

## **ОРАЗАЛЫ ЕРКИН ЕРМЕКОВИЧТЫҢ**

8D07105 – «Ғарыштық техника және технологиялар» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алуға ұсынылған диссертациясының

### **АҢДАТПАСЫ**

**Ғарыш аппаратының бағдарлануын басқарудың сызықтық формадағы математикалық моделі негізінде сызықтық емес жүйесінің орнықтылығын талдау әдісін әзірлеу.**

#### **Зерттеудің өзектілігі**

Спутниктің бағдарлауын басқару жүйелері ғарыш аппаратының негізгі борттық жүйелерінің қатарына жатады, өйткені олар аппарат корпусының қажетті кеңістіктік қалпын, пайдалы жүктемені нысанаға бағыттауды, антенналар мен күн батареяларын бағдарлауды, сондай-ақ ұшудың мақсатты режимдерін орындауды қамтамасыз етеді. Кіші ғарыш аппараттары мен наноспутниктер үшін бұл мәселе ерекше маңызға ие, себебі энергетикалық, массалық-габариттік және есептеу ресурстарының шектеулі болуы ықшам, сенімді және техникалық тұрғыдан іске асырылатын басқару алгоритмдерін қолдануды талап етеді.

Белсенді үш осьтік тұрақтандырудың кең таралған нұсқаларының бірі маховикті атқарушы органдары бар спутниктің бағдарлауын басқару жүйелері (СББЖ) болып табылады. Мұндай жүйелерде басқарушы моменттер аппарат осьтері бойымен орнатылған маховиктердің бұрыштық жылдамдықтарын өзгерту арқылы қалыптастырылады. Бұл техникалық шешім жұмыс денесін жұмсауды қажет етпейді және ұзақ уақыт бойы дәл бағдарлауды басқаруды іске асыруға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар «спутник–маховиктер» жүйесінің динамикасы елеулі түрде сызықтық емес сипатқа ие. Ол кватерниондық кинематикамен, кинетикалық моменттің қайта бөлінуімен және қозғалыстың бастапқы шарттарға тәуелділігімен байланысты. Спутниктің бағдарлауын басқару жүйелерін талдау және синтездеу бойынша қолданыстағы зерттеулерде жергілікті сызықтандырылған модельдер, Ляпунов әдістері, кері байланыс арқылы сызықтандыру, backstepping, sliding mode control, SDRE/SDARE,  $H_2/H_\infty$  тәсілдері және басқа да әдістер қолданылады. Алайда мұндай тәсілдердің едәуір бөлігі берілген жұмыс режимінің маңайындағы жергілікті орнықтылықты талдаумен шектеледі немесе арнайы сызықтық емес, робасты және оңтайландыруға негізделген басқару заңдарын құруды талап етеді.

Осыған байланысты бастапқы сызықтық емес СББЖ моделімен байланысты сақтай отырып, оның автоматтық басқарудың сызықтық теориясының аппаратын қолдануға мүмкіндік беретін орнықтылықты талдау әдісін әзірлеу өзекті болып табылады. Мұндай тәсіл спутниктің бастапқы

кинетикалық моментін ескере отырып, асимптотикалық орнықтылық шарттарын және PD-басқару заңының рұқсат етілетін параметрлерін аналитикалық түрде анықтауға мүмкіндік береді.

### **Зерттеудің мақсаты**

Зерттеудің мақсаты — маховикті атқарушы органдары бар спутниктің бағдарлауын басқару жүйесінің орнықтылығын талдау әдісін әзірлеу және негіздеу. Бұл әдіс бастапқы сызықтық емес динамиканы айнымалы коэффициенттері бар сызықтық формада көрсетуге, кинетикалық моменттің асимптотикалық қасиеттерін зерттеуге және PD-басқару заңы параметрлерінің кеңістігінде орнықтылық шарттарын анықтауға негізделеді.

### **Зерттеудің міндеттері**

Қойылған мақсатқа жету үшін диссертациялық жұмыста келесі міндеттер шешіледі:

1. Айналмалы динамика теңдеулері, бағдарлаудың кватерниондық сипаттамасы және PD-басқару заңы негізінде маховикті атқарушы органдары бар СББЖ-ның математикалық моделін құру.
2. Күй айнымалыларын арнайы таңдау арқылы СББЖ динамикасының бастапқы сызықтық емес дифференциалдық теңдеулер жүйесін айнымалы коэффициенттері бар сызықтық формада көрсету мүмкіндігін негіздеу.
3. «Спутник–маховиктер» жүйесінің кинетикалық моментінің асимптотикалық қасиеттері зерттеліп, оның шекті сипаттамалары мен сызықтық форманың коэффициенттері арасындағы байланысты анықтау.
4. Тұрақты коэффициенттері бар шекті сызықтық жүйе теңдеулерін қалыптастырылып, оның басқару заңының параметрлері мен спутниктің бастапқы кинетикалық моментіне тәуелді сипаттамалық полиномын алу.
5. Басқару жүйелерінің коэффициенттік орнықтылық критерийлері негізінде PD-басқару заңы параметрлерінің кеңістігінде СББЖ-ның асимптотикалық орнықтылық шарттарын анықтау.
6. Алынған орнықтылық шарттарына автоматтық басқарудың сызықтық теориясының классикалық критерийлерін қолдану арқылы тәуелсіз тексеру жүргізу.
7. Әртүрлі бастапқы шарттар үшін бастапқы сызықтық емес жүйе мен алынған сызықтық форманың шешімдеріне сандық салыстыру жүргізілді.
8. Маховикті атқарушы органдары бар СББЖ-ның макеттік үлгісінде таңдалған басқару құрылымының жұмыс қабілеттілігіне эксперименттік тексеру жүргізу.

