Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

ӘОЖ 681.5.037.26 Қолжазба құқығында

**ТЕМИРБЕК АЙЖАН**

**Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен сызықты жүйелерді адаптивті басқару**

8D07102 – Автоматтандыру және басқару

Философия докторы (PhD)

дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация

Ғылыми кеңесшілер

техника ғылымдарының докторы,

профессор

Бейсенбі М.Ә.

техника ғылымдарының докторы,

профессор

Вуйцик В.

Қазақстан Республикасы

Астана, 2024

**МАЗМҰНЫ**

|  |  |
| --- | --- |
| **БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР**................................................... | 4 |
| **КІРІСПЕ**........................................................................................................... | 5 |
| **1 АДАПТИВТІ БАСҚАРУ ТӘСІЛДЕРІНЕ ШОЛУ ЖӘНЕ ЕСЕПТІҢ ЖАЛПЫ ҚОЙЫЛЫМЫ**........................................................... | 10 |
| 1.1 Адаптивті басқару...................................................................................... | 10 |
| 1.2 Адаптивті басқару тәсілдері және қазіргі жағдайы............................... | 13 |
| 1.2.1 Іздестірусіз өздігінен бейімделетін жүйелер........................................ | 19 |
| 1.3 Адаптивті басқару жүйесін синтездеу есебінің қойылымы................... | 22 |
| 1.4 Адаптивті басқару жүйелерін синтездеу тәсілдері................................ | 26 |
| 1.5 Ляпунов функциялары тәсілі.................................................................... | 28 |
| 1.5.1 Ляпунов функциялары тәсілімен адаптивті жүйелерді синтездеу..... | 29 |
| 1.5.2 Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілі... | 32 |
| 1.6 Автоматты басқару жүйелерінің сапасына қойылатын талаптар*.........* | 36 |
| Бірінші бөлім бойынша қорытындылар......................................................... | 38 |
| **2 ЛЯПУНОВТЫҢ ГРАДИЕНТТІ-ЖЫЛДАМДЫҚТЫҚ ВЕКТОР-ФУНКЦИЯСЫ ТӘСІЛІМЕН БІР КІРІСІ ЖӘНЕ БІР ШЫҒЫСЫ БАР АДАПТИВТІ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН СИНТЕЗДЕУ**....................... | 39 |
| 2.1 Есептің қойылымы..................................................................................... | 39 |
| 2.2 Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен негізгі контурдың синтезі.............................................................. | 40 |
| 2.3 Эталондық модельді таңдау..................................................................... | 43 |
| 2.4 Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен адаптация контурының синтезі...................................................... | 49 |
| Екінші бөлім бойынша қорытындылар.......................................................... | 55 |
| **3 ЛЯПУНОВТЫҢ ГРАДИЕНТТІ-ЖЫЛДАМДЫҚТЫҚ ВЕКТОР-ФУНКЦИЯСЫ ТӘСІЛІМЕН m-КІРІСІ ЖӘНЕ n-ШЫҒЫСЫ БАР АДАПТИВТІ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН СИНТЕЗДЕУ**................................ | 56 |
| * 1. Есептің қойылымы...................................................................................... | 56 |
| 3.2 Эталондық модельді таңдау...................................................................... | 57 |
| 3.3 Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен негізгі контурдың синтезі............................................................... | 58 |
| 3.4 Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен адаптация контурының синтезі .................................................... | 65 |
| Үшінші бөлім бойынша қорытындылар........................................................ | 70 |
| **4 ЛЯПУНОВТЫҢ ГРАДИЕНТТІ-ЖЫЛДАМДЫҚТЫҚ ВЕКТОР-ФУНКЦИЯСЫ ТӘСІЛІМЕН СЫЗЫҚТЫ ҒАРЫШТЫҚ ҰШУ АППАРАТЫН АДАПТИВТІ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ СИНТЕЗІ**...... | 71 |
| 4.1 Бағдарлау және тұрақтандыру жүйесін сипаттау.................................... | 71 |
| 4.2 Ғарыштық ұшу аппаратын автоматты басқару жүйесінің математикалық моделі..................................................................................... | 73 |
| 4.3 Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен сызықты ҒҰА-ны адаптивті басқару жүйесінің синтезі............. | 79 |
| 4.3.1 Сызықты ҒҰА-ны адаптивті басқару жүйесінің негізгі контурының реттелетін регуляторының синтезі................................................................. | 79 |
| 4.3.2 Сызықты ҒҰА-ны адаптивті басқару жүйесінің адаптация контурын синтездеу........................................................................................ | 81 |
| Төртінші бөлім бойынша қорытындылар...................................................... | 87 |
| **ҚОРЫТЫНДЫ**............................................................................................... | 88 |
| **ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ**................................................. | 90 |
| **ҚОСЫМША A -** Енгізу актісі....................................................................... | 97 |
| **ҚОСЫМША Ә –** Объектінің параметрлері................................................. | 98 |

**БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР**

|  |  |
| --- | --- |
| ӨҰЖ | * өздігінен ұйымдастырылатын жүйелер |
| ӨБЖ | * өздігінен бейімделетін жүйелер |
| ІӨБЖ | * іздестірусіз өздігінен бейімделетін жүйелер |
| БМ | * басқару мақсаты |
| БО | * басқару объектісі |
| ЭМ | * эталондық модель |
| ҒҰА | * ғарыштық ұшу аппараты |
| ҒА | * ғарыш аппараты |
| SISO | * single-input single-output/бір кірісті бір шығысты |

**КІРІСПЕ**

**Зерттеу тақырыбының өзектілігі.** Қазіргі таңда жоғары сапа көрсеткіштермен және динамикалық және статикалық дәлдікпен басқару жүйесінің орнықтылығын, қажетті динамикасын қамтамасыз ету өзекті болып табылады. Техникалық жүйелердің дәстүрлі типтегі модельдерін қалыптастыру және пайдалану әдістері қазіргі таңда егжей-тегжейлі әзірленген және көптеген тапсырмаларды шешуде сәтті қолданылуда. Басқару жүйелерін талдау мен синтездеудің дәстүрлі әдістері - объектінің математикалық моделі белгілі, ол объектінің іс-әрекетін дәл сипаттайды және жұмыс істеу процесінде уақыт өте келе өзгермейді деген болжамға негізделген. Алайда, заманауи және перспективалы техникалық жүйелерге қатысты бірқатар проблемалар туындайды, оларды дәстүрлі әдістермен шешуге келмейді. Бұл проблемалар тиісті жүйенің қасиеттерінде және оның жұмыс істеу шарттарында әр түрлі текті және көптеген анықталмағандықтардың болуынан туындайды. Анықталмағандықтар басқару жүйелерінде басқарылмайтын қоздырулардың болуынан, басқару объектісінің параметрлерінің нақтылы мәндерін білмеумен және параметрлердің уақыт бойынша болжап білуге болмайтын өзгерулері кезінде туындайды. Бұл біріншіден, жүйенің жұмыс сапасын төмендетуге, типті оның орнықтылығын және жұмыс қабілеттілігін жоғалтуға алып келеді; екіншіден, оның қызмет етуінің қажетті сапасын сақтап қалу үшін тиімді басқару жүйесін есептеуге және іске асыруға шығынның артуына алып келеді. Мұндай анықталмағандықтарға қарастырылып отырған жүйенің адаптивтілік қасиеті, яғни жүйенің және оның моделінің өзгеріп отырған ағымдағы жағдайына байланысты жедел реттейтін қасиеті болған жағдайда ғана төтеп беруге болады.

Адаптивті басқару тәсілдері қазіргі заманғы автоматты басқару теориясы мен практикасындағы басты тәсілдердің бірі. Басқарылатын объектінің және сыртқы ортаның сипаттамалары туралы өте аз априорлық ақпарат жағдайында күрделі техникалық объектілерді оңтайлы басқаруға мүмкіндік беретін адаптивті жүйелерді құру басқару жүйелерінің теорияшылдары мен әзірлеушілері үшін маңызды міндеттердің бірі болып табылады.

Адаптивті басқару жүйелерінде сыртқы әсерлер компенсацияланады, яғни басқару жүйесі сыртқы әсерлерге қатысты өзгермейді (инвариантты), ал объект туралы ақпарат жұмыс барысында жиналады, дереу өңделеді және басқару әсерлерін жасау үшін қолданылады. Бұл объектінің параметрлері мен жұмыс ортасының анықталмағандығы жағдайында басқару сапасын арттыруға мүмкіндік береді.

Қазіргі таңда адаптивті басқару есептері класында көптеген шешімдер алынды. Бұл әдістер жүйені пайдалану басталғанға дейін немесе жобалау сатысында кездесетін басқару объектісінің параметрлері мен оның жұмыс жасау шарттарының елеулі анықталмағандығы кезінде басқару жүйелерін құруда қолданылады. Белгілі адаптивті алгоритмдерді жүзеге асыру өте қиын, сондықтан оларды құрайтын регуляторлардың күрделілігі мен көлеміне байланысты оларды практикада қолдануға қызығушылық тудырмайды.

Адаптивті басқару жүйелерін синтездеудің белгілі тәсілдері: гиперорнықтылық теориясына негізделген тәсілдер, күшейтудің «шексіз үлкен» коэффициентін енгізуге негізделген тәсілдер, сырғанаушы режімдерді ұйымдастыруға негізделген тәсілдер көбінесе реті төмен қарапайым бір өлшемді жүйелерді құруда қолданылады, ал Ляпунов функцияларын пайдалануға негізделген тәсілдер және градиенттік тәсілдер сызықты және бейсызықты жүйелердің орнықтылығы мен сапасын зерттеудегі басты тәсілдер болып келеді. Дегенмен, қазіргі таңда бұл тәсілдер көбінесе теориялық зерттеулерге арналған құрал болып табылады және нақты жағдайларда адаптивті регуляторлардың орнықтылығы, робастылығы және жұмыс сапасына қатысты көптеген сұрақтарға жауап бере алмайды. Осы тәсілдерді кеңінен қолдануда туындайтын негізгі қиындықтар Ляпунов функциялары мен басқару критерийлерін құрудағы әмбебап тәсілдерінің болмауы.

**Зерттеудің ғылыми жаңалығы.** Бұл жұмыста Ляпунов функцияларын қолдануға негізделген әдіс аясындағы Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілі бойынша сызықты адаптивті басқару жүйелерін синтездеудің жаңа тәсілі ұсынылған. Ляпуновтың тура әдісінің асимптотикалық орнықтылығы теоремасы мен орнықтылық ұғымдарын геометриялық тұрғысынан түсіндіру негізіндегі Ляпуновтың вектор-функциясын құрудың әмбебап тәсілі ұсынылған. Мұнда, динамикалық жүйе градиенттік жүйелер ретінде, ал Ляпунов функциялары апаттар теориясындағы потенциалдық функциялар ретінде қарастырылады, ал басқару жүйесінің градиенттілік шарты Ляпуновтың қажетті функцияларын біржақты және аналитикалық түрде құру мүмкіндігін береді. Ляпунов функцияларының бар болуынан қажетті динамикасы бар автоматты басқару жүйесінің апериодтық робасты орнықтылық шарттары анықталады және осының негізінде адаптивті басқарудың негізгі мақсатына әрдайым жетуге болады.

**Зерттеу объектісі.** Сызықты адаптивті жүйелері.

**Зерттеу пәні.** Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен сызықты адаптивті басқару жүйелерін зерттеу және құру әдіснамасын әзірлеу және оларды өзекті мақсаттарда қолдану.

**Зерттеу әдістері.** Бұл жұмыста тұжырымдалған басқару есептерін шешуде адаптивті басқару тәсілдері, күй кеңістігі әдісі, Ляпунов функциялары тәсілі, матрицалар теориясы және орнықтылық теориялары қолданылды. Имитациялық модельдеуге қолданбалы бағдарламалық Matlab және Simulink пакеттері қолданылды.

Диссертациялық жұмыстың *мақсаты* Ляпунов градиентті-жылдамдықтық вектор-функцияcы тәсілінің негізінде сызықты объектілерді адаптивті басқару жүйесінің синтезін теориялық әзірлеу.

Диссертациялық жұмыстың қойылған мақсатына сәйкес келесі *міндеттерді* шешу көзделген:

* адаптивті басқару мәселелірінің қазіргі жағдайына талдау жүргізу;
* Ляпуновтың вектор-функциясын құруға әмбебап тәсілді негіздеу және әзірлеу;
* сызықты адаптивті басқару жүйелерін зерттеуге Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілін әзірлеу;
* бір кірісі және бір шығысы бар сызықты жүйелерді адаптивті басқаруды Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен синтездеу;
* m кірісі және n шығысы бар сызықты жүйелерді адаптивті басқаруды Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен синтездеу;
* сызықты ғарыштық ұшу аппаратын адаптивті басқаруды Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен синтездеу.

**Қорғауға шығарылатын ғылыми нәтижелер (ғылыми ережелер):**

Қорғауға шығарылды:

1. Бір кіріс және бір шығысы бар сызықты объектіні адаптивті басқару жүйесін синтездеу тәсілі.
2. m-кіріс және n-шығысы бар сызықты объектіні адаптивті басқару жүйесін синтездеу тәсілі.
3. Сызықты ғарыштық ұшу аппаратын адаптивті басқаруды синтездеу тәсілі.

Айқын эталондық моделі бар өздігінен бейімделетін жүйені құру мақсаты қойылады. Өздігінен бейімделетін жүйелердің екі деңгейлі құрылымына сәйкес есеп екі кезеңде шешіледі: негізгі контурды құру және адаптация контурының синтезі.

Негізгі контурды құру

1. Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен басқару жүйесінің апериодтық робасты орнықтылық шарттарын анықтау және зерттеу.
2. Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен параметрлері берілген қажетті динамикасы бар модельдің апериодтық робасты орнықтылық шарттарын анықтау және зерттеу.
3. Негізгі контурдың регуляторының коэффициенттерін есептеу.

Адаптация контурының синтезі

1. Жалпыланған реттелетін объектінің моделін құру.
2. Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен жалпыланған реттелетін объектінің апериодтық робасты орнықтылық шарттарын анықтау және зерттеу.
3. Жалпыланған реттелетін объектінің апериодтық робасты орнықтылық шарттарынан адаптация контурын реттеу коэффициенттерін есептеу.

**Диссетациялық жұмыстың теориялық және өндірістік маңызы**. Диссертациялық жұмыстың теориялық және өндірістік маңыздылығы ұсынылған адаптивті басқару жүйелерін синтездеу күрделі техникалық жүйелерді басқару есептерін шешуге және жоғары сапа көрсеткіштермен басқару жүйесінің орнықтылығын, қажетті динамикасын қамтамасыз ету мүмкіндігін береді. Жұмыста келтірілген нәтижелер Қызылорда облысының Оңтүстік-Батыс Қызылқия кен орындарына қуаты 2500 кВт газ поршенді электр станциясында сынақтан өткізілді. Сынақ нәтижесінде жүктеменің 20-25%, яғни 0,12-0,15 Гц шегінде қысқа іске қосу тербелістері кезінде газ поршенді қондырғылардың (генераторлардың) айналымдарының тұрақтылығын жақсарту анықталды, енгізу актісі (Қосымша А)-да келтірілген.

**Автордың жеке үлесі.** Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен бір кірісі және бір шығысы бар сызықты адаптивті басқару жүйесін синтездеу тәсілі әзірленді. Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен m кірісі және n шығысы бар сызықты адаптивті басқару жүйесін синтездеу тәсілі әзірленді.

**Диссертация нәтижелерінің апробациясы және жарияланымдар***.* Диссертациялық жұмыстың тақырыбы бойынша ізденуші 5 баспа жұмысты жариялады, оның ішінде: бір мақала Scopus деректер базасына кіретін журналда жарияланған, төрт мақала ҚР Ғылым және жоғары білім министрлігінің ғылым және жоғары білім саласында сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынатын ғылыми басылымдарда жарияланған.

1. Synthesis of a gradient-velocity control system using the Lyapunov vector-function method for an object with one input and one output /**/** Journal of the Balkan Tribological Association. – 2022. – Vol. 28, №6. – Р. 799-813.
2. Синтез настраиваемого регулятора основного контура адаптивной системы управления с одним входом и одним выходом // Вестник НИА РК. – 20223. – №3(89). – С. 46-56.
3. Синтез адаптера для объекта с одним входом и одним выходом градиенто-скоростным методом вектор-функции Ляпунова // Вестник Торайгыров университет. – 2021. – №1. – С. 58-68.
4. Reference model selection of the adaptive control system for an object with single-input and single-output // Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің Хабаршысы. Физика-математика ғылымдары сериясы. – 2021. – №4(76). – Б. 15-20.
5. m-кірісі және n-шығысы бар адаптивті басқару жүйесінің негізгі контурының реттелетін регуляторының синтезі // ҚарТУ «Университет Еңбектері» Республикалық журналы. – 2021. – №3(84). – Б. 286-288.

**Жұмыстың құрылымы және көлемі.** Диссертациялық жұмыс 96 бет көлеміндегі кіріспе, 4 бөлім, қорытынды, 103 пайдаланған әдебиеттер тізімі және 2 қосымшадан тұрады. Диссертациялық жұмыстың жалпы көлемі 98 бетті құрайды.

**Кіріспеде** диссертациялық жұмыстың тақырыбының өзектілігі көрсетілді, зерттеудің мақсаты мен міндеті тұжырымдалды, зерттеудің ғылыми жаңалығы, теориялық және өндірістік маңызы негізделді.

**Бірінші бөлімде** адаптивті басқару тәсілдерінің қазіргі жағдайы сипатталды, адаптивті басқару жүйелерін синтездеудің белгілі тәсілдеріне қысқаша шолу жасалды, іздестірусіз адаптивті басқару жүйесін синтездеу есебінің қойылымы, Ляпунов теоремаларының геометриялық тұрғыдан түсіндірілуі келтірілді. Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілі әзірленді.

**Екінші бөлімде** сызықты адаптивті басқару жүйелерін синтездеудің жаңа тәсілі - Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілі әзірленді. Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен бір кірісі және бір шығысы бар сызықты объектіні адаптивті басқару жүйесінің синтезі жүргізілді.

**Үшінші бөлімде** Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен m кірісі және n шығысы бар сызықты объектіні адаптивті басқару жүйесінің синтезі жүргізілді.

**Төртінші бөлімде** Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен сызықты ғарыштық ұшу аппаратын адаптивті басқару жүйесінің синтезі жүргізілді.

**1 АДАПТИВТІ БАСҚАРУ ТӘСІЛДЕРІНЕ ШОЛУ ЖӘНЕ ЕСЕПТІҢ ЖАЛПЫ ҚОЙЫЛЫМЫ**

**1.1 Адаптивті басқару**

Заманауи басқару жүйелерін жобалау кезінде әзірлеушілер аналитикалық сипаттаманың анықталмағандығы бар, күрделі басқару құрылымы бар, қалыпты жұмыс режімдері және орындалатын функциялары өзгеретін динамикалық объектілерге жиі тап болады. Практикалық қызметте математикалық модельдері нақты емес, параметрлік дрейфі бар, сыртқы әсерлер туралы толық ақпарат болмаған жағдайда жұмыс істейтін объектілер үшін басқару жүйелерін әзірлеу қатардағы мәселеге айналды.

Басқару жүйелерін талдау мен синтездеудің дәстүрлі әдістері - объектінің математикалық моделі белгілі, ол объектінің іс-әрекетін дәл сипаттайды және жұмыс істеу процесінде уақыт өте келе өзгермейді деген болжамға негізделген. Басқаша айтқанда, бұл жағдайларда объектінің реті және оның математикалық моделінің барлық коэффициенттерінің сандық мәндері берілген. Шындығында, кез-келген модель нақты объектінің идеалдандырылған (яғни жеңілдетілген) сипаттамасын білдіреді [1]. Бұл жағдайда нақты басқару объектісі берілген модельмен 5-7% дәлдікпен сипатталады. Басқару жүйелері әрдайым белгілі бір орнықтылық қорымен құрылатындықтан, есептелген математикалық модельдің көрсетілген дәлсіздігіне қарамастан, жүйе орнықтылықты сақтайды және объектіні сапалы басқаруды қамтамасыз етеді. Алайда, іс жүзінде басқару объектісінің реті мен оның математикалық моделінің теңдеулерінің жалпы құрылымы ғана белгілі болатын жағдайлар, сондай-ақ, объектінің кейбір бөліктерінің немесе тіпті барлық параметрлерінің сандық мәндері алдын-ала белгісіз болатын жағдайлар бар. Кейде белгісіз коэффициенттердің мүмкін мәндерінің диапазондары берілуі мүмкін, бірақ бұл диапазондар өте кең: жоғарғы мәндер төменгі мәндерден бірнеше есе жоғары болуы мүмкін. Мұндай объектілер белгісіз басқару объектілері деп аталады. Мұндай жағдайларда әдеттегі басқару жүйелері орнықтылығын жоғалтады және басқарылатын процестің қалыпты жүруін қамтамасыз ете алмайды. Мәселен, мысалы, химия өнеркәсібінде, металлургияда технологиялық процестерді басқарудың автоматты жүйелерін құру кезінде адекватты математикалық модель құру күрделі тәуелсіз тапсырма болып табылады. Ұшу аппараттарының динамикалық сипаттамалары ұшу режіміне және атмосфераның күйіне байланысты. Технологиялық процестерді басқарудың автоматты және автоматтандырылған жүйелерінде орын алатын белгісіздік факторлары: жабдықтың жұмыс режімдерінің өзгеруі, шикізат сипаттамаларының тұрақсыздығы және отынның ластануы және тозуы, катализатордың ескіруі және т.б.

Басқару объектісі туралы ақпараттың жетіспеушілігі біріншіден, жүйенің жұмыс сапасын төмендетуге, типті оның орнықтылығын және жұмыс қабілеттілігін жоғалтуға алып келеді; екіншіден, оның қызмет етуінің қажетті сапасын сақтап қалу үшін тиімді басқару жүйесін есептеуге және іске асыруға шығынның артуына алып келеді.

Елеулі белгісіздік жағдайында басқару теориясының дәстүрлі әдістері жиі қолданылмайды немесе автоматты басқару жүйесінің қажетті сапасын қамтамасыз етпейді. Сондықтан, кез-келген басқару заңының практикалық құндылығы ең алдымен оның объектінің сипаттамалары немесе оның жұмыс істеу ортасы өзгерген кездегі жұмысқа қабілеттілігімен анықталады. Тұйық жүйенің орнықтылығын қамтамасыз ететін кез-келген регулятор басқару объектісінің кейбір класында ғана өзінің жұмысқа қабілеттілігін сақтай алады. Егер басқару теориясының дәстүрлі әдістері жүйе жұмыс істейтін барлық шарттар үшін жарамды басқару заңын синтездеу мүмкіндігін бермесе, онда бұл мәселені шешудің ең перспективалы әдістерінің бірі-адаптация әдістерін қолдану [1, с. 35].

«Адаптация» термині [2] автоматты басқару теориясына физиологиядан келді, мұнда адаптация организмнің өмір сүру жағдайына бейімделуін білдіреді. Адаптация - бұл бастапқы белгісіздік және/немесе өзгеретін жұмыс жағдайлары кезінде белгілі бір басқару сапасына қол жеткізу мақсатында басқару кезінде алынған ақпарат негізінде жүйенің параметрлері, құрылымы немесе басқару әсерлерін өзгерту процесі. Адаптивті жүйелер-адаптация принципі жүзеге асырылатын жүйелер. Автоматты басқару жүйелерінде адаптацияның пайда болуы, ең алдымен, басқарылатын объект және оның қоршаған ортасы туралы априорлық және ағымдағы ақпараттың жеткіліксіз болуына байланысты. Адаптивті басқару жүйелерінде объектінің өзгеретін жағдайлары мен белгісіз сипаттамаларына бейімделу жүреді. Адаптивті басқару жүйелерінің теориясында жүйелердің жұмыс істеу процесінде басқару алгоритмдерінің құрылымы мен параметрлерін өзгерту арқылы олардың сапасын жақсартуға бағытталған тәсілдер қалыптасады.

Адаптивті басқару жүйелерінде объект және сыртқы әсерлер туралы ақпарат пайдалану барысында жиналады, дереу өңделеді және басқару әсерлерін жасау үшін қолданылады. Бұл объектінің параметрлері мен жұмыс істеу ортасының анықталмағандығы жағдайларында басқару сапасын арттыруға мүмкіндік береді [3].

Сезгіштік және инварианттылық теориясының әдістеріне негізделген басқару жүйесін жобалаудың дәстүрлі принциптері басқарылатын жүйеге қажетсіз және бақыланбайтын қоздырулар әсерінің компенсациясы бар адаптивті емес көп контурлы жүйелерді құру мүмкіндігін береді. Сигналдық және параметрлік қоздыруларға сезімталдығы аз «қарапайым» жүйелерді адаптивті әдістерге жатқызуға болады. Түзетуші кері байланыс тізбегі бар қарапайым жүйелердің қасиеттеріне деген осындай көзқарас көптеген мамандармен талқыланды, ал жүйе пассивті адаптациясы бар жүйелер деп аталды [4]. Дегенмен, пассивті адаптациясы бар жүйелерде «адаптация» немесе «бейімделу» әрбір нақты жағдайда шектеулі шектерде сақталады.

