

А.С. КУЛИК

**ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ
РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ОБЪЕКТАМИ**



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»

А.С. КУЛИК

**ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ
РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ОБЪЕКТАМИ**

Харьков «ХАИ» 2016

УДК 519.876.2:62-50 (047)

ББК 32.965:22.17

К 90

Розглянуто особливості раціонального управління об'єктами за допомогою нового принципу управління по діагнозу. Описано моделі і методи діагностування та відновлення працездатності багатовимірних, багатозв'язних об'єктів, що піддаються дестабілізуючим впливам. Наведено результати досліджень з раціонального управління працездатністю функціональних блоків автономних літальних апаратів.

Для фахівців в області проектування систем автоматичного управління, а також докторантів, аспірантів, магістрів і студентів відповідних спеціальностей.

Рецензенты: Раскин Лев Григорьевич, заведующий кафедрой компьютерного мониторинга и логистики Национального технического университета «ХПИ», доктор технических наук, профессор.

Бодянский Евгений Владимирович, профессор кафедры искусственного интеллекта Харьковского Национального университета радиоэлектроники, доктор технических наук, профессор.

Утверждено к изданию в качестве монографии на заседании Учёного совета Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» (протокол № 5 от 20 января 2016 года).

ISBN 978-966-662-707-3

К 90 Кулик А.С. Элементы теории рационального управления объектами [Текст] / А.С. Кулик – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2016 – 255 с.

Рассмотрены особенности рационального управления объектами посредством нового принципа управления по диагнозу. Описаны модели и методы диагностирования и восстановления работоспособности многомерных, многосвязных объектов, подверженных дестабилизирующим воздействиям. Приведены результаты исследований по рациональному управлению работоспособностью функциональных блоков автономных летательных аппаратов.

Для специалистов в области проектирования систем автоматического управления, а также докторантов, аспирантов, магистров и студентов соответствующих специальностей.

Ил. 64 Табл. 4 Библиограф.: 186 назв.

УДК 519.876.2:62-50 (047)

ISBN 978-966-662-707-3

©Кулик А.С., 2016

©Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	5
ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ГЛАВА I. ПРЕДПОСЫЛКИ, ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ	11
1.1. Аргументация рационального подхода к управлению объектами.....	11
1.2. Тенденция парирования неопределённостей в объектах автоматического управления.....	24
1.3. Понятия и положения рационального управления объектами.....	31
ГЛАВА II. СПЕЦИФИКА ОБЪЕКТОВ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ	40
2.1. Традиционные модели функциональных элементов систем автоматического управления.....	40
2.2. Модели объектов рационального управления.....	49
2.3. Анализ преобразовательных свойств моделей объектов рационального управления.....	59
2.4. Диагностические логические модели.....	67
ГЛАВА III. СИГНАЛЬНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ	70
3.1. Истоки сигнально-параметрического диагностирования.....	71
3.2. Обнаружение дестабилизации.....	77
3.3. Локализация дестабилизирующих фрагментов.....	81
3.4. Определение типов дестабилизирующих воздействий.....	91
3.5. Идентификация видов дестабилизирующих воздействий.....	98
3.6. Организация диагностирования объектов рационального управления.....	102
ГЛАВА IV. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБЪЕКТОВ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ	107
4.1. Основные положения синтеза управлений с помощью функций А. М. Ляпунова.....	108
4.2. Синтез алгоритмов параметрической подстройки.....	115
4.3. Синтез алгоритмов сигнальной подстройки.....	123
4.4. Синтез алгоритмов реконфигурации аппаратуры	128
4.5. Управление реконфигурацией алгоритмов.....	135

ГЛАВА V. РАЦИОНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ БЛОКА ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ЛЕТАЮЩИХ МОДЕЛЕЙ.....	140
5.1. Назначение, устройство и функции летающих моделей.....	141
5.2. Блок измерителей. Назначение, устройство, принцип действия.....	147
5.3. Диагностическое обеспечение фрагмента блока измерителей.....	152
5.4. Восстановление работоспособности фрагмента блока измерителей.....	160
5.5. Результаты стендовых экспериментальных исследований датчиков канала курса летающих моделей.....	166
ГЛАВА VI. РАЦИОНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ БЛОКА ЭЛЕКТРОМАХОВИЧНЫХ ПРИВОДОВ.....	172
6.1. Назначение, принцип действия и устройство электромаховичных приводов.....	173
6.2. Математическое описание номинального режима функционирования.....	179
6.3. Диагностическое обеспечение блока электромаховичных приводов.....	185
6.4. Восстановление работоспособности блока электромаховичных приводов.....	190
6.5. Исследование рационального управления работоспособностью блока электромаховичного привода.....	196
ГЛАВА VII. РАЦИОНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....	208
7.1. Причины нарушения работоспособности летательных аппаратов как объектов управления.....	208
7.2. Математические описания номинальных движений летательных аппаратов.....	214
7.3. Диагностическое обеспечение летательных аппаратов.....	221
7.4. Восстановление работоспособности летательных аппаратов.....	230
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	239
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	241

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
БД – блок диагностирования;
БИ – блок измерителей;
БОР – беспилотный орбитальный ракетоплан;
БП – блок приводов;
БПЛА – беспилотный летательный аппарат;
БУ – блок управления;
ВРД – восстановление работоспособности датчиков;
ГВД – генератор видов дестабилизации;
ДЛМ – диагностическая логическая модель;
ДУ – датчик угла;
ДУС – датчик угловой скорости;
ДР – диагностирование работоспособности;
ДРД – диагностирование работоспособности датчиков;
ДФМ – диагностическая функциональная модель;
И – интегратор;
ИВД – имитатор видов дестабилизации;
ЛА – летательный аппарат;
М – маховик;
МАЛИ – маневренное автономное летающее изделие;
МКА – малогабаритный космический аппарат;
НИИ ПФМ – научно-исследовательский институт проблем физического моделирования режимов полёта самолётов;
ОАУ – объект автоматического управления;
ОУ – объект управления;
ОДВ – объект диагностирования и восстановления;
ОДО – обобщенный динамический объект;
ОРУ – объект рационального управления;
ППВ – правила поиска видов;
ППТ – правила поиска типов;
ППФ – правила поиска фрагментов;
САУ – система автоматического управления;
САРУ – система автоматического рационального управления;
СГ – свободный гироскоп;

СЛМ – свободнолетающая модель;
ТАУ – теория автоматического управления;
ТГ – тахогенератор;
ТЗ – техническое задание;
ТСП – технические средства подстройки;
ТСР – технические средства реконфигурации;
УАУ – устройство автоматического управления;
УП – усилитель-преобразователь;
УРУ – устройство рационального управления;
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;
ЭД – электродвигатель.

*Невозмутимый строй во всем,
Созвучье полное в природе;
Лишь в нашей призрачной свободе
Разлад мы с нею сознаём.*

*Ф. И. Пютчев (1803 – 1873) – российский
поэт, дипломат*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Неуклонное повышение конструктивной сложности, уровня многообразия функций, масштабности и энергоёмкости автоматически управляемых динамических объектов обуславливает увеличение множества факторов, оказывающих дестабилизирующее влияние на процессы управления. На каждом этапе научно-технического развития такое объективное противоречие в теории и практике автоматического управления разрешается посредством поиска и формирования новых идей и инструментальных средств, позволяющих найти приемлемые и конструктивные компромиссные решения.

Продуктивной, на современном этапе развития, представляется идея приспособления к дестабилизирующим воздействиям посредством интеллектуальной автоматизации процессов диагностирования и восстановления работоспособности динамических объектов.

Непредвиденные – нештатные ситуации появляются на каждом этапе жизненного цикла, начиная от замысла и заканчивая утилизацией. Поиск причин нештатных ситуаций традиционно производится с помощью технических средств и интеллектуальных способностей специалистов. Накопленный опыт по диагностированию динамических систем автоматического управления позволяет перейти к разработке моделей, методов и процедур структурно-формализованного автоматического диагностирования.

В практике восстановления работоспособности управляемых динамических объектов автоматического управления широко используются средства сигнальной и параметрической подстроек, алгоритмической и аппаратурной реконфигурации. Уровень приобретенного опыта позволяет перейти к алгоритмизации процесса восстановления посредством разработки моделей, методов и процедур гибкого управления средствами восстановления по текущему диагнозу в реальном масштабе времени.

В монографии представлены первые результаты системного объединения формализационного и слабоформализованного описания процессов

диагностирования и восстановления работоспособности на единой методологической основе для всех этапов жизненного цикла объектов автоматического управления. Опытнo-экспериментальные и теоретические исследования по системному объединению этих интеллектуальных процессов привели к необходимости формирования новых связей с помощью принципа управления по диагнозу и разработки моделей, методов и средств рационального управления объектами автоматического управления в условиях дестабилизирующих воздействий.

В первой главе представлена аргументация известных мыслителей о необходимости разумного взаимоотношения с Природой, сбалансированного, взвешенного и осмотрительного сочетания искусственного и естественного интеллектов при создании искусственных систем различного назначения и, в частности, систем автоматического управления объектами. Масштабность и энергоемкость таких систем, в связи с растущей актуальностью проблемы безопасности среды обитания – биосферы, обуславливает необходимость совершенствования техносферы посредством таких тенденций как совершенствование ресурсосберегающих технологий, повышение живучести и стойкости при дестабилизирующих воздействиях, снижение материальных и технико-экономических затрат на весь жизненный цикл и ряд других аналогичных тенденций. Обеспечить такие тенденции возможно также посредством интеллектуализации всех этапов жизненного цикла систем автоматического управления. Интеллектуализация может быть осуществлена с помощью рационального управления, базирующегося на глубоком диагностировании и гибком восстановлении работоспособности объектов автоматического управления на всех этапах жизненного цикла.

Вторая глава посвящена специфике рационального управления. Объектами рационального управления могут быть как объекты автоматического управления, так и их функциональные блоки. Все свойства объектов рационального управления представлены с помощью двух непересекающихся множеств, а именно, первое множество содержит свойства, характеризующие номинальные режимы функционирования, а второе – свойства адаптации к дестабилизирующим воздействиям. Описаны модели и критерии, обеспечивающие как необходимые, так и достаточные условия рационального управления.

Особенности сигнально-параметрического диагностирования объектов рационального управления изложены в третьей главе. Здесь дана характеристика истоков сигнально-параметрического подхода к диагностированию динамических объектов и его структуризация. Последовательно описаны задачи обнаружения, локализации, типизации и

идентификации дестабилизирующих воздействий и методы их решения, базирующиеся на соответствующих диагностических функциональных и логических моделях. Описана организация процесса диагностирования объектов рационального управления.

Восстановление работоспособности объектов рационального управления – это процесс обеспечения такого его состояния, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, будут соответствовать требованиям ТЗ. Как восстановить работоспособность, чтобы обеспечить устойчивость и качество процесса? На эти и другие вопросы можно найти ответы в четвёртой главе. Модели и алгоритмы восстановления приведены для таких известных средств, как сигнальная и параметрическая подстройки, реконфигурация алгоритмов и приборов. Для обеспечения устойчивости и качества процессов восстановления использован метод синтезирующих функций А.М. Ляпунова.

В пятой главе представлены результаты научно-исследовательской деятельности по рациональному управлению работоспособностью блока гироскопических датчиков, которые использовались на летающих моделях разработки научно-исследовательского института проблем физического моделирования режимов полета самолетов. Приведены модели датчиков углов и датчиков угловых скоростей, использованных в стенде для исследования датчиков канала курса. Подробно описаны процедуры диагностического обеспечения датчиков стенда. Представлено дихотомическое дерево поиска видов дестабилизации датчиков канала курса. Восстановление работоспособности датчиков производилось с использованием таких избыточных средств, как приборные, функциональные и алгоритмические. Приведены результаты стендовых экспериментальных исследований датчиков канала курса по рациональному управлению их работоспособностью в условиях дестабилизирующих воздействий.

Рациональное управление работоспособностью блока электромаховичных приводов в системах ориентации космических аппаратов рассмотрено в шестой главе. Здесь описаны назначение, принцип действия и устройство электромаховичных приводов, их математические модели для номинального режима функционирования в непрерывной и дискретной формах. Приведено диагностическое обеспечение блока электромаховичных приводов пирамидальной структуры для макетного варианта микроспутника. Описаны алгоритмы восстановления работоспособности блока электромаховичных приводов. Представлены результаты экспериментальных исследований по рациональному управлению работоспособностью блока электромаховичных приводов макетного варианта микроспутника.

Седьмая глава посвящена результатам исследований по рациональному управлению работоспособностью летательных аппаратов как объектов управления. Описаны известные причины нарушения работоспособности таких классов, как самолёты, беспилотные малогабаритные аппараты и космические аппараты. Представлены математические описания номинальных движений этих классов летательных аппаратов. Описаны особенности разработки диагностического обеспечения для летающей модели Су-17 в условиях боевых повреждений. Представлены результаты исследований по диагностированию малого космического аппарата. Описаны избыточные ресурсы, имеющиеся на летательных аппаратах и используемые для восстановления их работоспособности при различных видах дестабилизации посредством параметрической и сигнальной подстроек, структурной реконфигурации.

В монографии представлены результаты, полученные в научно-исследовательских работах, проводимых на кафедре систем управления летательных аппаратов в течении ряда лет. В этих исследованиях приняли участие преподаватели кафедры, аспиранты и докторанты. Благодаря заинтересованному, творческому участию сотрудников автор получал возможность восходить на новые уровни понимания и кристаллизации представлений о рациональном управлении. Автор глубоко признателен коллегам: А.П. Козию, Н.П. Разиньковой, А.Г. Чухраю, С.Н. Пасичнику, С.Н. Фирсову, А.Н. Тарану, В.Г. Джулгакову, К.И. Руденко, К.Т. До, В.Т. Нгуену, О.Ю. Златкину, О.А. Лученко, В.Ф. Симонову за вдохновляющую атмосферу сотрудничества и полученные результаты.

Поддержку при работе над темой рационального управления автор получал от ректора университета В.С. Кривцова и проректора по НИР А.В. Гайдачука, за что им благодарен.

Большую помощь в компьютерной подготовке рукописи оказали Е.И. Мазурина, И.Э. Мишина, а на завершающей стадии редактирования С.Н. Пасичник, и автор глубоко ценит затраченный ими труд.

Автор сердечно благодарит рецензентов Л.Г. Раскина и Е.В. Бодянского за доброжелательное отношение к теме исследований и полученным результатам.

Благодарю свою семью за плодотворные условия, позволившие реализовать задуманное.

