

ӘДЕН ӘЛШЕР ЕРБОЛУЛЫНЫҢ

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

АҢДАТПАСЫ

Ғарыш аппаратының бағдарын басқарудың сызықтық формадағы математикалық моделі негізінде сызықтық емес жүйесінің параметрлерін синтездеу әдісін әзірлеу

Зерттеудің өзектілігі

Спутниктің бағдарлауын басқару жүйесі ғарыш аппаратының мақсатты ұшу режимдерін орындау мүмкіндігін айқындайтын негізгі борттық жүйелердің бірі болып табылады. Кіші ғарыш аппараттары мен наноспутниктер үшін бағдарлау міндеті ерекше маңызға ие, себебі массалық-габариттік, энергетикалық және есептеу ресурстарының шектеулілігі техникалық тұрғыдан іске асырылатын және бапталуы күрделі емес басқару алгоритмдерін қолдануды талап етеді. Сонымен қатар басқару жүйесі бұрыштық қозғалыстың орнықтылығын, өтпелі процестің қажетті формасын және басқарушы әсерлердің рұқсат етілетін мәндерін қамтамасыз етуі тиіс.

Белсенді үш осьтік тұрақтандырудың кең таралған құралдарының бірі маховикті атқарушы органдар болып табылады. Мұндай жүйеде басқарушы моменттер байланысты координаталар жүйесінің осьтері бойымен орнатылған маховиктердің бұрыштық жылдамдықтарын өзгерту есебінен қалыптастырылады. Бұл техникалық шешім жұмыс денесін жұмсауды қажет етпейді және спутниктің бағдарлауын ұзақ уақыт бойы басқаруға мүмкіндік береді.

Сонымен бірге «спутник–маховиктер» жүйесі сызықтық емес механикалық жүйе болып табылады. Оның қозғалысы айналмалы динамика теңдеулерімен, кватерниондық кинематика теңдеулерімен және атқарушы органдардың теңдеулерімен сипатталады. Модельдің сызықтық еместігі, арналаралық байланыстар, бастапқы кинетикалық моменттің әсері, сондай-ақ басқарушы моменттер мен маховиктердің бұрыштық жылдамдықтары бойынша шектеулер басқару заңы параметрлерін синтездеу міндетін күрделендіреді.

Қолданыстағы тәсілдерде СББЖ синтезі үшін жергілікті сызықтандырылған модельдер, Ляпунов әдістері, кері байланыс арқылы сызықтандыру, SDRE/SDARE тәсілдері, робасты және оңтайлы реттегіштер, сондай-ақ сандық оңтайландыру әдістері қолданылады. Бұл әдістер спутникті тұрақтандыру және қайта бағдарлау бойынша кең ауқымды міндеттерді шешуге мүмкіндік береді. Алайда оларды қолдану кезінде басқару заңы параметрлері, сипаттамалық теңдеу түбірлері, өтпелі процестің формасы, жылдамдығын және маховикті атқарушы органдардың физикалық шектеулері арасындағы байланыс көбіне айқын аналитикалық түрде берілмейді. Соның

нәтижесінде реттегіш параметрлерін таңдау әрбір нақты объект үшін қосымша сандық іріктеуді және тексеруді қажет етеді.

Осыған байланысты маховикті атқарушы органдары бар СББЖ параметрлерін синтездеудің аналитикалық әдісін әзірлеу өзекті болып табылады. Мұндай әдіс оның орнықтылық талаптарын, өтпелі процестің формасын, жылдамдығы және атқарушы жүйенің физикалық шектеулерін бір мезгілде ескеруге мүмкіндік беруі тиіс.

Зерттеудің мақсаты

Зерттеудің мақсаты — маховикті атқарушы органдары бар спутниктің бағдарлауын басқару заңы параметрлерін сызықтық емес математикалық модельдің сызықтық формасы негізінде синтездеу әдісін әзірлеу. Бұл әдіс өтпелі процестің берілген апериодикалық формасын қамтамасыз етуге, қажетті жылдамдығы таңдауға және басқарушы момент пен маховиктердің бұрыштық жылдамдығы бойынша шектеулерді ескеруге бағытталған.

Зерттеудің міндеттері

Қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін диссертациялық жұмыста келесі міндеттер шешіледі:

1. Маховикті атқарушы органдары бар спутниктердің бағдарын басқару жүйелерін синтездеудің қолданыстағы әдістеріне шолу және талдау жүргізу.
2. Сызықтық емес СББЖ-ның сызықтық түрі негізінде басқару заңы параметрлерін синтездеудің математикалық негізін қалыптастыру.
3. СББЖ синтезі есебін оның өтпелі процесінің талап етілетін түрін қалыптастыру есебіне және оның жылдам әрекет етуін қамтамасыз ету есебіне декомпозициялау әдісін әзірлеу.
4. Өтпелі процестің апериодикалық сипатын қамтамасыз ететін PD-басқару заңы параметрлерін таңдау үшін аналитикалық қатынастарды алу.
5. Атқарушы органдардың физикалық шектеулерін ескеру процедурасын әзірлеу.
6. Екі зерттеу объектісі үшін басқару заңы параметрлерін есептеу және сызықтық емес СББЖ-ны сандық модельдеу.
7. Спутниктің имитациялық моделінде басқару заңының есептелген параметрлері кезінде СББЖ-ның жұмысқа қабілеттілігін тексеру.