«Активті» адаптивтілікте түзетуші тізбекті енгізу қажеттілігіне алып келеді, бірақ олар параметрлік немесе сигналды-параметрлік есептеуіш схемалар түрінде іске асырылады, бұл адаптивті жүйенің бейсызықтығына алып келеді, дегенмен, мұнда адаптивті қасиеттерге анықталмағандықтардың өзгеруінің барлық диапазонында қол жеткізіледі (пассивті адаптациясы бар жүйелермен салыстырғанда). Адаптивті басқару жүйелері туралы айтылған негізгі сыни ескертулер олардың кері байланыспен алмастыруға болатын тривиалды конструкциясының болуына және бірінші немесе екінші реттік қарапайым жүйелер болса да оларды басқару құрылғысы өте күрделі болуына байланысты болды. Осыдан, адаптация активті және пассивті болып табылатын техникалық объектілерді белгісіз және объектінің қалыпты жұмысына айтарлықтай әсер ететін әр түрлі шығу тегі бар қоздыруларға аз сезімтал басқару жүйелерін құрудың қажеттілігі туындайды [4, с. 16-17].

Басқару есептеріндегі адаптивті басқару әдістерін қолдануды қажет ететін анықталмағандық [1, с. 36-38] әртүрлі сипатта болуы мүмкін және басқару объектісінің математикалық моделінің белгісіздігінен, жұмыс істеу ортасының сипаттамаларының белгісіздігінен немесе тіпті мақсатты шарттың белгісіздігінен туындауы мүмкін.

Басқару объектісінің параметрлерінің анықталмағандығы. Белгісіздіктің бұл түрі басқару объектісінің қасиеттерінің (сипаттамаларының) белгісіз параметрлерге (масса, инерция моменті, сұйықтық коэффициенті және т.б.) тәуелділігін білдіреді. Бұл жағдайда белгісіз параметрлер квазистационарлық, яғни тұрақты немесе баяу өзгеретін (тұйық жүйедегі басқа процестермен салыстырғанда) болып табылады. Егер белгісіз параметрлердің өзгеру қарқынын басқару объектісіндегі процестердің қарқынымен және сыртқы әсерлердің өзгеру қарқынымен салыстыруға болатын болса, онда параметрлер дрейфінің моделін ұсынған жөн, ал осы модельдің коэффициенттерін жаңа белгісіз (тұрақты) параметрлер деп санаған жөн.

Сыртқы жағдайлардың анықталмағандығы. Нақты басқару жүйелерінің әрекетіне қоршаған орта, яғни бақыланбайтын сыртқы факторлар айтарлықтай әсер етеді, оларға қоздырушы әсерлері мен тапсырма сигналдары жатады. Практикалық жағдайлардың басым көпшілігінде сыртқы әсерлердің нақты формасы (немесе тіпті әрекетінің сипаты) басқару жүйесі жұмысын бастағанға дейін белгісіз болып қалады. Сондықтан, әдетте, нақты басқару жүйелерінің жұмыс істеуінің сыртқы шарттары анықталмағандықтың жоғары деңгейімен сипатталады. Оны шешу үшін аралас басқару, идентификация немесе адаптивті компенсацияның әртүрлі әдістері қолданылады.

Мақсаттың анықталмағандығы. Қажетті траектория алдын-ала берілген кеңістіктік қозғалыстың детерминді есептерімен қатар, қозғалыстың эталондық траекториясы дәл берілмеген немесе оның аналитикалық сипаттамасы алдын-ала белгісіз болатын, ал басқаруды қалыптастыру үшін тек траекториядан ауытқудың ағымдағы өлшемдерін қолдануға болатын нашар анықталған (толық анықталмаған) есептер айтарлықтай қызығушылық тудырады. Мұндай есеп сенсорлардың көмегімен анықталған «физикалық берілген» контур бойымен кейбір кинематикалық механизмнің қозғалысына сәйкес келеді және мақсаттың (мақсатты шарттың) белгісіздігімен сипатталады. Мұндай белгісіздік көбінесе қозғалмалы манипуляциялық роботтарды басқару кезінде жұмыс ортасы, қозғалыс траекториясы немесе манипуляция объектілері алдын-ала нақты белгісіз болса орын алады.

Басқарудың синтезі кезеңінде анықталмағандықтар математикалық модель параметрлерінің априорлық және ағымдағы вариациялары деп бөлінеді [5]. Априорлық белгісіздік жүйенің синтезі кезеңінде болады. Бұл басқару объектісінің қасиеттері мен оның жұмыс істеу шарттары туралы ақпараттың болмауына, объектінің нақты математикалық сипаттамасының болмауына, оларды өндіру кезінде енгізілген басқару жүйесінің функционалды элементтерінің параметрлерінің технологиялық шашырауына және т.б. байланысты болуы мүмкін. Объектінің математикалық моделінің параметрлерінің ағымдағы вариациялары олардың жұмыс барысындағы қажетсіз өзгерістерін білдіреді. Мұндай вариациялардың себептері мыналар болуы мүмкін: жүктеме қасиеттерінің өзгеруі (мысалы, жүктеме инерциясы моменті), жетек редукторының майлау материалының тұтқырлығының өзгеруі, қозғалтқыш орамаларының қызуы, олардың белсенді кедергісінің өзгеруіне әкеледі, зымыран немесе ұшақ бактарындағы отын массасының төмендеуі, массаның өзгеруіне әкеледі, объектінің жұмыс режімінің өзгеруі және сыртқы ортаның қасиеттері, сондай-ақ элементтерді жасау үшін қолданылатын материалдардың табиғи ескіруі.

Адаптивті басқаруды алғаш рет ұшу аппараттарын басқару мәселесінде қолданыла бастады [6] және қазіргі таңда олар технологиялық процестерді [7], энергетикалық қондырғыларды [8] басқару жүйелерін құруда; кемелер, манипуляциялық роботтар, автомобильдер және басқа да маневрлі режімдердегі қозғалмалы нысандарды [9] басқару жүйелерін құруда, теміржол көлігін басқаруда [10], экономикада кеңінен қолданылады. Адаптация әдістері химия өнеркәсібінде және металлургияда технологиялық процестерді басқарудың автоматты жүйелерін құруда [11], әртүрлі өндірістік процестерде қолданылады (бензин пиролизі, металды кесу, домналық өндірісі), өйткені мұндай процестердің басқару объектісінің қажетті толық моделін алу ұзақ және қымбат зерттеулер жүргізуді талап ететі.

**1.2 Адаптивті басқару тәсілдері және қазіргі жағдайы**

Адаптивті басқару тәсілдері жобалау сатысында немесе жүйені пайдалану басталғанға дейін басқару объектісінің өзіне де, сыртқы ортаға да қатысты әртүрлі анықталмағандығы кезінде регуляторды синтездеумен жүргізілетін есептерді шешуге арналған. Объектінің динамикалық қасиеттері кең ауқымда алдын-ала белгісіз түрде өзгеретін басқару есептері қарастырылады. Априорлық ақпараттың жетіспеушілігі объектінің жұмысы туралы ағымдағы деректер негізінде оның жұмыс істеу процесінде толықтырылады. Бұл деректер нақты уақыт режімінде өңделеді (басқарылатын процестің қарқынында) және басқару жүйесінің сапасын жақсарту үшін қолданылады.

Жоғарыда айтылғандардан басқа, адаптивті басқару тәсілдерін қолданудың келесі артықшылықтары бар:

* жүйенің жұмыс процесінде типті параметрлік дрейф кезінде берілген динамикалық көрсеткіштерді сақтап қалу;
* регуляторлар әмбебап болып табылады, оларды сипатталатын параметрлері әртүрлі, құрылымы бірдей объектілер үшін қолмен қайта реттеуді қажет етпейді;
* басқару объектісі туралы ақпаратқа да, басқару жүйесінің аппараттық бөлігіне де технологиялық талаптарды жеңілдетуге болады.

Адаптацияның алғашқы идеялары мен нақты тәсілдері [4, с. 6] өткен ғасырдың 30-шы жылдарының соңында өнеркәсіптік қондырғылардың өнімділігін автоматты түрде оңтайландыру есебінде және ішкі жану қозғалтқыштарының қуатын арттыру есебінде пайда болды. Автоматты оңтайландыру есебінің негізгі мазмұны жүйені оның статикалық сипаттамасының экстремумында табу және сақтау болды. Демек, осы уақытта адаптациясы бар жүйелер класының атауы-экстремалды жүйелер болды, «адаптация» терминінің өзі (лат. adapto-бейімделу) басқару теориясында осы қабілетке ие жүйелерге қарағанда кешірек пайда болды.

50-60 жылдары өздігінен бейімделетін іздестірусіз әдістері қалыптаса бастады: басқару тізбегінде ешқандай іздеу әсерінсіз (сигналдық немесе параметрлік). Адаптивті жүйелердің бұл класы кейінірек аналитикалық өздігінен реттелетін жүйелер атауын алды, мұнда басқару объектісінің моделінің параметрлерінің бақыланбайтын өзгерістері кезінде және (немесе) сыртқы қоздырулар кезінде регулятор параметрлерін реттеу үшін объектінің кіріс және шығысындағы өлшенетін айнымалыларға негізделген белгілі бір сипаттамаларды (жиілік, уақыт, жүйенің жұмыс режімдерінің параметрлері) іздестірусіз анықтау әдістері қолданылды. Жалпы алғанда, 50-60 жылдардағы адаптивті басқару теориясының қалыптасуының бастапқы кезеңі адаптивті жүйелердің құрылымдық синтезінің физикалық идеяларын қалыптастырудың қарқынды процесімен сипатталды, оның негізінде бақыланбайтын қоздырулардың (параметрлік, сигналдық, функционалды) әсерін тікелей компенсациялау әдісі қолданылды. Бұл процестер басқару жүйесінің қажетті параметрлері мен сипаттамаларын анықтаудың іздестіру және іздестірусіз әдістеріне негізделген адаптацияның математикалық әдістерін әзірлеумен қатар жүрді.

70-ші жылдары объектінің қасиеттерінің бақыланбайтын өзгеруіне және сыртқы қоздыруларға бейімделуі бар басқару теориясының дамуына үлкен әсер еткен басқа негізгі идеялардың қатарында оптимал басқарудың әмбебап алгоритмдері идеясын атауға болады. Ол А.А. Красовскийдің еңбектерінде қалыптасты және жетілдірілді. А.А. Красовскийдің оптимал басқаруының әмбебап алгоритмдері ресми түрде регуляторларды аналитикалық құрастыру теориясының шеңберінде жалпыланған жұмыс критерийін (функционалды) және бөлу теоремасын қолдана отырып алынды. Осы теоремаға сәйкес, жеткілікті есептеу құралдарын қолданған кезде, іс жүзінде оптимал регулятордың ақпараттық және басқару бөліктерін бөлек синтездеу мүмкін болады, әрі соңғы бөлігі детерминистік қойылымда синтезделеді. Жалпыланған жұмыс критерийі бойынша оптимал жүйе Калман сүзгісінен тұрады, ол күй векторының ағымдағы бағалауын және басқару объектісінің математикалық моделінің параметрлерін ағымдағы бағалауын іске асырады. 60-шы жылдардың аяғы мен 70-ші жылдардың басында А.А. Красовскийдің еңбектерінде жетілдірілген оптимал адаптивті жүйелерді синтездеуге сәйкестендіру тәсілі адаптивті басқару теориясындағы маңызды нәтижелердің біріне айналды, дегенмен объектінің өзгеріп отыратын жұмыс жағдайларына адаптация тұжырымдамасының өзі оның моделін ағымдағы нақтылау негізінде бұрын жарияланған жұмыстардан белгілі болды [12].

Объект және қоздыруларды ағымдағы сәйкестендіру нәтижелеріне негізделген адаптивті басқару теориясының дамуымен қатар, бұл тәсіл кейінірек сәйкестендіру тәсілі деп аталды. 60-шы жылдардың аяғында және 70-ші жылдары адаптация тұжырымдамасы регулятор параметрлерінің кеңістігінде, жалпы алгоритмдер мен құрылымдар кеңістігінде ағымдағы сандық оңтайландыру ретінде пайда болды. Сәйкестендіру процедурасы адаптация алгоритмдерінен нақты түрде алынып тасталды. Регулятордың параметрлерін реттеу кейбір критерийлік функцияның минимум (максимумы сирек) шартынан іске асырылады, функцияның минимумы (немесе максимумы) объектіні басқару жүйесінің қажетті күйіне сәйкес келетіндей етіп таңдалды. Мысалы, адаптация мақсаты объектінің қажетті жұмысын қамтамасыз ететін «идеал» немесе эталондық регулятордың коэффициенттерін бағалауды есептеу сияқты тұжырымдалады, объектінің қажетті әрекеті де эталондық модельмен берілуі мүмкін. Тікелей адаптивті басқару деп аталатын осындай тәсілдің мәселесі объектінің сипаттамаларының бақыланбайтын барлық өзгерістері мен сыртқы ортаның әсерлері туралы ақпаратты қамтитын жалпы басқару қатесін қалыптастыру болып табылады. Тағы бір мәселе-мақсатты шарттарға кепілдік беру қажеттілігі: ең алдымен, параметрлер мен күйдің рұқсат етілген аймағында берілген бастапқы шарттарда жүйенің барлық траекторияларының орнықтылық шарттары. Тікелей адаптивті басқару алгоритмдері бар жүйелер теориясына шетелдік ғалымдар да ерекше үлес қосты: I.D. Landau, R.V. Monopoli, K.S. Narenda, B.Widrow және басқалары, сондай-ақ ресейлік: В.А. Якубович, В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков [13-15].

Адаптивті сәйкестендіруге негізделген регуляторды реттеу әдістері оңтайландыру мәселелерін шешуді жеңілдеткенімен, реттеу уақыты ұзақ. Бұл жағдайларда ауыспалы құрылымды регуляторды да, сәйкестендірудің ішкі жүйесін де қамтитын біріктірілген адаптивті регулятор [16] қолданылады. Адаптивті регуляторды синтездеу кезінде басқару объектісінің ағымдағы координаттары туралы мәліметтердің толық еместігі де ескеріледі. Объектінің күйі туралы ақпараттың жетіспеушілігі объект моделінің белгісіз салыстырмалы реті бар және оның тек шығысын (туындыларды емес) өлшеу кезінде адаптивті басқару әдістерін әзірлеуді қамтиды. Белгілі әдістердің кемшілігі-ұсынылған алгоритмдердің күрделілігі (рет жоғары), бұл оларды жүзеге асыруды қиындатады және шуылға төзімділікті төмендетеді. Бұл кемшілікті жоюға параллель компенсаторды (шунттау буыны, немесе шунт) қолдануға негізделген [17] шунттау әдісі де дамыды. Әдістің негізгі идеясы кеңейтілген объектінің қатаң минималды фазалық қасиетін қамтамасыз ету болып табылады (нақты басқару объектісі мен компенсаторды қамтиды [18]).

Сырғымалы құрылымды басқару жүйелерін құрудың негізгі идеясы ауыспалы басқару заңдарын (тұйық жүйенің әртүрлі құрылымдарына сәйкес келетін) қолдану болып табылады.

Ауыстыру таңдалған ауыстыру функциясына сәйкес басқару объектісінің күйі туралы ағымдағы ақпарат негізінде жүзеге асырылады. Басқару құрылғысын құрудың бұл принципі құрылымдардың әрқайсысының пайдалы қасиеттерін пайдалану нәтижесінде басқару мүмкіндіктерін едәуір кеңейтеді және олардың ешқайсысына тән емес жаңа қасиеттерді алуға мүмкіндік береді. Ауыспалы құрылымды басқару жүйелерін құрудың әртүрлі тәсілдері бар. Ең әмбебап және дамыған әдіс-жүйенің күй кеңістігіндегі бейнелеу нүктесі таңдалған бет бойымен қозғалатын тұйық сырғымалы режімдер жүйесінде мәжбүрлеп ұйымдастыру. Бұл бетке нүкте өтпелі процес басталғаннан кейінгі соңғы уақытында түседі, содан кейін сол жерде қалады. Нәтижесінде тұйық жүйенің әрекеті басқару объектісінің параметрлеріне аз тәуелді (немесе мүлдем тәуелді емес), ал регуляторды синтездеу кезінде таңдалған ауысу бетінің теңдеуімен анықталады. Осылайша, мәжбүрлі сырғымалы режімдер жүйенің параметрлік және координаталық қоздыруларға сезімталдығын төмендетуге, сондай-ақ берілген әсерге қатысты инварианттылыққа қол жеткізуге мүмкіндік береді. Тұйық жүйенің қажетті динамикалық қасиеттері синтез кезінде берілген түрдегі ауысу бетін дұрыс таңдаумен қамтамасыз етіледі. Бұл жағдайда регулятордың синтезі екі қарапайым кезеңге бөлінеді: орнықты сырғымалы режімді тудыру; қажетті қасиеттері бар қозғалыс бетін таңдау.

Сырғымалы режімдер объектінің параметрлерін және күйін сәйкестендіру үшін де пайдалануға болады. [19, 20] жұмыстарда шунттау әдісі, сырғымалы режімдерді және сәйкестендіру процедурасын бірге пайдалануға негізделген тәсіл ұсынылады. Басқару алгоритміне мәжбүрлі сырғымалы режімдері бар айнымалы құрылымды регулятор, параметрлік сәйкестендіру алгоритмі және параллель компенсатор (немесе шунт) кіреді. Әдісті қолдану объектінің әрекеті туралы ағымдағы ақпараттың толықтығына қойылатын талаптарды айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді. Біріктірілген адаптация алгоритмі басқару объектісінің параметрлері кең ауқымда өзгерген кезде тұйық жүйенің берілген динамикалық қасиеттерін қамтамасыз етеді.

Қазіргі таңда әдебиеттердің басым бөлігінде адаптивті және оптимал басқару теориялары бойынша деректер келтірілген. Олардың кейбіреулері мәселенің теориясы бойынша ғылыми еңбектерге сүйене отырып, тек адаптация туралы жалпы түсінік береді. Мәселен, мақалалар жинағында [21] адаптация мәселелерінің әртүрлі аспектілері қарастырылады, адаптация мен оңтайландыру арасындағы байланыс талқыланады. [22] жұмыс авторлары аддитивті және мультипликативті бөгеуілдерге ұшыраған нақты динамикалық объектілерді сәйкестендірудің адаптивті жүйелерін құру, реттелетін параметрлердің өзара әсерін азайту мәселелерін баяндайды. [23] ұжымдық монографиясы радиотехникалық және электрондық құрылғыларда адаптивті сүзгілердің теориясы, құрастыруы және қолдануына арналған.

Басқа авторлар адаптивті басқаруды тікелей ұшу аппараттарын басқару жүйелеріне қолдануды қарастырады және автоматты басқарудың іздестірусіз адаптивті жүйелерін есептеудің әртүрлі әдістерін ұсынады. [24] жұмыста ұшқышсыз ұшатын аппараттарын жасау тәжірибесінен мысалдарды қарастырады, ұшу аппараттарына адаптивті басқарудың практикалық іске асырылуы көрсетілген. [25, 26] еңбектің авторлары ұшу аппараттарын автоматты басқарудың тезәрекетті іздестірусіз адаптивті басқару жүйелерінің құрылымын қалыптастыру принциптері мен параметрлерін есептеу әдістерін мазмұндаған. Мұнда басқару объектісінің айнымалы параметрлерін сәйкестендірудің әртүрлі әдістері келтірілген, баяу өзгеретін параметрлері бар іздеусіз адаптивті жүйелерді құру принциптері қарастырылған.

Адаптивті басқару жүйелері басқару практикасында кеңінен таралды, сондықтан да көптеген авторлар [27] өз еңбектерінде олардың жіктелуін, құру, талдау және қолданудың жалпы принциптерін келтіреді.

Адаптивті басқару жүйелерінің сан алауандығына байланысты, кейбір авторлар өз еңбектерінде тапсырмалар шеңберін шектеп және жүйенің тек жеке түрлерін терең қарастырады. Мәселен, кейбір еңбектерде тек іздестірусіз жүйелерге немесе қадағалаушы жүйелерге арналған мәселелер [28] қарастырылады, ал [29] авторлары тек эталондық модельдері бар жүйелерге терең тоқталады.

Адаптивті жүйелерді екі үлкен класқа бөлуге болады: өздігінен ұйымдастырылатын және өздігінен реттелетін.

Өздігінен ұйымдастырылатын жүйелерде (ӨҰЖ) жұмыс істеу процесінде басқару алгоритмі (оның құрылымы мен параметрлері) қалыптасады, бұл жүйені алға қойылған басқару мақсаты (БМ) тұрғысынан оңтайландыруға мүмкіндік береді. Мұндай есеп, мысалы, ағымдағы режімді анықтау үшін априорлық ақпарат жеткіліксіз болған кезде, жұмыс режіміне байланысты басқару объектісінің құрылымы мен параметрлері өзгерген жағдайда туындайды. Объектінің мүмкін құрылымдарының кең класында тұйық жүйеге барлық жұмыс режімдерінде БМ-ға қол жеткізуді қамтамасыз етуге қабілетті басқару алгоритмінің жалғыз құрылымын таңдауға үміттену қиын. Яғни, мұнда регулятордың еркін құрылымы кезіндегі синтезі қарастырылады. Есептің қойылымы күрделі, сондықтан оны қарапайым алгоритмдермен шешу мүмкін болмайды, демек, қазіргі уақытта мұндай жүйелерді практикаға кеңінен енгізуге мүмкіндігі аз.

Басқару объектісінің құрылымы белгілі және өзгермейтін, ал жұмысы бірқатар белгісіз параметрлерге байланысты болса, бұл есеп өздігінен бейімделетін жүйелер (ӨБЖ) класында шешіледі, мұндай жүйелерде регулятордың құрылымы берілген (алдын-ала таңдалған) және оның тек коэффициенттерін реттеу алгоритмін (адаптация алгоритмі) анықтау қажет.

А.А. Красовский еңбегінде адаптивті жүйелерді іздестіру және іздестірусіз жүйелер деп бөледі [30, 31]. Адаптивті іздестіру жүйелерінде регулятордың реттелетін параметрлерінен тәуелді эктремал сипаттамасы бар және өлшенетін, жүйе сапасының кейбір көрсеткіші қалыптастырылады. Экстремалды нүктенің орны белгісіз, сонымен қатар объектінің математикалық моделінің және сыртқы әсерлердің өзгеруімен басқару жүйесіне бірге өзгереді. Тапсырма реттелетін параметрлердің жиынтығында жүйенің сапа көрсеткішінің экстремал нүктесін табумен шектеледі, ол үшін жүйеде іздеу процесі ұйымдастырылады, әдетте реттелетін параметрлерді кішігірім іздеумен шектеледі.

Авиацияда басқарудың адаптивті іздестіру жүйелерін қолдану бойынша ұсыныстар кең таралған [32], бірақ экстремалды реттеу жүйесі басқа салаларда негізгі практикалық қолданысын тапты [33]. Ұшу аппараттарын басқару жүйелерінде экстремалды сипаттамаға ие сапа функциясын көрсету әрдайым мүмкін емес; егер мұндай функция бар болса, дәлірек айтсақ, оны тікелей өлшеуге қол жетімді емес; егер бұл кедергіні айналып өтуге болатын болса, онда іздеу процесін қалыптастыру әрдайым мүмкін емес, ал егер ол қалыптастырылса, онда уақыт өте келе әрдайым адаптивті іздестіру жүйесі экстремумның ығысуына ілесе бермейді және мұндай адаптивті іздестіру жүйесінің динамикалық сипаттамалары оның инерция дәрежесіне және кездейсоқ бөгеуілдер мен қоздырулар деңгейіне байланысты.

