Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»

На правах рукописи

(as

САБИТОВ Искандер Ильдарович

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ДВУХКАНАЛЬНОГО ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСВЯЗНЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ МЕТОДОМ ДЕКОМПОЗИЦИИ (НА ПРИМЕРЕ АВИАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ)

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации (в промышленности)

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель доктор технических наук, профессор Б. Г. Ильясов

УФА – 2016

оглавление

| Введение | 5 |
|--|----|
| Глава 1. Анализ проблемы проектирования МСАУ СТО | |
| с логическим алгоритмом управления | 13 |
| 1.1. Актуальность проблемы проектирования МСАУ | |
| авиационным газотурбинным двигателем | 13 |
| 1.2. Методы анализа и синтеза МСАУ сложными | 17 |
| техническими объектами | |
| 1.3. Логико-динамические системы управления сложными | |
| техническими объектами | 31 |
| 1.4. Цели и задачи научного исследования | 38 |
| Выводы по первой главе | 41 |
| Глава 2. Синтез двухканального логического регулятора | 43 |
| 2.1. Концепция проектирования и структура МСАУ с | |
| двухканальным логическим регулятором на основе метода | |
| декомпозиции | 43 |
| 2.2. Синтез корректирующего логического алгоритма | 47 |
| управления автономной сепаратной подсистемой с учетом | |
| динамики её движения | |
| 2.3. Синтез координирующего логического алгоритма | 59 |
| управления сепаратной подсистемой с учетом влияния | |
| перекрестных связей | |
| 2.4. Сравнительный анализ логических алгоритмов при | 67 |
| управлении многосвязным объектом | |
| Выводы по второй главе | 78 |
| Глава 3. Исследование эффективности МСАУ СТО с двойным | |
| логическим алгоритмом управления | 81 |
| 3.1. Синтез МСАУ СТО с двухканальным логическим | |
| регулятором в расчетной точке | 81 |

| 3.2. Анализ эффективности логического управления при | |
|--|-----|
| параметрических изменениях | 89 |
| 3.3. Анализ эффективности двойного логического | |
| управления при наличии чистого запаздывания | 106 |
| 3.4. Анализ эффективности логического управления в | |
| режиме стабилизации | 111 |
| Выводы по третьей главе | 121 |
| Глава 4. Исследование эффективности МСАУ авиационным | 123 |
| ГТД с двойным логическим алгоритмом управления | |
| 4.1. Инженерная методика и программное обеспечение | |
| для проектирования МСАУ ГТД с двойным логическим | 123 |
| алгоритмом управления | |
| 4.2. Особенности авиационного ГТД как многомерного | 133 |
| объекта управления | |
| 4.3. Анализ эффективности логического управления ГТД | 138 |
| при различных условиях полета | |
| 4.4. Анализ эффективности логического управления ГТД | 152 |
| при различных программах управления | |
| Основные результаты и выводы | 163 |
| Список литературы | 167 |

Список сокращений

- ГТД газотурбинный двигатель
- ИМ исполнительный механизм
- ЛР логический регулятор
- МОУ многосвязный объект управления
- МПФ матричная передаточная функция
- МСАУ многосвязная система автоматического управления
- ОУ объект управления
- ПО программное обеспечение
- СТО сложный технический объект
- ТРДФ турбореактивный двигатель с форсажной камерой

Введение

Актуальность темы исследования

Развитие науки и модернизация технических средств приводит к появлению сложных технических объектов (СТО) разнообразной физической природы, включающих в себя некоторое множество сепаратных подсистем, взаимосвязанных и взаимодействующих через естественные перекрестные связи внутри объекта. Примерами таких объектов являются энергетические комплексы, газотурбинные двигатели, синхронные генераторы, электроприводы и так далее.

Системы автоматического управления такими сложными техническими объектами необходимо разрабатывать в классе многосвязных систем автоматического управления (МСАУ), которые бы достаточно эффективно использовали на каждом режиме работы объекта все доступные ресурсы для достижения цели функционирования с учетом обеспечения заданных технических требований.

Рассматриваемый класс объектов управления является нелинейным, многосвязным И многофункциональным на различных режимах функционирования изменяются динамические и статические свойства как сепаратных подсистем, так и перекрестных связей между ними. Поэтому в процессе анализа и синтеза МСАУ необходимо определять достижимость цели функционирования не только каждой сепаратной подсистемой по отдельности, но и при их взаимодействии, так как характер влияния сепаратных подсистем друг на друга может существенно изменяться. Всё это приводит к тому, что в процессе проектирования МСАУ сложными техническими объектами, параметры которых изменяются в широких пределах в процессе работы, возникают существенные трудности, а проблемы управления такими объектами являются весьма актуальными и трудноразрешимыми для существующей теории автоматического управления.

Все это в полной мере относится и к авиационным газотурбинным двигателям (ГТД), задача управления которыми в той или иной степени решается в процессе проектирования. Однако существующие подходы к проектированию МСАУ ГТД не позволяют в полной мере обеспечивать требуемое качество функционирования на всех режимах работы и изменениях внешней среды, так как заданный «жесткий» алгоритм не позволяет учитывать в полной мере динамику поведения объекта в заданном множестве условий работы [109, 111]. Данная проблема приводит к необходимости формирования такой системы управления, которая позволяла бы «гибко» изменять свою структуру и параметры с учетом характера поведения МСАУ СТО в целом ради достижения глобальной цели функционирования.

систем Среди перспективных автоматического управления хорошо зарекомендовали себя логико-динамические системы управления [21, 22, 23], изменяющие как структуру, так и параметры управляющего устройства с помощью переключений, формирующихся на основании некоторого логического Использование логических алгоритмов в алгоритма. составе сепаратных подсистем МСАУ сложными техническими объектами позволяет повысить статическую и динамическую точность управления за счет целенаправленного качественного и количественного изменения управляющего сигнала. Такой подход позволит придать системе управления принципиально новые свойства, позволяющие в полной мере учитывать характер и динамику движения объекта управления.

Основной проблемой, связанной с применением логико-динамических систем для управления многосвязным техническим объектом, является разработка логического алгоритма, учитывающего не только текущее состояние и динамику объекта управления, но и влияние перекрестных связей в объекте на характер функционирования всей МСАУ в целом. При разработке существующих логических алгоритмов управления не рассматривались вопросы их применения для управления многосвязным и многофункциональным объектом. Общим для существующих логических алгоритмов является то, что при переключении структуры и\или изменении параметров учитывается динамика только собственной сепаратной подсистемы, что является неприемлемым в случае управления многосвязным динамическим объектом, так как существенное влияние на качество управления оказывают перекрестные связи. Таким образом,

задача синтеза логических алгоритмов для управления многосвязными объектами является актуальной теоретической и прикладной задачей.

Степень разработанности темы

Проблемам анализа и синтеза многосвязных систем автоматического управления сложными техническими и технологическими объектами посвящены работы Б. Н. Петрова, А. А. Красовского, М. В. Меерова, В. Т. Морозовского, П. И. Чинаева, М. Н. Красильщикова, Б. Г. Ильясова, В. И. Васильева, Ю. М. Гусева, Н. К. Зайнашева, В. Г. Крымского, Ю. С. Кабальнова, В. Н. Ефанова Среди зарубежных исследований можно выделить работы R. J. Kavanagh, M. D. Mesarovic, H. H. Rosenbrock, E. V. Bohn и других.

Вопросам разработки логико-динамических систем управления и их применения посвящены работы как отечественных исследователей Б. Н. Петрова, С. В. Емельянова, В. И. Уткина, М. В. Стариковой, Е. П. Попова, Б. Г. Ильясова, Е. И. Хлыпало, В. И. Петунина, А. И. Фрида, Р. Х. Шакировой, Е. К. Шигина, А. А. Кампе-Немма, а также зарубежных – R. C. Gaylord, A. S. Maclaren, W. N. Keller, I. Flugge-Lotz, B. Hamel, D. Liberson и другие.

Несмотря на значительный объем проведенных исследований в рассматриваемой области, вопросы применения логических алгоритмов для управления сложными многомерными объектами рассмотрены в недостаточной степени и не существует единой концепции проектирования такого рода МСАУ СТО с учетом обеспечения требуемого качества функционирования на различных режимах работы.

В связи с этим возникает необходимость в синтезе алгоритмов логического многосвязного управления, формирующих сигналы управления с целью согласования действия всех сепаратных подсистем МСАУ СТО в соответствии с новыми внешними условиями и режимами работы. Рассматриваемая проблема определила цель данной работы и задачи исследования.

Объект исследования

Объектом исследования диссертационной работы являются многосвязные системы автоматического управления сложными техническими объектами, функционирующими в условиях параметрической неопределенности.

Предмет исследования

Предметом исследования диссертационной работы являются алгоритмы логического управления в составе МСАУ СТО и оценка их эффективности на примере авиационного ГТД.

Цель работы и задачи исследования

Целью работы является повышение качества многосвязного управления сложным техническим объектом на основе логических алгоритмов и оценка эффективности их применения в составе МСАУ авиационным ГТД.

Для достижения поставленной цели актуальным является решение следующих задач.

1. Разработать концепцию проектирования и структуру МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором.

2. Провести синтез двойного логического алгоритма управления сепаратной подсистемой в составе МСАУ СТО.

3. Провести анализ эффективности МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором при параметрических изменениях, наличии чистого запаздывания и действии различных возмущений на основе имитационного моделирования.

4. Разработать инженерную методику и программное обеспечение для проектирования МСАУ с двойным логическим алгоритмом управления и провести оценку его эффективности на примере МСАУ авиационным ГТД, функционирующим в условиях параметрической и функциональной неопределенности, способом имитационного моделирования.

Методы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач используются методы теории автоматического управления, теории нелинейных систем, теории адаптивного и логического управления, а также методы системного анализа. Разработка программного обеспечения производилась в пакете прикладных программ *Matlab*.

Научная новизна результатов исследования

1. Научная новизна предложенной концепции проектирования и структуры МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором заключается в формировании сигнала управления $u_i^*(t)$ на основе интеграции основного сигнала $u_i(t)$ управления собственной сепаратной подсистемой и дополнительного координирующего сигнала $u_i(t)$, учитывающего влияние перекрестных связей.

2. Научная новизна двойного логического алгоритма заключается в коррекции динамики движения сепаратных подсистем совместно с формированием дополнительных искусственных перекрестных связей для согласования движения всех подсистем МСАУ СТО.

3. Научная новизна результатов оценки эффективности МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом управления заключается в подтверждении эффективности использования предложенного логического алгоритма управления в составе МСАУ СТО при параметрических изменениях, наличии чистого запаздывания и действии различных возмущений методом имитационного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке двойного логического алгоритма управления сложным многосвязным объектом, учитывающего не только динамику движения собственной сепаратной подсистемы, но и влияние остальных сепаратных подсистем через перекрестные связи в объекте управления.

Практическая значимость инженерной методики заключается в обоснованной реализации предложенной концепции проектирования МСАУ ГТД с логическими регуляторами, обеспечивающими заданные требования к качеству управления, программного обеспечения – в возможности автоматизировать процесс проектирования МСАУ ГТД с двойным логическим алгоритмом управления, полученных результатов имитационного моделирования МСАУ авиационным ГТД – в подтверждении эффективности предложенного двойного логического алгоритма для управления СТО, функционирующим в условиях параметрической и функциональной неопределенности.

Теоретическая и практическая значимость полученного двойного логического алгоритма подтверждается патентом России на изобретение [66].

Основные научные результаты, выносимые на защиту

1. Концепция проектирования и структура МСАУ СТО с двухканальным формирующим логический логическим регулятором, сигнал управления сепаратными подсистемами с учетом структурных И функциональных особенностей МСАУ СТО.

2. Двойной логический алгоритм управления, формирующий сигнал логической корректирующей ошибки по результатам анализа текущего состояния и динамики движения собственной сепаратной подсистемы с учетом влияния остальных сепаратных подсистем через перекрестные связи.

3. СТО с двойным Результаты анализа эффективности МСАУ логическим алгоритмом управления при параметрических изменениях, наличии действии запаздывания И различных возмущений чистого на основе имитационного моделирования.

4. Инженерная методика и программное обеспечение для проектирования МСАУ с двойным логическим алгоритмом управления и результаты оценки эффективности двойного логического алгоритма управления в составе МСАУ газотурбинным двигателем, функционирующим на различных высотах и скоростях полета, при различных программах управления.

Связь темы исследования с научными программами

Работа выполнялась в рамках следующих грантов РФФИ:

– № 14-08-01019 А «Автоматизация проектирования интеллектуальных систем управления автономными подвижными объектами с учетом компоновки их исполнительных подсистем на основе эволюционного подхода с использованием динамических нейронных сетей и виртуальной среды моделирования» (2014 – 2016 гг., науч. руководитель – Р. А. Мунасыпов),

№ 14-08-97056 р поволжье а «Анализ и синтез нелинейных и интеллектуальных алгоритмов управления сложными техническими И объектами технологическими с использованием частотных методов» (2014 – 2016 гг., науч. руководитель – Б. Г. Ильясов),

– № 15-08-01146 А «Разработка и исследование нелинейных многосвязных систем управления сложными динамическими объектами на основе логических законов управления в условиях неопределенности внешней среды и состояния системы» (2015 – 2017 гг., науч. руководитель – Б. Г. Ильясов).

Достоверность результатов исследования

Обоснованность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается корректным использованием положений теории автоматического нелинейных теории управления, теории систем И системного анализа. Диссертационное исследование основывается на применении апробированных научных положений логического управления, методов И корректном использовании математического аппарата согласовании полученных И теоретическими Достоверность результатов С известными положениями. теоретических положений И выводов подтверждаются результатами моделирования МСАУ ГТД с синтезированным двойным имитационного логическим алгоритмом управления, а также актами внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и в процесс проведения научно-исследовательских работ по перспективным интеллектуальным САУ и контроля авиационным ГТД в АО УНПП «Молния».

Апробация результатов исследования

Основные положения и результаты работы были представлены и обсуждались на ряде научных семинаров и конференций. Среди них:

– XIII, XIV, XVI, XVII Международные конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2011, 2012, 2014, 2015),

– XXXIV Всероссийская конференция по проблемам науки и технологий (Миасс, 2014),

– XII Всероссийское совещание по проблемам управления (Москва, 2014),

– VI, VIII Всероссийские мультиконференции по проблемам управления (п. Дивноморское, 2013, 2015),

– VII Российская мультиконференция по проблемам управления (Санкт-Петербург, 2014), – II, IV Международные научные конференции «Информационные технологии и системы» (Банное, 2013, 2015),

– II, III Международные конференции «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений» (Уфа, 2014, 2015),

– XVI, XVII Международные конференции «Информатика и информационные технологии» (Шеффилд, 2014, Рим, 2015),

 Х Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (Уфа, 2013),

VI, VII, VIII Всероссийские молодежные научные конференции «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2012, 2013, 2014),

– Международная молодежная конференция «Интеллектуальные технологии обработки информации и управления» (Уфа, 2012).

За работу по теме диссертационного исследования автор отмечен дипломом Института проблем управления РАН им. В. А. Трапезникова в рамках Всероссийского конкурса научных работ молодых ученых по теории управления и её приложениям в 2013 году.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертационной работы отражены в 25 публикациях, в том числе в 21 статье, из них 4 – в изданиях, входящих в перечень ВАК [34, 40, 43, 44], 18 – в трудах конференций [28-31, 35, 37-39, 41, 42, 45, 46, 73-76, 119, 120], получено 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [77-80] и 1 патент России на изобретение [66].

Объем диссертации

Диссертационная работа включает введение, четыре главы основного материала и библиографический список. Работа без библиографического списка изложена на 166 страницах машинописного текста. Библиографический список включает 132 наименования.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность доценту, кандидату технических наук Саитовой Гузели Асхатовне за высококвалифицированную научную консультацию в области проектирования МСАУ сложными динамическими объектами.

Глава 1. Анализ проблемы проектирования МСАУ СТО с логическим алгоритмом управления

1.1. Актуальность проблемы проектирования МСАУ авиационным газотурбинным двигателем

Развитие науки и модернизация технических средств приводит к появлению объектов разнообразной физической сложных динамических природы, включающих себя некоторое множество взаимосвязанных В И взаимодействующих сепаратных подсистем. Примерами таких объектов являются энергетические комплексы, газотурбинные двигатели, синхронные генераторы, электроприводы и так далее. Для управления такими сложными техническими объектами со многими регулируемыми выходными координатами необходима разработка многосвязных систем автоматического управления (МСАУ), которые достаточно эффективно использовали бы на каждом режиме работы объекта все доступные ресурсы для достижения цели функционирования с учетом некоторых ограничений и требований.

Все это в полной мере относится и к авиационным газотурбинным двигателям (ГТД), задача управления которыми в той или иной степени решается в процессе проектирования. Однако существующие подходы к проектированию МСАУ ГТД не позволяют в полной мере обеспечивать требуемое качество функционирования на всех режимах работы и при всех изменениях внешней среды, так как заданный «жесткий» алгоритм не позволяет учитывать в полной мере динамику поведения объекта в заданном множестве условий работы. Данная проблема приводит к необходимости формирования такой системы управления, которая позволяла бы «гибко» изменять свою структуру и параметры с учетом не только режимов работы и особенностей авиационного ГТД, но и текущего характера поведения всей МСАУ в целом ради достижения глобальной цели функционирования.

Свойства и особенности авиационного газотурбинного двигателя как многомерного объекта управления достаточно полно рассмотрены как в

отечественных работах А. А. Шевякова, Т. С. Мартьяновой, П. И. Чинаева, В. А. Боднера, М. Н. Красильщикова, А. В. Штоды, О. С. Гуревича, Б. А. Черкасова, Ю. В. Любомудрова, В. Г. Крымского, Ю. М. Гусева, Н. К. Зайнашева, Г. Г. Куликова, Б. Г.Ильясова, В. И. Васильева [1, 12, 13, 17, 18, 19, 48, 53, 63, 64, 71, 72, 99, 100, 102, 104, 105, 108], так и в зарубежных работах [112, 114, 122, 126].

собой Современный ГТД представляет сложную многомерную динамическую систему, В узлах которой протекают взаимосвязанные теплофизические газодинамические И процессы [19]. Характерными особенностями данного класса объектов управления являются нелинейность, нестанционарность и многофункциональность.

Дифференциальные уравнения, описывающие протекание динамических процессов в авиационном ГТД, характеризуются существенной нелинейностью, полностью учесть которую невозможно. Поэтому при исследовании МСАУ ГТД обычно используют его представление в виде системы линеаризованных стационарных дифференциальных уравнений [82], учитывающей наиболее важные для исследования динамические параметры, подчиняющиеся известным соотношениям из теории подобия [18, 53]. Такое представление ГТД позволяет описывать переходные процессы в расчетной точке линеаризации с достаточной степенью точности [63].

Целесообразность использования такой математической модели представления МСАУ авиационным ГТД объясняется возможностью учитывать наиболее важные для исследования динамические параметры, подчиняющиеся известным соотношениям из теории подобия [18, 53], сохраняя при этом их «физичность» на всех этапах. Однако такая математическая модель МСАУ ГТД характеризуется неполной её адекватностью реальным процессам с точки зрения влияния неучтённых нелинейностей, наличия малых параметров и так далее. Поэтому разрабатываемая МСАУ ГТД должна обладать как достаточными запасами устойчивости, так и возможностью подстройки алгоритмов управления к текущему объекту. Авиационный ГТД как объект управления является нестационарным – в процессе его функционирования возможны изменения динамических параметров как сепаратных подсистем, так и перекрестных связей, что обуславливается сменой режимов работы или изменениями внешних условий функционирования [1]. Такие параметрические изменения приводят к существенному изменению динамики переходных процессов по всем сепаратным подсистемам, которое не может быть полностью компенсировано линейными регуляторами.

Современные перспективные МСАУ авиационным ГТД разрабатываются в классе многофункциональных систем, характеризующихся качественными изменениями как самих сепаратных подсистем, так и элементов многомерной связи между ними с целью обеспечения требуемой цели функционирования. В изменение таких системах предполагается программы регулирования, подключении отключении) заключающееся (или замкнутых контуров В управления как отдельными внутренними координатами (частоты вращения, температуры газов и так далее), так и комплексом внутридвигательных параметров (параметров воздухозаборника, форсажного контура и так далее). То есть происходит изменение множества выполняемых функций в процессе работы силовой установки, вследствие чего меняются динамические характеристики МСАУ ГТД в целом. Очевидно, что при проектировании МСАУ ГТД необходимо обеспечивать требуемое качество управления отдельной как сепаратной подсистемой, так и некоторой совокупностью взаимодействующих между собой сепаратных подсистем (в различном их сочетании) [26].

Также необходимо отметить, что при проектировании МСАУ ГТД часто возникает ситуация, когда отдельные сепаратные подсистемы и их элементы уже спроектированы и определены алгоритмы их управления. В данном случае требуется провести дополнительного управления, синтез контура обеспечивающего требуемые динамические И статические свойства И повышающего эффективность ГТД как силовой установки.

Для полного и адекватного управления таким сложным техническим объектом требуется разработка систем автоматического управления в классе многосвязных САУ, представляющих собой некоторое множество сепаратных взаимосвязанных подсистем, связанных между собой через естественные перекрестные связи в объекте управления и взаимодействующих друг с другом ради достижения общей цели функционирования.

Описанные выше характерные особенности авиационного ГТД как объекта управления приводят к появлению как параметрической, так и структурной неопределённости, что вызывает значительные сложности при синтезе и анализе MCAУ ГТД, поскольку такие изменения существенно влияют как на качество функционирования всей системы в целом, так и на запасы устойчивости в системе, и должны обязательно учитываться при проектировании [59, 115].

Также при управлении многосвязными объектами существует проблема, связанная с координацией движения сепаратных подсистем. Как показывает практика, для решения данной проблемы требуется использовать связное управление, учитывающее динамику движения не только собственной сепаратной подсистемы, но и всего многосвязного объекта в целом. В таком случае сепаратные подсистемы оказываются связанными через многомерный регулятор, в том числе и введением искусственных связей.

B эффективного настоящее время становится очевидным, что для управления авиационными ГТД (с учетом всех структурных, параметрических и функциональных особенностей) необходимо проводить синтез таких МСАУ, которые оптимально использовали на каждом режиме функционирования силовой установки все доступные ресурсы для достижения главной для этого режима цели при множества ограничений. Необходимость наличии В получении значений эксплуатационных квазиоптимальных таких параметров, как быстродействие переходных процессов, запасы газодинамической устойчивости и т.д. требует применения нелинейных законов управления.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод о том, что основная трудность при проектировании МСАУ ГТД заключается в обеспечении как требуемого качества функционирования, так и заданных запасов устойчивости отдельных сепаратных подсистем и всей МСАУ в целом на всех режимах работы.

Для адекватного решения данной проблемы является актуальным разработка новых подходов к многосвязному управлению, которые бы учитывали не только текущее состояние и динамику движения сепаратных подсистем, но влияние перекрестных связей между ними, и обеспечивали достижение поставленной цели функционирования с заданными требованиями по качеству управления.

1.2. Методы анализа и синтеза МСАУ сложными техническими объектами

Как говорилось ранее, к многосвязным системам автоматического управления (МСАУ) сложными техническими объектами относятся такие системы, которые имеют несколько управляемых величин $y_i(t)$ (i = 1, ..., n), связанных И взаимодействующих друг С другом. Таким образом, рассматриваемые системы представляют совокупность одномерных САУ с перекрестными связями между ними. Анализ и синтез таких систем является важной теоретической и практической проблемой в современной теории управления. Для проектирования данного вида систем необходимо учитывать в мере структурные и параметрические особенности исследуемых полной многосвязных технических объектов. Проблемам исследования многосвязных систем автоматического управления посвящены работы отечественных ученых Б. Н. Петрова [67, 98], М. В. Меерова [55], В. Т. Морозовского [59], А. А. Красовского [86], В. А. Боднера [13], Я. З. Цыпкина [100], П. И. Чинаева [102], М. Н. Красильщикова [64] и других.

Теоретическая значимость данной проблемы обуславливается повышением требований как к качеству и точности управления, так и к быстродействию всей МСАУ СТО, функционирующим в условиях структурной, параметрической и

функциональной неопределенности. Практическая значимость многосвязных систем управления обуславливается их широким применением при управлении объектами ответственного назначения [57, 86].

1.2.1. Структурная схема исследуемого класса МСАУ сложными техническими объектами

Важным аспектом при проектировании МСАУ является способ описания структуры исследуемого СТО как многосвязного объекта управления относительно входных и выходных координат, наиболее важными среди которых являются *P* и *V* структуры [25].

В работе рассматриваемого МСАУ выбрана В качестве класса *Р*-каноническая структура. При выбранной структуре взаимодействие между множеством одномерных САУ осуществляется через естественные связи в объекте управления. Рассмотрим подробнее выделенную структуру описания СТО как многосвязного объекта управления. Пусть элементы с передаточными функциями $W_{ii}(s)$, (i = 1,2) являются главными, а элементы с передаточными функциями $W_{ii}(s)$ ($i \neq j, i, j = 1, 2$) – элементами связи. На рисунке 1.1 представлена *Р*-каноническая CTO. структура примере двухсвязного на где $u_i(s)$ (*i* = 1, 2) – сигналы управления, являющиеся входными относительно многосвязного объекта управления, $y_i(s)$ (i = 1, 2) – выходные сигналы с многосвязного объекта управления.



Рисунок 1.1 – Р-каноническая структура на примере двухсвязного СТО

В случае рассматриваемой *P*-канонической структуры каждая входная координата воздействует на все выходные координаты, а точки суммирования расположены на выходах СТО. Таким образом, возмущения в одной из сепаратных подсистем повлияют только на соответствующий выход. Характерной особенностью данной структуры является то, что число входов и выходов СТО может быть различным [25]. Р-канонические многосвязные объекты описываются следующей МПФ:

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11}(s) & W_{12}(s) \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix},$$

или в обобщенном виде:

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{W}(s)\mathbf{U}(s).$$

более Данная структура позволяет наглядно оценивать влияние перекрестных связей на динамику движения сепаратной подсистемы и состоянию всей МСАУ СТО сигнал формировать адекватный текущему управления.

1.2.2. Математическая модель исследуемого класса МСАУ сложными техническими объектами

Другим важным аспектом проектирования МСАУ СТО является способ построения математической модели многосвязного объекта управления, описывающей динамику его переходных процессов.

Один из самых первых способов описания МСАУ СТО основывается на описании поведения исследуемой системы в пространстве состояния, которые выражаются в виде системы дифференциальных уравнений в форме Коши. В контексте данного подхода для описания движения в динамической системе создается матричная математическая модель, включающая в себя матрицы входных управляющих параметров ($B_{n\times r}$), выходных параметров ($C_{m\times n}$), системы ($A_{n\times n}$) и прямой связи ($D_{m\times n}$).

В общем виде для многосвязных стационарных динамических систем линеаризованные уравнения состояния в нормальной форме Коши имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + BU(t), \\ Y(t) = CX(t) + DU(t), \end{cases}$$

где $X(t)_{1 \times n}$ – вектор состояний, $U(t)_{1 \times r}$ – вектор управляющий (входных) координат, $Y(t)_{1 \times m}$ – вектор управляемых (выходных) координат

Пространство состояния определяется наименьшей совокупностью фазовых координат, полностью характеризующих движения исследуемого сложного технического объекта в любой момент времени [5]. Такой подход позволяет разработать единые методы разработки алгоритмов управления вне зависимости от физической природы объекта управления. Однако использование данного подхода на практике сопряжено с сложностью в математическом плане и требует значительных вычислительных ресурсов. К тому же абстрактность вектора состояния и трудность его измерения приводят к потере «физичности». Все параметры МСАУ оказываются перемешанными, и провести анализ влияния параметров на запасы устойчивости МСАУ оказывается проблематичным [5].

Также существует подход к описанию многосвязной системы с помощью матричных передаточных функций. Базовым элементом при данном подходе являются элементарные динамические звенья. Такой подход позволяет исследовать свойства системы в целом, без учета ее внутренних структурных и параметрических особенностей. Существенный недостаток такого описания динамических характеристик МСАУ через характеристики элементарных звеньев заключается в снижении эффективности проводимых системных исследований, так как характеристики сепаратных подсистем и перекрестных связей зависят от нескольких передаточных функций динамических звеньев.

К другому направлению развития методов математического описания СТО относится подход, основанный на декомпозиции системы на сепаратные подсистемы и многомерные элементы связи между ними [32]. Данный подход

предоставляет возможность отличать как одну сепаратную подсистему от другой, так и один элемент связи от другого, то есть каждый элемент СТО описывается собственной характеристикой [5]. Рассмотрим подробнее данный подход.

Рассматриваемый метод определяет СТО с помощью индивидуальных характеристик подсистем и характеристики связи между ними.

Многосвязные системы автоматического управления (рисунок 1.2), в которых все связи между подсистемами осуществляются через многомерный объект, описываются следующими уравнениями движения:

$$\begin{cases} \mathbf{Y}(t) = \mathbf{W}_{OY}(p) [\mathbf{U}(t) + \mathbf{F}(t)], \\ \mathbf{U}(t) = \mathbf{W}_{PE\Gamma}(p) [\mathbf{G}(t) - \mathbf{Y}(t)]. \end{cases}$$

где G(t), Y(t), U(t), F(t) – вектор задающей, управляемой управляющей и возмущающей координаты, $\varepsilon(t)$ – вектор собственной ошибки управления, p – оператор дифференцирования.



Рисунок 1.2 – Структурная схема МСАУ СТО

В качестве индивидуальной характеристики подсистемы используется такая характеристика диагонального элемента многосвязного объекта управления, которая бы полностью отражала изучаемые свойства данного элемента МСАУ. Примером такой характеристики может служить передаточная функция сепаратной подсистемы в режиме управления:

$$\Phi_i(s) == \frac{Y_i(s)}{G_i(s)} = \frac{W_{PE\Gamma ii}(s)W_{OVii}(s)}{1 + W_{PE\Gamma ii}(s)W_{OVii}(s)}, \quad i = 1,...,n,$$
(1.1)

где для каждой *i*-й сепаратной подсистемы справедливо $W_{\text{PE}\Gamma ii}(s)$ – передаточная функция линейного регулятора, $W_{\text{O}\text{V}ii}(s)$ – передаточная функция объекта управления.

Отметим, что в качестве индивидуальной характеристики *i*-й подсистемы могут быть рассмотрены также амплитудно-фазовая характеристика $\Phi_i(j\omega)$, индивидуальная передаточная функция подсистемы по ошибке $\Phi \varepsilon_i$ ($\Phi \varepsilon_i = 1 - \Phi_i(s)$), а также временные характеристики (весовые, переходные), однозначно связанные с $\Phi_i(s)$ обратным преобразованием Лапласа [5]. При таком подходе сепаратная подсистема соответствует реальной физической подсистеме, имеющей самостоятельное конструкторское значение, а ее индивидуальная характеристика имеет вид, который широко используется в теории одномерных систем автоматического управления, то есть допускает исследование хорошо развитыми методами этой теории [32].

В качестве характеристики связи используются характеристики недиагональных элементов многосвязного объекта управления, так как они выражают действие перекрестных связей в многомерном объекте относительно действия прямых связей в нём [32]. Эта характеристика должна отражать существующие взаимоотношения между сепаратными подсистемами и строиться из динамических звеньев, выражающих эти соотношения [32]. Для МСАУ СТО, математическая модель которой задана в виде матричных передаточных функций, перекрестная связь между сепаратными подсистемами определяется только недиагональными элементами $W_{OYii}(s)$ ($i \neq j$), где $\mathbf{W}_{OY}(s)$ – матричная передаточная функция многосвязного СТО [49]. В общем случае связь между группой сепаратных подсистем характеризуется с помощью определителей матриц соответствующих размерностей $||W_{OYii}(s)\gamma_{ii}||$, где γ_{ii} – дискретная функция:

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 1, \ i \neq j, \\ 0, \ i = j. \end{cases}$$

Отметим, что, в контексте рассматриваемого класса объектов управления, также важно определить воздействие перекрестных связей относительно прямых связей. Такое влияние перекрестных связей между группой сепаратных подсистем также можно охарактеризовать с помощью определителей матриц соответствующих размерностей $||W_{OVij}(s)\delta_{ij}||$, где δ_{ij} – дискретная функция:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$$

Характеристика связи описывается следующим уравнением:

$$h_k(s) = \frac{\det[W_{OVij}(s)\gamma_{ij}]_{k \times k}}{\det[W_{OVij}(s)\delta_{ij}]_{k \times k}}, \quad k = \overline{2, n},$$
(1.2)

где $W_{ii}(s)$ – матричная передаточная функция многосвязного объекта управления.

Так как в работе исследуемые МСАУ являются гомогенными, то целесообразно использовать обобщенную характеристику многосвязного элемента связи [5]:

$$H_{K}(s) = \sum_{i_{1},\dots,i_{K}=1}^{\binom{n}{K}} h_{i_{1},\dots,i_{K}}(s), \qquad (1.3)$$

где $\binom{n}{K}$ – число сочетаний из *n* по *K* элементов.

Такая характеристика отражает интегральную связь между группой сепаратных подсистем.

В общем случае функция *H*(*s*) характеризует как знак, так и величину («силу»), а также характер связей в группе подсистем, которые соединены этим многосвязным элементом связи. Важная особенность данного подхода заключается в том, что при описании перекрестных связей между сепаратными подсистемами не имеет значения их количество.

В работе отдается предпочтение системному подходу к описанию MCAУ СТО на основе декомпозиции на сепаратные подсистемы и многомерные элементы связи между ними. Таким образом, данный подход к системному описанию позволяет анализировать многосвязные системы любой размерности и наглядно показывает влияние сепаратных подсистем с учетом структурой их элементов и перекрестных связей между ними на устойчивость и качество функционирования, что позволяет в полной мере учесть структурные особенности СТО.

1.2.3. Методы синтеза МСАУ сложными техническими объектами

МСАУ Существуют различные концепции проектирования CTO. прикладные аспекты которых разработаны в трудах отечественных ученых A. А Шевякова., Б. А. Черкасова, В. Г. Крымского, Ю. М. Гусева, М. Н. Красильщикова, Б. Г. Ильясова, Ф. А. Шаймарданова, В. И. Васильева, Ю. С. Крымского, В. Кабальнова, B. Γ. И. Ефанова, Г. Г. Куликова, Р. А. Мунасыпова [3, 13, 18, 32, 64, 81, 99, 103, 105] и других. В данных работах сделан следующий вывод: эффективность проектирования МСАУ сложными техническими и технологическими объектами резко снижается из-за возрастания сложности решения задач анализа и синтеза вследствие усложнения самих многосвязных динамических объектов.

Среди работ, связанных с рассматриваемой проблематикой, заслуживает внимания работа О. Н. Гаспаряна [116], в которой подробное изложены результата работ в области исследования и проектирования линейных и нелинейных МСАУ сложными динамическими объектами. Также выделяется коллективная монография [62], в которой отражены последние результаты в области исследования нелинейных систем на основе частотных методов и матричных неравенств.