Анатолий Кулик, г. Харьков

ГЛАВА I

ПРЕДПОСЫЛКИ, ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

*Никто не должен преступать меры:
мудрость жизни – знать во всём меру.
Гиппократ (460 – 370 гг. до н.э.),
знаменитый древнегреческий
врач, «отец медицины»*

Теория автоматического управления представляет собой развивающуюся область знания о принципах, моделях и методах автономной стабилизации и позиционирования объектов различной, не полностью определенной, физической природы. Не полная определенность обуславливается приближенностью модельных представлений как объектов управления, так и нестационарностью условий функционирования систем автоматического управления. Возрастающая энергетическая масштабность и функциональная уникальность таких систем приводят к нештатным ситуациям, оказывающим ощутимые дискомфортные влияния на среду обитания людей, животных, растений и в целом на биосферу. Это обстоятельство обуславливает поиск новых идей, а также инструментальных средств автоматического управления создаваемых искусственных объектов. В этой главе представлены результаты посильного авторского анализа противоречий в базовых тенденциях теории и практике автоматического управления. Приведены особенности нового компромисса посредством рационального управления, базирующегося на глубоком диагностировании и гибком восстановлении работоспособности объектов автоматического управления.

1.1 Аргументация рационального подхода к управлению объектами

1. Трудami мыслителя Владимира Ивановича Вернадского (1863 – 1945) положено начало новому системному пониманию процессов, происходящих на нашей Планете. Его гениальное учение о биосфере как области взаимодействия планетарных и космических сил с живым веществом, которое активно преобразует окружающую природу, способствовало пониманию научно-философской сущности

взаимодействия человека с Природой и появлению, в связи с интенсивным развитием техносферы, острейших проблем глобальной безопасности среды обитания человека. В результате научных исканий и размышлений о перспективе биосферы ученый обосновал гипотезу о естественной насущной необходимости трансформации биосферы в сферу разума, – ноосферу, обеспечивающую глобальный гомеостаз Природы, посредством рационального, гармоничного, уважительного сотрудничества человека с Природой. «Ноосфера есть новое геологическое явление на нашей планете. В ней впервые человек становится **крупнейшей геологической силой**. Он может и должен перестраивать своим трудом и мыслью область своей жизни, перестраивать коренным образом по сравнению с тем, что было раньше. Перед ним открываются все более и более широкие творческие возможности» [1].

О необходимости рациональной ([лат. *rationalis*] – разумно обоснованной, целесообразной, базирующейся на здравом смысле) организации социумов и государств пишется во многих основополагающих трудах теологов и религиозных деятелей, философов и ученых, воспринимавших Природу как единую, целостную систему [2 – 7]. Настойчиво утверждается мысль, что Природа – это сложнейшее, уникальное системное образование, в котором люди только ее часть и поэтому они должны жить по законам этой системы – Природы, не нарушая дозволенных, установленных границ, быть законопослушными. Следовательно, задача человека – это сотрудничество с себе подобными и остальной частью Природы по установленным, объективно существующим законам так, чтобы не нарушать равновесие, баланс, гармонию этого уникального системного образования, ее самоорганизацию. Человек лучшая часть Природы, её венец, так как наделён разумом, позволяющим разрабатывать, производить, эксплуатировать и утилизировать неприродные, искусственные образования – различные технические системы. Поэтому *homo sapiens* должен предвидеть последствия своих деяний и нести за них ответственность перед Природой.

Все в Природе взаимосвязано в иерархическую систему систем. Привнесение в эту иерархию новых, неприродных, искусственных объектов приводит к появлению ранее не известных, не прогнозируемых, с непредсказуемыми дестабилизирующими последствиями, беспрецедентных системных эффектов. Примеры последствий от снарядов времен войны, удобрений, гербицидов, ракетного топлива, радиоактивных отходов, промышленных и бытовых отходов, плотин и искусственных морей, пластиковых изделий, электромагнитных полей цифровых коммуникаций, космического мусора и многих других человеческих деяний. «Образ жизни,

наши мысли и само понимание мира за это столетие неузнаваемо изменились. Но вместе с тем новые возможности поставили нас перед лицом трудностей, о которых еще несколько десятилетий назад никто и не предполагал. И главная из них та, что человечество обрело возможность самоуничтожения» [7]. Поэтому человек должен предвидеть, просчитать и анализировать последствия своих инженерных деяний и нести за них персональную ответственность перед матушкой Природой. Как нести ответственность учит одна из древнейших, жизненно необходимых во все времена наук – это наука об управлении, изучающая особенности биосферных процессов и трансформирующая полученные знания во все сферы человеческой деятельности. Н. Н. Моисеев (1917 – 2000), занимавшийся моделированием биосферных процессов утверждал, что «биосфера Земли – сложнейшая нелинейная система, в которой происходит непрерывное взаимодействие различных механизмов, трансформирующих ее организацию. Эти механизмы реализуют огромное количество как положительных, так и отрицательных обратных связей, что сохраняет «устойчивое неравновесие», как обозначение такого свойства самоорганизации биосферы, которое обеспечивает сочетание дестабилизирующих механизмов и механизмов биотической регуляции в рамках непрерывного ее развития, т. е. усложнение ее организации» [8]. Наука об управлении начиналась с отдельных маленьких ручейков человеческих познаний и пониманий отдельных простых направлений взаимодействия человека с Природой. Эти ручейки со временем расширялись и углублялись, образовав полноводную реку общих знаний об изученных и управляемых частях биосферы. Процесс познания биосферы продолжается, что способствует неизбежному переходу в ноосферу. Наука об управлении развивающаяся область человеческого знания, отражающая самые сложные, уникальные процессы управления в Природе. Теория автоматического управления значительно более молодое научное направление, базирующееся на тех научных достижениях управления, которые оказалось возможным перенести в области создания искусственных систем автоматического управления. Закономерное движение цивилизации в ноосферу обуславливает разумно разрабатывать весь жизненный цикл искусственных систем, обладающих способностью рационально приспосабливаться к изменяющимся условиям среды.

2. Известные научные направления: дуальное управление, оптимальное управление, ситуационное управление, управление в условиях неопределенности, адаптивное управление и др. базируются на идеализации и формализации отдельных аспектов физических объектов управления. При формализации используются средства и методы построения математических

моделей, позволяющие абстрагироваться от реальной действительности. Фундаментальное свойство любых моделей, в том числе и математических, состоит в том, что модель принципиально беднее оригинала. На «бедной» модели объектов невозможно сформировать «богатое» управление, приносящее максимально возможный эффект Природе. В известных направлениях объект управления – это закрытая система или частично закрытая, в которой связи со средой существенно ограничены, так как принцип идеализации вынуждает принимать компромисс в пользу возможностей используемых математических средств. Реальные процессы подгоняются под математические средства, и при этом отсекается то, что мешает. Зачастую, математические средства, описывающие динамику объектов управления и позволяющие решать как прямые, так и обратные задачи, – линейные. Реальные физические объекты управления нелинейны по своей природе, поэтому между реальными и идеальными объектами управления существует возрастающее расхождение, удаление.

Устойчивая тенденция расширения функциональных возможностей систем управления приводит к существенному усложнению объектов управления и непреодолимым трудностям учета всех реальных связей, а следовательно, и к невозможности построения адекватных моделей, отражающих появление новых системных эффектов. Если в понимании и учете изменяющихся условий среды функционирования (связей среды) есть значительный прогресс (авиация, космонавтика, транспорт, батискафы, химические, металлургические производства), то в понимании изменяющихся свойств объектов управления и их средств управления, а тем более в их оценках такого прогресса нет. Аварии и катастрофы в техногенной сфере деятельности – это плата за непонимание, невежество, несовершенство проектирования всего жизненного цикла систем управления объектами. За игнорирование связей, новых системных эффектов приходится платить обществу, цивилизации самой дорогой платой – ухудшением среды обитания.

3. Механизмы управления в живой Природе поражают воображение своей живучестью, эффективностью, простотой, совершенством и стабильностью. Из открытых и познаваемых механизмов наибольшее применение в мире искусственных объектов и процессов управления получил механизм приспособления, адаптация в малом, т. е. в малых диапазонах изменения характеристик, обусловленных интервальной непознанностью дестабилизирующих факторов – возмущающих воздействий. Идея приспособления – адаптации породила соответствующие модели и методы синтеза систем управления. Принцип управления по отклонению – это принцип адаптации в малом. «Все течет, все изменяется» – утверждал

Гераклит в VI веке до н. э. Как же отразить изменяющиеся свойства объекта управления? Проверенный веками подход – это зафиксировать знание фазового состояния в какой-то момент времени. Тогда происходящие изменения рассматривать как отклонения от этого эталонного состояния. Поэтому в теории автоматического управления (ТАУ) знания об объекте фиксируются в номинальной математической модели, а все последующие новые состояния – это отклонения от номинального, вызванные возмущениями. Итак, в ТАУ закрепился подход для отражения изменений объекта управления с помощью номинальной модели и действующих возмущений. Управление таким объектом производится с помощью принципа управления по отклонению от задающего воздействия. Отклонения вызваны возмущениями, действующими на объект управления.

Рассматривать состояния объектов исследования в «малом» и в «большом», наверное, первым предложил А. М. Ляпунов (1857 – 1918) в своей докторской диссертации «Общая задача об устойчивости движения». В работе доказано, что процессы, события, состояния в «малом» и «большом» отличаются и обладают спецификой, адекватно представленной в соответствующих классах моделей динамики:

- 1) линейных в «малом»;
- 2) нелинейных в «большом».

Граница между этими моделями строго не определена. Формально – это диапазон ε -окрестности в «малом», а за пределами в «большом». Исследование устойчивости системных образований предложено А. М. Ляпуновым производить с помощью двух различных методов, в основе которых различные математические модели, идеи и средства анализа. Первый метод А. М. Ляпунова позволяет решать практические задачи анализа и синтеза линейных систем управления. Второй метод тоже позволяет решать эти задачи, но для нелинейных систем управления. При этом неформализованным моментом и на сегодня остается выбор функции Ляпунова. Требования к функции порождают множество вариантов решений, сократить которые можно с привлечением других практических ограничений и на основе здравого смысла, профессионального опыта и текущей практической целесообразности формировать рациональное управление.

4. Открытие принципов управления происходило на заре человеческой цивилизации в процессе осознания Человека как части Природы – этого удивительного по своей гармоничности, целесообразности и слаженности функционирования МИРА-КОСМОСА, понимаемого древнегреческими философами Платоном и Аристотелем, как упорядоченное гармонично целое, с разумным порядком. Воплощение этих открытий в первых, простейших

орудиях труда поражает глубиной проникновения в суть основополагающих принципов управления и оригинальностью их воплощения в различных ловушках – приспособлениях для ловли птиц, зверей и рыб. В дальнейшем, по мере освоения энергий ветра, воды и пара, появился как для развлекательных, так и потребительских целей ряд оригинальных изобретений автоматических устройств, представленных Героном Александрийским, А. Ромелли, Х. Гюйгенсом, Ж. Понселе, братьями Сименс, Ж. Жаккаром, И. Ползуновым, Дж. Уаттом и др. [9]. Эти изобретения строились по наитию и на основании опыта работы с преобразованием одного вида энергии в другой, т. е. интуитивно, а также с желанием автоматизировать некоторые виды человеческой деятельности, следовательно, формировались на рациональной основе. В расчетных схемах, если они и были, преобладала, обусловленная знаниями той эпохи неопределенность, которая существенно уменьшалась в процессе экспериментальной доводки изобретений и опытной их эксплуатации.

В эпоху создания промышленных паровых машин и использования их для получения энергии вращательного движения исполнительных механизмов различного назначения со стабильной угловой скоростью, поддерживаемой центробежными регуляторами, появилась склонность паровых машин с такими регуляторами к самораскачиванию, к неустойчивой работе. Знания механики того периода не позволяли производить необходимые для конструкций регулятора технические расчеты, обеспечивающие безотказную работу системы «машина-регулятор». Благодаря работе знаменитого английского физика Джеймса Клерка Максвелла (1831 – 1879) «О регуляторах», опубликованной в 1868 г. [10] был сделан крупный шаг в деле создания теории регулирования – это применение метода малых колебаний к исследованию устойчивости движения системы «машина-регулятор». Но как бороться с явлением самораскачивания? В работе Максвелла ясных указаний на этот вопрос инженеры не могли найти. Впервые ответы на этот и другие вопросы практики дали теоретические исследования, выполненные гениальным ученым и практиком Иваном Алексеевичем Вышнеградским (1831 – 1895) и представленные в работе 1876 года «О регуляторах прямого действия» [11]. «Можно сказать, что И. А. Вышнеградский впервые правильно схематизировал проблему движения обычной паровой машины, снабженной обычным центробежным регулятором Уатта, и положил начало теории регулирования, способной оказывать существенную помощь регуляторостроению» – такую высокую оценку вклада И. А. Вышнеградского в становление теории автоматического регулирования дает академик А. А. Андронов [12]. В последующем подход, а также инструментальные

средства, используемые И. А. Вышнеградским, были развиты швейцарским профессором Аурелом Стодолой (1859 – 1942) в области конструирования и расчета тепловых двигателей, паровых и газовых турбин. Работы А. Стодолы [13] завершают создание классической теории автоматического регулирования двигателей.

Итак, гениальными учеными в результате теоретических исследований был найден путь технического решения проблемы безотказной работы системы «машина-регулятор» и заложены научные основы автоматического регулирования, базирующиеся на математических моделях первого приближения, критериях корневой устойчивости и качества переходных процессов. С этого времени начинается интенсивное внедрение принципа управления по отклонению, а затем и других принципов по задающему и возмущающему воздействиям в различных объектах для автоматизации процессов управления, а также масштабные и фронтальные теоретические исследования по решению новых задач устойчивости и качества процессов автоматического управления с целью обеспечения в конечном итоге принципиально возможного уровня безотказности функционирования автоматических систем [14]. На протяжении всей короткой истории развития теории автоматического управления прослеживается тенденция, что практика внедрения в Природу искусственных объектов с автоматическим управлением демонстрирует с упрямым постоянством дерзкие вызовы теории управления посредством техногенных катастроф.

5. История практического использования классических принципов управления убеждает в необходимости совершенствования их в «большом». Результаты использования в «малом» (линеаризованные модели, малая интервальная неопределенность внешних и внутренних возмущений, задачи локальной стабилизации и позиционирования) поражают широтой, эффективностью и целесообразностью. Однако при выходе возмущающих воздействий, как внешних, так и внутренних за малые пределы, возникают бесчисленные нештатные ситуации, сводящие на нет положительные эффекты, пользу автоматизации, иногда принося непоправимый вред среде обитания человека.

