғарыда келтірілген мысал үшін рұқсат етілген басқару орталығындағы БО -ның әртүрлі мәндері үшін ШҒА-ның қозғалысын модельдейміз, басқару орталығына жету уақыты туралы қорытынды жасаймыз және қорытынды жасаймыз. Әр түрлі басқару элементтері үшін ШС басқару параметрлері қарастырылған (2.4 кестені қараңыз).

2.4 Кесте – Әр түрлі v кездегі МКА қозғалыс уақытын есептеу

№ п/п	v	$t_2, \text{мин}$	$t_3, \text{мин}$	$t_2 + t_3, \text{мин}$
1	$v = \pm 1$	5.62	1.43	7.05
2	$v = \pm 0.9$	6.03	1.18	7.212
3	$v = \pm 0.8$	6.4	1.22	7.62
4	$v = \pm 0.7$	6.03	1.09	7.12
5	$v = \pm 0.6$	6.43	1.14	7.57
6	$v = \pm 0.5$	6.48	0.79	7.27
7	$v = \pm 0.4$	6.52	0.69	7.21
8	$v = \pm 0.3$	6.86	0.56	7.42
9	$v = \pm 0.2$	6.99	0.26	7.25
10	$v = \pm 0.1$	7.14	0.11	7.25

Әр түрлі рұқсат етілген басқару элементтерін салыстыру:

$(t_2 + t_3)$ кем дегенде $v = \pm 1$;

Басқару орталығына жету аймағында қозғалтқыш қосылған кезде ШҒА қозғалыс уақыты $(t_2 + t_3)$.

Осылайша, алынған нәтижелерге сәйкес ШҒА қозғалысын оңтайлы бақылауға (қозғалтқыштың жұмыс жасауымен) $v = 1$ және $v = \pm 1$ көмегімен қол жеткізіледі.

«Шағын» ШС қол жетімділік ауданында есептеу үшін кері уақыт әдісі жетілдірілді. Модернизация басқару уақытының шегін белгілеуге және ШС аймағының орналасу аймағын белгілеуге негізделген. Бұл ШС-тің басқарылатын аймақтарын бөлуге және классикалық әкімшіліктермен салыстырғанда (бастапқы нүктеге байланысты) 1,3-тен 2,7 есеге дейін қысқартуға мүмкіндік берді.

«Шағын» ҚС қол жетімділік доменін есептеу үшін кері уақыт әдісі жетілдірілді. Модернизация басқару уақытының шегін белгілеуге және SS

аймағының орналасу аймағын белгілеуге негізделген. Бұл СС-тің басқарылатын аймақтарын бөлуге және классикалық әкімшіліктермен салыстырғанда (бастапқы нүктеге байланысты) 1,3-тен 2,7 есеге дейін қысқартуға мүмкіндік берді.

2.4 Сызықтық жүйелер үшін «шағын» басқарылатын және бақыланатын мәселелерді шешу

Басқару және бақылау - басқару жүйелерінің және бір уақытта басқару объектілерінің негізгі қасиеттері.

Стационарлық жүйелер үшін «шағын» басқару мүмкіндігі туралы түсінік егжей-тегжейлі жасалды [67, 68, 69, 70]. Онда «шағын» және бақылануда «шағын» бақылау арасындағы байланыс туралы мәселе көтерілді.

«Шағын» басқарылатын және бақыланатын қолданбалы мәселелер қарастырылды [63, 90]. ШҒА-тын басқарудағы және олардан алынған ақпаратты өңдеудегі ұқсас мәселелер қарастырылды [3, 4, 46, 91]. Жердің орталығында және қандай да бір бағытта бағытталған координаталық осьтерде (геоцентрлік координаттар жүйелері) координаталар жүйесіндегі ШҒА қозғалыс теңдеулері күрделі сызықтық емес құрылымға (формаға) ие екендігі белгілі. Мұндай жүйелерді шешу, ғарыш аппараттарының Жерден қозғалысын болжау және бақылау өте қиын. Егер қозғалыс траекториясының параметрлерімен қатар, олардың жылдамдығы мен үдеуі қарастырылса, міндет өте күрделі.

Соңғы жылдары, әдетте, ғарыш кемесін ұшыру ғарыш платформасынан (ҒП), мысалы, халықаралық ғарыш стансасынан (ШҒА) немесе автоматты түрде ірі ғарыш кемесінен (БҒА) жүзеге асырылды. Бұл жағдайда КС-да центрі бар координаталар жүйесі енгізіліп, ШҒА қозғалыс теңдеулері осы қозғалатын координаттар жүйесінде қайта есептелінеді, бұл ШҒА-тын бақылауға және оның күйін бақылауға жеткілікті. Бұл жағдайда ШҒА қозғалысының теңдеулері қарапайым, көбінесе сызықты және тіпті кейде жазық корпусқа айналуы өте маңызды. Бұл жағдай осы жұмыста қолданылатын жоспарда қарастырылған.

Сызықты стационарлық емес жүйені қарастырайық

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= P(t)x(t) + v(t)u, \\ y(t) &= R(t)x(t) \end{aligned} \tag{2.5}$$

мұндағы $x(t)$ уақытына байланысты фазалық күйдің 3 өлшемді векторы; $y(t)$ - бұл p -өлшемді бақылау векторы [$p = 1, 2, 3$, векторының өлшемі модельмен анықталады (2.1), және сәйкесінше матрицаның өлшемі p координаталарымен берілген тұрақты вектор; $R = R(t)_{p \times 3}$] кез келген u үшін: $u_1, u_2, u_3 : v = v(t) \ U$ ауданын алынған тұрақты рұқсат етілген бақылау $t : -1 \leq v(t) \leq 1$; $P(t), R(t)$ -

өлшемдері 3×3 және $p \times 3$ матрицалары, $t \in [0, +\infty]$ -де нақты және үздіксіз элементтер.

Келесі белгіні енгіземіз: O - R^3 фазалық кеңістігінің шығу тегі; $x(x_0, t_0, t, v(t)u)$ x_0 нүктесінде $t = t_0$ нүктесінен өтетін жүйенің (2.2) траекториясы.

2-ескерту. ШҒА-тын бақылау мен байқаудың мақсаты - ШҒА-тын x_0 нүктесінен x_1 нүктеге келтіру, содан кейін $y(t)$ бақылау векторын қолдана отырып, x_1 нүктеге жету процесінде ШҒА $x(t)$ күйін анықтау.

Бастапқы айнымалылардың сызықтық өзгеруі - O нүктесі, x_1 нүктесін алсаңыз болады. Содан кейін қозғалыс траекториясы үшін $x(x_0, t_0, t, v(t)u)$ мәні $x(t_0) = x(x_0, t_0, t_0, v(t)u) = x_0$.

Қойылған мәселелерді шешуге қажетті белгілі нәтижелер береміз.

Теорема 2.1. Y^T біртекті жүйенің негізгі матрицасы болсын $\dot{x} = P(t)x(t)$ нүктесінде қалыпқа келтірілген. Жүйенің (2.2) $t = 0$ интервалында толығымен басқарылуы үшін бұл қажет және жеткілікті матрицалық қатарлар

$$B(t) = Y^{-1}(t)u \quad 2.6$$

$[t_0, T]$ аралықта сызықты тәуелсіз болды.

Теорема 2.1 дәлелденді [92].

3-ескерту. ШҒА-тын бақылау мен байқаудың мақсаты - ШҒА-тын белгілі бір x_0 нүктесінен x_1 ге жеткізу, содан кейін $y(t)$ бақылау векторы арқылы x_0 -ден x_1 -ге дейінгі процесстегі ШҒА $x(t)$ күйін анықтау.

Бастапқыға арналған айнымалылардың сызықтық өзгеруін пайдаланып, O нүктесін пайдаланып, сіз x_1 нүктесін қабылдауға болатындығын көресіз. Сонда қозғалыс траекториясы үшін $x(x_0, t_0, t, v(t)u)$ $x(t_0) = x(x_0, t_0, t_0, v(t)u) = x_0$.

Жұмыста толық бақылау мүмкіндігі ұғымы оның классикалық мағынасына сәйкес келеді [2, 93].

$U(0)$ нүктесінің $t_0 \leq t \leq T$ уақыт интервалында кез келген уақытта бақылауға болатын u нүктесінің элементтері болатын O нүктесінің көршісі болсын.

Теорема 2.2 $f(x) = P(t)x(t) \in C_{S(O)}^3$ векторына рұқсат етіңіз, мұндағы $C_{S(O)}^3$ ауданындағы функцияларды қоса алғанда, 3-ші реттігі бар үзіліссіз және жартылай үзіліссіз туындылар класы болады. Координатаның шығу нүктесінде есептелген $\dot{x}, \ddot{x}_0, \ddot{x}_0$ векторлары $U_1 \subset U$ аймағында сызықты тәуелсіз болсын, мұндағы U_1 және $v(t)$ контроллері болатын аймақ U_1 - ге жатады.

Сонда шығу жүйесі «шағын» жүйеге қол жеткізуге болады (2.2).

2.2 теоремасы [89] -де дәлелденді. Келесі теореманы дәлелдейік

Егер сызықты стационарлық жүйе $[t_0, T]$ интервалында толығымен басқарылатын болса, онда ол $[t_0, T]$ аралықта «кішкентайда» басқарылады. Дәлел. Үшінші ретті сызықты стационарлық емес жүйені қарастырайық

$$\dot{x}(t) = P(t)x(t) + v(t)u \quad (2.7)$$

Қосымша матрицаларды ұсынамыз:

$$\begin{aligned} S_0(t) = u, | S_1(t) = \dot{S}(t) - P(t)S_0(t) = -P(t)S_0(t), \\ S_2(t) = \dot{S}_1(t) - P(t)S_1(t) = -P(t)S_1(t) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$P(t)$ матрицасының элементтері барлық матрицалардың элементтері $[t_0, T]$ аралығындағы үзіліссіз $S_0(t), S_1(t), S_2(t)$ матрицаларының элементтері тұрақты болған сайын жеткілікті түрде әр түрлі болады деп санаймыз. Осы матрицалардан (3×3) матрицасын құрамыз:

$$S(t) = (S_0(t), S_1(t), S_2(t)) \quad (2.9)$$

(2.3) жүйені $[t_0, T]$ аралықта толығымен басқаруға рұқсат етеміз. Содан кейін Теорема 2.1 бойынша $B(t) = Y^{-1}(t)u$ матрицасының жолдары $[t_0, T]$ интервалына сызықты тәуелсіз болады. Бұл $c^T B(t) \equiv 0$ сәйкестіктің $[t_0, T]$ векторының $c = 0$ болатындығын білдіреді.

Осыдан,

$$c^T Y^{-1}(t)u = 0 \Rightarrow c^T Y^{-1}(t)S_0 \equiv 0 \quad (2.10)$$

Бұдан $c^T Y^{-1}(t)u = 0 \Rightarrow c^T Y^{-1}(t)S_0 \equiv 0$ және $Y^{-1} \neq 0$ болғандықтан, $c^T Y^{-1}(t) \equiv 0$ нөлдік векторы бар, $c^T Y^{-1}(t)u = 0 \Rightarrow c^T Y^{-1}(t)S_0 \equiv 0$. Сондықтан $S(t)$ матрицасының жолдары сызықты тәуелсіз және $S(t) = 3$ дәрежесі $[t_0, T]$ кесіндісінде. (2.7) жүйе үшін $S(t)$ матрица келесі форманы алады:

$$S(t) = (u, -P(t)u, P^2(t)u) \quad (2.11)$$

$S(t)$ матрицасы - өлшемі квадраттық матрица 3×3 . Сонымен, егер $S(t)$ матрицасының жолдары $\square \square 0 t, T$ интервалына сызықтық тәуелсіз болса, онда $-P(t)u, P^2(t)u$ бағандары болады. $u, S(t)$ матрицалары да сызықтық тәуелсіз.

Әрі қарай 2.2 теоремасы бойынша, егер векторлары $\overset{\cdot}{x}_0, \overset{\ddot{\cdot}}{x}_0, \overset{\dots}{x}_0$ бастапқыда есептелген сызықтық тәуелсіз, содан кейін сызықтық жүйе «шағын» басқарылады.

Аралас жұмыстың $\overset{\cdot}{x}_0, \overset{\ddot{\cdot}}{x}_0, \overset{\dots}{x}_0$ осындай түрі бар:

$$\begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ x_0 & x_0 & x_0 \end{pmatrix} = v^3 \sigma_0(t) \quad (2.12)$$

Мұнда, $\sigma_0(t)$ -аралас жұмыстың векторлары $u, P(t)u, P^2(t)u$

$S(t)$ матрицасының $-P(t)u, P^2(t)u$ бағандары $u, -P(t)u, P^2(t)u$ векторларының аралас көбейтіндісін есептеуге арналған детерминант қатарлары екенін көруге болады. $S(t)$ матрицалары $\sigma_0(t) \neq 0 \forall t$ сызықты тәуелсіз, содан кейін $[t_0, T]$ интервалында $\begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ x_0 & x_0 & x_0 \end{pmatrix}$. Сонымен қатар, (2.4), $[t_0, T]$ тәуелсіз, “аз” күйінде басқарылатындығына байланысты. the $[t_0, T]$ кесіндісінде. Теорема дәлелденген.

Теорема 2.4. $[t_0, T]$ аралығындағы «шағын» жүйеде (2.2) басқарудың қажетті және жеткілікті шарты, матрица

$$A = \int_{t_0}^T B(\tau)B^T(\tau)d\tau \quad (2.13)$$

Теорема 2.5. Егер кез келген сәтте $\tau \in [t_0, T]$ дәрежесі $rank S(\tau) = 3$ болса, онда (2.5) жүйе the $[t_0, T]$ аралықта «шағын» толықтай басқарылады.

Дәлелдеу. $\tau \in [t_0, T]$ және $rank S(\tau) = 3$ дәрежелері болсын. $\begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ x_0 & x_0 & x_0 \end{pmatrix}$ векторлары бастапқыда есептелсін.

Бастапқыда қарама-қайшылықпен дәлелдейміз (2.5) бұл жағдайда $[t_0, T]$ жүйесінде толықтай басқарылады.

Бұл жүйені (2.5) толығымен басқару мүмкін емес делік. Содан кейін, Теорема 2.1-ге сәйкес, $B(t)$ матрицасының жолдары $[t_0, T]$ -ге сызықты тәуелді болады. Сонымен қатар, $c \neq 0$ векторы бар, $c^T B(t) \equiv 0$.

Онда,

$$c^T Y^{-1}(t)u \equiv 0 \Rightarrow c^T Y^{-1}(t)S_0 \equiv 0 \quad (2.14)$$

аламыз.

Соңғы теңдікті t -ге екі рет ажыратамыз. Бұл жағдайда мыналарды аламыз:

$$c^T Y^{-1}(t)u \equiv 0, k \equiv \overline{0,2} \quad (2.15)$$

Соңғы теңдіктер $c^T Y^{-1}(t)S(t) \equiv 0$. Осы соңғы сәйкестілікке $t = \tau$ орнын ауыстырамыз және $c^T Y^{-1}(t)S(t) \equiv 0$. аламыз, $S(\tau)$ матрицасының жолдары $rank S(\tau) < 3$ екенін көруге болады. Бұл теореманың бірінші шартына қайшы келеді. Сондықтан (2.5) жүйе толығымен басқарылады.

2.3 теоремасы бойынша (2.5) жүйені $[t_0, T]$ интервалында «шағын» басқаруға болады. Теорема дәлелденген.

2.5 Шағын толықтай байқау критерийі

y векторының y_1, \dots, y_p элементтері $t_0 \leq t \leq T$ уақыт аралықтарында байқалады деп болжайды, бұл (анықтама бойынша) кез-келген уақытта $t_0 \leq t \leq T$ интервалында $y_1(t), \dots, y_p(t)$ функциясының мәндері белгілі болады дегенді білдіреді және осы мәліметтер массивін өңдеуге болады.

Жүйеде (2.5) «шағын» байқалатындығы туралы мәселені қарастырамыз.