Существует множество принципов проектирования линейных МСАУ СТО, например в работах И. Н. Вознесенского предложена концепция проектирования, основанная на автономности регулирования каждой сепаратной подсистемы. В соответствии с этим принципом вводятся искусственные перекрестные связи между линейными регуляторами в сепаратных подсистемах. Благодаря этому достигается расчленение системы на ряд независимых между собой сепаратных подсистем. Другой подход к синтезу инвариантного управления, предложенный Г. В. Щипановым, заключается на компенсации возмущений, на основе которого сформулирован Петровым Б. Н. принцип двухканальности [68]. Данный принцип накладывает на структуру объекта необходимые условия для выполнения условий инвариантности. Однако такие методы проектирования далеко не всегда оправдывают себя и характеризуются множеством недостатков: высокая чувствительность к динамическим параметрам объекта управления, слабая помехозащищенность, высокий уровень сложности регуляторов и так далее. Полученные результаты часто оказываются пригодными только для расчетных режимов работы СТО.

Использование законов, формирующих сигналы управления по заранее заданному алгоритму, даже при учете многомерных связей в составе объекта управления, не всегда эффективно обеспечивает достижение глобальной цели функционирования СТО с учетом требуемого качества, поскольку при параметрических изменениях как сепаратных подсистем, так и перекрестных связей происходит не только количественное, но и качественное изменение характера поведения всей МСАУ в целом. Подобные изменения достаточно часто не могут полностью компенсироваться параметрическими изменениями линейной части МСАУ СТО. Для компенсации подобных изменений требуются, как правило, структурные преобразования МСАУ [48].

Известны несколько способов коррекции МСАУ СТО для обеспечения заданного качества функционирования при параметрических имениях: коррекция параметров и структуры управляющей части и введение дополнительных связей между сепаратными подсистемами [55, 100].

Реализовать столь сложные законы управления с учетом характерных особенностей многосвязного объекта управления возможно в классе нелинейных систем управления [61, 65]. В современных МСАУ для улучшения динамических свойств и адаптации к новым условиям функционирования используются нелинейные воздействия и связи: нелинейные обратные связи, нелинейные воздействия по производным и внутренним координатам системы [49]. Использование нелинейных алгоритмов значительно расширяет возможности целесообразного изменения качества процессов управления, позволяет изменять не только параметры протекающего процесса, но и его форму [10].

В контексте данного подхода на сегодняшний день быстро развивается класс адаптивных систем управления [56]. Данная концепция управления является одним из наиболее эффективных методов синтеза МСАУ СТО, условиях неопределенности И функционирующим В характеризующимся значительными параметрическими изменениями на различных режимах функционирования [33, 89]. Связано это с повышением требований к точности функционирования СТО в условиях неопределённости, а также с интенсивными темпами роста современных средств вычислительной техники, позволяющей реализовать данные принципы управления. Адаптивное управление заключается в том, что блок управления, на основе учета внешних факторов, проводит анализ динамики состояния объекта и формирует сигнал, способствующий достижению цели функционирования [2].

Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений в синтезе адаптивных систем управления являются беспоисковые адаптивные системы с изменяющимися параметрами регулятора при неизменной структуре [1, 84]. В силу задания законов и критериев адаптации, подобные системы управления позволяют оценивать как текущее состояние объекта управления, так и его компенсации параметрических изменений И динамику для возмущений, действующих на объект управления, с достаточно высокой точностью. Однако, несмотря на все положительные качества, данные управляющие устройства характеризуются и значительными недостатками, к которым относятся: малая перестраиваемого регулятора, вариация параметров что не позволяет обеспечивать требуемое качество функционирования на всех режимах работы, применимости в МСАУ ограниченные возможности счет за того. что параметрические изменения системы управления далеко не всегда могут компенсировать качественные изменения объекта управления, а также эталонной необходимость соблюдения адекватности модели И наличие значительной априорной информации об объекте управления. Всё это в значительной мере усложняет синтез и последующий анализ таких систем, что

приводит к достаточно высокой сложности применения такого подхода в инженерной практике. Также адаптивные управляющие системы предполагают предварительную параметризацию объекта. Но часто априорной информации бывает недостаточно для построения модели объекта с точностью до параметра, так как часто динамика объекта является существенно нелинейной, что значительно усложняет построение точной математической модели объекта.

В связи с вышеперечисленными проблемами, целесообразным становится использование методов робастного управления, которые не только позволяют сохранить устойчивость МСАУ СТО в определенных пределах, но и характеризуются меньшей чувствительностью к изменению параметров объекта управления по сравнению с оптимальными системами [70].

Важными направлением развития такого рода систем является созданием интеллектуальных систем управления, к которым относятся нейросетевые, логические и другие устройства управления.

Интерес к нейросетевым САУ связан с тем, что нейронные сети, обученные на любой заданный принцип управления, позволяют создать оптимальные по различным критериям САУ, при этом сохраняя возможность реализации нескольких принципов функционирования и перехода с одного на другой [47].

Нейросетевые системы управления характеризуются целым рядом свойств, которые позволяют на их основе проектировать высокоэффективные САУ: способностью к обучению на примерах и обобщению данных, адаптацей к структурно-параметрическим изменениям как объекта управления, так и внешней среды, возможностью синтеза регуляторов, формирующих управляющий сигнал на основе существенно нелинейных законов, а также высокой устойчивостью своей структуры [101]. Наибольшее распространение нейросетевого подхода происходит В области управления, где имеется информационная неопределенность и отсутствие точных математических моделей. В ходе развития сформировалось несколько направлений в методах использования регуляторов с нейронными сетями: прямые методы и непрямые методы. Прямые методы

характеризуются тем, что нейронные сети участвуют в непосредственном управлении СТО. Концепция непрямых методов заключается в том, что с помощью нейронной сети в процессе управления СТО выполняются такие функции, например, идентификация вспомогательные как, параметров динамического объекта или фильтрация шума [101]. Однако, даже на современном этапе технического развития, не всегда осуществимо и оправдано применение нейросетевых методов для проектирования МСАУ с повышенными требованиями к качеству функционирования многосвязного объекта управления. Прежде всего это связано с длительностью процесса обучения нейросетевого регулятора [91]. Также к значительным недостаткам нейросетевых управляющих устройств относятся как принципиальная невозможность предсказать погрешности регулирования при таких входных воздействиях, которых не было в обучающей выборке, так и отсутствие критериев выбора типа и структуры нейронной сети [47]. Применение нейросетевых систем управления требует дополнительных исследований устойчивости полученной МСАУ. Все это является существенной преградой на пути широкого использования нейросетевых регуляторов в промышленности [90].

Логические устройства управления реализуются в виде нелинейных корректирующих устройств, которые изменяют структуру и значения своих параметров на основании некоторого логического алгоритма [63]. Переключение в таких системах происходит при определенных соотношениях входных координат, которые определяются логическим алгоритмом управления. Основное преимущество такого вида регуляторов заключается в возможности построения системы автоматического управления на базе знаний и опыта, выраженных в виде системы продукционных правил, без предварительного построения строгой математической модели МСАУ [123]. Применение в МСАУ такого рода устройств управления позволяет существенно расширить возможности целенаправленного изменения процессов управления [48].

В данном классе регуляторов, в зависимости от способа интерпретации входных и выходных данных, предложены логические регуляторы, выраженные в нечетких [14, 15, 51] и четких термах [11, 60].

Мировой опыт показывает целесообразность применения нечетких регуляторов для повышения качества управления сложными техническими объектами, что находит подтверждение в работах Х. Ларсена, Е. Мамдани, М. Сугено, Т. Такаги, В. И. Васильева, Б. Г. Ильясова, Р. А. Мунасыпова и других.

В нечетких логических регуляторах переменные изображаются некоторой формы совокупностью нечетких термов различной (треугольной, колоколообразной и т.д.). Как правило, система продукционных правил вывода формируется базе формы. Поэтому, на «словесной» из-за процедуры дефаззификации, нечеткие логические регуляторы не позволяют поддерживать заданное значение выходной координаты с необходимой точностью [52].

Выявленных выше недостатков лишены многомерные четкие логические регуляторы [6]. Система продукционных правил, выраженных в четких термах прямоугольной формы, в значительной мере соответствует правилам управления СТО, так как в них отсутствуют излишние неопределенности [52]. Вследствие этого, четкие логические регуляторы характеризуются большим быстродействием и меньшей погрешностью.

Отдельным направлением, рассмотренном как в отечественной [50, 54, 85], так и в зарубежной литературе [124, 129, 130, 131], является логический регулятор, реализующий классические линейные алгоритмы управления. В качестве входных сигналов для таких управляющих устройств используются сигнал ошибки, её производная или интеграл, а также их комбинации, а коррекция параметров такого нечеткого регулятора выполняется на основании некоторой базы правил, выраженной с помощью блока нечеткой логики. Применение такого нечеткого регулятора в составе САУ позволяет существенно улучшить качество управления и повысить робастность [132].

Таким образом, использование логических регуляторов дает возможность реализовывать адаптивные системы управления [92], однако их практическое применение сопряжено с рядом сложностей. Синтез правил логического вывода невероятно сложен из-за того, что характер поведения СТО на различных режимах функционирования может значительно изменяться. Вследствие этого нечеткие и четкие логические регуляторы не позволяют полностью исключить перекрестное влияние контуров регулирования. Также общей проблемой для рассмотренного класса регуляторов является то, что существенные сложности вызывает анализ устойчивости САУ с нечеткими логическими регуляторами. На данный момент еще не разработаны точные методы проверки устойчивости для таких САУ [9], однако есть некоторые попытки адаптации существующих аналитических подходов [4, 125, 127].

Также достаточно широкое распространение как в зарубежной [110, 121, 128], так и в отечественной [22, 63, 69, 94, 107] литературе получил класс логикодинамических систем управления, включающих в себя устройства по осуществлению логического переключения в процессе управления, то есть системы с управляемой структурой.

В настоящее время достаточно трудно провести четкую границу между системами с логическим регуляторами и системами с управляемой структурой, поскольку физические принципы, положенные в основу данных подходов к управлению СТО, близки друг к другу. Переключение в рассматриваемых системах управления происходит в моменты, когда между координатами СТО формируются соотношения, определённые логическим алгоритмом управления [88]. Таким образом, управление происходит на основе параметрических и структурных изменений, а сами управляющие устройства являются наиболее простым случаем систем с самоорганизацией структуры. Данные регуляторы позволяют существенно расширить возможности целенаправленного изменения процессов управления, что приводит к улучшению динамических и статических свойств объекта управления [21].

Основная проблема, сопряженная с проектированием САУ на основе логических регуляторов, заключается в синтезе логического алгоритма управления, учитывающего структурные и функциональные особенности СТО. Общим для существующих логических алгоритмов является то, что переключение структуры и\или изменение параметров происходит в зависимости от значения ошибки $\varepsilon(t)$ и ее производной $\varepsilon'(t)$ [23], то есть учитывается динамика только собственной сепаратной подсистемы, что является неприемлемым в случае управления многосвязным СТО. Решение выделенной проблемы позволит преодолеть противоречия между быстродействием, точностью и устойчивостью.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день синтез МСАУ СТО с логическими регуляторами, обеспечивающий требуемое качество функционирования и запасы устойчивости с учетом стабилизации и координации сепаратных подсистем, недостаточно изучен [16], а в современной литературе не существует универсальной (с инженерной и математической точек зрения) методики проектирования подобных систем.

Таким образом, проектирование МСАУ СТО с логическими алгоритмами управления, учитывающими изменение структурных и параметрических свойств многосвязного объекта для достижения требуемого качества управления, является актуальной теоретической и практической проблемой.

1.3. Логико-динамические системы управления сложными техническими объектами

Одним из наиболее развитых методов проектирования МСАУ в целом, и с нелинейными алгоритмами в частности, является такой метод синтеза, который позволяет выбрать структуру и параметры управляющей части, обеспечивающей заданные требования по качеству или по быстродействию, или по точности процессов управления. В настоящее время в достаточно полной мере разработаны методы анализа и синтеза линейных МСАУ. Однако методы синтеза нелинейных МСАУ стали развиваться относительно недавно и не получили еще своего практического и теоретического завершения. Связано это, в первую очередь, с принципиальным различием между линейными и нелинейными законами управления.

Линейный закон формирует сигнал управления, пропорциональный некоторой входной переменной или её производной. Однако при нелинейном законе управления появляется возможность изменить характер и принцип воздействия МСАУ на СТО [97]. Таким образом, МСАУ с нелинейными законами управления характеризуется тем, что в ней возможны существенные изменения не только количественные, но и качественные [63, 96].

Для улучшения динамических и статических свойств, а также обеспечения требуемого качества функционирования широкое распространение получили логико-динамические системы [21, 22, 23]. Логические регуляторы, входящие в состав таких систем, изменяют структуру и параметры управляющего устройства переключений, формирующихся на основании помощью некоторого с алгоритма [93, 117]. Существуют разные схемы включения логического регулятора. На рисунке 1.3 представлена структурная схема логического последовательного включения, а на рисунке 1.4 – схема параллельного включения.







Рисунок 1.4 – Структурная схема параллельного включения логического регулятора

Последовательное включение логического регулятора позволяет полностью варьировать форму сигнала ошибки управления, а параллельное включение предоставляет возможность корректировать уже сформированный сигнал ошибки. Применение регулятора, реализующего логический логического алгоритм преодолеть противоречия управления, позволяет между качеством, быстродействием и точностью процессов управления [118].

Одной из важнейших задач, связанных с применением логических регуляторов, является синтез логических алгоритмов управления, определяющих в достаточно простом виде связь между некоторыми координатами объекта управления и всей САУ в целом и требуемыми сигналами управления данной системой.

В составе логического алгоритма управления можно выделить параметрические, оптимизирующие и логические составляющие. Рассмотрим подробнее данные составляющие.

Параметрические составляющие выражаются в виде некоторых нелинейных функций от текущих координат системы, например – от ошибки управления или [97]. Класс управляемой величины нелинейных функций, динамики формирующих параметрическую составляющую, себя включает В как статические, так и динамические нелинейности. Статические нелинейности влияют на коэффициент усиления системы, форсируя динамику объекта управления при значительных отклонениях и замедляя её при приближении к положению равновесия. Динамические нелинейные алгоритмы влияют на демпфирующие свойства в переходном процессе в зависимости от размеров и скорости отклонения [97]. Параметрические составляющие формируются с целью поддержания параметров объекта управления на определенном уровне и позволяют улучшить как динамические, так и статические показатели САУ.

Оптимизирующие составляющие формируются таким образом, чтобы синтезированный логический алгоритм управления функционировал в соответствии с некоторой функцией оптимальности, например – с целью

уменьшения ошибки управления. Таким образом, работа данной составляющей заключается в переключении управляющего воздействия при определенных состояниях систем с одного максимально возможного значения на другое, противоположного Эти переключения знака. моменты определяются комбинацией обобщённых координат и обобщённых скоростей. Однако формирование оптимизирующих составляющих является трудноразрешимой задачей [97]. Связано это, в первую очередь, с определением моментов переключения в общем виде, так как для обеспечения оптимальности управления необходимо учитывать динамику движения всех внутренних координат системы, что далеко не всегда является возможным.

Логические составляющие представляют собой некоторую совокупность логических операций управления, определяющих функции переключения структуры системы управления в зависимости от соотношений между внутренними координатами объекта управления с целью обеспечения заданного качества управления.

Существует множество различных алгоритмов логического управления. Общим для рассмотренных логических нелинейных алгоритмов управления является то, что переключение параметров системы происходит на основании функции ошибки $\varepsilon(t)$ и ее производных $\varepsilon'(t)$, $\varepsilon''(t)$. Данный подход обеспечивает нечувствительность качества процессов управления к изменению параметров объекта управления в небольших пределах. Рассмотрим некоторые из существующих логических алгоритмов управления.

В работе Е. К. Шигина [106] предложен логический алгоритм, формирующий корректирующий сигнал на основе анализа изменения динамики движения системы. Формирование логического сигнала $\varepsilon^{0}(t)$ описывается следующим функцией:

$$\varepsilon^{0}(t) = \begin{cases} k_{1}\varepsilon(t) & npu \ \varepsilon'(t)\varepsilon''(t) \ge 0, \\ k_{2}\varepsilon(t) & npu \ \varepsilon'(t)\varepsilon''(t) < 0, \end{cases}$$

где $\varepsilon(t)$ – собственная ошибка управления САУ, k_1 и k_2 – некоторые параметры, причем $k_1 < k_2$.

На рисунке 1.5 представлен график формирования логической корректирующей ошибки $\varepsilon^{0}(t)$ при гармоническом сигнале ошибки $\varepsilon(t) = \sin(t)$. Параметры логического устройства выбраны следующими: $k_1 = 0.5$, $k_2 = 2$.

Рассматриваемый логический алгоритм изменяет коэффициент передачи прямого контура управления в зависимости от того, на участке разгона (t_1, t_2) , (t_3, t_4) или торможения (t_0, t_1) , (t_2, t_3) находится на данный момент система.



Рисунок 1.5 – График формирования ошибки $\varepsilon^{0}(t)$ при гармоническом сигнале ошибки

Под участком торможения понимается участок переходного процесса, на котором скорость $\varepsilon'(t)$ изменения ошибки и её ускорение $\varepsilon''(t)$ характеризуются разными знаками, то есть выполняется условие $\varepsilon'(t)\varepsilon''(t) < 0$. Соответственно, на данном участке логическое устройство изменяет коэффициент передачи в прямой цепи САУ на k_2 , что приведет к более эффективному замедлению динамики движения. Под участком разгона понимается участок переходного процесса, на котором скорость $\varepsilon'(t)$ изменения ошибки и её ускорение $\varepsilon''(t)$ характеризуются одинаковыми знаками, то есть выполняется условие $\varepsilon''(t)\varepsilon''(t) > 0$. Соответственно, на данном участке логическое устройство изменяет коэффициент передачи в прямой цепи САУ на k_1 , что приведет к более умеренному разгону. При правильном выборе параметров логического алгоритма можно существенно снизить колебательность исходной системы.

В работе С. В. Емельянова [24] и М. В. Стариковой [87] предложен логический алгоритм (ЛР₂) типа «ключ», изменяющий коэффициент передачи

прямого канала на основе информации как о текущем значении ошибки $\varepsilon(t)$, так и о её производной $\varepsilon'(t)$, с целью получения оптимального переходного процесса.

Формирование логического сигнала $\varepsilon^0(t)$ описывается следующей функцией:

$$\varepsilon^{0}(t) = \begin{cases} k_{1}\varepsilon(t) & \text{при } \varepsilon(t)(k\varepsilon(t) + T\varepsilon'(t)) \ge 0, \\ 0 & \text{при } \varepsilon(t)(k\varepsilon(t) + T\varepsilon'(t)) < 0, \end{cases}$$

где $\varepsilon(t)$ – собственная ошибка управления САУ, *k* и *T* – параметры, зависящие от инерционности и быстродействия объекта управления.

На рисунке 1.6 представлен график формирования логической корректирующей ошибки $\varepsilon^{0}(t)$ при гармоническом сигнале ошибки $\varepsilon = \sin(t)$. Параметры логического регулятора выбраны следующими: $k_{1} = 2, k = 1, T = 1$.



Рисунок 1.6 – График формирования ошибки $\varepsilon^{0}(t)$ при гармоническом сигнале ошибки

Рассматриваемый логический алгоритм изменяет коэффициент передачи прямого контура управления в зависимости от того, насколько близка система к положению равновесия. Пока система находится далеко OT положения равновесия, что соответствует $\varepsilon(t)(k\varepsilon(t)+T\varepsilon'(t)) > 0$ (t_0, t_1), (t_2, t_3), то логическое устройство увеличивает коэффициент передачи прямого контура с целью форсирования движения системы. При приближении системы к положению равновесия, что соответствует $\varepsilon(t)(k\varepsilon(t)+T\varepsilon'(t)) < 0$ $(t_1, t_2), (t_3, t_4)$, логическое устройство разрывает прямой контур управления ($k_1 = 0$), что приводит к торможению динамики движения системы. При определенных значениях
параметров логического алгоритма колебательный переходный процесс в системе можно свети к апериодическому.

В работе С. В. Емельянова и А. И. Федотовой [21] предложен логический алгоритм (ЛР₃), вырабатывающий сигнал управления на основе информации как о текущем значении ошибки $\varepsilon(t)$, так и о её производной $\varepsilon'(t)$, с целью получения оптимального переходного процесса. Под оптимальным переходным процессом подразумевался такой процесс, в котором при единичном ступенчатом сигнале отсутствует перерегулирование, а время регулирования минимальное. Формирование логического сигнала $\varepsilon^0(t)$ описывается следующей функцией:

$$\varepsilon^{0}(t) = \begin{cases} k\varepsilon(t) + T\varepsilon'(t) & \text{при } \varepsilon(t)\varepsilon'(t) \ge 0, \\ k\varepsilon(t) - T\varepsilon'(t) & \text{при } (k\varepsilon(t) + T\varepsilon'(t))\varepsilon'(t) < 0, \\ -k\varepsilon(t) + T\varepsilon'(t) & \text{при } (k\varepsilon(t) + T\varepsilon'(t))\varepsilon(t) < 0, \end{cases}$$

где ε – собственная ошибка управления САУ, *k* и *T* – некоторые параметры.

На рисунке 1.7 представлен график формирования логической корректирующей ошибки $\varepsilon^{0}(t)$ при гармоническом сигнале ошибки $\varepsilon(t) = \sin(t)$.



Рисунок 1.7 – График формирования ошибки $\varepsilon^{0}(t)$ при гармоническом сигнале ошибки

Параметры логического регулятора выбраны следующими: $k_1 = 2, k = 1, T = 1$. Как видно по рисунке 1.7, данный логический нелинейный алгоритм управления близок к релейным, что позволяет использовать значения k и T близкие к предельным. В САУ с рассматриваемым логическим устройством происходит переключение основного контура и дополнительного

дифференцирующего контура. Когда система отдаляется от положения равновесия $(t_0, t_1), (t_3, t_4)$, то логическое устройство подключает основной контур и дифференцирующий контур с положительными коэффициентами с целью замедления динамики системы. Когда система приближается к положению равновесия $(t_1, t_3), (t_4, t_6)$, то логическое устройство на основе анализа динамики движения подключает прямой контур $(t_1, t_2), (t_4, t_5)$ или дифференцирующий контур $(t_2, t_3), (t_5, t_6)$ с целью торможения динамики движения. При таком подходе значительно возрастает качество управления за счет того, что при приближении САУ к положению равновесия сигнал замедления включается полностью [97].

Однако рассмотренные логические алгоритмы управления разработаны для одномерных систем, и их поведение в составе МСАУ СТО может быть совершенно иным, так как при формировании корректирующего сигнала не учитываются структурные и параметрические особенности класса многосвязных объектов управления.

В связи с этим возникает необходимость в разработке многомерных логических алгоритмов для управления многосвязными объектами методов синтеза, формирующих логические сигналы управления с целью согласования и стабилизации всех сепаратных подсистем в соответствии с новыми внешними условиями и режимами работы.

1.4. Цели и задачи научного исследования

Проведенный анализ особенностей проектирования МСАУ СТО и методов синтеза логико-динамических систем управления позволяет сформулировать направление и научную цель диссертационного исследования.

Исследовательская работа направлена на решение фундаментальной проблемы теории автоматического управления, связанной с развитием методов анализа и синтеза логических алгоритмов управления многосвязным СТО.

Целью работы является повышение качества многосвязного управления сложным техническим объектом на основе логических алгоритмов и оценка эффективности их применения в составе МСАУ авиационным ГТД.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих теоретических и прикладных задач:

1. Разработать концепцию проектирования и структуру МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором.

Как было отмечено ранее, современные МСАУ СТО характеризуются параметрическими существенными структурными, И функциональными изменениями на различных режимах работы. В качестве исследуемого в диссертационной работе сложного технического объекта управления рассматривается такой многомерный объект, в котором взаимодействие между сепаратными подсистемами осуществляется через естественные внутренние перекрестные связи. Для обеспечения высокой эффективности управления таким сложным многосвязным объектом (при различных режимах и условиях функционирования) необходимо не только изменять параметры и структуру линейных регуляторов, но и вводить дополнительные связи между сепаратными подсистемами для компенсации влияния перекрестных связей [55]. Для реализации столь сложных принципов многосвязного управления предполагается МСАУ CTO разработать концепцию проектирования И структуру С двухканальным логическим регулятором на основе метода декомпозиции многосвязного объекта управления на сепаратные подсистемы и многомерные элементы связи [32]. Выбранный подход позволяет анализировать реальные многосвязные СТО с учетом всех их структурных и функциональных особенностей, а также наглядно показать влияние динамических свойств сепаратных подсистем многосвязного объекта управления на качество управления МСАУ СТО в целом.

2. Провести синтез двойного логического алгоритма управления сепаратной подсистемой в составе МСАУ СТО.

Как было описано в п. 1.3, существующие логические алгоритмы управления недостаточно эффективны для их применения в составе МСАУ сложным многосвязным объектом, функционирующим в условиях

39

параметрической неопределенности. Для решения данной проблемы предполагается разработать новые методы логического многосвязного управления, учитывающие структурные, параметрические и функциональные особенности исследуемого класса объекта управления. В контексте решения данной задачи предполагается провести синтез двойного логического алгоритма, формирующего сигнал управления собственной сепаратной подсистемой на основе логического анализа как движения собственной сепаратной подсистемы, так и влияния перекрестных связей с целью согласования всех сепаратных подсистем в составе МСАУ СТО.

3. Провести анализ эффективности МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором при параметрических изменениях, наличии чистого запаздывания и действии различных возмущений на основе имитационного моделирования.

Существующие сложные технические объекты (наподобие авиационного ГТД) характеризуются значительным изменением своих параметров на различных режимах работы. Также из-за влияния различных факторов, в таких системах наблюдается как наличие чистого запаздывания, так и действие различных возмущающих сигналов. Таким образом, необходимо провести оценку влияния параметрических изменений, наличия чистого запаздывания и действия различных возмущений на качество логического управления многосвязным СТО.

4. Разработать инженерную методику и программное обеспечение для проектирования МСАУ с двойным логическим алгоритмом управления и провести оценку его эффективности на примере МСАУ авиационным ГТД, функционирующим в условиях параметрической и функциональной неопределённости, способом имитационного моделирования.

Как было сказано ранее, аналитическое решение задачи проектирования МСАУ СТО с логическими регуляторами с учетом всех параметрических и функциональных особенностей исследуемого класса объектов не всегда является возможным из-за наличия неучтенных параметров, влияния нелинейностей и так

40

далее. Предложенные инженерная методика и программное обеспечение позволят обосновано решать задачи по проектированию МСАУ СТО с логическими алгоритмами управления с учетом обеспечения заданных требований к качеству функционирования. Проведение имитационного моделирования МСАУ ГТД с предложенным двойным логическим алгоритмом управления позволяет оценить эффективность предложенного подхода к управлению многосвязным объектом с существенными параметрическими изменениями.

Таким образом, по результатам проведенного анализа проблем проектирования МСАУ СТО с многомерным логическим регулятором была поставлена цель и определены задачи исследования.

Выводы по первой главе

1. На основании проведённого анализа существующей проблемы проектирования МСАУ СТО (на примере МСАУ авиационным ГТД) с логическими алгоритмами управления установлено, что выбранная тематика научного исследования является важным научно-техническим направлением и характеризуется множеством нерешенных задач. Рассматриваемый класс объектов нелинейным, управления является многосвязным И многофункциональным. Динамику протекания переходных процессов в МСАУ такими объектами трудно предсказать из-за существенных изменений, вызванных как сменой режимов функционирования, так и действием внешней среды. Поэтому проблема обеспечения требуемого качества управления многосвязными объектами, функционирующими в условиях структурной и параметрической неопределенности, на основе логических алгоритмов является чрезвычайно сложной и трудноразрешимой для существующей теории управления.

2. Анализ существующих подходов проектированию к интеллектуальных МСАУ СТО показал, что, несмотря на значительный объем проведенных исследований В рассматриваемой области, не существует универсальной с инженерной и математической точек зрения методики проектирования подобных систем. Применение нейронных сетей и нечетких регуляторов сопряжено с существенными затруднениями как в теоретическом, так и в практическом плане и требует проведения дополнительных исследований. В диссертационной работе рассматривается применение логических регуляторов для управления многосвязным объектом. Данные регуляторы, изменяющие свою структуру и параметры в соответствии с некоторым логическим алгоритмом, при своей существенно простоте позволяют расширить возможности целенаправленного процессов управления, изменения что приводит к существенному улучшению динамических и статических свойств объекта управления.

3. Проведен анализ существующих методов логического управления и выявлены их недостатки. Существующие логические алгоритмы разработаны для управления преимущественно динамическими объектами с одним управляемым в полной мере учитывать структурные и параметром и не позволяют функциональные особенности МСАУ СТО. Поэтому проблема синтеза алгоритмов, способных выполнять согласованное логических И связное управление множеством сепаратных подсистем в составе МСАУ СТО с учетом влияния перекрестных связей между ними, является актуальной научной задачей.

4. Исходя из тенденции развития области логического управления, поставлена цель и определены задачи научного исследования. Решение поставленной цели и выделенных задач направлено на повышение качества управления логического многосвязного сложным техническим объектом, функционирующим В условиях параметрической И функциональной неопределенности.

42

Глава 2. Синтез двухканального логического регулятора

2.1. Концепция проектирования и структура МСАУ с двухканальным логическим регулятором на основе метода декомпозиции

По результатам анализа, проведённого в первой главе, установлено, что наиболее предпочтительными в инженерном приложении на сегодняшний день являются методы логического управления с перестраиваемой структурой управляющей части.

Как было сказано выше, существенной проблемой, связанной с применением многомерных логических регуляторов, является синтез адекватного логического алгоритма, формирующего корректирующий сигнал на основе оценки поведения многосвязного объекта управления с учетом его структурных и функциональных особенностей.

Существующие логические алгоритмы управления не позволяют в полной мере учитывать такие характерные особенности современных сложных динамических объектов, как нелинейность, нестационарность параметров, многомерность и многосвязность. Основная проблема, связанная с применением логических алгоритмов для управления сложными многосвязными объектами управления, заключается в формировании сигнала управления с учетом не только текущего состояния собственной сепаратной подсистемы, но и динамики движения остальных подсистем с целью их согласования и координации в достижении цели функционирования.

Таким образом, задача управления такими сложными техническими объектами на различных рабочих режимах с учетом всех свойств и особенностей представляется чрезвычайно сложной, а в современной литературе не существует универсальной (с инженерной и математической точек зрения) единой методики проектирования МСАУ с логическими алгоритмами управления.

С целью решения выделенной задачи предлагается концепция проектирования МСАУ СТО с логическими алгоритмами управления, а также

43

структура двухканального логического регулятора, реализующего предлагаемые алгоритмы.

2.1.1. Концепция проектирования МСАУ СТО с логическими алгоритмами управления

Исходя из системного подхода к описанию МСАУ на основе декомпозиции СТО на сепаратные подсистемы и многомерный элемент связи, в работе [36], в зависимости от характера параметрических изменений, выделено три различных класса МСАУ СТО.

Первый класс МСАУ СТО характеризуется параметрическими изменениями только в сепаратных подсистемах. Для эффективного управления данным классом МСАУ СТО необходимо изменять структуру и параметры линейного регулятора в сепаратной подсистеме с целью коррекции динамики её движения.

Второй класс МСАУ СТО отличается параметрическими изменениями только перекрестных связей. Для эффективного управления данным классом МСАУ СТО уже необходимо формировать дополнительные корректирующие связи между сепаратными подсистемами с целью их координации и согласования динамики движения всей МСАУ в целом.

Особенность третьего класса МСАУ СТО заключается в параметрических изменениях как сепаратных подсистем, так и перекрестных связей. Для эффективного управления данным классом МСАУ СТО необходимо уже многомерное управление каждой отдельной сепаратной подсистемой, корректирующее её динамику движения с целью координации и согласования всех сепаратных подсистем в составе многосвязного объекта управления. Таким образом, подход к управлению третьим классом представляет собой интеграцию подходов к управлению для первого и второго класса МСАУ СТО.

Реализовать столь сложные законы управления предлагается в контексте логического управления. Предложенная концепция заключается в интеграции линейного регулятора, реализующего линейные законы управления, и двухканального логического корректора, проводящего анализ как характера

движения сепаратных подсистем, так и влияния на их динамику перекрестных связей, с целью улучшения качества управления многосвязным объектом на нерасчетных режимах.

Предлагаемая структура МСАУ СТО с многомерным логическим регулятором представлена на рисунке 2.1, где G(t), $U^*(t)$, Y(t) – вектор задающей, управляющей, управляемой координаты, $\varepsilon(t)$ – вектор собственной ошибки управления.



Рисунок 2.1 – Структурная схема МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором

Концепция предлагаемого логического многосвязного управления заключается в интеграции логического алгоритма управления сепаратной подсистемой, изменяющего сигнал ошибки управления собственной сепаратной подсистемой на основе анализа как текущего состояния, так и прогнозируемого состояния исходя из динамики её движения, и логического алгоритма, формирующего дополнительные искусственные перекрестные связи между сепаратными подсистемами с целью координации и согласования движения МСАУ СТО в целом.

Таким образом, логический регулятор формирует сигнал управления U(t) многосвязным объектом управления на основе двухканального комбинированного логического подхода, учитывающего как текущее состояние, так и динамику движения МСАУ в целом. Такая концепция позволяет в полной мере учитывать структурные и функциональные особенности рассматриваемого класса МСАУ СТО.

2.1.2. Структура двухканального логического регулятора

В рамках предложенной рассмотренной концепции многосвязного логического управления предлагается структура логического регулятора в составе подсистемы МСАУ СТО, *i-*й сепаратной формирующего как основной корректирующий сигнал управления собственной сепаратной подсистемой (на текущего состояния и динамики основе анализа eë движения), так И дополнительный координирующий сигнал (на основе анализа динамики движения всех сепаратных подсистем в составе МСАУ СТО).

Предлагаемый логический регулятор, структурная схема которого представлена на рисунке 2.2, формирует скорректированный сигнал управления $U^*(t)$ на основе двухканальной логической обработки информации о динамике движения всех сепаратных подсистем в составе МСАУ СТО.



Рисунок 2.2 – Структурная схема логического регулятора в составе *i*-й сепаратной подсистемы

Рассмотрим принцип работы логического регулятора. Логический алгоритм управления сепаратной подсистемой формирует ошибку $\varepsilon_i^*(t)$ для *i*-й сепаратной подсистемы на основе анализа текущего значения ошибки управления $\varepsilon_i(t)$ и динамики её изменения $\varepsilon_i'(t)$ с целью коррекции динамики движения собственной сепаратной подсистемы. Логический алгоритм коррекции влияния перекрестных связей формирует искусственную координирующую перекрестную связь $u_i(t)$ на

основе анализа влияния динамики движения *j*-х сепаратных подсистем $(j = 1, ..., n; j \neq i)$ на динамику движения собственной *i*-й сепаратной подсистемы через перекрестные связи в многосвязном объекте управления. Таким образом, при формирования управляющего воздействия $u_i(t)$ логический регулятор в полной мере учитывает движения и собственной сепаратной подсистемы, и всей МСАУ в целом.

Предложенная концепция проектирования и структура МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом управления учитывает в полной мере структурные, параметрические и функциональные особенности многосвязного объекта управления при формировании логического сигнала управления. Отметим, что предложенный многомерный логический корректор достаточно прост как в программной, так и в натурной реализации.

Как было отмечено выше, существенной проблемой, связанной с применением логических регуляторов, является синтез адекватного логического алгоритма, формирующего корректирующий сигнал на основе оценки поведения многосвязного объекта управления с учетом его структурных и функциональных особенностей. Для решения данной проблемы необходимо разработать двойной логический алгоритм, вырабатывающий корректирующий сигнал управления собственной сепаратной подсистемой с учетом влияния перекрестных связей в многосвязном объекте управления.