Болжағыш модельдер арқылы адаптивті басқару. Соңғы жылдары математикалық оңтайландыру әдістеріне негізделген сызықты емес объектілерді басқару жүйелерінің есептерін шешудің заманауи әдістерінің бірі болжағыш модельдер арқылы адаптивті басқару болып табылады (Model Predictive Control – MPC) [34-41]. Практикалық адаптивті MPC басқару саласы айтарлықтай кеңейіп, мұнай-химия және энергетика өндірісіндегі, аэроғарыштық зерттеулердегі, соның ішінде қазіргі заманғы электр жетектері мен электр электроникасы жүйелерінің тізбектерін басқарудағы әртүрлі технологиялық жүйелер мен өнеркәсіптік қондырғыларға таралды. Алғаш рет бейсызық объектілерді басқарудың адаптивті MPC синтезінің міндеттері 1970 жылдардың соңында қалыптасты. Соңғы онжылдықта бұл әдіс теоретиктер мен практиктердің маңыздылығына ие болды. Динамикалық жүйелерді басқарудың дәстүрлі әдістерімен салыстырғанда адаптивті MPC басқарудың артықшылықтары: әр түрлі басқару жүйелеріне қолданылуы мүмкін – қарапайым және күрделі, соның ішінде көрсетілген сызықтық емес; үлкен тұрақсыз кідірісі бар көпөлшемді және көп арналы басқару жүйелері үшін жүзеге асырылуы мүмкін; кескінді өңдеу және реттеу салаларында сәтті қолдануға болады, мұнда сапаның басты талаптарының бірі – басқару процесінде функционалдық сапа; басқару объектісінің басқару және шығыс сигналдарына қатысты ауытқулар немесе шектеулер болған кезде басқару жүйесін оңтайландыруға мүмкіндік береді; 5) адаптивті MPC басқару оңтайландыру алгоритмін қалыптастыру және есептеу үшін жоғары жадты қажет етеді.

Адаптивті MPC күйінің кері байланысын басқарудың математикалық тәсілінің идеясы шектеулі болжау көкжиегінде ең жақсы болжамды траекторияны қамтамасыз ететін басқарушы әсерлердің оңтайлы реттілігін табу болып табылады. Сызықты емес объектілерді адаптивті басқаруды синтездеу міндеті үш негізгі қадамнан тұрады. Алдымен кеңейтілген сызықтық әдісті қолдана отырып, сызықты емес объектінің дифференциалдық теңдеулерін әр басқару интервалында шамамен сызықтық жүйелермен ұсынуға болады. Екінші қадамда сызықтық модельдерге ие бола отырып, басқару объектісінің шығысы бойынша болжамды модельдерді белгілі бір қадамдар санына құруға болады. Сонымен, квадраттық бағдарламалау алгоритмі бойынша сапа функционалын оңтайландыруды есептеу басқару жүйесіне оңтайлы басқару әсерін анықтау үшін болжамды модельдер негізінде жүзеге асырылады.

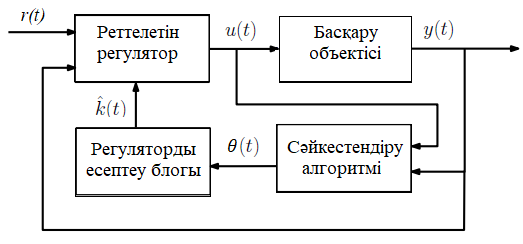
1.2.1 Іздестірусіз өздігінен бейімделетін жүйелер

Іздестірусіз жүйелерде арнайы іздеу сигналдары жоқ, өйткені басқару құрылғысының параметрлерін реттеу адаптация алгоритмдері арқылы жүзеге асырылады, олардың айқын көрінісі берілген басқару мақсатының орындалуын қамтамасыз ететін шарттардан аналитикалық түрде алынады. Іздеудің болмауы іздестірусіз әдістердің артықшылықтарының бірі болып табылады, өйткені басқару құрылғысының параметрлерін бейімдеу уақыты анық қысқарады. Бұл әдістерде іздестіру жүйелерін құрудан қарағанда бастапқы ақпараттың көбірек көлемін қажет етеді [42-44].

Адаптивті іздестірусіз жүйелер кері байланыс принципінің оң қасиеттерін қолдауға негізделген: іздестіру жүйелерден айырмашылығы мұндай жүйелерде көрсеткіш ізделмейді, ал керісінше объектінің математикалық моделі мен сыртқы әсерлері болжап білуге болмайтын өзгеріске ұшыраған жағдайда регулятордың параметрлерінің немесе құрылымының мақсатты өзгеруіне байланысты өзгермейтін (немесе қажетті болжамды түрде өзгеретін) көрсеткіш алдын-ала беріледі. Осындай көрсеткіштер ретінде басқару жүйесінің функционалдық жұмыс қабілеттілігін анықтайтын, оның сипаттамалары болуы керек.

Мұндай көрсеткіш біреу және маңызды көрсеткіш болуы мүмкін, мысалы, тұйық жүйенің жиілік реакциясы немесе бір уақытта бақыланатын көрсеткіштердің тұтас жиынтығы, мысалы, белгілі бір қоздыруларға қатысты инварианттық, дербестік немесе керісінше, көп байланысты жүйенің жеке арналарының өзара байланысының берілген дәрежесі; операторлық анықтылық және т.б. [45]. Бұл жағдайда басқару жүйесінің қажетті жұмыс көрсеткішін біле отырып және нақты ағымдағы көрсеткішті өлшей отырып, оларды салыстыруға, олардың сәйкессіздік өлшемін енгізуге және кері байланыс принципінде бұл сәйкессіздік шамасын нөлге немесе ең төменгі рұқсат етілген мәнге дейін азайтуға болады.

Өз кезегінде іздестірусіз өздігінен бейімделетін жүйелер (ІӨБЖ) тікелей немесе жанама адаптивті басқару схемаларына сәйкес құрылады. Тікелей адаптивті басқаруда жүйенің жұмыс істеу процесінде өлшенетін сипаттамалардың сәйкессіздігі негізінде регулятордың коэффициенттері сәйкессіздікті нөлге немесе рұқсат етілген шамаға дейін төмендететіндей етіп өзгертіледі. Жанама адаптивті басқару жүйелерінде басқару объектісі алдын-ала сәйкестендіріледі, содан кейін алынған ақпарат негізінде регулятордың коэффициенттерінің қажетті мәндері есептеледі. Жалпы жағдайда сәйкестендіру адаптивті жүйелердің құрылымында басқару объектісінің белгісіз параметрлерін бағалауын өндіретін сәйкестендіру блогы (алгоритмі), регулятордың параметрлерін және нақты реттелетін регуляторды есептеу блогы болады (1.1-сурет) [5, c.23]. Объект параметрлерін бағалау нақты параметрлерге ұмтылған кезде, тұйық жүйенің қасиеттері қажетті динамикаға жақындайтыны анық.



Сурет 1.1 – Cәйкестендіру адаптивті басқару жүйесінің схемасы

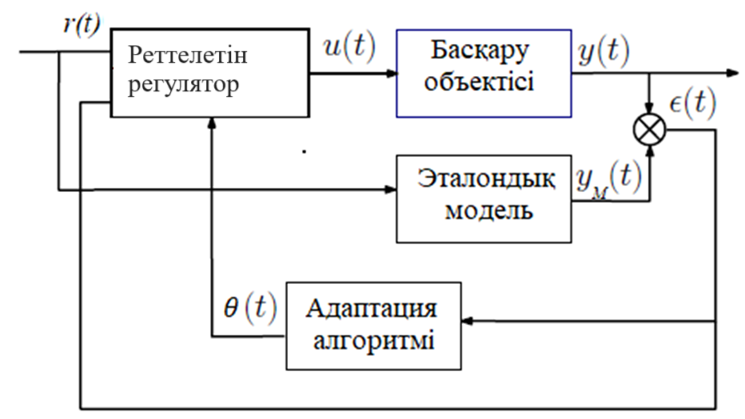
Сәйкестендіру екі тәсіл негізінде жүзеге асырылуы мүмкін деп айтуға болады: болжау қателіктерін минималдау немесе корреляциялық [46]. Бірінші тәсіл үшін бағалауды қалпына келтіру оңтайландыру мәселесін шешумен тең, мұнда минимумдалған мақсатты функция ретінде модель параметрлерін ағымдағы бағалау үшін қалпына келтірілген шығыс айнымалының мәні мен оның өзекті өлшемдері арасындағы сәйкессіздік нормасы әрекет етеді. Бұл норманың түрін таңдау, сондай-ақ өлшемдерді алдын-ала іріктеу әдістері болжау қатесін минималдау принципіне негізделген сәйкестендіру алгоритмдерінің барлық әртүрлілігін анықтайды.

Негізгі идеяның қарапайымдылығына қарамастан, жанама адаптивті жүйелері бірнеше маңызды кемшіліктерге ие. Біріншіден, жоғарыда сипатталған стратегия объектіні зерттеуге қосымша уақытты қажет етеді, бұл дұрыс басқаруды дамытуда кідіріске әкеледі. Екіншіден, реттелетін регулятордың және параметрлерді бағалау блогының жұмыс істеу мақсаттары негізінен әртүрлі. Регулятордың жұмысының мақсаты –  реттелетін айнымалының қажетті әрекетін қамтамасыз ету, ал сәйкестендіру блогының мақсаты - басқару объектісінің параметрлерін бағалау. Бұл тұрғыда параметрлерді реттеу тізбегі басқарудың негізгі мақсатына сәйкес ашық болып шығады, осыдан барлық жағымсыз салдарлар туындайды. Атап айтқанда, реттелетін  айнымалыны басқарудағы үлкен қателік  параметрлік бағалары бойынша жинақталу жылдамдығына ешқандай әсер етпеуі мүмкін және өз кезегінде регуляторды реттеу процестерін жеделдетпеуі мүмкін [5, с. 23].

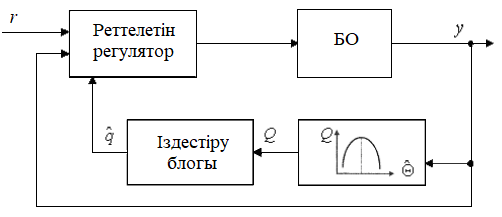
Тікелей адаптивті басқару жүйелерін құру кезінде, [5, с. 24] сәйкес, компенсация тәсілдеріне негізделген, қойылған басқару мақсатына жету шарттарын анықтаудың бірнеше аналитикалық әдістері қолданылады: инварианттық принцип немесе эталондық модельмен салыстыру. Осындай жүйелерде басқару мақсаты реттелетін айнымалының  эталондық мәнімен, немесе  сандық сапа критерийімен беріледі.  реттелетін айнымалының эталондық мәнін өндіру үшін арнайы динамикалық блок-эталондық модель қолданылады (1.2-сурет) [5, c.24]. Адаптивті басқару жүйелерінде эталондық модельді нақты динамикалық буын арқылы айқын түрде көрсетуге болады; немесе орныққан режімде жүйенің қажетті қасиеттерін сипаттайтын берілген коэффициенттер немесе қондырғылар түрінде, және нақты техникалық блок түріндегі физикалық көрінісі жоқ айқын емес көрсетуге болады. Айқын және айқын емес эталондық модельдері бар адаптивті жүйелердегі басқару мақсаты - басқару жүйесінің динамикасын эталондық модельге максималды жуықтауын қамтамасыз ету болып табылады. Реттелетін регулятор оның коэффициенттері басқару объектісінің параметрлеріне сәйкес келген кезде тұйық жүйе эталондық модель сияқты әрекет ететіндей етіп құрылады. Содан кейін жүйедегі параметрлік сәйкессіздіктер туралы ақпарат эталондық модельді бақылау қатесі болады . Сонымен қатар, адаптация алгоритмінің (немесе регулятор коэффициенттерін реттеу алгоритмінің) жұмысының мақсаты ретінде  қатені минималдау болып табылады. Осылайша, регулятор және оның адаптация алгоритмі эталондық модельді бақылау қателігін азайту - бір мақсатпен біріктіріледі. Бұл тәсілдің сәйкестендіру тәсілінен айырмашылығы, бұл жағдайда объектінің белгісіз параметрлерін бағалау процедурасы қажет емес, тұрақтандыру, бақылау немесе оптимал синтезі болсын, регулятордың коэффициенттері басқарудың негізгі мақсатын орындау шартынан тікелей реттеледі. Бейімделу-басқару жүйесінің номиналды (эталондық) режімінің параметрлеріне қатысты басқару объектісінің көптеген параметрлерінің шашырауы кезінде басқару жүйесінің параметрлерін берілген басқару жүйесінің эталондық моделіне бейімдеу кезінде басқару жүйесінің динамикалық сипаттамаларын сақтау мүмкіндігін сипаттайтын негізгі басқару тізбегі құрылымының қасиеті.

Сәйкестендірусіз адаптивті жүйелерді құрудың балама тәсілі - басқару объектісінің параметрлеріне регулятор коэффициенттері сәйкес келген кезде мәні минимумға (максимумға) жететін  сапасының кейбір критерийін қалыптастыру. Содан кейін басқару объектісінің параметрлерін реттеуді сапа критерийін минималдау (максимизациялау) шартынан жүргізуге болады. Осы принципке негізделген өздігінен реттелетін жүйелер экстремалды реттеу жүйелерінің атауларын алды. Олардың құрылымы 1.3-суретте көрсетілген [5, с. 24].

1.1, 1.2 және 1.3-суреттерінде көрсетілген құрылымдық схемаларды салыстыра отырып, адаптивті (өздігінен бейімделетін) жүйелердің негізгі ерекшелігі-регулятордың параметрлерін реттеу тізбегінен пайда болған қосымша кері байланыстың болуы. Мұндай кері байланыс сигналдық кері байланысқа қарағанда тікелей регулятор құрған параметрлік кері байланыс деп аталады.



Сурет 1.2 – Эталондық моделі бар адаптивті басқару жүйесінің схемасы



Сурет 1.3 – Экстремалды реттеу жүйесі

**1.3 Адаптивті басқару жүйесін синтездеу есебінің қойылымы**

Адаптация алгоритмдерін синтездеу кезінде «жалпыланған реттелетін объект» ұғымын қолдану ыңғайлы (1.4-сурет) [47], оның құрылымы жүйенің барлық өзгермейтін бөлігін қамтиды (жалпыланған объект және негізгі контурдың регуляторы). Басқарудың жалпыланған объектісіне басқару объектісі (БО), орындаушы, өлшеуіш, түзтуші құрылғылар, жүйенің реттелетін моделі және басқа да жүйе элементтері кіреді.

Адаптация алгоритмін синтездеуге арналған бастапқы деректер - жалпыланған реттелетін объект теңдеуі және басқару мақсаты. Жалпыланған реттелетін объект төмендегі теңдеулермен берілген:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |
|  |  |
|  | (1.2) | |

мұнда , , ,  - жалпыланған реттелетін объектінің күй, басқару, сыртқы кіріс және шығыс векторлары;

,  - белгілі вектор-функциялар;

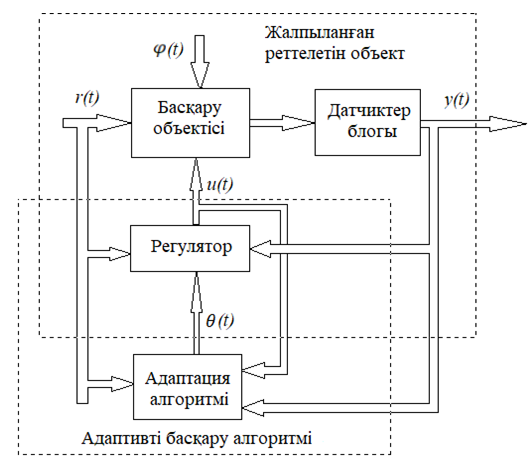
 – басқару объектісіне қоздыру әсері;

 - анықталмаған параметрлер векторы, ол әдетте объектінің математикалық сипаттамасын құрайтын теңдеулер коэффициенттерінен, сондай-ақ сыртқы әсерлердің өзгеруін анықтайтын коэффициенттерден тұрады.  – векторы көбінесе, квазистационар болып саналады.

Қарапайым жағдайда басқару мақсаты (БМ) мақсатты теңсіздік түрінде беріледі

, ,  кезінде,

мұнда  – мақсатты функция.



Сурет 1.4 – Адаптивті басқару жүйесінің құрылымдық схемасы

Қадағалау есептерінде мақсатты функция ретінде объектінің нақты және қажетті қозғалыс траекториясы арасындағы  сәйкессіздік функциясы таңдалады. Жүйенің қажетті жұмысы эталондық модель арқылы берілуі мүмкін

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.3) |

мұнда  -эталондық модельдің күй векторы.

Адаптивті басқару жүйесін синтездеу есебі әрбір  үшін (1.1), (1.2), (1.5), (1.6) жүйедегі (1.3) БМ-ға жетуді қамтамасыз ететін келесі түрдегі екі деңгейлі алгоритмдардың берілген класынан басқару алгоритмін табудан тұрады

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.5) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.6) |

мұнда ,  – кейбір операторлар;

 - регулятор параметрлерінің векторы.

Адаптивті регуляторды синтездеу процесін келесі кезеңдерге бөлуге болады.

1-ші кезең. «Идеал» басқару заңын таңдау. Көрсетілген басқару мақсатына жетудің негізгі мүмкіндігін қамтамасыз ететін басқару заңы табылады. параметрлер векторы белгілі деп болжанады. Алынған басқару заңы тікелей жүзеге асырыла алмайды, өйткені ол, әдетте, объектінің белгісіз параметрлерінен тәуелді. Бұл мағынада оны басқарудың идеалды заңы деп атауға болады.

2-ші кезең. Реттелетін параметрлерді және адаптация мақсатын таңдау. Табылған идеал басқару заңы тәуелді болатын белгісіз параметрлер реттелетін параметрлермен алмастырылады. Нәтижесінде басқару алгоритмі алынады, оған енді белгісіз параметрлер кірмейді, сондықтан оны регулятормен іске асыруға болады.

Тікелей тәсіл кезінде реттелетін параметрлер тікелей басқару заңының коэффициенттері (яғни төменгі деңгейдің регуляторы) болып табылады. Реттелетін параметрлердің саны мүмкіндігінше ең аз таңдалады.

Реттелетін параметрлер таңдалғаннан кейін адаптация мақсаты қойылады. Бұл адаптация алгоритмін одан әрі әзірлеуге негіз болатын кейбір қосымша мақсатты шарт. Тікелей тәсілде адаптация мақсаты бастапқы, немесе қосымша басқару мақсатымен сәйкес келеді.

Басқару жүйесінің қажетті қасиеттері әдетте эталондық модельмен беріледі [48-51]. Бұл модель жүйеге командалық (беруші) әсерге берілген реакциясы бар белгілі бір динамикалық буын түрінде айқын қосылуы мүмкін, немесе адаптация алгоритмінің кейбір «тағайындамалары» (параметрлері) түрінде айқын емес болуы мүмкін. Тиісінше, бірінші типтегі жүйелер айқын эталондық моделі бар жүйелер, ал екінші типтегі жүйелер айқын емес эталондық моделі бар жүйелер деп аталады.

Айқын эталондық моделі бар жүйелерді, өз кезегінде, мақсатқа жету тәсіліне қарай параметрлік және сигналдық адаптациясы бар жүйелерге бөлуге болады.

Сәйкестендіру (жанама) тәсілінде объектінің белгісіз параметрлері және сыртқы әсерлердің сипаттамаларының регуляторын синтездеу үшін қажетті мәндерді бағалау жүзеге асырылады. Әрі қарай, біріктірілген синтез процедурасы орындалады-параметрлерді бағалау басқару заңына кіретін коэффициенттерді есептеу үшін қолданылады.

Реттелетін параметрлері таңдалса, адаптация мақсаты қойылады. Бұл адаптация алгоритмін одан әрі дамытуға негіз болатын кейбір көмекші мақсатты шарт. Тікелей тәсілде адаптация мақсаты басқарудың бастапқы немесе көмекші мақсатымен сәйкес келеді. Сәйкестендіру тәсілінде адаптация мақсаты әдетте белгісіз параметрлердің «нақты» мәндеріне сәйкестігін немесе жақындығын қамтамасыз ету болып табылады.

Бұл тәсілде адаптацияның көмекші мақсаты, мысалы, басқару объектісі мен объектінің реттелетін моделінің сыртқы әсерге реакцияларының сәйкес келуі ретінде көрсетілуі мүмкін. Реттелетін модель басқару объектісінің теңдеулеріне ұқсас теңдеулермен сипатталады, онда белгісіз параметрлер олардың (реттелетін) бағалауларымен ауыстырылады.

Сигналдық реттеуі бар жүйелерде адаптация әсері регулятордың параметрлерін өзгертпестен оның коэффициенттерін арттыру немесе сырғымалы режімдерді қамтамасыз ету арқылы қол жеткізіледі. Мұндай жүйелерді жүзеге асыру оңайырақ, бірақ олар қажетті әрекетті объект параметрлерінің мәндерінің салыстырмалы түрде санаулы диапазонында ғана қамтамасыз етеді.

Параметрлік адаптациясы бар жүйелерде мақсатқа регулятордың параметрлерін өзгерту арқылы жетеді. Бұл жүйелер әмбебап болып келеді, дегенмен олардың құрылымы күрделірек болады. Адаптация алгоритмдері жүйе мен эталондық модельдің шығыстарының арасындағы сәйкессіздік сигналын қолданады. Мұндай жүйелердің күрделілігі реттелетін параметрлер санымен анықталады.

3-ші кезең. Адаптация алгоритмін таңдау. Белгісіздік жағдайында басқару мақсатын бірден орындауға қол жеткізу мүмкін емес болғандықтан, адаптация алгоритмі мақсаттың орындалуына жақындап, реттелетін параметрлерді біртіндеп өзгертеді.

4-ші кезең. Адаптивті жүйенің жұмыс қабілеттілігін зерттеу. Адаптивті регуляторды синтездеудің соңғы кезеңі қоздырулардың сипатын, сыртқы әсерлерді, объектінің күй айнымалыларына шектеулерді және синтез кезінде ескерілмеген басқа факторларды ескере отырып, жүйенің жұмысқа қабілеттілігін зерттеу болып табылады. Бұл кезеңде адаптация алгоритмінің параметрлері нақтыланады, және оның түрленуі мүмкін.

**1.4 Адаптивті басқару жүйелерін синтездеу тәсілдері**

Адаптивті жүйелерді синтездеу тәсілдерін [47, с. 383; 52] эвристикалық және теориялық деп бөлуге болады. Эвристикалық тәсілдерде адаптивті жүйесінің орнықтылығының қатаң негіздемесі және қарастырылатын әдістердің жарамдылық шарттары жоқ. Бұл тәсіл адаптивті жүйелердің дамуының алғашқы кезеңіне тән болды.

Теориялық (қатаң негізделген) тәсілдерді екі класқа бөлуге болады: дәл және жуықталған. Адаптивті жүйенің екі деңгейлі схемасына сәйкес есеп екі кезеңге бөлінеді: негізгі контур және адаптация контурының синтезі.

Негізгі контурды синтездеудің дәл тәсілдерінің ішінде келесі тәсілдер кеңінен таралған:

1) инварианттылық тәсілі, эталондық модель мен басқару объектісінің моделінің оң жақ бөліктерінің теңдігінен «идеалды» басқаруды таңдау идеясын жүзеге асырады;

2) басқарудың модалды тәсілі, мұнда «идеал» басқару өтпелі процестің сапасының қажетті көрсеткіштерін ескере отырып таңдалады;

3) оптимал синтез, мұнда сапаның кейбір асимптотикалық көрсеткішінің (*t* → ∞ кезінде) басқарушы әсері бойынша оңтайландыру есебі шешіледі.

Жуықталған тәсілдері модельді жеңілдетуге және жеңілдетілген модель бойынша синтез жүргізуге негізделген бөлшектеп байланыстыру әдістеріне негізделген. Жеңілдету және бөлшектеу үшін қоздырулар теориясының әдістері, Ляпуновтың скалярлық және векторлық функцияларының әдістері, сызықтандыру, ретті төмендету, қоздыруларды жою қолданылады. Жүйенің жылдам және баяу қозғалыстарын ерекшелеуге негізделген тәсіл танымал, синтез баяу қозғалыстарды сипаттайтын модель бойынша жүзеге асырылады. Мұндай әдістерге мыналар жатады:

1) орташалау тәсілі, бұл тәсіл Н.М. Крыловтың, Н.Н. Боголюбовтың және Б. Ван дер Полдың еңбектерінде бастау алды;

2) сингулярлық қоздыру әдісі. Бұл саладағы іргелі нәтижелер А.А. Красовский, Л.С. Понтрягин, А.Н. Тихонов және олардың шәкірттеріне тиесілі.