Классификация возмущающих воздействий на внешние – помехи и внутренние – отказы в значительной степени условная и применяется для высоких уровней идеализации объектов управления и условий их функционирования. Для реальных объектов и условий все возмущающие воздействия – это дестабилизирующие нормальный, расчетный режим функционирования факторы, по другому, как внешние так и внутренние воздействия принадлежат к одному классу дестабилизирующих воздействий.

Если внешние воздействия приводят к размытости сигналов – интервальной неопределенности в функционировании объекта управления, то внутренние воздействия приводят не только к существенному изменению параметров математических моделей, а даже к изменению их структуры, т. е. к существенной неопределенности – событийной. Усложнение, для таких условий, систем автоматического управления породило интенсивное увеличение средств защиты, контроля, индикации, оповещения и аналогичных других. В основе их функционирования – разомкнутый принцип преобразования информации. Поэтому задача таких средств – оповестить, т. е. передать ответственность лицу, принимающему решение, или отключить, следовательно, «обезопасить» себя. Факты их ложных срабатываний, а также несрабатываний свидетельствуют о небезупречной их работе и о необходимости их контролировать. Это извечная проблема «сторожей над сторожами». С неизбежными в силу неполноты знаний нештатными ситуациями необходимо взаимодействовать по-другому!

Для управления объектом с событийной неопределенностью уже недостаточно информации об отклонении выходных сигналов от их эталонных значений. Требуются конструктивные данные о месте действия, классе и виде дестабилизации и соответствующие средства их парирования.

Процессы управления – информационно-энергетические или, другими словами, информационно-ресурсные. «Отрыв» информационно-преобразовательной особенности управления от практических средств его реализации привёл к развитию непродуктивного направления в теории. Причины:

- 1) нарушение системности путем игнорирования энергетических, а следовательно, и физических связей между функциональными элементами системы;
- 2) увлечение идеальными моделями, которые, «принципиально беднее оригинала» – фундаментальное свойство моделей;
- 3) игнорирование рационального подхода к формированию управления, в основе которого учет реальных условий функционирования и нахождения не локального технико-экономического компромисса, а более широкого, учитывающего необходимость симбиоза человека и Природы.

Убедительным подтверждением этих причин служит судьба аналитического конструирования регуляторов, описанная Ю. П. Петровым [15] со знанием темы, конструктивно и с убедительными доказательствами неработоспособности из-за потери устойчивости таких регуляторов при неизбежных на практике вариациях параметров системы управления.

Теоретическое предположение о точном знании параметров системы управления – это высокая идеализация свойств, приводит к результатам синтеза, физически не осуществимых на практике. Так, при аналитическом конструировании синтез регуляторов производится по среднеквадратичному критерию. При даже малых отклонениях параметров от расчетных значений замкнутые системы автоматического управления теряли устойчивость. Здесь нарушение принципов системного подхода привело к тому, что решалась задача обеспечения минимума среднеквадратичной ошибки в отрыве от задачи обеспечения устойчивости, т. е. не учитывалась связь свойств устойчивости и точности, а также последовательность решения управленческих задач. И еще, мы живем в изменяющемся динамическом мире. «Все движется» – утверждал Гераклит Эфесский (VI – V вв до н. э.) в своем главном сочинении «О природе». И «Солнце – не только новое каждый день, но вечно и непрерывно новое». Характер и интенсивность этих изменений – неопределенные события. Известное противоречие между необходимым – устойчивость и достаточным – качеством условиями работоспособности замкнутых систем не разрешается формально, а путем практического рационального компромисса, поиска баланса, равновесия, гармонии, так как по Гераклиту «гармония мира натянута в противоположные стороны, как у лиры и лука».

Разработка и производство систем управления объектов ракетно-космической техники связаны со значительными материальными и стоимостно-временными затратами на различные испытания. Поэтому такой подход назван расчетно-экспериментальным, в котором нет «жестких» и готовых методов синтеза систем управления, а есть методы нахождения компромиссных решений на каждом этапе проектирования, конструирования и производства, а также в целом всего проекта. Этот подход формирования не оптимальной системы управления, а рациональной, полученной в результате использования традиций и опыта фирмы, интуиции разработчиков и производителей, а также здравого смысла при выполнении технического задания на изделие.

Модели, методы и средства проектирования САУ в «малом» доведены до совершенства, а в «большом» находятся в процессе развития посредством совершенствования классических принципов управления, рассмотрения нештатных состояний, вызванных дестабилизирующими воздействиями, как возможных состояний с событийной неопределенностью в системах управления.

6. Неопределенности на практике обычно возникают вследствие неточности изготовления, изменении параметров при старении и износе,

неточности сведений о динамике процесса управления, стохастической природы внешних воздействий. Чтобы обеспечить управление в таких условиях прибегают к новой идее самоприспосабливающегося, адаптивного и самообучающегося управления. «Идея адаптации в сложной системе возникла в связи с изучением поведения живых существ, так как среди них эти качества широко распространены и проявляются наиболее ярко. Адаптация означает способность системы изменять свою структуру и самонастраиваться в соответствии с изменяющейся обстановкой. Это – фундаментальное свойство живых организмов. Безусловно, это свойство является желательным атрибутом для современной системы управления. Одна из существенных особенностей адаптивного управления процессами состоит в том, что условия работы системы заранее неизвестны или известны лишь частично». Так убеждал еще в 70-е годы XX столетия известный управленец Ю. Ту [16]. И далее конструктивное предложение – «управление с адаптацией и самообучением отличается от обычного управления стохастическим процессом тем, что в первом случае в ходе процесса управления производится переоценка стратегии управления в свете имеющейся неопределенности и результатов ее изучения».

Еще один аргумент в пользу адаптации от популярного в конце прошлого столетия П. Эйкхоффа [17]. «Со времени применения знаменитого регулятора Уатта в бесчисленном множестве ситуаций стало ясно, что введение обратной связи можно использовать как эффективное средство для борьбы с неопределенностями. Эти неопределенности могут быть результатом непредсказуемых воздействий (возмущений) на систему со стороны среды или могут зарождаться внутри рассматриваемой системы (например, износ, старение, порча катализатора и т. д.). Обычная обратная связь может устранить влияние неопределенности или по крайней мере уменьшить эффект этого влияния до пренебрежимой величины. Конечно, это не панацея, и применение этого рецепта имеет свои границы. Эти ограничения проявляются в тех случаях, когда происходят большие изменения параметров; в этой ситуации возможно использование принципа адаптивного управления».

А вот утверждение П. Эйкхоффа, соответствующее основному положению рационального управления. «Априорные знания об объекте обычно ограничены неопределенностью описания среды и неполнотой физической модели объекта». Как же управлять такими объектами? Какой выбрать подход? На эти и другие подобные вопросы последовал вполне логичный и конструктивный ответ. «Принцип дуального управления Фельдбаума предполагает одновременное существование двух функций: изучение или определение характеристик объекта и управление объектом для

приведения его к требуемому состоянию. К сожалению, столь рациональный подход к интересующим нас задачам приводит к теоретическим результатам, практическая реализация которых даже в простейших случаях связана с чрезвычайно громоздкими вычислениями Синтез системы управления можно разделить на две части: процесс идентификации и процесс управления. По аналогии с терминологией статистической теории управления будем называть это допущение гипотезой разделимости» Итак, из предложений упомянутых работ многих других ученых, обремененных решением проблемы адаптации, следует необходимость в рациональном подходе к парированию неопределенностей, вызванных действием дестабилизирующих факторов, состоящем из двух взаимосвязанных этапов. Первый – это идентификация устранимых причин дестабилизации посредством идентификации или диагностирования работоспособности объекта управления, а второй – это восстанавливающее управление работоспособностью объекта.

7. Обобщенная функциональная схема современных и перспективных систем автоматического управления многомерными и многосвязными объектами может быть представлена двумя взаимосвязанными подсистемами. Первая – это объект автоматического управления с цифровыми входами и выходами, состоящий из объекта управления, блока датчиков и блока приводов. Вторая подсистема включает цифровую вычислительную машину с аппаратно-программным интерфейсом и представляет собой устройство автоматического управления. Цифровая часть системы управления – устройство автоматического управления более надежная, безотказная, живучая в силу прогрессирующего развития, чем в значительной степени аналоговая, непрерывная, гетерогенная подсистема – объект автоматического управления. В связи с этим обстоятельством целесообразно сосредоточиться на неопределенностях объекта автоматического управления и парировать их посредством диагностирования работоспособности в замкнутом контуре, а затем по результатам диагноза восстанавливать работоспособность его составных частей, а следовательно, и всей системы автоматического управления в целом.

Таким образом осуществляется рациональное управление объектом автоматического управления, как наиболее уязвимой и незащищенной, но ответственной, базовой (основной) части системы автоматического управления, подверженной объективно существующим дестабилизирующим воздействиям неопределенного типа. В связи с этим, необходимо начинать проектировать объект не только как объект автоматического управления, а и как объект автоматического диагностирования и восстановления

работоспособности, обеспечивая его соответствующими аппаратными, алгоритмическими и программными средствами.

В условиях таких неопределенностей дестабилизирующих воздействий не представляется возможным формировать управление объектом автоматического управления по одному критерию, как в теории оптимального управления. Выход в формировании рационального управления – это управление, удовлетворяющее множеству критериев, как правило, часть из них противоречивы, и более того, не могут быть сведены к аналитической конструкции из известных задач оптимизации. Это множество таких критериев, удовлетворение которых сбалансировано посредством итерационного, неформализованного процесса нахождения приемлемого в рамках конкретного проекта компромисса. По-другому, рациональное управление – это компромиссное управление посредством разумного использования арсенала доступных средств для эффективного достижения поставленных целей и задач. Так, при формировании технического задания на создание системы управления летательным аппаратом заказчиком выдвигается целый ряд требований, исходя из целей и задач миссии. Эти требования противоречивы. В процессе формирования находят эвристический компромисс, так как нет формальных средств, позволяющих найти оптимальное решение в такой многокритериальной постановке. Единственный путь, многократно подтвержденный на практике, это разумное, технически и научно обоснованное управление процессом нахождения приемлемого для всех разработчиков и производителей компромисса, являющегося по сути динамическим как на этапах разработки эскизного и рабочего проектов, так и в период производства и летных испытаний.

Практика проектирования, производства, эксплуатации и утилизации систем автоматического управления беспилотными объектами выдвигает целый ряд проблемных задач, решение которых позволило бы найти новый, более гармоничный компромисс в расходуемых материалах и энергетических ресурсах, полученных эффектах и влияниях (воздействиях) на участников миссий и среду обитания, а в целом – на Природу. Основные положения для решения этих актуальных и сложных задач представляются такими:

1) дестабилизирующие воздействия на объект автоматического управления рассматривать как неопределенные события, вызывающие одно из множества его возможных состояний;

2) объект с событийной неопределенностью должен удовлетворять не только критериям управляемости и наблюдаемости, а и критериям диагностируемости и восстанавливаемости работоспособности;

3) на всех этапах жизненного цикла систем автоматического управления использовать одни и те же принципы, модели и методы автоматического диагностирования и восстановления работоспособности объекта автоматического управления;

4) модифицирование принципов управления по отклонению и по возмущению с целью расширения их функциональных возможностей по выявлению устранимых причин нештатного функционирования объекта автоматического управления;

5) совершенствование методов принятия рациональных решений по управлению избыточными ресурсами объекта для гибкого восстановления его работоспособности в реальном масштабе времени;

6) использование для объектов с событийной неопределенностью математических моделей, отражающих связь признаков дестабилизирующих воздействий с реакциями, доступными для измерения и оценки, – диагностических моделей как качественных, так и количественных;

7) сбалансированность избыточных ресурсов, используемых для гибкого восстановления работоспособности объекта, с глубиной его диагностирования до устранимых причин дестабилизирующих воздействий.

Приведенная аргументация призвана привлечь внимание читателей к необходимости размышления о нарастающей дестабилизации результатов (последствий) научно-технического прогресса в Природе и помочь в выборе методов и средств нахождения разумного использования природных богатств, интеллектуальных и физических возможностей человеческого сообщества, а также в постановке целей и задач создания разумных систем управления беспилотными объектами, помогающими гармоничному сотрудничеству с природными ресурсами и оказывающими исчезающе малое влияние на среду обитания – биосферу. Для обеспечения экологически безопасных и гармоничных беспилотных объектов – роботов, необходимо стать на мировоззренческую платформу рационального отношения ко всем природным ресурсам. Существенным вкладом в это закономерное движение может стать новая парадигма создания и дальнейшего использования автономных малогабаритных и безопасных объектов различного назначения, обладающих развитой способностью самостоятельно приспосабливаться к объективно и реально изменяющимся условиям функционирования природной среды. И первым шагом в разработке такой исходной концептуальной схемы решения актуальных проблем должны быть экспериментально-теоретические исследования по разработке систем автоматического управления, разумно распознающих дестабилизирующие воздействия и парирующих устранимые причины их появления. В монографии предлагается проектирование таких

систем одним из возможных подходов, базирующемся на новых принципах управления, реализованных в соответствующих моделях, методах и средствах.

1.2 Тенденция парирования неопределённостей в объектах автоматического управления

Производственные отношения в любой общественно-экономической формации разрешают извечное противоречие между растущими потребностями и ограниченными возможностями. Исторические этапы практики автоматического управления свидетельствуют об уровнях найденного компромисса между потребностями общества и возможностями научно-технических достижений. Все этапы практики автоматического управления, начиная с зары человеческой цивилизации до конца XIX века, базировались на изобретательской деятельности, т.е. решения формировались на уровне интуиции и здравого смысла. Только когда повышение мощности паровых машин привело к неустойчивой работе центробежных регуляторов Дж. Уатта появилась насущная потребность в научном подходе к возникшей проблеме. С этого этапа начинается лавинообразное внедрение автоматического управления сначала в управлении паровыми машинами, затем электрическими. Неистовство научно-технического прогресса в середине XX века способствовало интенсивному внедрению автоматического управления во все сферы жизни и привело наряду с существенным повышением производительности общественного труда к целому ряду техногенных аварий и катастроф с тяжёлыми технико-экономическими и социальными последствиями. В этот период кристаллизуется представление передовой части цивилизации о насущной потребности мирового сообщества жить в безопасной среде обитания, а не быть заложниками неприродных и ненадёжных искусственных автоматических систем. Проблема экологической безопасности вырастает до уровня самой актуальной мировой проблемы дальнейшей судьбы земной цивилизации. Научно-технический уровень автоматического управления не обеспечивает должной безопасности из-за недостаточно развитых способностей систем управления выявлять и парировать самостоятельно возникающие нештатные ситуации. Итак, нужен новый компромисс между растущими потребностями мирового сообщества жить и развиваться в экологически чистой и безопасной среде и научно-техническими возможностями проектировать, производить, эксплуатировать и утилизировать «безвредные», безопасные системы автоматического управления.