Зерттеу әдістері

Диссертациялық жұмыста автоматтық басқару теориясының әдістері, қатты дене қозғалысы теориясы, сызықтық және сызықтық емес жүйелердің орнықтылық теориясы, сипаттамалық теңдеулерді талдау әдістері, бағдарлау қозғалысын кватерниондық сипаттау, дифференциалдық теңдеулер жүйелерін сандық интегралдау, сондай-ақ MATLAB/Simulink және Simscape Multibody орталарында имитациялық модельдеу әдістері қолданылды.

Жүргізілген зерттеулердің ғылыми жаңалығы

Диссертациялық жұмыстың ғылыми жаңалығы маховикті атқарушы органдары бар СББЖ параметрлерін синтездеу әдісін әзірлеумен байланысты. Бұл әдісте PD-басқару заңының параметрлері бастапқы сызықтық емес

жүйенің сызықтық формасы және нормаланған сипаттамалық теңдеу негізінде анықталады.

Диссертациялық жұмыстың жаңа нәтижелеріне мыналар жатады:

1. Бастапқы сызықтық емес жүйенің сызықтық түрі негізінде маховикті атқарушы органдары бар спутниктің бағдарын басқарудың PD-басқару заңы параметрлерін синтездеу әдісі әзірленді.

2. Синтез есебін салыстырмалы уақыттағы өтпелі процестің аperiodикалық түрін қалыптастыруға және нақты уақытқа өту масштабын таңдауға бөлу ұсынылды.

3. СББЖ орнықтылығының максималды дәрежесіне сәйкес келетін басқару заңының оңтайлы параметрлері үшін аналитикалық қатынастар алынды. Бұл нормаланған сипаттамалық теңдеудің еселі нақты теріс түбірлеріне сәйкес келеді.

4. Басқарушы моменттер мен маховиктердің бұрыштық жылдамдықтары бойынша шектеулерге қойылатын талаптардың орындалуын қамтамасыз ететін салыстырмалы уақыттан абсолюттік уақытқа өту масштабын таңдау алгоритмі әзірленді.

5. Ұсынылған есептеу процедурасының әртүрлі массалық-инерциялық сипаттамалары бар объектілерге қолданылатыны және басқару заңы параметрлерін синтездеудің бірыңғай құрылымын сақтайтыны көрсетілді.

6. Синтезделген басқару заңының имитациялық тексеруі Simscape Multibody ортасында СББЖ эксперименттік үлгісінің моделі негізінде орындалды.

Диссертациялық жұмыстың ғылыми және практикалық маңыздылығы

Жұмыстың ғылыми маңыздылығы сызықтық емес СББЖ параметрлерін синтездеу міндетін сызықтық жүйелердің сапа көрсеткіштері негізінде қарастыруға мүмкіндік беретін әдісті әзірлеуде көрінеді. Ұсынылған тәсіл бастапқы сызықтық емес модельді жергілікті сызықтық жуықтаумен алмастырмай, оның сызықтық формасын пайдаланады және басқару заңы параметрлерін сипаттамалық теңдеу құрылымымен тікелей байланыстырады.

Диссертациялық жұмыстың практикалық маңыздылығы әзірленген әдісті маховикті атқарушы органдары бар кіші ғарыш аппараттарының бағдарлауын басқару жүйелерін жобалау кезінде қолдану мүмкіндігімен анықталады. Ұсынылған әдіс PD-басқару заңы параметрлерін алдын ала таңдауда, СББЖ-ның рұқсат етілетін жылдамдығын анықтауда, атқарушы органдар шектеулерінің әсерін бағалауда, маховик параметрлерін таңдауда және бағдарлау алгоритмдерін тексеруге арналған имитациялық модельдер құруда қолданылуы мүмкін.

Әдістің практикалық құндылығы басқару заңы параметрлерін есептеу аналитикалық түрде орындалатынымен және өтпелі процесс бойынша итерациялық іріктеуді қажет етпейтіндігімен сипатталады. Бұл ретте реттегіш параметрлері объектінің инерциялық сипаттамаларымен, уақыт масштабы

және маховиктердің басқарушы моменті мен бұрыштық жылдамдығы бойынша шектеулерімен тікелей байланысады.