Анықтама 5. (2.5) теңдеулерімен сипатталған нақты детерминистік жүйе (сәйкесінше (2.5) теңдеулер жүйесі O нүктесінің кездейсоқ $U(O)$ үшін болған жағдайда, $[t_0, T]$ интервалында O шығу үшін байқалатын “шағын” деп аталады. $V(O) \subset U(O)$ маңайы бар, сондықтан кез-келген $x_0 \in V(O)$ нүктесі үшін рұқсат етілген бақылауды (1.3) шартымен көрсетуге болады, ол үшін осы нүктеден кететін оң жүйенің (2.5) бастапқы нүктесі шығады координаттарын $U(O)$ маңайынан шығармай ақырғы уақытта, және кез-келген бастапқы нүкте $x_0 \in V(O)$ және $[t_0, T]$ интервалында (1.3) бастап шығыс және басқару функцияларын өлшеу нәтижелерінен ерекше қалпына келтірілуі мүмкін.

Анықтама 6. (2.5) жүйені $[t_0, T]$ интервалы бойынша шығу үшін «шағын» деп атаймыз, егер келесі шарттардың бірі орындалмаса:

1) егер O нүктесінің $U(O)$ көршілес орналасуы болса, онда еркін $V(O) \subset U(O)$ көрші үшін, кемінде $x_0 \in V(O)$ нүктесі бар, осылайша жүйенің оң жартылай сызбасы ауданын қалдырады. (O) (1.3) соңғы мерзімде кез келген рұқсат етілген бақылау үшін;

2) $x_0 \in V(O)$ әр нүктесін $[t_0, T]$ кесіндісінде ерекше қалпына келтіру мүмкін емес.

Есепті дамуды ескере отырып, дифференциалдық теңдеулердің сапалы теориясының әдістерін қолдана отырып шешеміз.

(2.5) жүйесімен қатар келесі жүйені қарастырамыз:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) + vu \quad (2.16)$$

Көріп отырғандай (2.3) вектор функциясын қарастыру үшін оңай

$$f(x, t) = \begin{pmatrix} f_1(x, t) \\ f_2(x, t) \\ f_3(x, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1(t)x_1 + a_2(t)x_2 + a_3(t)x_3 \\ b_1(t)x_1 + b_2(t)x_2 + b_3(t)x_3 \\ c_1(t)x_1 + c_2(t)x_2 + c_3(t)x_3 \end{pmatrix}, \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{dx}{dt} = \left(\frac{dx_1}{dt}, \frac{dx_2}{dt}, \frac{dx_3}{dt} \right), \\ \ddot{x} &= \frac{d^2x}{dt^2} = \left(\frac{d^2x_1}{dt^2}, \frac{d^2x_2}{dt^2}, \frac{d^2x_3}{dt^2} \right) \\ \dddot{x} &= \frac{d^3x}{dt^3} = \left(\frac{d^3x_1}{dt^3}, \frac{d^3x_2}{dt^3}, \frac{d^3x_3}{dt^3} \right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

- бұл 1-ші , 2-ші , 3-ші туындылар $x(x_1, x_2, x_3)$ (тәуелсіз) параметрі бойынша.

O нүктесі бар $H(O) \subset U(O)$ белгілі бір доменде келесі шарттар қанағаттандырылады (қарастырылатын типтің проблемалары үшін дәстүрлі):

- 1) векторлық функция $f(x, t) \in C_H^3$ - функциялардың $H(O)$ доменіне қосылған 3-ші реттігі бар үздіксіз және үзіліссіз жартылай туындылар класы;
- 2) $f(x, t) = 0$ уақыт параметрінің кез-келген мәні үшін, тек $x = 0$ үшін;
- 3) шарттар (кейде Коши шарттары деп аталады) U доменінен кез-келген тұрақты бақылау үшін жүйенің (2.1) шешімдерінің болуы, бірегейлігі және кеңеюі үшін орындалады.

Бақылау теориясынан белгілі болғандай (мысалы, [94] қараңыз), жүйенің күйін (2.5) толығымен байқаудың классикалық міндеті $[t_0, T]$ уақыт аралығы, $[t_0, T]$ жүйенің - x_t векторының қозғалысын ерекше қалпына келтіруден тұрады. бақылау векторының $y(t)$ мәндерінің кез-келген уақытта $[t_0, T]$ және бақылау мәндеріне сәйкес.

Классикалық байқау есебін шешу үшін (1) жүйенің жалпы шешімін Коши түрінде жазамыз

$$x(t) = Y(t) \left[Y^{-1}(Y^{-1}(t_0)x_0 + \int_{t_0}^t Y^{-1}(\tau)vud\tau \right] \quad (2.19)$$

мұндағы $Y(t)$ - біртекті жүйенің негізгі матрицасы $\dot{x} = A(t)x$ жүйесінің қозғалысын анықтау үшін (2.19) теңдеуіне енетін барлық мәліметтер белгілі болғандықтан, x_0 бастапқы мәліметтердің векторын табу керек.

(2.19) өрнегін (2.1) теңдеуіне алмастыра отырып, x_0 анықтау жүйесін аламыз

$$H(t)x_0 = h(t) \quad (2.20)$$

мұнда матрица

$$H(t) = C(t)Y(t)Y^{-1}(t_0) \quad (2.21)$$

ал вектор,

$$h(t) = y(t) - C(t)Y(t) \int_{t_0}^t Y^{-1}(\tau) v u d\tau \quad (2.22)$$

Жұмыс нәтижесін пайдаланамыз [2] және жүйенің толық бақылауы туралы теореманы қалыптастырамыз (2.1), (2.2).

Теорема 2.6. (2.1) жүйенің $[t_0, T]$ интервалында толығымен байқалуы үшін $H(t)$ матрицаларының бағандары $[t_0, T]$ интервалына сызықтық тәуелсіз болуы керек. Бұл жұмыстың негізгі теориялық нәтижесі келесі теорема.

Теорема 2.7. Жүйе (2.1) $[t_0, T]$ кесіндісіндегі шығу үшін «шағын» байқалады, егер векторлары $\dot{x}_0, \ddot{x}_0, \dddot{x}_0$ шыққан жерінде есептелген болса, аймақта сызықтық тәуелсіз болады. $U_1 \subset U$, мұндағы U_1 - қарама-қарсы басқару элементтері болатын аймақ, ал $H(t)$ матрицаларының бағандары $[t_0, T]$ интервалына сызықтық тәуелсіз.

Дәлелдеу. [89] шағын қол жетімділік теоремасын қолдана отырып, сызықтық стационар емес жағдайда векторлардың араласқан көбейтіндісін $\dot{x}_0, \ddot{x}_0, \dddot{x}_0$ есептейміз.

Бір формуладағы жазбаларды түсінуге нұқсан келтірместен көлемді формулалардың «көлемін» азайту үшін векторлық және координаталық жазудың қолданылатындығын ескеріңіз.

Сонымен (2.16) дифференциалданатын теңдеуді аламыз

$$\ddot{x} = F(x, t) + G(x, v u) \quad (2.23)$$

мұнда функция,

$$F(x, t) = \frac{\partial f}{\partial t} f(x, t) + \frac{\partial f}{\partial t} \left[\sum_{j=1}^3 \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right]_{3 \times 1} \quad (2.24)$$

$$G(x, v u) = \frac{\partial f}{\partial x} v u = v \left[\sum_{j=1}^3 \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right]_{3 \times 1} \quad (2.25)$$

(2.8) келесі теңдеуді дифференциалдап, келесіні аламыз

$$\begin{aligned}
\ddot{x} &= \left(\frac{\partial F}{\partial x} f + \frac{\partial F}{\partial t} \right) + v \left(\frac{\partial F}{\partial x} u + \frac{\partial G}{\partial x} f + \frac{\partial G}{\partial t} \right) + \\
v^2 \frac{\partial G}{\partial x} u &= \left[\sum_{j=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial x_j} f_j + \frac{\partial F_i}{\partial t} \right] + v^2 \left[\sum_{j=1}^3 \frac{\partial G_i}{\partial x_j} u_j \right]_{3 \times 1} \\
&+ v \left[\sum_{j=1}^3 \frac{\partial G_{ij=1}}{\partial x_j} + \sum_{j=1}^3 f_j + \frac{\partial G_i}{\partial t} \right]_{3 \times 1}
\end{aligned} \tag{2.26}$$

(i және j) - сәйкесінше жол және баған индексі)

Енді (2.1), (2.25) және (2.26) үш сызықты емес тұрақты емес теңдеулер жүйесі үшін O нүктесінде есептелген $\dot{x}_0, \ddot{x}_0, \dddot{x}_0$ векторларын табамыз:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_0 = v u = v(u_1, u_2, u_3)^T = \ddot{x} = | F(0, t) + G(0, v u) = \\
\left[\frac{\partial f_i(x, t)}{\partial t} \Big|_{x=0} \right]_{3 \times 1} + \frac{\partial f_i}{\partial t} \Big|_{x=0} + \frac{\partial f_0}{\partial x} v u = 0 + v \left[\sum_{j=1}^3 \frac{\partial f_{i0}}{\partial x_j} x_j \right]_{3 \times 1}
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Ескерту 4. Шағын ғарыш аппараттарын бақылау мен бақылаудың нақты тәжірибесінде координаталардың пайда болуы үшін «кішкентай» нысанды байқауды математикалық модельдеу кезінде $U(O)$ төңірегінiң диаметрінің өсуі $V(O)$ төңірегінiң диаметрінің ұлғаюына әкелуі мүмкін. Егер $V(O)$ санының мұндай ұлғаюы бүкіл кеңістікті қамтыса, онда шығу тегіне қатысты МСА үшін «үлкен» болу мүмкіндігі туралы айтады.

Теорема 2.8. Кесу $[t_0, T]$ сегментінің шығу тегі үшін «шағын» жүйеде (2.1) байқалуы үшін (2.1) жүйені «шағын» және бақыланатын $[t_0, T]$ кесіндісінде бақылауы жеткілікті.

Теорема 2.9. (2.1) жүйесі $[t_0, T]$ интервалдағы координаталардың пайда болуы үшін «шағын» күйде байқалады, егер шығу нүктесінде есептелген $\dot{x}_0, \ddot{x}_0, \dddot{x}_0$ векторлары сызықтық тәуелсіз болса ғана $U_1 \subset U$ аймақ, мұндағы U_1 – қарама-қарсы басқару элементтері болатын аймақ, ал $H(t)$ матрицасының бағандары интервалына сызықты тәуелсіз.

2.6 Шағын қосарлылық принципі

Сызықтық емес стационарлық жүйені (2.2) және (2.28) басқарылатын бақылау жүйесін қарастырайық

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= P^T(t)x(t) + v(t)R^T(t) \\ y(t) &= u^T x(t) + g(t) \end{aligned} \quad (2.28)$$

Теорема 2.10. (Қосарлылық принципі «шағын»). (2.2) жүйеде толығымен «шағын» $[t_0, T]$ интервалында байқалады және $[t_0, T]$ кескінінде «шағын» реттеледі, егер оның сәйкестік жүйесі болса (2.28) $[t_a, t_b]$ кесіндісіндегі «шағын» бақыланады және $[t_0, T]$ сегментінде «шағын» байқалады.

Дәлелдеу. $Y(t)$, $Z(t)$ сәйкесінше (2.2), (2.28) жүйелердің негізгі матрицалары болсын. (2.2) жүйені «шағын» $[t_0, T]$ интервалында және «шағын» $[t_a, t_b]$ интервалында байқауға рұқсат етеміз.

Содан кейін $H(t) = R(t)Y(t)$ матрицасының бағандары және $H_1(t) = Y^{-1}(t)u$ матрицасының жолдары $[t_0, T]$ және $[t_a, t_b]$ интервалында сызықты тәуелсіз болады.

2.1 және 2.8 теоремалары бойынша (2.28) жүйе $[t_a, t_b]$ интервалында «шағында» толығымен бақыланады және байқалады.

Ескерту 8. Осы жұмыста енгізілген «шағын» байқау ұғымы жаңа ғылыми тұжырымдама. Осыған байланысты, «шағын» байқауды талдау үшін жұмыс әдісінде, атап айтқанда БҚТ-ға қатысты ШҒА-тын бақылауды талдау үшін ұсынылған баламалар жоқ.

«Шағын» нысандарда, соның ішінде ШС-ке бақылау мәселесін шешудің өзгертілген әдісі мен алгоритмдерін ұсынамыз.

2.7 «Шағын» ШС байқау есебін шешу әдісі

1. ШС кесіндісіндегі ШС жүйесінің «шағын» күйіндегі бақылаудың күйін тексеру.

2. ШС $[t_0, T]$ интервалында ШС жүйесінің бақылану жағдайын тексеру.

3. ШС жүйесіндегі «шағын» байқауды бағалау.

2.7.1 Шағын ШС-тің мүмкін болуын бағалау алгоритмдері

Тегіс қозғалыс үшін:

1. $k = u_2 / u_1$ санын табу.

2. k санын $b(t)z^2 + [a(t) - d(t)]z - c(t) = 0$ теңдеуінің түбірі $[t_0, T]$ кесіндісінен табу.

3. $[t_0, T]$ интервалында $H(t)$ матрицасының дәрежесін табыңыз.

4. Егер k саны (3) теңдеудің түбірі болмаса және $H(t) = 2$ матрицасының дәрежесі болмаса, онда жүйе $[t_0, T]$ интервалында «шағында» байқалады.

Кеңістіктік қозғалыс үшін:

1. Координат басынан $\dot{x}_0, \ddot{x}_0, \overset{\cdot\cdot\cdot}{x}_0$ векторларын табу.
2. $\dot{x}_0, \ddot{x}_0, \overset{\cdot\cdot\cdot}{x}_0$ векторларының аралас көбейтіндісін есептеу.
3. $[t_0, T]$ интервалында $H(t)$ матрицаның рангін табыңыз.
4. Егер $\dot{x}_0, \ddot{x}_0, \overset{\cdot\cdot\cdot}{x}_0$ және матрицаның дәрежесі $H(t) = 3$ болса, онда (ШҒ) жүйені $[t_0, T]$ интервалында «шағын» байқауға болады.

Модельдеу

Дәлелденген теориялық нәтижелердің практикалық қолданылуын модельдік мысалды қолдана отырып көрсетеміз, онда ШҒА негізіндегі БҚТ шағын ғарыш аппараттарын басқару және бақылау практикасы (және идеологиясы) көрсетіледі.

«Шағын» нысандардағы, соның ішінде ШС-те бақылау мәселесін шешудің өзгертілген әдісі мен алгоритмдерін ұсынамыз.

(O, x_1, x_2, x_3) координаталар жүйесінде шағын ғарыш кемесі БҚТ-мен қатты байланысқан, түзету қозғалтқыштары орнатқан және келесі жүйемен сипатталған траектория бойымен қозғалсын:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + v(t)u, \\ y(t) &= C(t)x(t), \end{aligned} \quad (2.29)$$

мұнда,

$$A(t) = \begin{bmatrix} t & t-1 & 1 \\ 2 & \sin t & 1 \\ 0 & t & 1 \end{bmatrix}, C(t) = [2t \ 5 \ -t], x = (x_1 \ x_2 \ x_3)^T, y = y_1, u = [1 \ 1 \ 1]^T \quad (2.30)$$

$u = [1 \ 1 \ 1]^T$ – тұрақты басқару.

(2.29) жүйені «шағын» бақылау және бақылау мүмкіндігі туралы қарастырайық.