Итак, актуальнейшая проблема в теории автоматического управления заключается в разработке концепции, моделей и средств управления, обеспечивающих безопасность всего жизненного цикла создаваемых систем автоматического управления объектами различной физической природы.

Фундаментальным основанием при разработке систем автоматического управления выступают различные, как по используемым средствам, так и по отражающим свойствам, модели. Построение моделей идеальных или материальных «по необходимости занимает центральное место в процедуре любого научного исследования». Такое место моделям определили отцы кибернетики А. Розенблют и Н. Винер [18]. Это обусловлено тем, что «модели выступают в качестве необходимого промежуточного звена между совокупностью утверждений теории и действительностью, которая приближенно отражается в соответствующих моделях [19]. Известно несколько определений модели в научной литературе, посвященной методологическим аспектам моделирования [19 – 21]. Наиболее конструктивным определением для прикладных областей представляется определение, данное Я. Г. Неуйминым: «Модель в общем смысле (обобщенная модель) есть создаваемый с целью получения и (или) хранения информации специфический объект (в форме мысленного образа, описания знаковыми средствами либо материальной системы), отражающий свойства, характеристики и связи объекта-оригинала произвольной природы, существенные для задачи, решаемой субъектом» [22].

Исторический взгляд на особенности, возникающие в ходе научных исследований, противоречий и коллизий, облакаемых в форму научных проблем, позволяет выявить, что «все научные проблемы начинаются как проблемы закрытого ящика, т. е. проблемы, в которых известно лишь небольшое число значимых переменных. Движение науки и состоит в прогрессирующем раскрытии этих ящиков» [18]. Используя эту закономерность при получении новых знаний, всё множество моделей, отражающих преобразовательные свойства объектов автоматического управления можно систематизировать с использованием иерархического принципа, сформулированного в статье «Роль моделей в науке» [18]. Буквально, суть этого принципа: «последовательное добавление данных, или переменных, ведёт постепенно к возникновению более совершенных теоретических моделей и, следовательно, к иерархии этих моделей – от относительно простых и абстрактных к более сложным, более конкретным теоретическим построениям». Используем этот принцип с позиции адекватного описания преобразовательных процессов в объектах автоматического управления. На рис. 1.1 представлена пятиуровневая

иерархия моделей, коррелирующаяся с основными этапами развития автоматики и теории автоматического управления.

Модели первого уровня иерархии появились с созданием автоматов для удовлетворения жизненно необходимых потребностей человека. Это многочисленные ловушки, капканы для ловли зверей, птиц и рыб на заре человеческой цивилизации. Затем появились различные самодействующие игрушки и приспособления для религиозных и развлекательных целей. В последующем человек научился использовать энергию ветра и воды в практических целях: были разработаны автоматические устройства, такие, как регулятор скорости вращения жернова при помоле зерна, созданный итальянским механиком Агостино Рамелли (1530 – 1590). «Приручение» энергии пара способствовало созданию автоматических регуляторов: И.И. Ползуновым в 1763 г., Д. Уаттом – в 1784 г., Ж. Понселе – в 1829 г., братьями Сименс – в 1845 г.

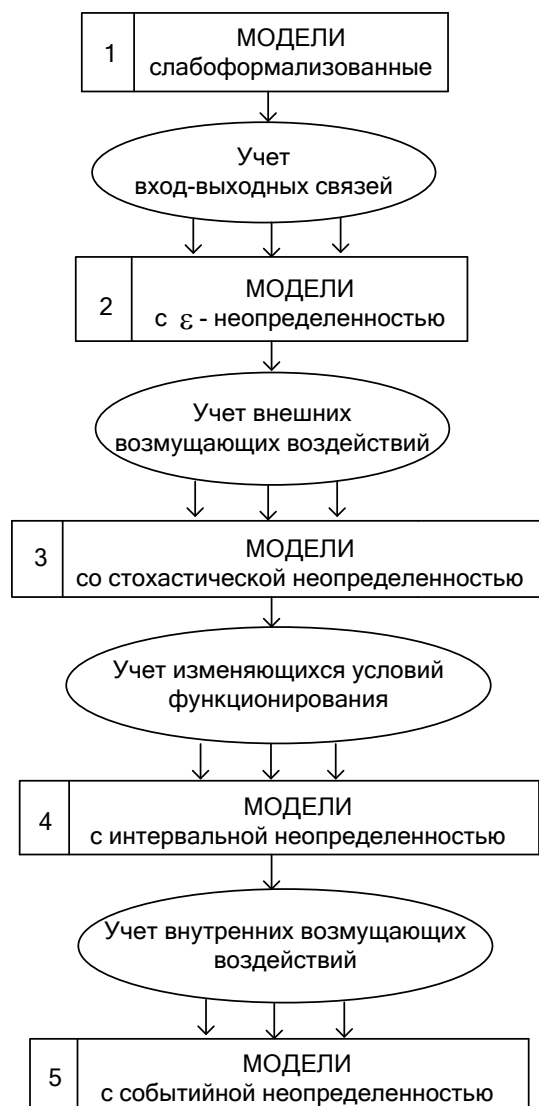


Рисунок 1.1 – Иерархия моделей объектов автоматического управления

Открытие электрической энергии позволило разрабатывать различные новые объекты управления, преобразующие электрическую энергию в механическую, световую и тепловую. Конструирование автоматических регуляторов на этом этапе развития автоматизации происходило с использованием «словесных», вербальных, в общем, лингвистических моделей, а также с помощью графических схем, отражающих физический принцип действия объекта. Выразительность используемых средств описания позволяла формировать самые простые модели – слабоформализованные.

Второй уровень моделей с ε -неопределённостью или с окрестной неопределённостью связан с периодом становления автоматического управления как научного направления. Трудрами Дж. Максвелла (1831 – 1879) [10], И.А. Вышнеградского (1831 – 1895) [11], А. Стодолы (1859 – 1942) [12], А.М. Ляпунова (1857 – 1918) [23] были заложены фундаментальные основы математического описания процессов преобразования в системе «паровая машина + центробежный регулятор» посредством линеаризации нелинейных характеристик в окрестности рабочей точки и отражения связи малого перемещения заслонки подачи пара в цилиндр машины с малым отклонением угловой скорости выходного вала от заданной с помощью линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Исследование малых колебаний в ε -окрестности оказалось более продуктивным, чем больших, и позволило конструктивно решать как задачу устойчивости, так и качества стабилизации угловой скорости вращения выходного вала паровой машины, так и других объектов автоматического управления.

На следующем этапе развития автоматического управления возросшие требования к качеству стабилизации и позиционирования объектов обусловили необходимость учёта как различных неопределённостей и помех, так и внешних нерегулярных возмущающих воздействий. Использование стохастических аппроксимаций таких воздействий привело к новым математическим моделям со стохастической неопределённостью. Работы А.Н. Колмогорова (1903 – 1987) [24], Н. Винера (1904 – 1984) [25], В.В. Солодовникова (1910 – 1991) [26] и др. способствовали широкому использованию математических моделей объектов автоматического управления со стохастической неопределённостью. Однако, использование таких моделей при синтезе по среднеквадратичному критерию качества, на практике приводило к потере устойчивости при малых отклонениях параметров объекта управления от расчётных значений. Более того, начали разрабатываться объекты управления, характеристики которых должны были изменяться в процессе их использования. Эти обстоятельства послужили

поводом для учёта в моделях изменяющихся условий функционирования объектов управления.

Существенно изменяющиеся условия функционирования объектов управления привели к необходимости использования нелинейных дифференциальных уравнений и общих характеристик их поведения в виде предельных циклов в фазовом пространстве. Академик А.А. Андронов (1901 – 1952) со своими сотрудниками впервые начали исследование таких нелинейных объектов управления и пришли к пониманию необходимости «грубости», допускающей возможность несущественного изменения характера движения, а следовательно, и вида дифференциальных уравнений [27, 28]. Свойство «грубости» или «робастности» отражается в моделях введением интервалов для коэффициентов дифференциальных уравнений. В этих интервалах коэффициенты могут изменяться неопределённым образом. Такие модели отнесены к четвёртому уровню предложенной иерархии.

Существенная масштабность и уникальность систем автоматического управления в энергетике, авиации, космонавтике, на транспорте, в различных производствах обусловили уязвимость их к действию таких дестабилизирующих факторов функционирования, как деградация и старение компонент, поломки и неисправности в объекте, сбои и ложные срабатывания в регуляторе, а в общем, отказы. Отказы было принято рассматривать как внутренние возмущающие воздействия, которые необходимо учитывать при формировании моделей аварийных объектов автоматического управления. Отказ – событие неопределённое по времени возникновения, месту, классу и виду проявления. Попытки использования для описания отказов объектов надёжностных характеристик натолкнулись на непреодолимую трудность получения достоверных данных интенсивностей отказов для вновь разрабатываемых изделий. Поэтому представление отказов в объектах автоматического управления как неопределённых событий получило развитие, начиная с работ R. V. Beard [29], R. M. Clark [30], R. Isermann [31], P. M. Frank [32], А. В. Мозгалева [35], А. С. Кулика, В. Г. Рубанова, Ю. Н. Соколова [34]. В последующем деление возмущающих воздействий на объект автоматического управления на внешние и внутренние всё более и более оказывалось условным, затрудняющим конструктивное модельное представление, а также и синтез всей системы автоматического управления. Это обстоятельство приводит к необходимости рассматривать все возмущающие воздействия как воздействия, дестабилизирующие расчётное функционирование объекта автоматического управления, причём дестабилизирующее неопределённым образом. Другими словами, дестабилизирующие воздействия – это неопределённые события по времени

появления, месту приложения, принадлежности к типовым классам и конкретному физическому виду. Таким образом, учёт влияния дестабилизирующих факторов приводит к моделям пятого уровня иерархии, а именно, к математическим моделям с событийной неопределённостью.

Итак, из описания представленной иерархии моделей следует, что свойства объекта управления на всех этапах развития автоматизации отражались приближенно в моделях, так как модель описывает только существенные с точки зрения решаемой задачи свойства. Таким образом, модель принципиально беднее реального объекта – это фундаментальное свойство модели. Другими словами, в модели изначально заложена неопределённость, обусловленная её приближённой точностью отражения реальных свойств объекта автоматического управления. Как же с неточной моделью можно добиться качественного решения задач стабилизации или позиционирования объекта автоматического управления? На каждом этапе развития теории автоматического управления для потребностей опережающей практики разрабатывались соответствующие методы синтеза законов управления, обеспечивающие необходимые и достаточные условия работоспособности автоматических систем. Эти методы основывались на двух принципах управления. А именно, принципе управления по отклонению и принципе управления по возмущению.

Успех принципа управления по отклонению обусловлен тем, что в процессе функционирования системы автоматического управления снимается неопределённость между моделью и действительностью.

Использование принципа управления по возмущению позволяет снимать неопределённость действия возмущения посредством его измерения и последующей компенсации.

Следует отметить, что эти принципы эффективны при малых изменениях как параметров объекта автоматического управления, так и малых возмущений, т. е. в пределах ε -окрестности или окрестной неопределённости.

В оригинальной, глубоко профессиональной книге Ю.П. Петрова [15] приведены убедительные доказательства и факты потери системами автоматического управления устойчивости из-за неконтролируемых отклонений некоторых параметров в объектах управления при использовании для синтеза законов классического арсенала средств оптимального управления. Появление неустойчивости приводило к нештатным ситуациям в эксплуатации таких систем автоматического управления. Причина заключалась в игнорировании факта неопределённости в модельном отражении свойств реального объекта управления, т. е. в чрезмерной его

идеализации, когда использовались модели со стохастической неопределённостью.

Появление объектов автоматического управления, функционирующих в условиях изменения своих характеристик, а следовательно, и параметров потребовало новых моделей с интервальной неопределённостью, что повлекло за собой разработку новых методов синтеза, базирующихся на параметрической идентификации и самонастройке в реальном масштабе времени [35 – 37]. Разработанные с помощью такого подхода системы автоматического управления качественно функционировали тогда, когда параметры объекта не выходили за пределы используемых при синтезе интервалов. Неизбежные поломки, неисправности, дефекты, а в общем отказы в реальных условиях эксплуатации приводили к таким изменениям параметров объектов, которые то ли невозможно было идентифицировать, то ли парировать посредством контуров самонастройки. Практика эксплуатации таких объектов потребовала учёта возможных отказов в новых моделях с событийной неопределённостью и соответствующих методов синтеза систем, устойчивых к отказам.

Появление целого ряда работ [38 – 41] способствовало привлечению внимания исследователей к проблеме управления объектами в нештатных ситуациях, что способствовало появлению спектра методов, базирующихся на использовании фильтров Р. Калмана и Д. Люенбергера для локализации отказа с последующей сигнальной параметрической компенсацией его последствий. В основе этих работ было предположение, что отказы объекта автоматического управления приводят к существенным изменениям коэффициентов линейных математических моделей, представленных в пространстве состояний. На практике спектр реальных отказов в объектах автоматического управления, за редким исключением, покрывался только изменением коэффициентов линейных моделей. Более того, при таком подходе глубина локализации ограничивалась только частью объекта автоматического управления, в который прошёл отказ, и компенсировалась не причина, а следствие. Эти обстоятельства побуждали к поиску новых моделей, адекватно отражающих нештатные ситуации объектов автоматического управления, вызванные как внешними, так и внутренними, в общем, дестабилизирующими воздействиями. А такие новые модели с событийной неопределённостью способствовали бы поиску и разработке новых принципов, методов и средств эффективного автоматического

управления.

Итак, на всех этапах развития теории автоматического управления увеличивающаяся (расширяющаяся) неопределённость модельного представления объектов управления компенсировалась разработкой оригинальных методов преобразования доступных измерению сигналов с целью формирования управляющих воздействий, обеспечивающих требуемые запасы устойчивости и показатели качества, с помощью продуктивного использования модифицированных классических принципов управления по отклонению и по возмущению. Представленные тенденции усложнения моделей объектов автоматического управления с целью конкретизации описания расширяющегося множества дестабилизирующих воздействий приводят к новому классу математических моделей с событийной неопределённостью. Разработка новых моделей, конкретизирующих причины дестабилизирующих воздействий на объект автоматического управления, позволяет начать исследования по расширению диагностических возможностей классических принципов управления, с целью выявления устранимых причин дестабилизирующих воздействий, а также их приспособлению (адаптации) для парирования выявленных причин дестабилизации посредством самоорганизации для обеспечения требуемых показателей безопасного функционирования таких систем автоматического управления.