### **Зерттеу әдістері**

Қойылған міндеттерді шешу үшін қатты дене қозғалысы теориясының математикалық аппараты, автоматтық басқару теориясының әдістері, бағдарлаудың кватерниондық сипаттамасы, сызықтық емес дифференциалдық теңдеулерді айнымалы коэффициенттері бар сызықтық формаға түрлендіру

әдістері, коэффициенттік орнықтылық критерийлері, Соколов–Липатов критерийі, Гурвиц критерийі, Михайлов критерийі, компьютерлік модельдеу әдістері, сандық есептеулер және аппараттық бөлігі контурда болатын жартылай табиғи эксперименттік сынақтар қолданылды.

### **Жүргізілген зерттеулердің ғылыми жаңалығы**

Диссертациялық жұмыстың ғылыми жаңалығы маховикті атқарушы органдары бар спутниктің бағдарлауын басқарудың сызықтық емес жүйесінің орнықтылығын оның динамикасын айнымалы коэффициенттері бар сызықтық формада көрсету негізінде талдау әдісін әзірлеумен байланысты.

Жаңа ғылыми нәтижелерге мыналар жатады:

1. Қозғалыстың бастапқы теңдеулерімен байланысты сақтай отырып, маховиктері бар СББЖ динамикасын сипаттайтын сызықтық емес дифференциалдық теңдеулер жүйесін айнымалы коэффициенттері бар сызықтық формада көрсету әзірленді.
2. «Спутник–маховиктер» жүйесінің кинетикалық моментінің асимптотикалық қасиеттері мен шекті сызықтық жүйенің сипаттамалық полином коэффициенттері арасындағы байланыс орнатылды.
3. Шекті сызықтық жүйенің орнықтылығы және бастапқы сызықтық форманың айнымалы коэффициенттерінің қасиеттері арқылы өрнектелетін СББЖ-ның асимптотикалық орнықтылық шарттары алынды.
4. Спутниктің бастапқы кинетикалық моментінің шекті жүйенің сипаттамалық полином коэффициенттеріне және PD-басқару заңы параметрлерінің рұқсат етілетін аймағына әсері көрсетілді.
5. Шекті жүйенің СББЖ орнықтылығы коэффициенттік, алгебралық және жиіліктік талдау әдістерін бірге қолдану арқылы тексерілді.
6. Таңдалған басқару құрылымының жұмыс қабілеттілігі маховикті атқарушы органдары бар СББЖ-ның макеттік үлгісінде эксперименттік түрде тексерілді.

### **Диссертациялық жұмыстың ғылыми және практикалық маңыздылығы**

Жұмыстың ғылыми маңыздылығы спутниктің бағдарлауын басқарудың сызықтық емес жүйелерінің орнықтылығын талдау әдісін дамытуда көрінеді. Ұсынылған әдіс толық динамиканы жергілікті жуықтаумен алмастырмай, бастапқы сызықтық емес модельден айнымалы коэффициенттері бар сызықтық формаға өтуге мүмкіндік береді. Бұл тәсіл маховикті атқарушы органдары бар СББЖ-ны талдау кезінде классикалық орнықтылық критерийлерін қолдану мүмкіндігін кеңейтеді.

Диссертациялық жұмыстың практикалық маңыздылығы алынған әдісті маховикті атқарушы органдары бар кіші ғарыш аппараттарының бағдарлауын басқару жүйелерін жобалау кезінде қолдану мүмкіндігімен анықталады. Әзірленген тәсіл СББЖ-ны математикалық модельдеуде, PD-басқару заңы параметрлерін алдын ала таңдауда, орнықтылық аймақтарын құруда, бастапқы кинетикалық моменттің әсерін талдауда, сондай-ақ кіші спутниктердің

бағдарлау алгоритмдерін сынауға арналған зертханалық стендтер мен макеттік үлгілерді жасау кезінде пайдаланылуы мүмкін.

### **Қорғауға шығарылатын негізгі ережелер:**

1. Маховикті атқарушы органдары бар СББЖ динамикасының бастапқы сызықтық емес дифференциалдық теңдеулер жүйесін айнымалы коэффициенттері бар сызықтық формада көрсету әдісі.
2. Бастапқы сызықтық емес модельді зерттеуді сызықтық түрдегі модельдің орнықтылығын талдауға келтіретін СББЖ-ның асимптотикалық орнықтылығын зерттеу әдісі.
3. Спутниктің бастапқы кинетикалық моментін ескере отырып, PD-басқару заңы параметрлері кеңістігінде СББЖ-ның орнықтылық аймағын құрудың коэффициенттік әдісі.
4. Ұсынылған тәсілдің жұмыс қабілеттілігін сандық және эксперименттік түрде растау нәтижелері.