Қорғауға шығарылатын негізгі ережелер:

1. Бастапқы сызықтық емес жүйенің сызықтық түрі негізінде маховикті атқарушы органдары бар спутниктің бағдарын басқарудың PD-басқару заңы параметрлерін синтездеу әдісі.
2. СББЖ синтезі есебін екі ішкі есепке декомпозициялау әдісі: салыстырмалы уақыттағы өтпелі процестің апериодикалық түрін алу және нақты уақытқа өту масштабын таңдау.
3. СББЖ-ның максималды жылдам әрекет етуін қамтамасыз ететін PD-басқару заңы параметрлері үшін аналитикалық қатынастар. Бұл нормаланған сипаттамалық теңдеудің еселі нақты теріс түбірлеріне сәйкес келеді.
4. Басқарушы моменттер мен маховиктердің бұрыштық жылдамдықтары бойынша шектеулерге қойылатын талаптардың орындалуын қамтамасыз ететін салыстырмалы уақыттан абсолюттік уақытқа өту масштабын таңдау алгоритмі.
5. Әзірленген әдістің модельдік микроспутникке және СББЖ эксперименттік үлгісіне қолданылуын растайтын сандық және имитациялық модельдеу нәтижелері.

Алынған нәтижелердің дұрыстығы

Алынған нәтижелердің дұрыстығы айналмалы динамика мен кватерниондық кинематиканың бастапқы теңдеулерін қолданумен, автоматтық басқарудың сызықтық теориясы қағидаларын пайдаланумен, басқару заңы параметрлерін сипаттамалық теңдеуден аналитикалық түрде шығарумен, бастапқы сызықтық емес жүйені сандық модельдеумен, сондай-ақ синтезделген басқару заңын Simscape Multibody ортасында эксперименттік үлгінің имитациялық моделінде тексерумен қамтамасыз етіледі.

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

Ізденушінің жеке үлесі

Автор маховикті атқарушы органдары бар спутниктердің бағдарын басқару жүйелерін синтездеудің заманауи әдістеріне талдау жүргізді, «спутник–маховиктер» жүйесі динамикасының математикалық моделін қарастырды, СББЖ динамикасын сипаттайтын бастапқы сызықтық емес теңдеулер жүйесінің сызықтық түрін зерттеді, өтпелі процестің берілген түрі және СББЖ-ның талап етілетін жылдам әрекет етуі бойынша PD-басқару заңы параметрлерін синтездеу әдісін әзірледі, атқарушы органдардың шектеулерін ескере отырып нақты уақытқа өту масштабын есептеді, модельдік микроспутник пен СББЖ эксперименттік үлгісіне сандық модельдеу жүргізді, сондай-ақ Simscape Multibody ортасында эксперименттік үлгінің имитациялық моделін құрды.

Диссертацияның көлемі мен құрылымы

Диссертациялық жұмыс кіріспеден, төрт тараудан, қорытындыдан, пайдаланылған дереккөздер тізімінен және қосымшадан 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, алынған нәтижелердің дұрыстығы, апробация және жарияланымдар туралы мәліметтер келтірілген.

Бірінші тарауда спутниктердің бағдарын басқару жүйелері параметрлерін синтездеу әдістеріне шолу жасалып, зерттеу міндеттерінің қойылымы тұжырымдалды. СББЖ синтез объектісі ретінде қарастырылды, маховикті атқарушы органдары бар жүйелердің ерекшеліктері, синтез әдістерінің негізгі бағыттары және динамикалық параметрлерді синтездеудің әдіснамалық негіздері талданды, жұмыстың мақсаты мен міндеттері тұжырымдалды.

Екінші тарауда сызықтық жүйелердің сапа көрсеткіштері бойынша сызықтық емес СББЖ-ны синтездеу әдісі әзірленді. СББЖ математикалық моделінің сызықтық түрі, басқару процестерінің орнықтылығы мен сапасын талдау, өтпелі процестің талап етілетін түрін және талап етілетін жылдам әрекет етуін алу есептерін декомпозициялау, өтпелі процесс түрін оңтайлы синтездеу, басқару заңы параметрлерін анықтаудың аналитикалық әдісі, сондай-ақ басқарушы моменттер мен маховиктердің бұрыштық жылдамдықтары бойынша шектеулерді ескеру қарастырылды.

Үшінші тарауда спутниктің бағдарлауын басқарудың сызықтық емес жүйесінің параметрлерін есептеу және оның сызықтық формасы негізінде модельдеу орындалған. Модельдік микроспутник пен СББЖ эксперименттік үлгісінің сипаттамалары беріліп, олардың параметрлері мен өтпелі процестері есептелген, сондай-ақ модельдеу нәтижелеріне салыстырмалы талдау жүргізілген.

Төртінші тарауда маховикті атқарушы органдары бар спутниктің эксперименттік үлгісінің имитациялық моделі қарастырылған. Бір арналы, екі арналы және үш арналы тапсырмалар бойынша синтезделген басқару заңының

жұмыс қабілеттілігі тексерілген, уақыт масштабының әсері және бастапқы бұрыштық жылдамдықты демпфирлеу процестері талданған.

Қорытындыда диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері мен қорытындылары көрсетілген.

Қосымшада маховикті атқарушы органдары бар спутниктің эксперименттік үлгісінің имитациялық моделі келтірілген.