Теоретическая и практическая значимость полученного двойного логического алгоритма подтверждается патентом России на изобретение [66].

2.2. Синтез корректирующего логического алгоритма управления автономной сепаратной подсистемой с учетом динамики её движения

Решим задачу синтеза метода логического управления автономной сепаратной подсистемой. Как было сказано выше, на различных режимах работы современных СТО возможны существенные параметрические изменения в сепаратных подсистемах. Возможным способом адаптации к таким изменениям является формирование логического корректирующего сигнала на основе

дополнительной информации о динамике функционирования собственной сепаратной подсистемы.

Рассмотрим структурную схему, представленную на рисунке 2.3, САУ сепаратной подсистемой, функционирующей в автономном режиме.



Рисунок 2.3 – Структурная схема САУ СТО с корректирующим логическим алгоритмом

Предлагаемый корректирующий логический алгоритм управления вырабатывает корректирующую ошибку $\varepsilon_i^*(t)$ на основе дискретного анализа поведения собственной ошибки управления по следующим характеристикам: её текущего значения $\varepsilon_i(t)$, динамики движения $\varepsilon_i'(t)$ и направления изменения $\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t)$. На рисунке 2.4 представлены графики изменения ошибки управления $\varepsilon_i(t)$, её производной $\varepsilon_i'(t)$, а также их произведения $\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t)$.



Рисунок 2.4 – График изменения ошибки $\varepsilon_i(t)$, её производной $\varepsilon_i'(t)$ и их произведения $\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t)$

Когда модуль ошибки $|\varepsilon_i(t)|$ возрастает, что соответствует $\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) > 0$ (t_0, t_1),(t_2, t_3), то система удаляется от положения равновесия и необходимо замедлить движение системы с учетом как текущего состояния $K_{\Pi}\varepsilon_i(t)$ ошибки управления (где K_{Π} – некоторый коэффициент усиления), так и динамики её движения $T_{\Pi}\varepsilon_i'(t)$ (где T_{Π} – некоторая постоянная времени). Если же модуль ошибки $|\varepsilon_i(t)|$, наоборот, уменьшается, что соответствует $\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \leq 0$ (t_1, t_2), (t_3, t_4), то система приближается к положению равновесия и необходимо дополнительно проводить анализ динамики её движения. Для этого обозначим через $\varepsilon_i^{\Pi P}(t)$ прогнозируемое значение ошибки управления $\varepsilon_i(t)$:

$$\varepsilon_i^{\Pi P}(t) = K_{\Pi}\varepsilon_i(t) + T_{\Pi}\varepsilon_i'(t).$$

Графики изменения ошибки управления $\varepsilon_i(t)$, её производной $\varepsilon_i'(t)$ и прогнозируемой ошибки управления $\varepsilon_i^{\Pi P}(t)$ представленны на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – График изменения ошибки $\varepsilon_i(t)$, её производной $\varepsilon_i'(t)$ и прогнозируемой ошибки $\varepsilon_i^{\Pi P}(t)$

Если текущее значение ошибки $\varepsilon_i(t)$ и прогнозируемое значение ошибки $\varepsilon_i^{\Pi P}(t)$ одного знака (t_1, t_5) , (t_3, t_6) , то система находится вдалеке от положения равновесия и воздействия не требуется. Когда же текущее значение ошибки $\varepsilon_i(t)$ и значение ошибки $\varepsilon_i^{\Pi P}(t)$ будут разных знаков (t_5, t_2) , (t_6, t_4) , то система находится вблизи от положения равновесия и необходимо замедлить движение системы с учетом её динамики движения $T_{\Pi}\varepsilon_i'(t)$.

Таким образом, на основе вышеописанной концепции, предложенный логический алгоритм управления автономной сепаратной подсистемой описывается следующей функцией:

$$\varepsilon_{i}^{*}(t) = \begin{cases} \varepsilon_{i}(t) & \text{при} \quad (\varepsilon_{i}(t)\varepsilon_{i}'(t) \leq 0) \land \left(\varepsilon_{i}(t)\varepsilon_{i}^{\Pi P}(t) \geq 0\right), \\ \varepsilon_{i}(t) + T_{\Pi}\varepsilon_{i}'(t) & \text{при} \quad (\varepsilon_{i}(t)\varepsilon_{i}'(t) \leq 0) \land \left(\varepsilon_{i}(t)\varepsilon_{i}^{\Pi P}(t) < 0\right), \\ K_{\Pi}\varepsilon_{i}(t) + T_{\Pi}\varepsilon_{i}'(t) & \text{при} \quad (\varepsilon_{i}(t)\varepsilon_{i}'(t) > 0), \end{cases}$$
(2.1)

где *Т*_л и *К*_л – параметры логического алгоритма управления.

На рисунке 2.6 представлен график формирования логической корректирующей ошибки $\varepsilon_i^*(t)$ при собственной ошибке управления $\varepsilon_i(t) = \sin(t)$. Значения параметров логического алгоритма управления заданы следующими: $T_{\Lambda} = K_{\Lambda} = 1$.



Рисунок 2.6 – График формирования логического сигнала $\varepsilon_i^*(t)$ предложенным логическим алгоритмом управления сепаратной подсистемой

Видно, что когда модуль ошибки возрастает (t_0, t_1) , (t_3, t_4) , то система удаляется от положения равновесия и логический алгоритм принимает решение замедлять движение системы с учетом как текущего состояния ошибки управления $K_{\Pi}\varepsilon_i(t)$, так и динамики её движения $T_{\Pi}\varepsilon_i'(t)$. Однако при уменьшении модуля ошибки (t_1, t_3) , (t_4, t_6) система приближается к положению равновесия и необходимо учитывать динамику её движения. Когда система находится еще вдалеке от положения равновесия (t_1, t_2) , (t_4, t_5) , то логический алгоритм не вырабатывает корректирующего воздействия. Но когда система находится уже вблизи от положения равновесия (t_2, t_3) , (t_5, t_6) , то логический алгоритм управления принимает решение стабилизировать движение системы с учетом её динамики $T_{\Pi}\varepsilon_{i}'(t)$.

Таким образом, предложенный логический алгоритм формирует логическую ошибку $\varepsilon_i^*(t)$ с целью коррекции динамики движения сепаратной подсистемы.

Методика расчета параметров логического алгоритма управления автономной сепаратной подсистемой

Решим задачу синтеза методики подбора параметров *T*_л и *K*_л предложенного логического алгоритма с целью достижения требуемого качества управления автономной сепаратной подсистемой.

Структурная схема исследуемой автономной системы представлена на рисунке 2.3. В качестве объекта управления рассмотрим апериодическое звено первого порядка со следующей заданной передаточной функцией $W_{Oy}(s)$:

$$W_{OY}(s) = \frac{K_{OY}}{T_{OY}s + 1},$$
 (2.2)

где *К*_{ОУ} – коэффициент передачи объекта управления, *Т*_{ОУ} – постоянная времени объекта управления.

В качестве линейного регулятора рассмотрим интегрирующее звено со следующей заданной передаточной функцией:

$$W_{PE\Gamma}(s) = \frac{K_{PE\Gamma}}{s}, \qquad (2.3)$$

где *К*_{РЕГ} – коэффициент передачи линейного регулятора.

С целью решения выделенной задачи необходимо провести анализ влияния рассматриваемых параметров T_{Λ} и K_{Λ} на качество управления автономной сепаратной подсистемой с предложенным логическим алгоритмом управления.

Логический алгоритм формирует корректирующую ошибку управления $\varepsilon_i^*(t)$ собственной сепаратной подсистемой при следующих соотношениях между собственной ошибкой управления $\varepsilon_i(t)$ и её производной $\varepsilon_i'(t)$:

1. $\varepsilon_i^*(t) = \varepsilon_i(t)$ – когда исследуемая система находится вдалеке от положения равновесия ($\varepsilon_i(t)\varepsilon_i^{\Pi P}(t) \ge 0$), однако приближается к нему ($\varepsilon_i(t)\varepsilon_i'(t) \le 0$). В данный момент регулятор не воздействует на исследуемую систему.

2. $\varepsilon_i^*(t) = \varepsilon_i(t) + T_{\Pi}\varepsilon_i'(t) -$ когда исследуемая система приближается к положению равновесия ($\varepsilon_i(t)\varepsilon_i^{\Pi P}(t) < 0$ и $\varepsilon_i(t)\varepsilon_i^{\Pi P}(t) < 0$) и логический регулятор замедляет динамику движения системы путем добавления $T_{\Pi}\varepsilon_i'(t)$.

3. $\varepsilon_i^*(t) = K_{\Pi}\varepsilon_i(t) + T_{\Pi}\varepsilon_i'(t) -$ когда исследуемая система удаляется от положения равновесия ($\varepsilon_i(t)\varepsilon_i^{\Pi P}(t) < 0$), логический регулятор корректирует движение системы путем как изменения $K_{\Pi}\varepsilon_i(t)$, так и добавления $T_{\Pi}\varepsilon_i'(t)$

Проведем анализ выделенных моментов переключения.

Переключение (1) не вносит изменение в сигнал ошибки, динамика системы не изменяется и анализа не требуется.

Переключение (2) при приближении системы к положению равновесия (близость к которому определяется с помощью прогнозируемого значения ошибки $\varepsilon_i^{\Pi P}(t)$) начинает замедлять динамику движения системы за счет добавления сигнала по первой производной от ошибки (см. рисунок 2.6). Таким образом, исследуемую систему в разомкнутом виде можно описать следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{(T_{\mathcal{I}}s+1)K_{PE\Gamma}K_{OY}}{(T_{OY}s+1)s},$$

где *Т*_л – постоянная времени логического алгоритма управления.

Таким образом, данный параметр определяет не только интенсивность замедления, но и величину, компенсирующую изменение постоянной времени объекта управления. Однако при слишком большом значении T_{Λ} динамика движения исследуемой системы на расчётном режиме существенно замедляется, что приводит к нежелательному возрастанию времени регулирования.

Переключение (3) корректирует систему при её отдалении от положения равновесия как за счет изменения амплитуды собственной ошибки управления, так и за счет добавления информации о её динамике движения (см. рисунок 2.6).

Таким образом, регулятор оценивает движение системы не по текущему значению ошибки, а по её «прогнозируемому» значению. Такой подход к коррекции позволяет быстрее компенсировать отклонения системы от положения равновесия. Таким образом, исследуемую систему в разомкнутом виде можно описать следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{\left(\frac{T_{\mathcal{I}}}{K_{\mathcal{I}}}s+1\right)K_{\mathcal{I}}K_{PE\Gamma}K_{OY}}{(T_{OY}s+1)s}$$

где T_{Π} – постоянная времени логического алгоритма управления, K_{Π} – коэффициент передачи логического алгоритма управления.

На основе вышесказанного, предложена методика подбора параметров T_{Π} и K_{Π} логического алгоритма управления автономной сепаратной подсистемы.

• параметр T_{Π} выбрать из условия компенсации инерционности многосвязного объекта управления на различных режимах работы без учета коэффициента передачи системы. Для этого требуется, с учетом астатичности исследуемой подсистемы, на основе разомкнутой передаточной функции сепаратной подсистемы, учитывающей параметр T_{Π} ,

$$W(s) = (T_{\mathcal{I}}s+1)W_{\text{PEF}}(s)W_{\text{OY}}(s) = \frac{\left(1+\sum_{k=1}^{m}b_{k}s^{k}\right)(T_{\mathcal{I}}s+1)}{\left(1+\sum_{r=1}^{n}c_{r}s^{r}\right)s},$$

рассчитать для требуемого режима работы усредненную постоянную времени T_{Σ} и усредненную постоянную времени форсирования τ_{Σ} , которые позволят приблизительно оценить значение соответствующих величин каждой сепаратной подсистемы:

$$T_{\Sigma} = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^{n} c_r,$$

$$\tau_{\Sigma} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m} b_k.$$

Тогда значение параметра T_{Λ} выбирается из условия компенсации постоянной времени T_{Σ} с помощью форсирования τ_{Σ} :

$$\tau_{\Sigma} = \beta T_{\Sigma}$$

где β – коэффициент, характеризующий интенсивность компенсации инерционности объекта управления при изменении его постоянных времени.

При возрастании значения параметра T_{π} (что соответствует возрастанию значения коэффициента β) уменьшается перерегулирование переходного процесса в собственной сепаратной подсистеме. Однако слишком большое значение данного параметра (и коэффициента соответственно) приводит к излишнему замедлению динамики движения.

• параметр K_{Λ} выбрать из условия обеспечения требуемого быстродействия МСАУ СТО с логическими регуляторами на различных режимах работы. В качестве первоначального значения рекомендуется параметр K_{Λ} выбрать из условия обеспечения заданного качества регулирования замкнутой сепаратной подсистемой в составе МСАУ СТО (с учетом ранее рассчитанного значения T_{Λ}):

$$\Phi(s) = \frac{K_{\mathcal{I}}\left(\frac{T_{\mathcal{I}}}{K_{\mathcal{I}}}s+1\right)W_{\mathrm{PEF}}(s)W_{\mathrm{OY}}(s)}{1+K_{\mathcal{I}}\left(\frac{T_{\mathcal{I}}}{K_{\mathcal{I}}}s+1\right)W_{\mathrm{PEF}}(s)W_{\mathrm{OY}}(s)}.$$

С возрастанием значения параметра K_{Λ} собственная сепаратная подсистема начинает более быстро компенсировать отклонения от положения равновесия. Однако при слишком большом значении данного параметра K_{Λ} появляются колебания переходного процесса.

Рассмотрим задачу анализа влияния параметров (T_{Π} и K_{Π}) на качество управления с помощью предложенного логического алгоритма на имитационном примере.

Пример 2.1. Проведем оценку влияния параметров (*T*_л и *K*_л) логического корректирующего алгоритма на качество управления автономной

сепаратной подсистемой. Структурная схема исследуемой САУ представлена на рис. 2.3.

Передаточная функция объекта управления с учетом инерционного исполнительного механизма имеет следующий вид:

$$W_{OY}(s) = \frac{K_{\rm UM}(\tau_0 s + 1)}{(T_{\rm UM} s + 1)(T_1^2 s^2 + T_0 s + 1)},$$

где $T_{\rm UM}$ – постоянная времени исполнительного механизма, $K_{\rm UM}$ – коэффициент передачи исполнительного механизма, T_1 , T_0 – постоянные времени объекта управления, τ_0 – постоянная форсирования объекта управления. Параметры объекта управления при переходе в нерасчетную точку имеют следующие значения: $K_{\rm UM} = 0.8$, $T_{\rm UM} = 0.15$ сек., $T_1^2 = 0.15$ сек.², $T_0 = 0.85$ сек., $\tau_0 = 0.4$ сек.

В качестве линейного регулятора применяется изодромное звено со следующей заданной передаточной функцией:

$$W_{PE\Gamma}(s) = \frac{K_{PE\Gamma}(T_{PE\Gamma}s+1)}{s},$$

где $K_{\text{PEГ}}$ и $T_{\text{PEГ}}$ – параметры линейного регулятора, имеющие следующие заданные значения: $K_{\text{PEГ}} = 6$, $T_{\text{PEГ}} = 0,35$ сек.

Рассчитаем значение параметра T_{Λ} при фиксированном значении K_{Λ} , равным 1. Параметр T_{Λ} выбирается из условия обеспечения требуемого качества функционирования сепаратной подсистемы.

Для этого, в соответствии с приведенной методикой, определим разомкнутую передаточную функцию W(s) исследуемой САУ, учитывающую параметр T_{Λ} :

$$W(s) = (T_{\mathcal{J}}s+1)W_{\text{PE}\Gamma}(s)W_{\text{OY}}(s) = \frac{(0,14s^2+0,75s+1)(T_{\mathcal{J}}s+1)}{(0,0225s^3+0,2775s^2+s+1)s}.$$

На основе данной передаточной функции W(s) рассчитаем усредненную постоянную времени T_{Σ} и усредненную постоянную времени форсирования τ_{Σ} ,:

$$T_{\Sigma} = 0,433, \quad \tau_{\Sigma} = 0,63T_{\Pi} + 0,2967.$$

Тогда значение параметра T_{Λ} выбирается из условия компенсации постоянной времени T_{Σ} с помощью форсирования τ_{Σ} :

$$\tau_{\Sigma} = \beta T_{\Sigma} \rightarrow T_{\mathcal{I}} = 0,2163 \,\beta.$$

где β – коэффициент, характеризующий интенсивность компенсации инерционности объекта управления при изменении его постоянных времени.

На рисунке 2.7 представлены графики переходных процессов выходной координаты y(t) (рисунок 2.7, а) и логической скорректированной ошибки $\varepsilon^*(t)$ (рисунок 2.7, б) в исследуемой системе с различными T_{Λ} при фиксированном K_{Λ} , равном 1.



Рисунок 2.7 – Графики переходных процессов выходной координаты y(t) (a) и логической скорректированной ошибки $\varepsilon^*(t)$ (б) в исследуемой САУ при различных T_{Λ}

По результатам моделирования видно, что при $\tau_{\Sigma} < T_{\Sigma}$ (что соответствует β < 1) логический регулятор не может эффективно скорректировать движение системы, что приводит к сохранению перерегулирования и длительному времени регулирования. При $\tau_{\Sigma} \approx T_{\Sigma}$ (что соответствует $\beta \approx 1$) логический регулятор практически полностью компенсирует перерегулирование в системе, существенно повышает устойчивость и качество управления. Однако при возрастании постоянной времени Тоу объекта управления логический алгоритм управления не сможет полностью её компенсировать. При $\tau_{\Sigma} > T_{\Sigma}$ (что соответствует $\beta > 1$) логический компенсирует алгоритм управления не только текущую инерционность объекта, но и некоторое её изменение. Однако на расчетном

режиме такой выбор значения T_{Λ} приводит к формированию в системе «скользящего» режима работы, характерным признаком которого являются быстрые переключения в логическом регуляторе. Данный режим позволяет получить квазиоптимальные переходные процессы в системе, однако его возникновение существенно уменьшает качество функционирования и долговечность работы исполнительных механизмов системы из-за вибрация вблизи положения равновесия. На рисунке 2.8 представлены графики изменения u(t) в исследуемой системе при различных T_{Λ} и видно, что при $\beta > 1$ возникает вибрация вблизи положения равновесия.



Рисунок 2.8 – Графики изменения u(t) в исследуемой системе при различных T_{II}

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при возрастании значения параметра T_{Λ} уменьшается перерегулирование переходного процесса в исследуемой системе. Однако слишком большое значение данного параметра приводит к излишнему замедлению динамики движения системы.

Рассчитаем значение параметра K_{Π} при фиксированном значении T_{Π} , равным 0,2 сек. Параметр K_{Π} выбирается из условия обеспечения требуемого быстродействия сепаратной подсистемы при заданном T_{Π} .

На рисунке 2.9 представлены графики переходных процессов выходной координаты y(t) (рисунок 2.9, а) и логической скорректированной ошибки $\varepsilon^*(t)$ (рисунок 2.9, б) в исследуемой системе с различными K_{Λ} при фиксированном T_{Λ} , равном 0,2 сек.



Рисунок 2.9 – Графики переходных процессов выходной координаты y(t) (a) и логической скорректированной ошибки $\varepsilon^*(t)$ (б) в исследуемой САУ при различных K_{Λ}

По результатам моделирования видно, что с возрастанием значения параметра К_л исследуемая система начинает более быстро приближаться к положению равновесия. Однако при слишком большом значении данного параметра ($K_{\Pi} > K_{OY}$) в системе появляется нежелательное перерегулирование, но изменение параметра Кл не приводит систему к режиму скольжения. Однако существенно большие значения параметра отношению данного по к коэффициенту усиления системы (K_Л > 4...10 K_{OY}) приводят к появлению в переходном процессе затухающих колебаний, автоколебаний и неустойчивых колебаний.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при возрастании значения параметра *K*_л возрастает быстродействие переходного процесса в исследуемой системе. Однако слишком большое значение данного параметра приводит к появлению колебаний в исследуемой системе. ■

По проведённого результатам анализа установлено, ЧТО при соответствующем подборе значений параметров T_{Π} и K_{Π} можно свести переходный процесс колебательного вида (на нерасчетном режиме) К апериодическому за счет эффективной коррекции динамики движения системы логическим алгоритмом.

2.3. Синтез координирующего логического алгоритма управления сепаратной подсистемой с учетом влияния перекрестных связей

Как было сказано в п. 2.1, на различных режимах работы в современных СТО возможны существенные параметрические изменения в перекрестных связях. Одним из возможных способов адаптации к таким изменениям является формирование логических корректирующих связей на основе анализа динамики движения многосвязного объекта управления в целом.

Рассмотрим структурную схему, представленную на рисунке 2.10, МСАУ с предлагаемым логическим алгоритмом управления, формирующим искусственную координирующую связь $u_i(t)$ на основе сигнала $y_i(t)$, полученного исходя из сравнительного логического анализа динамики движения $y_i'(t)$ собственной *i*-й сепаратной подсистемы *c* динамикой движения $y_j'(t)$ остальных *j*-х сепаратных подсистем.



Рисунок 2.10 – Структурная схема МСАУ СТО с координирующим логическим алгоритмом

Рассмотрим графики (рисунок 2.11) изменения динамики движения выходных координат $y_{1,2}'(t)$ на примере двухсвязной САУ при стабилизирующих связях ($H_2 > 0$) между сепаратными подсистемами. Пусть выходная координата $y_1(t)$ формируется собственной сепаратной подсистемой, а выходная координата $y_2(t)$ – несобственной сепаратной подсистемой. Допущением является то, что все сепаратные подсистемы однонаправленно движутся к единой точке.



Рисунок 2.11 – График изменения динамики изменения выходных координат $y_{1,2}'(t)$ и их произведения $y_1'(t)y_2'(t)$

Проведем сравнительный дискретный анализ динамик изменения выходных координат. Когда выходные координаты сепаратных подсистем изменяются в противоположных направлениях, что соответствует $y_1'(t)y_2'(t) < 0$ (t_1 , t_2), (t_3 , t_4), то сепаратные подсистемы не скоординированы между собой и начинают противодействовать друг другу. С целью их координации необходимо формировать положительную связь по динамике несобственной сепаратной подсистемы $+\alpha_{,,1}y_2'(t)$, где коэффициент α характеризует силу данной связи. В случае, когда выходные координаты сепаратных подсистем изменяются в одном направлении, что соответствует $y_1'(t)y_2'(t) < 0$ (t_0 , t_2), (t_3 , t_4), то сепаратные подсистемы уже не согласованы между собой, и необходимо проводить дополнительный сравнительный анализ динамики их движения. Для этого обозначим через $y_0^{OT}(t)$ (см. рисунок 2.5) величину отклонения между динамикой сепаратных подсистемы:

$$y_i^{OT}(t) = y_i'(t)(y_i'(t) - y_j'(t)),$$

где *i* – собственная сепаратная подсистема, *j* – несобственная сепаратная подсистема.

Графики изменения динамики движения выходных координат $y_{1,2}'(t)$, а также величины отклонения $y_1^P(t)$ для собственной сепаратной подсистемы представлены на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – График изменения динамики движения выходных координат *y*_{1,2}'(*t*) и величины отклонения *y*^{OT}(*t*) для собственной сепаратной подсистемы

Если собственная сепаратная подсистема движется с отставанием от лидера, что соответствует $y_1^{OT}(t) < 0$ (t_0 , t_5), (t_2 , t_6), то воздействия не требуется. Когда же собственная сепаратная подсистема, наоборот, движется с опережением лидера, что соответствует $y_1^{OT}(t) > 0$ (t_5 , t_1), (t_6 , t_3), то необходимо формировать отрицательную связь по динамике несобственной сепаратной подсистемы $-\alpha_{\pi}y_2'(t)$. Такой подход позволит согласовать динамику движения сепаратных подсистем, что позволит повысить качество управления МСАУ в целом.

Рассмотрим случай, когда сепаратных подсистем в составе МСАУ СТО больше двух. В таком случае возникает необходимость установления определенных правил анализа влияния через перекрестные связи остальных сепаратных подсистем. На основе таких правил каждая сепаратная подсистема будет принимать решение о формировании положительной и отрицательной логической связи с целью согласования своей динамики движения с динамикой движения остальных сепаратных подсистем в составе МСАУ СТО.

В работе [7] рассмотрены некоторые операции экстремальной непрерывной логики, которые можно использовать для формирования правил выбора на основе совокупности входных воздействий. В работе предлагается использовать принцип

ориентации на лидера – ориентацию на наиболее быструю динамику среди остальных сепаратных подсистем в составе МСАУ:

$$y'(t) = \max(y_j'(t)), \quad j = 1..n, j \neq i.$$
 (2.4)

Такой подход позволит согласовывать и координировать все сепаратные подсистемы в составе МСАУ СТО с учетом их быстродействия.

Таким образом, на основе вышеописанной концепции, предложенный логический алгоритм управления собственной *i*-й сепаратной подсистемой с учетом влияния перекрестных связей описывается следующей функцией:

$$\overline{y}_{i}'(t) = \begin{cases}
0 & \text{при } (y_{i}'(t)y'(t) \ge 0) \land (y_{i}^{OT}(t) \le 0), \\
-\alpha_{\Pi} y'(t) & \text{при } (y_{i}'(t)y'(t) \ge 0) \land (y_{i}^{OT}(t) > 0), \\
\alpha_{\Pi} y'(t) & \text{при } (y_{i}'(t)y'(t) < 0),
\end{cases}$$
(2.5)

где y'(t) – динамика лидера среди *j*-х сепаратных подсистем, $\alpha_{\rm Л}$ – параметр логического алгоритма управления, $y_i^{\rm OT}(t)$ – отклонение динамики движения собственной *i*-й сепаратной подсистемы от динамики движения «лидера».

На рисунке 2.13 представлен график формирования логической связи $y_i'(t)$ при $y_i'(t) = \sin(t)$ и $y'(t) = \cos(t)$. Значение параметра логического алгоритма управления задано следующим: $\alpha_{\pi} = 1$.



Рисунок 2.13 – График формирования связи $y_i(t)$ при $y'_i(t) = \sin(t)$ и $y'(t) = y'_j(t) = \cos(t)$

Видно, что когда выходные координаты *i*-й и *j*-й сепаратной подсистемы изменяются в противоположных направлениях (t_2, t_3) , (t_5, t_6) , то сепаратные подсистемы противодействуют друг другу и предложенный логический алгоритм формирует положительную связь по скорости движения *j*-й сепаратной подсистемы $+\alpha_{\Pi}y_j'(t)$ с целью координации движения подсистем. Однако когда выходные координаты *i*-й и *j*-й сепаратной подсистемы двигаются в одном направлении (t_0, t_2) , (t_3, t_5) , то предложенный логический алгоритм проводит анализ динамики движения сепаратных подсистем с целью их согласования. Если *i*-я сепаратная подсистема опережает *j*-ю сепаратную подсистему (t_1, t_2) , (t_4, t_5) , то предложенный логический алгоритм проводит анализ динамики движения опережает *j*-ю сепаратную подсистему (t_1, t_2) , (t_4, t_5) , то предложенный логический связь по динамике *j*-й сепаратной подсистемы – $\alpha_{\Pi}y_j'(t)$. В противном случае (t_0, t_1) , (t_3, t_4) логическая связь не формируется.

Таким образом, предложенный логический алгоритм формирует искусственную логическую связь $u_{i}(t)$ с целью согласования динамики движения МСАУ в целом.

Методика расчета параметров логического алгоритма управления сепаратной подсистемой с учетом влияния связей

Решим задачу анализа влияния параметра α_{Λ} предложенного логического координирующего алгоритма на качество управления МСАУ СТО при варьировании значения системных коэффициентов H_i , определяющих силу и характер перекрестных связей, на основе имитационного моделирования.

Пример 2.2. Проведем оценку влияния параметра α_л логического координирующего алгоритма на качество управления МСАУ. В качестве исследуемой системы рассмотрим двухсвязную гомогенную МСАУ с голономным связями, структурная схема которой представлена на рисунке 2.10.

Матричная передаточная функция многосвязного объекта управления с учетом инерционного исполнительного механизма имеет следующий вид:

$$W_{OV}(s) = \frac{\tau_0 s + 1}{(T_{IIM} s + 1)(T_1^2 s^2 + T_0 s + 1)} \begin{bmatrix} 1 & K_{12} \\ K_{21} & 1 \end{bmatrix},$$

где $T_{\rm UM}$ – постоянная времени исполнительного механизма, T_1 , T_0 – постоянные времени объекта управления, τ_0 – постоянная форсирования объекта управления,

 K_{ij} – коэффициенты передачи между сепаратными подсистемами механизма. Параметры объекта управления при управлении каждой сепаратной подсистемой в автономном режиме ($K_{12} = K_{21} = 0$) имеют следующие значения: $T_{\rm HM} = 0,15$ сек., $T_1^2 = 0,15$ сек.², $T_0 = 0,85$ сек., $\tau_0 = 0,4$ сек.

Многомерный линейный регулятор представляет собой изодромное звено со следующей заданной передаточной функцией $W_{\text{PEF}}(s)$:

$$W_{PE\Gamma}(s) = \frac{K_{PE\Gamma}}{s} (T_{PE\Gamma} \ s+1) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $K_{\text{РЕГ}}$ и $T_{\text{РЕГ}}$ – параметры линейного регулятора. Параметры $W_{\text{РЕГ}}(s)$ многомерного линейного регулятора рассчитаны из условия обеспечения требуемого качества управления каждой *i*-й сепаратной подсистемой в автономном режиме на расчетной точке и имеют следующие заданные значения: $K_{\text{РЕГ}} = 2,4, T_{\text{РЕГ}} = 0,35$ сек..

В соответствии со структурой логического регулятора (см. рисунок 2.2), дополнительный линейный регулятор в каждой сепаратной подсистеме также представляет собой интегрирующее звено со следующей заданной передаточной функцией $R_i(s)$:

$$R_i(s) = \frac{1}{s}, \quad i = 1, 2.$$
 (2.6)

Рассмотрим качество функционирования МСАУ СТО с предложенным логическим алгоритмом при положительных перекрестных связях между сепаратными подсистемами: $H_2 = -K_{12}K_{21} < 0$, где K_{ij} – коэффициенты передачи перекрестной связи из *j*-й сепаратной подсистемы в *i*-ю сепаратную подсистему. На рисунке 2.14 представлены графики переходных процессов $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой МСАУ при дестабилизирующих перекрестных связях (K₁₂ = 1,3, K₂₁ =0,3). Положительные связи нарушают согласованность движения сепаратных подсистем, приводит к существенному ухудшению ЧТО также качества функционирования всей МСАУ в целом.



Рисунок 2.14 – Графики переходных процессов **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО: а – без логического алгоритма, б – с логическим алгоритмом ($\alpha_{\Pi 1} = 3$, $\alpha_{\Pi 2} = 0,4$)

По рисунку 2.14, (а) видно, что в первой подсистеме вследствие влияния связей наблюдается существенное перерегулирование. В сепаратной подсистеме с наибольшим возмущением (в рассматриваемом примере это первая подсистема) параметр α_{Λ} должен выбираться достаточно большим ($\alpha_{\Lambda 1} = 3$) для компенсации такого влияния перекрестных связей. Тогда логический регулятор эффективно компенсирует возмущение и стабилизирует динамику движения всей МСАУ СТО в целом, что видно по рисунку 2.14, (б).

Рассмотрим качество функционирования МСАУ СТО с предложенным логическим алгоритмом при отрицательных перекрестных связях между сепаратными подсистемами: $H_2 = -K_{12}K_{21} > 0$, где K_{ij} – коэффициенты передачи перекрестной связи из *j*-й сепаратной подсистемы в *i*-ю сепаратную подсистему. На рисунке 2.15 представлены графики переходных процессов **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ при стабилизирующих перекрестных связях ($K_{12} = -1, 2, K_{21} = 0, 5$). Отрицательные связи нарушают координацию движения сепаратных подсистем, что приводит к существенному ухудшению качества функционирования всей МСАУ в целом.



Рисунок 2.15 – Графики переходных процессов $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой МСАУ без предложенного логического алгоритма при стабилизирующих связях ($H_2 > 0$)

По рисунку 2.15, (а) видно, что во второй подсистеме вследствие форсирующего влияния связей появляется перерегулирование, которое приводит к появлению колебаний переходного процесса. Для компенсации такого влияния перекрестных связей, во второй сепаратной подсистеме параметр α_{Λ} должен выбираться достаточно большим ($\alpha_{\Lambda 2} = 3$) чем в первой ($\alpha_{\Lambda 1} = 1,2$). Тогда логический регулятор эффективно компенсирует колебания переходных процессов и стабилизирует динамику движения всей МСАУ СТО в целом, что видно по рисунку 2.15, (б).

По результатам моделирования можно сделать вывод, что с возрастанием значения параметра α_Л качество управления многосвязным объектом повышается за счет координации движения сепаратных подсистем. Однако слишком большое значение данного параметра α_Л приводит к существенному замедлению динамики движения многосвязного объекта в целом. ■

По результатам проведённого анализа установлено, что предложенный логический регулятор может эффективно компенсировать влияние как дестабилизирующих (положительных), так и стабилизирующих (отрицательных) перекрестных связей на динамику переходного процесса многосвязного объекта управления при выполнении условия статической устойчивости МСАУ.

2.4. Сравнительный анализ логических алгоритмов при управлении многосвязным объектом

Многообразие логических алгоритмов управления обуславливает необходимость в проведении их сравнительного анализа с предложенным многомерным логическим алгоритмом по качеству управления многосвязным объектом. С целью решения данной задачи необходимо провести синтез МСАУ с предложенным логическим алгоритмом управления на расчетном режиме. Структура исследуемой гомогенной трехсвязной САУ СТО с логическими алгоритмами управления представлена на рисунке 2.16.



Рисунок 2.16 – Структурная схема исследуемой трехсвязной САУ СТО с логическими алгоритмами управления

В качестве автономного объекта управления в каждой *i*-й сепаратной подсистеме рассмотрим последовательное соединение колебательного звена и апериодического звена, которое можно описать следующей заданной передаточной функцией *W*_{OY*ii}(<i>s*):</sub>

$$W_{OVii}(s) = \frac{K_{OV}}{(T_{UM}s+1)(T_{OV}^{2}s+2T_{OV}\xi_{OV}s+1)},$$
(2.7)

где для каждой *i*-й сепаратной подсистемы справедливо K_{OV} – коэффициент передачи объекта управления, T_{OV} – постоянная времени объекта управления, ξ_{OV} – коэффициент демпфирования объекта управления, $T_{\rm MM}$ – постоянная времени исполнительного механизма. На расчетном режиме параметры объекта управления принимают следующие заданные значения: K_{OV} = 0,5, T_{OV} = 1 сек., ξ_{OV} = 0,75, $T_{\rm MM}$ = 0,5 сек.

В качестве линейного регулятора в составе каждой *i*-й сепаратной подсистемы рассмотрим изодромное звено со следующей передаточной функцией $W_{\text{PEF}ii}(s)$:

$$W_{PE\Gamma ii}(s) = \frac{K_{PE\Gamma}(\tau_{PE\Gamma}s+1)}{s},$$
(2.8)

где для каждой *i*-й сепаратной подсистемы справедливо K_{PEF} – коэффициент передачи линейного регулятора, τ_{PEF} – постоянная форсирования линейного регулятора. Параметры линейного регулятора рассчитаны для каждой сепаратной подсистемы, работающей в автономном режиме, то есть без учета влияния перекрестных связей: $K_{\text{PEF}} = 0,66$, $\tau_{\text{PEF}} = 0,6$ сек.