Шешімі. (2.29) жүйемен қатар, оның түйісу жүйесін қарастырамыз

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A^T x(t) + v(t)C^T, \\ y(t) &= u^T x(t). \end{aligned} \quad (2.31)$$

Бұл жағдайда $S(t) = (S_0(t), S_1(t), S_2(t))$. Жүйе үшін (2.29) аламыз

$$S_0(t) = u(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} S_1(t) &= S_0 - \dot{A}S_0(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t & t-1 \\ 2 & \sin t & t \\ 0 & t & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -2t \\ -t - \sin(t) - 2 \\ -t - 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} S_2(t) &= \dot{S}_1 - AS_1(t) = \\ &= \begin{bmatrix} -2 \\ -1 - \cos(t) \\ -1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t & t-1 & 1 \\ 2 & \sin t & 1 \\ 0 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2t \\ -t - \sin(t) - 2 \\ -t - 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2.33)$$

мұнда,

$$\begin{aligned} f_1(t) &= t + 2t^2 + (t-1)(t + \sin(t) + 2) - 1, \\ f_2(t) &= 4t - \cos(t) + \sin(t)(t + \sin(t) + 2) + t(t+1) - 1, \\ f_3(t) &= t + t(t + \sin(t) + 2) \end{aligned} \quad (2.34)$$

осыдан,

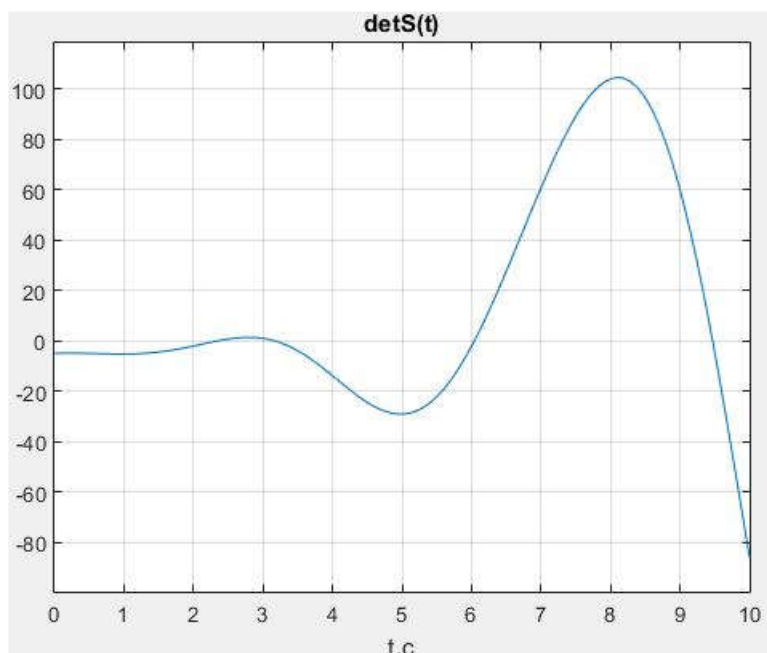
$$S(t) = \begin{bmatrix} 1 & -2t & f_1(t) \\ 1 & -t - \sin(t) - 2 & f_2(t) \\ 1 & -t - 1 & f_3(t) \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

аламыз.

Matlab бағдарламасының көмегімен $S(t)$ детерминантына өрнек аламыз.

$$\begin{aligned} \det S(t) &= 2t - \cos(t) - 2\sin(t) - t\sin^2(t) + \\ &+ 2t^2\sin(t) + t\cos(t) - 3t\sin(t) - 4 \end{aligned} \quad (2.36)$$

Уақыт $t \in [0,10]$ болсын. $\det S(t)$ уақытына байланысты (2.29) жүйесінің басқарылатын матрицасын анықтайтын функцияның графигін берейік (2.7 сурет).



2.7 Сурет – $\det S(t)$ функциясының графигінің уақытқа байланысты "шағын" (2.29) жүйенің бақылау матрицасының графигі

Matlab пакетінің көмегімен $\det S(t)$ теңдеуін шешу, $[0,10]$ уақыт интервалында теңдеудің 4 түбірі бар (3 ондық санға дейін):

$$\det S(t) = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} t_1 = 2,354 \\ t_2 = 3,16 \\ t_3 = 6,042 \\ t_4 = 9,468 \end{cases} \quad (2.37)$$

Демек, t_i матрицаның рангісі $S(t) < 3$. Бұл дегеніміз, дәлелдеген теоремаларға сәйкес бұл (2.28) жүйе уақытта «шағында» байқалмайды дегенді білдіреді.

Әрі қарай (2.29) жүйенің «шағында» байқалатындығын қарастырамыз. «Шағында» қосарлану принципін қолдана отырып, «шағын» (2.29) жүйеге қатысты (2.2) жүйені басқаруға болатындығын тексереміз. (2.29) жүйе үшін төмендегіні аламыз:

$$\begin{aligned}
S_0(t) &= u(t) - [2t \ 5 \ -t]^T, \\
S_1(t) &= \dot{S}_0 - AS_0(t) = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t & 2 & 0 \\ t-1 & \sin t & t \\ 1 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2t \\ 5 \\ -t \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} -2t^2 - 8 \\ t^2 - 2t(t-1) - 5 \sin t \\ -6t - 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.38}$$

$$S_2(t) = \dot{S}_1 - AS_1(t) = [g_1(t) \ g_2(t) \ g_3(t)]^T \tag{2.39}$$

мұнда,

$$\begin{aligned}
g_1(t) &= 10 \sin(t) - 4t + t(2t^2 + 8) + 4t(t-1) - 2t^2, \\
g_2(t) &= t(6t+1) - 2t + (2t^2 + 8)(t-1) + \\
&+ \sin(t)(5 \sin(t)) + 2t(t-1) - t^2 + 2, \\
g_3(t) &= 6t + t(5 \sin(t)) + 2t(t-1) - t^2 + 3
\end{aligned} \tag{2.40}$$

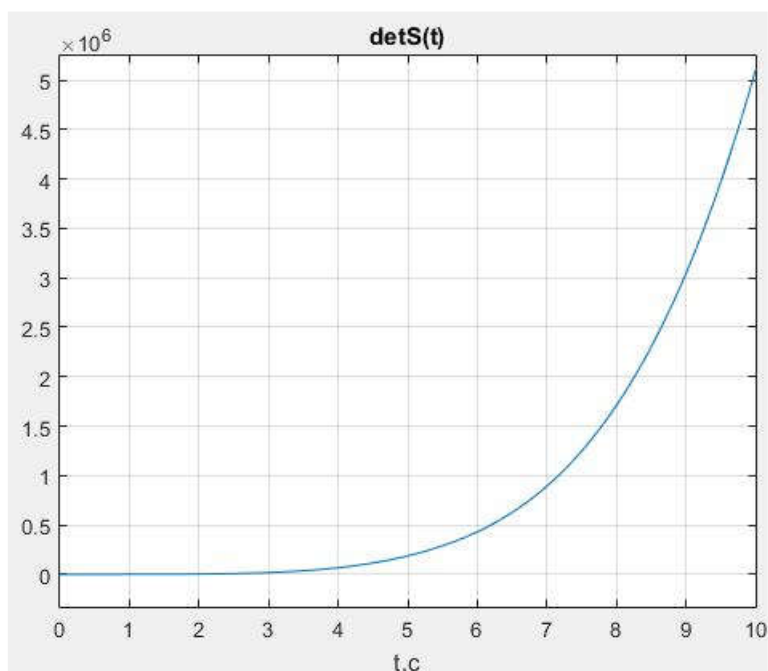
Нәтижесінде форманың матрицасын аламыз

$$S(t) = \begin{bmatrix} 2t & -2t-8 & g_1(t) \\ 5 & t^2 - 2t(t-1) - 5 \sin(t) & g_2(t) \\ -t & -6t-1 & g_3(t) \end{bmatrix} \tag{2.41}$$

Matlab бағдарламасын қолдана отырып $S(t)$ үшін анықтаушы өрнекті аламыз:

$$\begin{aligned}
\det S(t) &= 180t - 50 \sin(t) - 60t^2 \sin(t) + 36t^3 \sin(t) - \\
&- 22t^4 \sin(t) + 2t^5 \sin(t) + 10t^2 \sin(t)^2 + 10t^3 \sin(t)^2 - \\
&- 130t \sin(t) + 30t^2 + 160t^3 + 14t^4 + 48t^5 + 120
\end{aligned} \tag{2.42}$$

Уақытына байланысты $\det S(t)$ – (2.28) жүйенің басқарылатын матрицасын анықтайтын функцияның графигін берейік (2.8 сурет).



2.8 Сурет – Уақыт бойынша (2.29) жүйенің «шағын» жағдайында бақыланатын матрицаның анықтаушысының $\det S(t)$ функциясының графигі

Бұны көру қиын емес

$$\det S(t) > 0 \forall t \quad (2.43)$$

Демек, $\forall t > 0$ үшін матрицасының дәрежесі $S(t) = 3$. Бұл, дәлелденген теоремаларға сәйкес, бұл жүйе (2.28) $\forall t > 0$ үшін «шағында» басқарылатындығын білдіреді.

Соңғы нәтиже 2.5 кесте түрінде болады

2.5 Кесте – Шағын ғарыш аппараттарына арналған «аз мөлшерде» басқарылатын және бақыланатын уақыт аралығы

Уақыт аралығы	0	(0;t ₁)	t ₁	(t ₁ ;t ₂)	t ₂	(t ₂ ; t ₃)	t ₃	(t ₃ ;t ₄)	t ₄
«шағында» басқару	+	+	-	+	-	+	+	+	-
«шағында» бақылау	+	+	-	+	-	+	+	+	-

Ескерту 9. Шағын ғарыш аппараттарының ғарыш кеңістігіндегі басқару нысанасына қарай қозғалысы БТҚ-да орналасқан тұрақты координаттар жүйесіне қатысты дәстүрлі сызықтық теңдеумен сипатталған жазықтықта жүретіні жоққа шығарылмайды. Бұл, мысалы, «жалпақ» жүйемен сипатталған шағын ғарыш кемесінің қозғалысы:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A^T x(t) + v(t)C^T, \\ x_3 &= 0, \\ y(t) &= C(t)x(t) \end{aligned} \tag{2.44}$$

Мұнда, $x = x(t) = (x_1, x_2)^T$ жүйенің барлық қалған элементтері өлшемдердің тиісті өзгеруі кезінде өз мазмұнын сақтап қалды.

1. Ғарышта берілген нүктеге жету үшін ғарыш кеңістігінің кеңістіктегі және уақыттағы жұмыс істеуінің шектеулі жағдайларында ғарыш кемесінің бортынан басқару моделі негізделді.

2. Сызықтық жүйе (2.1) үшін классикалық мақсатқа қол жетімділік бір уақытта жүйе үшін «шағын» мақсатқа қол жетімділік қандай шарттармен анықталғанын (2.1) қарастырды.

3. Теориялық тұрғыдан алғанда, «шағын» басқару мен бақылану арасында байланыс орнатылды

4. Басқару теориясының жаңа аппараты модельдік нұсқада БҚТ-ға қатысты ұсақ ғарыш аппараттарының қозғалысын талдау үшін қолданылады.

3 Ерекше жағдайларда ШҒА басқарылуы

3.1 Шағын ғарыш кемесінің ерекше нүктедегі басқарылуы

Диссертациялық жұмыста траекторияның сингулярлық нүктелерінің әсер етудің өзекті мәселесі (траекторияның осындай нүктеде филиалы бар) және бақылау мен байқау алгоритмі шағын ғарыш кемесінің «шағын» қозғалысына әсер етеді.

Анықтама. Шағын ғарыш аппараттарының қозғалыс траекториясының ерекше нүктесі

а) сәйкес теңдеулер жүйесінің шешімінің болуы және біртектілігі туралы Коши теоремасы қозғалыс моделінің өзі бұзылады (түйін типінің ерекше нүктесі қарастырылады);

б) кездейсоқ есептелмеген факторлардың әсерінен траектория есептелгеннен өзгеше болады (ерітіндінің кейінгі тармақталуы).

Тапсырма. Егер траекторияның ерекше нүктесі нысанаға (координаталардың шығуы) келе жатқан жолда пайда болса, онда шағын ғарыш аппаратын арнайы түрде «шағын» түрде қалай басқаруға болады?

Шағын ғарыш аппаратының қозғалыс теңдеуін қарастырамыз

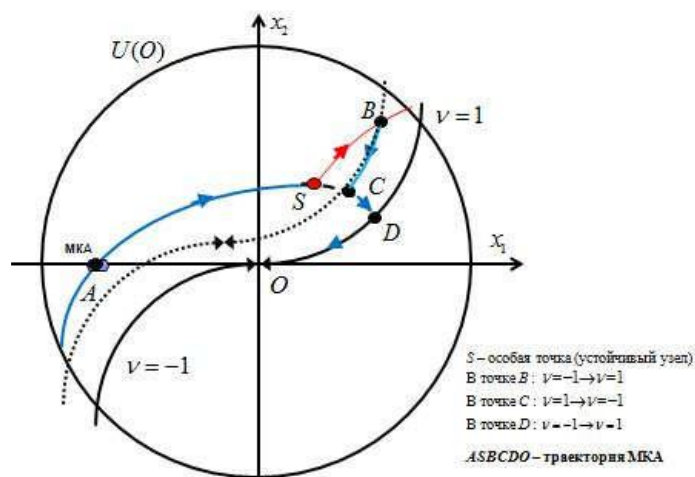
$$\dot{x}(t) = Ax(t) + v(t)u \quad (3.1)$$

басқару барысында $(\forall t) |v(t)| \leq 1$, $A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$, $u = [u_1 \ u_2]^T$, $x = [x_1 \ x_2]^T$

Бұл жұмыста бір ғана арнайы нүкте бар деп саналады және оның координаттары уақыт бойынша өзгермейді. Бұл стационарлық жүйеге сәйкес келеді (3.1).

Ерекше нүктеде "шағын" басқару есебін шешу әдісін келтіреміз:

1. S типті сингулярды модель түріне қарай анықтау.
 2. S нүктесінен кейінгі ШС траекториясын бақылау құрылғыларын қолдана отырып бағалау.
 3. Егер ШС траекториясы мақсатқа жақын болса, онда басқару сол күйінде қалады.
 4. C нүктесі бастапқы есептелген траекторияға C нүктесінде оралады, $v=1 \rightarrow v=-1$ басқаруды ауыстырады.
- 3.1 суретте жеке нүктеде ұсынылған ұсақ бақылау әдісі көрсетілген.



3.1 Сурет – Ерекше нүктеде «шағын» басқарылу иллюстрациясы

3.2 Шағын ғарыш аппараттарының «шағын» шартында алғашқы басқарылуы

Шағын ғарыш жүйелері, олардың шағын өлшемдеріне және нақты қосымшаларына байланысты, мысалы жалпақ микро-спутник сияқты жүйелер жалпақ сызықты автономды модельмен қанағаттанарлық сипатталады. Іс жүзінде, көптеген жағдайларда шағын ғарыш кемесінің бастапқы пайдалану шарттарын эксперимент түрінде құру қиынға соғады. Бұл жалпы бақылау уақыты мен сапасына, атап айтқанда «шағын» ғарыш кемесіндегі бақылауға әсер етуі мүмкін. Содан кейін берілген бастапқы жағдайларға алдын-ала шарттарда ШҒА-тын орнату қажет болады немесе керісінше.

Сонымен қатар, бастапқы жағдайға дейінгі «шағын» ғарыш аппараттарында «басқару» мәселесі практикада өзекті болып отыр. Бұл бөлімде бастапқы және бастапқы шарттардың негізгі анықтамалары мен қасиеттері берілген, сонымен қатар бастапқы және бастапқы шарттар үшін дифференциалдық теңдеулердің шешімдері және олардың өзара байланысы қарастырылған. Бірінші бөліктің теориясының негізінде шағын ғарыш аппаратына қолданылатын басқару теориясының негізгі нәтижесін аламыз.

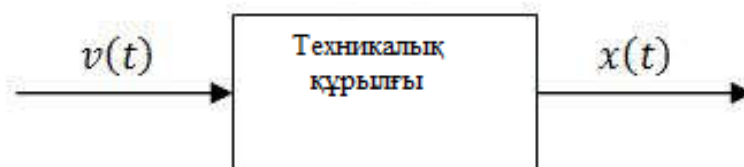
Бастапқы және алғашқы жағдайлар. Шағын ғарыш аппараттарын басқарудың қолданбалы есептерінде операторлық әдістерді қолданудың тиімді бағыттарының бірі тұрақты коэффициенті бар сызықтық дифференциалдық теңдеулер болып табылады. Осы теңдеулерді шешудің оперативті әдісінің жалпы тұжырымдамасы келесідей. Интегралдық дифференциалдық теңдеу Лапласқа сәйкес терминге ауыстырылады. Нәтижесінде ол дифференциалдық теңдеуден алгебралық күрделі теңдеуге, бастапқы дифференциалдық теңдеудің шешімі бейнеленген жалғыз белгісіз. Алынған Хебра теңдеуі негізінен белгісіз

кескінге қатысты шешіледі, содан кейін кескіндер аймағынан есептер шығаруды аяқтайтын түпнұсқа облысына ауысу жасалады.