1.3 Понятия и положения рационального управления объектами

Использование классических принципов автоматического управления по задающему воздействию, по возмущающему воздействию и по отклонению порождает функциональные схемы систем автоматического управления, состоящих из двух взаимосвязанных подсистем. Первая – это объект автоматического управления (ОАУ), включающая объект управления, исполнительные органы и измерители состояния – датчики. Вторая подсистема – это устройство автоматического управления (УАУ), состоящая из преобразовательных функциональных элементов, реализованных на специализированных цифровых вычислительных машинах и формирующих управляющие воздействия на ОАУ. Уровень безопасности используемых аппаратно-программных средств цифровой обработки сигналов в УАУ существенно и значительно выше уровня ОАУ. Поэтому самой уязвимой к дестабилизирующим воздействиям оказывается подсистема ОАУ.

Под работоспособным состоянием САУ будем понимать такое её состояние, при котором значения всех параметров, характеризующих

способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям технического задания (ТЗ).

Дестабилизирующие воздействия – это воздействия на ОАУ, нарушающие работоспособность САУ.

Для обеспечения работоспособности ОАУ в соответствии с ТЗ требуется выполнить необходимые и достаточные условия. На современном уровне развития автоматического управления необходимые условия – это обеспечение требуемых показателей запасов устойчивости. Достаточные условия – это обеспечение требуемых показателей качества. Выполнение необходимых и достаточных условий работоспособности САУ на этапе эксплуатации позволяет также удовлетворять и целому ряду вторичных требований по живучести, безаварийности, безотказности, отказостойкости, а в целом, безопасности функционирования САУ [38, 40, 45].

Широкое распространение принципа управления по отклонению обусловлено целым рядом бесспорных преимуществ по сравнению с другими принципами. Во-первых, это способность обнаруживать появление в контуре управления любых дестабилизирующих воздействий. Во-вторых, свойство компенсировать «малые» отклонения от заданного поведения, вызванные дестабилизирующими воздействиями. В-третьих, использование этого принципа позволяет корректировать с помощью соответствующих алгоритмов динамические свойства объектов автоматического управления с целью обеспечения требований ТЗ по запасам устойчивости и показателям качества.

При таких преимуществах использование принципа управления по отклонению не позволяет в полной мере обеспечить необходимые и достаточные условия работоспособности современных и перспективных САУ. С этой позиции рассмотрим недостатки принципа управления по отклонению:

1) компенсация последствий дестабилизирующих воздействий, а не парирование устранимых причин этих воздействий;

2) внутренняя противоречивость принципа, обусловленная необходимостью допустить действие дестабилизации, а затем компенсировать;

3) процесс компенсации вынуждает работать работоспособные функциональные элементы в затратных, интенсивных режимах, расходующих энергию и ресурс;

4) дестабилизирующие воздействия, приводящие к существенному изменению параметров системы и её структуры, не компенсируются;

5) время компенсации определяется временем переходного процесса САУ;

6) невозможна локализация дестабилизирующих воздействий и гибкая,

адресная и дифференцированная их нейтрализация;

7) дестабилизирующие воздействия – это не контролируемые и не измеряемые входы САУ.

Использование для управления ОАУ принципа по возмущающему воздействию позволяет, во-первых, выявлять из всех дестабилизирующих воздействий существенные и измерять их влияние на управляемые переменные. Во-вторых, компенсировать дестабилизирующее влияние на управляемые переменные. В-третьих, обеспечивать качественную компенсацию измеряемых дестабилизирующих воздействий.

Недостатки принципа управления по возмущению следующие:

- 1) использование информации только о существенных дестабилизирующих воздействиях;
- 2) необходимость их измерения с помощью соответствующих датчиков;
- 3) компенсация их влияния на работоспособность САУ, а не парирование причин.

Дальнейшим развитием и совершенствованием принципов управления по отклонению и по возмущению, позволяющим сохранить и приумножить их достоинства посредством устранения выявленных недостатков, представляется принцип управления по диагнозу. Блок-схема САУ, сформированная по этому принципу приведена на рис. 1.2.

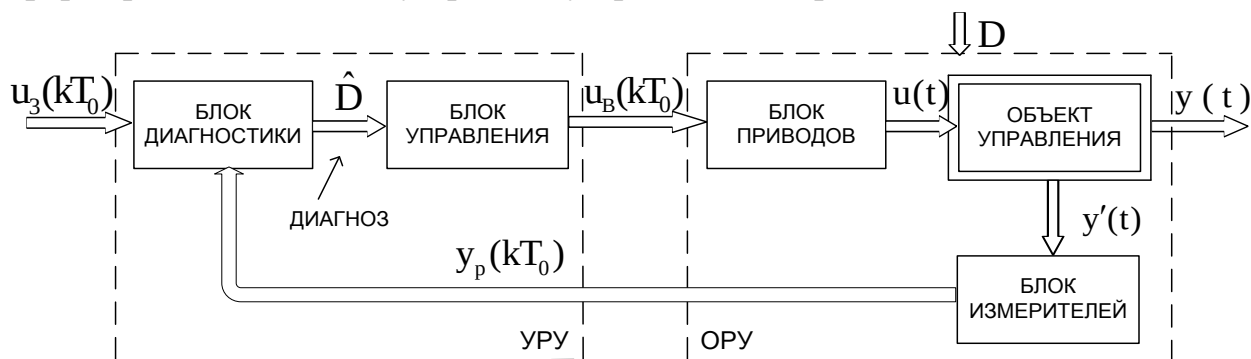


Рисунок 1.2 – Блок-схема системы автоматического управления по диагнозу

Итак, блок-схема САУ состоит из двух взаимосвязанных подсистем. Первая – это объект рационального управления (ОРУ), включающий объект управления (ОУ), блок приводов (БП) и блок измерителей (БИ) состояния. На всю подсистему ОРУ действует множество неконтролируемых, неопределенных дестабилизирующих воздействий – D , влияющих на вектор состояния ОУ. Вторая подсистема – устройство рационального управления (УРУ) состоит из блока диагностики (БД) работоспособности, в котором по векторным

сигналам задающему – $u_3(kT_0)$ и расширенному выходному $y_p(kT_0)$ формируется диагноз работоспособности ОАУ в форме оценок дестабилизирующих воздействий $\hat{D}$. В блоке управления (БУ) формируются управляющие воздействия $u_B(kT_0)$ на БП для восстановления работоспособности ОРУ по результатам его диагностирования – $\hat{D}$.

Ключевым в представленной блок-схеме является БД. Назначение блока заключается в формировании диагноза ОРУ. Для формирования диагноза требуется обнаружить дестабилизирующее воздействие, локализовать и идентифицировать его посредством поиска места, определения класса и установления вида.

Обнаружение дестабилизирующего воздействия – это установление факта отклонения в работоспособности ОРУ. Место – это конкретная, конструктивно-законченная часть – фрагмент ОРУ, подверженная дестабилизирующему воздействию, нарушающему его работоспособность. К примеру, i -ый исполнительный орган, j -ый измеритель состояния и т.п. Класс – это группа дестабилизирующих воздействий, приводящих к однотипному характеру нарушения работоспособности ОРУ. Например, дрейфы измерителей, уменьшение коэффициентов передачи исполнительных органов и т.п. Вид дестабилизирующего воздействия – это конкретное физическое его проявление, устранимое с помощью наличных избыточных ресурсов восстановления работоспособности и компенсации отклонений. Для примера, дрейф нуля j -го измерителя, положительный, величиной 1,5 град, уменьшение коэффициента передачи i -го ИО на $0,3Н \cdot м/В$ и т.п. Таким образом, в БД производится диагностирование, представляющее собой процесс последовательного установления факта появления дестабилизации, места её действия, определение класса и установление конкретного устранимого вида.

Назначение блока БУ заключается в рациональном выборе такого избыточного ресурса из имеющихся в САУ, использование которого позволяет для установленной причины дестабилизации $\hat{d}_i \in \hat{D}$ восстановить работоспособность ОРУ наилучшим в текущих условиях образом. Восстановление работоспособности по сути своей представляет трёхэтапный процесс. На первом – рациональный выбор, из имеющихся в ОРУ и БУ множества избыточных ресурсов, наиболее приемлемого в текущей нештатной ситуации. На втором – это парирование выявленных устранимых видов дестабилизации, с помощью выбранных ресурсов. На третьем этапе производится компенсация, появившихся за время диагностирования и

предыдущих этапов восстановления отклонений выходных переменных ОУ от требуемого, заданного поведения.

В предложенной блок-схеме структура и функции ОРУ отличаются от традиционных, классических. Вместе с необходимыми свойствами управляемости и наблюдаемости, ОРУ должен обладать рядом достаточных свойств, обеспечивающих диагностируемость и восстанавливаемость его работоспособности.

Под диагностируемостью ОРУ будем понимать его свойство, заключающееся в возможности однозначного установления устранимой причины дестабилизирующего воздействия по доступным измерению состояниям за конечное время. Под восстанавливаемостью ОРУ будем понимать такое свойство, которое позволяет, с помощью имеющихся в его составе избыточных средств, восстановить работоспособность за конечное время. Итак, для обеспечения диагностируемости ОРУ требуются соответствующие глубине диагноза объемы информации и её характер, т.е. сигналы, а для восстанавливаемости соответствующие глубине диагноза избыточные ресурсы. Поэтому блоки БП и БИ, как правило, это блоки со структурной, параметрической и сигнальной избыточностями.

Введение новых функциональных блоков в замкнутый контур управления обуславливает и необходимость формирования показателей качества их функционирования для оценки вклада их в показатели качества всей САУ. Представляются целесообразными для блока БД такие показатели качества диагностирования:

- 1) время диагноза;
- 2) полнота;
- 3) точность;
- 4) достоверность.

Под временем диагноза понимается время, затрачиваемое на обработку сигналов при получении диагноза, включающего момент времени появления дестабилизирующего воздействия, его место, класс и вид. Полнота диагноза должна характеризовать степень выявления причин всех возможных нештатных ситуаций. Под точностью диагноза следует понимать точность численной оценки признака, характеризующего устранимый физический вид дестабилизирующего воздействия. Достоверность диагноза – это показатель степени доверия выявленным причинам появления нештатных ситуаций.

Для количественных оценок функционирования БУ предлагаются следующие показатели качества восстановления работоспособности:

- 1) время восстановления;
- 2) точность;

3) истощаемость.

Под временем восстановления будем понимать время, затрачиваемое на выбор приемлемого ресурсного средства, его введения в работу и парирование устранимого вида дестабилизации, а также компенсацию накопившихся отклонений в функционировании САУ. Показатель точности восстановления призван характеризовать точность парирования устранимого вида дестабилизации. Показатель истощаемости ресурсов характеризует оставшиеся, имеющиеся в наличии избыточные ресурсы и степень их покрытия нештатных ситуаций, т.е. весовые их характеристики.

Очевидно, что численные значения ряда предлагаемых показателей качества зависят от $d_i \in D$ – вида дестабилизирующего воздействия. Поэтому интегральная оценка этих показателей должна быть интервальной.

Таким образом, использование принципа управления по диагнозу порождает как новые понятия, так и новые функциональные блоки в контуре управления, новую блок-схему САУ и новый подход к разработке таких САУ, базирующийся на положениях рационального управления. Рассмотрим базовые положения рационального управления ОРУ [42, 43]:

1) положения, принципы, инструментальные средства рационального управления ОРУ закладываются на этапе эскизного проектирования САУ и не изменяются на всех последующих этапах жизненного цикла изделия;

2) рациональное управление ОРУ формируется в результате разумного сочетания аналитических средств, макетных и стендовых экспериментальных исследований, интуиции и здравого смысла разработчиков [44];

3) событийная неопределённость дестабилизирующих воздействий на ОРУ порождает множество его возможных состояний и обуславливает необходимость в рациональном управлении его работоспособностью;

4) рациональное управление работоспособностью ОРУ возможно только на основе знания причин дестабилизирующих воздействий. Причины этих воздействий не могут быть непосредственно измерены. Косвенные измерения последствий воздействий приводят к необходимости решения обратных задач, в частности, диагностических. Поэтому рациональное управление базируется на диагнозе устранимых причин дестабилизирующих воздействий;

5) множество возможных состояний ОРУ, порождаемых дестабилизирующими воздействиями $d_i \in D$, обуславливает необходимость формирования множества избыточных ресурсов R , позволяющих восстанавливать работоспособность. Поэтому рациональное управление базируется на событийном выборе и продуктивном использовании избыточных ресурсов;

б) сложность, многосвязность, многомерность, гетерогенность и уникальность современных и перспективных ОРУ приводит к необходимости декомпозиции рационального управления на три последовательно взаимосвязанные задачи:

а) рационального управления работоспособностью блока БП;

б) рационального управления блока БИ;

в) рационального управления ОУ [41, 45]. Такой подход порождает блок-схему САУ, представленную на рис. 1.3.

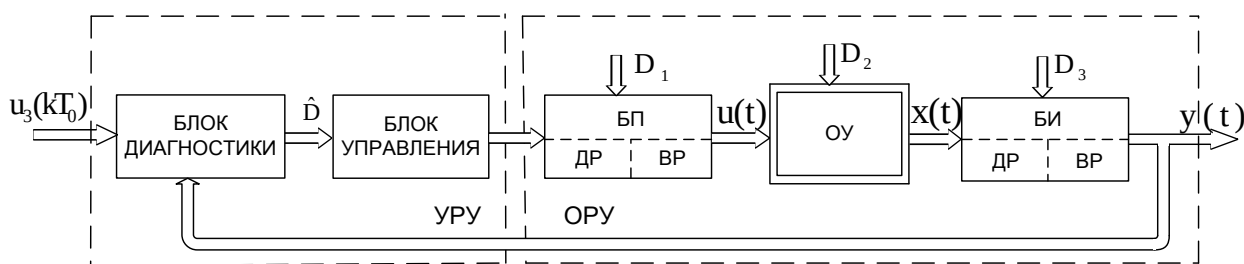


Рисунок 1.3 – Блок-схема системы рационального автоматического управления

Блоки БП и БИ снабжены средствами диагностирования – ДР и восстановления – ВР работоспособности, позволяющими нейтрализовать нештатные ситуации, возникающие от дестабилизирующих воздействий соответственно из множеств D_1 и D_3 . Нештатные ситуации ОУ, вызванные дестабилизирующими воздействиями множества D_2 диагностируются в УРУ и здесь же вырабатываются управляющие воздействия $u_y(kT_0)$, восстанавливающие работоспособность ОУ и в целом всей САУ и обеспечивающие качественную обработку задающего воздействия $u_3(kT_0)$;

7) рациональное управление объектами, подверженными действию событийно неопределённой дестабилизации базируется на глубоком диагностировании устранимых причин нарушения работоспособности и на гибком её восстановлении в реальном масштабе времени. Поэтому рациональное управление – это искусство возможного интеллектуального управления.