Время регулирования рассматриваемой сепаратной подсистемы, работающей составляет t \approx 5.39 автономном режиме, сек. при В перерегулировании $\delta \approx 4.73$ %.

Проведем синтез параметров логических алгоритмов управления, рассмотренных в параграфе 1.3, а также предложенного многомерного логического алгоритма с учетом компенсации перерегулирования ($\sigma \le 1$ %) при допустимом времени регулирования ($t \le 8$ сек).

Для решения задачи сравнительного анализа исследуемых логических алгоритмов, помимо прямых показателей качества (время регулирования и величина перерегулирования), используется следующий интегральный показатель качества:

$$I = \sum_{i=1}^{3} \int_{0}^{t} |\varepsilon_i(t)| dt.$$

где для каждой *i*-й сепаратной подсистемы справедливо $\varepsilon_i(t)$ – прямая ошибка управления собственной *i*-й сепаратной подсистемой.

В таблице 2.1 представлены исследуемые логические алгоритмы управления, описанные в п. 1.3, которые реализуются соответствующими логическими регуляторами.

| Исследуемые логические алгоритмы управления |
|---|
|---|

| Логический регулятор | Функция формирования логически скорректированной ошибки $\varepsilon_i^0(t)$ для собственной <i>i</i> -й сепаратной подсистемы | | | |
|--|---|--|--|--|
| Е. К. Шигина (ЛР ₁) | $\varepsilon_i^0(t) = \begin{cases} k_1 \varepsilon_i(t) & \text{при } \varepsilon_i'(t) \varepsilon_i''(t) \ge 0, \\ k_2 \varepsilon_i(t) & \text{при } \varepsilon_i'(t) \varepsilon_i''(t) < 0. \end{cases}$ | | | |
| | $k_1 = 0,7, k_2 = 0,9.$ | | | |
| С. В. Емельянова и М. В. Стариковой (ЛР ₂) | $\varepsilon_{i}^{0}(t) = \begin{cases} k_{1}\varepsilon_{i}(t) & \text{при } \varepsilon_{i}(t)(K\varepsilon_{i}(t) + T\varepsilon_{i}'(t)) \geq 0, \\ 0 & \text{при } \varepsilon_{i}(t)(K\varepsilon_{i}(t) + T\varepsilon_{i}'(t)) < 0. \end{cases}$ | | | |
| | $k_1 = 1, K = 1, T = 1, 4,$ | | | |
| С.В.Емельянова и А.И.Федотовой (ЛР ₃) | $\varepsilon_{i}^{0}(t) = \begin{cases} K\varepsilon_{i}(t) + T\varepsilon_{i}'(t) & \text{при } \varepsilon_{i}(t)\varepsilon_{i}'(t) \ge 0, \\ K\varepsilon_{i}(t) - T\varepsilon_{i}'(t) & \text{при } (K\varepsilon_{i}(t) + T\varepsilon_{i}'(t))\varepsilon_{i}'(t) \le 0, \\ - K\varepsilon_{i}(t) + T\varepsilon_{i}'(t) & \text{при } (K\varepsilon_{i}(t) + T\varepsilon_{i}'(t))\varepsilon_{i}(t) < 0. \end{cases}$ | | | |
| | K = 0,81, T = 0,75, | | | |
| Предложенный (ЛР ₄) | $\begin{split} \varepsilon_{i}^{*}(t) &= \begin{cases} \varepsilon_{i}(t) & \text{при} (\varepsilon_{i}(t)\varepsilon_{i}'(t) \leq 0) \land \left(\varepsilon_{i}(t)\varepsilon_{i}^{\Pi P}(t) \geq 0\right), \\ \varepsilon_{i}(t) + T_{\Pi}\varepsilon_{i}'(t) & \text{при} (\varepsilon_{i}(t)\varepsilon_{i}'(t) \leq 0) \land \left(\varepsilon_{i}(t)\varepsilon_{i}^{\Pi P}(t) < 0\right), \\ K_{\Pi}\varepsilon_{i}(t) + T_{\Pi}\varepsilon_{i}'(t) & \text{при} (\varepsilon_{i}(t)\varepsilon_{i}'(t) > 0), \end{cases} \\ \bar{y}_{i}'(t) &= \begin{cases} 0 & \text{при} \left(y_{i}'(t)y'(t) \geq 0\right) \land \left(y_{i}^{OT}(t) \leq 0\right), \\ -\alpha_{\Pi}y'(t) & \text{при} \left(y_{i}'(t)y'(t) \geq 0\right) \land \left(y_{i}^{OT}(t) \leq 0\right), \end{cases} \end{split}$ | | | |
| | $\left[\begin{array}{cc} \alpha_{\mathcal{I}} y'(t) & \text{при} (y_i'(t)y'(t) < 0), \end{array} \right]$ | | | |
| | $K_{\Pi} = 1, T_{\Pi} = 1, \alpha_{\Pi} = 1.$ | | | |

Пример 2.1. Решим задачу сравнительного анализа логических алгоритмов в составе гомогенной трехсвязной САУ, в которой между сепаратными подсистемами образуются только дестабилизирующие связи ($H_2 > 0$, $H_3 > 0$). Многомерный элемент связи K_{OY} , соответствующий данному характеру перекрестных связей, описывается следующей заданной матрицей:

$$\mathbf{K}_{OY} = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.7 \\ -0.4 & 1 & 0.6 \\ 0.5 & -0.8 & 1 \end{bmatrix}.$$
 (2.9)

На основе анализа обобщенной характеристики многосвязного элемента связи определено, что в исследуемой МСАУ СТО образуются только положительные связи: $H_2 = 0.33$, $H_3 = 0.374$.

Графики переходных процессов Y(t) в исследуемой МСАУ СТО без логических алгоритмов управления представлены на рисунке 2.17.



Рисунок 2.17 – Графики переходных процессов **Y**(*t*) в исследуемой трехсвязной САУ без логических регуляторов

Видно, что линейный регулятор, за счет существенного влияния перекрестных связей различных типов, не может согласовать динамику движения сепаратных подсистем, вследствие чего в исследуемой системе наблюдается значительное перерегулирование и длительное время регулирования.

Значения показателей качества функционирования МСАУ СТО без логических алгоритмов управления представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

| Показатель качества | Первая | Вторая | Третья |
|----------------------------------|------------|------------|------------|
| | сепаратная | сепаратная | сепаратная |
| | подсистема | подсистема | подсистема |
| Время регулирования, сек. | 33 | 35,5 | 32 |
| Перерегулирование, % | 73,4 | 51,6 | 28,9 |
| Интегральный показатель качества | | 23,71 | |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО без логических алгоритмов управления

Графики переходных процессов Y(t) в исследуемой МСАУ СТО с ЛР₁ представлены на рисунке 2.18. Логический алгоритм Е. К. Шигина (ЛР₁) не может компенсировать влияние дестабилизирующих перекрестных связей за счет изменения коэффициента передачи. Это связано с тем, что данный логический алгоритм формирует сигнал управления на основе анализа изменения динамики движения собственной подсистемы, которое существенно зависит от влияния перекрестных связей и не отражает динамку движения многосвязного объекта управления в целом.



Рисунок 2.18 – Графики переходных процессов **Y**(*t*) в исследуемой трехсвязной САУ с ЛР₁

Таким образом, МСАУ СТО с ЛР₁ характеризуется достаточно низким качество управления. Значения показателей качества функционирования МСАУ СТО с ЛР1 представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

| Показатель качества | Первая | Вторая | Третья |
|----------------------------------|------------|------------|------------|
| | сепаратная | сепаратная | сепаратная |
| | подсистема | подсистема | подсистема |
| Время регулирования, сек. | 21.5 | 24,8 | 20,4 |
| Перерегулирование, % | 56,5 | 40,2 | 15,3 |
| Интегральный показатель качества | | 20,69 | |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО с ЛР1

Графики переходных процессов **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО с ЛР₂ представлены на рисунке 2.19. Логический алгоритм С. В. Емельянова и М. В.

Стариковой (ЛР₂) также не может компенсировать влияние дестабилизирующих перекрестных связей за счет изменения коэффициента передачи.



Рисунок 2.19 – Графики переходных процессов $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой трехсвязной САУ с ЛР₂

Это связано с тем, что данный логический алгоритм формирует сигнал управления без учета динамики движения, что не позволяет существенно изменить характер МСАУ.

Значения показателей качества функционирования МСАУ СТО с ЛР₂ представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

| Показатель качества | Первая | Вторая | Третья |
|----------------------------------|------------|------------|------------|
| | сепаратная | сепаратная | сепаратная |
| | подсистема | подсистема | подсистема |
| Время регулирования, сек. | 23,9 | 26 | 22,9 |
| Перерегулирование, % | 58,6 | 41,7 | 20,2 |
| Интегральный показатель качества | | 17,94 | |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО с ЛР2

Графики переходных процессов Y(t) в исследуемой МСАУ СТО с ЛР₃ представлены на рисунке 2.20. Логический алгоритм Емельянова С. В. и Федотовой А. И. (ЛР₃) более эффективно компенсирует влияние дестабилизирующих перекрестных связей за счет изменения коэффициента передачи с учетом динамики движения собственной сепаратной подсистемы.


Рисунок 2.20 – Графики переходных процессов $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой трехсвязной САУ с ЛР₃

Однако при приближении к положению равновесия данный логический алгоритм не может согласовать динамику движения многосвязного объекта управления, что приводит к длительным колебаниям переходного процесса и снижению качества функционирования МСАУ в целом.

Значения показателей качества функционирования МСАУ СТО с ЛР₃ представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

| Показатель качества | Первая | Вторая | Третья |
|----------------------------------|------------|-----------------------|------------|
| | сепаратная | сепаратная сепаратная | |
| | подсистема | подсистема | подсистема |
| Время регулирования, сек. | 14,8 | 16,9 | 19,1 |
| Перерегулирование, % | 48,3 | 40,5 | 17,6 |
| Интегральный показатель качества | | 15,48 | · |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО с ЛР₃

Графики переходных процессов Y(t) в исследуемой МСАУ СТО с предложенным двойным логическим алгоритмом (ЛР₄) представлены на рисунке 2.21.

Предложенный логический алгоритм эффективнее компенсирует влияние дестабилизирующих перекрестных связей за счет совокупного действия логического алгоритма управления сепаратной подсистемой и логического алгоритма управления.



Рисунок 2.21 – Графики переходных процессов $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой трехсвязной САУ с ЛР₄

Значения показателей качества функционирования МСАУ СТО с ЛР₄ представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6

| Показатель качества | Первая | Вторая | Третья |
|----------------------------------|------------|-----------------------|------------|
| | сепаратная | сепаратная сепаратная | |
| | подсистема | подсистема | подсистема |
| Время регулирования, сек. | 11,5 | 12 | 10,5 |
| Перерегулирование, % | 38,2 | 28 | 6,2 |
| Интегральный показатель качества | | 11,95 | |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО с ЛР4

Такой подход к управлению позволяет не только существенно снизить перерегулирование в каждой сепаратной подсистеме, но и, за счет стабилизации и координации динамики движения всего многосвязного объекта в целом, уменьшить колебательность исходной МСАУ СТО. ■

Пример 2.2. Решим задачу сравнительного логических анализа алгоритмов в составе гомогенной трехсвязной САУ, в которой между подсистемами образуются стабилизирующие, сепаратными как так И дестабилизирующие связи ($H_2 < 0, H_3 > 0$). Многомерный элемент связи K_{OY} , соответствующий данному характеру перекрестных связей, описывается следующей заданной матрицей:

$$\mathbf{K}_{OY} = \begin{bmatrix} 1 & 0,6 & -0,7 \\ -1,2 & 1 & 0,6 \\ 0,5 & -0,8 & 1 \end{bmatrix}.$$
 (2.10)

На основе анализа обобщенной характеристики многосвязного элемента связи определено, что в исследуемой МСАУ СТО образуются как положительные $(H_2 = -0,11)$, так и отрицательные $(H_3 = 0,492)$ связи.

Графики переходных процессов Y(t) в исследуемой МСАУ СТО без логических алгоритмов управления представлены на рисунке 2.22.



Рисунок 2.22 – Графики переходных процессов **Y**(*t*) в исследуемой трехсвязной САУ без логических регуляторов

Линейный регулятор, за счет влияния перекрестных связей различных типов, не может согласовать и скоординировать динамику движения сепаратных подсистем, вследствие чего исследуемая система теряет устойчивость.

Графики переходных процессов Y(t) в исследуемой МСАУ СТО с логическим алгоритм Е. К. Шигина (ЛР₁), С. В. Емельянова и М. В. Стариковой (ЛР₂) представлены на рисунке 2.23.

Данные логические алгоритмы несколько стабилизируют динамику движения многосвязного объекта управления, однако видно, что данные регуляторы, изменяя только коэффициент усиления собственной сепаратной подсистемы, не могут компенсировать влияние перекрестных связей и не позволяют существенно изменить характер движения МСАУ СТО.



Рисунок 2.23 – Графики переходных процессов **Y**(*t*) в исследуемой трехсвязной САУ: а – с логическим регулятором Е. К. Шигина (ЛР₁), б – с логическим регулятором С. В. Емельянова и М. В. Стариковой (ЛР₂)

Графики переходных процессов Y(t) в исследуемой МСАУ СТО с ЛР₃ представлены на рисунке 2.24. Логический алгоритм С. В. Емельянова и А. И. Федотовой (ЛР₃) существенно лучше стабилизирует и координирует динамику движения многосвязного объекта управления за счет более эффективной коррекции динамики движения собственной сепаратной подсистемы. Такой подход существенно повышает качество управления МСАУ СТО.



Рисунок 2.24 – Графики переходных процессов $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой трехсвязной САУ с ЛР₃

Однако данный логический алгоритм может только частично компенсировать влияние перекрестных связей, вследствие чего в исследуемой системе наблюдаются как значительные колебания исследуемой МСАУ вблизи положения равновесия, так и длительное время регулирования.

Значения показателей качества функционирования МСАУ СТО с ЛРЗ представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7

| Показатель качества | Первая | Вторая | Третья |
|----------------------------------|------------|-----------------------|------------|
| | сепаратная | сепаратная сепаратная | |
| | подсистема | подсистема | подсистема |
| Время регулирования, сек. | 20,3 | 22,9 | 17,7 |
| Перерегулирование, % | 7,6 | 12,6 | 8,28 |
| Интегральный показатель качества | | 16,38 | |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО с ЛР3

Графики переходных процессов $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой МСАУ СТО с предложенным двойным логическим алгоритмом (ЛР₄) представлены на рисунке 2.25.



Рисунок 2.25 – Графики переходных процессов Y(t) в исследуемой трехсвязной САУ с ЛР₄

Значения показателей качества функционирования МСАУ СТО с ЛР₄ представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

| | 10 1 | | |
|----------------------------------|------------|------------|------------|
| Показатель качества | Первая | Третья | |
| | сепаратная | сепаратная | сепаратная |
| | подсистема | подсистема | подсистема |
| Время регулирования, сек. | 10,3 | 8,2 | 9,9 |
| Перерегулирование, % | 0,9 | 1,3 | 0,9 |
| Интегральный показатель качества | | 13,84 | |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО с ЛР4

За счет совместного действия логического корректирующего и координирующего алгоритмов, предложенный логический регулятор позволяет более эффективно компенсировать влияние связей с целью согласования и координации динамики движения всех сепаратных подсистем, что позволяет существенно улучшить качество функционирования МСАУ СТО в целом.

По результатам моделирования установлено, что существующие логические алгоритмы не позволяют управлять многосвязным объектом, так как при формировании сигнала управления не учитывают структурно-функциональные особенности данного класса объектов. Однако предложенный многомерный логический алгоритм, за счет формирования логического сигнала управления с учетом влияния перекрестных связей, значительно улучшает качество функционирования как отдельных сепаратных подсистем, так и всей МСАУ СТО в целом.

Выводы по второй главе

1. Предложена концепция проектирования и структура МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором на основе метода декомпозиции. Концепция проектирования МСАУ с двухканальным логическим регулятором заключается в интеграции линейного регулятора, реализующего линейные алгоритмы управления, и двухканального логического корректора, проводящего анализ как характера движения сепаратных подсистем, так и влияния на их динамику перекрестных связей, с целью улучшения качества управления многосвязным объектом на нерасчетных режимах. На основе предложенной концепции разработана структура двухканального логического регулятора в составе і-й сепаратной подсистемы МСАУ СТО, формирующего как основной корректирующий сигнал управления собственной сепаратной подсистемой (на основе анализа её текущего состояния и динамики движения), так и дополнительный координирующий сигнал (на основе сравнительного анализа динамики движения всех сепаратных подсистем в составе МСАУ СТО). Таким образом, предложенный подход к логическому управлению многосвязным

объектом учитывает его структурные и функциональные особенности, что дает существенное преимущество с точки зрения прикладного инженерного применения. Научная новизна предложенной концепции проектирования и структуры МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором заключается в формировании сигнала управления $u_i^*(t)$ на основе интеграции основного сигнала $u_i(t)$ управления собственной сепаратной подсистемой и дополнительного координирующего сигнала $u_i(t)$, учитывающего влияние перекрестных связей

2. Разработан логический алгоритм управления автономной сепаратной подсистемой в составе многосвязного объекта управления, формирующий корректирующую ошибку $\varepsilon_i^*(t)$ на основе анализа как текущего состояния, так и прогнозируемой динамики движения собственной *i*-й сепаратной подсистемы по сигналам ошибки $\varepsilon_i(t)$ и её производной $\varepsilon_i'(t)$ соответственно. По результатам имитационного моделирования установлено, что предложенный логический алгоритм управления совместно с линейным регулятором значительно повышает качество управления при параметрических изменениях объекта управления.

3. Разработан логический алгоритм управления сепаратной подсистемой формирующий связей, С учетом влияния перекрестных искусственную координирующую связь $u_{i}(t)$ на основе сигнала $v_{i}(t)$, полученного исходя из логического сравнительного анализа динамики движения $y_i'(t)$ собственной *i*-й сепаратной подсистемы с динамикой движения $y_i'(t)$ остальных *j*-х сепаратных подсистем. По результатам имитационного моделирования установлено, что предложенный логический алгоритм обеспечивает согласование и координацию всех сепаратных подсистем в составе МСАУ СТО, что приводит к их и существенному возрастанию качества функционирования стабилизации многосвязного СТО.

Научная новизна двойного логического алгоритма заключается в коррекции динамики движения сепаратных подсистем совместно с формированием дополнительных искусственных перекрестных связей для согласования движения всех подсистем МСАУ СТО.

79

Теоретическая и практическая значимость полученного двойного логического алгоритма подтверждается патентом России на изобретение [66].

4. Проведен сравнительный анализ существующих логических алгоритмов управления с предложенным двойным логическим алгоритмом. По результатам анализа установлено, что предложенный логический алгоритм по сравнению с существующими логическими алгоритмами существенно улучшает качество управления МСАУ СТО за счет формирования логического сигнала управления как с учетом движения собственной сепаратной подсистемы, так и с учетом влияния перекрестных связей.

Глава 3. Исследование эффективности МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом управления

3.1. Синтез МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором в расчетной точке

В современных МСАУ сложными многомерными техническими объектами, подобными авиационному ГТД, на различных режимах функционирования происходят существенные изменения свойств и параметров многосвязного объекта управления, которые приводят к изменению качества управления. Вследствие ЭТОГО необходимо эффективности решить задачу оценки предложенного двойного логического алгоритма управления, реализуемого МСАУ СТО составе при параметрических логическим регулятором, В изменениях, наличии чистого запаздывания и действии различных возмущений на основе имитационного моделирования. С целью решения данной задачи необходимо провести синтез МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом управления на расчетном режиме для последующей оценки влияния рассматриваемых изменений на качество логического управления.

Рассмотрим гомогенную трехсвязную САУ без логических регуляторов, структурная схема которой представлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Структурная схема исследуемой МСАУ СТО

В работе [32] при исследовании гомогенных МСАУ предлагается использовать индивидуальную характеристику сепаратной подсистемы (1.1), отражающую её свойства в режиме управления, и многомерный элемент связи, отражающий силу и характер перекрестных связей между сепаратными подсистемами.

Так как рассматриваемая МСАУ является гомогенной, то индивидуальные характеристики всех сепаратных подсистем идентичны друг другу и имеют следующий вид:

$$\Phi_{i}(s) = \frac{W_{OV_{ii}}(s)W_{PE\Gamma_{ii}}(s)}{1 + W_{OV_{ii}}(s)W_{PE\Gamma_{ii}}(s)}, \quad i = 1, 2, 3,$$
(3.1)

где $W_{OVii}(s)$, $W_{PE\Gammaii}(s)$ – передаточные функции объекта управления и линейного регулятора в составе *i*-й сепаратной подсистемы соответственно.

В качестве объекта управления в составе автономной *i*-й сепаратной подсистемы рассмотрим последовательное соединение апериодического звена и колебательного звена, которое описывается следующей заданной передаточной функцией $W_{OYii}(s)$:

$$W_{OY_{ii}}(s) = \frac{K_{IM}}{(T_{IM}s+1)(T_{OY}^2s+2\xi_{OY}T_{OY}s+1)}, \quad i = 1, 2, 3,$$
(3.2)

где $T_{\rm UM}$ – постоянная времени исполнительного механизма, $K_{\rm UM}$ – коэффициент передачи исполнительного механизма, $T_{\rm OV}$ – постоянная времени многосвязного объекта управления, $\xi_{\rm OV}$ – коэффициент демпфирования многосвязного объекта управления.

На расчетном режиме исполнительный механизм не изменяет амплитуду сигнала управления ($K_{\rm UM} = 2$), однако характеризуется инерционностью ($T_{\rm UM} = 0.1$ сек.). Объект управления характеризуется значительной инерционностью ($T_{\rm OY} = 1$ сек.) и высоким коэффициентом демпфирования ($\xi_{\rm OY} = 0.9$). Таким образом, на расчетном режиме параметры объекта управления имеют следующие заданные значения: $K_{\rm UM} = 2$, $T_{\rm UM} = 0.1$ сек., $T_{\rm OY} = 1$ сек., $\xi_{\rm OY} = 0.9$.

Многосвязный объект управления на расчетном режиме характеризуется наличием как стабилизирующих, так и дестабилизирующих связей. Многомерный элемент связи K_{OV} , соответствующий данному характеру перекрестных связей, на расчетном режиме описывается следующей заданной матрицей:

$$\mathbf{K}_{OV} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix},$$
(3.3)

где K_{ij} – коэффициенты передачи перекрестной связи из *j*-й сепаратной подсистемы в *i*-ю сепаратную подсистему. На расчетном режиме элементы многомерного элемента связи K_{OY} имеют следующие значения: $K_{11} = K_{22} = K_{33} = 1$, $K_{12} = -0,4$, $K_{13} = 0,5$, $K_{21} = 0,7$, $K_{23} = -0,3$, $K_{31} = 0,5$, $K_{32} = -0,6$.

В качестве линейного регулятора в составе *i*-й сепаратной подсистемы рассмотрим заданное изодромное звено со следующей передаточной функцией $W_{\text{PEF}ii}(s)$:

$$W_{PE\Gamma_{ii}}(s) = K_{PE\Gamma} \frac{\tau_{PE\Gamma} s + 1}{s}, \quad i = 1, 2, 3,$$
 (3.4)

где для каждой *i*-й сепаратной подсистемы K_{PEF} – коэффициент передачи линейного регулятора, τ_{PEF} – постоянная форсирования линейного регулятора.

3.1.1. Синтез параметров многомерного линейного регулятора

Проведем синтез параметров линейного регулятора, обеспечивающего требуемые запасы устойчивости (по амплитуде $\theta_{\text{TPE6}} \ge 6$, по фазе $\phi_{\text{TPE6}} \ge 50^\circ$) и качества управления (время регулирования t < 10 сек., перерегулирование $\delta \approx 0$ %) в каждой сепаратной подсистеме с учетом влияния перекрестных связей в МСАУ.

Так как исследуемая МСАУ является гомогенной, то целесообразно воспользоваться обобщенной характеристикой многосвязного элемента связи (1.2), описанной в п. 1.2 и определяющей характер и силу перекрестной связи между группой сепаратных подсистем:

$$H_2 = h_{12} + h_{13} + h_{23} = 0,28 - 0,25 - 0,18 = -0,15, \quad H_3 = h_{123} = -0,15.$$
 (3.5)

Видно, что на расчетном режиме между первой и второй сепаратной подсистемой образуется локальная стабилизирующая отрицательная обратная связь ($h_{12} > 0$), однако в исследуемой системе в целом образуется дестабилизирующая положительная обратная связь ($H_2 < 0, H_3 < 0$).

На основе полученных характеристик H_2 и H_3 построим характеристическое уравнение связи, которое позволяет оценить запасы устойчивости в MCAV [5]:

$$D(x,H) = 1 + \sum_{i=2}^{n} H_i x^i = 1 - 0,15x^2 - 0,15x^3 = 0.$$

Исследование запасов устойчивости как для замкнутой, так и разомкнутой системы подробно рассмотрены в [27]. Корни x_j (*j*=1,2,3) характеристического уравнения связи позволяют оценить устойчивость системы по АФЧХ замкнутой системы, а модифицированные корни x_j^* (*j*=1,2,3) (3.6) – по АФЧХ замкнутой системы.

$$x_i^* = \frac{x_i}{(1 - x_i)}.$$
(3.6)

Значение корней *x_i* и модифицированных корней *x_i** представлены в таблице 3.1. *Таблица 3.1*

Корни x_i и модифицированные корни x_i^* исследуемой МСАУ на расчетном режиме

| i | Корень, <i>x</i> _i | | Модифицированный корень, <i>x_i*</i> | | |
|---|-------------------------------|------------------------|--|-------------------------|--|
| 1 | 1,6 | 1,6 | -2,66 | 2,66e ^{-j180°} | |
| 2 | -1,3-j1,57 | $2e^{-j129,6^{\circ}}$ | -0,7 <i>-j</i> 0,2 | 0,73e ^{-j164°} | |
| 3 | -1,3+j1,57 | $2e^{j129,6^{\circ}}$ | -0,7+j0,2 | $0,73e^{j164^{\circ}}$ | |

Рассчитаем параметры линейного регулятора, обеспечивающего требующие запасы устойчивости как по фазе, так и по амплитуде относительно рассчитанных модифицированных корней.

Для этого рассчитаем параметры линейного регулятора, обеспечивающего для каждой сепаратной подсистемы запас устойчивости по фазе $\bar{\phi} = |\gamma| - 90^{\circ}$, где γ – наименьший аргумент среди модифицированных корней x_i^* (в контексте рассматриваемого примера: $\gamma = 164^{\circ}$). Для этого необходимо решить следующую систему уравнений для каждой сепаратной подсистемы:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}[W(j\omega_{C})] = 0, \\ \operatorname{Im}[W(j\omega_{C})] = -r, \end{cases}$$
(3.7)

где r – наименьший модуль модифицированных корней x_i^* (в контексте рассматриваемого примера: r = 0,73), $W(j\omega) - A\Phi \Psi X$ разомкнутой сепаратной системы в режиме управления.

Параметры линейного регулятора $K_{\text{РЕГ}i}$ и $\tau_{\text{РЕГ}i}$ (*i*=1,2,3) в составе *i*-й сепаратной подсистемы, обеспечивающие запас устойчивости по фазе $\overline{\varphi}$ на расчетном режиме, принимают следующие значения: $K_{\text{РЕГ}i} = 0,12$, $\tau_{\text{РЕГ}i} = 2,35$ сек. Данные параметры линейного регулятора обеспечивают запас устойчивости по фазе $\overline{\varphi} = 74^{\circ}$ и запас устойчивости по амплитуде $\theta \approx 9,5$, однако время регулирования не удовлетворяет требуемому и соответствует t = 14,8 сек. при точности регулирования в 5 %.

Скорректированные значения коэффициента передачи $K_{\text{PE}\Gamma i}$ линейного регулятора для *i*-й сепаратной подсистемы (*i* = 1, 2, 3), обеспечивающие заданное временя регулирования с учетом допустимого перерегулирования: $K_{\text{PE}\Gamma 1} = 0,166$, $K_{\text{PE}\Gamma 2} = 0,162$, $K_{\text{PE}\Gamma 3} = 0,206$.

Таким образом, линейный регулятор в составе МСАУ СТО описывается следующей матричной передаточной функцией $W_{\text{PEF}}(s)$:

$$W_{PE\Gamma}(s) = \frac{2,35s+1}{s} \begin{bmatrix} 0,166 & 0 & 0\\ 0 & 0,162 & 0\\ 0 & 0 & 0,206 \end{bmatrix}.$$
 (3.8)

Графики переходных процессов Y(t) в исследуемой МСАУ СТО на расчетном режиме без логического регулятора представлены на рисунке 3.2.

По результатам моделирования видно, что синтезированный линейный регулятор обеспечивает требуемое качество управления в составе исследуемой МСАУ СТО на расчетном режиме.



Рисунок 3.2 – Графики переходных процессов **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО на расчетном режиме без логических алгоритмов

Однако наблюдается некоторый «прогиб» в динамике движения выходной координаты из-за наличия колебательного звена, а также некоторая разница в темпе движения сепаратных подсистем.

3.1.2. Синтез параметров двухканального логического регулятора

С целью компенсации выделенных недостатков предлагается использовать в составе исследуемой МСАУ СТО двухканальный логический регулятор. Структурная схема такой системы представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Структурная схема исследуемой МСАУ СТО с логическим регулятором в каждой сепаратной подсистеме

Рассчитаем параметры $K_{\Pi 1}$ и $T_{\Pi 1}$ корректирующего логического закона для первой сепаратной подсистемы в соответствии с рекомендациями, приведенными в главе 2.

Принимая во внимание влияние $T_{\Pi}\varepsilon_i'(t)$ корректирующего логического алгоритма, разомкнутая передаточная функция исследуемой сепаратной

подсистемы в режиме управления без учета коэффициента передачи описывается следующим уравнением:

$$W_1(s) = (T_{\mathcal{J}1}s+1)W_{PE\Gamma11}(s)W_{OY11}(s) = \frac{2,35T_{\mathcal{J}1}s^2 + (2,35+T_{\mathcal{J}1})s+1}{(0,1s^3+1,18s^2+1,9s+1)s}.$$

Так как данная передаточная функция характеризуется высоким порядком числителя и знаменателя, то рассчитаем усредненную постоянную времени $T_{1\Sigma}$ и усредненную постоянную времени форсирования $\tau_{1\Sigma}$:

$$\begin{aligned} \tau_{1\Sigma} &= \frac{2,35T_{\mathcal{I}1} + \left(2,35 + T_{\mathcal{I}1}\right)}{2} \\ T_{1\Sigma} &= \frac{0,1+1,18+1,9}{3}. \end{aligned}$$

Тогда параметр $T_{\Pi 1}$ выбирается из условия компенсации постоянной времени $T_{1\Sigma}$ с помощью форсирования $\tau_{1\Sigma}$:

$$1,675T_{\pi 1} = 1,06\beta - 1,175.$$

Коэффициент β , характеризующий интенсивность компенсации инерционности объекта управления, примем равным 3. Тогда параметр $T_{Л1}$ для первой сепаратной подсистемы будет равен 1,2 сек. Так как исследуемая МСАУ СТО является гомогенной, то значения параметров ($T_{Л2}$, $T_{Л3}$) для остальных сепаратных подсистем будут также равны 1,2 сек.

Значения параметра K_{Π} , обеспечивающих требуемое быстродействие исследуемой МСАУ СТО с двухканальными логическими регуляторами в расчетной точке: $K_{\Pi 1} = 1$, $K_{\Pi 2} = 1,25$, $K_{\Pi 3} = 1,5$.

По результатам анализа характеристик элемента связи h(s), значения параметра α_{Π} для каждой *i*-й сепаратной подсистемы выбраны из условия согласования динамики движения всех сепаратных подсистем исследуемой МСАУ СТО: $\alpha_{\Pi 1} = 0,25$ сек., $\alpha_{\Pi 2} = 0,2$ сек., $\alpha_{\Pi 3} = 0,1$ сек.

Таким образом, значения параметров $K_{\rm Л}$, $T_{\rm Л}$ и $\alpha_{\rm Л}$ предложенного двойного логического алгоритма управления имеют следующие заданные значения, представленные в таблице 3.2.

Таблица 3.2

| Сепаратная подсистема | T_{Π} , сек. | K_{Π} | α _Л , сек. |
|------------------------------|------------------|-----------|-----------------------|
| Первая сепаратная подсистема | 1,2 | 1 | 0,25 |
| Вторая сепаратная подсистема | 1,2 | 1,25 | 0,2 |
| Третья сепаратная подсистема | 1,2 | 1,5 | 0,1 |

Параметры двухканального логического регулятора

В соответствии со структурой логического регулятора (см. рисунок 2.2), дополнительный линейный регулятор $R_i(s)$ в составе каждой *i*-й сепаратной подсистемы описывается следующей заданной передаточной функцией:

$$R_i(s) = \frac{1}{s}, \quad i = 1, 2, 3.$$
 (3.9)

Таким образом, логический корректирующий алгоритм (параметры K_{Λ} , T_{Λ}) в совокупности с линейным регулятором (3.8) и логический координирующий алгоритм (параметр α_{Λ}) в совокупности с линейным корректором (3.9) обеспечивают требуемое качество управления исследуемой МСАУ СТО на расчетном режиме. Графики переходных процессов **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО на расчетном режиме представлены на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Графики переходных процессов **Y**(*t*) в исследуемой MCAУ СТО на расчетном режиме с двухканальным логическим регулятором

По результатам моделирования можно сделать вывод, что предложенный логический регулятор корректирует динамику движения выходных координат и согласовывает темпы движения каждой сепаратной подсистемы при сохранении требуемого быстродействия.

Таким образом, на расчетном режиме МСАУ как без логических регуляторов, так и с ними обеспечивает заданные показатели качества функционирования СТО.

3.2. Анализ эффективности логического управления при параметрических изменениях многосвязного объекта управления

3.2.1. Оценка эффективности двойного логического алгоритма управления при независимых параметрических изменениях сепаратных подсистем

Рассмотрим задачу анализа эффективности предложенного двойного логического алгоритма управления в составе первого класса МСАУ СТО, характеризующегося параметрическими изменениями только сепаратных подсистем, а именно – варьированием либо постоянной времени T_{OY} , либо коэффициента демпфирования ξ_{OY} , либо коэффициента передачи $K_{\rm UM}$.

Пример 3.1. Решим задачу оценки влияния качество на функционирования МСАУ СТО с логическим регулятором возрастания постоянной времени Т_{ОУ} многосвязного объекта управления в два раза и в четыре раза относительно расчетной точки. Графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ СТО без логических регуляторов при изменении постоянной времени T_{OV} в два раза ($T_{OV}^*=2$ T_{OV}) и в четыре раза $(T_{OV}*=4 T_{OV})$ представлены на рисунке 3.5. Увеличение постоянной времени T_{OV} приводит к возрастанию инерционности многосвязного объекта управления, вследствие чего ухудшается качество управления. Видно, что линейный регулятор без логических алгоритмов управления не может эффективно компенсировать возрастание инерционности переходные процессы характеризуются существенным перерегулированием и длительным временем регулирования при $T_{OV}^* = 4 T_{OV}$.