*Адаптация алгоритмдерін синтездеудің негізгі тәсілдері:*

1) градиент тәсілдері. Реттелетін параметрлерді өзгерту алгоритмі сәйкессіздік қатесінен мақсатты функцияның антиградиенті бағытында құрылады. Алгоритмдер объектінің параметрлеріне тәуелді сезімталдық функциясын есептеуді қажет етеді, бұл адаптивті басқару есебінің қойылымына қайшы келеді. Мұны эталондық модельді қолдана отырып, сезімталдық функциясын жуықтап есептеу арқылы шешуге болады;

2) Ляпунов функцияларын қолдануға негізделген тәсілдер. Бұл топтың көптеген алгоритмдерін жылдамдық градиентінің схемасы бойынша алуға болады. Әдісте мақсатты функцияның уақыт бойынша өсу градиенті бар бағытқа жақын болатын мақсатты функцияның градиенті пайдаланылады. Адаптация алгоритмі мақсатты функцияның өзгеру жылдамдығынан антиградиент бағытта құрылады. Әдіс мақсатты функция мен реттелетін және идеалды параметрлер арасындағы сәйкессіздігі квадратының қосындысы түріндегі Ляпунов функциясының болуын қамтамасыз етеді;

3) гиперорнықтылық теориясына негізделген әдістер. Адаптация контурының синтезі адаптивті регудяторы бар жүйенің гиперорнықтылық жағдайынан жүзеге асырылады;

4) сырғанаушы режімдерді ұйымдастыруға негізделген әдістер. Сырғанаушы режім пайда болған кезде жүйе параметрлік ауытқулар мен бөгеуілдерге қатысты инварианттық қасиеттерге ие болады. Бұл топқа жылдамдық градиентінің схемасы негізінде алынған сигналдық адаптациясы бар жүйелер қосылады;

5) «шексіз үлкен» күшейту коэффициентін енгізуге негізделген әдістер. Әдісте шексіз үлкен коэффициентті қолданады, сол арқылы жүйенің беріліс функциясы эталондық модельдің беріліс функциясына балама болады. Әдістің негізгі кемшіліктері: жоғары күшейту коэффициенті кезінде орнықтылықтың жоғалуы, шуға төзімділік нашар болады.

Төртінші және бесінші топтың әдістеріне негізделген жүйелер көбінесе адаптивті қасиеттері бар жүйелер немесе пассивті адаптациясы бар жүйелер деп аталады, өйткені оларда параметрлерді реттеу контуры болмайды. Бұндай жүйелері параметрлік қоздыруларды сезбеудің қарапайым жолдары болып табылады. Яғни сезімталдықты төмендету үшін құрылымның аз өзгеру қасиетін пайдалануға және негізгі тізбектің резервтерін пайдалануға негізделген. Ауыспалы құрылымы бар жүйелер теориясын С.В. Емьяновтың жетекшілігімен ғалымдар тобы әзірледі. Сырғымалы режімдердегі олардың жұмысына зерттеулер жүргізгеннен кейін үзілісті басқарылатын автоматты жүйелерге деген қызығушылық айтарлықтай өсті. Үзілісті басқарылатын жүйелердің практикалық құндылығы олардың бейімделуін, инварианттылығын, сызықтануын және ретін төмендетуін қамтамасыз ету мүмкіндігімен анықталады. Бұл ретте басқару шектеулі уақыт ішінде және түпкілікті басқару әсерлерінде тұйық жүйенің қажетті қозғалысын қамтамасыз етеді. Айнымалы құрылымды жүйелер теориясы бойынша зерттеу нәтижелерін жүйелі түрде ұсынылған.

ХХ ғасырдың 60-жылдарының басынан бастап Ляпуновтың тікелей әдісі негізінде синтезделген адаптивті жүйелер пайда бола бастады. Олар іздестірусіз адаптивті жүйелерді практикалық қолдануға арналған теорияны дамытуда ең танымал болып келеді [53-57]. Ляпуновтың тікелей әдісіне сәйкес Ляпунов функцияларының бірнеше түрлі нұсқаларын таңдауға болады, олар сәйкесінше бір реттеу жүйесі үшін орнықтылық жағдайларының әртүрлі нұсқаларын бере алады. Сонымен қатар, осы шарттардың кейбіреулері кеңірек болуы мүмкін, сондықтан Ляпуновтың тікелей әдісі жалпы бейсызықты жүйенің орнықтылығының жеткілікті шарттарын алуды қамтамасыз етеді, яғни Ляпунов теоремасының шарттары орындалса жүйе орнықты болады, бірақ бұл шарттар жүйенің параметрлері бойынша орнықтылығының барлық ауқымын қамтымауы мүмкін. Бейсызықты жүйелердегі басқарудың техникалық есептерін шешу үшін Ляпуновтың әр нақты функциясы үшін Ляпуновтың тікелей әдісі нақты адаптация алгоритмінің құрылымын береді, ал құрылымдар жиынтығының кеңеюі Ляпуновтың функциялар жиынтығының кеңеюімен байланысты, оны құру үшін тек бағдарланған ұсыныстар бар, бірақ ортақ әдістеме жоқ.

60-жылдардың басында В.М. Попов басқару жүйелер теориясында жаңа гиперорнықтылық ұғымын енгізді және оны жүйелердің тиімділігі ұғымымен біріктіре отырып, гиперорнықтылық критерийі деп аталатын бірыңғай әдісті тұжырымдады [58]. Якубович-Калман леммасының көмегімен ұсынылған гиперорнықтылық критерийінің Ляпуновтың тікелей әдісінен айырмашылығы, жалпы бейсызықты жүйенің орнықтылықтың жеткілікті шарттары ғана емес, сонымен қатар қажетті шарттарды да қалыптастырады. Гиперорнықтылық критерийі негізінде И.Д. Ландау адаптивті басқару жүйелерін синтездеу әдісін жасады, оның жұмысында [59] егер гиперорнықтылық әдісімен алынған мақсатқа жету шарттары орындалса, онда тұйық жүйеде арнайы түрдегі Ляпунов функциясы бар екендігі көрсетілген.

Гиперорнықтылық критерийі жүйенің орнықтылық шарттарын анықтайды және адаптация алгоритмдерін кезекті таңдау кезеңінде пайдалану мақсатында адаптация контурының негізгі құрылымдарының жинағын және де нақты динамикалық объектілерді басқару жүйесін құрудың баламалары мен нұсқаларын салыстырмалы талдауын жасай отырып, адаптация алгоритмдерінінің жиынтығын синтездеуге мүмкіндік береді [60].

**1.5 Ляпунов функциялары тәсілі**

Ляпуновтың екінші тәсілі - әртүрлі кластағы жүйелердің орнықтылығын зерттеудегі әмбебап тәсіл болып келеді. Бұл тәсілде зерттеу құралы ретінде Ляпунов функциялары деп аталатын кейбір арнайы функцияларды қолданады. Ляпуновтың екінші тәсілінің тиімділігі Ляпунов енгізген көмекші функцияларды қолдану теңдеудің шешімдерін таппай-ақ, кейбір көмекші функциялар мен олардың туындыларының қасиеттерін пайдалана отырып, орнықтылық пен орнықсыздықты зерттеуге мүмкіндік беретіндігімен байланысты [61, 62].

 айнымалыларының фазалық кеңістігінде анықталған, координат басын қамтитын кейбір *D* облысында үздіксіз  функциясы берілсін. Және  функциясының *D* облысында үздіксіз дербес туындылары болсын дейік.

Егер *D* облысының  -дан басқа барлық жерінде  теңсіздігі орындалса, онда  функциясы оң анықталған деп аталады. Ал, егер де  теңсіздігі орындалса, онда  функциясы теріс анықталған деп аталады. Аталған екі жағдайда да функция таңбалы анықталған деп аталады. Егер *D* облыста барлық жерде теңсіздігі немесе  теңсіздігі орындалса, онда функциясы таңбалы тұрақты деп аталады, және де бірінші жағдайда  функциясы оң таңбалы, екінші жағдайда теріс таңбалы деп те аталады. Егер *D* облысында  функциясының оң және теріс мәндері болса, онда  функция айнымалы таңбалы функция деп аталады. Қозғалыс орнықтылығын зерттеу үшін қолданылатын осылайша енгізілген функциялар Ляпунов функциялары деп аталады.

1.5.1 Ляпунов функциялары тәсілімен адаптивті жүйелерді синтездеу

Ляпунов функциялары тәсілі сызықты және бейсызықты жүйелердің орнықтылығын және сапасын зерттеудің негізгі әдістерінің бірі болып табылады. Әдіс адаптивті басқару жүйелерін синтездеу мәселесіне терең және тиімді қолданысын тапты [47, с. 390-395; 63, 64].

Сызықты стационарлы басқару жүйесі келесі күй теңдеуімен сипатталсын:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.7) |

мұнда  – басқару объектісінің (БО) күй векторы;

 – басқару векторы;

 – БО матрицасы;

 – басқарудың тұрақты матрицасы.

Басқару объектісінің барлық күй векторын өлшеуге қолжетімділік болжанады, сол себептен .

Басқару объектісінің қажетті динамикасын қамтамасыз ету есебі қарастырылады, оны эталондық модельдің көмегімен береміз:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.8) |

мұнда  – эталондық модельдің күй векторы;

 – беруші әсер.

Эталондық модельді таңдау тұйық жүйеге қойылатын талаптардан тәуелді болады. Мұнда,  – Гурвицтік болсын дейік.

Басқару мақсаты келесі теңдеумен беріледі:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.9) |

мұнда  , (1.7) және (1.8) жүйенің қателігі.

Адаптивті жүйенің екі деңгейлі құрылымымен сәйкес есеп екі кезеңде шешіледі: негізгі контурды құру және адаптация контурын синтездеу.

*1. Негізгі контурдың синтезі*

Есеп БО-ның параметрлері белгілі деген болжаммен шешіледі. Идеал регулятордың құрылымын алуға келесі теңдеу көмектеседі:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.10) |

Теңдеудің шешімділік шартын орындау қажет:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.11) |

кез келген ,  үшін  идеал басқаруға қатысты (1.10) теңдеу келесі түрде жазылады:



оның шешімі А матрицасының гурвиц болуынан асимптотикалық орнықты, және сондықтан, идеал шарттарда (1.9) басқару мақсатына жетеді.

(1.11) қатынасты қанағаттандыратын идеал теңдеу келесі теңдеумен сипатталады:



келесі түрде жазуға болады

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.12) |

мұнда , , , - келесі теңдеуді қанағаттандыратын, регулятордың идеал коэффициенттерінің матрицасы:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| , | | (1.13a) |
| , | (1.13ә) | |

(1.13) теңдеулер көбінесе модель мен БО келісілгендік шарттары деп аталады және олар БО параметрлерін дәл білген кезде берілген есепті шешу мүмкіндігін анықтайды. (1.13) сәйкес идеал регулятордың коэффициенттерінің матрицалары БО-ның нақты параметрлеріне тәуелді. Сондықтан, БО параметрлерінің белгісіздігі жағдайында жүйеде (1.9) басқару мақсатына қол жеткізу үшін регулятор коэффициенттерінің матрицаларын реттеу қажет.

(1.12) сәйкес негізгі контурдың құрылымы келесідей таңдалады:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.14) |

мұнда  – регулятордың реттелетін коэффициенттерінің матрицалары.

(1.10) теңдеуге (1.14)-ті қойып, негізгі контурдың (1.7) басқару объектісі, (1.8) эталондық модель және (1.14) регуляторынан тұратын жалпыланған реттелетін объектінің келесі түрдегі сипаттамасы алынады:



 (1.15)

мұнда  бірлік матрица;

 – регулятордың коэффициенттерінің идеал мәндерден ауытқу матрицалары

|  |  |
| --- | --- |
| , | (1.16) |

*2. Адаптация контурының синтезі*

 және  матрицаларын реттеу кезінде адаптация алгоритмін синтездеу үшін (1.15) жалпыланған реттелетін объект теңдеуі келесі түрде жазылады:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.17) |

мұнда  - реттелетін коэффициенттердің «идеал» мәндерінен ауытқуының кеңейтілген матрицасы



мұнда  векторы, элементтері функцияларды өлшеу негізінде өлшенеді немесе есептелінеді.

Ляпунов функциясыны ретінде келесі түрдегі квадраттық скалярлық функциясы қарастырылады:

|  |  |
| --- | --- |
| , , | (1.18) |

мұнда *- D* матрицасының басты диагоналының элементтерінің қосындысы.

(1.18) функцияның туындысы, (1.17) теңдеуді қолданумен келесі түрде жазылады:





Егер адаптация алгоритмі келесі түрде таңдалса:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (1.19) |

онда  функциясының келесі қасиеттері болады:  және , яғни Ляпунов функциясы болып табылады.

Соңғы тұжырым  матрицасының гурвиц болуынан туындайды, ол үшін Ляпунов леммасына байланысты келесі матрицалық теңдеуді қанағаттандыратын болады:

, 

және сәйкесінше,

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.20) |

Осылайша, (1.17), (1.19) жүйе орнықты және (1.20) байланысты  кезінде  басқару мақсатына жетеді. (1.20)  -да айқын түрде реттелетін параметр болмағандықтан, келтірілген пікірлерден тек  матрицасының шектеулігі шығады.

1.5.2 Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілі

Адаптивті басқару жүйелерін синтездеудің Ляпунов функцияларын пайдалануға негізделген белгілі тәсілдері сызықты және бейсызықты жүйелердің орнықтылығы мен сапасын зерттеудегі басты тәсілдер. Дегенмен, мұнда зерттеудің негізгі проблемасы адаптивті басқару жүйелерін зерттеу үшін Ляпуновтың [65, 66] функцияларын құрудың әмбебап әдістерінің болмауы болып табылады. Қазіргі уақытта бұл әдіс негізінен теориялық зерттеулердің құралы болып табылады және нақты жағдайлардағы адаптивті регулятордың орнықтылығы мен жұмыс сапасына қатысты барлық сұрақтарға жауап бере алмайды. Сондықтан, бұл диссертациялық жұмыста сызықты адаптивті басқару жүйелерін синтездеуге жаңа Ляпуновтың градиентті-жылдамдықты вектор-функциясы тәсілі ұсынылады [67-72].

 функциясының уақыт бойынша  толық туындысын қарастырайық, (1.21) формула:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.21) |

 шамалары *М* бейнелеу нүктенің  жылдамдығының проекциялары, ал  туындылары  проекциялары болып табылады. (1.21) формуланың оң жағы  және  векторларының скалярлық көбейтіндісіне тең, (1.22) формула:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.22) |

 функциясының  туындысын білу бейнелеу нүктесінің қозғалысын нақты бақылау мүмкіндігін береді.  туындының қабылдайтын мәндеріне байланысты үш жағдайды қарастырамыз.

*М* нүктесінде  туынды теріс мән қабылдасын:  Бұл функцияның кемуін көрсетеді. *М* нүктесі  беттің ішіне өтеді.  болғандықтан, (1.22) формуладан  жылдамдық пен  функцияның градиентінің арасындағы бұрыш доғал болып шығады. Анықталған-оң функциясы үшін  градиент векторы  бетке сыртқы нормальмен сәйкес келетінін ескеріп,  векторы осы беттің ішіне бағытталған деп қорытынды жасауға болады. М бейнелеу нүктесінің траекториясы 1.5а-суретте көрсетілгендей  бетін сыртынан ішке қарай кесіп өтеді.

*М* нүктесінде туынды нөлге тең болсын   скалярлық көбейтінді нөлге тең, осы векторлар арасындағы бұрыш түзу, бейнелеу нүктесінің траекториясы  бетке жанасады.

 жағдайда  функциясы өседі,  жылдамдық пен  функцияның градиенті арасындағы бұрыш сүйір, бейнелеу бұрышының траекториясы  бетін 1.5ә-суретте көрсетілгендей ішінен сыртқа кесіп өтеді [67, c.24].

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| а | ә |

а,ә - бейнелеу нүктесінің  бетін кесіп өтуі жылдамдық векторы мен градиент векторының арасындағы бұрыштың мәнінен тәуелді

Сурет 1.5 – Бейнелеу нүктесінің траекториясы

А.М. Ляпуновтың тура әдісінің геометриялық тұрғыдан түсіндірілуіне сәйкес, орнықтылықты зерттеу [73, 74] беттер тобын құруға алып келеді, мүндай беттер координат басын қоршайды және қоздыруларға қатысты құрастырылған күй теңдеуінің шешімдеріне сәйкес келетін интегралдық қисықтары осы беттердің әрқайсысын тек сыртынан ішке қарай кесіп өтуі мүмкін қасиетке ие. Қоздырылмаған қозғалыстың орнықтылығы беттердің осындай тобын құру мүмкін болғаннан кейін бірден орнатылады.

Бастапқы координаттар жүйесі қозғалмайтын болсын. Оның  координат басының қайсыбір маңында үздіксіз дифференциалданатын  және  функция табылсын.  функциясының уақыт бойынша толық туындысы (1.23) формуламен сипатталады:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.23) |

(1.23) теңдеу екі вектордың скалярлық көбейтіндісі түрінде (1.24) формуламен көрсетілген:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.24) |

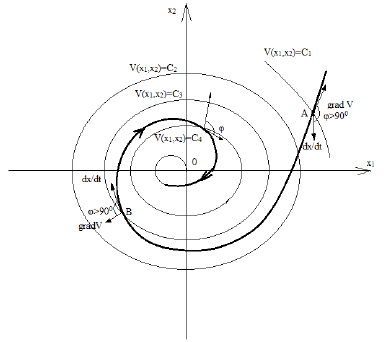
мұнда 

(1.24) формуладағы функцияның бірінші вектор-градиенті  функциясының әрқашан ең үлкен өсу жағына бағытталған, ол оған координат басынан алыстаған кезде жетеді. Скалярлық көбейтіндінің екінші көбейткіші – қозғалыстың жылдамдық векторы, координаттар жүйесінің кез келген нүктесіндегі оның бағыты фазалық траекторияға жанама бағытта болады.

 координат басының маңында  функцияның  туындысының әрекетін қарастырайық, асимптотикалық орнықтылық жағдайында: 

Басқару жүйесіне қоздырулар әсер еткенде, жүйенің орнықтылық қасиетімен байланысты бастапқы жағдайлардың қоздыруы түріндегі әсерді байқауға болады. Осыған сәйкес, жүйенің тепе-теңдік күйімен сәйкес келетін  күй айнымалылар жиынтығын енгізу ұсынылады [67, с. 26; 75]. Қоздыруды қоздырылған қозғалыстың  қоздырылмаған қозғалыстан ауытқуы ретінде көрсетуге болады, яғни  Жүйенің бастапқы күй теңдеуі  үшін ауытқуларда, немесе  қоздыруларға қатысты күй теңдеулерін жазумен барабар. Осындай ауыстыру нәтижесінде, біртекті емес сызықты түрлендіруге сәйкес, бастапқы координаттар жүйесі жаңасына айналады, онда координат басы жылжытылады және координаттық осьтер параллель тасымалданады. Қорытындылай келе,  қоздырулардың орнықтылығын зерттеу, координат басына қатысты кез-келген  стационарлық күйінің орнықтылығын зерттеуді білдіреді деп айтуға болады.

Жүйенің қозғалыс траекториясы  туынды теріс болған кезде координат басына ұмтылады (1.6-сурет) [67, c.28].





Сурет 1.6 – Ляпунов функциясының деңгей беттері

және бастапқы координаттар жүйесіндегі жүйенің фазалық траекториясы

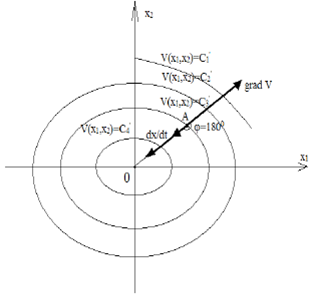
Бұл бастапқы жүйенің  координат басында басқару жүйесі орнықты болатындығына сәйкес келеді [67, с. 28]. Ал оң туынды болған кезде фазалық траектория координат басынан шығып, жүйені орнықсыздыққа әкеледі.

Осылайша, қоздырулар  үшін уақыт бойынша  Ляпунов функциясынан толық туынды құрылады, ол (1.25) формулаға тең:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.25) |
|  |  |

Басқару жүйесінің күй теңдеуі  ауытқуларда құрылған және координат басына  стационарлық күй сәйкес келген жағдайда Ляпунов функциясының градиенті координат басынан алыстаған кезде артады, яғни  шартымен. Скалярлық көбейтіндідегі екінші вектор – қоздырулардың (аытқулардың ) жылдамдық векторы [67, с. 29]. Соңғысы, жаңа координаттар жүйесінің фазалық кеңістігінің кез келген нүктесінде координат басына бағытталады.

Ауытқулардың жылдамдық векторы және Ляпунов функциясының градиенті үшін  теңдік орындалатын болады, осыға сәйкес екі вектордың арасындағы  бұрыш 1.7-суретте көрсетілгендей 1800 тең [67, c.29].





Сурет 1.7 – Ляпунов функциясының деңгей беттері және жаңа жылжымалы координаттар жүйесіндегі  жылдамдық векторы және  градиент векторы

Сонымен, Ляпуновтың екінші әдісінің теоремасының геометриялық түсіндірілуіне сәйкес орнықтылық тұжырымдамасына, асимптотикалық орнықтылық туралы теоремаға және жүйенің орнықтылығын динамикада зерттеу процессіне сүйене отырып, басқару жүйесін градиенттік жүйелер ретінде ұсына аламыз және Ляпунов апаттар теорияларынан болатын градиент жүйелерінің потенциалды функциялары ретінде жұмыс істейді [76, 77].

**1.6 Автоматты басқару жүйелерінің сапасына қойылатын талаптар**

Басқару жүйесін ғылыми немесе инженерлік мақсатта зерттеу кезінде көп жағдайда тапсырмалардың екі түрін шешу керек болады. Бірінші типке талдау тапсырмасын жатқызуға болады, мұнда алдын-ала берілген жүйенің сипаттамаларын анықтау; екінші типті тапсырма – синтездеу, мұнда берілген сипаттамалары бар жүйелерді жобалау қажет. Автоматты басқару жүйесін жобалау кезінде келесі талаптар қойылады:

– орнықтылық, күй векторы  (немесе шығыс векторы )  кезінде нөлге ұмтылады;

– басқарушылық, берілген  уақыт ішінде  күй векторын (немесе шығыс векторын)  (немесе ) бастапқы күйінен  (немесе ) сонғы күйіне келтіретін  кіріс векторының болуы;

– бақылаушылық,  уақыт интервалында  шығыс векторын бақылау бойынша  бастапқы күйге келтіру;

– өндірішілік, жүйенің шығысында қажетті шығыс күйдің маңындағы  берілген реакцияны жүйенің шығысына келтіретін  кірісті табу мүмкіндігін беру;

– басқару сапасы, яғни кірісте векторлық бірлік сатылы әсер кезінде  шығыс векторы (немесе  бастапқы күйден (немесе ) соңғы күйге өтуі кезінде) қайта реттелудің рұқсат етілетін мәндерімен анықталатын басқарудың рұқсат етілетін сапасының кеңістігінде жату керек;

– кедіргіге төзімділік, кедергілердің болуы кезінде берілген кіріс әсерінің векторының өндірушілік қателігі берліген мәннен аспауы керек;

– робастылық, жобаланатын автоматты басқару жүйесі объектінің моделінің және қоршаған ортаның моделінің беруінде шектеулі анықталмағандығы кезінде жоғарыда тұжырымдалған барлық шарттарды қанағаттандыру керек.

Автоматты басқару жүйелеріндегі өтпелі процесстің сапасына қойылатын негізгі талаптар. Жүйенің орнықтылығын зерттеу уақыт өтуімен өтпелі процесстердің өшуін, яғни кез келген сыртқы қоздырулар кезінде жүйені орныққан күйге келтіру мүмкіндігін қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, біріншіден, орныққан күй берілген күйге жеткілікті жақын болуы керек, және екіншіден өтпелі процесстің өшу уақыты жеткілікті тез, ал ауытқу үлкен емес болуы керек. Сондықтан, жүйенің орнықтылығын қамтамасыз еткеннен кейін орныққан күйдегі жүйенің дәлдігі, өтпелі процесстің сапасы және т.с.с. қажетті басқару сапасын қамтыған жөн.

Жоғары сапа көрсетіштері бар жоғары орнықты автоматты басқару жүйесін жоғары орнықты жүйелер тобына бөлуге болады. Бұл апериодтық орнықтылық шектерін анықтауды және жүйені апериодтық робасты орнықтылыққа зерттеуді талап етеді. Жалпы жүйені апериодтық робасты орнықтылыққа зерттеу басқару жүйесінің параметрлерінің өзгеруіне шектер көрсету, параметрлердің осы облыстағы мәндері кезінде басқару жүйесіндегі өтпелі процесстер қажетті сапалы көрсеткіштері бар апериодтық өтпелі процесстері болады, жоғары орнықтылықты басқару жүйелері үшін математикалық тұрғыдан шешім нормасы монотонды түрде кемиді, яғни жүйедегі техникалық өтпелі процесстер апериодтық сипатқа ие. Бұл жұмыста адаптивті басқару жүйелерін апериодтық робасты орнықтылыққа зерттеу Ляпунов функцияларын қолдануға негізделген әдіс аясындағыЛяпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілінің негізінде жүргізіледі.

**Бірінші бөлім бойынша қорытындылар:**

1. Қазіргі таңда жоғары сапа көрсетіштері бар жоғары орнықты заманауи және перспективалы техникалық жүйелерді құру өзекті мәселе болып табылады. Мұндай жүйелерді құруда басқару жүйелерін талдау мен синтездеудің дәстүрлі әдістерінің мүмкіндігі шектеулі. Бұл мәселені шешудің перспективалы әдістерінің бірі-адаптация тәсілдерін қолдану. Адаптивті басқару жүйелерінде сыртқы қоздырулар компенсацияланады, яғни басқару жүйесі сыртқы қоздыруларға қатысты өзгермейді, ал объект туралы ақпарат жұмыс кезінде жиналады, дереу өңделеді және басқару әсерлерін жасау үшін қолданылады, яғни нақты уақыт режімінде жұмыс жасайды.