Из представленных базовых положений рационального управления следует, что объектами такого управления могут быть как блоки датчиков измерительных подсистем и др. измерителей, блоки приводов, сервоприводов и др. исполнительных органов, а также ОУ, другими словами, объекты, подверженные существенному влиянию дестабилизирующих воздействий, изменяющих как структуру, так и параметры. Для рационального управления

такими объектами требуется сформировать множество возможных дестабилизирующих воздействий. Гипотеза событийной неопределённости этих воздействий позволяет сформировать следующий подход к определению их множества для любых объектов рационального управления. Преобразовательные свойства объектов отражаются в установившихся режимах функционирования посредством статических характеристик, а в динамических режимах – соответствующими воздействиям переходными характеристиками.

Как статические, так и переходные характеристики описываются в номинальных режимах функционирования конечным числом параметров, однозначно характеризующих их свойства в соответствующих математических моделях. Исходя из этого обстоятельства, любые отклонения этих параметров нужно рассматривать как элементы множества D – множества физических видов дестабилизирующих воздействий, доступных для диагностирования. Доступность для диагностирования означает, что по доступным измерению входным сигналам объекта можно установить конкретный физический вид действующего в текущий момент времени дестабилизирующего воздействия, т.е. объект должен обладать, как ранее отмечалось, свойством диагностируемости.

Для восстановления работоспособности объекта, подверженного дестабилизирующим воздействиям, требуются ресурсы и, как правило, избыточные по отношению к расчётной канонической схеме, отражающей преобразовательные свойства в номинальном режиме функционирования. Избыточные ресурсы – R вводятся в исходную схему с помощью структурных, параметрических, сигнальных, алгоритмических и других средств, позволяющих парировать сформированное множество дестабилизирующих воздействий D , т.е. для рационального управления объектом требуется, чтобы он обладал свойством восстанавливаемости.

Таким образом, для организации рационального управления объект кроме необходимых для его предназначения преобразовательных свойств сигналов, должен обладать и достаточными свойствами диагностируемости и восстанавливаемости. Следовательно, объект рационального управления нужно соответствующим образом проектировать, чтобы обеспечить его как необходимыми, так и достаточными свойствами. Тогда использование принципа управления по диагнозу позволяет преодолевать априорную неопределённость работоспособности таких объектов в реальном масштабе времени.

Итак, предложено обобщение принципа управления по диагнозу, порождающего замкнутые системы рационального управления, на объекты

различного функционального назначения. Это обобщение свидетельствует о возможности разработки единой методологии проектирования всех стадий жизненного цикла, как функциональных элементов, так и систем автоматического управления как целостного искусственного образования, использующего меньше природных материальных и энергетических ресурсов, обладающего развитой способностью предотвращать неизбежные нештатные ситуации и в меньшей степени ухудшающего среду обитания человека, а значит обеспечивать более гармоничное, устойчивое функционирование Природы по своим многовековым, объективным и непознанным законам, порожденным уникальной целесообразностью неисчерпаемой, неповторимой и вдохновляющей её красоты.

Таким образом, рациональное управление призвано поддерживать качественное выполнение объектами различного функционального назначения своих преобразовательных функций в условиях объективных, неизбежных дестабилизирующих воздействий.

ГЛАВА II

СПЕЦИФИКА ОБЪЕКТОВ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Наука является нашей единственной
надеждой, способной залечивать раны,
нанесенные нам недостойными
руководителями путём злоупотребления
культурой и техникой.*

*Г. Оберт (1894 – 1989), выдающийся немецкий
учёный, один из пионеров
ракетостроения и космонавтики.*

Объектами рационального управления могут быть как функциональные элементы систем автоматического управления, так и объекты автоматического управления, подверженные существенному влиянию дестабилизирующих воздействий на их работоспособность. Для того, чтобы функциональные элементы можно было использовать в качестве объектов рационального управления, нужно расширить их функциональные возможности для реализации принципа управления по диагнозу. Функциональные возможности объектов рационального управления характеризуются их свойствами. Все свойства объектов рационального управления можно представить с помощью двух непересекающихся множеств. Первое множество содержит свойства объекта, определяющие его номинальное функциональное назначение, другими словами, это необходимые свойства объекта. Второе множество включает свойства диагностируемости и восстанавливаемости объекта, т. е. это достаточные свойства объекта рационального управления. Обеспечение объектов рационального управления как необходимыми, так и достаточными свойствами осуществляется в процессе их проектирования. Формирование структуры и свойств объектов начинается с этапа эскизного проектирования, на котором используются различные модельные инструментальные средства и методы анализа их потенциальных свойств.

2.1 Традиционные модели функциональных элементов систем автоматического управления

С целью конкретизации и доступности последующего изложения рассмотрим шестимерную, относительно связанной системы координат, спутниковую систему угловой ориентации и стабилизации [1, 2],

представленную на рис. 2.1.

На этой схеме используется несколько видов моделей. Первый вид – это графическая модель, с помощью функциональной схемы, отражающей укрупнённо состав функциональных элементов и связи, в соответствии с принципом управления по отклонению, образующие замкнутую САУ. Вторым видом – это математические модели различных форм, описывающих фрагментарно преобразовательные линеаризованные свойства элементов.

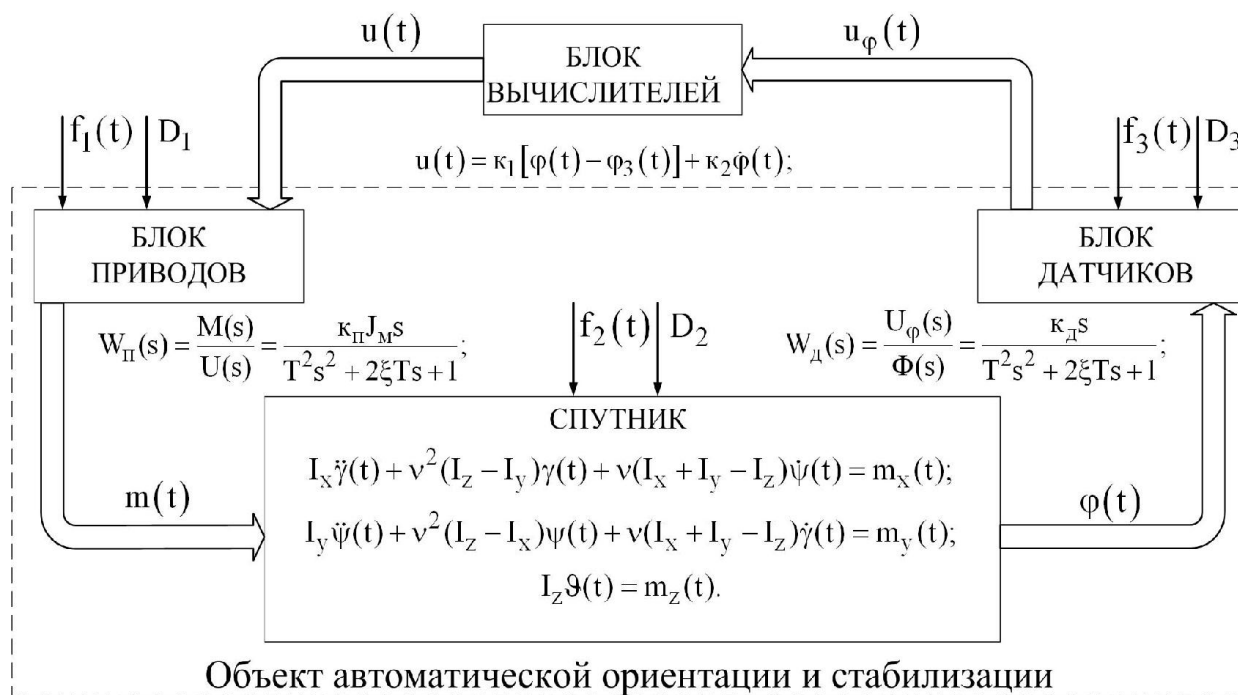


Рисунок 2.1 – Укрупненная функциональная схема спутниковой системы ориентации и стабилизации

Рассмотрим особенности математических моделей элементов. Первый элемент – это объект управления, представляющий собой конструкцию спутника. Линеаризованная математическая модель конструкции спутника цилиндрической формы представлена в связанной декартовой системе координат, оси которой совпадают с главными осями инерции объекта. Приведенная система линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами отражает в «малом» преобразовательные свойства конструкции при действии вектора управляющих моментов – $m(t)$ на вектор углового положения спутника относительно центра масс – $\varphi(t)$ [2].

Функциональный элемент измерителей в приведенной схеме может быть реализован в виде моноблока или комплекта, состоящего из измерителей проекций угла и угловой скорости, оси чувствительности которые

параллельны соответствующим осям связанной системы координат. Тогда, например, в каждом измерителе преобразование угловой скорости конструкции спутника в соответствующее изменение напряжения в линейном приближении описывается приведенной векторной передаточной функцией [3, 4].

Функциональный элемент приводов может быть оснащен тремя двигателями-маховиками, установленными по осям связанной системы координат, т. е. взаимно-ортогональным расположением кинетических моментов. Преобразование малого сигнала $u_x(t)$ в соответствующее изменение кинетического момента $m_x(t)$ в преобразованиях Лапласа отражено на рис. 2.1. в форме векторной передаточной функции $W_n(s)$ [4].

В функциональном элементе – бортовая цифровая вычислительная машина, обеспечивается требуемая угловая ориентация и стабилизация объекта управления с помощью алгоритма, представленного векторным алгебраическим уравнением, связывающим сигнал управления $u(t)$ на соответствующий привод с сигналами измерителей – $u_\varphi(t)$ [3, 4].

Для описания свойств функциональных элементов в линейном приближении традиционно используются формы математических моделей, представленные на функциональной схеме. Более общей формой, позволяющей компактно отражать свойства управляемости и наблюдаемости, диагностируемости и восстанавливаемости, а также эффективно решать задачи анализа и синтеза САУ, представляется математическое описание в линейном дискретном пространстве состояний с помощью конечно-разностных уравнений в векторно-матричной форме:

$$\begin{aligned} x[(k+1)T_0] &= Ax(kT_0) + Bu(kT_0) + \xi(kT_0); \quad x(kT_0) = x_0; \\ y(kT_0) &= Cx(kT_0) + Du(kT_0) + \zeta(kT_0), \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $x(kT_0)$ – вектор состояния объекта исследования, $x(kT_0) \in X^n$;

$u(kT_0)$ – вектор управления, $u(kT_0) \in U^r$;

$y(kT_0)$ – вектор измеряемых переменных, $y(kT_0) \in Y^m$;

$\xi(kT_0)$ и $\zeta(kT_0)$ – векторы ошибок моделирования, помех измерения, возмущающих воздействий, $\xi(kT_0) \in \Xi^n$; $\zeta(kT_0) \in Z^m$;

A , B , и C и D – матрицы соответствующих размерностей;

k – номер дискрет, $k \in K$;

T_0 – период квантования.

Переходы от традиционных – классических форм математического описания функциональных преобразовательных свойств объектов исследования к векторно-матричной форме неоднозначны. Это обстоятельство позволяет среди множества возможных форм выбирать канонические, в наилучшей степени отражающие исследуемые свойства объекта для последующего решения задач анализа и синтеза.

Опишем процесс преобразования вектора управляющих моментов – $m(t)$, вектора возмущающих моментов – $m_B(t)$ в соответствующий вектор углового положения спутника. Если ввести такие переменные состояния:

$$x_1(t) = \gamma(t); x_2(t) = \dot{\gamma}(t); x_3(t) = \psi(t); x_4(t) = \dot{\psi}(t); x_5(t) = \vartheta(t); x_6(t) = \dot{\vartheta}(t),$$

то, преобразовав исходные уравнения в форму уравнений Коши с последующей их векторно-матричной структуризацией, получим такое описание:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \\ \dot{x}_5(t) \\ \dot{x}_6(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{a}_{21} & 0 & \bar{a}_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \bar{a}_{41} & 0 & \bar{a}_{43} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \\ x_6(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \bar{b}_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b}_{42} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{63} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x(t) \\ m_y(t) \\ m_z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \bar{b}'_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b}'_{42} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{b}'_{63} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{Bx}(t) \\ m_{By}(t) \\ m_{Bz}(t) \end{bmatrix}; \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \\ y_4(t) \\ y_5(t) \\ y_6(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & 0 \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & 0 & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \\ x_6(t) \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_1(t_0) \\ x_2(t_0) \\ x_3(t_0) \\ x_4(t_0) \\ x_5(t_0) \\ x_6(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{10} \\ x_{20} \\ x_{30} \\ x_{40} \\ x_{50} \\ x_{60} \end{bmatrix}.$$

Здесь коэффициенты матриц получены в результате преобразований исходных уравнений. К примеру, $\bar{a}_{21} = -v^2 \frac{I_z - I_y}{I_x}$; $\bar{b}_{21} = \frac{1}{I_x}$; $\bar{b}'_{21} = \frac{1}{I_x}$ и т. д.