Тиісті мәселені қарастырайық. Тұрақты коэффициенттері бар n -ретті сызықты дифференциалдық теңдеу берілсін:

$$\begin{aligned} \frac{d^n x(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx(t)}{dt} + a_n x(t) = \\ = b_0 \frac{d^m v(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} v(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dv(t)}{dt} + b_m v(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Бұл теңдеуде $x(t)$ – белгісіз функция, $v(t)$ – белгілі функция, $a_i (i = \overline{1, n}), b_j (j = \overline{0, m})$ – тұрақты коэффициенттер берілген, және ыңғайлылық үшін $a_0 = 1$. Қолданылған көзқарас тұрғысынан, басқару есептерінде (3.2) теңдеуді былайша түсіндіруге ыңғайлы жолы. Кейбір техникалық құрылғы бар, оның ішінде белгілі бір енгізу әрекеті берілетін ШҒА бар. Техникалық құрылғы осы әсерге реакция жасайды және $v(t)$ әсерінен оның шығуында белгісіз $x(t)$ процесс пайда болады. $v(t)$ және $x(t)$ процестердің өзара қатынасы, құрылыстың, соның ішінде ШҒА-тын басқаратын физикалық заңдарымен анықталады (3.2 сурет).



3.2 Сурет – Кіріс және шығыс бөлігіндегі құрылғыны иллюстрациялау

Анықтама 1. Кез келген функция (t_0, T) интервалдағы (3.2) теңдеудің шешімі деп аталады, егер бұл функция осы аралықта n рет ерекшеленетін болса және оның туындыларымен бірге (3.2) теңдеуіне ауыстырылса, соңғысын $\forall t \in (t_0, T)$ үшін сәйкестілікке айналдырады. Жалпы алғанда, кез-келген дифференциалдық теңдеудің шешімдері шексіз. Бірақ қолданбалы басқару мәселелерінде олар қосымша шарттарды қанағаттандыратын осы жиынтықтың біреуіне қызығушылық танытады. Көбіне бұл шарттар $n-1$ және функциялары оның аргументінің белгілі бір мәні бойынша берілген мәнді алатындығында. Әдетте бұл талап $t = t_0$ нүктесінде қалыптасады және $x(t_0), \dot{x}(t_0), \dots, x^{(n-1)}(t_0)$ сәйкес мәндер бастапқы шарттар деп аталады.

Бұдан әрі қозғалмас бұрын, бастапқы жағдайларды тапсыру процесінің физикалық жағын қарастырайық. Бұл шарттар құрылғының бастапқы күйін, оның ішінде теңдеумен сипатталатын ШҒА (3.2) сипаттайды. Анықтау үшін $t = t_0$. Физикалық түрде бұл құрылғылардың кіруіне әсер еткен сәт $v(t)$, уақытты

есептеудің басында қабылдадық. Математикалық есептеу кезінде Коши әдетте бастапқы шарттар қабылданады $x(t_0), \dot{x}(t_0), \dots, x^{(n-1)}(t_0)$ функциялардың шекті мәні ретінде түсініледі. Аргументтің үлкен мәндері жағынан нөлге қарай қозғалғанда. Бұл ойды атап өту үшін белгілерді пайдаланамыз.

$$\begin{aligned} x(0) &= x(0_+) = \lim_{t \rightarrow 0, t > 0} x(t), \\ x^{(i)}(0) &= x^{(i)}(0_+) = \lim_{t \rightarrow 0, t > 0} x^{(i)}(t), (i = \overline{1, n-1}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Физикалық тұрғыдан алғанда, шамалар (3.3) $x(t)$ функциясының мәндерін және құрылғының шығысында әрекет енгізілгеннен кейін бірден туындайды.

Анықтама 2. Әдетте зерттеуші, бұл құндылықтарды білмейді, себебі ол процесті кіріске жібергеннен кейін құрылғының шығысындағы процесстің не болатынын белгісіз және осы сұраққа жауап іздеудің өзі зерттеу тақырыбын құрауы мүмкін. Сонымен бірге, зерттеуші әдетте кіріс әрекеті пайда болғанға дейін, яғни $t = 0$ уақытына, бірақ нөлден солға дейін, құрылғының шығуында не болғанын біледі. Осы құндылықтарды белгілермен белгілейік,

$$x(0) = x(0_-), x^{(i)}(0) = x^{(i)}(0_+), i = \overline{1, n-1} \quad (3.4)$$

және оларды бастапқы шарттар деп атаймыз.

Ескерту 1. Жалпы жағдайда $x^{(i)}(0_-) \neq x^{(i)}(0_+), i = \overline{0, n-1}$ өйткені $v(t)$ функциясының әсерінен $x(t)$ функциясы және оның туындылары моменті $0 =$ кенеттен өзгеруі мүмкін. Физикалық тұрғыдан алғанда, бастапқы жағдайға дейінгі жағдайлар $v(t)$ себептерімен қалыптасады. Егер бұл себептер болмаса, бастапқы шарттар нөлге тең болады. Бастапқы шарттар $v(t)$ алдындағы себептермен де, функцияның өзі де жасалады.

Бастапқы шарттардағы міндет анағұрлым маңызды сипатқа ие және инженерлік зерттеулердің мәніне сәйкес келеді.

Болашақта $x^{(i)}(t) = \frac{d^i x(t)}{dt^i} = p^i x(t)$ жазуға мүмкіндік беретін дифференциалдау операторын $p = \frac{d}{dt}$ қолдану үшін дифференциалдық теңдеулер мен байланысты түрлендірулерді жазу ыңғайлы.

$p^n x(t) + a_1 p^{n-1} x(t) + \dots + a_{n-1} p x(t) + a_n x(t) = A(p), b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m = B(p)$ дегенді білдіріп, соңында жазамыз:

$$A(p)x(t) = B(p)v(t) \quad (14)$$

Форма (3.5) - тұрақты коэффициенттері бар сызықтық дифференциалдық теңдеулерді жазудың жалпы түрі. p қатысты n -ші және m ретті

формулалардың көпмүшеліктері болатын $A(p)$ және $B(p)$ өрнектері сызықты дифференциалдау операторлары деп аталады.

Ескерту 2. Бастапқы шарттарды орнатқанда (3.3), белгілі $v(t)$ функциядан $B(p)$ операторы анықтаған барлық әрекеттерді орындай аламыз және теңдеудің оң жағын $f(t) = B(p)v(t)$ функцияға азайтуға болады. Содан кейін (3.2) теңдеу пайда болады.

$$A(p)x(t) = f(t) \tag{3.6}$$

3.3 Берілген бастапқы және бастапқы шарттар үшін дифференциалдық теңдеулерді оператор әдісі арқылы шешу

[95] жұмысынан, дифференциалдық теңдеудің шешімін (3.5) бастапқы жағдайда кешенді аймақта келесі түрде жазуға болады

$$X(s) = \frac{B(s)}{A(s)}V(s) + \frac{\sum_{i=0}^{n-1} p^i x(0_+) \psi_i(s) - \sum_{k=0}^{m-1} p^k v(0_+) \phi_k(s)}{A(s)} \tag{3.7}$$

мұнда белгілер пайдаланылады

$$\begin{aligned} \psi_0(s) &= s^{n-1} + a_1 s^{n-2} + \dots + a_{n-2} s + a_{n-1}, \\ \psi_1(s) &= s^{n-2} + a_1 s^{n-3} + \dots + a_{n-3} s + a_{n-2}, \\ &\dots, \\ \psi_{n-1}(s) &= 1, \\ \psi_{n-1}(s) &= 1, \\ \varphi_0(s) &= b_0 s^{m-1} + b_1 s^{m-2} + \dots + b_{m-2} s + b_{m-1}, \\ &\dots, \\ \varphi_{m-2}(s) &= b_0 s + b_1, \\ \varphi_{m-1}(s) &= b_0 \end{aligned}$$

Нақты аймақта шешім алу үшін, суреттер кеңістігінен түпнұсқалар кеңістігіне өту керек. Осы мақсатта (3.7) қатынасы Лапласты кері түрлендіруге ұшырауы керек, бұл шешімге әкеледі:

$$\begin{aligned}
x(t) &= L^{-1}\{X(s)\} = \\
&= L^{-1}\left\{X(s) = \frac{B(s)}{A(s)}V(s) + \frac{\sum_{i=0}^{n-1} p^i x(0_+) \psi_i(s) - \sum_{k=0}^{m-1} p^k v(0_+) \varphi_k(s)}{A(s)}\right\} \quad (3.8)
\end{aligned}$$

Ескерту 3. Алайда нөлдік бастапқы жағдайлары бар нақты қолданбалы проблемалар жиі кездесетінін атап өткен жөн. Төменде көрсетілгендей, бұл алдын-ала шарттар нөл болған жағдайда болады, ал оператор $B(p) = b = const$ яғни, ол сараланбайды.

Жоғарыда айтылғандай, инженер үшін Коши есебінің неғұрлым тартымды және физикалық негізделген нұсқасы - Коши есебінің бастапқы нұсқасы $x(0_-), px(0_-), \dots, p^{n-1}x(0_-)$. Бұл төменде көрсетілген мәселені шешу процедурасын жеңілдетумен қатар, нақты мәселелерді шешкен кезде практикалық мүмкіндікті, conditions $x(0_+), px(0_+), \dots, p^{n-1}x(0_+)$ бастапқы шарттарын емес, дәл осы жағдайларды анықтауға байланысты.

Берілген бастапқы шарттардағы дифференциалдық теңдеулерді операциялық әдіспен шешкенде, Лаплас трансформациясының өте маңызды анықтамасына өте маңызды түзету енгізуіміз керек. Классикалық анықтамада интеграция аралығы $t = 0_+$ сәтінен бастап $t = \infty$ дейінгі бастапқы мәндердің бәрін қамтиды деп болжадық. Бұл жағдайда түпнұсқаның нөлдік сәттің сол жағындағы мәндері, яғни $t = 0_-$ кезінде, интеграция аралығына кірмейді. Енді сол (бастапқы) жағдайларды есепке бағытталған міндетті қоюды өзгертуге байланысты, түпнұсқаның сол жақ мәнін қамтитын Лаплас түрлендіру ұғымының өзі табиғи өзгеріс болады.

Теңдеудің соңғы шешімі (3.5) бастапқы жағдайларда келесі түрге ие:

$$x(t) = L^{-1}\{X(s)\} = L^{-1}\left\{X(s) = \frac{B(s)}{A(s)}V(s) + \frac{\sum_{i=0}^{n-1} p^i x(0_+) \psi_i(s)}{A(s)}\right\} \quad (3.9)$$

Ескерту 4. (3.9) -дегі бірінші термин $B(p) \neq const$ функциясымен $v(t)$ ерітіндінің компонентін анықтайды, ал екінші, алдын-ала шарттармен пайда болады. Қатынастар (3.9) бастапқы шарттардағы оның аналогынан (3.8) карағанда әлдеқайда қарапайым, өйткені онда $v(t)$ функциясының және оның туындыларының бастапқы мәндері жоқ. Іс жүзінде бұл өрнек көбінесе қарапайым. Басқару, байланыс, бақылауға тән техникалық құрылғылардың жұмысын талдаудың көптеген міндеттерінде $v(t)$ енгізу әрекетін қолданар алдында құрылғы тыныштықта болған деген болжам жасалады. Бірақ математикалық тұрғыдан, бұл бастапқы шарттар нөлге тең болады: $x(0_-) = 0, px(0_-) = 0, \dots, p^{n-1}x(0_-) = 0$.

Бастапқы және алғашқы шарттардың байланысы. Егер (3.5) дифференциалдық теңдеуде $B(p) \neq const$ операторы, содан кейін бастапқы және бастапқы шарттар бір-біріне тең болмайды. Физикалық тұрғыдан алғанда, процесс $v(t)$ пайда болған кезде, бастапқы жағдайға дейінгі жағдайлардың күрт өзгеруі байқалады. $v(t)$ функциясының бастапқы шарттарын және формасын, және, керісінше, $v(t)$ функциясының формасы мен бастапқы шарттарын анықтауға, оларды тудыратын бастапқы жағдайларды анықтауға мүмкіндік беретін қатынастар орнатамыз.

Дифференциалдық теңдеуді шешудің $X(s)$ кескіні теңдеуді алдын-ала және бастапқы шарттарды қолдана отырып шешу керек, өйткені бұл шешім табу тәсіліне қарамастан бірдей объективті қолданыстағы физикалық процесті сипаттайды $x(t)$ Бірақ содан кейін (3.8), (3.9) бастап шығады.

$$\sum_{i=0}^{n-1} p^i x(0_+) \psi_i(s) - \sum_{k=0}^{m-1} p^k v(0_+) \varphi_k(s) = \sum_{i=0}^{n-1} p^i x(0_-) \psi_i(s) \quad (3.10)$$

(3.10) қатынасы барлық s үшін қанағаттандырылады, егер сол қатынастардың сол және оң жақтарындағы s бірдей күштерімен коэффициенттер болып табылатын өрнектер сәйкес келсе. Осы өрнектерді теңестіре отырып, $v(t)$ процестің бастапқы және дұрыс мәндеріне және оның туындыларына немесе керісінше бастапқы шарттар табылатын теңдеулер жүйесін аламыз. Бұл теңдеулерді $m = n$ жағдайына жазамыз (егер $m < n$ болса, n сәйкес b_i коэффициенттерді нөлге тең деп қарастыру керек):

$$\begin{aligned} x(0_+) - b_0 v(0_+) &= x(0_-), \\ a_1 x(0_+) + p x(0_+) - b_1 v(0_+) - b_0 p v(0_+) &= a_1 x(0_-) + p x(0_-), \\ a_2 x(0_+) + a_1 p x(0_+) + p^2 x(0_+) - b_2 v(0_+) - b_1 p v(0_+) - b_0 p^2 v(0_+) &= \\ = a_2 x(0_-) + a_1 p x(0_-) + p^2 x(0_-), & \\ \dots & \\ a_{n-2} x(0_+) + a_{n-3} p x(0_+) + a_{n-4} p^2 x(0_+) + \dots + p^{n-2} x(0_+) - & \\ - b_{n-2} v(0_+) - b_{n-3} p v(0_+) - b_{n-4} p^2 v(0_+) - \dots - b_0 p^{n-2} v(0_+) &= \\ = a_{n-2} x(0_-) + a_{n-4} p^2 x(0_-) + \dots + p^{n-2} x(0_-), & \\ a_{n-1} x(0_+) + a_{n-2} p x(0_+) + \dots + a_1 p^{n-1} v(0_+) &= \\ = a_{n-3} p^2 x(0_-) + \dots + a_1 p^{n-2} x(0_-) + p^{n-1} x(0_-) & \end{aligned} \quad (3.11)$$

Мысалы, $m = n = 2$ үшін аламыз

$$\begin{aligned} x(0_+) &= x(0_-) + b_0 v(0_+), \\ p x(0_+) &= p x(0_-) + a_1 x(0_+) + b_1 v(0_+) + b_0 p v(0_+). \end{aligned}$$

Келесілерге назар аудару қажет. Егер $b_0 = b_1 = b_2 = \dots = b_{n-1} = 0, b_{n-1} \neq 0, b_n = 0$ яғни $B(p)$ және, демек, оператор дифференциалды емес, онда

$$x(0_+) = x(0_-), px(0_-), \dots, p^{n-1}x(0_+) = p^{n-1}x(0_-).$$

Осылайша, бұл нақты жағдайда бастапқы және алдын-ала шарттар сәйкес келеді және олардың қарсыластығының себептері жоғалады. Сондықтан $A(p)x(t) = f(t)$ формуласының дифференциалдық теңдеулерін шешкен кезде, жай жай шарттар туралы айтады және олардың табиғатын көрсетпейді. Егер теңдеудің оң жағында $B(p)v(t)$ формасы болса, онда теңдеуді қандай шарттармен шешілетінін бастапқы немесе алғашқы болатындарын ойластырған жөн. Қолданбалы есептерді шешуде, әдетте, бастапқы кезеңге дейінгі жағдайлар қолданылады. Қажет болса, оларды бастапқы шарттар ретінде ұсынуға болады (мысалы, дифференциалдық теңдеуді оператор әдісі арқылы емес, бастапқы шарттарды қолданатын классикалық шешімдер үшін). Бастапқы нөлдік нөлдік жағдайда жалпы жағдайда бастапқы шарттар нөл болмайды.

3.4 Бастапқы шарттарда «шағын» басқарылатын есепті шешудің сандық-аналитикалық әдісі

Шағын ғарыш аппараттарының қозғалыс теңдеуін алдын-ала қарастырамыз:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + v(t)u + \dot{v}(t)q, \quad (3.12)$$

мұнда $x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \quad A(t) = \begin{bmatrix} a(t) & b(t) \\ c(t) & d(t) \end{bmatrix},$

$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$ – басқаруды күшейту векторлары,

$v(t) = mt$ – сызықтық функция.