2. Қазіргі таңда сызықты жүйелерді адаптивті басқару тәсілдері бойынша көптеген шешімдер алынған. Адаптивті басқару жүйелерін синтездеудің белгілі тәсілдері: гиперорнықтылық теориясына негізделген тәсілдер, күшейтудің «шексіз үлкен» коэффициентін енгізуге негізделген тәсілдер, сырғанаушы режімдерді ұйымдастыруға негізделген тәсілдер көбінесе реті төмен қарапайым бір өлшемді жүйелерді құруда қолданылады. Ляпунов функцияларын пайдалануға негізделген тәсілдер сызықты және бейсызықты жүйелердің орнықтылығы мен сапасын зерттеудегі басты тәсілдер болып келеді. Бұл тәсілдерді кеңінен қолдануда туындайтын негізгі қиындықтар Ляпунов функциялары мен басқару критерийлерін құрудағы әмбебап тәсілдерінің болмауы. Қазіргі таңда бұл тәсілдер теориялық зерттеулердегі негізгі құрал болып табылады және нақты жағдайларда адаптивті регуляторлардың орнықтылығы және сапасына қатысты сұрақтардың барлығына жауап бере алмайды.

**2 ЛЯПУНОВТЫҢ ГРАДИЕНТТІ-ЖЫЛДАМДЫҚТЫҚ ВЕКТОР-ФУНКЦИЯСЫ ТӘСІЛІМЕН БІР КІРІСІ ЖӘНЕ БІР ШЫҒЫСЫ БАР АДАПТИВТІ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН СИНТЕЗДЕУ**

Бұл бөлімде бір кірісі және бір шығысы бар объект үшін Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен айқын эталондық моделі бар сызықты адаптивті басқару жүйесін синтездеу есебін шешу қарастырылады. Айқын эталондық моделі бар өздігінен бейімделетін жүйе құру мақсаты қойылады, ӨБЖ-нің екі деңгейлі құрылымына сәйкес есеп екі кезеңде шешіледі: негізгі контурды құру және адаптация контурының синтезі. Қажетті динамикасы бар негізгі контурдың эталондық моделі және адаптация контуры бар жалпыланған реттелетін объектінің апериодтық робасты орнықтылығының шарттарынан адаптивті басқару жүйесінің реттелетін регуляторының коэффициенттері есептеледі және  кезінде  (мұндағы - қателік) басқару мақсатына жетеді.

**2.1 Есептің қойылымы**

Сызықтық стационарлы басқару жүйесін қарастырайық [47, с. 391].

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.1) |

мұнда  – басқару объектісінің (БО) күй векторы;

 – басқару векторы;

 – БО матрицасы;

 – басқарудың тұрақты матрицасы.

Басқару объектісінің қажетті динамикасын қамтамасыз ету есебі де қарастырылады, оны эталондық модельдің көмегімен береміз

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.2) |

мұнда  – эталондық модельдің күй векторы;

 – беруші әсер.

Басқару мақсатын

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.3) |

деп талап етіп көрсетейік. Мұнда  – (2.1) және (2.2) жүйенің қателігі. Осылайша, айқын эталондық моделі бар адаптивті жүйені құру есебі қойылады. Есепті тікелей адаптивті тәсілі негізінде шешеміз. Өздігінен бейімделетін жүйелердің екі деңгейлі құрылымына сәйкес есепті шешеміз: негізгі контурды құру және адаптация контурын синтездеу.

**2.2 Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен негізгі контурдың синтезі**

Сызықты стационарлы басқару жүйесін қарастырайық. Жүйені Ляпуновтың градиенті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен апериодтық робасты орнықтылыққа зерттейміз [67, с. 26-29]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.4) |

Басқару объектісінің барлық күй векторын өлшеуге қолжетімділік болжанады, сол себептен .

Басқару заңы келесі түрде беріледі

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.5) |

мұнда – анықталуға тиісті регулятордың коэффициенттерінің  – матрицасы.

Объект-регулятор тұйық жүйесі келесі теңдеумен сипатталады:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.6) |

мұнда

, , 

(2.6) тұйық жүйесінің  матрицасы Фробениус матрицасына ұқсайтындығын тікелей ауыстыру арқылы оңай көз жеткізуге болады.

Басқару жүйесінің сапасы және орнықтылығы тұйық жүйенің матрицасының элементтерімен анықталады. Сондықтан, жүйені апериодтық робасты орнықтылыққа зерттейміз, мұнда өтпелі процесстер бастапқы кезеңде жарқылсыз өтеді, және жүйе тербеліссіз және қайта реттеусіз жұмыс жасайды.

(2.6) жүйені кеңейтілген түрде келесідей көрсетеміз

 (2.7)

Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен (2.7) жүйенің апериодтық робасты орнықтылығының шартын анықтаймыз.

(2.7) күй теңдеуінен Ляпуновтың вектор-функциясынан градиент векторының құрастырушыларын табамыз 

 (2.8)

(2.7)-тен жылдамдық векторын жіктеу компоненттерін  жүйе координаттары бойынша анықтаймыз:

 (2.9)

Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілі жүйенің асимптотикалық орнықтылығы теоремасына негізделген. Осыған сәйкес, жүйенің тепе-теңдік күйінің асимптотикалық орнықтылығы үшін (2.7) күй теңдеуін ескеріп, Ляпунов функциясынан уақыт бойынша алынған толық туындысы теріс анықталған функция болатын, оң анықталған функциясының болуы қажет және жеткілікті [65, с. 291; 67, с. 26]. Сондықтан, Ляпуновтың вектор-функциясының градиент векторы (2.8) мен жылдамдық векторының (2.9) көбейтіндісі ретіндегі Ляпуновтың вектор-функциясынан толық туынды есептеледі:



 (2.10)

(2.10)-ден Ляпуновтың вектор-функциясынан уақыт бойынша алынған толық туынды теріс таңбалы функция екені анық.

1. Ляпунов функциясын (2.8)-тен келесі түрде аламыз:



 (2.11)

(2.11) функциясының оң анықталғандығының шарты, яғни Ляпунов функциясның болу шарты келесі теңсіздікпен анықталады:

 (2.12)

(2.12) теңсіздіктер жүйесі SISO жүйенің - бір кірісі және бір шығысы бар басқару жүйесінің апериодтық робасты орнықтылық шарты болып табылады.

**2.3 Эталондық модельді таңдау**

Басқару объектісінің қажетті динамикасын қамтамасыз ету есебі қарастырылады, оны айқын эталондық модельдің көмегімен береміз.

Эталондық модельді таңдау адаптивті басқару жүйесін синтездеу процесінің бір бөлігі. Эталондық модель екі талапты қанағаттандыру керек: бір жағынан, ол синтезделген жүйенің барлық сапа талаптарын көрсетуі керек, екінші жағынан, негізгі контур үшін эталондық реакция қол жетімді болуы керек.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.13) |

мұнда  – эталондық модельдің күй векторы;

 – беруші әсер.

, 

Эталондық модельді таңдау тұйық жүйеге қойылатын талаптардан тәуелді болады (өтпелі процестің уақыты, қайта реттеу, статикалық қате және т.б.). Бұл жағдайда ол орнықты болуы керек, яғни  – гурвицтік, сонымен қатар апериодтық робасты орнықты болсын дейік.

Басқарудың жақсы сапасын көрсететін, апериодтық робасты орнықты эталондық модельді таңдаймыз. Эталондық модельді апериодтық робасты орнықтылыққа зерттейміз. Осылайша, (2.13) жүйені кеңейтілген түрде жазамыз.

 (2.14)

Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен (2.14) жүйені апериодтық робасты орнықтылыққа зерттейміз.

(2.14) теңдеуінен Ляпуновтың вектор-функциясынан градиент векторының құрастырушыларын табамыз



 (2.15)

(2.14)-ден жылдамдық векторын жіктеу компоненттерін жүйе координаттары бойынша анықтаймыз:

 (2.16)

Ляпуновтың вектор-функциясынан уақыт бойынша алынған толық туынды градиенттер векторы (2.15) мен жылдамдық векторының (2.16) көбейтіндісі ретінде есептеледі:



 (2.17)

(2.17) функция теріс таңбалы функция екені анық, яғни асимптотикалық орнықтылықтың жеткілікті шарты орындалады.

(2.15) теңдеуден Ляпунов функциясын келесі түрде аламыз:



 (2.18)

Ляпунов фукнциясының оң анықталғандығын келесі түрде көрсетуге болады:

  (2.19)

Идеал басқаруды келесі түрде аламыз:

 (2.20)

(2.20) теңдеуін келесі түрде жазуға болады:

 (2.21)

мұнда  – келесі теңдеуді қанағаттандыратын идеал регулятор коэффициенттері.

Жалпы алғанда, адаптивті басқару мақсатына жету эталондық моделі бар адаптивті басқару жүйелеріндегі сыртқы әсерлер  кезінде компенсацияланады. Сондықтан, (2.19)-де  деп болжауға және (2.12) және (2.19) –дан жазуға болады:

  (2.22)

(2.22) шарттарды модель мен басқару объектісін сәйкестендіру шарттары деп атайды және олар басқару объектісінің параметрлерін дәл білу шарттарында қойылған есепті шешу мүмкіндігін анықтайды. (2.22)-тен регулятордың идеал коэффициенттері басқару объектісінің нақты параметрлеріне байланысты. Сондықтан жүйеде  кезінде  басқару мақсатына жету үшін регулятордың коэффициенттері реттеледі.

Үшінші ретті жүйе (2.23) күй теңдеуімен сипатталсын [78]. (2.23) жүйе үшін эталондық модель таңдау есебін қарастырайық.

 (2.23)

(2.23) жүйе үшін басқарудың жақсы сапасын көрсететін эталондық модель (2.24) күй теңдейімен сипатталсын.

 (2.24)

(2.24) жүйені Ляпуновтың градиентті-жылдамдықты вектор функциясы тәсілімен апериодтық робасты орнықтылыққа зерттейік.

(2.24) күй теңдеуінен Ляпунов функциясының векторларынан градиент векторының нөлдік емес құрастырушыларын табамыз:

(2.25)

(2.24)-тен жүйе координаттары бойынша жылдамдық векторының жіктелуінің нөлдік емес компоннттерін анықтаймыз :

 (2.26)

Ляпуновтың вектор-функциясынан уақыт бойынша алынған толық туынды (2.25) градиент векторын (2.26) жылдамдық векторына скалярлық көбейту ретінде анықталады.

 (2.27)

Ляпуновтың вектор-функциясынан уақыт бойынша алынған (2.27) толық туынды кепілді түрде теріс таңбалы функция болып табылады, яғни Ляпунов бойынша асимптотикалық орнықтылықтың жеткілікті шарты әрдайым орындалады.

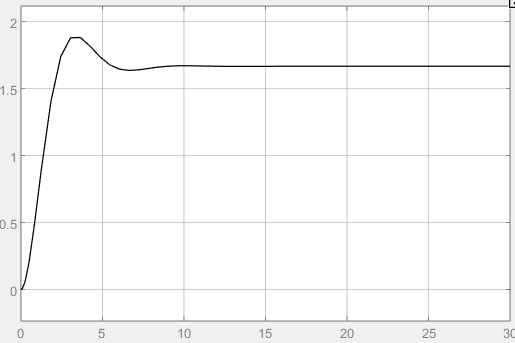
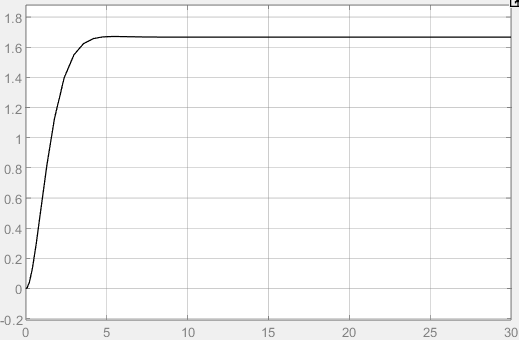
Ляпунов функциясын (2.25)-тен скаляр түрде градиенттер векторының құрастырушылары бойынша анықтаймыз:

 (2.28)

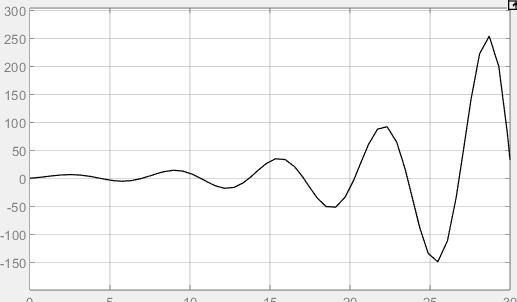
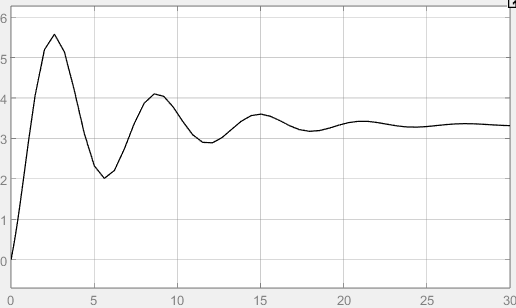
(2.28) Ляпунов функциясының бар болу шарты, яғни Ляпунов вектор-функциясының оң анықталғандығы келесі шарттармен анықталады:

 (2.29)

жүйе параметрлері кезінде  коэффициенті  аралықтарда өзгертумен Matlab Simulink бағдарламасында жүргізілген эксперимент нәтижелері суретте келтірілген. Эталондық модель =-10 мәні кезінде (2.29) апериодтық робасты орнықтылық шарттарын қанағаттандырады, жүйенің өтпелі сипаттамасы апериодтық сипатқа ие (2.1а-сурет). Ал  мәні (2.29) шартты қанағаттандырмауы кезінде жүйенің өтпелі сипаттамасында тербелістер, асыра реттеу және орнықсыздық байқалады (2.1ә, 2.1б, 2.1в-суреттер).



а ә



б в

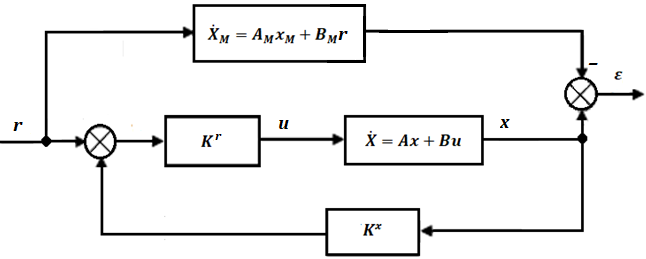
Сурет 2.1 –  коэффициентінің әртүрлі мәндеріндегі эталондық модельдің өтпелі сипаттамалары

(2.23) басқару жүйесінің қажетті динамикасын қамтамасыз ететін (2.24) эталондық модельдің апериодтық орнықты жағдайында тәжірибе көрсеткендей өтпелі процесстер бастапқы кезеңде серпілсіз өтеді, жүйені тербеліссіз және асыра реттеусіз жұмыс жасайтын сапа көрсеткіштермен қамтамасыз етеді.

**2.4 Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен адаптация контурының синтезі**

Адаптация алгоритмін синтездеу есебін тұжырамдауда жалпыланған реттелетін объект қолданамыз. Жалпыланған реттелетін объект құрамына жүйенің өзгермейтін барлық бөлігі кіреді («жалпыланған объект» және негізгі контурдың регуляторы). Жалпыланған реттелетін объект кірістері: регулятордың реттелінетін параметрлері және жалпыланған объектінің кірістері.

Жалпыланған реттелетін объект құрылымы 2.2-суретте көрсетілген [47, c.392].



Сурет 2.2 – Жалпыланған реттелетін объектінің құрылымдық схемасы

Жалпыланған реттелетін объект векторлық-матрицалық теңдеумен ауытқуларда сипатталады

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.30) |

мұнда  – басқару объектісінің күй векторы;

 – ауытқу векторы ;

- эталондық модельдің күй векторы;

– беруші (сыртқы) әсерлер векторы.

, , 

Басқару заңы келесі түрде таңдалады

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.31) |

(2.31) басқару заңын ескерсек, (2.30) теңдеуі келесі түрге түрленеді:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.32) |
|  |  |

(2.32)-тен табамыз

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.33) |

және (2.32) теңдеу келесі түрге түрленеді:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.34) |

(2.31) және (2.33) ескере отырып жүйенің теңдеуін келесі түрге түрлендіреміз

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.35) |

Басқару мақсатына (2.34) және (2.35) біріктірілген жүйенің апериодтық робасты орнықтылығы кезінде жетеді:

 (2.36)

мұнда  

(2.36) жүйені кеңейтілген түрде көрсетеміз және Ляпуновтың градиентті-жылдамдықты вектор-функциясы тәсілімен (2.36) жүйенің апериодтық робасты орнықтылығын зерттейміз.

 (2.37)

(2.37) жүйенің апериодтық робасты орнықтылығын зерттейміз.

(2.37)–ден градиент векторының компоненттерін Ляпуновтың вектор-функциясынан анықтаймыз

 (2.38)

(2.37)-тен жылдамдық векторын компоненттерінің жіктелуін  жүйе координаттары бойынша анықтаймыз:

 (2.39)

Ляпуновтың вектор-функциясынан уақыт бойынша алынған толық туынды градиенттер векторы (2.38) мен жылдамдық векторының (2.39) көбейтіндісі ретінде есептеледі:

 (2.40)

(2.40) функция теріс таңбалы функция екені анық, яғни асимптотикалық орнықтылықтың жеткілікті шарты әрдайым орындалады.

Ляпунов функциясын (2.38)-дан скаляр түрінде келесі түрде аламыз

 (2.41)

Ляпунов функциясының оң анықталғандығы (2.41)-дан келесі теңсіздіктер жүйесімен анықталады:

 (2.42)

Бұл (2.42) жүйеден  реттелетін коэффициенттерді анықтаймыз

 (2.43)

Осылайша, (2.30) және (2.37) жүйесі (2.43)-ге қатысты апериодтық робасты орнықты және  кезінде  басқару мақсатына жетеді. Адаптивті басқару жүйесін синтездеу есебі жалпыланған реттелетін объект сипаттамасын (2.37) түрге келтіруді қамтамасыз ететін негізгі контурдың құрылымын құрастыруға және Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен апериодтық робасты орнықтылықты зерттеуге және (2.43) алгоритмді регулятордың параметрін (немесе басқару объектісінің өзін) реттеуге әкеледі. Мұнда *А* матрицасы (басқару объектісінің параметрлері) өлшенеді немесе өлшеу негізінде есептеледі.

**Екінші бөлім бойынша қорытындылар:**

1. Адаптивті басқару жүйелерін синтездеудің жаңа тәсілі - Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілі әзірленді.

2. Бір кіріс және бір шығысы бар объект үшін айқын эталондық моделі бар адаптивті басқару жүйесінің негізгі контур құрылды. Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен негізгі контурдың басқару жүйесі және қажетті динамикасы бар эталондық модель апериодтық робасты орнықтылыққа зерттелді. Апериодтық робасты орнықтылыққа зерттеу градиент вектор мен жылдамдық векторының скаляр көбейтіндісіне тең болатын теріс таңбалы функцияны құру негізінде жүргізіледі. Жүйенің орнықтылық шарттары оң анықталған Ляпунов функциясның болу шарттарынан анықталады. Осы шарттарда жүйенің берілген параметрлері кезінде негізгі контурдың регуляторының коэффициенттері есептелді.

3. Жалпыланған реттелетін объекті моделі құрылып, Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен адаптация контурының синтезі жүргізілді. Жалпыланған реттелетін объектінің апериодтық робасты орнықтылық шарттары анықталды. Бұл шарттар басқару мақсатына жету мүмкіндігін береді және олардың негізінде жүйенің берілген параметрлері кезінде адаптация контурын реттеу коэффициенттерін табылды. Осылай бір кіріс және бір шығысы бар объектінің қажетті динамикасын қамтамасыз ету есебі, яғни оны адаптивті басқару жүйесі синтезделді.

4. Эталондық модель орнықтылық, робастық, тербеліс, тезәрекеттігі, қайта реттеу, статикалық дәлдік, жүйеде қажетті өтпелі процестердің түрі және т.б. сапа көрсеткіштеріні бойынша таңдалады.

Бұл бөлімнің негізгі нәтижелері келесі жұмыстарда келтірілген [79-81].

**3 ЛЯПУНОВТЫҢ ГРАДИЕНТТІ-ЖЫЛДАМДЫҚТЫҚ ВЕКТОР-ФУНКЦИЯСЫ ТӘСІЛІМЕН m-КІРІСІ ЖӘНЕ n-ШЫҒЫСЫ БАР АДАПТИВТІ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН СИНТЕЗДЕУ**

Бұл бөлімде m кірісі және n шығысы бар объект үшін Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен эталондық моделі бар сызықты адаптивті басқару жүйесін синтездеу есебін шешу қарастырылады. Айқын эталондық моделі бар өздігінен бейімделетін жүйе құру мақсаты қойылады, ӨБЖ-нің екі деңгейлі құрылымына сәйкес мақсат екі кезеңде шешіледі: негізгі контурды құру және адаптация контурының синтезі. Қажетті динамикасы бар негізгі контурдың эталондық моделі және адаптация контуры бар жалпыланған реттелетін объектінің апериодтық робасты орнықтылығының шарттарынан адаптивті басқару жүйесінің реттелетін регуляторының коэффициенттері есептеледі және  кезінде  (мұндағы - қателік) басқару мақсатына жетеді.

**3.1 Есептің қойылымы**

Сызықтық стационарлы басқару жүйесін қарастырайық.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.1) |

мұнда  – басқару объектісінің (БО) күй векторы;

 – басқару векторы;

 – БО матрицасы;

 – басқарудың тұрақты матрицасы.

Басқару объектісінің барлық күй векторын өлшеуге қолжетімділік болжанады, сол себептен .

Басқару объектісінің қажетті динамикасын қамтамасыз ету есебі де қарастырылады, оны эталондық модельдің көмегімен береміз

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.2) |

мұнда  – эталондық модельдің күй векторы;

 – беруші әсер.

Эталондық модельді таңдау тұйық жүйеге қойылатын талаптарға байланысты (өтпелі процестің уақыты, қайта реттеу, статикалық қате және т.б.). Бұл жағдайда ол орнықты болуы керек, яғни эталондық модель апериодтық робасты орнықты болуы керек делік, яғни сыртқы әсерлерді  ескере отырып, эталондық модельді апериодтық робасты орнықтылыққа зерттейміз.

Басқару мақсатын

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.3) |

деп талап етіп көрсетейік. Мұнда  – (3.1) және (3.2) жүйенің қателігі. Осылайша, айқын эталондық моделі бар адаптивті жүйені құру мақсаты қойылады. Бұл мақсатқа тікелей адаптивті тәсілі негізінде шешеміз. Шешім өздігінен бейімделетін жүйелердің екі деңгейлі құрылымына сәйкес табылады: негізгі контурды құру және адаптация контурын синтездеу.

**3.2 Эталондық модельді таңдау**

кезінде (3.2) эталондық модель кеңейтілген түрде келесідей жазылады

 (3.4)

(3.4) жүйенің апериодикалық робасты орнықтылығының шартын табайық. Ол үшін (3.4)-тен Ляпуновтың вектор-функциясының градиент векторының құрастырушыларын анықтайық :

 (3.5)

(3.4)-тен жылдамдық векторын компоненттерінің жіктелуін жүйе координаттары бойынша анықтаймыз:

 (3.6)

Ляпуновтың вектор-функциясынан уақыт бойынша алынған толық туынды градиенттер векторы (3.5) мен жылдамдық векторының (3.6) көбейтіндісі ретінде есептеледі:

 (3.7)

(3.7) Ляпунов вектор-функциясынан алынған толық туынды теріс таңбалы функция екені анық, яғни Ляпунов фнкциясының осы таңдауымен асимптотикалық орнықтылықтың жеткілікті шарты әрдайым орындалады.

(3.5) градиенті бойынша Ляпунов функциясын төмендегі түрде анықтаймыз

 (3.8)

(3.8)-ден Ляпунов функциясының оң анықталғандығы, яғни Ляпунов функциясының бар болу шарты анықталады:

 (3.9)

**3.3 Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен негізгі контурдың синтезі**

(3.1) теңдеудегі басқару заңы келесі түрде берілсін

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.10) |

мұнда – анықталатын, регулятордың коэффициенттерінің -матрицасы.