89



Рисунок 3.5 – Графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ СТО без логического алгоритма при изменении постоянной времени T_{OY} : a - в два раза, $\delta - в$ четыре раза

Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО при изменении инерционности многосвязного объекта управления представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

| Изменение постоянной времени <i>T</i> _{ОУ} | В два раза | | | В четыре раза | | |
|---|------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| Сепаратная подсистема | 1 | 1 2 3 | | | 2 | 3 |
| Время регулирования, сек. | 9,96 | 9,15 | 9,7 | 59,38 | 56,25 | 59,67 |
| Перерегулирование, % | 13,55 | 11,9 | 10,68 | 46,03 | 43,34 | 42,49 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при изменении инерционности объекта управления

Графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ СТО с логическим регулятором при изменении постоянной времени T_{OY} представлены на рисунке 3.6. Предложенный двойной логический алгоритм значительно более эффективно компенсирует влияние инерционности за счет того, что, при формировании корректирующей ошибки, используется информация как о текущем состоянии объекта управления, так и о его динамике.





Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО при изменении инерционности многосвязного объекта управления представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

| Изменение постоянной времени $T_{\rm OY}$ | В два раза | | | В четыре раза | | |
|---|------------|------|------|---------------|------|-------|
| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Время регулирования, сек. | 5,38 | 5,46 | 5,29 | 24,6 | 24 | 24,65 |
| Перерегулирование, % | 0 | 0,24 | 0,47 | 25,15 | 24,3 | 25,7 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при изменении инерционности объекта управления

В контексте рассматриваемого примера, предложенный двойной логический алгоритм управления позволяет компенсировать изменение постоянной времени T_{OY} многосвязного объекта управления в два раза. Однако более существенное изменение постоянной времени требует провести коррекцию параметров логического регулятора. На рисунке 3.7 представлены графики переходных процессов выходной координаты $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой МСАУ СТО при коррекции параметра логического регулятора, а именно – параметра T_{J} .



Рисунок 3.7 – Графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ СТО при $T_{Л1-3}$ *= 3 $T_{Л1-3}$

Видно, что после проведения коррекции качество управления существенно возросло – перерегулирование и время регулирования существенно уменьшились. при. Таким образом, по результатам моделирования можно сделать вывод о том, что при подборе параметров логического алгоритма коррекции движения собственной сепаратной подсистемы возможно компенсировать изменение постоянной времени объекта управления.

Пример 3.2. Решим задачу оценки влияния на качество функционирования МСАУ СТО с логическим регулятором уменьшения коэффициента демпфирования ξ_{OY} многосвязного объекта управления в два раза и в три раза относительно расчетной точки. Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО без логических регуляторов при изменении коэффициента демпфирования ξ_{OY} в два раза ($2\xi_{OY}^* = \xi_{OY}$) и в три раза ($3\xi_{OY}^* = \xi_{OY}$) представлены на рисунке 3.8.

Уменьшение коэффициента демпфирования ξ_{OV} приводит к появлению медленно затухающих колебаний переходных процессов, которые линейный регулятор не может эффективно компенсировать, что приводит к существенному ухудшению качества управления.



Рисунок 3.8 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой MCAУ СТО без логического алгоритма при изменении коэффициента демпфирования ξ_{OУ}: а – в два раза, б – в три раза

Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО при изменении инерционности многосвязного объекта управления представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5

| Изменение коэффициента демпфирования ξ _{OV} | В два раза | | | В три раза | | |
|---|------------|-------|-------|------------|-------|------|
| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Время регулирования, сек. | 11 | 10,86 | 11,28 | 23,9 | 23,3 | 24 |
| Перерегулирование, % | 1,24 | 1,43 | 0 | 13,3 | 11,94 | 10,4 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при изменении демпфирования объекта управления

Графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ СТО с логическим регулятором при изменении коэффициента демпфирования ξ_{OY} представлены на рисунке 3.9.

Предложенный двойной логический алгоритм значительно улучшает качество управления МСАУ СТО за счет более эффективной корректировки движения на основе анализа динамики сепаратной подсистемы.



Рисунок 3.9 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом при изменении коэффициента демпфирования ξ_{OY}: *a* – в два раза, *б* – в три раза

Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО при изменении демпфирования многосвязного объекта управления представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

| Изменение коэффициента демпфирования | В два раза | | | В четыре раза | | |
|--------------------------------------|------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Время регулирования, сек. | 11,12 | 10,44 | 10,74 | 10,7 | 10,26 | 10,72 |
| Перерегулирование, % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при изменении демпфирования объекта управления

Применение предложенного двойного логического алгоритма к управлению каждой сепаратной подсистемой позволяет более эффективно корректировать динамику движения каждой сепаратной подсистемы в составе МСАУ при изменении коэффициента демпфирования ξ_{Oy} в 2-3 раза. ■

Пример 3.3. Решим задачу оценки влияния возрастания коэффициент передачи $K_{\rm ИM}$ исполнительного механизма в четыре раза и в восемь раз относительно расчетной точки на качество функционирования МСАУ СТО с логическим регулятором. Графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ СТО без логических регуляторов при изменении

коэффициента передачи $K_{\rm UM}$ в четыре раза ($K_{\rm UM}^* = 4K_{\rm UM}$) и в восемь раз ($K_{\rm UM}^* = 8K_{\rm UM}$) представлены на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО без логического алгоритма при изменении коэффициента передачи *K*_{ИМ}: *a* – в четыре раза, *б* – в восемь раз

Уменьшение коэффициента передачи К_{им} приводит к возрастанию динамики движения, вследствие чего появляется значительное перерегулирование и колебание переходного процесса, которые линейный регулятор также не может компенсировать

Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО при изменении коэффициента передачи исполнительного механизма представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

| Изменение коэффициента передачи | В четыре раза | | | В восемь раз | | |
|---------------------------------|---------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Время регулирования, сек. | 6,96 | 6,7 | 7 | 24,8 | 21,3 | 24,84 |
| Перерегулирование, % | 36,27 | 34,55 | 32,48 | 64,44 | 61,81 | 60,09 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при изменении коэффициента передачи исполнительного механизма

Графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ СТО с логическим регулятором при изменении коэффициента передачи $K_{\rm ИM}$ представлены на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом при изменении коэффициента передачи *K*_{ИМ}: *a* – в четыре раза, *б* – в восемь раз

Предложенный двойной логический алгоритм значительно улучшает качество управления позволяет компенсировать возрастания И влияние коэффициента передачи за счет прогнозирования изменения динамики движения каждой сепаратной подсистемы. Графики скорректировнной ошибки $\boldsymbol{\varepsilon}^{*}(t)$ в МСАУ исследуемой CTO с логическим регулятором при изменении коэффициента передачи Ким представлены на рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 – Графики изменения скорректированной ошибки ε*(t) в исследуемой МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом при изменении коэффициента передачи K_{им} в восемь раз

Видно, что при возрастании коэффициента передачи исполнительного механизма *К*_{им} предложенный двойной логический алгоритм переходит на режим скольжения. Значения показателей качества функционирования в исследуемой

МСАУ СТО при изменении коэффициента передачи исполнительного механизма представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8

| Изменение коэффициента передачи | В два раза | | | В четыре раза | | |
|---------------------------------|------------|-----|-----|---------------|---|-----|
| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Время регулирования, сек. | 5,5 | 3,1 | 2,7 | 3,6 | 3 | 2,6 |
| Перерегулирование, % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при изменении коэффициента передачи исполнительного механизма

Применение предложенного двойного логического алгоритма управления позволяет более эффективно стабилизировать динамику движения каждой сепаратной подсистемы в составе МСАУ коэффициента передачи *K*_{им} в 4-8 раз.

Режим скольжения хоть и позволяет улучшить качество переходного процесса, однако существенно уменьшает помехоустойчивость системы управления и приводит к «вибрационному» сигналу управления (рисунок 3.13, промежуток t_1 - t_2), что плохо сказывается на исполнительных механизмах и может быть нежелательным.



Рисунок 3.13 – Графики изменения сигнала управления U*(*t*) в исследуемой МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом при изменении коэффициента передачи *K*_{ИМ} в восемь раз

Для устранения данного режима на вход логических регуляторов могут дополнительно включаться фильтры $F_1(s)$, а на выходе – компенсирующее звено $F_0(s)$:

$$F_1(s) = 1/F_0(s).$$

Оценим влияние фильтров на качество логического управления. В качестве фильтра $F_i(s)$ на входе логического регулятора в каждой *i*-й сепаратной подсистеме рассмотрим звено с постоянной времени T_{Φ} и постоянной форсирования τ_{Φ} , $T_{\Phi} > \tau_{\Phi}$:

$$F_i(s) = \frac{\tau_{\phi}s + 1}{T_{\phi}s + 1}, \quad i = 1, 2, 3.$$
 (3.10)

На рисунках 3.14 – 3.16 представлены графики изменения выходной координаты **Y**(*t*), скорректированной ошибки $\varepsilon^*(t)$ и модифицированного сигнала управления **U***(*t*) в исследуемой МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом при фиксированной τ_{Φ} ($\tau_{\Phi} = 0,05$ сек.) и различных значениях постоянной времени T_{Φ} ($T_{\Phi} = 0,1$ сек. (а), $T_{\Phi} = 0,2$ сек. (б)).



Рисунок 3.14 – Графики переходных процессов выходной координаты $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом: $a - при T_{\Phi} = 0,1$ сек., $\delta - при T_{\Phi} = 0,2$ сек.



Рисунок 3.15 – Графики изменения скорректированной ошибки $\varepsilon^*(t)$ в исследуемой МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом: $a - при T_{\Phi} = 0,1$ сек., $\delta - при T_{\Phi} = 0,2$ сек



Рисунок 3.16 – Графики изменения модифицированного сигнала управления $U^*(t)$ в исследуемой МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом: $a - при T_{\Phi} = 0,1$ сек., $\delta - при T_{\Phi} = 0,2$ сек.

Введение фильтра с форсированием привело к значительному возрастанию амплитуды скорректированной ошибки $\varepsilon^*(t)$ и модифицированного сигнала управления $U^*(t)$ во начальный момент времени. Однако очевидно, что введение фильтра значительно уменьшило длительность скользящего режима, вследствие чего повысилось качество управления МСАУ СТО в целом.

По результатам имитационного моделирования установлено, что предложенный двойной логический алгоритм управления может обеспечить исследуемой МСАУ высокое качество управления при независимых параметрических изменениях отдельных параметров сепаратных подсистем: либо постоянной времени T_{OV} (возрастание в два раза $T_{OV}^* = 2T_{OV}$), либо коэффициента демпфирования ξ_{OY} (уменьшение в три раза $3\xi_{OY}$ * = ξ_{OY}), либо коэффициента передачи $K_{\rm MM}$ (возрастание в четыре раза $K_{\rm MM}$ * = 4 $K_{\rm MM}$).

3.2.2. Оценка эффективности двойного логического алгоритма управления при независимых параметрических изменениях системных коэффициентов перекрестных связей

Рассмотрим задачу анализа эффективности предложенного двойного логического алгоритма управления в составе второго класса МСАУ СТО, характеризующегося параметрическими изменениями только перекрестных связей между сепаратными подсистемами, а именно – варьированием характера

системных коэффициентов *H*₂ и *H*₃, описывающих перекрёстные связи между группой подсистем.

Пример 3.4. Решим задачу оценки влияния изменения характера системного коэффициента ($H_3^* = -H_3$) относительно расчетной точки на качество функционирования МСАУ СТО с логическими регуляторами. Многомерный элемент связи K_{OY} , соответствующий заданному характеру параметрических изменений, описывается следующей заданной матрицей:

$$\mathbf{K}_{OY} = \begin{bmatrix} 1 & -0.4 & 0.5 \\ 0.7 & 1 & 0.3 \\ 0.5 & 0.6 & 1 \end{bmatrix}.$$

При данных параметрических изменениях между сепаратными подсистемами образуются как дестабилизирующие $(H_2 <$ 0), так И стабилизирующие (H₃ > 0) связи. На рисунке 3.17 представлены графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой MCAV СТО без логических регуляторов при следующем характере многомерного элемента связи: $(H_2 = -0, 15), (H_3 = 0, 15).$



Рисунок 3.17 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО без логического алгоритма при стабилизирующих и дестабилизирующих связях

Качество управления в исследуемой МСАУ СТО без логических алгоритмов значительно ухудшилось при изменении характера связи между

сепаратными подсистемами. Это происходит 3a счет наличия как стабилизирующих, так и дестабилизирующих связей – данные связи несколько подсистем, изменяют динамику движения что приводит к появлению перерегулирования в отдельных сепаратных подсистемах. Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9

| | Логический алгоритм | Без логического алгоритма | | | С логическим алгоритмом | | | |
|--|---------------------------|---------------------------|-------|-------|-------------------------|------|------|--|
| | управления | управления | | | управления | | | |
| | Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | |
| | Время регулирования, сек. | 9,31 | 3,9 | 3,76 | 11,78 | 5,38 | 5,18 | |
| | Перерегулирование, % | 0 | 10,49 | 15,67 | 0 | 1,24 | 0 | |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при перекрестных связях разного характера

На рисунке 3.18 представлены графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ СТО с логическим регулятором при следующем характере многомерного элемента связи: ($H_2 = -0,15$), ($H_3 = 0,15$).



Рисунок 3.18 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО с логическим алгоритмом при стабилизирующих и дестабилизирующих связях

Однако введение предложенного логического алгоритма управления значительно улучшает качество функционирования за счет формирования координирующих логических связей c целью компенсации влияния

дестабилизирующих связей при разнохарактерных системных коэффициентах *H*₂ и *H*₃. ■

Пример 3.5. Решим задачу оценки влияния изменения характера системных коэффициентов ($H_2^* = -1, 4H_2$), ($H_3^* = -1, 8H_3$) относительно расчетной точки на качество функционирования МСАУ СТО с логическими регуляторами. Многомерный элемент связи K_{OY} , соответствующий заданному характеру параметрических изменений, описывается следующей матрицей:

$$\mathbf{K}_{OV} = \begin{bmatrix} 1 & -0.4 & 0.5 \\ 0.7 & 1 & -0.3 \\ 0.5 & 0.6 & 1 \end{bmatrix}.$$

При данных параметрических изменениях между сепаратными подсистемами образуются сильные стабилизирующие связи ($H_2 > 0$, $H_3 > 0$). На рисунке 3.19 представлены графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО без логических регуляторов при следующем характере многомерного элемента связи: ($H_2 = 0,21$), ($H_3 = 0,27$).



Рисунок 3.19 – Графики переходных процессов выходной координаты *Y*(*t*) в исследуемой МСАУ СТО без логического алгоритма при стабилизирующих связях

Качество управления в исследуемой МСАУ СТО без логических алгоритмов также значительно ухудшилось при изменении параметров многомерного элемента связи. Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10

| Логический алгоритм управления | Без логического алгоритма управления | | С логическим алгоритмом управления | | | |
|-----------------------------------|---|------|---------------------------------------|-------|------|------|
| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Время регулирования, сек. | 10,1 | 5,95 | 4,43 | 11,63 | 6,47 | 2,95 |
| Перерегулирование, % | 0 | 6,67 | 22,73 | 0 | 0,83 | 0,22 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при перекрестных связях одного характера

Внутренние связи вносят существенные изменения в динамику движения сепаратных подсистем, вследствие чего нарушается согласование между сепаратными подсистемами, что приводит к потере их координации. Однако предложенный логический алгоритм управления значительно улучшает качество функционирования. На рисунке 3.20 представлены графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ СТО с логическим регулятором при следующем характере многомерного элемента связи: ($H_2 = 0,35$), ($H_3 = 0,27$).



Рисунок 3.20 – Графики переходных процессов выходной координаты *Y*(*t*) в исследуемой МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом при стабилизирующих связях

Видно, что предложенный логический алгоритм на основе анализа динамики движения каждой сепаратной подсистемы формирует логические связи с целью согласования и координации сепаратных подсистем, что приводит к

существенному улучшению качества управления при положительных системных коэффициентах *H*₂ и *H*₃. ■

По результатам имитационного моделирования установлено, что предложенный логический алгоритм управления за счет формирования дополнительных связей между сепаратными подсистемами позволяет стабилизировать характеристики исследуемой МСАУ при параметрических изменениях перекрестных связей многосвязного объекта управления и обеспечить высокое качество управления при $(H_2 < 0, H_3 > 0), (H_2 > 0, H_3 > 0).$

3.2.3. Оценка эффективности двойного логического алгоритма управления при комплексных параметрических изменениях многосвязного объекта управления

Рассмотрим задачу анализа эффективности предложенного двойного логического алгоритма управления в составе третьего класса МСАУ СТО, характеризующегося параметрическими изменениями как сепаратных подсистем, так и перекрестных связей между ними.

Пример 3.6. Решим задачу оценки влияния на качество функционирования МСАУ СТО с логическим регулятором изменения параметров как сепаратных подсистем ($T_{OV}^* = 2 T_{OY}$), ($2\xi_{OV}^* = \xi_{OY}$), ($K_{UM}^* = 2 K_{UM}$), так и перекрестных связей ($H_2^* = -1, 4H_2, H_3^* = 1, 8H_3$). Многомерный элемент связи K_{OY} , соответствующий данному характеру параметрических изменений в перекрестных связях, описывается следующей матрицей:

$$\mathbf{K}_{OV} = \begin{bmatrix} 1 & -0.4 & 0.5 \\ 0.7 & 1 & 0.3 \\ 0.5 & -0.6 & 1 \end{bmatrix}.$$

На рисунке 3.21 представлены графики переходных процессов вектора выходной координаты $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой МСАУ СТО при указанных комплексных изменениях параметров многосвязного объекта управления.



Рисунок 3.21 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО при комплексных изменениях объекта управления: а – без логического регулятора, б – с логическим регулятором

Видно, что существенные комплексные изменения параметров привели к потере устойчивости исследуемой МСАУ СТО без логических алгоритмов. Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО при комплексных изменениях параметров многосвязного объекта управления представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11

| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------|------|-------|-------|
| Время регулирования, сек. | 9,5 | 10 | 9,6 |
| Перерегулирование, % | 13,5 | 13,03 | 20,45 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при комплексных изменениях параметров объекта

Введение же предложенного логического алгоритма управления не допускает появление неустойчивого состояния МСАУ при одновременном комплексном изменении множества параметров за счет согласования и координации динамики движения сепаратных подсистем.

По результатам имитационных моделирований установлено, что предложенный двойной логический алгоритм управления за счет интеграции логического алгоритма управления сепаратной подсистемы с логическим алгоритмом коррекции перекрестных связей позволяет сохранить качество управления исследуемой МСАУ даже при комплексных параметрических изменениях многосвязного объекта управления.

3.3. Анализ эффективности двойного логического управления при наличии чистого запаздывания в МСАУ СТО

Задача управления многосвязным объектом при наличии чистого запаздывания является достаточно сложной [83]. Наличие запаздывания как в сепаратных подсистемах, так и в перекрестных связях между ними ведет к возрастанию фазового сдвига, вследствие чего нарушается координация движения многосвязного объекта управления, что может вызвать неустойчивость МСАУ в целом даже при небольших коэффициентах усиления регуляторов в составе сепаратных подсистем [8, 95].

Проведем анализ эффективности предложенного двойного логического алгоритма управления сложным динамическим объектом при наличии запаздывания как в системе управления, так и в самом многосвязном объекте управления.

Пример 3.7. Решим задачу оценки влияния чистого запаздывания в прямом контуре управления каждой сепаратной подсистемой на качество функционирования МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором в целом. Структурная схема исследуемой МСАУ представлена на рисунке 3.22, где т – величина чистого запаздывания, *p* – оператор дифференцирования.



Рисунок 3.22 – Структурная схема исследуемой МСАУ СТО с логическим регулятором при наличии запаздывания в прямом контуре управления

Графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ СТО без логических регуляторов при наличии элемента чистого

запаздывания $e^{-s\tau}$ величиной $\tau = 0,7$ сек. в прямом контуре управления каждой сепаратной подсистемы представлены на рисунке 3.23.



Рисунок 3.23 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО без логического алгоритма при наличии запаздывания в прямом контуре управления

Введение запаздывания в прямой контур управления приводит к выработке управляющего сигнала U(t), не соответствующего текущему состоянию многосвязного объекта управления, что приводит к значительному ухудшению качества функционирования МСАУ в целом.

Очевидно, что наличие форсирующего линейного регулятора недостаточно для компенсации влияния запаздывания в прямом контуре управления каждой сепаратной подсистемы. Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО при наличии элемента чистого запаздывания $e^{-s\tau}$ величиной $\tau = 0,7$ сек. в прямом контуре управления каждой сепаратной подсистемы в таблице 3.12.

Таблица 3.12

| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------|------|------|------|
| Время регулирования, сек. | 9,35 | 9 | 9,77 |
| Перерегулирование, % | 11.8 | 14,1 | 6,33 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при наличии запаздывания в прямом контуре управления

Графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ СТО с предложенным логическим регулятором при наличии элемента

чистого запаздывания $e^{-s\tau}$ величиной $\tau = 0,7$ сек. в прямом контуре управления каждой сепаратной подсистемы представлены на рисунке 3.24.



Рисунок 3.24 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой MCAУ СТО с логическим алгоритмом при наличии запаздывания в прямом контуре управления

Предложенный двойной логический алгоритм значительно более эффективно компенсирует влияние запаздывания в прямом контуре управления за счет формирования корректирующей ошибки на основе прогноза изменения ошибки управления. Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО при наличии элемента чистого запаздывания $e^{-s\tau}$ величиной $\tau = 0.7$ сек. в прямом контуре управления каждой сепаратной подсистемы представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13

| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------|------|------|------|
| Время регулирования, сек. | 10,1 | 10,3 | 10,6 |
| Перерегулирование, % | 0,3 | 0 | 0 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при наличии запаздывания в прямом контуре управления

Применение предложенного двойного логического алгоритма не позволяет исключить колебания переходного процесса, так как прогнозируемая ошибка формируется на основе анализа динамики системы, не соответствующей текущему состоянию из-за влияния запаздывания.

Пример 3.8. Решим задачу оценки влияния чистого запаздывания в обратной связи каждой сепаратной подсистемы, вызванного характеристикой
информационно-измерительного элемента (датчика), на качество функционирования МСАУ СТО с предложенным логическим регулятором в целом. Структурная схема исследуемой МСАУ представлена на рисунке 3.25, где τ – величина чистого запаздывания, *p* – оператор дифференцирования.



Рисунок 3.25 – Структурная схема исследуемой МСАУ СТО с двойным логическим регулятором при наличии запаздывания в обратной связи сепаратной подсистемы

Графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ СТО без логических регуляторов при наличии элемента чистого запаздывания $e^{-s\tau}$ величиной $\tau = 0,5$ сек. в обратной связи каждой сепаратной подсистемы представлены на рисунке 3.26.



Рисунок 3.26 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО без логического алгоритма при наличии запаздывания в обратной связи

Введение запаздывания в обратную связь приводит к выработке сигнала ошибки управления $\varepsilon(t)$, не соответствующей текущему состоянию многосвязного объекта управления, что приводит к выработке неверного сигнала управления линейным регулятором для каждой сепаратной подсистемы, вследствие чего

ухудшается качество управления МСАУ в целом. Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО при наличии элемента чистого запаздывания $e^{-s\tau}$ величиной $\tau = 0,5$ сек. в обратной связи каждой сепаратной подсистемы представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при наличии запаздывания в обратной связи

| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------|-----|-----|-----|
| Время регулирования, сек. | 8,2 | 8 | 8,7 |
| Перерегулирование, % | 4 | 5,2 | 0 |

Графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ СТО с логическим регулятором при наличии элемента чистого запаздывания $e^{-s\tau}$ величиной $\tau = 0,5$ сек. в обратной связи каждой сепаратной подсистемы представлены на рисунке 3.27.



Рисунок 3.27 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой MCAУ СТО с двойным логическим алгоритмом при наличии запаздывания в обратной связи

Значения показателей качества функционирования исследуемой МСАУ СТО при наличии элемента чистого запаздывания $e^{-s\tau}$ величиной $\tau = 0,5$ сек. в обратной связи каждой сепаратной подсистемы представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при наличии запаздывания в обратной связи

| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------|-----|------|-----|
| Время регулирования, сек. | 6,7 | 10,3 | 9,7 |
| Перерегулирование, % | 0 | 0 | 0 |

Предложенный двухканальный логический регулятор не может полностью компенсировать влияние чистого запаздывания в обратной связи из-за неверной оценки текущего состояния и динамики движения многосвязного объекта, что приводит к появлению ошибок управления собственной сепаратной подсистемой, вследствие чего появляются колебания движения каждой сепаратной подсистемы вблизи положения равновесия.

По результатам имитационного моделирования можно сделать вывод, что наличие запаздывания в системе управления существенно влияет на качество работы предложенного логического управления – в исследуемой МСАУ СТО с предложенным двухканальным логическим регулятором заметно уменьшается перерегулирование при сохранении медленно затухающих колебаний динамики движения всех сепаратных подсистем вблизи положения равновесия. В контексте рассмотренных примеров предложенный двойной логический алгоритм управления сохраняет приемлемое качество управления при наличии чистого запаздывания $e^{-s\tau}$ как в прямом контуре управления (величиной $\tau = 0,7$ сек.) и в обратной связи (величиной $\tau = 0,5$ сек.).

3.4. Анализ эффективности логического управления в режиме стабилизации

Задача управления многосвязным объектом при действии возмущений является достаточно сложной. Наличие возмущающего сигнала даже в отдельной сепаратной подсистеме нарушает функциональную связь между управляющим воздействием и управляемой координатой в многосвязном объекте, что приводит к значительному ухудшению качества функционирования МСАУ в целом. На рисунке 3.28 представлена структурная схема исследуемой МСАУ СТО с возмущением в прямом контуре управления.

Рассмотрим задачу анализа эффективности предложенного двойного логического алгоритма управления сложным динамическим объектом при действии ступенчатого $f_1(t)$ и импульсного возмущений $f_2(t)$ (представленных на

111

рисунке 3.29) как на отдельную сепаратную подсистемы, так и на весь многосвязный объект в целом.



Рисунок 3.28 – Структурная схема исследуемой МСАУ СТО с возмущением в прямом контуре управления



Рисунок 3.29 – Графики исследуемых видов возмущающих воздействий

Пример 3.9. Решим задачу оценки эффективности предложенного двойного логического алгоритма управления при действии возмущения на отдельную сепаратную подсистему в составе многосвязного объекта управления. Графики переходных процессов выходной координаты $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой МСАУ СТО без логических регуляторов при действии ступенчатого $f_1(t)$ и импульсного $f_2(t)$ возмущения на первую сепаратную подсистему представлены на рисунке 3.30.



Рисунок 3.30 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО без логического алгоритма при действии на отдельную сепаратную подсистему: а – ступенчатого возмущения *f*₁(*t*), б – импульсного возмущения *f*₂(*t*)

Видно, что в исследуемой МСАУ СТО без логических регуляторов наблюдается существенное отклонение управляемой величины от положения равновесия как в сепаратной подсистеме с возмущающим воздействием, так и в остальных сепаратных подсистемах за счет распространения влияния возмущения на все остальные сепаратные подсистемы через перекрестные связи, что приводит к существенному ухудшению качества управления многосвязным объектом. Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО представлены в таблице 3.16.

Таблица 3.16

| Показатель качества | Ступенчатое возмущение $f_1(t)$ | | | Импульс | ное возмущ | ение $f_2(t)$ |
|-------------------------|---------------------------------|------|------|---------|------------|---------------|
| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Время компенсации, сек. | 17,3 | 21,3 | 19,9 | 12,3 | 7,8 | 7,9 |
| Отклонение, % | 90,8 | 47,8 | 37,5 | 70,1 | 43,4 | 32,5 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при возмущении в отдельной подсистеме

Линейному регулятору требуется значительное время для компенсации возмущения по всем сепаратным подсистемам, вызванного изменением первой управляемой координаты. Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО с логическим регулятором при действии

ступенчатого $f_1(t)$ и импульсного $f_2(t)$ возмущения на первую сепаратную подсистему представлены на рисунке 3.31.



Рисунок 3.31 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой MCAУ СТО с логическим алгоритмом при действии на отдельную сепаратную подсистему: а – ступенчатого возмущения *f*₁(*t*), б – импульсного возмущения *f*₂(*t*)

Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО представлены в таблице 3.17.

Таблица 3.17

| Показатель качества | Ступенчатое возмущение $f_1(t)$ | | Импульс | ное возмущ | ение $f_2(t)$ | |
|-------------------------|---------------------------------|------|---------|------------|---------------|------|
| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Время компенсации, сек. | 16,8 | 18,4 | 16 | 12,4 | 7,7 | 7,8 |
| Отклонение, % | 57,7 | 22,4 | 18,2 | 43,4 | 22,3 | 17,6 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при возмущении в отдельной подсистеме

Предложенный логический регулятор за счет анализа текущего состояния собственной сепаратной с учетом динамики её движения частично компенсирует влияние возмущения на отдельную сепаратную подсистему: существенно уменьшается отклонение управляемой величины от положения равновесия в исследуемой МСАУ, однако время полной компенсации не изменяется.

Пример 3.10. Решим задачу оценки эффективности предложенного двойного логического алгоритма управления при действии возмущения на все три сепаратные подсистемы в составе многосвязного объекта управления. Графики переходных процессов выходной координаты $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой МСАУ СТО без

логических регуляторов при действии ступенчатого $f_1(t)$ и импульсного $f_2(t)$ возмущения на первую сепаратную подсистему представлены на рисунке 3.32.



Рисунок 3.32 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО без логического алгоритма при действии на все сепаратные подсистемы: а – ступенчатого возмущения *f*₁(*t*), б – импульсного возмущения *f*₂(*t*)

Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО представлены в таблице 3.18.

Таблица 3.18

| Показатель качества | Ступенчатое возмущение $f_1(t)$ | | | Импульс | ное возмущ | ение $f_2(t)$ |
|-------------------------|---------------------------------|-------|------|---------|------------|---------------|
| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Время компенсации, сек. | 15,5 | 14,2 | 14 | 12,5 | 12,3 | 11,7 |
| Отклонение, % | 100 | 114,3 | 83,7 | 77,4 | 93,6 | 64,1 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при возмущении во всех подсистемах

Видно, что в исследуемой МСАУ СТО без логических регуляторов наблюдается существенное отклонение управляемой величины от положения равновесия в каждой сепаратной подсистеме, так как действия возмущений интегрируются между собой из-за перекрестных связей, и линейный регулятор не может их компенсировать, что приводит к существенному ухудшению качества управления многосвязным объектом в целом. Графики переходных процессов выходной координаты $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой МСАУ СТО с логическим регулятором при действии ступенчатого $f_1(t)$ и импульсного $f_2(t)$ возмущения на все три сепаратные подсистемы представлены на рисунке 3.33.



Рисунок 3.33 – Графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой MCAУ СТО с логическим алгоритмом при действии на отдельную сепаратную подсистему: а – ступенчатого возмущения *f*₁(*t*), б – импульсного возмущения *f*₂(*t*)

Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ СТО представлены в таблице 3.19.

Таблица 3.19

| Показатель качества | Ступенчатое возмущение $f_1(t)$ | | | Импульс | ное возмущ | ение $f_2(t)$ |
|-------------------------|---------------------------------|------|------|---------|------------|---------------|
| Сепаратная подсистема | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Время компенсации, сек. | 16,1 | 14,6 | 13,8 | 11,3 | 12,8 | 11,4 |
| Отклонение, % | 61,2 | 62,3 | 53,2 | 49,9 | 52,2 | 44,2 |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при возмущении во всех подсистемах

Предложенный формирования логический регулятор 3a счет дополнительных связей между сепаратными подсистемами частично компенсирует влияние возмущения на многосвязный объект в целом, что приводит к существенному уменьшению как отклонения управляемой величины от положения равновесия, так и времени полной компенсации в исследуемой МСАУ.

Пример 3.11. Решим задачу анализа эффективности предложенного двойного логического алгоритма управления сложным динамическим объектом при воздействии случайного возмущающего сигнала на одну сепаратную подсистему. Воздействие помех приводит к неверной оценке логическим алгоритмом текущего характера движения многосвязного объекта управления,

вследствие чего формируется неправильный сигнал логического управления, приводящий к нарушению функционирования МСАУ СТО в целом. Источником помех могут служить различные датчики и преобразователи. Структура исследуемой МСАУ СТО представлена на рисунке 3.34.



Рисунок 3.34 – Структура исследуемой МСАУ СТО со случайными возмущениями

Возмущающее воздействие формировалось датчиком псевдослучайных величин с нормальным алгоритмом распределения, математическим ожиданием $\mu = 0$ и дисперсией $\sigma^2 = 0,1$. В качестве формирующего фильтра использовалось апериодическое звено первого порядка:

$$F_{\Phi OPM}(s) = \frac{1}{s+1}.$$

Для оценки качества логического управления при воздействии случайных помех воспользуемся следующей интегральной оценкой:

$$I = \sum_{i=1}^{n=3} \int \varepsilon_i^2(t) dt,$$

где $\varepsilon_i(t)$ – ошибка управления в *i*-й сепаратной подсистеме.



Рисунок 3.35 – Графики изменения возмущающего случайного сигнала $f_{\text{BO3M}}(t)$ (a) и выходной координаты $\mathbf{Y}(t)$: б – без логического регулятора, в – с логическим регулятором

На рисунке 3.35 представлены графики изменения возмущающего случайного сигнала $f_{BO3M}(t)$ и выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ СТО, а на рисунке 3.36 – график изменения интегральной ошибки *I*.



Рисунок 3.36 – График изменения интегральной ошибки І

По результатам моделирования видно, что в МСАУ СТО с логическим регулятором качество управления при воздействии случайных помех значительно уменьшилось из-за воздействия помех на динамику изменения выходной координаты. Вследствие этого логический регулятор неверно оценивает текущий характер движения системы, что приводит к ошибочным переключениям логического алгоритма, что видно на рисунке 3.37.



Рисунок 3.37 – График изменения скорректированной ошибки управления ε₁*(*t*) в первой сепаратной подсистеме при действии случайных помех

Для устранения эффекта ложного срабатывания предложенного логического регулятора и повышения помехоустойчивости МСАУ СТО при появлении высокочастотных составляющих на вход логических регуляторов в составе соответствующей сепаратной подситемы могут дополнительно включаться фильтры $F_i(s)$ с постоянной времени T_{Φ} и постоянной форсирования τ_{Φ} , $T_{\Phi} > \tau_{\Phi}$:

$$F_i(s) = \frac{\tau_{\varPhi} s + 1}{T_{\varPhi} s + 1},$$

а на выходе – компенсирующее звено $F_{0i}(s)$:

$$F_{0i}(s) = \frac{1}{F_i(s)}.$$

Оценим влияние фильтров на качество логического управления при действии случайных помех. В качестве фильтра $F_i(s)$ на входе логического регулятора в каждой *i*-й сепаратной подсистеме рассмотрим звено с постоянной времени T_{Φ} и постоянной форсирования τ_{Φ} (3.10).

На рисунке 3.38 представлены графики изменения скорректированной ошибки управления $\varepsilon_1^*(t)$ в первой сепаратной подсистеме при фиксированной τ_{Φ} ($\tau_{\Phi} = 0,05$ сек.) и различных значениях постоянной времени T_{Φ} , а на рисунке 3.39 – графики изменения выходной координаты **Y**(*t*).



Рисунок 3.38 – Графики изменения скорректированной ошибки управления $\varepsilon_1^*(t)$: a – при $T_{\Phi} = 0,1$ сек., б – при $T_{\Phi} = 0,8$ сек.