Біріншіден, жүйені өзгертеміз (3.12). $x = x_H - x^0$ айнымалысын жүйеден (3.13) ауыстыру арқылы $x^0 = A^{-1}mq$ таңдаймыз және сәйкесінше келесі теңдеуді аламыз:

$$\dot{x}_H(t) = A(t)x_H(t) + v(t)u. \quad (3.13)$$

Демек, жүйеге арналған бастапқы жағдайдағы (3.12) «кішкентайда» ШҒА - тын басқару мүмкіндігі мәселесі «шағын» ШҒА-тын жүйенің бастапқы жағдайында (3.13) басқару деңгейіне дейін азайтылды. Қозғалыс теңдеулер жүйесінде басқару векторының туындыларының болмауына байланысты (3.13) жүйенің бастапқы жағдайлары және бастапқы жағдайларға сәйкес келеді.

ШҒА үшін «шағын» басқарылатын есепті шешудің сандық-аналитикалық әдісі:

1. $x = x_H - x^0$ айнымалысының сызықтық өзгеруі;
2. $x^0 = A^{-1}mq$ және жүйені таңдаңыз (3.12):
3. жүйенің шағын (3.12) бақылануы бастапқы жағдайдағы «шағын» (3.13) басқару қабілетіне сәйкес келеді;
4. Қатырылған коэффициенттер әдісін қолдана отырып, жүйенің «шағын» күйінде басқарылатындығын тексереміз (3.13).

Модельдеу

ШҒА бастапқы жағдайында келесі жүйенің «шағын» басқарылатындығын тексеріңіз:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + \dot{x}(t)q, \quad (3.14)$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} t & 1 \\ e^t & t^2 - 1 \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, q = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, v(t) = mt,$$

$T = [0,5]$ мин -ШҒА жұмыс уақытының интервалы

Қатырылған коэффициенттер әдісін қолдана отырып, (3.15) жүйені шағында бақылау мүмкіндігі үшін зерттейміз.

Нәтижені келесі кестеде аламыз.

3.1 Кесте – Шағын жүйеде (3.15) [0,5] арқылы басқару

$t, \text{ мин}$	Шағында басқару
0	+
0,5	+
1	+
1,5	+
2	+
2,5	+
3	+
3,5	+
4	+
4,5	+
5	+

Сонымен қатар, $A(t)$ және $v(t)$ матрица элементтерінің функциялары олардың кесіндісіндегі мәндерін күрт өзгертпейді $[0; 5]$. Демек, (3.15) жүйені шағын уақыт аралығында бастапқы интервалмен басқаруға болады $[0; 5]$.

Бұл тарауда фазалық траекторияның жекелеген нүктесінде және кішкентай ғарыш аппараттарының траекториясында және қозғалыс күйінде «шағын» күйде басқару мүмкіндігі туралы мәселелер алдын-ала дайындалған және ұсынылған. Траекторияның жекелеген нүктесінде ШС бақылау моделі ұсынылған, бұл бақылаудың бұзылуын болдырмауға мүмкіндік береді. Сызықтық бақылау мысалында алдын-ала бастапқы шарттардағы «кішкентай» ШС-те басқару мүмкіндігі мәселесін шешу ұсынылған.

4 Шағын ғарыш аппараттарын басқаруға және бақылауға арналған бағдарламалық кешен

Бағдарламалық жасақтаманың мақсаты - шағын ғарыш аппараттарын қоса алғанда, объектілердің динамикалық сызықтық жүйелерінің «шағын» күйінде басқарылатын және бақыланатын модельдеу. Бағдарлама шағын ғарыш аппаратын басқаруды жоспарлайды, басқаруды ауыстыру және нысанаға тигізу сәттерін анықтайды, қол жетімділік аймағын «шағын» қалпына келтіреді және нысанды тұрақтылыққа тексереді.

Қолдану аймағында нысандардың қозғалысын талдау, бақылау мен байқауды модельдеу, ғарыштық технологиялар.

4.1 ШҒА қозғалысын басқаруға болатын және бақыланатын модельдеуге арналған бағдарламалық кешеннің құрылымы

Осы тарауда толығымен сипаттама берілген және тегіс автономды жағдайға арналған шағын ғарыштық аппараттардың "басқару және бақылау жөніндегі бағдарламалық кешен "бағдарламалық кешенінің құрылымы келтірілген. Аталған бағдарламалық кешен үшін бірінші 3 тарауларда бағдарламалық код түрінде келесі Алгоритмдер іске асырылған:

- 1) сызықтық жүйенің орнықтылығын бағалау алгоритмі;
- 2) БО-на қол жеткізу саласын табу алгоритмі»;
- 3) шағын желілік жүйеде басқарушылықты және бақылауды бағалау алгоритмі;
- 4) БО-на қол жеткізу үшін ШҒА басқару тапсырмасының алгоритмі;
- 5) басқаруды ауыстырып қосу сәттерін және БО-на қол жеткізу сәтін табу алгоритмі.

Бағдарламалық жасақтамада қолданылатын барлық деректер нысандары не MATLAB стандартты типтерінің тұрақтылары, не MATLAB стандартты типтерінің өзгермелі элементтері немесе MATLAB стандартты типтерінің айнымалыларынан және немесе вектор, матрица типті айнымалылардан және немесе тілдің басқа құрылымдарынан тұрады. MATLAB тілін қолдану арқылы сандық шешім мен ШҒА траекториясының графикалық көрінісіне жауап беретін бағдарламалық кешен модульдері жасалынған. Бұл модульдер басқару орталығына оңтайлы басқарумен қысқа мерзімде жету үшін «шағын» ғарыш аппараттарын басқару мен бақылауды модельдеуге мүмкіндік береді. Осы диссертациялық жұмыса қолданылған модификацияланған алгоритмдердің тиімділігіне салыстырмалы талдау жүргізілді, классикалық бақылаумен салыстырғанда «шағын» бақылау тиімділігі көрсетілген. Бағдарламалық пакеттің осы модульдерінің жұмыс істеу нәтижелері осы тезистің 2 және 3 тарауларында келтірілген. Тараудың негізгі нәтижелері [96, 97, 98, 99, 100, 101,

102, 103, 104, 105] -де жарияланған, сонымен қатар А, В қосымшаларында келтірілген.

«Шағын» ШҒА-да бақылау мен қол жетімділікті модельдеуге арналған бағдарламалық жасақтама төменде келтірілген 4 құрылымдық модульден тұрады.

1. «Қозғалыс тұрақтылығы бағдарламасы» модулі (4.1-сурет). Бұл модульде математикалық модельдің деректерінен стационарлық жүйе үшін сипаттамалық теңдеудің игендық мәндері табылған. Евгений мәндерін табу нәтижелері бойынша модуль шағын ғарыш кемесінің қозғалыс тұрақтылығын бағалайды. Стационарлық емес жүйе үшін тұрақтылық ШҒА-ның жұмыс уақыт интервалында әр түрлі уақытта қатырылған коэффициенттер әдісімен бағаланады. Егер осы сәттерде шағын ғарыш кемесінің қозғалысы тұрақты болса, онда басқару нүктесіне жету үшін қажетті минималды уақыт аралықта ол «аз» күйінде тұрақ деп тұжырым жасауға болады. Бұл уақыт интервалы 3 модульде анықталады немесе бастапқыда ШҒА қуатының шектеулі болуына байланысты орнатылады.



4.1 Сурет – ШҒА қозғалысының орнықтылық бағдарламасы

MATLAB тілінде 1 Модулінің жұмыс алгоритмі:

```

% Программа оценки устойчивости системы
global a b c d k p lamda2
disp('введите параметры матрицы состояния:')
a=input('введите параметр a=');
b=input('введите параметр b=');
c=input('введите параметр c=');
d=input('введите параметр d=');
k=input('введите параметр k=');
ptdt=[1 -(a+d) a*d-b*c];
la=roots(ptdt);%корни характеристического уравнения
disp('корни характеристического уравнения:')
l1=la(1)
l2=la(2)
p=abs(imag(la(1)))% определить p - мнимая часть корней характеристического уравнения
if (real(l1)<=0)&(real(l2)<=0)
    disp('Система устойчивая')
else
    disp('Система не устойчивая')
end

```

```

if b*k^2+(a-d)*k-c==0% Оценки существования области достижимости
    disp('Области достижимости не существует')
else
    disp('Система управляема в малом')
    if ~(l1==l2)%разные корни харак.уравнения
        if (real(l1)>0)&(real(l2)>0)
            disp('Областью достижимости является некоторая часть фазовой
плоскости')
        end
        if (real(l1)<0)&(real(l2)<0)
            disp('Областью достижимости является вся фазовая плоскость')
        end
        if
            ((real(l1)==0)&(real(l2)==0))&((~(imag(l1)==0))&(~(imag(l2)==0)))
            disp('Областью достижимости является вся фазовая плоскость')
        end
        if ((l1<=0)&(l2>0))|((l1>0)&(l2<=0))% какой корень больше нуля
            disp('Областью достижимости является некоторая часть фазовой
плоскости')
            lamda=(l1>0);
        end
    end
end

```

```

        lamda2=1a(lamda);
    end
    if ((l1<0)&(l2==0))|((l1==0)&(l2<0))
        disp('Областью достижимости является вся фазовая плоскость')
    end
    else% кратные корни харак.уравнения
        if ((~(b==0))|~((c==0))&(l1>0)%>0
            disp('Областью достижимости является некоторая часть фазовой плоскости')
        end
        if ((~(b==0))|~((c==0))&(l1<=0)%<0
            disp('Областью достижимости является вся фазовая плоскость')
        end
    end
end
end
end

```

2. "Қол жетімділік саласын қалпына келтіру бағдарламасы" модулі. Бұл модульде сандық әдіспен ауысу қисығын салу. Бұдан әрі $U(O)$ ЦУ маңайындағы ШҒА маневрі үшін шектелген ауысу қисығының қиылысу нүктелерін табамыз. Коммутация нүктелеріне дейін алынған барлық ауысу қисығының нүктелерінен модуль соңғы есептік уақыт ішінде теріс траекторияларды жасайды және ең аз уақыт ішінде БО "шағын" қол жеткізу аймағын алады. 4.2, 4.3, 4.4 және 4.5 суреттерінде "шағын" қол жеткізу аймағын қалпына келтіру нәтижелері иллюстрациялар келтірілген.

MATLAB тіліндегі 2 Модуль жұмысының алгоритмі:

```

%(корни харак.уравнения - вещественные)!!!
global a b c d u1 u2 r z1 z2 e
disp('введите параметры матрицы состояния:')

```

```

a=input('введите параметр a=:');
b=input('введите параметр b=:');
c=input('введите параметр c=:');
d=input('введите параметр d=:');

disp('введите параметры матрицы управления:')

u1=input('введите параметр u1=:');% постоянный вектор u
u2=input('введите параметр u2=:');

z1=input('введите начальные координаты объекта z1=:');% начальные ко-
ординаты
z2=input('введите начальные координаты объекта z2=:');

e=input('введите погрешности координат при переключении e=:');% по-
грешности координат при переключении управления!!!

tspan=input('введите отрезок времени исследования');% Отрезок времени
исследования

vehinhtron% заданная начальная окрестность начала координат

ptdt=[1 -(a+d) a*d-b*c];

la=roots(ptdt);%корни харак.уравнения

disp('корни харак.уравнения:')

l1=la(1)

l2=la(2)
s=real(la(1))% определить s - вещественная часть корней харак. уравне-
ния

p=abs(imag(la(1)))%определить p - мнимая часть корней харак. уравнения

%ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ДОСТИЖИМОСТИ В МАЛОМ

[t k]=ode45(@helolo,tspan,[0;0]);%Построение кривой переключения V=1
plot(k(:,1),k(:,2),'k','linewidth',3)

size_k=size(k,1);

numx=0;

while ((k(1+numx,1))^2+(k(1+numx,2))^2)<r^2%Восстановить области дос-
тижимости

    [t x1]=ode45(@helolno,tspan,[k(1+numx,1);k(1+numx,2)]);

```

```

plot(x1(:,1),x1(:,2))

numx=numx+1;

end

[t m]=ode45(@helolno,tspan,[0;0]);%Построение кривой переключения V=-1
plot(m(:,1),m(:,2),'k','linewidth',3)

size_m=size(m,1);

numy=0;

while ((m(1+numy,1))^2+(m(1+numy,2))^2)<r^2%Восстановить области дост-
тижимости

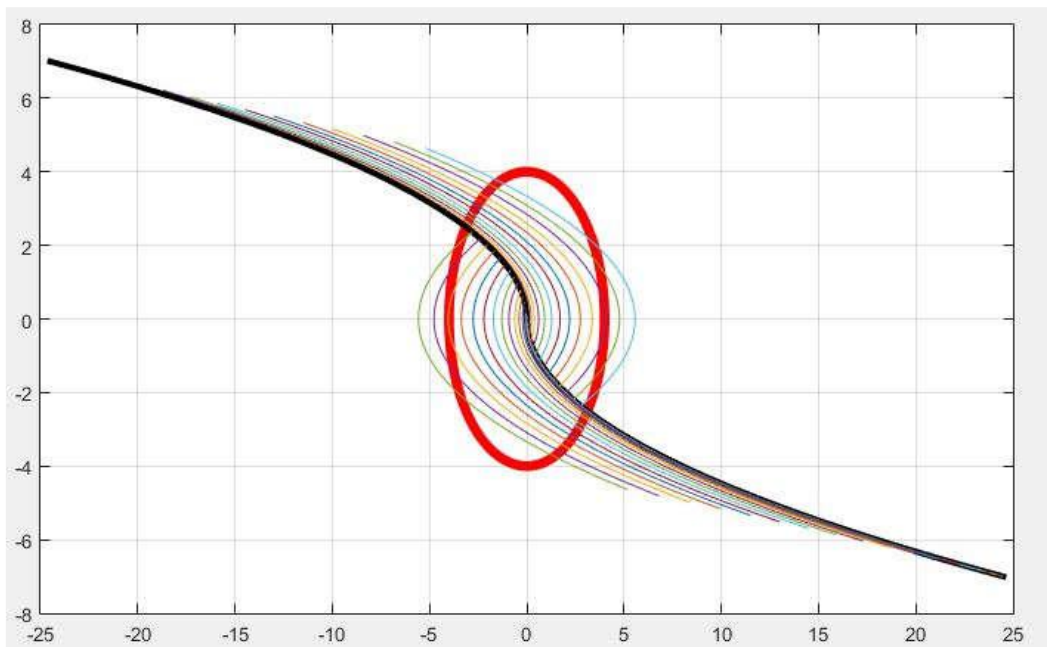
[t y1]=ode45(@helolo,tspan,[m(1+numy,1);m(1+numy,2)]);

plot(y1(:,1),y1(:,2))

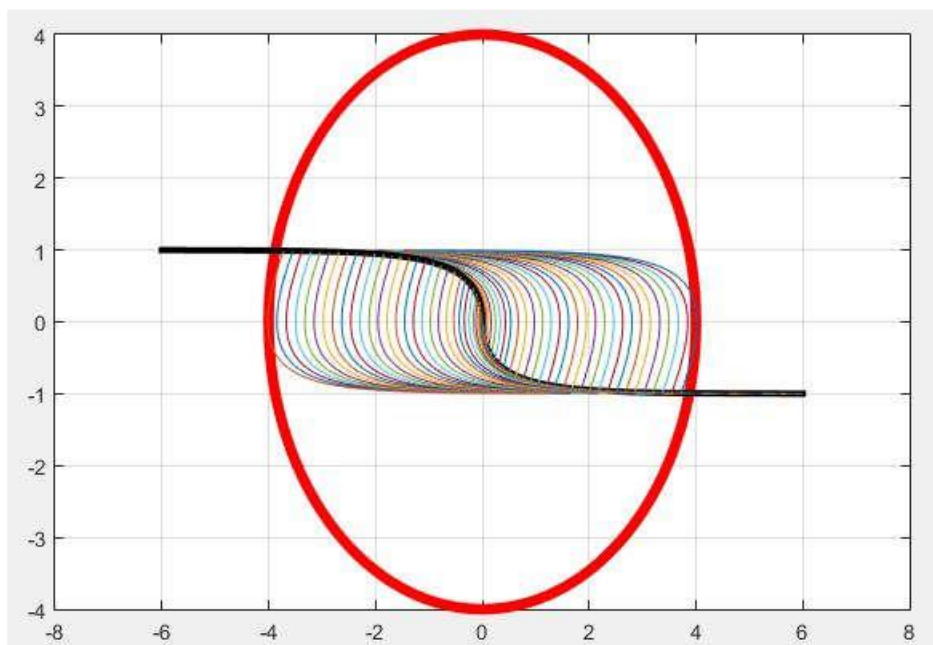
numy=numy+1;

end