Объект-регулятор тұйық жүйесі төмендегі теңдеумен сипатталады:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.11) |

мұнда

, 

, 



(3.11) теңдеуі кеңейтілген түрде келесідей жазылады

 (3.12)

Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен (3.12) жүйенің апериодтық робасты орнықтылығының шартын табамыз. Ол үшін (3.12)-ден Ляпуновтың вектор-функциясының градиент векторының құрастырушыларын табамыз :

 (3.13)

(3.12)-ден жылдамдық векторын компоненттерінің жіктелуін жүйе координаттары  бойынша анықтаймыз:

(3.14)

Ляпуновтың вектор-функциясынан уақыт бойынша алынған толық туынды градиенттер векторы (3.13) мен жылдамдық векторының (3.14) көбейтіндісі ретінде есептеледі:





 (3.15)

(3.15) Ляпунов вектор-функциясынан алынған толық туынды теріс таңбалы функция екені анық.

(3.13)-тен Ляпунов функциясын келесі түрде көрсете аламыз:

 (3.16)

(3.16)-дан Ляпунов функцияcының оң анықталғандығы келесі шарттардан анықталады

 (3.17)

"Идеал" регуляторды алу үшін, яғни  және  матрицалық элементтердің берілген мәндерінде (3.1) немесе (3.12) жүйе берілген қасиеттерге ие болуы үшін (3.9) және (3.17) теңсіздіктің сол жағын теңестіріп және сол жерден  матрицаның элементтерінің белгілі мәндерімен  матрицаның коэффициенттерінің қажетті мәндерін таба аламыз:

 (3.18)

(3.18) жүйені элементтері бойынша салыстырып келесіні аламыз:







 (3.19)

Алгебралық теңдеулердің осы *n*-жүйесінен идеал регулятордың матрицасының  элементтерінің мәнін табуға болады .  матрицасының және  басқарудың күшейту коэффициенттері егер диагональды матрица түрінде берілген болса:

, 



Күй теңдеуі (3.19) теңдеулер жүйесімен сипатталатын төртінші ретті басқару жүйесін апериодтық робасты орнықтылыққа зерттеу мысалын қарастырайық.

 (3.20)

Басқару заңы

 (3.21)

(3.20) басқару жүйесі (3.21) басқару заңын ескеріп келісідей жазылады:

 (3.22)

(3.22) жүйені Ляпуновтың градиентті-жылдамдықты вектор функциясы тәсілімен апериодтық робасты орнықтылыққа зерттейік.

(3.22) күй теңдеуінен Ляпунов функциясының векторларынан градиент векторының нөлдік емес құрастырушыларын табамыз :

 (3.23)

()-тен жүйе координаттары бойынша жылдамдық векторының жіктелуінің нөлдік емес компоненттерін анықтаймыз :

 (3.24)

Ляпуновтың вектор-функциясынан уақыт бойынша алынған толық туынды (3.23) градиент векторын (3.24) жылдамдық векторына скалярлық көбейту ретінде анықталады.



 (3.25)

Ляпуновтың вектор-функциясынан уақыт бойынша алынған (3.25) толық туынды кепілді түрде теріс таңбалы функция болып табылады, яғни Ляпунов бойынша асимптотикалық орнықтылықтың жеткілікті шарты әрдайым орындалады.

Ляпунов функциясын (3.23)-тен скаляр түрде градиенттер векторының құрастырушылары бойынша анықтаймыз:

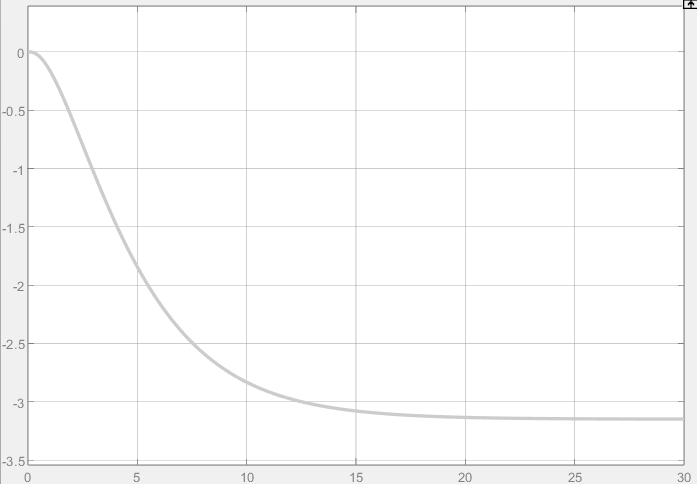
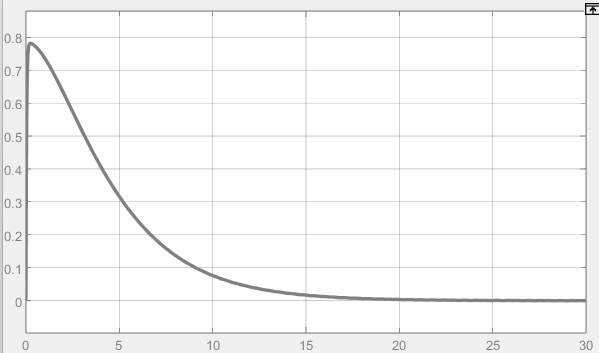
 (3.26)

(3.26) Ляпунов функциясының бар болу шарты, яғни Ляпунов вектор-функциясының оң анықталғандығы келесі шарттармен анықталады:

 (3.27)

Мысал ретінде келесі жағдайды қарастырайық:  .

Апериодтық робасты орнықтылық аймағындағы, яғни (3.27) шартты қанағаттандыруы кезіндегі (3.22) басқару жүйесінің өтпелі процесс графигі (3.1-сурет).



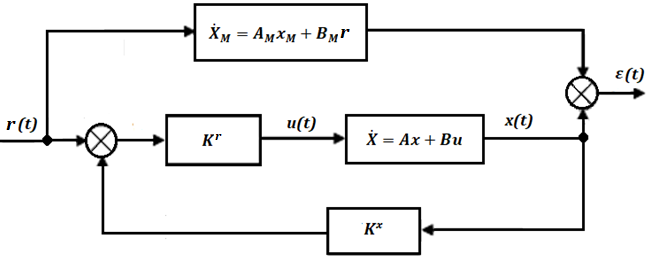
а ә

Сурет 3.1 – Апериодтық орнықтылық аймағындағы өтпелі сипаттамалар

(3.22) басқару жүйесінің апериодтық орнықты жағдайында тәжірибе көрсеткендей ауытқуларда жазылған күй теңдеулерінің шешім нормасы монотонды түрде нөлге ұмтылады, яғни Ляпуновтың градиентті-жылдамдықты вектор функциясы тәсілі өтпелі процесстер бастапқы кезеңде серпілсіз өтетін, тербеліссіз және асыра реттеусіз жұмыс жасайтын басқару жүйесінің жоғары сапа көрсеткіштерін береді.

**3.4 Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен адаптация контурының синтезі**

Адаптация алгоритмін синтездеу есебін тұжырамдауда жалпыланған реттелетін объект қолданамыз. Жалпыланған реттелетін объект құрамына жүйенің өзгермейтін барлық бөлігі кіреді («жалпыланған объект» және негізгі контурдың регуляторы). Жалпыланған реттелетін объект кірістері: регулятордың  реттелінетін параметрлері және жалпыланған объектінің  кірістері. Жалпыланған реттелетін объект құрылымы 3.2-суретте көрсетілген [47, c.392].



Сурет 3.2 – Жалпыланған реттелетін объектінің құрылымдық схемасы

Жалпыланған реттелетін объектінің теңдеулерін  ауытқуларға қатысты жазамыз:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.28) |

Басқару заңы келесі түрде таңдалады

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.29) |

Олай болса, (3.29) басқару заңын ескеріп (3.28) векторлық-матрицалық теңдеу келесі түрге түрленеді



осыдан

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.30) |

Осылайша (3.28) теңдеуі келесі түрге түрленеді

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.31) |

Осыдан, (3.1) жүйе (3.29) басқару заңы мен (3.30) ескеріп келесі түрге түрленеді

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.32) |

(3.3) басқару заңына жүйенің апериодикалық робасты орнықтылығы кезінде әрдайым жетеді

 (3.33)

мұнда белгіленген .

, 

, 



(3.33) жүйені Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен зерттейік. Ол үшін (3.33) жүйе кеңейтілген түрде көрсетіледі:

 (3.34)

(3.34)-дан Ляпуновтың вектор функциясынан градиенттер векторының компоненттерін анықтаймыз :

 (3.35)

(3.34)-дан жылдамдық векторының жіктелуін  координаттар бойынша анықтаймыз:

 (3.36)

Ляпуновтың вектор-функциясынан уақыт бойынша алынған толық туынды градиенттер векторы (3.35) мен жылдамдық векторының (3.36) көбейтіндісі ретінде есептеледі:



 (3.37)

(3.37) Ляпунов вектор-функциясынан алынған толық туынды теріс таңбалы функция екені анық, яғни асимптотикалық орнықтылықтың жеткілікті шарты орындалады.

Ляпуновтың вектор-функциясының градиент векторы (3.35) бойынша скаляр түрде Ляпунов вектор функциясын құрамыз

 (3.38)

(3.38)-дан Ляпунов функциясының болу шарты (оң анықталғандық) яғни, (3.34) жүйенің апериодтық робасты орнықтылығы келесі теңсіздік жүйесімен анықталады:

 (3.39)

Апериодтық робасты орнықтылық шектері шарттарынан келесі жүйені алуға болады:









 (3.40)

(3.40)-ден алгебралық теңдеулердің *n*-жүйесінен  матрицасының реттелетін коэффициенттерінің элементтерінің  мәндерін табуға болады.

m кіріс, n шығысы бар адаптивті басқару жүйесінің негізгі контуры және жалпыланған реттелетін объектісін градиенттік жүйелер ретінде, ал Ляпунов функциясын апаттар теориясының потенциалдық функциялары ретінде көрсету Ляпунов функциясын құрудың әмбебап тәсілін ұсыну және Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен адаптивті басқару жүйесінің негізгі контуры және жалпыланған реттелетін объектісінің орнықтылығы, робастылығы және жұмыс сапасын зерттеу мүмкіндігін береді. m кіріс, n шығысы бар адаптивті басқару жүйесінің негізгі контуры және жалпыланған реттелетін объектісінің апериодтық робасты орнықтылық шарттарынан басқару объектісінің параметрлерінің берілген және өлшенетін мәндері кезінде негізгі контурдың реттелетін регуляторының коэффициенттері есептеледі.

**Үшінші бөлім бойынша қорытындылар:**

1. mхn өлшемді матрицасы бар сызықты объектіні адаптивті басқару жүйесін синтездеудің жаңа тәсілі - Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілі әзірленді.

2. m кірісі және n шығысы бар сызықты объектіні адаптивті басқарудың айқын эталондық моделі бар өздігінен реттелетін жүйесі құрылды. ӨБЖ-нің екі деңгейлі құрылымы бар: негізгі контур және адаптация тізбегі. ӨБЖ-де басқару объектісінің құрылымы белгілі және өзгермейді, ал адаптация алгоритмінің мақсаты басқару жүйесі мен эталондық модельдің арасындағы сәйкессіздікті нөлге келтіретіндей қылып құрылымы берілген (алдын-ала таңдалған) регулятордың коэффициенттерін реттеу болып табылады.

3. Қойылған басқару мақсатына жету үшін m кірісі және n шығысы бар сызықты объектіні адаптивті басқару жүйесінің негізгі контуры құрылып, басқару жүйесі және басқару жүйесін қажетті динамикамен қамтамасыз ететін эталондық модель Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен апериодтық робасты орнықтылыққа зерттелді. Оң анықталған Ляпунов функциясының бар болуынан апериодтық робасты орнықтылық шарттары анықталды. Басқару жүйесінің берілген мәндері (параметрлері) кезінде негізгі контурдың регуляторының коэффициенттері есептелді.

3. Жүйенің барлық өзгермейтін бөлігін (жалпыланған объект және негізгі контурдың регуляторы) қамтитын адаптация контурының жалпыланған реттелетін объекті моделі құрылып, Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен апериодтық робасты орнықтылыққа зерттелді. Жалпыланған реттелетін объектінің апериодтық робасты орнықтылық шарттарынан жүйенің берілген параметрлері кезінде адаптация контурын реттеу коэффициенттерін табылды және қойылған басқару мақсатына қол жеткіземіз.

Бұл бөлімнің негізгі нәтижелері келесі жұмыстарда келтірілген [82, 83].

**4 ЛЯПУНОВТЫҢ ГРАДИЕНТТІ-ЖЫЛДАМДЫҚТЫҚ ВЕКТОР-ФУНКЦИЯСЫ ТӘСІЛІМЕН СЫЗЫҚТЫ ҒАРЫШТЫҚ ҰШУ АППАРАТЫН АДАПТИВТІ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ СИНТЕЗІ**

**4.1 Бағдарлау және тұрақтандыру жүйесін сипаттау**

Ғарыштық ұшу аппараттары (ҒҰА) жоғары технологиялы және ғылымды қажетсінетін борттық кешендер. Іс жүзінде ғарыштық жүйелердің көбісі параметрлердің белгісіздігі жағдайында жұмыс істейді және олар алдын-ала белгісіз, болжап білуге болмайтын үлкен шектерде өзгеруі мүмкін. Ғарыш аппараттын (ҒА) тұрақтандыру мен бағдарлауды басқару элементтерінің көбісінің сипаттамалары динамикалық өзгерулерге ұшырағыш. Бұл мысалы, барлық жүйенің функционалдық сипаттамаларына әсер ететін, қоректендіру шиналарындағы кернеудің елеулі диапазондардағы тұрақсыздануы болуы мүмкін. Құрамбөліктердің көбісі температураның елеулі ауысуына, нейтрондар және иондаушы радиацияның әсеріне ұшырағыш. Осының барлығы жүйенің электрондық құрамбөліктерінің параметрлерін номинал мәнінен ауытқуыға алып келеді, бұндай ауытқулар жүйенің әртүрлі бөліктерінде кездейсоқ түрде орын алады. Нәтижесінде басқару жүйесі болжанбайды және қажетсіз тербелістермен және одан әрі бейберекет әрекетпен сипатталуы мүмкін. Сонымен қатар, ұшу аппаратының массасының күтпеген түрде өзгеруі, жүйе параметрлерінің өзгеруі мен дайындау қателіктері және т.б. белгісіздіктерді ендіреді [84-87]. Бұл дегеніміз, қозғалыстағы объектінің күйі туралы ақпарат ағыны нақты уақыт шкаласында өңделуі керек, сонымен қатар, ҒҰА-ның құрамында техникалық жағдайды бақылау құралдары белгісіздік себептерін жою құралдарымен теңдестіріліп жасалуы керек. Сондықтан, белгісіздік дәрежесін азайту және басқару процесінің қажетті сапа көрсеткіштеріне жету үшін адаптивті тәсілдерін қолдану өзекті.

Ғарыш кеңістігін көптеген әртүрлі ұшу аппараттары игеруде. Олар түрі, жұмыс режімі және орындайтын тапсырмасы бойынша ерекшеленеді, бірақ оларды біріктіретін ортақ мәселе – ғарыш кеңістігіндегі олардың қозғалысын (бағдарын) басқару. Осыған сәйкес, әртүрлі мақсаттағы ҒҰА-ның бағдарын басқарудың көптеген жүйелері әзірленді және патенттелді. Бағдарды басқару жүйесі ғарыш аппаратының негізгі міндеттерін (ғарыштық түсірілім, ғылыми ақпараттар жинау, байланыс және т.б.) орындау үшін көзделген басқару режімдеріне байланысты ұшу процесінде берілген бағытта оның бағдарын қамтамасыз етеді [88-91].

Ғарыш аппараттарының бағдарын басқарудың барлық жүйелері негізінен келесі функционалды ерекшеленетін құрылғылар тобынан тұрады:

* ҒА-ның кеңістіктегі орнын және оның қозғалыс сипатын анықтау мүмкіндігін беретін датчиктер;
* датчиктерден келіп түсетін ақпаратты талдайтын және туындаған ахауылдарға сәйкес қозғалысты басқару командаларын өндіретін логикалық құрылғылар;
* логикалық құрылғының командасымен сәйкес ҒА-ның қозғалысын өзгертетін орындаушы механизмдер.

Ғарыш аппаратын орбитаға шығарғаннан кейін, ол аспаптарды зерттелетін объектілерге бағыттау мақсатымен берілген бұрыштық күйді сақтау үшін бағдарлау жүйесінің тұрақты бақылауында болады. Бағдарлау - ғарыш аппаратының кеңістіктегі берілген бұрыштық қозғалысын білдіреді. Бағдарлау режімі ғарыш аппаратының белсенді болуының барлық уақытында үздіксіз жүзеге асырылады.

Бағдарлауды басқару жүйесі ҒА-ны тұрақтандыруды және берілген бағытта бағдарлауды қамтамасыз етеді. Бағдарлау – нәтижесінде ҒҰА кеңістікте белгілі бір орынға немесе белгіленген орындардың кезектілігіне ие болатын процесс. Бағдарлау бастапқы үлкен ауытқуды жоя отырып, байланысқан координаттар жүйесін тірек (базалық) координаттар жүйесімен біріктіреді.

Тұрақтандыру – ҒҰА-ның байланысқан координаттар жүйесінің тірек (базалық) координаттар жүйесінен ұшу кезінде пайда болған бұрыштық ауытқуларды жою процессі. Тұрақтандыру ұшу аппаратына кеңістіктегі белгілі бір бағдардан кейін ішкі немесе сыртқы ауытқу әсерлерінен бұзылған, өзінің бастапқы күйін қалпына келтіруге қабілет береді.

Ғарыш аппараттарының бұрыштық қозғалысын басқаруға қажетті аспаптар мен құрылғылардың жиынтығы ғарыш аппараттарының бағдарлауын басқару жүйесі деп аталады. Ол ғарыш аппаратының корпусымен байланысқан координаттар жүйесінің берілген бұрыштық қозғалысын негізгі координаттар жүйесіне немесе таңдалған бағдарларға қатысты жүзеге асырады.

Ғарыш аппаратының бағдарлауын басқару үшін оған белгілі бір шамалар мен таңбалардың басқару моменттерін қолдану қажет. Бағдарлау жүйелерінде активті және пассивті орындаушы механизмдер қолданылады. Пассивті орындаушы механизмдерге гравитациялық, аэродинамикалық, магниттік механизмдер жатады, олар өз жұмысы үшін ҒҰА бортында жинақталған энергияны қажет етпейді. Олардың тиімділігі жоғары болғанымен оларды қолдану салалары шектеулі. Өз жұмысы үшін ҒҮА бортында жиналатын белгілі бір энергияны немесе массаны қажет ететін активті жүйелерге электромагниттік құрылғылар, реактивті бағдарлау қозғалтқыштары, электр қозғалтқыштары- маховиктер жатады.

Көптеген заманауи ғарыш аппараттарында, мысалы, осы жұмыста қарастырылғандарда электр қозғалтқыштары-маховиктер негізіндегі жүйе қолданылады, мұнда басқару моменті инерциялық айналмалы массалар (орындаушы механтзмдер – электр қозғалтқыштары - маховиктер) арқылы жасалады. Активті бағдарлау жүйесінің құрамына бағдарлау бұрыштарының датчиктері, бұрыштық жылдамдық датчиктері, борттық цифрлық есептеу машинасы (БЦЕМ) және орындаушы механизмдер кіреді.

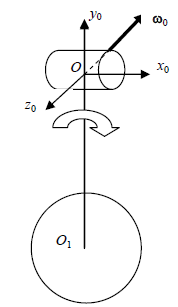
Датчиктерден және басқа борттық жүйелерден БЦЕМ-ге түсетін ақпарат көлемі бағдарлауды сапалы басқару үшін жеткілікті болуы тиіс. БЦЕМ таңдалған басқару алгоритмдерін жүзеге асырады және орындаушы механизмдерді басқару сигналдарын тудырады. Орындаушы механизмдер ғарыш аппаратының корпусына ғарыш аппаратының бұрыштық жағдайының қажетті бағытта өзгеруіне әкелетін басқару моменттерін қосады. Бұл өзгерістер датчиктермен жазылады. Теріс кері байланыс қалыптасады.

**4.2 Ғарыштық ұшу аппаратын автоматты басқару жүйесінің математикалық моделі**

*Координаттар жүйесін анықтау*

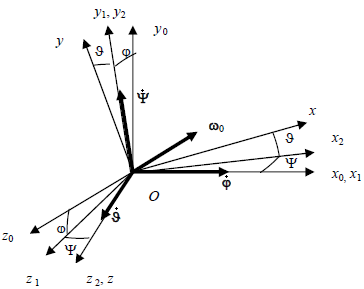
Ғарыштық аппараттың берілген орны белгілі бір координаттар жүйесінде анықталады, оның осьтерінің кеңістіктегі бағыты алдын-ала белгілі. Мұндай координаттар жүйесі негізгі санақ жүйесі деп аталады, оның осьтері арнайы құрылғылар мен аспаптардың көмегімен ҒҰА бортында көрсетілуі керек. Бұл жағдайда осьтер қозғалмайтын немесе инерциялық кеңістікте белгілі түрде қозғалуы мүмкін. Осы немесе басқа негізгі жүйе әрбір нақты жағдайда аппараттың функционалдық мақсатына, оның осьтерін техникалық іске асыру мүмкіндіктерін және бұрыштық қозғалыстарды басқару жүйесін ескере отырып таңдалады [92-98].

Жасанды жер серіктерін және басқа планеталарды құру кезінде айналмалы бағдарлау осьтерін қолданатын бағдарлау жүйелері кең таралды. Ең көп таралған жүйе орбиталық координаттар жүйесі, ол келесідей енгізіледі. Жердің *О1* центрін ғарыш аппараттарының *О* масса центрімен байланыстырады.

****

Сурет 4.1 – Орбиталды координаттар жүйесі

*Ox0y0z0* орбиталық координаттар жүйесіндегі (4.1-сурет) [86, c.13] ҒҰА-ның бұрыштық орналасуы корпуспен тығыз байланысты *Oxyz* координаттар жүйесінің осьтерінің орналасуымен анықталады. *Oxyz* координаталық осьтерінің күйі үш Эйлер бұрышымен сипатталады:  (крен, тангаж және рыскание бұрыштары) (4.2-сурет) [86, c.69].

****

Сурет 4.2 – Бағдарлау бұрыштары

Орбиталық координаттар жүйесінің осьтері келесідей орналасады: *Oy0* осі жергілікті тігінен бағытталған, *Ox0* осі жергілікті горизонт жазықтығында жатыр және қозғалыс бағытымен сәйкес келеді, *Oz0* осі бинормаль бойынша орбитаға бағытталған және алғашқы екі осьпен оң координаттар жүйесін құрайды.

Масса центріне қатысты ҒҰА қозғалысының теңдеулерін қарастырайық. Қатты дененің қозғалмайтын нүктеге қатысты қозғалысы Эйлер теңдеуімен сипатталады [99, 100]:





 (4.1)

мұнда – сәйкес осьтерге қатысты ҒҰА инерциясының негізгі моменттері;

 және  – басқарушы және қоздырушы моменттердің тиісті осьтерге проекциясы;

 – ҒҰА лездік бұрыштық жылдамдығының байланысқан осьтерге проекциясы.

Жалпы жағдайда, ҒҰА-ға әсер ететін *M* күштер моментінің векторы оның орбиталық координаттар жүйесінің осьтеріне қатысты орналасуына байланысты, яғни  бұрыштардың шамасынан, бұрыштық айналу жылдамдығының шамасынанан тәуелді [101-103]:



Осылайша, үш теңдеуді (4.1)  алты тәуелсіз функция байланыстырады. Есептің шешімін табу үшін  бұрыштық айналу жылдымдақтары,  бұрыштар және  орбиталық жылдамдықты өзара байланыстыратын кинематикалық теңдеулердің көмегімен ізделетін  функциялардың тағы үш теңдеуін аламыз:

 (4.2)

Сонымен, ҒҰА-ның масса центріне қатысты бұрыштық қозғалысы толығымен үш динамикалық теңдеумен (4.1) және үш кинематикалық теңдеумен (4.2) сипатталады.

(4.2) кинематикалық теңдеуді сызықтандырғаннан кейін келесі түрде жазылады:

 (4.3)

(4.3) сызықтандырылған кинематикалық теңдеулерді (4.1)-ші Эйлердің динамикалық теңдеулеріне алмастырып, орбитаны айналмалы () деп ұйғарып, масса центрінің айналасындағы ғарыш аппараттарының қозғалысының сызықтандырылған теңдеулерін аламыз:

 (4.4)

Ғарыштық ұшу аппараттарының бағдарлау жүйесінің математикалық моделін құрайық. Басқару моментіне қатысты ғарыштық ұшу аппаратының беріліс функциялары (4.4) қозғалыс теңдеуіндегі , ,  және  елемеген кездегі алынатын сызықтандырылған теңдеулердің Лаплас түрлендіруінен алынады:

 (4.5)

, ,  және  мәндерін заманауи ғарыштық аппараттардың бұрыштық жылдамдықтары мен бұрыштық ауытқулары жеткілікті аз, ал жер орбиталары үшін бұрыштық орбиталық жылдамдық  құрайтын, тәуіліктік -  және бағдарлау жүйесіндегі өтпелі процестердің салыстырмалы түрде жылдам жүруі туралы болжамды қабылдауға болатындықтан, яғни өтпелі процес уақыты орбиталық айналу  кезеңінен едәуір аз болғандықтан елемеуге болады.