### **Ізденушінің жеке үлесі**

Автор спутниктердің бағдарын басқарудың заманауи әдістеріне және басқару жүйелерінің орнықтылығын зерттеу әдістеріне талдау жүргізді, «спутник–маховиктер» жүйесі динамикасының математикалық моделін құрды, СББЖ динамикасын сипаттайтын бастапқы сызықтық емес теңдеулер жүйесін айнымалы коэффициенттері бар сызықтық түрге түрлендірді, спутниктің кинетикалық моментінің асимптотикалық қасиеттерін зерттеді, шектік сызықтық жүйенің орнықтылық шарттарын алды, сандық есептеулер жүргізді және басқару заңы параметрлері кеңістігінде орнықтылық аймақтарын құрды. Сонымен қатар автор таңдалған басқару құрылымының жұмысқа қабілеттілігін СББЖ макеттік үлгісінде эксперименттік түрде тексерді.

### **Диссертация нәтижелерін апробациялау**

Диссертациялық жұмыстың негізгі ережелері мен нәтижелері ғарыштық техника, ғарыш аппараттарының қозғалыс динамикасы мен басқаруы, автоматтық басқару теориясы және кіші спутниктердің бағдарлау жүйелерін әзірлеу мәселелеріне арналған ғылыми семинарларда, кафедра отырыстарында және ғылыми-тәжірибелік іс-шараларда баяндалып, талқыланды.

### **Ғылыми жарияланымдар**

Диссертациялық зерттеу нәтижелері бойынша жұмыстың негізгі ережелері мен нәтижелерін көрсететін 13 ғылыми жұмыс жарияланды, оның ішінде:

- Scopus және Web of Science дерекқорларына енгізілген журналдарда 3 Q1 мақала;
- Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған басылымдарда 4 мақала;
- Springer басылымында 2 жарияланым;
- халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференциялар материалдарында 4 мақала.

### **Диссертацияның көлемі мен құрылымы**

Диссертациялық жұмыс кіріспеден, төрт тараудан, қорытындыдан, пайдаланылған дереккөздер тізімінен және қосымшалардан тұрады.

Кіріспеде зерттеу тақырыбының өзектілігі негізделіп, жұмыстың мақсаты мен міндеттері тұжырымдалған, зерттеу объектісі мен пәні анықталған, ғылыми жаңалығы мен практикалық маңыздылығы ашылған, қорғауға шығарылатын негізгі ережелер, сондай-ақ апробация және жарияланымдар туралы мәліметтер келтірілген.

Бірінші тарауда спутниктердің бағдарын басқару жүйелерінің орнықтылығын талдау әдістеріне шолу жасалды. Маховикті атқарушы органдары бар спутниктің басқару объектісі ретіндегі ерекшеліктері қарастырылды, сондай-ақ локалды сызықтандырылған модельдердің шектеулері көрсетіліп, бастапқы сызықтық емес динамикамен байланысты сақтайтын әдісті әзірлеу қажеттілігі негізделді және зерттеу міндеттері тұжырымдалды.

Екінші тарауда маховикті атқарушы органдары бар СББЖ динамикасының математикалық моделі құрылды, бастапқы сызықтық емес жүйенің сызықтық түрі алынды және кинетикалық моменттің асимптотикалық қасиеттері негізінде оның орнықтылығының қажетті және жеткілікті шарттары анықталды. Бастапқы кинетикалық моменттің сызықтық емес СББЖ орнықтылығына әсері қарастырылып, СББЖ-ның глобалды асимптотикалық орнықтылығының жеткілікті шарттары тұжырымдалды.

Үшінші тарауда маховиктері бар спутниктің бағдарын басқару жүйесінің орнықтылық аймақтары PD-басқару заңы параметрлері кеңістігінде құрылды. СББЖ динамикасын сипаттайтын сызықтық емес және сызықтық теңдеулер жүйелерінің сандық шешімдері салыстырылды, Соколов–Липатов әдісі, Гурвиц және Михайлов критерийлері бойынша орнықтылық талдауы жүргізілді, сондай-ақ алынған нәтижелердің салыстырмалы талдауы орындалды.

Төртінші тарауда СББЖ макетінің бұрыштық бағдарлау және тұрақтандыру жүйесін сынау нәтижелері берілген. Макеттік үлгі және өлшеу-басқару жүйесі, эксперименттік деректерді топтастыру әдістемесі, рысканье, крен және тангаж арналары бойынша сынақтар, сыртқы ұйытқытушы әсер кезіндегі сынақтар және кешенді сынақтар қарастырылған.

Қорытындыда диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері мен қорытындылары көрсетілген.