```



4.2 Сурет – Теріс заттай тамырлар кезінде "шағын" қол жеткізу саласының иллюстрациясы



4.3 Сурет – Теріс емес нақты тамырлар үшін «шағын» қол жетімділік аймағының иллюстрациясы

```

%(корни харак.уравнения - комплексные)!!!
global a b c d u1 u2 r z1 z2 e f g p z Bp alpha1 alpha2
disp('введите параметры матрицы состояния:')
a=input('введите параметр a=:');
b=input('введите параметр b=:');
c=input('введите параметр c=:');
d=input('введите параметр d=:');
disp('введите параметры матрицы управления:')
u1=input('введите параметр u1=:');% постоянный вектор u
u2=input('введите параметр u2=:');
f=input('введите параметр f=:');% вспомогательное значение при по-
строении кривой переключения
e=input('введите погрешности координат при переключении e=:');% по-
грешности начала координат при его попадании
z1=input('введите начальные координаты объекта z1=:');% начальные ко-
ординаты
z2=input('введите начальные координаты объекта z2=:');

```



```

vehinhtron% заданная начальная окрестность начала координат
timdiemdacbiet% найти особые точки

                                % КОРНИ ХАРАК.УРАВНЕНИЯ

ptdt=[1 -(a+d) a*d-b*c];
la=roots(ptdt);%корни харак.уравнения
disp('корни харак.уравнения:')
l1=la(1)
l2=la(2)

s=real(la(1))% определить s - вещественная часть корней харак. уравне-
ния
p=abs(imag(la(1)))%определить p - мнимая часть корней харак. уравнения
% I) Real <=0!!!
if s<=0

                                % 1.1 Построение кривой переключения

[t k]=ode45(@helolo,[0 pi/p],[0;0]);% дуга OA1!!!
[t m]=ode45(@helolno,[0 pi/p],[0;0]);% дуга OB1!!!

size_k=size(k,1);
size_m=size(m,1);

c1=k;
c2=m;

oa=k;
ob=m;

y=0;
while y==0
    for i=1:size_k
        if (k(i,1)^2+k(i,2)^2)<=r^2+f
            y=0;
        else y=1;
            break
    end
end

```

```

        end
    end
    if y==0
        plot(k(:,1),k(:,2),'k','linewidth',3)% построим дугу OA1!!!
    end
    if y==1
        break
    end
for i=1:size_k % дуга B1B2
    [t x1]=ode45(@helolno,[0 pi/p],[k(i,1);k(i,2)]);
    size_x1=size(x1,1);
    m(i,1)=x1(size_x1,1);
    m(i,2)=x1(size_x1,2);
end
for i=1:size_k
    if (m(i,1)^2+m(i,2)^2)<=r^2+f
        y=0;
    else y=1;
        break
    end
end
if y==0
    plot(m(:,1),m(:,2),'k','linewidth',3)% построим дугу B1B2
    ob=[ob;m];
end
if y==1
    break
end
for i=1:size_k % дуга A2A3

```

```

[t x1]=ode45(@helolo,[0 pi/p],[m(i,1);m(i,2)]);
size_x1=size(x1,1);
k(i,1)=x1(size_x1,1);
k(i,2)=x1(size_x1,2);
end
for i=1:size_k
    if (k(i,1)^2+k(i,2)^2)<=r^2+f
        y=0;
    else y=1;
        break
    end
end
if y==0;
    plot(k(:,1),k(:,2),'k','linewidth',3)% построим дугу A2A3
    oa=[oa;k];
end
if y==1
    break
end
y=0;
end
[t m]=ode45(@helolno,[0 pi/p],[0;0]);% дуга OB1!!!
y=0;
while y==0
    for i=1:size_m
        if (m(i,1)^2+m(i,2)^2)<=r^2+f
            y=0;
        else y=1;
            break
        end
    end
end

```

```

        end
    end
    if y==0
        plot(m(:,1),m(:,2),'k','linewidth',3)% построим дугу OB1!!!
    end
    if y==1
        break
    end
for i=1:size_m % дуга A1A2
    [t x1]=ode45(@helolo,[0 pi/p],[m(i,1);m(i,2)]);
    size_x1=size(x1,1);
    k(i,1)=x1(size_x1,1);
    k(i,2)=x1(size_x1,2);
end
for i=1:size_m
    if (k(i,1)^2+k(i,2)^2)<=r^2+f
        y=0;
    else y=1;
        break
    end
end
if y==0
    plot(k(:,1),k(:,2),'k','linewidth',3)% построим дугу A1A2
    oa=[oa;k];
end
if y==1
    break
end
for i=1:size_m % дуга B2B3

```

```

        [t x1]=ode45(@helolno,[0 pi/p],[k(i,1);k(i,2)]);
        size_x1=size(x1,1);
        m(i,1)=x1(size_x1,1);
        m(i,2)=x1(size_x1,2);
    end
    for i=1:size_m
        if (m(i,1)^2+m(i,2)^2)<=r^2+f
            y=0;
        else y=1;
            break
        end
    end
end
if y==0
    plot(m(:,1),m(:,2),'k','linewidth',3)% построим дугу B2B3
    ob=[ob;m];
end
if y==1
    break
end
y=0;end

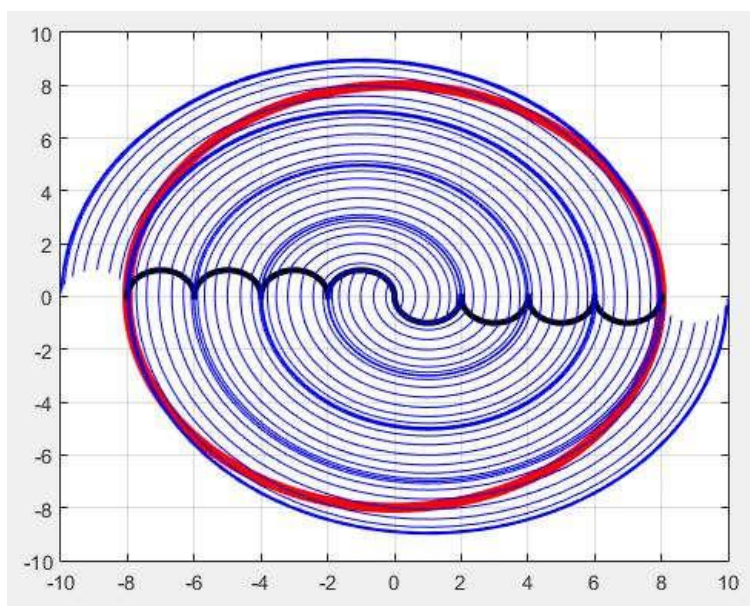
        % ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ДОСТИЖИМОСТИ В МАЛОМ
size_oa=size(oa,1);
size_ob=size(ob,1);
for i=1:size_oa
    if oa(i,1)^2+oa(i,2)^2<=r^2&oa(i,1)^2+oa(i,2)^2>=r^2-0.8
        [t x1]=ode45(@helolno,[0 pi/p],[oa(i,1);oa(i,2)]);
        plot(x1(:,1),x1(:,2),'b')
        break
    end
end

```

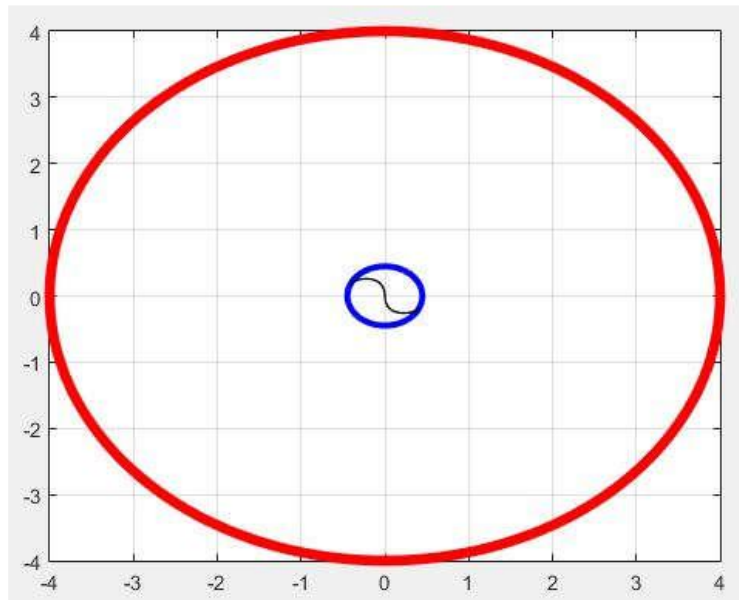
```

end
for i=1:5:size_oa % Области достижимости в малом u=-1
    if oa(i,1)^2+oa(i,2)^2<=r^2
        [t x1]=ode45(@helolno,[0 pi/p],[oa(i,1);oa(i,2)]);
        plot(x1(:,1),x1(:,2),'b')
    end
end
for i=1:size_ob
    if ob(i,1)^2+ob(i,2)^2<=r^2&ob(i,1)^2+ob(i,2)^2>=r^2-0.8
        [t x1]=ode45(@helolo,[0 pi/p],[ob(i,1);ob(i,2)]);
        plot(x1(:,1),x1(:,2),'b')
        break
    end
end
for i=1:5:size_ob % Области достижимости в малом u=1
    if ob(i,1)^2+ob(i,2)^2<=r^2
        [t x1]=ode45(@helolo,[0 pi/p],[ob(i,1);ob(i,2)]);
        plot(x1(:,1),x1(:,2),'b')
    end
end
end

```



4.4 Сурет – Нөлдік заттық бөлігі бар кешенді тамырлар кезінде "шағын" қол жеткізу саласының иллюстрациясы



4.5 Сурет – Оң заттық бөлігі бар кешенді тамырлар кезінде "шағын" қол жеткізу саласының иллюстрациясы



4.6 Сурет – Қол жетімділікті қалпына келтіру бағдарламасы

3. «Шағын құрамдағы басқару бағдарламасы» модулі (4.7 сурет). Бұл модульде шағын ғарыш аппараттарының қозғалысының математикалық моделінің мәліметтерінен «шағын» күйде басқарылатын жағдайларды тексеріп, шағын ғарыш кемесінің басқарылатындығы туралы қорытынды жасаңыз. Коммутациялық қисыққа қатысты ШҒА-ның бастапқы 1 позициясын анықтағаннан кейін, ШҒА үшін бастапқы бақылауды орнатайық. Сандық әдісті қолдана отырып, бағдарлама x_0 оңтайлы нүктесін «шағын» және басқару коммутация моменттерін есептейді және басқару элементтерін осы сәтте қарама-қарсы белгіге ауыстырады және басқару нүктесіне жету сәтін табады.



4.7 Сурет – ШҒА үшін "шағын" басқару бағдарламасы

4. "Шағын бақылау бағдарламасы" модулі (4.8 сурет). Бұл модульде ШҒА қозғалысының математикалық моделінің мәліметтерінен "шағын" байқау шарттарын тексеру және ШҒА "шағын" Байқау туралы қорытынды жасау.

MATLAB тілінде 4 модулінің жұмыс алгоритмі

```
% Программа оценки наблюдаемости системы
global a b c d u1 u2 y1 y2 y3 y4
disp('введите параметры матрицы состояния:')
a=input('введите параметр a=');
b=input('введите параметр b=');
c=input('введите параметр c=');
d=input('введите параметр d=');
disp('Матрица состояния:')
A=[a b;c d]
disp('введите параметры матрицы управления:')
u1=input('введите параметр u1=');
u2=input('введите параметр u2=');
disp('Матрица управления:')
U=[u1;u2]
rank_y=input('введите количество размерности матрицы наблюдения')
disp('введите параметры матрицы наблюдения:')
switch rank_y
    case 1
        y1=input('введите параметр y1=');
        y2=input('введите параметр y2=');
        disp('Матрица наблюдения:')
        C=[y1 y2]
    case 2
        y1=input('введите параметр y1=');
        y2=input('введите параметр y2=');
        y3=input('введите параметр y3=');
        y4=input('введите параметр y4=');
        disp('Матрица наблюдения:')
```

```

C=[y1 y2;y3 y4]

    otherwise

        disp('введите неверно количество размерности матрицы
наблюдения')

        disp('введите еще раз количество размерности матрицы
наблюдения')

        return

end

disp('матрица управляемости:')
Y=[U A*U]

disp('матрица наблюдаемости:')
H=[C' A'*C']

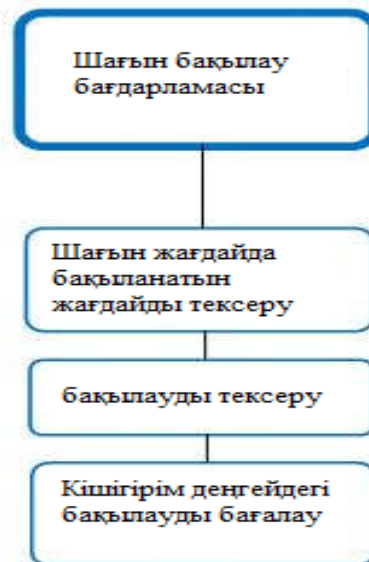
if rank(Y)==2&rank(H)==2

    disp('Система наблюдаема в малом')

else disp('Система не наблюдаема в малом')

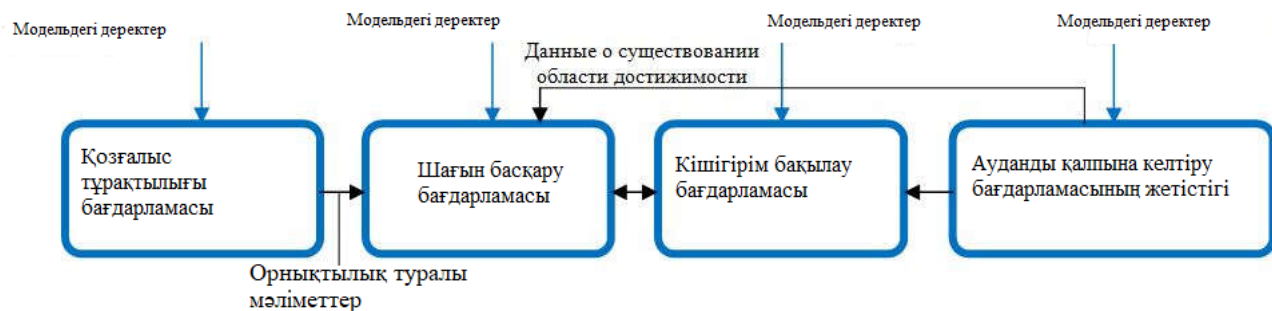
end