ҒҰА көбінесе конус немесе цилиндр түрінде симметриялы пішінге ие болғандықтан, *Ох* -бойлық ось болса, онда  болады. Осы шартты ескере отырып, жүйенің бірінші теңдеуі (4.5) жеңілдетіліп, келесі түрге ие болады:

 (4.6)

Бағдарлау және басқару жүйесінің басқару моменті  -дың екі құрастырушысы болады: Бірінші құрастырушы қалпына келтіруші момент  екіншісі демпфер моменті .

Келесі белгілеулерді енгізіп:



(4.5) және (4.6) теңдеулер жүйесін Коши формасында жазуға болады:

 (4.7)

 (4.8)

Келтірілген қозғалыс теңдеуі абсолютті қатты ҒҰА-ға (айналатын ішкі массалар есепке алынбайды, жылулық және серпімді деформацияны ескермей) жататынын, оның байланысқан координаттар осі ғарыштық аппараттың инерциясының негізгі осі бойынша бағытталғанын айта кету керек.

Кез келген автоматты басқару жүйесінің қозғалтқышының инерциясы болады. Күшейткіштің ең көп тараған функциясы - екінші реттік апериодты қосылыстың беріліс функциясы.

Бұрыштық жылдамдық датчигінің беріліс функциясы

 (4.9)

мұнда  – орындаушы механизмнің уақыт тұрақтысы, орындаушы механизмнің инерциялылығын сипаттайды;

 – салыстырмалы демпфирлеу коэффициенті ;

 – сермерлі орындаушы механизмнің күшейту коэффициенті.

 буынның кірісі және  орындаушы механизмнің теңдеулер шығысы:



Күйлер кеңістігінде 











Күн датчигінің беріліс функциясы

 (4.10)

 (4.11)

мұнда  және  - тиісінше күн датчигінің ауытқу бұрышын өлшеу арнасының күшейту коэффициенті және уақыт тұрақтысы;

 және - тиісінше күн датчигінің бұрыштық жылдамдығын өлшеу арнасының күшейту коэффициенті және уақыт тұрақтысы;

- *OX* осіне қатысты негізгі инерция моменті.

Орындаушы механизм, күн датчигі және бір оське қатысты симметриялық ғарыштық ұшу аппараты келесі теңдеумен сипатталады:

 (4.12)

Белгілеулер енгізіледі:

, , ,

, , , .

**4.3 Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен сызықты ҒҰА-ны адаптивті басқару жүйесінің синтезі**

Сызықты ғарыштық ұшу аппаратының бағдарлау және тұрақтандыру жүйесін адаптивті басқаруда айқын эталондық моделі бар өздігінен бейімделетін жүйе құру мақсаты қойылады, ӨБЖ-нің екі деңгейлі құрылымына сәйкес бұл мақсат екі кезеңде шешіледі: негізгі контурды құру және адаптация контурының синтезі. ӨБЖ-де басқару объектісінің құрылымы белгілі және өзгермейді, ал адаптация алгоритмінің мақсаты басқару жүйесінің номинал режімінің параметрлеріне қатысты басқару объектісінің параметрлерінің шашырауы кезінде басқару жүйесінің параметрлерін қажетті динамикасы бар негізгі контурдың эталондық моделіне бейімдеу, яғни басқару жүйесі мен эталондық модельдің арасындағы сәйкессіздікті нөлге келтіретіндей қылып құрылымы таңдалған регулятордың коэффициенттерін реттеу болып табылады.

4.3.1 Сызықты ҒҰА-ны адаптивті басқару жүйесінің негізгі контурының реттелетін регуляторының синтезі

Ғарыштық ұшу аппаратын сызықты басқару жүйесі келесі күй теңдеуімен сипатталсын:

 (4.13)

мұнда ,  – тиісінше ҒҰА-ның осьті айналу бұрышы, айналудың бұрыштық жылдамдығы және

,  – сермер қозғалтқышының айналу бұрышы және сермер қозғалтқышының бұрыштық жылдамдығы.

Басқару заңы келесі түрде беріледі

 (4.14)

(4.13) ҒҰА басқару жүйесі (4.14) басқару заңын ескеріп келісідей жазылады:

 (4.15)

(4.15) жүйені Ляпуновтың градиентті-жылдамдықты вектор функциясы тәсілімен апериодтық робасты орнықтылыққа зерттейік. Мұнда тиісті параметрлер таңдалғанда жүйе қажетті апериодтық өтпелі процестерді және басқарудың жоғары сапасына кепілдік береді және тербеліс режімдері мен орнықсыздықтың болмауына кепілдік береді.

(4.15) күй теңдеуінен Ляпунов функциясының векторларынан градиент векторының нөлдік емес құрастырушыларын табамыз :

 (4.16)

(4.15)-тен жүйе координаттары бойынша жылдамдық векторының жіктелуінің нөлдік емес компоненттерін анықтаймыз :

 (4.17)

Ляпуновтың вектор-функциясынан уақыт бойынша алынған толық туынды (4.16) градиент векторын (4.17) жылдамдық векторына скалярлық көбейту ретінде анықталады.



 (4.18)

Ляпуновтың вектор-функциясынан уақыт бойынша алынған (4.18) толық туынды кепілді түрде теріс таңбалы функция болып табылады, яғни Ляпунов бойынша асимптотикалық орнықтылықтың жеткілікті шарты әрдайым орындалады.

Ляпунов функциясын (4.16)-тен скаляр түрде градиенттер векторының құрастырушылары бойынша анықтаймыз:



 (4.19)

(4.19) Ляпунов функциясының бар болу шарты, яғни Ляпунов вектор-функциясының оң анықталғандығы келесі шарттармен анықталады:

 (4.20)

4.3.2 Сызықты ҒҰА-ны адаптивті басқару жүйесінің адаптация контурын синтездеу

*Эталондық модельді таңдау*

ҒҰА-ны қажетті динамикамен қамтамасыз ету есебін қарастырайық, қажетті динамиканы эталондық модельдің көмегімен береміз

 (4.21)

мұнда  – эталондық модельдің күй векторы;

– беруші немесе сыртқы әсер.

Эталондық модель векторлы-матрица түрінде келесідей жазылады

 (4.22)

Эталондық модельді таңдау тұйық жүйеге қойылатын талаптарға байланысты (өтпелі процестің түрі, өтпелі процестің уақыты, қайта реттеу, астатизм және т.б.). Бұл жағдайда ол орнықты болуы керек, яғни эталондық модель апериодтық робасты орнықты болуы керек делік.

Басқару мақсатын

 (4.23)

деп талап етіп көрсетейік. Мұнда – (4.13) және (4.21) жүйенің қателігі. Ыңғайлы болу үшін ҒҰА күй теңдеуі векторлы-матрицалық түре келесі теңдеумен жазылады

 (4.24)

мұнда  – ҒҰА күй теңдеуі;

 – тұйық контурдағы басқару векторы;

– басқару объектісінің матрицасы;

– басқарудың тұрақты векторы.

«Идеал» регулятордың құрылымын алу үшін ауытқуларда теңдеулер жазылады:

 (4.25)

(4.25) теңдеудің шешілімділігі

 (4.26)

(4.26) шартты орындаған кезде (4.25) теңдеу келесі түрге ие болады

 (4.27)

Басқару мақсатына (4.26) шарт орындалған кезде және (4.27) жүйенің апериодтық робасты орнықтылығы кезінде жетеді.

(4.27) жүйе Ляпуновтың градиентті-жылдамдықты вектор-функциясы тәсілімен апериодтық робасты орнықтылыққа зерттеледі. Эталондық моделдің матрицасы келесі түрде болады



(4.27) жүйені кеңейтілген түрде көрсетейік

 (4.28)

(4.28)-дан Ляпуновтың вектор-функциясынан градиент векторының құрастырушыларын анықтаймыз :

 (4.29)

(4.28)-дан жүйе координаттары бойынша жылдамдық векторының жіктеу құрастырушыларын анықтаймыз :

 (4.30)

Ляпуновтың вектор-функциясынан уақыт бойынша алынған толық туынды (4.29) градиенттер векторын (4.30) жылдамдық векторына скалярлық көбейтуі ретінде анықталады:



 (4.31)

(4.31) функция теріс таңбалы функция болып табылады, яғни асимптотикалық орнықтылықтың қажетті шарты орындалады.

(4.30)-ден Ляпуновтың вектор-функциясы скалярлық түрде анықталады:

 (4.32)

Эталондық модельдің апериодтық робасты орнықтылығының шарттарын келесі түрде алынады:

 (4.33)

(4.33) шарт орындалған кезде эталондық модель өтпелі процестің қажетті сапасын қамтамасыз етеді.

Жалпы (4.23) мақсатына жету үшін жүйенің бекітілген мәндері (параметрлері) кезінде (4.33) және (4.20) теңсіздігінің оң жақтарының теңдігі орындалуы керек. Осылайша келесіні аламыз

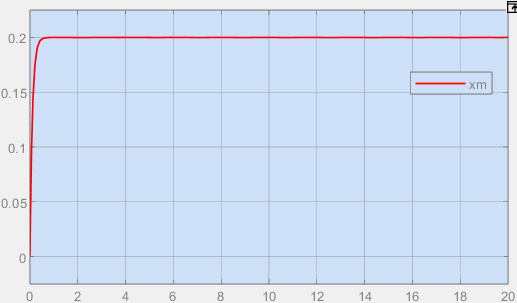
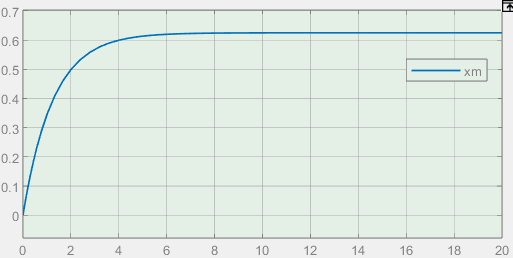
Осыдан, ҒҰА-ны басқару жүйесінің синтезделетін коэффициенттері табылады:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.34) |

Осылайша, ҒҰА адаптивті басқару жүйесінің негізгі контурының реттелетін регуляторының және эталондық моделінің апериодтық робасты орнықтылығы басқару жүйесінің робасты орнықтылығы мен сапасына кепілдік береді.

*Имитациялық модельдеу нәтижелері*

Ғарыштық ұшу аппаратын бағдарлау мен тұрақтандыруды басқару жүйесі Matlab Simulink ортасында зерттеледі. Басқару жүйесін қажетті динамикамен қамтамасыз ететін эталондық модель имитациялық эксперимент негізінде алынады. Басқару объектісінің параметрлерінің белгілі мәндерінде (Қосымша Ә) және эталондық модельдің динамикасының матрицасындағы және коэффициенттердің мәндерін өзгертумен қажетті өтпелі сипаттамалары бар 4.3-суреттегі эталондық модель алынды. Табылған және коэффициенттері (4.33) апериодтық робасты орнықтылығының шарттарын қанағаттандырады. Апериодтық робасты орнықты жүйелерде ауытқуларға қатысты күй теңдеулерінің шешім нормасы монотонды түрде нөлге ұмтылады, техникалық тұрғыдан оның өтпелі процессі апериодтық сипатта болады.

а ә

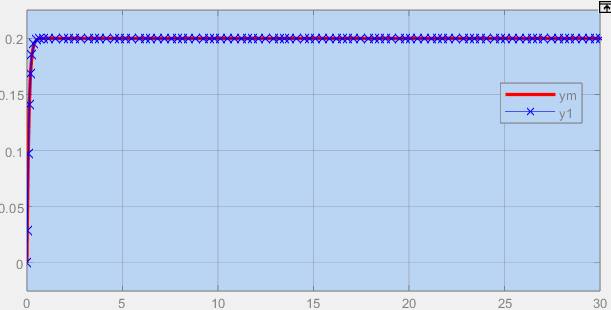
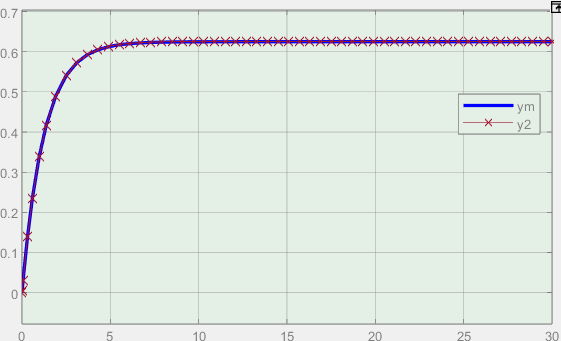
а – жүйенің х1 ауытқу бұрышы шығысының өтпелі сипаттамасы; ә – жүйенің х2 бұрыштық жылдамдық шығысының өтпелі сипаттамасы

Сурет 4.3 – Қажетті динамикасы бар эталондық модельдің өтпелі сипаттамалары

(4.23) басқару мақсатына жету үшін жүйенің берілген мәндері (параметрлері) кезінде (4.33) эталондық модельдің апериодтық робасты орнықтылығы шарттарының және (4.20) негізгі контурының апериодтық робасты орнықтылығы шарттарының оң жақтарының теңдігінен ғарыштық ұшу аппаратын басқару жүйесінің синтезделетін k1=3.21 және k2=2.41 коэффициенттері табылды.

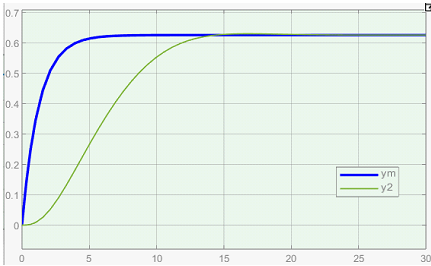
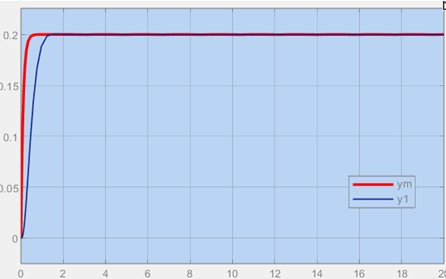
Мұндай адаптивті жүйеде автоматты түрде өздігінен бейімделу жүреді, адаптация контурының есебінен адаптивті жүйеде біріншіден сыртқы қоздырулар компенсацияланады, яғни жүйе сыртқы қоздыруларға қатысты өзгермейді. Екіншіден, жүйеде параметрлердің өзгеруіне байланысты өздігінен бейімделу жүреді, яғни басқару жүйесінің номинал режімінің параметрлеріне қатысты басқару объектісінің параметрлерінің шашырауы кезінде басқару жүйесінің параметрлерін қажетті динамикасы бар эталондық модельге бейімдеу жүреді. Басқару жүйесінің қажетті жұмыс көрсеткіштерін біле отырып және нақты ағымдағы көрсеткіштерді өлшей отырып, олардың сәйкессіздік өлшемін нөлге немесе ең төменгі рұқсат етілген мәнге дейін азайтуға эталондық модельдің апериодтық робасты орнықтылығы шарттары және негізгі контурының апериодтық робасты орнықтылығы шарттарынан қол жеткізеді.

Ғарыштық ұшу аппаратының отынды жағудан оның массасы мен инерция моменті өзгереді. Осыдан инерция моментін мәнін өзгертумен жүргізілген эксперименттер нәтижесі: 4.4-суретте басқару жүйесінің регуляторының k1=3.21 және k2=2.41 коэффициенттері кезіндегі, 4.5-cуреттте k1=6.32 және k2=5.28 коэффициенттері кезіндегі, 4.6-суретте k1=8.28 және k2=6.41 кезіндегі өтпелі сипаттамалары келтірілген, осыдан басқару жүйесі мен айқын эталондық модельдің іс-қимылындағы динамикалық сәйкестікке қол жеткізетіндігін көруге болады.

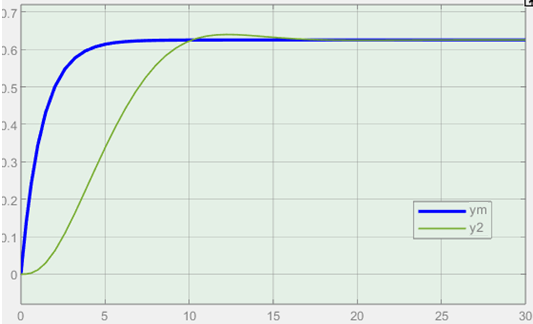
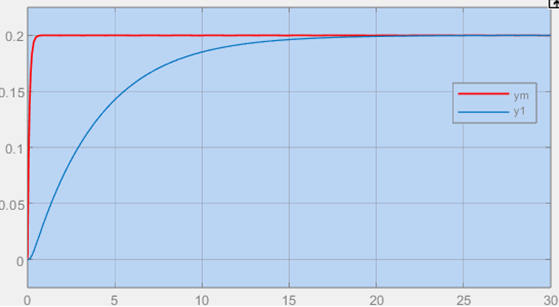
а ә

Сурет 4.4 – k1=3.21 және k2=2.41 кезіндегі х1 ауытқу бұрышы, х2 бұрыштық жылдамдық және эталондық модельдің шығыстарының өтпелі сипаттамалары

а ә

Сурет 4.5 – k1=6.32 және k2=5.28 кезіндегі х1 ауытқу бұрышы, х2 бұрыштық жылдамдық және эталондық модельдің шығыстарының өтпелі сипаттамалары

а ә

Сурет 4.6 – k1=8.28 және k2=6.41 кезіндегі жүйенің х1 ауытқу бұрышы, х2 бұрыштық жылдамдық және эталондық модельдің шығыстарының өтпелі сипаттамалары

**Төртінші бөлім бойынша қорытындылар:**

1. Сызықты ғарыштық ұшу аппаратының бағдарлау және тұрақтандыру жүйесін адаптивті басқаруда айқын эталондық моделі бар өздігінен бейімделетін жүйе құрылды. ӨБЖ-де басқару объектісінің құрылымы белгілі және өзгермейді, ал адаптация алгоритмінің мақсаты басқару жүйесінің номинал режімінің параметрлеріне қатысты басқару объектісінің параметрлерінің шашырауы кезінде басқару жүйесінің параметрлерін қажетті динамикасы бар негізгі контурдың эталондық моделіне бейімдеу, яғни басқару жүйесі мен эталондық модельдің арасындағы сәйкессіздікті нөлге келтіретіндей қылып құрылымы таңдалған регулятордың коэффициенттерін реттеу болып табылады.

2. Басқару жүйесінің берілген мәндерінде айқын эталондық модельдің және коэффициенттері имитациялық эксперименттер негізінде анықталып, басқару жүйесін қажетті динамикамен қамтамасыз ететін оның апериодты сипаттағы өтпелі сипаттамасы алынды.

3. Жалпыланған реттелетін объектінің апериодтық робасты орнықтылық шарттарынан жүйенің берілген параметрлері кезінде адаптация контурының өздігінен бейімделу коэффициенттері есептелді.

4. Ғарыштық ұшу аппаратының инерция моменті мәнін өзгертумен жүргізілген эксперименттер нәтижесі басқару жүйесінің эталондық модельге бейімделенетінін көрсетті.

5. Ұсынылып отырған Ляпуновтың градиентті-жылдамдықты вектор-функциясы тәсілімен синтезделген сызықты ғарыштық ұшу аппаратын адаптивті басқару жүйесі жұмысқа қабілеттілігін растады. Мұндай басқару жүйесінің артықшылықтары: жүйе нақты уақыты масштабында жұмыс істейді және техникалық іске асырылуы оңай. Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілі өтпелі процестің бастапқы сәтінде серпілсіз болатын және тербеліссіз өтпелі процесті қамтамасыз ететін, жоғары дәлдікті басқару жүйесін құру және зерттеу мүмкіндігін береді.

**ҚОРЫТЫНДЫ**

Қазіргі таңда жоғары сапа көрсетіштері бар жоғары орнықты заманауи және перспективалы техникалық жүйелерді құру өзекті мәселе болып табылады. Мұндай жүйелерді құруда басқару жүйелерін талдау мен синтездеудің дәстүрлі әдістерінің мүмкіндігі шектеулі. Бұл мәселені шешудің перспективалы әдістерінің бірі-адаптация тәсілдерін қолдану. Адаптивті басқару жүйелерінің синтезі адаптация тізбегі бар тұйық объектінің орнықтылығын, робастылығын және басқару сапасын параметрлердің шашырауының кез келген мәндерінде қамтамасыз етумен тығыз байланысты.

Қазіргі таңда сызықты жүйелерді адаптивті басқару тәсілдері жеткілікті дамыған, дегенмен адаптация алгоритмдерін синтездеудің белгілі тәсілдері: гиперорнықтылық теориясына негізделген тәсілдер, күшейтудің «шексіз үлкен» коэффициентін енгізуге негізделген тәсілдер, сырғанаушы режімдерді ұйымдастыруға негізделген тәсілдер көбінесе реті төмен қарапайым бір өлшемді жүйелерді құруда қолданылады, ал Ляпунов функцияларын пайдалануға негізделген тәсілдер және градиенттік тәсілдермен ұсынылған адаптивті басқару схемалары көбінесе өлшемділігі жоғары болып келеді, сонымен қатар күрделі математикалық аппаратты қолданады, бұл оларды инженерлік қолдануды қиындатады. Осыған байланысты қарапайым құрылымы мен шағын өлшемі бар адаптивті басқару алгоритмдерін синтездеу мәселесі әліде зерттеуді қажет етеді.

Бұл жұмыста Ляпунов функцияларын қолдануға негізделген әдіс аясындағы Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілінің көмегімен сызықты объектілерді адаптивті басқару жүйесінің синтезі есебін шешудің жаңа тәсілі ұсынылған. Ляпуновтың тура әдісінің асимптотикалық орнықтылығы теоремасы мен орнықтылық ұғымдарын геометриялық тұрғысынан түсіндіру негізіндегі Ляпуновтың вектор-функциясын құрудың әмбебап тәсілі ұсынылған. Адаптивті басқару жүйесін градиенттік функциялар ретінде, Ляпунов функцияларын апаттар теориясының градиенттік динамикалық жүйелердің потенциалдық функциялары ретінде қарастырылады. Бұл Ляпунов функциясын вектор-функция түріндегі градиент бойынша құру мүмкіндігін береді. Орнықтылықты зерттеу жүйе траекториясының әрбір нүктесінде динамикалық беттерді құруға алып келеді, ол нүктеде жүйенің күй теңдеуі ауытқуларда құрастырылады, яғни бұл координат басын және координаттар жүйесін тасымалдауды білдіреді. Жаңа нүктеге ауыстырылған координат басы – бұл нөлдік координат басы болып есептелінеді. Орнықтылық координат басына қатысты зерттеледі. Яғни, бастапқы координаттар жүйесі абсолютті емес және орнықтылыққа зерттелетін кеңістіктің нүктесіне байланысты өзгереді. Геометриялық тұрғыдан Ляпунов функциясынан есептелген градиент векторы функцияның ең үлкен өсуіне қарай бағытталады, жылдамдық векторы бұл ауытқу – ол координат басына қарай ұмтылады, яғни бұл жерден осы екі вектордың бір-біріне қарама-қарсы бағытта бағытталғанын көруге болады. Бұл градиент векторы және жылдамдық векторы арасындағы бұрыш 1800-қа тең екенін білдіреді.