На рисунке 3.40 приведён график изменения интегральной ошибки при различных значениях постоянной времени *T*_Ф.



Рисунок 3.40 – График изменения интегральной ошибки I при различных T_{Φ}

По результатам моделирования можно сделать вывод об эффективности сглаживающих фильтров при действии случайных возмущений. При малых значениях T_{Φ} фильтрация сигналов незначительная и не позволяет устранить ложные срабатывания логического алгоритма. При повышении значения T_{Φ} фильтрация позволяет устранить большинство ложных срабатываний, что приводит к повышению качества управления. Однако дальнейшее увеличение постоянной времени T_{Φ} приводит к излишней фильтрации и снижению качества управления. Таким образом, при соответствующем подборе параметров сглаживающих фильтров можно существенно уменьшить влияние случайных возмущений на качество логического управления.

По результатам имитационного моделирования установлено, что предложенный двойной логический алгоритм управления, за счет анализа движения всех сепаратных подсистем с учетом влияния перекрестных связей, позволяет более эффективно компенсировать влияние возмущений как на отдельную сепаратную подсистему, так и на весь комплекс подсистем.

Выводы по третьей главе

1. Проведен синтез МСАУ СТО с предложенным двойным логическим алгоритмом управления на расчетном режиме. Для каждой сепаратной подсистемы в составе многосвязного объекта управления рассчитаны параметры логического регулятора из условия обеспечения требуемого качества управления многосвязным объектом.

2. Проведен анализ эффективности МСАУ СТО с предложенным двойным логическим алгоритмом управления при параметрических изменениях как в сепаратных подсистемах, так и в перекрестных связях многосвязного объекта. По результатам анализа было установлено, что предложенный двойной логический алгоритм управления совместно с линейным регулятором позволяет существенно улучшить качество управления МСАУ СТО при изменении отдельных параметров как сепаратных подсистем (при возрастании постоянной времени T_{OY} объекта управления в два раза, при уменьшении коэффициента демпфирования ξ_{OY} объекта управления в три раза, при возрастании

коэффициента передачи $K_{\rm UM}$ исполнительного механизма в четыре раза), так и перекрестных связей (при изменении характера и силы системных коэффициентов H_2 и H_3 , описывающих перекрестные связи между группой подсистем). Также предложенный логический регулятор обеспечивает сохранение устойчивости всей МСАУ СТО при комплексном изменении параметров многосвязного объекта управления.

3. Проведен анализ эффективности МСАУ СТО с предложенным двойным логическим алгоритмом управления при наличии чистого запаздывания как в контуре обратной связи, так и в самом многосвязном объекте. По результатам анализа установлено, что предложенный логический регулятор позволяет значительно снизить влияние чистого запаздывания на качество функционирования МСАУ за счет формирования опережающего сигнала управления.

4. Проведен анализ эффективности МСАУ СТО с предложенным двойным логическим алгоритмом управления при действии возмущений как на отдельную сепаратную подсистему, так и на многосвязный объект управления в целом. По результатам анализа установлено, что предложенный логический регулятор, за счет создания логических коалиционных связей, позволяет значительно более эффективно компенсировать влияние возмущения и стабилизировать многосвязный объект управления.

Научная новизна результатов оценки эффективности МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом управления заключается в подтверждении эффективности использования предложенного логического алгоритма управления в составе МСАУ СТО при параметрических изменениях, наличии чистого запаздывания и действии различных возмущений методом имитационного моделирования.

122

Глава 4. Исследование эффективности МСАУ авиационным ГТД с двойным логическим алгоритмом управления

4.1. Инженерная методика и программное обеспечение для проектирования МСАУ ГТД с двойным логическим алгоритмом управления

Задача управления сложными многосвязными объектами на различных рабочих режимах с учетом всех их свойств и особенностей представляется чрезвычайно сложной, а в современной литературе не существует универсальной (с инженерной и математической точек зрения) единой методики проектирования МСАУ с логическими алгоритмами управления.

С целью решения данной задачи предлагается инженерная методика, предназначенная для повышения качества управления гомогенными сложными техническими объектами (СТО). В её основу положены как идеи системного подхода к исследованию многосвязных систем, позволяющие осуществить декомпозицию сложной многосвязной системы на сепаратные подсистемы и элементы связи между ним, так и разработанный двойной логический алгоритм управления, представленный в главе 2. Структурная схема предлагаемой методики представлена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Структурная схема инженерной методики

Методика позволяет провести синтез логических регуляторов для сепаратных подсистем МСАУ СТО с целью обеспечения требуемого качества управления. Методика также позволяет использовать экспериментально снятые характеристики отдельных элементов системы, что повышает достоверность и точность результатов исследования.

Методика пригодна для синтеза логических многосвязных систем управления такими сложными техническими объектами как электроэнергетические комплексы, состоящие из большого числа параллельно генераторов работающих однотипных электрической энергии, системы турбовинтовых двигателей; синхронизации ВИНТОВ авиационных многодвигательные силовые установки летательных аппаратов и др.

Допущением инженерной методики является то, что в проектируемой МСАУ все сепаратные подсистемы движутся к единой точке в одном направлении и связаны только через естественные перекрестные связи внутри объекта управления.

Предлагаемая инженерная методика состоит из нескольких этапов. Рассмотрим выделенные этапы более подробно.

Этап 1. Построить математическую модель сложного технического объекта как многосвязного объекта управления. Данная задача решается на основе системного подхода к описанию многосвязного объекта управления рассчитать индивидуальные характеристики сепаратных подсистем $\Phi_i(s)$ и многомерные элементы связи между ними $H_K(s)$ [32].

Многосвязные системы автоматического управления (рисунок 4.2), в которых все связи между подсистемами осуществляются через многомерный объект, описываются следующими уравнениями движения:

$$\begin{cases} \mathbf{Y}(t) = \mathbf{W}_{OV}(p) [\mathbf{U}(t) + \mathbf{F}(t)], \\ \mathbf{U}(t) = \mathbf{W}_{PE\Gamma}(p) [\mathbf{G}(t) - \mathbf{Y}(t)]. \end{cases}$$

где $\mathbf{G}(t)$, $\mathbf{Y}(t)$, $\mathbf{U}(t)$, $\mathbf{F}(t)$ – вектор задающей, управляемой управляющей и возмущающей координаты, $\varepsilon(t)$ – вектор собственной ошибки управления.



Рисунок 4.2 – Структурная схема МСАУ СТО

124

В качестве индивидуальной характеристики $\Phi_i(s)$ сепаратной подсистемы используется такая характеристика диагонального элемента многосвязного объекта управления, которая бы полностью отражала изучаемые свойства данного элемента МСАУ. Примером такой характеристики может служить передаточная функция сепаратной подсистемы в режиме управления:

$$\Phi_i(s) == \frac{Y_i(s)}{G_i(s)} = \frac{W_{PE\Gamma ii}(s)W_{OVii}(s)}{1 + W_{PE\Gamma ii}(s)W_{OVii}(s)}, \quad i = 1, ..., n,$$
(4.1)

где для каждой *i*-й сепаратной подсистемы справедливо $W_{\text{PEF}ii}(s)$ – передаточная функция линейного регулятора, $W_{\text{OY}ii}(s)$ – передаточная функция объекта управления.

В качестве характеристики связи используются характеристики недиагональных элементов многосвязного объекта управления, так как они выражают действие перекрестных связей в многомерном объекте относительно действия прямых связей в нём. Характеристика связи описывается следующим уравнением:

$$h_k(s) = \frac{\det[W_{OVij}(s)\gamma_{ij}]_{k \times k}}{\det[W_{OVii}(s)\delta_{ii}]_{k \times k}}, \quad k = \overline{2, n},$$
(4.2)

где $W_{ij}(s)$ – передаточные функции элементов матрицы многосвязного объекта управления, γ_{ij} , δ_{ij} – дискретная функция. Так как предлагаемая инженерная методика разрабатывается для гомогенных МСАУ, то целесообразно использовать обобщенную характеристику многосвязного элемента связи [5]:

$$H_{K}(s) = \sum_{i_{1},...,i_{K}=1}^{\binom{n}{K}} h_{i_{1},...,i_{K}}(s), \qquad (4.3)$$

где $\binom{n}{K}$ – число сочетаний из *n* по *K* элементов.

Данный подход к системному описанию многосвязного объекта управления позволяет анализировать многосвязные системы любой размерности, наглядно показывает влияние сепаратных подсистем и перекрестных связей между ними на устойчивость и качество функционирования, что позволяет в полной мере учесть структурные особенности СТО.

Этап 2. Провести синтез многомерного линейного регулятора $W_{\text{PEF}ii}(s)$ в составе МСАУ СТО на расчетной точке. Синтез многомерного линейного регулятора $W_{\text{PEF}ii}(s)$ в составе каждой *i*-й сепаратной подсистемы $\Phi_i(s)$ МСАУ СТО из условия обеспечения требуемого качества управления на расчетной точке.

Этап 2.1. Рассчитать основной линейный регулятор $W_{\text{РЕГ}ii}(s)$ для каждой *i*-й сепаратной подсистемы в составе МСАУ СТО. Данная задача решается классическим способом, например из условия приближения исходной передаточной функции $\Phi_i(s)$ *i*-й сепаратной подсистемы к желаемой передаточной функции $\Phi_{i}(s)$ [10] с учетом её физической реализуемости:

$$\Phi_{\mathcal{K}i}(s) = \Phi_i(s), \quad i = 1, \dots, n.$$

$$(4.4)$$

Из равенства (4.4) определяются передаточная функция линейного регулятора, обеспечивающего требуемое качество управления автономной *i*-й сепаратной подсистемой.

Этап 2.2. Модифицировать коэффициент усиления линейного регулятора $R_i(s)$ в составе каждой *i*-й сепаратной подсистемы для обеспечения заданного быстродействия многосвязного объекта управления с учетом влияния перекрестных связей путем решения следующего матричного уравнения, описывающего коэффициенты передачи МСАУ СТО в статическом режиме $(s \rightarrow 0)$:

$$\mathbf{W}_{PE\Gamma}\mathbf{W}_{OV}\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{K}_{VCHI}, \tag{4.5}$$

где $\mathbf{W}_{OV}(n \times n)$ – коэффициенты передачи многосвязного объекта управления, $\mathbf{W}_{PE\Gamma}(n \times n)$ – коэффициенты передачи многомерного регулятора, $\gamma(1 \times n)$ – корректирующие коэффициенты передачи, $\mathbf{K}_{VCUT}(1 \times n)$ – желаемые коэффициенты передачи по сепаратным подсистемам МСАУ СТО.

Значение вектора **К**_{УСИЛ} необходимо выбрать исходя из требуемого быстродействия многосвязного объекта управления в расчетной точке с учетом влияния связей. Тогда вектор корректирующих коэффициентов усиления линейного регулятора вычисляется по уравнению:

(. .

$$\gamma = \left(\mathbf{W}_{PE\Gamma} \mathbf{W}_{OV}\right)^{-1} \mathbf{K}_{\text{УСИЛ}}.$$
(4.6)

Тогда модифицированный линейный регулятор $W_{PE\Gamma}^{*}(s)$ для каждой *i*-й сепаратной подсистемы описывается следующей передаточной функцией:

$$W_{PE\Gamma_{i}} * (s) = \gamma_{1i} W_{PE\Gamma_{i}}(s) = \frac{\gamma_{1i} \Phi_{\mathcal{K}i}(s)}{[1 - \Phi_{\mathcal{K}i}(s)]} W_{OVii}(s), \quad i = 1, ..., n.$$
(4.7)

Этап 2.3. Определить запасы устойчивости в МСАУ СТО с синтезированными линейными регуляторами. Для этого, по найденным обобщенным характеристикам связи $H_K(s)$, определяется характеристическое уравнение связи для исследуемой МСАУ относительно некоторой переменной x [32]. Для упрощения описания $H_K(s)$ рассматривается в статическом режиме:

$$1 + \sum_{K=2}^{n} H_{K} x^{K} = 0.$$
(4.8)

Решение данного уравнения определит множество точек на комплексной плоскости, которые не должны быть охвачены АФЧХ индивидуальной характеристикой $\Phi_i(j\omega)$ *i*-й сепаратной подсистемы. При этом возможно определить запасы устойчивости МСАУ в целом по методикам, предложенным в работе [27].

По результатам 2-го этапа завершается синтез линейных регуляторов для сепаратных подсистем в составе исследуемой МСАУ СТО. ■

Этап 3. Провести синтез логического корректора для каждой *i*-й сепаратной подсистемы в составе МСАУ СТО с целью обеспечения заданного качества управления на нерасчетных режимах. Так как на динамику движения многосвязного объекта управления влияет множество факторов, взаимосвязь которых с параметрами T_{Λ} , K_{Λ} и α_{Λ} логического корректора достаточно сложно определить, то в инженерной методике предлагаются инженерные рекомендации по определению их значений.

Этап 3.1. Подобрать значения параметров *T*_л и *K*_л корректирующего логического алгоритма управления для каждой сепаратной подсистемой.

• Параметр *T*_л выбрать из условия компенсации инерционности многосвязного объекта управления на различных режимах работы без учета

коэффициента передачи системы. Для этого требуется, с учетом астатичности исследуемой сепаратной подсистемы, на основе разомкнутой передаточной функции *i*-й сепаратной подсистемы, учитывающей параметр $T_{\rm A}$,

$$W_{i}(s) = (T_{\mathcal{I}i}s + 1)W_{PE\Gamma ii}(s)W_{OVii}(s) = \frac{1 + \sum_{k=1}^{m} b_{k}s^{k}}{\left(1 + \sum_{r=1}^{n} c_{r}s^{r}\right)s}, \quad i = 1, \dots, n$$

рассчитать для требуемого режима работы усредненную постоянную времени T_{Σ} и усредненную постоянную времени форсирования τ_{Σ} , позволяющих приблизительно оценить значение соответствующих величин каждой сепаратной подсистемы:

$$T_{i\Sigma} = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^{n} c_r, \quad i = 1,...,n.$$

$$\tau_{i\Sigma} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m} b_k, \quad i = 1,...,n$$

Тогда значение параметра T_{Π} выбирается из условия:

$$\tau_{i\Sigma} = \beta T_{i\Sigma}, \quad i = 1, \dots, n,$$

где β – коэффициент, характеризующий интенсивность компенсации инерционности объекта управления при изменении его постоянных времени.

При возрастании значения параметра T_{π} (возрастании коэффициента β) уменьшается перерегулирование переходного процесса в собственной сепаратной подсистеме. Однако слишком большое значение данного параметра (и коэффициента соответственно) приводит к излишнему замедлению динамики движения.

• Параметр K_{Λ} выбрать из условия обеспечения требуемого быстродействия МСАУ СТО с логическими регуляторами на различных режимах работы. В качестве первоначального значения рекомендуется параметр K_{Λ} выбрать из условия обеспечения заданного качества регулирования *i*-й сепаратной подсистемы в составе МСАУ СТО, с учетом рассчитанного значения T_{Λ} :

$$L_{i}(s) = \frac{K_{\mathcal{J}i}\left(\frac{T_{\mathcal{J}i}}{K_{\mathcal{J}i}}s+1\right)W_{PE\Gamma ii}(s)W_{OVii}(s)}{1+K_{\mathcal{J}i}\left(\frac{T_{\mathcal{J}i}}{K_{\mathcal{J}i}}s+1\right)W_{PE\Gamma ii}(s)W_{OVii}(s)}, \quad i=1,\dots,n.$$

С возрастанием значения параметра K_{Λ} собственная сепаратная подсистема начинает более быстро компенсировать отклонения от положения равновесия. Однако при слишком большом значении данного параметра K_{Λ} появляются колебания переходного процесса.

Этап 3.2. Подобрать значение параметра *α*_л координирующего логического алгоритма управления сепаратной подсистемой.

• Параметр α_л выбрать из условия компенсации влияния перекрестных связей на динамику движения собственной сепаратной подсистемы.

В качестве первоначального значения рекомендуется параметр $\alpha_{Лi}$ для *i*-й сепаратной подсистемы выбрать исходя из анализа характеристики элемента связи h(s) *i*-й сепаратной подсистемы с группой остальных сепаратных подсистем. С возрастанием значения параметра $\alpha_{Л}$ качество управления многосвязным объектом повышается за счет более «сильной» координации всех сепаратных подсистем. Однако слишком большое значение данного параметра $\alpha_{Л}$ приводит к существенному замедлению динамики движения многосвязного объекта в целом.

В качестве дополнительного линейного регулятора R_i(s) для каждой *i*-й сепаратной подсистемы рекомендуется использовать последовательное соединение интегрального звена и фильтра $F_i(s)$ с постоянной времени, выбранной ИЗ учета компенсации ШУМОВ И выбросов, вызванных дифференцирующим звеном в составе логического корректора, вырабатывающего координирующий сигнал:

$$R_i(s) = \frac{1}{s} F_i(s), \quad i = 1, ..., n.$$

По результатам этапа 3 завершается синтез логического корректора в составе двухканального логического регулятора для каждой сепаратной подсистемы исследуемой МСАУ СТО.

Этап 4. Проведение имитационного моделирования полученной МСАУ СТО с логическим регулятором с целью проверки обеспечения заданного качества функционирования. В случае если качество управления не соответствует требуемому, то повторяется этап 3, а в случае необходимости – этап 2.

Таким образом, предложенная инженерная методика позволяет обоснованно решать задачи по проектированию МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом управления с учетом обеспечения заданных требований к качеству управления МСАУ СТО.

На всех этапах разработки САУ как сложными техническими объектами, так и ГТД важное место занимает моделирование и параметрическая оптимизация разработанной системы управления средствами ЭВМ. Такой подход позволяет существенно уменьшить затраты времени на подготовку и решение задач, повысить эффективность исследования и оперативно решать проблемы, возникающие в процессе создания и эксплуатации двигателя.

Современная вычислительная техника предоставляет возможность автоматизировать процесс анализа и синтеза МСАУ СТО с двойными логическими алгоритмами управления, что позволит существенно снизить трудоемкость исследования данного класса систем, а результаты представлять в удобном виде для инженера-проектировщика.

Разработка программного обеспечения, реализующего предложенную инженерную методику синтеза МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором, проводится в пакете прикладных программ *Matlab*. Данный пакет представляет собой вычислительную среду, позволяющую от начала и до конца решать технические задачи любой сложности [5, 20, 113]. В качестве прототипа используются программное обеспечение, описанное в свидетельствах о регистрации программы [77-80].

Разработанное программное обеспечение представляет собой несколько взаимосвязанных и взаимодействующих блоков, состоящих из программных модулей и выполняющих определенные функциональные операции в процессе проектирования МСАУ СТО. Общая структурная схема разработанного программного обеспечения представлена на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Структурная схема разработанного программного обеспечения

Главная экранная форма программного обеспечения представлена на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Главная экранная форма программного обеспечения

Рассмотрим назначение выделенных программных блоков, входящих в состав программного обеспечения.

– Блок анализа математической модели сложного динамического объекта. Данный блок предоставляет возможность провести декомпозицию математической модели многосвязного объекта управления на основе системного описания с помощью индивидуальных характеристик сепаратных подсистем и многомерного элемента связи между ними.

Блок синтеза логического регулятора для каждой сепаратной подсистемы. Данный блок предоставляет возможность провести расчет линейного регулятора из параметров многомерного учета обеспечения требуемого запаса устойчивости по фазе и по амплитуде (на примере изодромного звена). Также данный блок предоставляет возможность провести расчет параметров логического корректора из учета обеспечения заданного качества управления каждой сепаратной подсистемой в составе МСАУ СТО.

 Блок анализа многосвязной системы автоматического управления.
 Данный блок предоставляет возможность определить запасы устойчивости и значения показателей качества управления в синтезированной МСАУ СТО.

Таким образом, разработанное программное обеспечение предоставляет следующие функциональные возможности:

 декомпозицию математической модели сложного многосвязного объекта управления;

 синтез логического регулятора в составе МСАУ СТО, обеспечивающего требуемое качество управления с учетом влияния многомерного элемента связи;

определение запасов устойчивости синтезированной МСАУ СТО;

 моделирования процесса функционирования МСАУ СТО с логическим регулятором;

 анализ влияния изменения параметрических характеристик многосвязного объекта управления на качество функционирования МСАУ СТО с логическим регулятором; анализ влияния чистого запаздывания на качество функционирования
 МСАУ СТО с логическим регулятором;

 анализ влияния возмущений на качество функционирования МСАУ СТО с логическим регулятором.

Программное обеспечение обладает интуитивно понятным интерфейсом и не требует дополнительного обучения пользователя для работы с ним. Использование разработанного программного обеспечения удобно для инженера-проектировщика, так как автоматизирует логически понятный ему процесс, что приводит к сокращению времени проектирования МСАУ СТО с логическим регулятором.

4.2. Особенности авиационного ГТД как многомерного объекта управления

Современные перспективные МСАУ авиационным ГТД разрабатываются в классе многосвязных и многофункциональных систем, представляющих собой некоторое множество связанных между собой через газодинамические процессы сепаратных подсистем. Такие системы характеризуются изменением множества выполняемых функций в процессе работы силовой установки (подключение/отключение замкнутых контуров управления как отдельными внутридвигательными параметрами, так и всем комплексом параметров) с целью наиболее эффективного достижения требуемой цели функционирования.

Свойства и особенности авиационного ГТД как многомерного объекта управления рассмотрены как в зарубежных [112, 114, 122, 126], так и в отечественных работах [1, 12, 48, 63, 64, 71, 72,].

Отметим несколько наиболее характерных свойств авиационного ГТД как многомерного объекта управления.

Авиационный ГТД как объект управления является нестационарным – в процессе его функционирования возможны изменения динамических параметров как сепаратных подсистем, так и перекрестных связей, что обуславливается сменой режимов работы или изменениями внешних условий функционирования

[1]. Причинами этого является, прежде всего, изменение параметров p_1^* давления и T_1^* температуры воздуха на входе авиационного ГТД, в меньшей степени влияет изменение режима работы ГТД, изменение характеристик узлов двигателя и так далее [53]. Также следует отметить, что формулы газодинамического подобия определяют однозначно функциональную зависимость коэффициентов ГТД от давления p_1^* и T_1^* температуры заторможенного воздушного потока на входе двигателя лишь в ограниченной области изменения режимов работы и условий полета, для которой выполняются необходимые условия применимости. Когда же эти условия нарушаются, то происходит расслоение рабочей линии динамической характеристики ГТД. Такие параметрические изменения приводят к существенному изменению динамики переходных процессов по всем сепаратным подсистемам, которое не может быть полностью компенсировано линейными регуляторами. Данную особенность также необходимо учитывать при проектировании МСАУ ГТД – синтезируемая система должна не только обеспечивать требуемые запасы устойчивости, но И характеризоваться робастностью и нечувствительностью к малым изменениям или неучтенным параметрам.

Необходимо отметить существенную нелинейность дифференциальных уравнений, описывающих протекание динамических процессов в авиационном ГТД, полностью учесть которую невозможно. Поэтому при исследовании МСАУ ГТД обычно используют его представление в виде системы линеаризованных стационарных дифференциальных уравнений [82], учитывающей наиболее важные для исследования динамические параметры, подчиняющиеся известным соотношениям из теории подобия [18, 53]. Такое представление ГТД позволяет описывать переходные процессы в расчетной точке линеаризации с достаточной степенью точности [63].

Также при проектировании МСАУ авиационным ГТД необходимо учитывать, что её сепаратные подсистемы как в автономном режиме, так и в виде совокупности взаимодействующих между собой сепаратных подсистем (в различном их сочетании) должны удовлетворять заданным требованиям к устойчивости и качеству функционирования. Таким образом, одной из важнейших проблем проектирования МСАУ авиационными ГТД является проблема согласованного управления динамикой движения всей системы в целом. Корректное решение данной проблемы обеспечивает как удовлетворение предъявленных требований к качеству управления, так и наглядную реализацию соответствующих алгоритмов управления.

Описанные выше характерные особенности авиационного ГТД как объекта управления приводят к появлению как параметрической, так и структурной неопределённости, что вызывает серьезные затруднения при синтезе и анализе МСАУ ГТД, поскольку такие изменения существенно влияют как на качество функционирования всей системы в целом, так и на запасы устойчивости в системе, и должны обязательно учитываться при проектировании [59].

Рассмотрим математическую модель авиационного ГТД на примере одновального ТРДФ, структурная схема которого представлена на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Структурная схема одновального ТРДФ

Процесс функционирования исследуемой многосвязной системы описывается на основе следующих функциональных параметров ТРДФ: частота вращения ротора турбокомпрессора (*n*), степень понижения давления на турбине (π_T) и температура газов перед турбиной (*T*₃).

Одновальный ТРДФ как объект управления описывается следующей математической моделью, представленной в виде системы линеаризованных стационарных дифференциальных уравнений [82]:

$$\begin{cases} (T_{\mathcal{A}} p+1)X_{n} = k_{11}X_{G_{T}} + k_{12}X_{F_{C}} - k_{13}X_{G_{T\phi}}, \\ (T_{\mathcal{A}} p+1)X_{\pi T} = k_{21}(\tau_{21} p+1)X_{G_{T}} + k_{22}(\tau_{22} p+1)X_{F_{C}} - k_{23}(\tau_{23} p+1)X_{G_{T\phi}}, \\ (T_{\mathcal{A}} p+1)X_{T3} = k_{31}(\tau_{31} p+1)X_{G_{T}} - k_{32}(\tau_{32} p+1)X_{F_{C}} + k_{33}(\tau_{33} p+1)X_{G_{T\phi}}, \end{cases}$$
(4.9)

где $G_{\rm T}$ – расход топлива в основной камере сгорания, $F_{\rm C}$ – площадь сечения реактивного сопла, $G_{\rm T\Phi}$ – расход топлива в форсажной камере сгорания.

В системе линеаризованных стационарных дифференциальных уравнений (4.9) приняты следующие обозначения: X_i – относительное отклонение рассматриваемой физической координаты от значения на исследуемом режиме, p – оператор дифференцирования, $T_{\rm Д}$ – постоянная времени двигателя, τ_{ij} – постоянные времени форсирования подсистем двигателя, k_{ij} – коэффициенты усиления в прямых и перекрестных связях.

В соответствии с формулами приведения [53, 1, 63] нелинейные зависимости для определения постоянных времени ($T_{\mathcal{I}}$ и τ_{ij}) одновального ТРДФ (4.9) описываются следующими уравнениями:

$$T_{\pi} = T_{\pi \, \text{np}} \, \frac{1,033}{P_1^*} \sqrt{\frac{T_1^*}{288}} \,,$$
$$\tau_{ij} = \tau_{ij \, \text{np}} \, \frac{1.033}{p_1^*} \sqrt{\frac{T_1^*}{288}}, \quad i, j = 2, 3.$$

где p_1^* и T_1^* – соответственно давление и температура воздуха на входе в двигатель [58], а $T_{\text{Д}_{\text{пр}}}$, $\tau_{ij_{\text{пр}}}$ – приведённые значения рассматриваемых коэффициентов, полученные в результате линеаризации динамической характеристики ТРДФ вблизи установившихся режимов для случая $p_1^* = 1,0334$ атм, $T_1^* = 288 \ K$ (параметры атмосферного воздуха на высоте H = 0 км. и температуре $T = 15^\circ$ C).

Значения параметров p_1^* и T_1^* в общем виде определяются в зависимости от высоты H и скорости полета M из следующих соотношений:

$$T_1^* = T_H (1 + 0.2M^2), \quad p_1^* = \sigma_{\rm BX} P_H (1 + 0.2M^2)^{3.5}$$

где T_H – температура воздуха на высоте полёта, P_H – давление воздуха на высоте полёта, М – число Маха, $\sigma_{\text{вх}}$ – коэффициент восстановления полного давления на входе в двигатель [82].

Значение коэффициентов передачи k_{ij} перекрестных связей также в общем виде определяются в нелинейной зависимости от p_1^* и T_1^* (см. таблицу 4.1), где $k_{ij_{np}}$ – приведённое значение рассматриваемого коэффициента, полученное в результате линеаризации динамической характеристики ТРДФ вблизи установившихся режимов для случая $p_1^* = 1,0334$ атм, $T_1^* = 288$ K.

Таблица 4.1.

| i\j | 1 | 2 | 3 |
|-----|--|--|--|
| 1 | $k_{11 \text{ mp}} \frac{1.033}{p_1^*}$ | $k_{12 \text{ mp}} \sqrt{\frac{T_1^*}{288}}$ | $k_{13 \text{ np}} \frac{1.033}{p_1^*}$ |
| 2 | $k_{21\mathrm{np}}\sqrt{\frac{288}{T_1^*}}\frac{1.033}{p_1^*}$ | k _{22 пр} | $k_{23\mathrm{np}}\sqrt{\frac{288}{T_1^*}}\frac{1.033}{p_1^*}$ |
| 3 | $k_{31\text{np}} \ \frac{1,033}{P_1^*} \sqrt{\frac{T_1^*}{288}}$ | $k_{32 \text{ mp}} \frac{T_1^*}{288}$ | $k_{33\mathrm{np}} \ \frac{1,033}{P_1^*} \sqrt{\frac{T_1^*}{288}}$ |

Нелинейные зависимости, описывающие коэффициенты передачи k_{ii}

Таким образом, одновальный ТРДФ (система уравнений (4.9) с учетом описанных выше нелинейных зависимостей) как объект управления описывается следующей матричной передаточной функцией:

$$\mathbf{W}_{TP\Phi\mathcal{I}}(s) = \frac{1}{(T_{\mathcal{I}}s+1)} \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & -K_{13} \\ K_{21}(\tau_{21}s+1) & K_{22}(\tau_{22}s+1) & -K_{23}(\tau_{23}s+1) \\ K_{31}(\tau_{21}s+1) & -K_{32}(\tau_{32}s+1) & K_{33}(\tau_{33}s+1) \end{bmatrix}.$$
(4.10)

Таким образом, согласно [63] численное значение МПФ многосвязного объекта управления с учетом (4.10) в условиях стенда (H = 0 км., V = 0 М) соответствует:

$$\mathbf{W}_{TP\Phi\mathcal{I}}(s) = \frac{1}{0,6s+1} \begin{bmatrix} 0,5 & 0,6 & -0,15\\ 0,25(0,25s+1) & 0,6(0,4s+1) & -0,1(0,35s+1)\\ 0,8(0,38s+1) & -0,68(0,19s+1) & 0,13(0,23s+1) \end{bmatrix}.$$
(4.11)

Полученная математическая модель МСАУ авиационным ГТД, функционирующим в широком диапазоне изменения высот и скоростей полета, позволит провести оценку эффективности предложенного двойного логического алгоритма управления СТО, функционирующим в условиях структурной и параметрической неопределенности.

Систему управления столь сложным техническим объектом с учетом всех его особенностей необходимо проектировать в классе МСАУ. Многосвязная система автоматического управления (МСАУ) авиационным ГТД представляет собой комплекс исполнительных устройств и регулирующих органов, обеспечивающих работу ГТД с необходимыми для полета характеристиками [82]. Возможность получения требуемого качества функционирования авиационного ГТД на различных режимах работы значительно зависит как от выбора программы и алгоритмов управления, так и от их реализации в системе управления [82].

Также уже было отмечено, что авиационный ГТД характеризуется существенными изменениями своих параметров при различных условиях полета: постоянная времени двигателя и его коэффициент передачи могут изменяться в десятки раз. Линейные регуляторы без контура адаптации или соответствующей коррекции не могут обеспечить требуемое качество управления в широком диапазоне функционирования.

Таким образом, необходимо оценить качество многосвязного логического управления авиационным ГТД при различных условиях полета и программах управления.

4.3. Анализ эффективности логического управления ГТД при различных условиях полета

Решим задачу оценки эффективности МСАУ авиационным ГТД, функционирующим в широком диапазоне высот и скоростей полета летательного аппарата, на примере одновального ТРДФ.

Структурная схема исследуемой МСАУ ГТД с двухканальными логическими регуляторами в сепаратных подсистемах представлена на рисунке 4.6.

138



Рисунок 4.6 – Структурная схема исследуемой МСАУ одновальным ГТД

Процесс функционирования исследуемой МСАУ описывается на основе следующих функциональных параметров ГТД: частота вращения ротора турбокомпрессора (*n*), степень понижения давления на турбине (π_T) и температура газов перед турбиной (T_3).

Исследуемый ГТД в условиях стенда (H = 0 км., V = 0 км.) с учетом инерционного исполнительного механизма с постоянной времени $T_{\rm MM} = 0,4$ сек. описывается следующей матричной передаточной функцией:

$$\mathbf{W}_{OV}(s) = \frac{1}{0,24s^2 + s + 1} \begin{bmatrix} 0,5 & 0,6 & -0,15 \\ 0,25(0,25s+1) & 0,6(0,4s+1) & -0,1(0,35s+1) \\ 0,8(0,38s+1) & -0,68(0,19s+1) & 0,13(0,23s+1) \end{bmatrix}.$$
 (4.12)

Для регулируемых координат МСАУ ГТД в условиях стенда (H = 0, M = 0) зададим следующие технические требования: к качеству управления – астатизм v = 1, время регулирования $t_P < 5$ сек., перерегулирование $\sigma = 0$ %; к запасам устойчивости – по амплитуде $\theta_{\text{ТРЕБ}} \ge 2$, по фазе $\phi_{\text{ТРЕБ}} \ge 40^{\circ}$.

Проведем синтез параметров линейной части логического регулятора с учетом обеспечения заданных технических требований. В качестве линейного регулятора рассмотрим последовательное соединение изодромного звена и апериодического звена. Таким образом, линейный многомерный регулятор описывается следующей заданной матричной передаточной функцией $W_{\text{РЕГ}}(s)$:

$$W_{\text{PEF}}(s) = \frac{\tau_{\text{PEF}}s + 1}{(T_{\text{PEF}}s + 1)s} \begin{bmatrix} K_{\text{PEF}1} & 0 & 0\\ 0 & K_{\text{PEF}2} & 0\\ 0 & 0 & K_{\text{PEF}3} \end{bmatrix},$$
(4.13)

где $K_{\text{PE}\Gamma i}$ – коэффициент передачи линейного регулятора для каждой *i*-й сепаратной подсистемы, $\tau_{\text{PE}\Gamma}$ – постоянная форсирования линейного регулятора, $T_{\text{PE}\Gamma}$ – постоянная времени линейного регулятора.

Обобщенные характеристики многосвязного элемента связи (1.2), определяющие характер и силу перекрестной связи между группой сепаратных подсистем, для исследуемой МСАУ ГТД имеют следующие значения:

$$H_{2}(s) = h_{12}(s) + h_{13}(s) + h_{23}(s) = 0,48 \frac{(0,41s^{2} + 1,53s + 1)}{(0,4s + 1)(0,23s + 1)},$$

$$H_{3}(s) = -0,58 \frac{(0,23s^{2} + 1,06s + 1)}{(0,4s + 1)(0,23s + 1)},$$
(4.14)

где

$$h_{12}(s) = -0.5 \frac{(0.25s+1)}{(0.4s+1)}, h_{13}(s) = 1.85 \frac{(0.38s+1)}{(0.23s+1)},$$

$$h_{23}(s) = -0.87 \frac{(0.19s+1)(0.35s+1)}{(0.4s+1)(0.23s+1)}.$$
(4.15)

Видно, что на расчетном режиме в исследуемой МСАУ одновального ГТД, за счет образования между первой сепаратной подсистемой (*n*) и третьей сепаратной подсистемой (T₃) сильной локальной стабилизирующей отрицательной обратной связи ($h_{13}(s) > 0$), в исследуемой системе образуются как стабилизирующая обратная связь ($H_2(s) > 0$), так и дестабилизирующая обратная связь ($H_3(s) < 0$). Для упрощения процесса синтеза будем рассматривать системные коэффициенты $H_2(s)$ и $H_3(s)$ (4.14) в статическом виде, т.е. при s = 0.