```



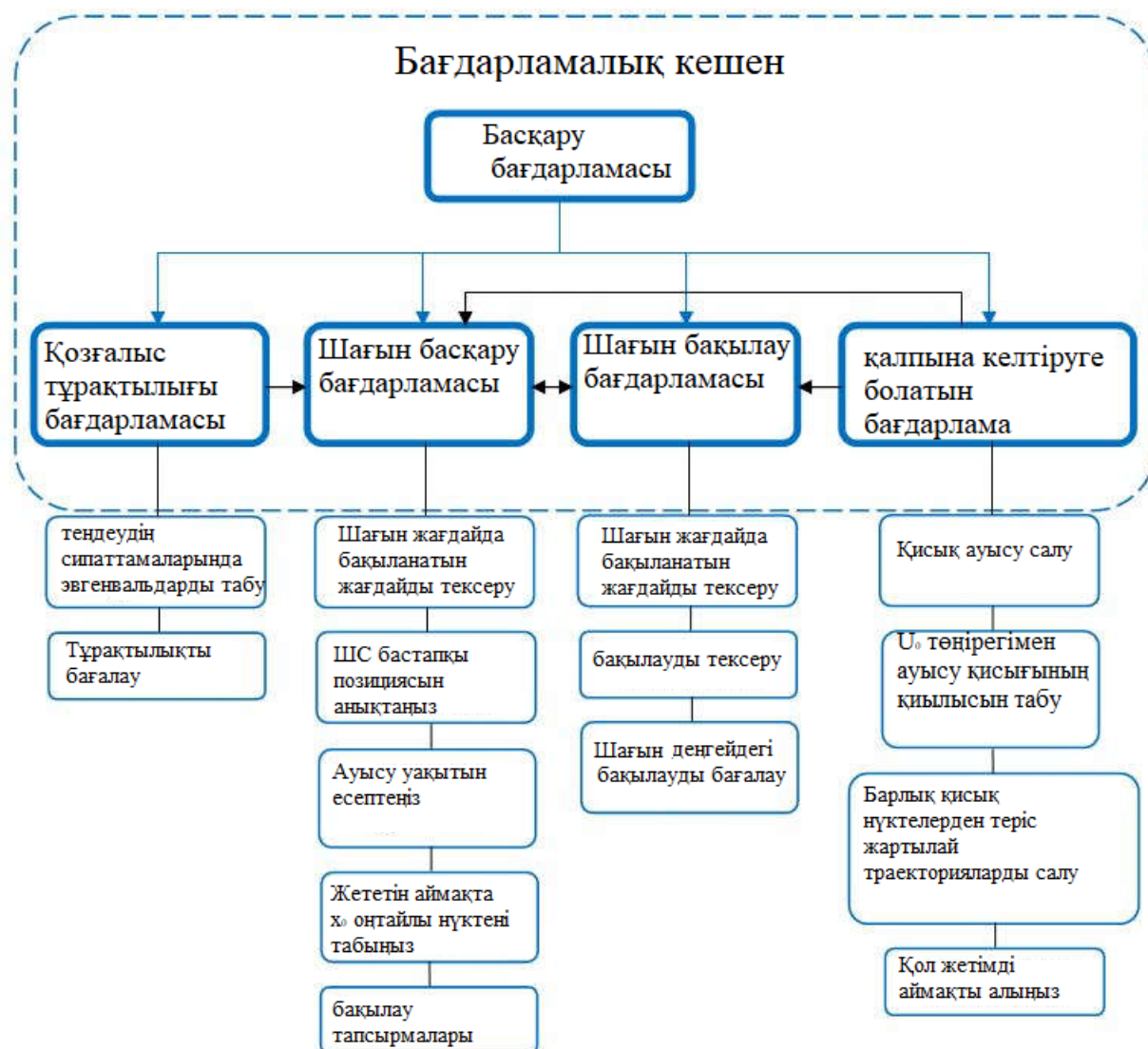
4.8 Сурет – Шағын ғарыш аппараттарын бақылаудың шағын бағдарламасы

4.9 суретте бағдарламалар арасындағы байланыс көрсетілген



4.9 Сурет – Бағдарламалар арасындағы байланыс

4.10 суретте 4 бағдарламадан тұратын бағдарламалық пакеттің жалпыланған құрылымы көрсетілген.



4.10 Сурет – Шағын құрамдағы ШҒА бағдарламалық кешенінің құрылымы

4.2 ШҒА басқаруды модельдеудің бағдарламалық кешенінің жұмыс істеу мысалы

Бұл бөлімде шағын ғарыш аппаратын оңтайлы басқаруды модельдеу нәтижелері, басқару коммутациясы моментінің және нысанаға тигізу моменттерінің есептері, басқару коммутациясының координаттары алынған.

$$\dot{x} = Ax(t) + v(t)u \quad (4.1)$$

мұнда, $A = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 2 & -1 \end{bmatrix}$, $u = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$, $-1 \leq v \leq 1$.

Сипаттама: Шағын ғарыш кемесі координаттары бар ғарыш кемесінен басқару нысанасына (шығу нүктесіне) ауыса бастайды. Шағын ғарыш аппараты $U(O)$ маңайынан шықпай-ақ қысқа мерзімде нысанаға жетуі үшін $U(O)$ (радиусы 4 км шеңбер) нүктесінен оңтайлы ШҒА нүктесін табыңыз.

t_1 - ШҒА $U(O)$ ($v=0$) маңындағы x_0 нүктесіне дейін БҒА (тұрақты қозғалысымен) қозғалыс уақыты.

t_2 - ШҒА нүктесінен ауысу қисығына дейінгі уақыт x_0

t_3 - ШҒА бұл бақылауды басқару сәтінен бастап нысанаға тигізу кезіндегі қозғалыс уақыты ($v = -1$).

T - БҒА басқару нысанасына дейінгі шағын ғарыш аппараттарының қозғалысының жалпы уақыты.

Кестеде модельдеу нәтижесі көрсетілген.

4.11 суретте мысалдың параметрлері көрсетілген.

```
введите параметры матрицы состояния:  
введите параметр a=-2  
введите параметр b=0  
введите параметр c=2  
введите параметр d=-1  
введите параметры матрицы управления:  
введите параметр u1=1  
введите параметр u2=1  
введите начальные координаты объекта z1=-2.3674  
введите начальные координаты объекта z2=-2.1462  
введите погрешность координат при переключении e=0.2  
введите погрешность координат достижения цели f=0.1  
введите отрезок времени исследования[0 2]  
введите радиус окружности r=4
```

4.11 Сурет – Үлгі турлы мәліметтерді енгізу терезесі

4.1 Кесте – Ауысу сәттерін табу нәтижесі

№	x_0 , км	t_1 , мин	t_2 , мин	t_3 , мин	T , мин
1	(-3,53; -1,34)	8,67	15,93	2,03	26,63
2	(-2,89; -1,82)	9,67	15,19	1,78	26,64
3	(-2,36; -2,14)	10,67	14,42	1,3	26,39
4	(-1,98; -2,34)	11,67	13,99	1,5	27,16
5	(-1,59; -2,46)	12,67	13,37	2,02	28,06
6	(-1,3; -2,5)	13,67	13,11	2,03	28,81
7	(-1,06; -2,49)	14,67	11,75	1,45	28,87
8	(-0,87; -2,43)	15,67	11,50	1,89	29,06
9	(-0,71; -2,35)	16,67	11,28	2,34	30,29
10	(-0,58; -2,25)	17,67	11,02	2,06	30,75
11	(-0,48; -2,13)	18,67	9,67	1,59	29,93
12	(-0,42; -2,06)	19,67	9,46	1,93	30,72
13	(-0,37; -1,97)	20,67	9,24	2,17	31,41

Кесте бойынша, үшінші нұсқа $x_0(-2.36; -2.14)$ БҒА-дан мақсатқа дейін ($T = 26.39$) ШҒА қозғалысының жиынтық ең аз уақытына сәйкес келеді.

Тұрақты қозғалыста ($v=0$) ШҒА 10.67 мин ішінде $U(O)$ мақсатының маңында x_0 оңтайлы нүктесіне қозғалады.

x_0 нүктесінде басқаруды қосамыз $v=1$ ШҒА 14.42 мин үшін $v=1$ басқарумен қозғалады.

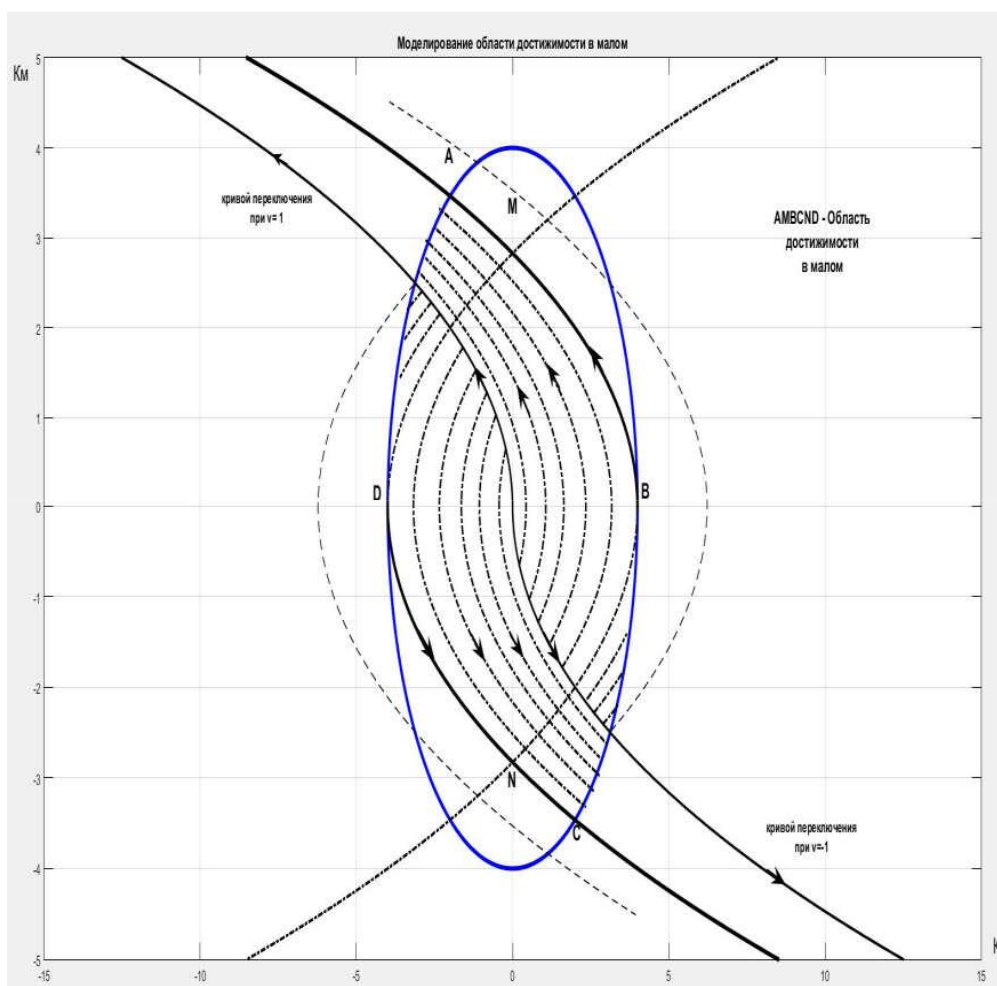
$T = 10.67+14.424=25.09$ мин басқаруды $v = 1$ $v = -1$ бастап ауыстырып қосамыз.

ШҒА 1.3 мин үшін $v = -1$ басқарумен қозғалады және мақсатқа жетеді.

БҒА - нан 26.39 мақсаттарға дейінгі ШҒА қозғалысының жиынтық уақыты.

Алайда 11 – нұсқа $(-0.48; -2.13)$ ШҒА қозғалтқышпен ($v=1$ $v=-1$) қозғалтқышпен нысанаға өтуінің минималды уақытына сәйкес келеді.

$(t_2 + t_3)$ мин = $9.67 + 1.59 = 11.26$ мин. 4.12-суретте осы мысалда қол жетімділік аймағын қалпына келтіру нәтижесі көрсетілген.



4.12 Сурет – Қол жеткізу аймағын «шағын» қалпына келтіру

Бұл тарауда диссертацияның алдыңғы 3 тарауынан ішкі динамикасы бар шағын ғарыш аппараттарының қозғалысының математикалық модельдерін қолдана отырып, ұшудың әртүрлі кезеңдерінде шағын ғарыш аппараттарының қозғалысын компьютерлік модельдеуге арналған бағдарламалар жиынтығының ішкі динамикасы бар шағын ғарыш аппараттарының қозғалысын модельдеуге арналған бағдарламалық жасақтама жасалды. Бағдарламалық кешенді бағдарламалау тілі - MATLAB.

ҚОРЫТЫНДЫ

1. Базалық ғарыш аппаратында орналасқан және жылжымалы түзету қозғалтқыштарының қасиеттеріне байланысты БҒА орналасқан жылжымалы орбиталық координаталар жүйесінде «шағын» жерсеріктікті басқару мен басқарудың жеңілдетілген емес сызықтық емес моделі құрылды. Модельдің дұрыстығы мен сенімділігі классикалық модельдердің қасиеттерімен және әртүрлі координаттар жүйелерінде координаттарды қайта есептеу үшін сенімді формулалармен расталады.

2. «Шағын» жерсеріктің қол жетімді аймағын есептеу үшін кері уақыт әдісі жетілдірілді. Модернизациялау максималды бақылау уақытын белгілеуге және қосалқы жер серігін белгілеуге негізделген. Бұл қосалқы спутниктің басқарылатын аймақтарын бөлуге мүмкіндік берді және мақсатқа жету уақытын классикалық басқару элементтерімен салыстырғанда (бастапқы нүктеге байланысты) 1,3-тен 2,7 есеге немесе одан да көпке қысқартады.

3. 1, 2 тармақшалар мен мұздатылған коэффициенттер әдісі негізінде қосалқы серіктің қозғалысының стационарлық емес моделінің тұрақтылығын болжау процедурасы құрылды, бұл қол жетімді аймақтағы жерсеріктің тұру уақытын сандық есептеуге және басқарудың ауысу сәтін табуға мүмкіндік берді.

4. Қосалқы жерсеріктің «бастапқы нүктелерін» санау әдісін қолдана отырып, мақсатқа жету уақытын азайту мәселесі сандық түрде шешілді. «Шағын» шағын спутникті бақылау және басқару модельдері құрылды және олардың арасында қосалқы байланыс орнатылды, бұл қосалқы жер серігінің қозғалысына бақылау жасауға мүмкіндік береді. Қосалқы жер серігін траекторияның белгілі бір нүктесінде басқару моделі ұсынылған, бұл басқару сәтсіздігін болдырмауға мүмкіндік береді. Сызықтық бақылау мысалын қолдана отырып, бастапқы жағдайдағы «шағын» қосалқы жердегі басқару мүмкіндігі мәселесін шешу ұсынылды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. R. Bellman, I. Glicksberg, O. Gross. On the bang-bang control problem, Quarterly of Appl. Math. 14. (1956). (или Р. Беллман, И. Гликсберг, О. Гросс, Некоторые вопросы математической теории процессов управления, М., ИЛ, 1962).
2. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971. 400 с.
3. Ключников В. Ю. Построение кластеров малых космических аппаратов // Изв. Вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 6. С. 423-428.
4. Ключников В. Ю. Пути повышения целевой эффективности наноспутников информационного обеспечения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 5. С. 414-422.
5. Семенов А.В., Никифоров А.В., Тимонин Д.Г., Ануфрейчик К.В., Чулков И.В. Организация хранения данных в системе управления, сбора и передачи информации проекта «РЕЗОНАНС». / Труды научно–технического семинара «Научные эксперименты на малых космических аппаратах» под ред. Р. Р. Назирова, И. В. Чулкова, В. Н. Юрова. – М.: ИКИ РАН, 2013. С. 90 – 96.
6. Назиров Р. Р. Влияние ошибок модели движения на точность определения положения ИСЗ вдоль его орбиты / Препринт. М.: Изд. ИКИ АН СССР, 1983. 215 с.
7. Мальцев Г.Н., Кунгурцев В.В., Козинев И.А. Дистанционное зондирование Земли на основе кластера малых космических аппаратов многоспектрального наблюдения // Известия ВУЗов. Приборостроение. Тематический выпуск «Малые космические аппараты». Т.52. 2009. № 4. С.16.
8. Краснощеков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. – М.: Изд-во ФАЗИС и ВЦ РАН. 2000. – 412 с.
9. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Физматгиз, 1961.
10. Н.Н. Красовский. Оптимальное управление в обыкновенных динамических системах // Успехи математических наук. 1965. Т. XX. Вып 3 (123). С. 153 – 174.
11. Athans M., Falb P. L. Optimal Control. – NY.: McGraw Book Company/ 1965 (Русск. перев.: Атанс М., Фалб П. Оптимальное управление. – М.: Машиностроение. 1968. – 764 с.).
12. Фельдбаум А. А. Оптимальные процессы в системах автоматического регулирования // Автом. и телемех. 1953. № 6
13. Брайсон А., Хо Ю-ши. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972. 544 с.
14. Корсун О.Н., Николаев С.В. Применение моделирования в практике испытаний летательных аппаратов // Cloud of Science. 2018. Т.5. № 2. С. 286-299.

15. Корсун О.Н., Стуловский А.В., Буковский Г.А. Формирование оптимального управления самолетом на закритических углах атаки на основе популяционного алгоритма оптимизации // Вестник компьютерных и информационных технологий № 6, 2018 – С. 27 - 36.