Бір кірісі және бір шығысы бар сызықты объект және m кірісі және n шығысы бар сызықты объект үшін айқын эталондық моделі бар өздігінен бейімделетін жүйе құрылды. Өздігінен бейімделетін жүйенің негізгі контур және адаптация контуры болатын екі деңгейлі құрылымы бар. Мұндай жүйелерде басқару объектісінің құрылымы белгілі және өзгермейді, басқару жүйесінің қажетті динамикасы айқын эталондық модельмен қамтамасыз етіледі. Басқару жүйесінің қажетті жұмыс көрсеткіштерін біле отырып және нақты ағымдағы көрсеткіштерді өлшей отырып, олардың сәйкессіздік өлшемін нөлге немесе ең төменгі рұқсат етілген мәнге дейін азайту басқару мақсаты қойылды. Қойылған басқару мақсатына жету үшін бір кірісі және бір шығысы бар сызықты объектіні және m кірісі және n шығысы бар сызықты объектіні адаптивті басқару жүйесінің негізгі контурлары құрылып, басқару жүйесі және басқару жүйесін қажетті динамикамен қамтамасыз ететін эталондық модель Ляпуновтың градиентті-жылдамдықтық вектор-функциясы тәсілімен апериодтық робасты орнықтылыққа зерттелді. Оң анықталған Ляпунов функциясының бар болуынан апериодтық робасты орнықтылық шарттары анықталды. Басқару жүйесінің берілген мәндері (параметрлері) кезінде негізгі контурдың регуляторының коэффициенттері есептелді. Адаптация контурының синтезін жүргізуде жүйенің барлық өзгермейтін бөлігін қамтитын адаптация контурының жалпыланған реттелетін объекті моделі құрылды. Жалпыланған реттелетін объект – бұл да динамикалық объект, оның динамикасы адаптивті басқару жүйесінің динамикасын анықтайды. Жалпыланған реттелетін объектінің апериодикалық орнықтылығы басқару мақсатына жету мүмкіндігін береді. Осыдан, жалпыланған реттелетін объекті апериодтық робасты орнықтылыққа зерттеледі. Өлшенетін және өлшенбейтін сыртқы әсерлер – қоздырулар болып табылады. Сыртқы қоздыруларды адаптация контуры компенсациялайды, ал қалған динамикасы апериодтық робасты орнықтылықтан анықталады. Апериодтық орнықты жүйелердің жеке классын бөліп қарастырамыз, мұндай жүйелерде ауытқуларға қатысты күй теңдеулерінің шешім нормасы монотонды түрде нөлге ұмтылады, техникалық тұрғыдан оның өтпелі процессі апериодтық сипатта болады. Жалпыланған реттелетін объектінің апериодтық робасты орнықтылық шарттарынан жүйенің берілген параметрлері кезінде адаптация контурының өздігінен бейімделу коэффициенттері есептеледі. Осылай жалпы алғанда сызықты объектілерді адаптивті басқару жүйесінің синтезі есебін шешудің жаңа әдісі ұсынылады.

Ұсынылып отырған Ляпуновтың градиентті-жылдамдықты вектор-функциясы тәсілімен адаптивті басқару жүйелерін синтездеуді практика жүзінде іске асырлуы сызықты ғарыштық ұшу аппаратының бағдарлау және тұрақтандыру жүйесінің негізінде жүргізілді және имитациялық модельдеу негізінде жұмысқа қабілеттілігін растады. Мұндай басқару жүйесінің артықшылықтары: жүйе нақты уақыты масштабында жұмыс істейді және техникалық іске асырылуы оңай.

**ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ**

1 Мирошник КВ., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.

2 Теория управления (дополнительные главы): учеб. пос. / под ред. Д.А. Новикова. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 552 с.

3 Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах (беспоисковые методы). – М.: Наука, 1990. – 292 с.

4 Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивное управление в технических системах: учеб. пособие. – СПб., 2001. – 244 с.

5 Бобцов А.А., Никифоров В.О., Пыркин А.А. и др. Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении: учеб. пос. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 277 c.

6 Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. – М.: Наука, 1973. – 560 с.

7 Андреев В.О., Суздальцев А.И., Тиняков С.Е. Системы управления технологическими комплексами с транспортным запаздыванием // АиТ. – 2002. – №5. – С. 184-189.

8 Плетнев Г.П. Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций. – М.: Энергия, 1995. – 350 с.

9 Неймарк Ю.И. Динамические системы и управляемые процессы. – М.: Наука, 1978. – 336 с.

10 Срагович В.Г. Адаптивное управление. – М.: Наука, 1981. – 264 с.

11 Петров Б.Н., Кафаров В.В., Рутковский В.Ю. и др. Применение беспоисковых самонастраивающихся систем для управления химико-технологическими процессами // Измерение, контроль, автоматизация. – 1979. – №3(19). – С. 46-54.

12 Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пос. – М.: Высш. шк., 1989. – 263 с.

13 Деревицкий Д.П., Фрадков А.Л. Прикладная теория дискретных систем управления. – М.: Наука, 1981. – 216 с.

14 Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука, 1981. – 448 с.

15 Земляков С.Д., Рутковский В.Ю. О некоторых результатах развития теории и практического применения беспоисковых адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. – 2001. – №7. – С. 103-121.

16 Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах. – М.: ЛКИ, 2008. – 381 с.

17 Novosad D., Lubomír M. Pole placement controller with compensator adapted to semi-batch reactor process // International Journal of mathematical models and methods in applied sciences. – 2011. – Vol. 5, Issue 7. – P. 1265-1272.

18 Соболев О.С. Методы исследования линейных многосвязных систем. – М.: Энергия, 1985. – 120 с.

19 Жулин А.И., Ягодкина Т.В. Методы структурной и параметрической идентификации многомерных динамических объектов // Информатизациионные средства и технологии: матер. междунар. конф. – М.: МЭИ, 1995. – С. 87-92.

20 Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Адаптивное управление летательным аппаратом с идентификацией на скользящих режимах // Управление большими системами. – 2009. – №26. – С. 113-145.

21 Адаптивные автоматические системы: сб. ст. / под ред. Г.А. Медведева и др. – М.: Срв.радио, 1972. – 1984 с.

22 Кику А.Г., Костюк В.И., Краскевич В.Е. и др. Адаптивные системы идентификации. – Киев: Техника, 1975. – 288 с.

23 Коуэна К.Ф.Н., Гранта П.М. Адаптивные фильтры / пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 392 с.

24 Соколов И.И., Рутковский В.Ю., Судзиловский Н.Б. Адаптивные системы автоматического управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1988. – 208 с.

25 Новоселов А.С., Болконин В.Е., Чинаев П.И. и др. Системы адаптивного управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.

26 Ynineb A.R. et al. MRAC Adaptive Control Design for an F15 Aircraft Pitch Angular Motion Using Dynamics Inversion and Fractional-Order Filtering // International Journal of Robotics and Control Systems. – 2022. – Vol. 2, Issue 2. – P. 240-252.

27 Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пос. – М.: Энергоиздат, 1987. – 256 с.

28 Смирнова В.М. и др. Основы проектирования и расчета следящих систем. – М.: Машиностроение, 1983. – 296 с.

29 Земляков С.Д., Рутковский В.Ю. О некоторых результатах развития теории и практического применения поисковых адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. – 2001. – №7. – С. 103-121.

30 Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.С. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. – М.: Наука, 1977. – 272 с.

31 Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – Таганрог: ТГРУ-М.: Энергоатомиздат, 1994. – 468 с.

32 Проблемы проектирования и развития систем автоматического управления и контроля ГТД / под ред. С.Т. Кусимова, Б.Г. Ильясова, В.И. Васильева. – М.: Машиностроение, 1999. – 609 с.

33 Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н. Матричные методы в теории и практике систем автоматического управления летательных аппаратов. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 666 с.

34 Frasik J.M. et al. An evaluation of control methods on a Quanser AERO. – Kristiansand: University of Agder, 2018. – 83 p.

35 Hojjati R. Adaptive Control and Control Allocation for Spacecraft Formation Flying under Perturbations, Uncertainties, and Faults. – Ottawa: Carleton University, 2020. – 141 p.

36 Туз А.А., Браун-Аквей В., Лемпого Ф. и др. Управление с прогнозирующими моделями // Тр. Кольского научного центра РАН. – 2015. – №3(29). – С. 151-161.

37 Razvan C., Livint G. Nonlinear model predictive control of autonomous vehicle steering // Procced. 19th internat. conf. on System Theory and Computing. – Cheile Gradistei, 2015. – P. 466-471.

38 Черешко А.А., Шундерюк М.М. Границы применимости алгоритмов усовершенствованного управления с прогнозирующей моделью в условиях 109 неопределенности динамики объекта // Проблемы управления. – 2020. – №1. – С. 17-23.

39 Faulwasser T., Grüne L. et al. Economic Nonlinear Model Predictive Control // Found. Trends Syst. Control. – 2017. – Vol. 5, Issue 1. – P. 224-409.

40 Gorges D. Relations between Model Predictive Control and Reinforcement Learning // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, Issue 1. – P. 4920-4928.

41 Chikasha P.N., Dube C. Adaptive Model Predictive Control of a Quadrotor // IFAC PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, Issue 2. – P. 157-162.

42 Tatjevsky P. Advanced Control of Industrial Processes: Structures and Algorithms. – London: Springer, 2010. – 348 p.

43 Nguyen N.T. Model-Reference Adaptive Control: A Primer. – Cham: Springer, 2018. – 453 p.

44 Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Крутова И.Н. и др. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления. – М.: Машиностроение, 1972. – 260 с.

45 Глумов В.М., Земляков С.Д. и др. Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами: некоторые результаты и направления развития // АиТ. – 1999. – №6. – C. 100-116.

46 Льюнг Л. Идентификация систем: теория для пользователя. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

47 Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М., 2004. – Т. 5. – 784 с.

48 Методы Робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.

49 Еремин Е.Л., Цыкунов А.М. Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. – Бишкек: Илим, 1992. – 182 с.

50 Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Чепак Л.В. Синтез адаптивных систем для скалярных объектов с запаздыванием по управлению. – Благовещенск: Изд-во Амурcкого гос. ун-та, 2006. – 247 с.

51 Еремин Е.Л., Чепак Л.В. Нелинейно-робастная система с неявным эталоном для скалярного объекта с запаздыванием по управлению // Вестник Амурского государственного университета. – 2007. – №37. – С. 37-40.

52 Aslrom J.K., Wittenmark В. Adaptive control. – London: Addison-Wesley Publishing Company, 1989. – 526 p.

53 Balaska H., Ladaci S., Djouambi A. Direct fractional order MRAC adaptive control design for a class of fractional order commensurate linear systems // Journal of Control and Decision. – 2021. – Vol. 8, Issue 3. – P. 1-15.

54 Ioannou P., Fidan B. Adaptive control tutorial. – Philadelphia: Siam, 2006. – 403 p.

55 Astolfi A. Nonlinear and adaptive control: Tools and algorithms for the user. – London: Imperial College Press, 2006. – 312 p.

56 Astolfi A., Karagiannis D., Ortega R. Nonlinear and adaptive control with applications. – Berlin: Springer, 2008. – 290 p.

57 Gros C. Complex and adaptive dynamical systems: A primer. – Berlin: Springer, 2008. – 260 p.

58 Попов В.М. Гиперустойчивость автоматических систем. – М.: Наука, 1970. – 456 с.

59 Landau I.D. Adaptive Control Systems: the Model Reference Approach. – N.Y.: Dekker, 1979. – 406 p.

60 Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Чепак Л.В. Модели современных систем автоматического управления. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2014. – 66 с.

61 Барбашин Е.А. Введение в теория устойчивости движения. – М.: Наука, 1967. – 225 с.

62 Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. – М.; Л.: Гостехиздат, 1950. – 472 с.

63 Андриевский Б., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке Matlab. – СПб.: Наука, 2000. – 475 с.

64 Ogata К*.* Modem control engineering. – New Jersey: Prentice Hall, 1990. – 963 p.

65 Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Управление нелинейными колебательными и хаотическими системами // В кн.: Избранные главы теории автоматического управления. – СПб.: Наука, 1999. – 467 с.

66 Nazenda K.S., Volavani L.S. A comparison of Lyapunov and hyperstability approaches to adaptive control of continuous systems // IEEE Trans. Automot. Confr. – 1980. – Vol. AC-25, Issue 2. – P. 243-247.

67 Бейсенби М.А. Исследование робастной устойчивости систем автоматического управления методом функции А.М. Ляпунова. – Астана, 2015. – 204 с.

68 Beisenbi M.A., Basheyeva Zh.O. Solving output control problems using Lyapunov gradient-velocity vector function // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2019. – Vol. 9, Issue 4. – P. 2874-2879.

69 Beisenbi M., Kaliyeva S. The solution to the problem of synthesis of control of multidimensional objects // Procced. internat. conf. on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). – Tashkent, 2019. – P. 1-4.

70 Beisenbi M., Sagymbay A., Satybaldina D. et al. Velocity gradient method of Lyapunov Vector Functions // Procced. ACM 5 th internat. conf. on e-Society, e-Learning and e-Technologies (ICSLT 2019). – Vienna, 2019. – P. 88-92.

71 Beisenbi M., Kaliyeva S. Synthesis of the control systems by the state of an object with input and single output by a gradientvelocity method of A.M. Lyapunov vector functions // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9, Issue 10. – P. 2080-2086.

72 Mamyrbek B., Aliya S., Gulzhan U. et al. Robust stability of spacecraft traffic control system using lyapunov functions // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2016. – Vol. 88, Issue 2. – P. 252-261.

73 Бейсенби М.А., Тен В.В. Компьютерное моделирование робастно-устойчивых систем управления в классе структурно-устойчивых отображений // Procced. 2 th internat. conf. «New Trends in the Computer Science Master’s Curriculum». – Almaty, 2004. – P. 115-119.

74 Ержанов Б.А., Тен В.В. Использование трехпараметрических структурно-устойчивых отображений для моделирования робастно-устойчивых систем управления // Procced. 2 th internat. conf. «New Trends in the Computer Science Master’s Curriculum». – Almaty, 2004. – P. 170-174.

75 Мукатаев Н.С. Системы управления с повышенным потенциалом робастной устойчивости в классе катастроф «гиперболическая омблика»: дис ... док. PhD: 6D070200. – Астана, 2015. – 114 с. – Инв. №0615РК00181.

76 Гилмор Р. Прикладная теория катастроф: в 2 т. / пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 350 с.

77 Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения / пер. с англ. – М.: Наука, 2001. – 617 с.

78 Дорф P., Бишоп P.Современные системы управления / пер. с англ. – М., 2002. – 832 с.

79 Beisenbi M., Temirbek A., Ostayeva A. et al. Synthesis of a gradient-velocity control system using the Lyapunov vector-function method for an object with one input and one output /**/** Journal of the Balkan Tribological Association. – 2022. – Vol. 28, Issue 6. – P. 799-813.

80 Бейсенби М.А., Темирбек А., Маймурынова А.А. Синтез адаптера для объекта с одним входом и одним выходом градиенто-скоростным методом вектор-функции Ляпунова // Вестник Торайгыров университет. – 2021. – №1. – С. 58-68.

81 Beisenbi M.A., Temirbek A., Maimurynova А.А. Reference model selection of the adaptive control system for an object with single-input and single-output // Абай атындағы ҚазҰПУ-нің Хабаршысы. – 2021. – №4(76). – Б. 15-20.

82 Бейсенби М.А., Темирбек А. m-кірісі және n-шығысы бар адаптивті басқару жүйесінің негізгі контурының реттелетін регуляторының синтезі // ҚеАҚ «Университет еңбектері». – 2022. – №3(84). – Б. 286-288.

83 Бейсенби М.А., Темирбек А. Синтез настраиваемого регулятора основного контура адаптивной системы управления с одним входом и одним выходом // Вестник НИА РК. – 2023. – №3(89). – С. 46-56.

84 Бейсенби М.А. Увеличение потенциала робастной устойчивости системы управления космическим летательным аппаратом (КЛА). – Астана: ТОО «DR-Project», 2015. – 160 с.

85 Артюхин Ю.П., Каргу Л.И. Симаев В.Л. Системы управления космических аппаратов, стабилизированных вращением. – М.: Машиностроение, 1976. – 287 с.

86 Васильев В.Н. Системы ориентации космических аппаратов. – М., 2009. – 310 с.

87 Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н. Управление ориентацией космических аппаратов. – М.: Наука, 1974. – 600 с.

88 Петров К. П. Аэродинамика транспортных космических систем. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 212 с.

89 Попов В.И. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1986. – 183 с.

90 Tewari A. Modern control design with Matlab and Simulink. – Kanpur: Indian Institute of Technology, 2002. – 519 p.

91 Zhang Y., Chen Z. A Closed-loop Control Allocation Method for Satellite Precision Pointing // Procced. in IEEE 10th internat. conf. on Industrial Informatics. – Beijing, 2012. – P. 1108-1112.

92 Mauro G. D., Lawn M., Bevilacqua R. Survey on Guidance Navigation and Control Requirements for Spacecraft Formation-Flying Missions // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2018. – Vol. 41, Issue 3. – P. 1-22.

93 Gui H., de Ruiter A.H.J. Adaptive Fault-Tolerant Spacecraft Pose Tracking with Control Allocation // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2019. – Vol. 27, Issue 2. – P. 479-494.

94 Zhu Z., Guo Y. Adaptive fault-tolerant attitude tracking control for spacecraft formation with unknown inertia // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 2018. – Vol. 32, Issue 1. – P. 13-26.

95 Bustan S.K. Hosseini Sani, and N. Pariz, Adaptive Fault Tolerant Spacecraft Attitude Control Design with Transient Response Control // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2014. – Vol. 19, Issue 4. – P. 1404-1411.

96 Gui H., Vukovich G. Adaptive fault-tolerant spacecraft attitude control using a novel integral terminal sliding mode // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2017. – Vol. 27, Issue 16. – P. 3174-3196.

97 Козлов Д.И*.* Конструирование автоматических космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1996. – 343 с.

98 Петров К.П*.* Аэродинамика транспортных космических систем. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 212 с.

99 Гавриленко О.И., Лученко О.А. Система управления угловым движением микроспутника // Матер. 8-й всеукраин. науч.-практ. конф. «Наука и образование 2005». – Днепропетровск: Наука і освіта, 2005. – C. 67-69.

100 Кулик А.С., Гавриленко О.И., Лученко О.А. Отказоустойчивая ориентация и стабилизация существенно несимметричного космического аппарата // Тези доп міжнар. наук.-техн. конф. «ІКТМ-2003». – Харьков: ХАІ, 2003. – С. 107.

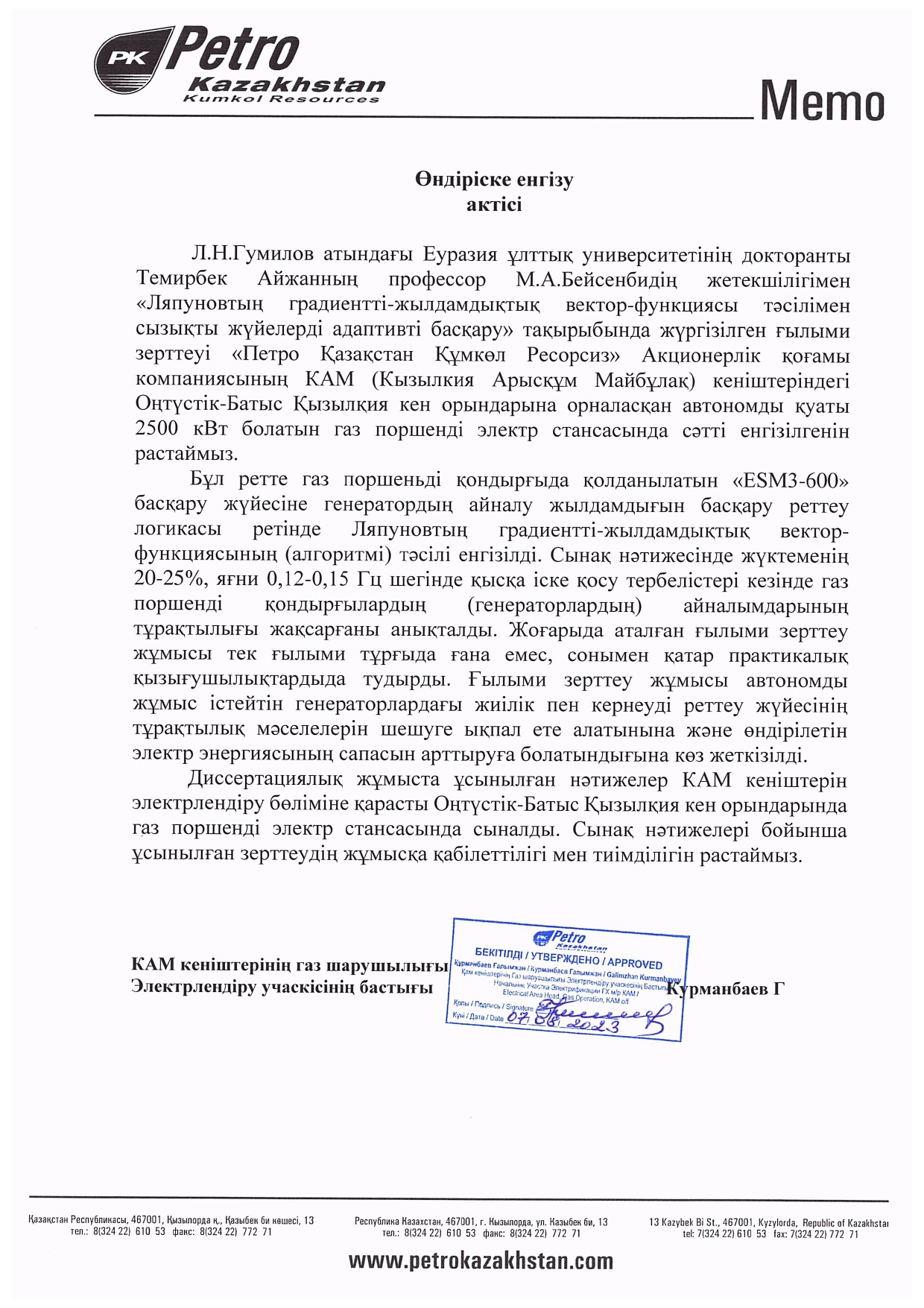
101 Поляков М.В., Полякова А.В. Двигатель маховик на базе механической системы «Электродвигатель редуктор-маховик» для управления ориентацией малого космического аппарата // Космическое приборостроение: сб. науч. тр. – Томск, 2013. – С. 104-107.

102 Симоньянц Р.П. Методы пассивной ориентации и стабилизации космических аппаратов: учеб. пос. – М., 2015. – 132 с.

103 Зеленцов В.В., Никитенко В.И. Исполнительные органы систем управления движением космических летательных аппаратов и ракет: учеб. пос. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 32 с.

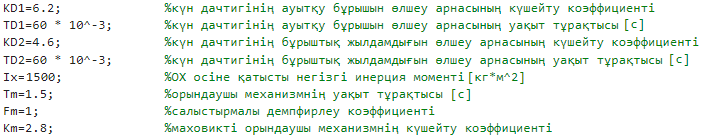
**ҚОСЫМША А**

Енгізу актісі

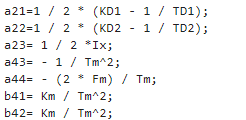


**ҚОСЫМША Ә**

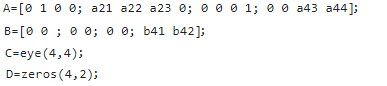
Объектінің параметрлері

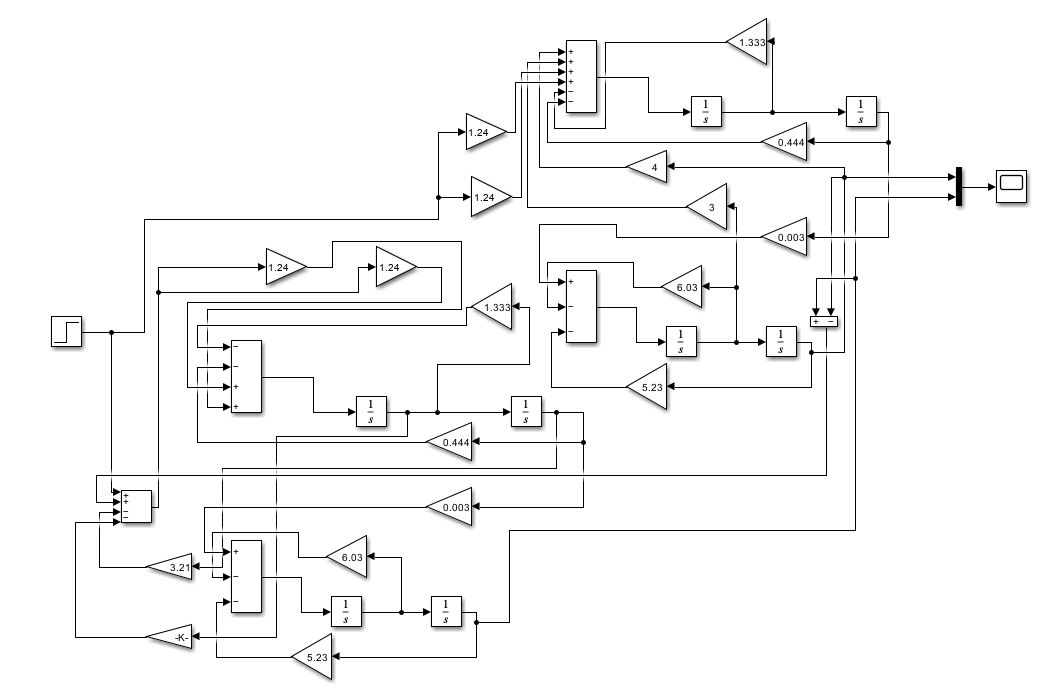


Қозғалыс теңдеуінде қолданылатын айнымалылар









Сурет Ә.1 – Matlab Simulink ортасында ғарыштық ұшу аппараттарын басқару жүйесінің құрылымдық схемасы