На основе полученных характеристик H_2 и H_3 построим характеристическое уравнение связи, которое позволяет оценить запасы устойчивости в МСАУ [5]:

$$D(x,H) = 1 + \sum_{i=2}^{n} H_i x^i = 1 + 0.48x^2 - 0.58x^3 = 0.$$

Значения корней x_i и модифицированных корней x_i^* характеристического уравнения связи представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Корни x_i и модифицированные корни x_i^* исследуемой МСАУ ГТД на расчетном режиме

| i | Корень, <i>x</i> _i | | Модифицированный корень, x _i * | |
|---|-------------------------------|-------------------------|---|-------------------------|
| 1 | 1,55 | 1,55 | -2,83 | 2,83e ^{-j180°} |
| 2 | -0,36- <i>j</i> 0,99 | $1,06e^{-j110^{\circ}}$ | -0,52 <i>-j</i> 0,35 | $0,62e^{-j146^{\circ}}$ |
| 3 | -0,36+j0,99 | $1,06e^{j110^{\circ}}$ | -0,52+j0,35 | $0,62e^{j146^{\circ}}$ |

Многомерный линейный регулятор, рассчитанный на основе предложенной методики с учетом обеспечения как требуемых запасов устойчивости, так и необходимого быстродействия МСАУ ГТД на стендовом режиме, имеет следующие параметры:

$$W_{PE\Gamma}(s) = \frac{0.6s+1}{(0.05s+1)s} \begin{bmatrix} 1.4 & 0 & 0\\ 0 & 2.5 & 0\\ 0 & 0 & 9 \end{bmatrix}.$$
 (4.16)

На рисунке 4.7 представлены графики переходных процессов выходной координаты $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой МСАУ авиационным ГТД с линейными регуляторами.



Рисунок 4.7 – Графики переходных процессов Y(t) в исследуемой МСАУ ГТД с линейными регуляторами на расчетном режиме стенда (H = 0 км., V = 0 *M*)

По результатам моделирования синтезированной МСАУ авиационным ГТД видно, что обеспечиваются требуемые значения показателей качества функционирования МСАУ ГТД. Однако наблюдается несогласованность в динамике движения сепаратных подсистем, которая выражается в виде некоторых колебаний переходного процесса.

Решим задачу синтеза логического корректора в составе исследуемой МСАУ ГТД с целью согласования и координации сепаратных подсистем.

Для этого рассчитаем параметры $K_{\Pi 1}$ и $T_{\Pi 1}$ корректирующего логического закона для первой сепаратной подсистемы управления частотой вращения ротора турбокомпрессора (*n*) с предложенной инженерной методикой.

Принимая во внимание влияние $T_{\Pi}\varepsilon_i'(t)$ корректирующего логического алгоритма, разомкнутая передаточная функция исследуемой сепаратной подсистемы в режиме управления без учета коэффициента передачи описывается следующим уравнением:

$$W_1(s) = (T_{\mathcal{J}1}s+1)W_{PE\Gamma_{11}}(s)W_{OY_{11}}(s) = \frac{0.6T_{\mathcal{J}1}s^2 + (T_{\mathcal{J}1}+0.6)s+1}{(0.012s^3+0.29s^2+1.05s+1)s}$$

Так как данная передаточная функция характеризуется высоким порядком числителя и знаменателя, то рассчитаем усредненную постоянную времени $T_{1\Sigma}$ и усредненную постоянную времени форсирования $\tau_{1\Sigma}$:

$$\begin{aligned} \tau_{1\Sigma} &= \frac{0.6T_{\mathcal{I}1} + (T_{\mathcal{I}1} + 0.6)}{2}, \\ T_{1\Sigma} &= 0.4507. \end{aligned}$$

Тогда параметр $T_{\Pi 1}$ выбирается из условия компенсации постоянной времени $T_{1\Sigma}$ с помощью форсирования $\tau_{1\Sigma}$:

$$0.8T_{J1} = 0.4507\beta - 0.3.$$

Коэффициент β , характеризующий интенсивность компенсации инерционности объекта управления по данной сепаратной подсистеме, примем равным 1,75. Тогда для первой сепаратной подсистемы $T_{Л1}$ будет равен 0,61 сек.

Повторяя аналогичные вычисления, определяем T_{Λ} для остальных сепаратных подсистем:

• сепаратная подсистема управления степенью понижения давления на турбине (π_T): $T_{J2} = 0.5$ сек.;

• сепаратная подсистема управления температурой газов перед турбиной (*T*₃): *T*_{л3} = 0,71 сек.

Значения параметра K_{Π} , обеспечивающих требуемое быстродействие исследуемой МСАУ СТО с двухканальными логическими регуляторами в расчетной точке: $K_{\Pi 1} = 1$, $K_{\Pi 2} = 2$, $K_{\Pi 3} = 4$.

По результатам анализа характеристик элемента связи h(s), значения параметра α_{Π} для каждой *i*-й сепаратной подсистемы выбраны из условия согласования динамики движения всех сепаратных подсистем исследуемой МСАУ СТО: $\alpha_{\Pi 1} = 0,2$ сек., $\alpha_{\Pi 2} = 0,35$ сек., $\alpha_{\Pi 3} = 0,3$ сек.

Таким образом, значения параметров $K_{\rm Л}$, $T_{\rm Л}$ и $\alpha_{\rm Л}$ предложенного двухканального логического регулятора для заданного режима, рассчитанные в соответствии с предложенной инженерной методикой, представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Параметры логического регулятора в составе МСАУ ГТД

| Сепаратная подсистема, управляющая | <i>T</i> , сек | K | α |
|--|----------------|---|------|
| частотой вращения ротора турбокомпрессора (n) | 0,61 | 1 | 0,2 |
| степенью понижения давления на турбине (π_T) | 0,5 | 2 | 0,35 |
| температурой газов перед турбиной (T_3) | 0,8 | 4 | 0,3 |

В соответствии со структурой двухканального логического регулятора (см. рисунок 2.2), дополнительный линейный регулятор в составе каждой і-й сепаратной подсистемы описывается следующей заданной передаточной функцией:

$$R_i(s) = \frac{1}{s}, \quad i = 1, 2, 3.$$
 (4.17)

Графики переходных процессов выходной координаты Y(*t*) в исследуемой МСАУ ГТД с предложенными логическими регуляторами представлены на рисунке 4.8.



Рисунок 4.8 – Графики переходных процессов Y(t) исследуемой МСАУ ГТД с логическими двухканальными регуляторами в режиме стенда (H = 0 км., V = 0 М)

Видно, что введение в контур управления предложенного логического регулятора привело к стабилизации и согласованию динамики всех сепаратных подсистем – переходные процессы стали монотонными, исчезли незначительные колебания вблизи положения равновесия.

Таким образом, логический корректирующий алгоритм (параметры K_{Λ} , T_{Λ}) (в совокупности с линейным регулятором) и логический координирующий алгоритм (параметр α_{Λ}) (в совокупности с линейным корректором) обеспечивают требуемое качество функционирования исследуемой МСАУ одновальным ТРДФ на расчетном режиме.

Решим задачу управления авиационным ГТД, функционирующим в широком диапазоне высот и скоростей полета летательного аппарата. Как уже было сказано, ГТД представляет собой устойчивый нестационарный объект, динамические и статические параметры которого изменяются в соответствии с внешними условиями полета. Данные изменения наиболее просто описываются с помощью законов теории подобия [53]. В работе [17] предложена область функционирования ГТД в зависимости от высоты *H* и скорости полета *V*, представленная на рисунке 4.9.


Рисунок 4.9 – Исследуемые точки функционирования МСАУ ГТД

Параметры исследуемого одновального ТРДФ как многосвязного объекта управления в исследуемых точках *P*₁₋₅ (рисунок 4.9) представлены в таблице 4.4. *Таблица 4.4*

| Т. | <i>Н</i> , км | V, Max | Матричная передаточная функция ГТД, $W_{OY}(s)$ |
|-----------------------|---------------|--------|---|
| <i>P</i> ₁ | 7 | 1 | $\frac{1}{0,31s^2+1,19s+1} \begin{bmatrix} 0,65 & 0,6 & -0,19\\ 0,32(0,33s+1) & 0,6(0,52s+1) & -0,13(0,46s+1)\\ 1,05(0,5s+1) & -0,69(0,25s+1) & 0,17(0,3s+1) \end{bmatrix}$ |
| <i>P</i> ₂ | 17 | 1,3 | $\frac{1}{1,05s^2+3,02s+1} \begin{bmatrix} 2,18 & 0,6 & -0,65\\ 1,09(1,09s+1) & 0,6(1,75s+1) & -0,43(1,53s+1)\\ 3,5(1,66s+1) & -0,68(0,83s+1) & 0,57(s+1) \end{bmatrix}$ |
| <i>P</i> ₃ | 22 | 2,5 | $\frac{1}{0,56s^{2}+1,81s+1} \begin{bmatrix} 0,9 & 0,78 & -0,27 \\ 0,34(0,59s+1) & 0,6(0,94s+1) & -0,14(0,82s+1) \\ 1,88(0,89s+1) & -1,15(0,33s+1) & 0,3(0,54s+1) \end{bmatrix}$ |
| P_4 | 9 | 2 | $\frac{1}{0,13s^2+0,74s+1} \begin{bmatrix} 0,23 & 0,72 & -0,07\\ 0,1(0,14s+1) & 0,6(0,22s+1) & -0,04(0,2s+1)\\ 0,45(0,21s+1) & -0,97(0,11s+1) & 0,07(0,13s+1) \end{bmatrix}$ |
| <i>P</i> ₅ | 0,1 | 1,5 | $\frac{1}{0,08s^2+0,605s+1} \begin{bmatrix} 0,14 & 0,72 & -0,04 \\ 0,06(0,08s+1) & 0,6(0,14s+1) & -0,02(0,12s+1) \\ 0,27(0,13s+1) & -0,98(0,06s+1) & 0,04(0,09s+1) \end{bmatrix}$ |

Параметры ТРДФ как многосвязного объекта управления в исследуемых точках P₁₋₅

На основе анализа изменения параметров МСАУ ГТД на различных режимах функционирования [63], можно сделать вывод, что исследуемая система принадлежит к III классу МСАУ – в соответствии с изменениями условий полета в исследуемой системе существенно изменяются динамические параметры сепаратных подсистем и перекрестных связей между ними.

Пример 4.1. Проведем оценку применимости предложенных логических регуляторов в составе МСАУ ГТД при возрастании постоянной времени $T_{\rm Д}$ исследуемого одновального ТРДФ на различных условиях полета. Графики переходных процессов **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ ГТД при единичном ступенчатом входном сигнале для каждой выделенной точки P_{1-3} (см. таблицу 4.4.) представлены на рисунках 4.10 – 4.12.



Рисунок 4.10 – Графики переходных процессов $\mathbf{Y}(t)$ в МСАУ ГТД при увеличении $T_{\mathcal{A}}$ в 1,3 раза (P_1): а – без логического регулятора; б – с логическим регулятором



Рисунок 4.11 – Графики переходных процессов **Y**(*t*) в МСАУ ГТД при увеличении *T*_Д в 2,3 раза (*P*₃): а – без логического регулятора; б – с логическим регулятором



Рисунок 4.12 – Графики переходных процессов **Y**(*t*) в МСАУ ГТД при увеличении *T*_Д в 4,4 раза (*P*₂): а – без логического регулятора; б – с логическим регулятором

Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ ГТД в исследуемых точках P_{1-3} без логического регулятора представлены в таблице 4.5, а в таблице 4.6 – с логическим регулятором, где t_{PEF} – время регулирования управляемой координаты при трубке точности в 5 %, а σ – величина перерегулирования.

Таблица 4.5

| | | | - | - | | | | | |
|---------------------------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|---|----------|-------|
| Возрастание $T_{Д}$ | в 1,3 раза | | | в 2,3 раза | | | 1 | в 4,4 ра | 3a |
| Сепаратная подсистема | n | π_T | T_3 | n | π_T | T_3 | п | π_T | T_3 |
| $t_{\rm PE\Gamma}$, сек. | 5,8 | 5,2 | 4,9 | 13,4 | 10,6 | 14 | - | - | _ |
| σ, % | 16,3 | 1,7 | 5,3 | 47,8 | 13,8 | 26,73 | — | — | _ |

Показатели качества функционирования МСАУ ГТД без логического регулятора в исследуемых точках P_{1-3}

Таблица 4.6

Показатели качества функционирования МСАУ ГТД с логическим регулятором в исследуемых точках P_{1-3}

| Возрастание Тд | E | з 1,3 раз | a | I | з 2,3 раз | а | | | |
|--------------------------------|-----|-----------|-------|-----|-----------|-------|------|---------|-------|
| Сепаратная подсистема | n | π_T | T_3 | n | π_T | T_3 | n | π_T | T_3 |
| <i>t</i> _{РЕГ} , сек. | 2,5 | 2,7 | 1,7 | 2,2 | 4,9 | 4,7 | 1,56 | 5,78 | 3,38 |
| σ, % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,5 | 14,26 | 8,37 |

В исследуемой точке P_1 постоянная времени $T_{\rm A}$ увеличивается в 1,3 раза, что приводит к появлению значительного перерегулирования в исследуемой МСАУ ГТД без логического регулятора. При использовании предложенных логических алгоритмов управления исследуемая МСАУ обеспечивает требуемое качество управления ГТД. При увеличении постоянной времени $T_{\rm A}$ уже в 2,3 раза (исследуемая точка P_3) МСАУ ГТД приближается к границе устойчивости. Однако МСАУ ГТД с предложенным логическим регулятором сохраняет приемлемое качество управления и не допускает появления перерегулирования в сепаратных подсистемах. При данных изменениях рекомендуется провести модификацию параметров логического корректора или линейного регулятора. При существенном изменении постоянной времени $T_{\rm A}$ (исследуемая точка P_2) предложенный логический регулятор не допускает потери устойчивости МСАУ ГТД, однако качество управления неудовлетворительное – наблюдаются существенные колебания динамики отдельных сепаратных подсистем вблизи от положения равновесия.

Для обеспечения требуемого качества управления одновальным ГТД (время регулирования $t_P < 5$ сек., перерегулирование $\sigma = 0$ %) в выделенной точке P_2 достаточно изменить параметры логического корректора (см. таблицу 4.7) в составе двухканальных логических регуляторов.

Таблица 4.7

| Сепаратная подсистема, управляющая | Т | K | α |
|---|-----|-----|------|
| частотой вращения ротора турбокомпрессора (n) | 1 | 1 | 0,2 |
| степенью понижения давления на турбине (π_T) | 1,2 | 2,5 | 0,35 |
| температурой газов перед турбиной (T ₃) | 2 | 4 | 0,3 |
| | | | |

Параметры модифицированного логического регулятора в составе МСАУ ГТД

Графики переходных процессов **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ ГТД при единичном ступенчатом входном сигнале после коррекции логического регулятора представлены на рисунке 4.13.



Рисунок 4.13 – Графики переходных процессов $\mathbf{Y}(t)$ в МСАУ ГТД после изменения параметров логического регулятора для точки P_2

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что коррекция параметров двухканального логического регулятора позволяет обеспечить требуемое качество функционирования МСАУ авиационным ГТД.

Пример 4.2. Проведем оценку применимости предложенных логических регуляторов в составе МСАУ ГТД при уменьшении постоянной времени $T_{\rm Д}$ исследуемого одновального ТРДФ на различных условиях полета. Графики переходных процессов **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ ГТД при единичном ступенчатом входном сигнале для каждой выделенной точки P_{4-5} (см. таблицу 4.4.) представлены на рисунках 4.14 и 4.15.



Рисунок 4.14 – Графики переходных процессов **Y**(*t*) в МСАУ ГТД при уменьшении *T*_Д в 1,8 раза (*P*₄): а – без логического регулятора; б – с логическим регулятором



Рисунок 4.15 – Графики переходных процессов $\mathbf{Y}(t)$ в МСАУ ГТД при уменьшении $T_{\text{Д}}$ в 3 раза (P_5): а – без логического регулятора; б – с логическим регулятором

В исследуемых точках P_4 и P_5 уменьшение постоянной времени $T_{\rm Д}$ сопровождается существенными параметрическими изменениями перекрестных связей, что приводит к значительному ухудшению качества управления в целом.

Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ ГТД в исследуемых точках *P*₄₋₅ без логического регулятора представлены в таблице 4.8, а в таблице 4.9 – с логическим регулятором.

Таблица 4.8

| Уменьшение Тд | в 1,8 раза | | | в 3 раза | | | |
|--------------------------------|------------|---------|-------|----------|---------|-------|--|
| Сепаратная подсистема | п | π_T | T_3 | п | π_T | T_3 | |
| $t_{\mathrm{PE}\Gamma}$, сек. | 14,2 | 5 | 13,9 | 25,6 | 16,2 | 33,3 | |
| σ, % | 5,7 | 5 | 20,4 | 11,2 | 5,9 | 18,9 | |

Показатели качества функционирования МСАУ ГТД без логического регулятора в исследуемых точках *P*₄₋₅

Таблица 4.9

| e norm teering per yantopoin B heenedyembix to huar 1 4-5 | | | | | | | | | |
|---|-----|------------|-------|----------|---------|-------|--|--|--|
| Уменьшение Тд | | в 1,8 раза | | в 3 раза | | | | | |
| Сепаратная подсистема | n | π_T | T_3 | n | π_T | T_3 | | | |
| $t_{\rm PE\Gamma}$, сек. | 7,6 | 4,7 | 12,2 | 10,5 | 5,3 | 18,9 | | | |
| σ, % | 2 | 4,76 | 7,7 | 4,3 | 4,7 | 16,1 | | | |

Показатели качества функционирования МСАУ ГТД с логическим регулятором в исследуемых точках *P*₄₋₅

Предложенный логический регулятор позволяет скорректировать динамику движения сепаратных подсистем, что приводит к уменьшению перерегулирования и сохранению монотонности динамики движения. Однако предложенный двойной логический алгоритм не может существенно изменить форму переходного процесса, вследствие чего динамика движения остается затянутой, а переходные процессы характеризуются длительным временем регулирования.

Для обеспечения требуемого качества управления одновальным ГТД (время регулирования $t_P < 0.9$ сек., перерегулирование $\sigma = 0$ %) в выделенной точке P_5 достаточно изменить параметры как линейного регулятора (увеличить коэффициенты передачи по всем сепаратным подсистемам в 10 раз: $K_{\text{РЕГ1}} = 14$, $K_{\text{РЕГ2}} = 25$, $K_{\text{РЕГ3}} = 90$), так логического корректора (см. таблицу 4.10) в составе двухканальных логических регуляторов.

Таблица 4.10

Параметры модифицированного логического регулятора в составе МСАУ ГТД

| Сепаратная подсистема, управляющая | Т | K | α |
|---|------|---|------|
| частотой вращения ротора турбокомпрессора (n) | 0,3 | 2 | 0,2 |
| степенью понижения давления на турбине (π_T) | 0,25 | 1 | 0,35 |
| температурой газов перед турбиной (T ₃) | 0,6 | 4 | 0,3 |

Графики переходных процессов Y(t) в исследуемой МСАУ ГТД при единичном ступенчатом входном сигнале после коррекции двухканального логического регулятора представлены на рисунке 4.16.



Рисунок 4.16 Графики переходных процессов Y(t) в МСАУ ГТД после изменения параметров логического регулятора для точки P_5

По результатам моделирования очевидно, что коррекция параметров логических регуляторов позволяет улучшить качество управления и достичь требуемого функционирования МСАУ ГТД в целом. ■

Таким образом, по результатам проведенного имитационного моделирования установлено, что применение предложенного двухканального логического регулятора позволяет значительно повысить эффективность МСАУ ГТД, функционирующим в широком диапазоне высот и скоростей полета летательного аппарата. В контексте приведенных примеров определено, что при варьировании постоянной времени $T_{\rm d}$ до 30–50 % от расчетного значения предложенный двойной логический алгоритм обеспечивает приемлемое качество управления, однако при более значительных изменениях требуется корректировка параметров логического регулятора.

4.4. Анализ эффективности логического управления ГТД при различных программах управления

Решим задачу оценки эффективности МСАУ ГТД при различных программах управления на примере двухвального ТРДФ. Структурная схема исследуемой МСАУ ГТД представлена на рисунке 4.17.



Рисунок 4.17 – Структурная схема исследуемой МСАУ ГТД

Процесс функционирования исследуемой МСАУ описывается на основе следующих функциональных параметров ТРДФ: частота вращения турбокомпрессора низкого давления (n_1), степень понижения давления на турбине (π_T) и температура газов за турбиной (T_4).

Математическая модель двухвального ТРДФ как объекта управления представлена в виде системы линеаризованных стационарных дифференциальных уравнений [105]:

$$\begin{cases} aX_n = k_{11}(\tau_{11}p+1)X_{G_T} + k_{12}(\tau_{12}p+1)X_{F_C} - k_{13}(\tau_{13}p+1)X_{G_{T\phi}}, \\ aX_{\pi_T} = k_{21}(b_{21}p^2 + \tau_{21}p+1)X_{G_T} + k_{22}(b_{22}p^2 + \tau_{22}p+1)X_{F_C} - k_{23}(b_{23}p^2 + \tau_{23}p+1)X_{G_{T\phi}}, \\ aX_{T_4} = k_{31}(b_{31}p^2 + \tau_{31}p+1)X_{G_T} - k_{32}(b_{32}p^2 + \tau_{32}p+1)X_{F_C} + k_{33}(b_{33}p^2 + \tau_{33}p+1)X_{G_{T\phi}}, \\ a = T_1^2 p^2 + T_0 p + 1, \end{cases}$$

$$(4.18)$$

где $G_{\rm T}$ – расход топлива в основной камере сгорания, $F_{\rm C}$ – площадь сечения реактивного сопла, $G_{\rm T\Phi}$ – расход топлива в форсажной камере сгорания.

В системе линеаризованных стационарных дифференциальных уравнений (4.18) приняты следующие обозначения: X_i – относительное отклонение рассматриваемой физической координаты от значения на исследуемом режиме, p – оператор дифференцирования, T_0 и T_1 – постоянные времени двигателя, τ_{ij} и b_{ij} – постоянные времени форсирования подсистем двигателя, k_{ij} – коэффициенты усиления в прямых и перекрестных связях.

Таким образом, объект управления, представляющий собой последовательное соединение многомерного исполнительного механизма (в виде статического апериодического звена) и двухвального ТРДФ (в соответствии с системой уравнений (4.18)), описывается следующей матричной передаточной функцией:

$$\mathbf{W}_{OY}(s) = \frac{1}{(T_{IM}s+1)(T_1^2s^2+T_0s+1)} \times \begin{bmatrix} K_{11}(\tau_{11}s+1) & K_{12}(\tau_{12}s+1) & -K_{13}(\tau_{13}s+1) \\ K_{21}(b_{21}s^2+\tau_{21}s+1) & K_{22}(b_{22}s^2+\tau_{22}s+1) & -K_{23}(b_{23}s^2+\tau_{23}s+1) \\ K_{31}(b_{31}s^2+\tau_{31}s+1) & -K_{32}(b_{32}s^2+\tau_{32}s+1) & K_{33}(b_{33}s^2+\tau_{33}s+1) \end{bmatrix}.$$
(4.19)

Таким образом, согласно [105] численное значение МПФ многосвязного объекта управления с учетом (4.19) в условиях стенда (H = 0, M = 0) при постоянной времени исполнительного механизма $T_{\rm UM} = 0,15$ сек. соответствует:

$$\mathbf{W}_{OV}(s) = \frac{1}{0,0225s^{3} + 0,2775s^{2} + s + 1} \times \begin{bmatrix} 0,8(0,4s+1) & 1,6(0,45s+1) & -0,85(0,25s+1) \\ 0,26(0,2s^{2} + 0,7s+1) & 1,25(0,25s^{2} + 0,8s+1) & -0,5(0,18s^{2} + 0,7s+1) \\ 0,4(0,3s^{2} + 1,2s+1) & -0,75(0,2s^{2} + 0,35s+1) & 0,35(0,25s^{2} + 0,4s+1) \end{bmatrix}.$$
(4.20)

Для регулируемых координат МСАУ ГТД в условиях стенда (H = 0 км., V = 0 М) зададим следующие технические требования к качеству управления – астатизм v = 1, время регулирования $t_P < 5$ сек., перерегулирование $\sigma = 0$ %.

Проведем синтез параметров линейной части логического регулятора с учетом обеспечения заданных технических требований. В качестве линейного регулятора рассмотрим последовательное соединение изодромного звена и апериодического звена. Таким образом, линейный многомерный регулятор описывается следующей заданной матричной передаточной функцией $W_{\text{РЕГ}}(s)$:

$$W_{PE\Gamma}(s) = \frac{\tau_{PE\Gamma}s + 1}{s} \begin{vmatrix} \frac{K_{PE\Gamma 1}}{T_{PE\Gamma 1}s + 1} & 0 & 0\\ 0 & \frac{K_{PE\Gamma 2}}{T_{PE\Gamma 2}s + 1} & 0\\ 0 & 0 & \frac{K_{PE\Gamma 3}}{T_{PE\Gamma 3}s + 1} \end{vmatrix},$$
(4.21)

где $K_{\text{PEГ}i}$ – коэффициент передачи линейного регулятора для каждой *i*-й сепаратной подсистемы, $\tau_{\text{PEГ}}$ – постоянная форсирования линейного регулятора, $T_{\text{PEГ}i}$ – постоянная времени линейного регулятора для каждой *i*-й сепаратной подсистемы.

Обобщенные характеристики многосвязного элемента связи (1.2), определяющие характер и силу перекрестной связи между группой сепаратных подсистем, для исследуемой МСАУ ГТД имеют следующие значения:

$$H_{2}(s) = -0,059 \frac{\left(-0,018s^{5} - 1,457s^{4} - 8,1845s^{3} - 17,5419s^{2} - 14,3059s + 1\right)}{(0,4s+1)\left(0,25s^{2} + 0,8s+1\right)\left(0,25s^{2} + 0,4s+1\right)},$$

$$H_{3}(s) = -0,4409 \frac{\left(0,0397s^{5} + 0,4102s^{4} + 1,7167s^{3} + 3,5361s^{2} + 3,4776s + 1\right)}{(0,4s+1)\left(0,25s^{2} + 0,8s+1\right)\left(0,25s^{2} + 0,4s+1\right)}.$$

$$(4.22)$$

где

$$h_{12}(s) = -0.416 \frac{(0.09s^3 + 0.515s^2 + 1.15s + 1)}{(0.4s + 1)(0.25s^2 + 0.8s + 1)},$$

$$h_{13}(s) = 1.214 \frac{(0.075s^3 + 0.6s^2 + 1.45s + 1)}{(0.4s + 1)(0.25s^2 + 0.4s + 1)},$$

$$h_{23}(s) = -0.857 \frac{(0.036s^4 + 0.203s^3 + 0.625s^2 + 1.05s + 1)}{(0.25s^2 + 0.8s + 1)(0.25s^2 + 0.4s + 1)}.$$
(4.23)

Видно, что на расчетном режиме в исследуемой МСАУ ГТД между первой сепаратной подсистемой (n_1) и третьей сепаратной (T_4) образуется локальная стабилизирующая отрицательная обратная связь $(h_{13}(s) > 0)$, однако в исследуемой системе в целом образуется дестабилизирующая положительная обратная связь $(H_2(s) < 0, H_3(s) < 0)$. Для упрощения процесса синтеза будем рассматривать системные коэффициенты $H_2(s)$ и $H_3(s)$ (4.22) в статическом виде, т.е. при s = 0.

На основе полученных характеристик H_2 и H_3 построим характеристическое уравнение связи, которое позволяет оценить запасы устойчивости в МСАУ [5]:

$$D(x,H) = 1 + \sum_{i=2}^{n} H_i x^i = 1 - 0,059x^2 - 0,4409x^3 = 0.$$

Значения корней x_i и модифицированных корней x_i^* характеристического уравнения связи представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11

| i | Коре | нь, <i>x</i> _i | Модифицированный корени | | |
|---|------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|--|
| 1 | 1,27 | 1,27 | -4,69 | $-4,69e^{-j180^{\circ}}$ | |
| 2 | -0,7-j1,14 | $1,34e^{-j121^{\circ}}$ | -0,59 <i>-j</i> 0,27 | $0,65e^{-j155^\circ}$ | |
| 3 | -0,7+j1,14 | $1,34e^{j121^{\circ}}$ | -0,59+j0,27 | $0,65e^{j155^{\circ}}$ | |

Корни *x_i* и модифицированные корни *x_i* * исследуемой МСАУ ГТД на расчетном режиме

Многомерный линейный регулятор, рассчитанный на основе предложенной методике с учетом обеспечения необходимого быстродействия МСАУ ГТД (время регулирования $t_P \leq 5$ сек. при допустимом перерегулировании $\sigma < 0\%$) на стендовом режиме, имеет следующие параметры:

$$W_{PE\Gamma}(s) = \begin{bmatrix} \frac{1,6(0,6s+1)}{(s+1)s} & 0 & 0\\ 0 & \frac{2,25(s+1)}{(0,8s+1)s} & 0\\ 0 & 0 & \frac{4,75(s+1)}{(0,8s+1)s} \end{bmatrix}.$$
 (4.24)

Параметры логического корректора, рассчитанные в соответствии с предложенной инженерной методикой для стендового режима, представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12

Параметры логического регулятора в составе МСАУ двухвального ГТД

| Сепаратная подсистема, управляющая | <i>T</i> , сек | K | α |
|---|----------------|-----|------|
| частотой вращения турбокомпрессора низкого давления (n ₁) | 1,2 | 2 | 0,25 |
| степенью понижения давления на турбине (π_T) | 1,6 | 3 | 0,75 |
| температурой газов за турбиной (<i>T</i> ₄) | 1,8 | 2,5 | 0,5 |

В соответствии со структурой логического регулятора (см. рисунок 2.2), дополнительный линейный регулятор в составе каждой *i*-й сепаратной подсистемы описывается следующей заданной передаточной функцией:

$$R_i(s) = \frac{1}{s}, \quad i = 1, 2, 3.$$
 (4.25)

Графики переходных процессов выходной координаты Y(t) в исследуемой МСАУ двухвальным ГТД с предложенными логическими регуляторами представлены на рисунке 4.18.



Рисунок 4.18 – Графики переходных процессов в исследуемой МСАУ ГТД с логическими регуляторами в режиме стенда (*H* = 0 км., *V* = 0 M)

По результатам имитационного моделирования видно, что предложенный двухканальный логический регулятор обеспечивает требуемое качество управления исследуемой МСАУ двухвальным ТРДФ на расчетном режиме

Решим задачу анализа применимости предложенного двухканального логического регулятора в составе МСАУ двухвальным ТРДФ при различных программах управления:

- $T_4 = \operatorname{cons} t$, $n_1 = \operatorname{var}$, $\pi_T = \operatorname{var}$;
- $\pi_T = \operatorname{cons} t, n_1 = \operatorname{var}, T_4 = \operatorname{var};$
- $\pi_T = \text{const}, T_4 = \text{const}, n_1 = \text{var}.$

На всех вышеперечисленных режимах требуется оценить эффективность предложенного двойного логического алгоритма при неизменном объекте управления и логических регуляторах.

Пример 4.3. Первая программа управления заключается в регулировании частоты вращения турбокомпрессора низкого давления (n_1) и степени понижения давления на турбине (π_T) при стабилизации температуры газов за турбиной (T_4) . На рисунке 4.19 представлены графики переходных процессов выходной координаты $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой МСАУ ГТД при заданной программе управления: $T_4 = \text{cons}t$, $n_1 = \text{var}$, $\pi_T = \text{var}$.



Рисунок 4.19 – Графики переходных процессов $\mathbf{Y}(t)$ в исследуемой МСАУ двухвальным ТРДФ при заданной программе управления ($T_4 = \text{cons}t$, n_1 , $\pi_T = \text{var}$): а – без логического регулятора, б – с логическим регулятором

Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ ГТД представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13

| Логический алгоритм управления | Без логического алгоритма управления | | | С логическим алгоритмом управления | | | |
|--------------------------------|---|---------|-------|---------------------------------------|---------|-------|--|
| Сепаратная подсистема | n_1 | π_T | T_4 | n_1 | π_T | T_4 | |
| Время регулирования, сек. | 7,53 | 4,54 | 3,74 | 3,79 | 3,68 | 2,95 | |
| Перерегулирование, % | 41,76 | 4,49 | 30,12 | 0 | 0 | 8,5 | |

Показатели качества функционирования МСАУ ГТД при заданной программе управления

По результатам моделирования можно сделать вывод, что линейный регулятор не позволяет сохранить требуемое качество управления – в переходных процессах по управляемым координатам наблюдаются существенные колебания динамики движения соответствующих сепаратных подсистем, вследствие чего перерегулирование. Также линейный появляется регулятор допускает существенные отклонения по стабилизируемой координате. Однако предложенный логический регулятор за счет своих свойств позволяет существенно улучшить качество функционирования МСАУ двухвальным ГТД на заданной программе управления.

Пример 4.4. Вторая программа управления заключается в регулировании частоты вращения турбокомпрессора низкого давления (n_1) и температуры газов за турбиной (T_4) при стабилизации степени понижения давления на турбине (π_T) . На рисунке 4.20 представлены графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ ГТД при заданной программе управления: $\pi_T = \text{cons}t$, $n_1 = \text{var}$, $T_4 = \text{var}$. Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ ГТД представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при заданной программе управления

| Логический алгоритм управления | Без логического алгоритма управления | | | С логическим алгоритмом управления | | | |
|--------------------------------|---|---------|-------|---------------------------------------|---------|-------|--|
| Сепаратная подсистема | n_1 | π_T | T_4 | n_1 | π_T | T_4 | |
| Время регулирования, сек. | 7,42 | 6,31 | 6 | 2,82 | 4,12 | 1,65 | |
| Перерегулирование, % | 60,18 | 34,74 | 40,59 | 0,87 | 10 | 1,4 | |



Рисунок 4.20 – Графики переходных процессов Y(t) в исследуемой МСАУ двухвальным ТРДФ при заданной программе управления ($\pi_T = \text{cons}t$, n_1 , $T_4 = \text{var}$): а – без логического регулятора, б – с логическим регулятором

По результатам моделирования видно, что в переходных процессах исследуемой МСАУ ГТД наблюдаются быстро затухающие колебания, однако качество функционирования исследуемой системы остается неудовлетворительным. Применение в контуре управления предложенного логического регулятора позволяет сохранить приемлемое качество управления двухвальным ГТД.

Пример 4.5. Третья программа управления заключается в регулировании только частоты вращения турбокомпрессора низкого давления (n_1) при стабилизации степени понижения давления на турбине (π_T) и температуры газов за турбиной (T_4) . На рисунке 4.22 представлены графики переходных процессов выходной координаты **Y**(*t*) в исследуемой МСАУ ГТД при заданной программе управления: $\pi_T = \text{cons}t$, $T_4 = \text{cons}t$, $n_1 = \text{var}$. Значения показателей качества функционирования в исследуемой МСАУ ГТД представлены в таблице 4.15.