16. Elenev D., Zabolotnov Y. Modeling and analysis of motion of a spacecraft with a tether aerodynamic stabilizer // CEUR Workshop Proceedings. — 2017. — Vol. 1904. — P. 85-88

17. Ключников В. Ю. Основные черты идеологии малоразмерных космических аппаратов: итоги и перспективы / 2-й Симпозиум «Современные проблемы создания российских малых космических аппаратов и их использования для решения социально-экономических и научных задач». Калуга, 18-19 сентября 2018 г [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://volgaspace.ru>.

18. Малые ИСЗ стран мира. Обзор. – М.: НТЦ «Компас», 1996.

19. Спутниковые системы связи и вещания: Ежегодник. Т. 1–2. – М., 1999/2000 г.

20. World Satellite Communications and Broadcasting Markets Survey (Prospects to 2007). Euroconsult, 1998.

21. <http://www.federalspace.ru> – официальный сайт Федерального космического агентства РФ («Роскосмос»).

22. Севастьянов Н.Н., Бранец В.Н., Панченко В.А., Казинский Н.В., Кондрации Т.В., Негодяцев С.С. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли. Труды МФТИ №3, том 1. -2009

23. Белецкий В.В. Движение искусственного спутника Земли относительно центра масс. Серия «Механика космического полета». – М.: Наука, 1965. – 416 с.

24. Бажинов И.К., Гаврилов В.П., Ястребов В.Д. и др. (авторский коллектив – 33 автора) Навигационное обеспечение полета орбитального комплекса «Салют-6» – «Союз» – «Прогресс». – М.: Наука, 1985. – 375 с.

25. Control systems, robotics and automation - Vol. II - PID Control - Araki M

26. Сбытова Е. С. Динамика микромеханического гироскопа с резонатором виде упругих пластин // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва: Национальный исследовательский университет 'Московский Энергетический Институт', 2014.

27. Банах Л. Я., Никифоров А. Н. Воздействие аэрогидродинамических сил на быстровращающиеся роторные системы // Изв. РАН. МТТ. 2006. №5. С. 42-51.

28. Барасав М. А., Ивойлов М. А., Матвеев В. А. Оптимизация балансировки волнового твердотельного гироскопа с помощью нейронной сети Хопфилда // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2012. №7. С. 289-298.

29. Apostolyuk V. Theory and Design of Micromechanical Vibratory Gyroscopes // MEMS/NEMS/ Handbook (Ed: Cornelius T. Leondes). Springer. 2006. Vol. 1. Chapter 6. P. 173-195.

30. Ву, К. М. Управляемость «в малом» в задаче динамики микромеханического гироскопа [Текст] / К. М. Ву // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ). - 2016. - № 4 (выпуск 58). – С. 123-128.

31. Ву, К. М. Численный метод в управляемости «в малом» гироскопических систем [Текст] / К. М. Ву // Современные технологии в науке и образова-

нии – СТНО-2017: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 9 т. Т.2. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2017; Рязань. – С. 153-158.

32. Ву, К.М. Управляемость «в малом» в задаче динамики микромеханического гироскопа [Текст] / К. М. Ву // 7-я международная научно-техническая конференция «К.Э. Циолковский - 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: Тез. докл. / Рязан. гос. радиотехн. университет. Рязань, 2017. – С. 190-195.

33. Ву, К.М. Численный метод в задаче микромеханического гироскопа [Текст] / К. М. Ву // Труды 60-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 20–26 ноября 2017 г. Прикладная математика и информатика. – М.: МФТИ, 2017. – С. 151-153.

34. Ву, К.М. Численный метод в задаче управления гиростабилизаторами в медицине [Текст] / К. М. Ву

35. Ву, К.М. Управление одноосным гиростабилизатором в малом К. М. Ву // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Том 1. Рязанский государственный радиотехнический университет. 2018. – С. 264-266.

36. Коваленко А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. М., «Машиностроение», 1975, 248с.

37. Поляков К. Ю. Теория автоматического управления. Санкт-Петербург, 2008.

38. Лазарева Т. Я., Мартемьянов Ю. Ф. Основы теории автоматического управления. Тамбов: ТГТУ, 2004.

39. Цзян Суэ Сень. Техническая кибернетика. – М.: ИЛ, 1956.

40. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. – М.: Наука, 1965. – 540 с.

41. Белецкий В.В. Движение искусственного спутника Земли относительно центра масс. Серия «Механика космического полета». – М.: Наука, 1965.– 416 с.

42. Бажинов И.К., Гаврилов В.П., Ястребов В.Д. и др. (авторский коллектив – 33 автора) Навигационное обеспечение полета орбитального комплекса «Салют-6» – «Союз» – «Прогресс». – М.: Наука, 1985. – 375 с.

43. Аким Э.Л., Энеев Т.М. Определение параметров движения космического летательного аппарата по данным траекторных измерений // Космич. исследов. 1963. Т.1. Вып. 1. С. 5 – 50.
44. Improved Determination of G Using Two Methods // Physical Review Letters
45. Движение искусственных спутников Земли. Итоги науки и техники: серия «Исследование космического пространства». – М.: ВИНТИ. 1980. – 160 с.
46. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Ходченко В.П. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов // Вопросы электромеханики. 2010. Т. 114. С. 15 – 26. 132
47. Ксендзук А.В., Фатеев В.Ф., Попов С.А. Метод обработки сигналов в космических многопозиционных радиолокационных системах с синтезом апертуры антенны. Известия ВУЗов. Приборостроение. Тематический выпуск «Малые космические аппараты». Т. 52 . 2009. № 4.С. 28.
48. Фатеев В.Ф., Каргу Д.Л. Перспективная сеть передачи данных для локальной группировки малых космических аппаратов. Известия ВУЗов. Приборостроение. Тематический выпуск «Малые космические аппараты». Т. 52 . 2009. № 4.С. 46
49. Фатеев В.Ф., Лагуткин В.Н., Лукьянов А.П., Подкорытов Е.Н., Слынько Ю.В., Старостенко А.М. Моделирование входной информации оптической системы малых космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, №4 С. 12 – 14.
50. L. Marcus, E. B. Lee. On the existence of optimal controls, Journ. Basic. Engr. Trans. ASME 83, D. (1961).
51. J. Flugge-Lotz, H. Marbach, The optimal control systems for different performance criteria, Joint Automat. Control. Conf., New York, № 4 (1962).
52. A.K. Chaudhuri, Ajit Jumar Choudhury , On the optimum surtching function of a certain class of third-order contactor servomechanism, J. Electron, and Control. 16, № 4 (1964).
53. А. А. Фельдбаум, Основы теории оптимальных автоматических систем. – М.: Физматгиз, 1963.
54. www.ipu.ru/node/12137 – сайт ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН.
55. Методы робастного, нейро-нечёткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова, изд. 2-ое, стер., М., Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2002, 744 с.
56. J.P. LaSalle, Time optimal control systems, Proc. of National Acad. Sci. 45.(1959).
57. Гамкрелидзе Р. В. Теория оптимальных по быстрдействию процессов в линейных системах // Изв. АН, сер. матем. 22, вып. 4 (1958).
58. Сахно И.В., Ткачев Е.А., Гаврилов Д.А., Успенский К.К. Малый космический аппарат обзора морской поверхности с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем. Известия ВУЗов. Приборостроение. Тематический выпуск «Малые космические аппараты». Т. 52 . 2009. № 4.С. 34

59. Каргу Д.Л., Кремез Г.В., Минаков Е.П., Николаев П.В., Федоров С.А. Малогабаритный бортовой комплекс управления космическим аппаратом //Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, №4 С. 66 – 70.

60. Бурмистров В. В., Зоткин М. Ю., Макаров М. М., Миронов В. И. Методика аналитического оценивания точности наведения космического аппарата робота при итерационном терминальном управлении в условиях действия случайных возмущений / Материалы докладов на IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатация вооружения, военной и специальной техники» 13-14 декабря 2018 г. – СПб.: ВКА им А.Ф.Можайского, 2018. С. 81 – 90.

61. Wilson J. R. Satellite hopes ride on Orbital Express // Aerospace America. 2007. С. 30 – 35.

62. Мамон П. А., Кульвиц А. В. Теория полета КА: курс лекций. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2007. 160 с.

63. Миронова К. В., Корячко В. П. Достижимость цели в малом для плоского управляемости движения космического аппарата // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 51. С. 89 -

64. Барбашин Е.А., Табуева В.А. Динамические системы с цилиндрическим фазовым пространством. – М.: Наука, 1969. – 300 с., ил.

65. Ешуков Л.Н., Карасев И.П. О достижимости в малом систем оптимального регулирования второго порядка / Труды РРТИ. – Рязань: РРТИ. 1968. Вып. 8. С. 20 – 29.

66. Карасев И.П. О существовании области достижимости //Дифференц. уравн. 1967. Т. 3. № 12. С. 323 – 330.

67. Митрохин Ю.С. Об управляемости в малом систем нелинейных дифференциальных уравнений оптимального регулирования //Дифференц. уравн. 1974. Т. XX. № 8. С. 1406 – 1411.

68. Миронов В.В., Митрохин Ю.С. Новый подход к исследованию устойчивости и управляемости динамических систем // Труды международной конференции «Алгебраические и аналитические методы в теории дифференциальных уравнений». – Орел, 1996. – С. 127–129.

69. Миронов В.В., Митрохин Ю.С. Устойчивость систем автоматического управления с переменной структурой // Вестник РГРТА. – 1999. – Вып. 6. – С. 37–40.

70. Миронов В.В., Митрохин Ю.С. Задача об управляемости систем оптимального регулирования и методы ее решения // Вестник РГРТА. – 2000. – Вып. 7. – С. 57–64.

71. Markus L. Controllability of Nonlinear Processing // J. Sos. Industr. and Appl. Math. 1965. A3. № 1. P. 78 – 90.

72. Davison E.J, Silverman L.M., Varaiya P. Controllability of a Class of Nonlinear Time-variable systems // JEEE Trans. Automat. Control. 1967. V. 12. № 6. P. 791 – 792.

73. Бейко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. К.: Вища школа, 1983. – 453 с.
74. Бордовицына Т.В. Современные численные методы в задачах небесной механики. – М.: Наука, 1984. – 137 с.
75. Иванов Н.М., Лысенко Л.Н., Мартынов А.И. Методы теории систем в задачах управления космическим аппаратом. М.: Машиностроение, 1981. – 544 с.
76. Гродзовский Г.Л., Иванов Ю.Л., Токарев В.В. Механика космического полета (Проблемы оптимизации). М.: Наука, 1975. – 418с.
77. Громов Ю.Ю., Земской Н.А., Лагутин А.В., Иванова О.Г., Тютюнник В.М. Специальные разделы теории управления. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2007. – 108 с.
78. Минюк С.А. К теории полной управляемости линейных нестационарных систем // Дифференциальные уравнения. 1990. Т. 26. № 3. С. 414 – 420.
79. Терехин М.Т., Землякова Л.С. Об управляемости системы обыкновенных дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения (Качественная теория): Межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГУ, 1995. С. 141 – 150.
80. Лётов А.М. Динамика полета и управление. М.: Наука, 1969. – 360 с.
81. Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М.: Наука, 1974. – 598 с.
82. Моисеев А.А. Оптимальное управление при дискретных управляющих воздействиях // Автоматика и телемеханика. 1991. №9. С. 123 – 132.
83. Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем. – М.: Наука, 1971. – 424 с.
84. Катасонов Н.М. Способы электропитания и управления электроракетными стационарными плазменными двигателями / Н.М. Катасонов, В.Н. Галайко // Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 1997. – С. 139 – 145.
85. Small SPT unit development and tests / В. Arkhipov, V. Kim, V. Kozlov [etc.] // 28th International Electric Propulsion Conference Toulouse, France. 17 – 21 March 2003. – P. 139 – 145.
86. Ходненко В.П., Хромов А.В. Корректирующие двигательные установки для малых космических аппаратов // Вопросы электромеханики. 2009. Т. 109. С. 27–32.
87. Разработка стационарного плазменного двигателя (СПД) и его испытания на ИСЗ «Метеор» / Л.А. Арцимович, И.М. Андронов, А.И. Морозов [и др.] // Космич. исследов. – 1974. – Т. XII. – Вып. 3. – С. 451 – 468.
88. Глибицкий М.М. Системы питания и управления электрическими ракетными двигателями. – М.: Машиностроение, 1981. – 136 с.
89. Миронов В. В., Северцев Н. А. Методы анализа устойчивости систем и управляемости движением // ВЦ РАН. – М.: Изд-во РУДН, 2002. 165с.

90. Миронова К. В., Корячко В. П. Проектирование вариантов управления наноспутником на основе траекторных измерений // Информатизация образования и науки. 2015. № 26. С. 75-87.

91. Гудзенко А. В., Успенский В. Б. Анализ наблюдаемости в задаче управления ориентацией космического летательного аппарата с присоединенными упругими элементами // Материалы III научно-практической конференции НТУ «ХПИ». Харьков, 2009.

92. Смирнов Н. В. Задачи управления и наблюдения в линейных системах. Критерий полной управляемости и наблюдаемости [Электронный ресурс]. Режим Доступа: <https://docplayer.ru/43423197-30-zadachi-upravleniya-i-nablyudeniya-v-lineynyh-sistemah-kriterii-polnoyupravlyaemosti-i-nablyudaemosti-smirnov-n-v.html>.

93. Норден А. П. Дифференциальная геометрия. М.: Учпедгиз, 1948. 215 с.

94. Немыцкий В. В., Степанов В. В. Качественная теория дифференциальных управлений. М.: Гостехиздат, 1949. 545 с.

95. Чураков Е.П. Операторные методы в задачах управления, связи и контроля: Учебное пособие. – Рязань: РРТИ, 1984. – 76 с.

96. Ву, К.М. Проблема наблюдаемости «в малом» для неавтономных линейных систем и ее приложение к анализу движения малого космического аппарата [Текст] / К. М. Ву // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ). - 2019. - № 1 (выпуск 67). – С. 73-80.

97. Ву, К. М. Задача оптимального управления «в малом» и ее реализация для малых космических систем [Текст] / К. М. Ву, И. П. Карасев // Информатизация образования и науки. - 2019. - № 2 (42). – С. 56-64.

98. Ву, К.М. Принцип двойственности «в малом» для линейных систем и его приложение к анализу движения субспутника в окрестности базового космического аппарата [Текст] / К. М. Ву, В. В. Миронов // Информатизация образования и науки. - 2019. - № 3 (43).

99. Ву, К.М. Изучение области достижимости для систем оптимального регулирования третьего порядка [Текст] / К. М. Ву., В. В. Миронов // Современные технологии в науке и образовании. – СТНО-2019: сб. тр. II междунар. науч.-техн. Форума: в 10 т. Т.5. – Рязань: Рязан. гос. радио-техн. ун-т, 2019. – С. 136-139.

100. Ву, К.М. Численный метод оценки области достижимости для линейных неавтономных систем [Текст] / К. М. Ву // Современные технологии в науке и образовании. – СТНО-2019: сб. тр. II междунар. науч.-техн. Форума: в 10 т. Т.5. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2019. – С. 111-115.

101. Ву, К.М. Наблюдаемость «в малом» малых космических аппаратов для радиотехнических систем [Текст] / К. М. Ву., В.В. Миронов // Современные технологии в науке и образовании. – СТНО-2019: сб. тр. II междунар. науч.-техн. Форума: в 10 т. Т.5. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2019. – С. 133-135.

102. Ву, К.М. Нахождение фундаментальной матрицы в линейной системе управления [Текст] / К. М. Ву // Межвуз. сб. научн. трудов – «Информационные технологии». – Рязань, 2019. – С. 53-55.

103. Ву, К.М. Управляемость «в малом» для линейных неавтономных систем второго порядка [Текст] / К. М. Ву // Межвуз. сб. научн. трудов – «Информационные технологии». – Рязань, 2019. – С. 55-57.

104. Ву, К.М. Связь предначальных и начальных условиях в задачах управления [Текст] / К. М. Ву // Межвуз. сб. научн. трудов – «Информационные технологии». – Рязань, 2019. – С. 57-60.

105. Ву, К.М., Миронов В.В. Программный комплекс по управлению и наблюдению «в малом» малых космических аппаратов для плоского автономного случая / К. М. Ву, В.В. Миронов – М.: Роспатент.- Свидетельство № 20196153212 от 12.04.2019.

106. Ву, К.М., Миронов В.В. Проблема управляемости и наблюдаемости «в малом» неавтономных линейных систем и ее приложение к анализу движения субспутника в окрестности базового космического аппарата. – М.: «Book Jet», 2019. – 150 с.