Для перехода к дискретной форме можно воспользоваться различными методами. Если воспользоваться методом Эйлера, тогда

$$\dot{x}_i(t) \approx \frac{[x_i(k+1)T_0] - x_i(kT_0)}{T_0}; \quad i = \overline{1,6}$$

и структура системы уравнений (2.2) претерпит изменения в связи с таким переходом и после преобразований примет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \\ x_4(k+1) \\ x_5(k+1) \\ x_6(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 1 & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{42} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{63} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x(k) \\ m_y(k) \\ m_z(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ b'_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & b'_{42} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b'_{63} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{Bx}(k) \\ m_{By}(k) \\ m_{Bz}(k) \end{bmatrix}; \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ y_3(k) \\ y_4(k) \\ y_5(k) \\ y_6(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & 0 \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & 0 & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \\ x_6(k) \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_1(k_0) \\ x_2(k_0) \\ x_3(k_0) \\ x_4(k_0) \\ x_5(k_0) \\ x_6(k_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{10} \\ x_{20} \\ x_{30} \\ x_{40} \\ x_{50} \\ x_{60} \end{bmatrix}.$$

В этой системе уравнений для упрощения записи опущен параметр T_0 . Новые значения коэффициентов матриц, для примера, будут следующими $a_{21} = (\bar{a}_{21} + 1)T_0$; $b_{21} = b'_{21} = \bar{b}_{21}T_0$ и аналогично другие. В компактной форме полученную векторно-матричную систему уравнений можно представить так:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bm(k) + B'm_B(k); \quad x(k_0) = x_0; \\ y(k) &= Cx(k). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Для того, чтобы представленная математическая конструкция (2.4) стала инструментом для исследования функциональных свойств изучаемого объекта, инструментом, называемым математической моделью, требуется сформировать ряд таких атрибутов [5]:

- 1) точность линеаризации, выраженная количественно;
- 2) функциональные характеристики невозмущенного движения;
- 3) диапазон и допустимый или возможный характер изменений входных воздействий;

- 4) диапазон и допустимый или возможный характер реакций;
- 5) математические линейные уравнения возмущенного движения, связывающие отклонения входных и выходных переменных объекта;
- 6) численные значения коэффициентов уравнений с требуемой точностью;
- 7) диапазон и масштаб изменения времени моделирования.

Математические уравнения, представленные на рис. 2.1, а также (2.2) – (2.4), получаются в результате линеаризации нелинейных уравнений, описывающих физические процессы преобразования сигналов в реальных функциональных элементах САУ. При этом выбирается наиболее характерное невозмущенное движение с соответствующими параметрами, применительно к спутнику это m_0, m_{B0}, y_0 , удовлетворяющими исходным нелинейным уравнениям. Применяя метод малого параметра [6], получают уравнения возмущенного движения, представленные в этом параграфе. По сути, используемые в этих уравнениях переменные – это отклонения от значений, характеризующих невозмущенное движение. Допустимая, исходя из условий решаемой задачи, точность линеаризации, задаваемая абсолютной или относительной ошибкой, позволяет обоснованно сформировать диапазоны входных, управляющих и возмущающих воздействий и диапазоны выходных реакций функционального объекта. Исследование частотных свойств нелинейных физических элементов позволяет аргументировано установить допустимые характеры изменения входных и выходных сигналов. Итак, представленные ранее уравнения – это только один из атрибутов математической модели, отражающей формальную связь отклонений входных и выходных переменных объекта исследования.

Необходимым атрибутом математической модели выступают и численные значения коэффициентов уравнений, полученных в результате линеаризации посредством метода малого параметра. Значения коэффициентов, как правило, получают в результате соответствующей обработки с помощью методов идентификации экспериментальных данных. При этом точность идентификации должна быть согласована с точностью линеаризации. При необходимости ускорить или замедлить исследуемые процессы преобразования в модель вводится новое время – t_m , связанное с реальным масштабным коэффициентом m_t , т. е. $t_m = m_t t$, и для дискретных моделей $k_m = m_t k$.

Следует отметить, что при выводе уравнений движения современных электромеханических объектов предпочтительней применять уравнения Лагранжа второго рода [7, 8]:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i; i = \overline{1, n}, \quad (2.5)$$

где q_i – обобщенные координаты;

Q_i – обобщенные силы;

T – кинетическая энергия.

Описание в пространстве состояний, полученное с помощью уравнений второго рода и линеаризации, позволяют наиболее полно отразить преобразовательные процессы в объектах исследования. Для оценки преобразовательных свойств полученных уравнений, другими словами, их управленческого качества, Р. Калман предложил новые понятия управляемости и наблюдаемости и соответствующие критерии [9].

Объект принято называть полностью управляемым, если он может быть переведен из некоторого начального состояния $x(k_0)$ в желаемое состояние равновесия $x(k_1)$ за конечный интервал времени $k_1 - k_0$. Другими словами, если существует управляющее воздействие $u(k)$, позволяющее переводить объект из состояния $x(k_0)$ в состояние $x(k_1)$ за время $k_1 - k_0$, то такой объект полностью управляем. Для оценки такого свойства объектов, описываемых в линейном приближении как в непрерывном, так и дискретном пространстве состояний, используется такой критерий управляемости.

$$\text{rang} \left[\underbrace{B, AB, \dots, A^{n-1}B}_R \right] = \text{rang } R = n. \quad (2.6)$$

Итак, необходимое и достаточное условие управляемости по Калману заключается в том, чтобы ранг составной матрицы управляемости R был равен размерности вектора состояния – n .

Понятие наблюдаемости характеризует возможность непосредственно или косвенно по вектору выхода (измеримым выходным переменным) получить оценку вектора состояния. Р. Калман предложил аналитический критерий анализа наблюдаемости с помощью матрицы наблюдаемости Q :

$$Q = \left[C^T, (CA)^T, \dots, (CA^{n-1})^T \right].$$

Необходимое и достаточное условие наблюдаемости по Калману заключается в том чтобы $\text{rang } Q = n$.

Анализ системы уравнений для переменных состояния $x_5(k)$ и $x_6(k)$ из (2.3) на управляемость относительно вектора управляющего момента $m_z(k)$ свидетельствует о принципиальной возможности перевода спутника по крену из состояния $x_5(k_0)$ и $x_6(k_0)$ в $x_5(k_1)$ и $x_6(k_1)$ за конечное время $k_1 - k_0$, так как

$$R = \begin{bmatrix} 0 & b_{63} \\ b_{63} & b_{63} \end{bmatrix}; \text{rang } R = 2.$$

Аналогичный результат получаем при анализе движения по крену по возмущающему моменту $m_z(k)$.

Анализ наблюдаемости для всей системы уравнений (2.3) свидетельствует о полной наблюдаемости вектора состояния, так как $\text{rang } C = 6$, т. е. все переменные состояния доступны вычислению.

С помощью критериев управляемости и наблюдаемости можно оценивать преобразовательные свойства датчиков и приводов, но не по передаточным функциям, так как эти формы математического описания отражают только управляемые и наблюдаемые свойства физических объектов. Поэтому математические описания преобразовательных свойств таких объектов целесообразно получать с помощью уравнений Лагранжа второго рода.

Итак, критерии управляемости и наблюдаемости для реальных нелинейных объектов исследования, представленных линеаризованными уравнениями в пространстве состояния, позволяют оценить степень влияния входных воздействий на вектор состояния, а также дают возможность наблюдать или оценивать это влияние по выходным доступным измерению переменным. Другими словами, глубокий математический смысл этих критериев заключается в оценке для используемой математической конструкции существования решения и его однозначности. Физический смысл этих критериев состоит в оценке преобразовательных свойств объекта исследования относительно входных воздействий в соответствующие выходные реакции.

Любой функциональный элемент САУ независимо от способа его конструкторского воплощения представляет собой целевое образование, выполняющее свое функциональное назначение. Для оценки стабильности выполнения функциональных преобразований используют понятия и

критерии, введенные А. М. Ляпуновым [10]. Из множества существующих определений устойчивости используем такое.

Устойчивость – это свойство объекта возвращаться в исходное состояние или близкое к нему после кратковременного вывода его из этого состояния. Для линеаризованных описаний объектов анализ устойчивости производится с помощью первого метода А. М. Ляпунова. Так, применительно к дискретному описанию в пространстве состояний (2.1) необходимое и достаточное условие устойчивости объекта по 1-му методу А. М. Ляпунова заключается в нахождении корней $z_i, i = \overline{1, n}$ характеристического уравнения $\dim[zI - A] = 0$ внутри единичной окружности с центром в начале координат комплексной плоскости [11].

Оценка устойчивости функциональных элементов может производиться не только путем решения характеристического уравнения. Алгебраические критерии Гурвица, Лъенара-Шипара, частотные Найквиста позволяют анализировать расположение корней характеристического уравнения по косвенным характеристикам [11].

Описанные критерии позволяют оценить ряд функциональных свойств объектов исследования в номинальных режимах с помощью сформированных математических моделей.

Критерии управляемости и наблюдаемости позволяют оценить такое свойство объектов как наличие связи между переменными. Так, в критерии управляемости оценивается связь между вектором управляющих воздействий $u(k)$ и вектором состояний $x(k)$. Критерий наблюдаемости позволяет выявить связь между вектором состояния $x(k)$ и вектором измерений $y(k)$. Таким образом, критерии Р. Калмана позволяют оценить возможность контролируемого управления объектом, исходя из его структурных особенностей. Другими словами, оценивается наличие свойств, обеспечивающих принципиальную возможность качественного управления объектом. Функциональное свойство объекта, необходимое для его работоспособности – устойчивость, оценивается с помощью соответствующих критериев. Эти критерии позволяют выявить и оценить фундаментальное свойство объекта исследования – способность обрабатывать управляющие воздействия и игнорировать возмущение.

В процессе эксплуатации функциональные элементы САУ подвержены влиянию ряда факторов (деградация, старение, сбои, неисправности, отказы и т. п.), приводящих при моделировании к изменению параметров математических моделей. Для описания влияния изменения параметров математических моделей на выходные переменные используются

инструментальные средства теории чувствительности [12]. Исходя из описания (2.1) уравнения функций параметрической чувствительности для объектов, представленных матрицами $A(\alpha)$, $B(\alpha)$, $C(\alpha)$ и $D(\alpha)$ – функционально-зависимыми от множества параметров $\alpha \in \{\alpha_i\}$, $i = \overline{1, q}$ будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} r_i(k+1) &= [A(\alpha_n)T_0 + 1]r_i(k) + T_0 \frac{\partial A(\alpha)}{\partial \alpha_i} x(k) + T_0 \frac{\partial B(\alpha)}{\partial \alpha_i} u(k); r_i(k_0) = x_0; \\ s_i(k) &= C(\alpha_n)r_i(k) + \frac{\partial C(\alpha)}{\partial \alpha_i} x(k) + \frac{\partial D(\alpha)}{\partial \alpha_i} u(k); i = \overline{1, q}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где $r_i(k)$ – параметрическая функция чувствительности вектора состояния $x(k)$;

$s_i(k)$ – параметрическая функция чувствительности вектора измеряемых переменных;

α_n – множество номинальных значений параметров α_i .

Уравнения параметрической чувствительности позволяют количественно оценивать влияние малых вариаций параметров уравнений математических моделей объектов исследования на выходные переменные. Другими словами, эти уравнения позволяют исследовать свойство нестационарности объектов исследования.

2.2 Модели объектов рационального управления

Объекты рационального управления должны обладать совокупностью необходимых свойств, описанных в предыдущем параграфе, а также совокупностью новых достаточных свойств, обеспечивающих диагностирование и восстановление работоспособности объекта при дестабилизирующих воздействиях. Для обеспечения таких новых свойств требуется вводить новые выходные сигналы с контрольных точек, дополнительные, избыточные функциональные элементы и средства, например, датчики, приводы, усилители мощности, дополнительную сигнальную, параметрическую подстройку и ряд других, что приводит к новым объектам с избыточной структурой. Каждый такой объект обладает специфической конструкцией и функциональными особенностями, обеспечивающими работоспособность в номинальном режиме, а в нештатном – диагностируемость и восстанавливаемость. Для дальнейшего конструктивного отражения таких особенностей всех объектов требуется

перейти на более общий уровень описания их динамических преобразовательных свойств.

Для описания таких объектов с избыточной структурой введем вначале понятие обобщенного динамического объекта (ОДО). Итак, преобразовательные свойства блока датчиков, блока приводов и спутника, как следует из п. 2.1, могут быть описаны в номинальных режимах с помощью различных математических средств. Наиболее приемлемой формой, позволяющей отразить как необходимые, так и достаточные свойства новых объектов, в результате проведенных исследований выбрано описание в пространстве состояний. В номинальном режиме функционирования преобразовательные свойства любого функционального элемента объекта автоматического управления могут быть представлены схематически (рис. 2.2) и с помощью традиционной системы уравнений в непрерывном пространстве состояний.



Рисунок 2.2 – Графическое представление ОДО

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) + f(t); x(t_0) = x_0; \\ y(t) = C x(t). \end{cases} \quad (2.8)$$

Введение в ОДО дополнительных избыточных средств, обеспечивающих диагностирование и восстановление его работоспособности, приводит к новому обобщенному объекту рационального управления, представленному функциональной схемой на рис. 2.3.

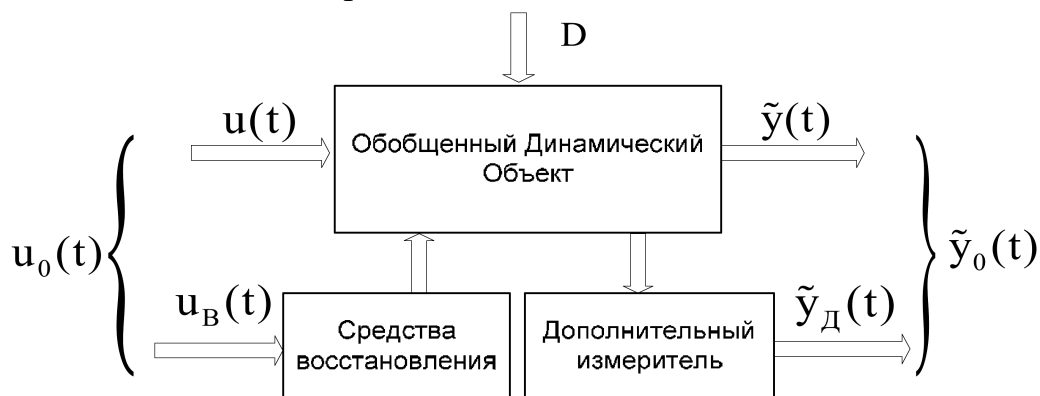


Рисунок 2.3 – Функциональная схема модифицированного ОДО,

где $u(t)$ – вектор основных управляющих воздействий;

$u_B(t)$ – управляющие воздействия средствами восстановления;

$u_0(t)$ – объединенный вектор всех управляющих воздействий;

D – множество дестабилизирующих воздействий, $D = \{d_i\}_q^1$;

$\tilde{y}(t)$ – вектор основных выходных дестабилизированных переменных;

$\tilde{y}_D(t)$ – вектор дополнительных выходных дестабилизированных переменных;

$\tilde{y}_0(t)$ – объединенный вектор всех выходных дестабилизированных переменных.