Таблица 4.15

| Логический алгоритм управления | Без логического алгоритма управления | | | С логическим алгоритмом управления | | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|---------|-------|---------------------------------------|---------|-------|--|
| Сепаратная подсистема | n_1 | π_T | T_4 | n_1 | π_T | T_4 | |
| Время регулирования, сек. | 6,73 | 5,44 | 5,16 | 1,71 | 3,58 | 3,57 | |
| Перерегулирование, % | 51,22 | 36,26 | 42,16 | 1,29 | 14,69 | 19,29 | |

Показатели качества функционирования МСАУ СТО при заданной программе управления



Рисунок 4.21 – Графики переходных процессов Y(t) в исследуемой МСАУ двухвальным ТРДФ при заданной программе управления (T_4 , $\pi_T = \text{cons}t$, $n_1 = \text{var}$): а – без логического регулятора, б – с логическим регулятором

По результатам моделирования видно, что применение логического регулятора в составе МСАУ двухвальным ТРДФ при заданной программе управления за счет логического управления собственной сепаратной подсистемой с учетом влияния перекрестных связей позволяет не допустить появления колебаний динамики движения как координат по управлению (n_1) , так и координат по стабилизации $(\pi_T \, u \, T_4)$.

Таким образом, результатам проведенного по имитационного моделирования установлено, что применение предложенного двойного алгоритма управления ГТД позволяет значительно логического повысить эффективность МСАУ ГТД при различных программах управления. В контексте приведенных примеров определено, что логический регулятор за счёт своих свойств позволяет заметно уменьшить перерегулирование и колебательность движения выходных координат как при управлении, так и при стабилизации, МСАУ вследствие чего обеспечивается высокое качество управления двухвальным ГТД при различных программах управления.

Выводы по четвертой главе

1. Разработана инженерная методика проектирования МСАУ ГТД с двойным логическим алгоритмом управления. Данная методика позволяет рассчитать параметры логического регулятора в составе МСАУ ГТД с учетом

обеспечения требуемого качества управления как сепаратными подсистемами в Практическая отдельности, так и при связном управлении. значимость инженерной методики заключается в обоснованной реализации предложенной МСАУ проектирования ГТД логическими концепции с регуляторами, обеспечивающими заданные требования к качеству управления. Также разработано программное обеспечение для проектирования МСАУ ГТД с двухканальным логическим регулятором в сепаратных подсистемах. Данное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс синтеза гомогенных МСАУ СТО с логическим регулятором, обеспечивающим требуемые устойчивости и качество управления. Практическая запасы значимость программного обеспечения заключается в возможности автоматизировать процесс проектирования МСАУ ГТД с двойными логическими алгоритмами управления.

2. Получена математическая модель авиационного ГТД (на примере одновального ТРДФ), позволяющая провести оценку эффективности двойного предложенного логического алгоритма управления сложным техническим объектом, функционирующим В условиях структурной И параметрической неопределенности.

3. Проведена оценка применимости предложенного двухканального логического регулятора в составе МСАУ ГТД на примере одновального ТРДФ, функционирующего в широком диапазоне высот и скоростей полета летательного аппарата, по переходным характеристикам путем имитационного моделирования. По результатам имитационного моделирования МСАУ одновальным ТРДФ было установлено, что предложенный двойной логический алгоритм обеспечивает приемлемое качество управления при изменении постоянной времени $T_{\rm д}$ одновального ТРДФ до 30–50 % от расчетного значения, однако при более значительных изменениях требуется корректировка параметров логического регулятора.

4. Проведена оценка применимости предложенного двухканального логического регулятора в составе МСАУ ГТД на примере двухвального ТРДФ при различных программах управления по переходным характеристикам путем имитационного моделирования. По результатам имитационного моделирования МСАУ двухвальным ТРДФ было установлено, что предложенный двойной логический алгоритм обеспечивает приемлемое качество на различных программах управления при неизменных регулирующих органах. Практическая значимость полученных результатов имитационного моделирования МСАУ газотурбинным авиационным двигателем заключается В подтверждении эффективности предложенного двойного логического алгоритма для управления СТО, функционирующим в условиях параметрической и функциональной неопределенности.

Основные результаты и выводы

В ходе проведенного научного исследования, целью которого является повышение качества многосвязного управления сложным техническим объектом на основе логических алгоритмов, были решены все поставленные задачи и получены следующие результаты:

1. Разработана концепция проектирования и структура МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором на основе метода декомпозиции. Предложенная концепция заключается в интеграции линейного регулятора, реализующего линейные законы управления, и двухканального логического корректора, проводящего анализ как характера движения сепаратных подсистем, так и влияния на их динамику перекрестных связей, с целью улучшения качества управления многосвязным объектом на нерасчетных режимах. На основе предложенной концепции разработана структура двухканального логического регулятора в составе *i*-й сепаратной подсистемы МСАУ СТО, формирующего корректирующий сигнал управления собственной основной сепаратной подсистемой (на основе анализа её текущего состояния и динамики движения) и дополнительный координирующий сигнал (на основе сравнительного анализа динамики движения всех сепаратных подсистем в составе МСАУ СТО). Научная новизна предложенной концепции проектирования и структуры МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором заключается в формировании сигнала управления $u_i^*(t)$ на основе интеграции основного сигнала $u_i(t)$ управления собственной сепаратной подсистемой и дополнительного координирующего сигнала $u_i(t)$, учитывающего влияние перекрестных связей.

2. Проведен синтез двойного логического алгоритма управления сепаратной подсистемой в составе МСАУ СТО. В контексте решения данной задачи разработан логический алгоритм управления автономной сепаратной подсистемой в составе многосвязного объекта управления, формирующий корректирующую ошибку $\varepsilon_i^*(t)$ на основе анализа как текущего состояния, так и прогнозируемой динамики движения собственной *i*-й сепаратной подсистемы по

сигналам ошибки управления $\varepsilon_i(t)$ и её производной $\varepsilon_i'(t)$ соответственно. Также разработан логический алгоритм управления сепаратной подсистемой с учетом влияния перекрестных связей, формирующий искусственную координирующую связь $u_i(t)$ на основе сигнала $y_i'(t)$, полученного исходя из логического сравнительного анализа динамики движения $y_i'(t)$ собственной *i*-й сепаратной подсистемы с динамикой движения $y_i'(t)$ остальных *j*-х сепаратных подсистем. Научная новизна двойного логического алгоритма заключается в коррекции динамики движения сепаратных подсистем совместно с формированием дополнительных искусственных перекрестных связей для согласования движения всех подсистем MCAV СТО.

3. Проведен анализ эффективности МСАУ СТО с двухканальным логическим регулятором при параметрических изменениях, наличии чистого запаздывания и действии различных возмущений на основе имитационного моделирования. В контексте параметрических изменений многосвязного объекта предложенный управления установлено, что двухканальный логический регулятор обеспечивает требуемое качество управления при варьировании отдельных параметров сепаратных подсистем (постоянной времени T_{OV} объекта коэффициента демпфирования ξον объекта управления, управления, коэффициента передачи Ким исполнительного механизма) и перекрестных связей (при изменении системных коэффициентов H₂ и H₃, описывающих характер и силу перекрестных связей между группой подсистем). Также установлено, что предложенный двухканальный логический регулятор обеспечивает сохранение устойчивости всей МСАУ СТО при комплексном изменении параметров объекта управления. многосвязного В контексте чистого запаздывания предложенный двухканальный логический регулятор обеспечивает требуемое качество управления при наличии чистого запаздывания как в контуре управления, так и в самом многосвязном объекте. В контексте действия возмущений двойной логический алгоритм управления обеспечивает требуемое качество управления при действии возмущений как на отдельную сепаратную

подсистему, так и на многосвязный объект управления в целом. Научная новизна результатов оценки эффективности МСАУ СТО с двойным логическим алгоритмом управления заключается в подтверждении эффективности использования предложенного логического алгоритма управления в составе МСАУ СТО при параметрических изменениях, наличии чистого запаздывания и действии различных возмущений методом имитационного моделирования.

4. Разработана инженерная методика и программное обеспечение для проектирования МСАУ с двойным логическим алгоритмом управления. Практическая значимость инженерной методики заключается в обоснованной реализации предложенной концепции проектирования МСАУ ГТД с логическими регуляторами, обеспечивающими заданные требования к качеству управления. Практическая значимость программного обеспечения заключается в возможности автоматизировать процесс проектирования МСАУ ГТД с двойными логическими алгоритмами управления. Также проведена оценка их эффективности на примере МСАУ авиационным газотурбинным двигателем по переходным характеристикам путем имитационного моделирования. По результатам имитационного моделирования было установлено, что предложенный логический алгоритм обеспечивает приемлемое качество управления как при изменении условий полета (на примере одновального ГТД), так и при изменении программы двухвального ГТД). Практическая управления (на примере значимость полученных результатов имитационного моделирования МСАУ авиационным газотурбинным двигателем заключается в подтверждении эффективности предложенного двойного логического алгоритма для управления CTO. функционирующим параметрической И функциональной В условиях неопределенности.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Разработанный подход к логическому управлению, основанному на коррекции сепаратных подсистем c динамики движения совместно формированием дополнительных искусственных перекрестных связей, является достаточно перспективным для совершенствования методов интеллектуального сложными многосвязными объектами, управления функционирующими в условиях структурной, параметрической и функциональной неопределенности. Совершенствование многосвязных логических алгоритмов, формирующих адаптивную параметрическую и структурную коррекцию МСАУ СТО, а также их методами интеллектуального с существующими интеграция управления способствуют повышению эффективности управления сложным динамическим объектом.

Список литературы

1. Адаптивные системы управления газотурбинными двигателями летательных аппаратов / В. Ю. Рутковский, Б. Г. Ильясов, Ю. С. Кабальнов и др.; под ред. М. Н. Красильщикова. – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 224 с.

Александров, А. Г. Оптимальные и адаптивные системы
 / А. Г. Александров. – М.: Высшая школа, 1989. – 263 с.

3. Анализ и синтез линейных интервальных динамических систем (состояние проблемы) / Ю. М. Гусев, В. Н. Ефанов, В. Г. Крымский и др. // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1991. – № 1 (С. 3–24); №2 (С. 3–30).

4. Анализ периодических движений в многосвязных системах с нечеткими регуляторами в сепаратных подсистемах / Б. Г. Ильясов, Р. А. Мунасыпов, Г. А. Саитова и др. // Мехатроника, автоматизация, управление: Теоретический и прикладной науч.-техн. журн. – 2004. – №8. – С. 24–29.

5. Анализ устойчивости систем автоматического управления: учебное пособие / Б. Г. Ильясов и др.; под ред. Б. Г. Ильясова; Уфимск. гос. авиац. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2006. – 204 с.

6. Антипин, А. Ф. Основные принципы построения универсальной системы программирования логического регулятора на основе чётких термов / А. Ф. Антипин // Электротехнологии, элкетропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. в 2 т. / редкол.: Ю. Г. Матвеев и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2007. – Т.2. – С.10–12.

7. Артемьев, В. М. Управление в системах с разделением времени
/ В. М. Артемьев, В. А. Ганэ, В. Л. Степанов. – Минск: Вышэйшая школа, 1982. –
223 с.

Баркин, А. И. Устойчивость линейных систем с запаздыванием / А. И.
 Баркин // Автоматика и телемеханика. – 2006. – № 3. – С. 3–7.

9. Белоглазов, Д. А. Анализ методов устойчивости нечетких систем управления / Д. А. Белоглазов, Е. Ю. Косенко // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. – № 2 (139). – С. 127–133.

 Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2007. – 751 с.

 Богданов, А. В. Многомерный четкий логический регулятор с отработкой продукционных правил в ситуационных подпрограммах / А. В. Богданов,
 Е. А. Муравьева, Т. В. Сазонова // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2012. – № 5. – С. 248–252.

Боднер, В. А. Автоматика авиационных двигателей / В. А. Боднер. –
 М.: Оборонгиз, 1956. – 400 с.

Боднер, В. А. Системы автоматического управления двигателями летательных аппаратов / В. А. Боднер, Ю. А. Рязанов, Ф. А. Шаймарданов. – М.: Машиностроение, 1973. – 248 с.

14. Бураков, М. В. Нечеткие регуляторы: учеб. пособие / М. В. Бураков. – СПб.: ГУАП, 2010. – 252 с.

15. Бураков, М. В. Синтез нечетких логических регуляторов
/ М. В. Бураков, А. С. Коновалов // Информационно-управляющие системы. –
2011. – №1. –С. 22–27.

16. Васильев, С. Н. О некоторых результатах по устойчивости переключаемых и гибридных систем / С. Н. Васильев, А. И. Маликов // Актуальные проблемы механики сплошной среды. – 2011. – Т. 1. – С. 23–81.

17. Гуревич, О. С. Интегрированное управление силовой установкой многорежимного самолета / О. С. Гуревич, Ф. Д. Гольдберг, О. Д. Селиванов; под ред. О. С. Гуревич. – М.: Машиностроение, 1993. – 304 с.

18. Гусев, Ю. М. Проектирование систем автоматического управления газотурбинных двигателей (нормальные и нештатные режимы) / Ю. М. Гусев, Н. К. Зайнашев, А. И. Иванов; под ред. Б. Н. Петрова. – М.: Машиностроение, 1981. – 400 с.

Добрянский, Г. В. Динамика авиационных ГТД / Г. В. Добрянский,
 Т. С. Мартьянова. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.

20. Дьяконов, В. П. *Matlab*. Полный самоучитель / В. П. Дьяконов. – М.: ДМК-Пресс, 2014. – 768 с.

21. Емельянов, С. В. Построение оптимальных систем автоматического регулирования второго порядка с использованием предельных значений коэффициентов усиления элементов контура регулирования / С. В. Емельянов, А. И. Федотова // Автоматика и телемеханика. – 1960. – Т. 21(1). – С. 56–63.

22. Емельянов, С. В. Системы автоматического управления с переменной структурой / С. В. Емельянов. – М.: Наука, 1967. – 562 с.

23. Емельянов, С. В. Способ получения сложных законов регулирования с использованием лишь сигнала ошибки и ее первой производной / С. В. Емельянов // Автоматика и телемеханика. – 1957. – Т. 18(10). – С.873–885.

24. Емельянова, С. В. Применение нелинейных корректирующих устройств типа «Ключ» для улучшения качества систем автоматического регулирования второго порядка / С. В. Емельянов // Автоматика и телемеханика. – 1959. – Т. 7 (20). – С. 867–883.

25. Изерман, Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М.: Мир, 1984 – 541 с.

26. Ильясов, Б. Г. Алгоритм реконфигурации структуры многосвязной системы автоматического управления из условия устойчивости на основе частотных методов / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, А. Ш. Назаров // Вестник УГАТУ. – Уфа: УГАТУ, 2012. – Т. 16, № 3 (48). – С. 3–10.

27. Ильясов, Б. Г. Анализ запасов устойчивости гомогенных многосвязных систем управления / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2009. – № 4. – С. 4–12.

28. Ильясов, Б. Г. Анализ многосвязных систем управления с нелинейной коррекцией подсистем / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: мат. 13-й Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2011. – С. 127–130.

29. Ильясов, Б. Г. Анализ нелинейных многосвязных систем автоматического управления с логическими регуляторами / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: мат. 17-й Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2015. – С. 609–614.

30. Ильясов, Б. Г. Анализ устойчивости многосвязных систем автоматического управления с логическими регуляторами / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: мат. 16-й Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2014. – С. 574–579.

31. Ильясов, Б. Г. Анализ устойчивости цифровых многосвязных систем /
Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: мат. 14-й Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2012. – С. 569–576.

32. Ильясов, Б. Г. Исследование устойчивости однотипных многосвязных систем автоматического управления с голономными связями между подсистемами / Б. Г. Ильясов, Ю. С. Кабальнов // Автоматика и телемеханика. 1995. – № 8. – С. 82–90.

33. Ильясов, Б. Г. Концепция проектирования адаптивных многосвязных САУ газотурбинных двигателей / Б. Г. Ильясов, А. Ш. Назаров, Г. А. Саитова // Мехатроника, автоматизация и управление: мат. II Рос. мультиконф. по проблемам управления. – СПб.: Изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2008. – С. 219–222..

34. Ильясов, Б. Г. Логический закон управления сепаратной подсистемой при структурно-параметрических изменениях многосвязного объекта / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2014. – № 11. – С.585–595. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/739091.html (дата обращения: 10.06.2015).

35. Ильясов, Б. Г. Многосвязная система управления с корректирующим устройством на основе комбинированной логики / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова,

И. И. Сабитов // 8-я Всерос. мультиконф. по проблемам управления. – Ростов-на-Дону: Изд-во Юж. фед. ун-та, 2015. – Т. 1. – С.71–73.

36. Ильясов, Б. Г. Об одном подходе к построению адаптивных многосвязных систем автоматического управления сложным динамическим объектом / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, А. Ш. Назаров // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2010. – №8. – С. 13–20.

37. Ильясов, Б. Г. Программное обеспечение поддержки принятия решения при проектировании систем автоматического управления многосвязной системой / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITIDS'2014): тр. 2-й Междунар. конф. – Уфа: УГАТУ, 2014. – Т. 1. – С. 125–130.

38. Ильясов, Б. Г. Программное обеспечение поддержки принятия решения при проектировании МСАУ СДО с логическими регуляторами / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITIDS'2015): тр. 3-й Междунар. конф. – Уфа: УГАТУ, 2015. – Т. 1. – С. 103–106.

39. Ильясов, Б. Г. Разработка нелинейной модели определения коэффициентов регулятора с помощью откликов искусственной нейронной сети / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // Информационные технологии и системы: сб. науч. тр. 2-й Междунар. конф. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2013. – С. 90–92.

40. Ильясов, Б. Г. Синтез многосвязных систем автоматического управления с логическими связями между подсистемами / Б. Г. Ильясов, И. И. Сабитов // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. – 2015. – № 1. – Режим доступа: www.science-educa*t*ion.ru/121-17530 (дата обращения: 24.11.2015).

41. Ильясов, Б. Г. Управление газотурбинным двигателем с помощью логических регуляторов / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // Наука и

технологии: сб. науч. тр. 34-й Всерос. конф. по проблемам науки и технологий. – М.: РАН, 2014. – Т. 3. – С. 156–162.

42. Ильясов, Б. Г. Управление многосвязными системами на основе логических регуляторов / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // 6-я Всерос. мультиконф. по проблемам управления. – Ростов-на-Дону: Изд-во Юж. фед.ун-та, 2013. – Т. 2. – С.21–24.

43. Ильясов, Б. Г. Управление многосвязными системами на основе логических регуляторов / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18, № 2 (63). – С. 98–102.

44. Ильясов, Б. Г. Применение логического регулятора для управления авиационным газотурбинным двигателем / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. № 4 (79). С. 131-136.

45. Ильясов, Б. Г. Управление многосвязными системами с запаздыванием на основе логических регуляторов / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // XII Всерос. совещ. по проблемам управления. – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 1370–1377.

46. Ильясов, Б. Г. Многосвязная система автоматического управления газотурбинным двигателем на основе логического закона управления / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // Управление в морских и аэрокосмических системах: мат. 7-й Рос. мультиконф. по проблемам управления. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. – С. 625–632.

47. Интеллектуальные системы автоматического управления / под ред.
И. М. Макарова, В. М. Лохина. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.

48. Интеллектуальные системы управления и контроля газотурбинных двигателей / С. Н. Васильев, Р. А. Бадамшин, С. С. Валеев и др.; под ред. С. Н. Васильева. – М.: Машиностроение, 2008. – 550 с.

49. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Т. 2: Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д. П. Ким. – М.: Физматлит, 2007. – 440 с.

50. Кудинов, Ю. И. Нечеткие регуляторы и системы управления /
Ю. И. Кудинов, И. Н. Дорохов, Ф. Ф. Пащенко // Проблемы управления. – 2004. –
№ 3. – С. 2.–14.

51. Кудинов, Ю. И. Построение адаптивного нечеткого комбинированного регулятора в многосвязных системах / Ю. И. Кудинов, И. Ю. Кудинов // Проблемы управления: научно-техн. журн. – 2006. – № 5. – С. 12–18.

52. Леоненко, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

53. Любомудров, Е. В. Применение теории подобия при проектировании систем управления ГТД / Е. В. Любомудров. – М.: Машиностроение, 1971. – 200 с.

54. Масютина, Г. В. Структурно-параметрический синтез адаптивной системы управления на основе нечеткой логики / Г. В. Масютина, В. Ф. Лубенцов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – №5. – С. 165–170.

55. Мееров, М. В. Исследование и оптимизация многосвязных систем управления / М. В. Мееров. – М.: Наука, 1986. – 384 с.

56. Мирошник, И. В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 2000 – 549 с. – (Сер. «Анализ и синтез нелинейных систем»).

57. Мишин, А. В. Общая структура управления сложными системами /
 А. В. Мишин // Автоматизация и современные технологии. – 2003. – №6. – С.23–28.

58. Модели систем автоматического управления и их элементов: М-74 учеб. пособие / С. Т. Кусимов, Б. Г. Ильясов, В. И. Васильев и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 214 с.

59. Морозовский, В. Т. Многосвязные системы автоматического регулирования / В. Т. Морозовский. – М.: Энергия, 1970. – 288 с.

60. Муравьева, Е. А. Управление технологическими процессами, реализованное на четких логических регуляторах: монография / Е. А. Муравьева, М. Б. Гузаиров. – М.: Машиностроение, 2012. – 305 с.

61. Нелинейные корректирующие устройства в системах автоматического управления / А. А. Вавилов, Ю. М. Козлов и др.; под ред. чл.-корр. АН СССР Ю. И. Топчева – М.: Машиностроение, 1971 – 469 с.

62. Нелинейные системы. Частотные и матричные неравенства / под ред.
А. Х. Гелига, Г. А. Леонова, А. Л. Фрадкова. – М.: Физматлит, 2008. – 607 с.

63. Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов / А. А. Шевяков, Т. С. Мартьянова, В. Ю. Рутковский и др.; под общ. ред. А.А. Шевякова, Т.С. Мартьяновой. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

64. Основы теории многосвязных систем автоматического управления летательными аппаратами: учеб. пособие / С. Ф. Бабак, В. И. Васильев, Б. Г. Ильясов и др.; под ред. М. Н. Красильщикова. – М.: Изд-во МАИ, 1995. – 288 с.

65. Островский, Г. М. Применение нелинейных корректирующих устройств в системах автоматического регулирования второго порядка / Г. М. Островский // Автоматика и телемеханика. – 1956. – Т. 17(11). – С. 979–984.

66. Патент России на Изобретение № 2574841. Способ логического управления сложным многосвязным динамическим объектом / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов. Заявка № 2014154114/06; заявл. 29.12.2014;

67. Петров, Б. Н. Избранные труды. Т. 1. Теория управления.
– М.: Физматлит, 2004. – 382 с.

68. Петров, Б. Н. О применении условий инвариантности / Б. Н. Петров //
Тр. II Всесоюзного совещания по теории автоматического регулирования.
– Т. II. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – С. 241–246.

69. Петунин В. И. Особенности синтеза многосвязных систем автоматического управления с селектором каналов / В. И. Петунин // Вестник УГАТУ. 2008. – Т. 11, № 1 (28). – С. 11–17.

70. Поляк, Б. Т. Робастная устойчивость и управления / Б. Т. Поляк,
 П. С. Щербаков. – М.: Наука, 2002. – 303 с.

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

72. Расчетное исследование динамической характеристики одновального турбореактивного двигателя / Д. А. Ахмедзянов, Ю. М. Ахметов, А. Б. Козловская, А. Е. Михайлов // Вестник УГАТУ. – Уфа: УГАТУ, 2011. – Т. 15, № 1 (41). С. 15–25.

73. Сабитов, И. И. Методика расчета коэффициентов ПИ регулятора для сепаратных каналов многосвязной САУ / И. И. Сабитов // Управление большими системами: сб. науч. тр. 10-й Всерос. шк.-конф. молодых ученых. – Уфа: УГАТУ, 2013. – Т. 2. – С. 90–93.

74. Сабитов, И. И. Применение логических регуляторов в каналах многосвязной системы / И. И. Сабитов // Мавлютовские чтения: сб. науч. тр. 7-й Всерос. молодеж. науч. конф. – Уфа: УГАТУ, 2013. – Т. 3. – С. 282–283.

75. Сабитов, И. И. Применение нейронной сети для определения первоначальных коэффициентов нелинейного логического корректирующего устройства /
И. И. Сабитов // Интеллектуальные технологии обработки информации и управления (ITIPM'2012): тр. Междунар. молодеж. конф. – Уфа: АРКАИМ, 2015. – Т. 2. – С. 23–25.

76. Γ. A. Информационное обеспечение Саитова, процесса проектирования многосвязной системы автоматического управления С требуемыми запасами устойчивости / Г. А. Саитова, И. И. Сабитов, Е. А. Халикова // Информационные технологии и системы [Электронный ресурс]: тр. Четвертой Междунар. науч. конф. ИТиС – 2015: науч. электрон. изд. / отв. ред. Ю. С. Попков, А. В. Мельни-ков. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2015. – С. 176–178.

77. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618326. Анализ и синтез многосвязной системы автоматического

управления с запаздыванием / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов и др. – Заявка № 2012616093; Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 14.09.2012.

78. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611581. Анализ и синтез пропорционально-интегрального регулятора для сепаратных каналов многосвязной системы автоматического управления / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов. – Заявка № 2013661459; Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 06.02.2014.

79. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2015613251. Программа логического управления сепаратной подсистемой в составе сложного динамического объекта / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов и др. – Заявка № 2014663145; Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 10.03.2015.

80. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2015613647. Программа синтеза многосвязной системы автоматического управления с логическими регуляторами / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов. – Заявка № 2015610698; Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 20.03.2015.

81. Синтез систем управления методом структурных функций / С. Т. Кусимов, Б. Г. Ильясов, В. И. Васильев, Р. А. Мунасыпов // Труды 8 Средиземноморской конф. IEEE по управлению и автоматизации (MED'2000). Патрас, Греция, 2000. – WB 2-5. – С. 1–6 (на англ. языке).

82. Системы автоматического управления авиационными ГТД: энциклопед. справочник / под ред. д.т.н., проф. О. С. Гуревича. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. – 208 с.

83. Системы автоматического управления с запаздыванием: учеб. пособие
/ Ю. Ю. Громов, Н. А. Земской, А. В. Лагутин, О. Г. Иванова, В. М. Тютюнник. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 76 с.

84. Соколов, Н. И. Адаптивные системы автоматического управления летательными аппаратами: учеб. пособие для студентов авиационных

специальностей вузов / Н. И. Соколов, В. Ю. Рутковский, Н. Б. Судзиловский. – М.: Машиностроение, 1995. – 208 с.

85. Соловьев, В. В. Алгоритм синтеза адаптивного нечеткого регулятора /
В. В. Соловьев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – №1 (138). –
С. 161–165.

86. Справочник по теории автоматического управления / под ред.
 А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

87. Старикова, М. В. Исследование автоматических систем с логическими управляющими устройствами / М. В. Старикова, под ред. Б. Н. Петрова. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.

88. Таран, В. А. Применение нелинейной коррекции и переменной структуры для улучшения динамических свойств систем автоматического регулирования / В. А. Таран // Автоматика и телемеханика. – 1964. – Том 25(1). – С. 140–149.

89. Теряев, Е. Д. Цифровые системы и поэтапное адаптивное управление /
Е. Д. Теряев, Б. М. Шамрико. – М.: Машиностроение, 1999. – 330 с.

90. Управление динамическими системами в условиях неопределённости
/ С. Т. Кусимов, Б. Г. Ильясов, В. И. Васильев и др.; под ред. С. Т. Кусимова,
Б. Г. Ильясова, В. И. Васильева. – М.: Наука, 1998. – 452 с.

91. Усков А. А. Интеллектуальные технологии управления.
Искусственные нейронные сети и нечеткая логика / А. А. Усков, А. В. Кузьмин. –
М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 143 с.

92. Усков, А. А. Интеллектуальные системы управления на основе методов нечеткой логики / А. А. Усков, В. В. Круглов. – Смоленск: Смоленская городская типография, 2003. – 177 с.

93. Уткин, В. И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой / В. И. Уткин. – М.: Наука, 1974. – 272 с.

94. Федоров, С. М. Методы синтеза нелинейных систем автоматического управления / С. М. Федоров. – М.: Машиностроение, 1970.

95. Филимонов, А. Б. Спектральная декомпозиция систем с запаздываниями. Компенсация запаздываний / А. Б. Филимонов. – М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2002. – 288 с.

96. Флюгге-Лотц, И. Метод фазовой плоскости в теории релейных систем: пер. с англ. / И. Флюгге-Лотц. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 176 с.

97. Хлыпало, Е. И. Нелинейные системы автоматического регулирования: расчет и проектирование / Е. И. Хлыпало; под ред. Е. А. Попова. – Л.: Энергия, 1967. – 451 с.

98. Частотный метод анализа и синтеза многомерных систем автоматического регулирования / Б. Н. Петров, Б. А. Черкасов, Б. Г. Ильясов, Г. Г. Куликов // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 247, №2. – С. 304–307.

99. Черкасов Б.А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1988. – 359 с.

100. Черкасов, Б. А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей / Б. А. Черкасов. – М.: Машиностроение, 1988. – 359 с.

101. Чернодуб, А. Н. Обзор методов нейроуправления / А. Н. Чернодуб,
 Д. А. Дзюба // Проблемы программирования. – 2011. – № 2. – С. 79–94.

102. Чинаев, П. И. Методы анализа и синтеза многомерных автоматических систем / П. И. Чинаев. – Киев: Техніка, 1969. – 378 с.

103. Шаймарданов, Ф. А. Численный метод синтеза МСАУ ГТД и условия обеспечения необходимых запасов устойчивости / Ф. А. Шаймарданов, Г. Г. Куликов, О. Л. Свитский // Автоматическое регулирование двигателей летательных аппаратов: труды ЦИАМ. – 1983. – Вып. 24.

104. Шевяков, А. А. Системы автоматического управления авиационными воздушно-реактивными силовыми установками / А. А. Шевяков. – М.: Машиностроение, 1992. – 432 с.

105. Шевяков, А. А. Автоматика авиационных и ракетных силовых установок / А. А. Шевяков. – М.: Машиностроение, 1965. – 546 с.

106. Шигин, Е. К. Нелинейные системы автоматического регулирования со звеном, обладающим характеристикой типа ∆ / Е. К. Шигин; МВТУ им. Баумана // Механика. – 1959. – № 92.

107. Шигин, Е. К. Об улучшении переходных процессов корректирующими звеньями с переменными параметрами / Е. К. Шигин // Автоматика и телемеханика. – 1958. – Том 19(4). – С. 306–311.

108. Штода, А. В. Системы управления и регулирования авиационных двигателей: учебник / А. В. Штода, Ф. Н. Морозов, А. Г. Шиуков; под ред. А. В. Штоды. – М.: ВВИА, 1977. – 267 с.

109. Albertos P., Antonio S. Multivariable Control Systems: An Engineering Approach. – Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, 2004. – 340 pp.

110. Asarin E., Bournez O., Dang T., Maler O., Pnueli A. Effective synthesis of switching controllers for linear systems // Proceedings of the IEEE: Special issue on hybrid systems. 2000. – V. 88. – P. 1011–1025.

111. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. - ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006 – 461 pp.

112. Bazazzade M., Badihi H., Shahriari A. Improved *turbine* engine hierarchical modeling and simula*t*ion based on engine fuel con*t*rol system // Journal of Aerospace Science & Technology, 2009, – vol. 6, – pp. 45–53,.

113. Chapman S. J. MATLAB Programming for Engineers. 4th edition. – CL Engineering, 2008 – 478 pp.

114. Chipperfield A. J., Bica B., Fleming P. J. Fuzzy scheduling con*t*rol of a gas *t*urbine aero-engine: a mul*t*iobjec*t*ive approach // IEEE Transac*t*ions on Indus*t*rial Elec*t*ronics, 2002, – vol. 49, no. 3 – pp. 536–548,.

115. Edmond A. J. Phase margins for mul*t*ivariable control systems // International Journal of Control 1990, – vol 52 – pp. 485–498

116. Gasparyan O.N. Linear and Nonlinear Mul*t*ivariable Feedback Con*t*rol: A. Classical approach. –John Wiley and Sons, L*t*d. 2008.

117. Gaylord R. C., Keller W. N. Attitude Control System Using Logically Controlled Pulses / R. C. Gaylord, W. N. Keller // Progr. Astronaut and Rocketry. – London: Acad. Press, 1962. – Vol. 8.

118. Hamel B. A mathematical study of on-off controlled higher-order systems.
Proc. of the Symposium on nonlinear circuit analysis // Symposium Proc. -New York:
Polytechnic Institute of Brooklyn, 1956. – vol. VI – P. 225–232.

119. Ilyasov B.G., Saitova G.A., Sabitov I.I. Multivariable control system of gas turbine engine with logical controllers // Информатика и информационные технологии (CSIT'2014): тр. 16-й междунар. конф. – Уфа: УГАТУ, 2014. – Т. 1. С. 224–228. (Опубл. на англ. яз.)

120. Ilyasov B.G., Saitova G.A., Sabitov I.I. Multivariable control system with a regulator based on hybrid logic algorithms // Информатика и информационные технологии (CSIT'2015): тр. 17-й междунар. конф. – Уфа: УГАТУ, 2015. – Т. 1. С. 132–136. (Опубл. на англ. яз.)

121. Liberzon D. Switching in systems and control. – Boston: Birkhäuser, 2003.– 233 pp.

122. Lichtsinder M., Levy Y. Jet engine model for control and real-time simulations // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006 - vol. 128, no. 4 - pp. 745–753.

123. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. – Int. J. Man-Mach. Stud. 1975, – vol. 7 – p. 1–13.

124. Mann G.K.I., Bao-Gang Hu., Gosine R.G. Analysis of direct action fuzzy
PID controller structures. – IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part
B, vol. 29, Issue 3, Jun 1999, p. 371 – 388.

125. Mohan B.M., Sinha A. A simplest fuzzy PID controller: analytical structure and stability analysis. - India Annual Conference, 2004. Proceedings of *t*he IEEE INDICON 2004. First. 20-22 Dec. 2004, p.288 – 293.
126. Nelson G. M., Lakany H. An investigation into the application of fuzzy logic control to industrial gas turbines // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007 – vol. 129, no. 4 – pp. 1138–1142.

127. Sio K.C., Lee C.K. Stability of fuzzy PID controllers. – IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1998 – Part A, vol. 28, Issue 4 – pp. 490–495.

128. Sun Z., Ge S. Analysis and synthesis of switched linear control systems //Automatica. 2005. – V. 41(2). – P. 181–195.

129. Tang K.S., Man K.F., Chen G., Kwong S. An op*t*imal fuzzy PID con*t*roller.
- IEEE Transac*t*ions on Indus*t*rial Elec*t*ronics, 2001 – vol. 48, Issue 4, – pp. 757 - 765.

130. Xu J., Feng X. Design of adaptive fuzzy PID tuner using optimization method. // Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004. – vol. 3, – pp.2454–2458.

131. Yang Y., Wang W.-G., Yu D.-J., Ding G. A fuzzy parameters adaptive PID controller design of digital positional servo system. // International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2002 – vol. 1, – p.310–314.

132. Yesil E.; Guzelkaya M.; Eksin I. Internal model control based fuzzy gain scheduling technique of PID controllers. // World Automation Congress, 2004 – Vol. 17 – p. 501–506.