Обобщенный динамический объект с представленной модификацией будем называть объектом рационального управления (ОРУ). Для математического описания преобразовательных свойств ОРУ даже в общем виде требуется конкретизация условий. Обобщая известные исходные положения при проектировании САУ для космических объектов [4], а также доступные результаты расследования причин нештатных ситуаций в ракетно-космической технике [13] введем ряд предположений:

1) один из рациональных принципов рожденных, практикой разрешения известной проблемы «сторожа над сторожами», состоит в выборе «доверенного сторожа». Исходя из этого принципа и практики построения ответственных систем управления подвижными объектами предположим, что цифровые аппаратные и алгоритмические средства диагностирования и восстановления работоспособности менее уязвимы к дестабилизирующим воздействиям, чем ОДО;

2) в циклограмме функционирования ОРУ можно выделить конечный интервал времени T , в течение которого производится диагностирование и восстановление его работоспособности;

3) дестабилизирующие воздействия рассматриваем как независимые и неопределенные события, причем в интервале T появляется только одно дестабилизирующее событие d_i из множества D возможных;

4) причина появления дестабилизирующего события d_i существенно не изменяется на интервале T ;

5) каждому событию d_i , $i = \overline{1, q}$ можно поставить в соответствие прямой квазистационарный параметрический признак $\Delta\lambda_i = \lambda_i - \lambda_{in}$, здесь λ_i – текущее значение параметра коэффициентов модели ОДО при дестабилизирующем воздействии, λ_{in} – его номинальное значение.

Для формирования моделей ОРУ, описывающих в линейном приближении нештатные ситуации, вызванные дестабилизирующими событиями d_i , $i = \overline{1, q}$, воспользуемся классическим подходом, сформированным основателями теории управления Д. К. Максвеллом, И. А. Вышнеградским, А. Стодолой и существенно развитым их последователями. Подход основан на использовании метода малых колебаний при построении математических уравнений системы автоматического регулирования, подверженной сигнальным внешним воздействиям. В последующем появилось множество методов, составивших основу теории возмущений, использующих асимптотические методы малого параметра для решения дифференциальных уравнений [15, 16]. Следует отметить, что методы теории возмущений являются эффективными аналитическими инструментами построения линеаризованных математических моделей современных объектов научного и прикладного исследований [7, 17].

Для описания номинального движения, т. е. особенности преобразования входных управляющих воздействий объектов в управляемые переменные в штатных режимах, традиционно в самонастраивающихся системах используются эталонные модели, описываемые такими линеаризованными уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t); \quad x(t_0) = 0; \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t).\end{aligned}\tag{2.9}$$

Здесь символ $\hat{}$ характеризует оценочное значение функций.

При решении задач идентификации объектов управления используются, так называемые, статические эталонные модели, представленные такой системой уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\tilde{x}(t) + Bu(t); \quad \tilde{x}(t_0) = \tilde{x}_0; \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t),\end{aligned}\tag{2.10}$$

где $\tilde{x}(t)$ – вектор состояния дестабилизированного ОРУ.

Для получения оценочных значений вектора состояния объектов управления нашли применение детерминированные аналоги известного фильтра Р. Калмана, представленные Д. Люенбергером, как наблюдатели [18]. По сути, наблюдатели представляют собой эталонную модель, асимптотически инвариантную к начальным условиям объекта управления, которую можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= G\hat{x}(t) + K\tilde{y}(t) + Bu(t); \quad \hat{x}(t_0) = 0; \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t),\end{aligned}\tag{2.11}$$

где матрица $G = A - KC$;

$\tilde{y}(t)$ – вектор выходных переменных дестабилизированного ОРУ.

Из приведенных трех форм эталонных моделей наблюдатель Д. Люенбергера можно использовать как более общую форму эталонных моделей. Действительно, если матрица $K = 0$, а матрица $G = A$, то получается эталонная модель в форме (2.9). Если матрица $G = 0$ и для матрицы C из описания ОРУ существует обратная C^{-1} , тогда получаем статическую эталонную модель (2.10).

Нарушения функционирования ОДО обуславливается появлением дестабилизирующих событий $d_i \in D$, $i = \overline{1, q}$, что приводит к нарушению работоспособности объекта, а следовательно, к искажению вектора состояния и вектора выходных переменных. В соответствии с предположением, каждому дестабилизирующему событию d_i можно поставить в соответствие параметр λ_i , значение которого изменяется в интервале $\lambda_i \in [\underline{\lambda}_i, \overline{\lambda}_i]$. Проведенные исследования средств математического описания дестабилизирующего движения ОДО позволили сформировать следующую систему уравнений в пространстве состояний в канонической наблюдаемой форме:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}_i(t) &= A(\lambda_i)\tilde{x}_i(t) + B(\lambda_i)u(t) + N(\lambda_i); \quad \tilde{x}_i(t_0) = \tilde{x}_{i0}; \\ \tilde{y}_i(t) &= C\tilde{x}_i(t); \quad i = \overline{1, q},\end{aligned}\tag{2.12}$$

где $\tilde{x}_i(t)$ – n -мерный вектор состояний ОДО, дестабилизированного событием d_i ;

$\tilde{y}_i(t)$ – m -мерный вектор выходных переменных ОДО, дестабилизированного событием d_i ;

$u(t)$ – k -мерный вектор управляющих воздействий;

$A(\lambda_i)$, $B(\lambda_i)$ и $N(\lambda_i)$ – матрицы соответствующих размерностей, коэффициенты которых нелинейно зависят от параметра λ_i ;

C – $(m \times n)$ -матрица коэффициентов $c_{ij} \in \{0, 1\}$, не зависящих от параметра λ_i .

Для выявления составляющих движения ОДО, обусловленных появлением дестабилизирующего события, характеризуемого параметром λ_i , другими словами, дополнительного движения, вычтем из системы уравнений дестабилизирующего движения (2.12) систему уравнений номинального эталонного движения (2.11) и в результате получим:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_i(t) &= A(\lambda_i) \tilde{x}_i(t) - G \hat{x}_i(t) - K \tilde{y}(t) + B(\lambda_i) u(t) - B u(t) + N(\lambda_i); \Delta x_i(t_0) = \tilde{x}_{i0}; \\ \Delta y_i(t) &= C x_i(t) - C \hat{x}_i(t); i = \overline{1, q}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

где $\Delta x_i(t) = \tilde{x}_i(t) - \hat{x}_i(t)$; $\Delta y_i(t) = \tilde{y}_i(t) - \hat{y}_i(t)$.

Представим матрицы системы (2.12) следующим образом:

$$A(\lambda_i) = A + \Delta A(\lambda_i); B(\lambda_i) = B + \Delta B(\lambda_i); N(\lambda_i) = \Delta N(\lambda_i), \quad (2.14)$$

где A, B – матрицы, соответствующие номинальному движению объекта. В этом движении дестабилизация отсутствует, поэтому $N \equiv 0$;

$\Delta A(\lambda_i), \Delta B(\lambda_i)$ и $\Delta N(\lambda_i)$ – приращения соответствующих матриц, вызванных изменением параметра λ_i .

Такое представление матриц соответствует появлению в ОДО дестабилизирующего события, характеризующегося «большой» величиной изменения параметра $\Delta \lambda_i = \lambda_i - \lambda_{ин}$.

Для «малых» изменений параметра, характеризующихся тем, что $\Delta \lambda_i \gg \Delta \lambda_i^2$, приращения матриц в уравнениях (2.14) разложим в ряд Тейлора [6] относительно $\lambda_{ин}$ с последующим отбрасыванием членов более высокого порядка малости и тогда получим, что

$$A(\lambda_i) = (A + \mathcal{A}_i \Delta \lambda_i); B(\lambda_i) = B + \mathcal{B}_i \Delta \lambda_i; N(\lambda_i) = \mathcal{N}_i \Delta \lambda_i,$$

$$\text{где } \mathcal{A}_i = \left. \frac{\partial A(\lambda_i)}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda_i = \lambda_{ин}}; \mathcal{B}_i = \left. \frac{\partial B(\lambda_i)}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda_i = \lambda_{ин}}; \mathcal{N}_i = \left. \frac{\partial N(\lambda_i)}{\partial \lambda_i} \right|_{\lambda_i = \lambda_{ин}} - \text{функции}$$

чувствительности соответствующих матриц по параметру λ_i .

Подставим полученные выражения в систему уравнений (2.13):

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= (\mathbf{A} + \mathcal{A}_i \Delta \lambda_i) \tilde{\mathbf{x}}_i(t) - \mathbf{G} \hat{\mathbf{x}}_i(t) - \mathbf{K} \tilde{\mathbf{y}}_i(t) + (\mathbf{B} + \mathcal{B}_i \Delta \lambda_i) \mathbf{u}(t) - \mathbf{B} \mathbf{u}(t) + \mathcal{N}_i \Delta \lambda_i; \\ \Delta \mathbf{y}_i(t) &= \mathbf{C} \tilde{\mathbf{x}}_i(t) - \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}_i(t); \Delta \mathbf{x}_i(t_0) = \tilde{\mathbf{x}}_{i0}.\end{aligned}$$

Сделаем следующие преобразования:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= \mathbf{A} \tilde{\mathbf{x}}_i(t) - \mathbf{K} \mathbf{C} \tilde{\mathbf{x}}_i(t) - \mathbf{G} \hat{\mathbf{x}}_i(t) + \mathcal{A}_i \Delta \lambda_i \tilde{\mathbf{x}}_i(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t) + \mathcal{B}_i \Delta \lambda_i \mathbf{u}(t) - \mathbf{B} \mathbf{u}(t) + \mathcal{N}_i \Delta \lambda_i; \\ \Delta \mathbf{y}_i(t) &= \mathbf{C} [\tilde{\mathbf{x}}_i(t) - \hat{\mathbf{x}}_i(t)]; \Delta \mathbf{x}_i(t_0) = \tilde{\mathbf{x}}_{i0}; \\ \Delta \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= (\mathbf{A} - \mathbf{K} \mathbf{C}) \tilde{\mathbf{x}}_i(t) - \mathbf{G} \hat{\mathbf{x}}_i(t) + \mathcal{A}_i \Delta \lambda_i \tilde{\mathbf{x}}_i(t) + \mathcal{B}_i \Delta \lambda_i \mathbf{u}(t) + \mathcal{N}_i \Delta \lambda_i; \\ \Delta \mathbf{y}_i(t) &= \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}_i(t); \Delta \mathbf{x}_i(t_0) = \tilde{\mathbf{x}}_{i0}.\end{aligned}$$

Так как $\mathbf{A} - \mathbf{K} \mathbf{C} = \mathbf{G}$, а $\tilde{\mathbf{x}}_i(t) = \hat{\mathbf{x}}_i(t) + \Delta \mathbf{x}_i(t)$, тогда

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= \mathbf{G} [\tilde{\mathbf{x}}_i(t) - \hat{\mathbf{x}}_i(t)] + \mathcal{A}_i \Delta \lambda_i \hat{\mathbf{x}}_i(t) + \mathcal{A}_i \Delta \lambda_i \mathbf{x}_i(t) + \mathcal{B}_i \Delta \lambda_i \mathbf{u}(t) + \mathcal{N}_i \Delta \lambda_i; \Delta \mathbf{x}_i(t_0) = \tilde{\mathbf{x}}_{i0}; \\ \Delta \mathbf{y}_i(t) &= \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}_i(t).\end{aligned}$$

В силу того, что $\tilde{\mathbf{x}}_i(t) - \hat{\mathbf{x}}_i(t) = \Delta \mathbf{x}_i(t)$ и $\Delta \lambda_i \Delta \mathbf{x}_i(t) \approx 0$ из-за малости, в окончательном виде дестабилизирующее движение ОДО, вызванное отклонением параметра $\Delta \lambda_i$, можно представить так:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= \mathbf{G} \Delta \mathbf{x}_i(t) + [\mathcal{A}_i \hat{\mathbf{x}}_i(t) + \mathcal{B}_i \mathbf{u}(t) + \mathcal{N}_i] \Delta \lambda_i; \Delta \mathbf{x}_i(t_0) = \tilde{\mathbf{x}}_{i0}; \\ \Delta \mathbf{y}_i(t) &= \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}_i(t); i = \overline{1, q}.\end{aligned}\tag{2.15}$$

Рассмотрим функциональные особенности полученной системы уравнений исходя из принципа управления по диагнозу. Система (2.15) описывает функциональную связь отклонений вектора выходных переменных $\Delta \mathbf{y}_i(t)$ с вектором управляющих воздействий $\mathbf{u}(t)$ и отклонением параметра λ_i для q дестабилизирующих событий. Для получения диагноза ОДО требуется организация процедуры диагностирования, заключающаяся, в общем, в решении обратной задачи выявления по следствиям причины их появления. Применительно к ОДО требуется по доступным измерению сигналам, а это вектор $\Delta \mathbf{y}(t)$, найти истинную причину, вызвавшую такую временную реакцию, среди множества $P = \{\Delta \lambda_i\}$, $i = \overline{1, q}$ возможных. Тогда, в соответствии с устоявшейся терминологией технической диагностики, $\Delta \lambda_i$ –

это прямой параметрический признак i -го дестабилизирующего события $d_i \in D$, а $\Delta y_i(t)$ – это косвенный сигнальный признак дестабилизирующего события d_i . Следовательно, в этих терминах система уравнений (2.15) отражает функциональную связь в ОДО прямого признака параметрического $\Delta \lambda_i$ дестабилизирующего события d_i с косвенным, сигнальным $\Delta y_i(t)$ для элементов множества D – множества событий, дестабилизирующих работоспособность исследуемого объекта. Обратим внимание на характер этой связи. Как следует из структуры математической конструкции, связь эта динамическая, в форме линейного дифференциального уравнения с постоянными, но неопределенными коэффициентами. Неопределенность обуславливается неизвестным значением прямого признака $\Delta \lambda_i$ перед диагностированием. Постоянство $A_i \Delta \lambda_i$, $B_i \Delta \lambda_i$ и $N_i \Delta \lambda_i$ обуславливается предположением о неизменяемости причины появления дестабилизирующего события d_i на интервале T . Вполне очевидно, что задача получения диагноза сводится к задаче получения оценки прямого признака $\hat{\Delta \lambda}_i$, исходя из известной структуры системы уравнений (2.15) и доступных измерению вектора управляющих воздействий $u(t)$ и вектора отклонений $\Delta y(t)$ на интервале диагностирования $T_d \subset T$. Задача получения оценки $\hat{\Delta \lambda}_i$ принадлежит к классу обратных математических задач.

Итак, для ОДО при появлении дестабилизирующего воздействия d_i , характеризуемого параметром λ_i и описываемого системой уравнений (2.12), были получены в результате линеаризации математические конструкции, отражающие связь между косвенными $\Delta y_i(t)$ и прямыми признаками $\Delta \lambda_i$, $i = \overline{1, q}$. Система уравнений (2.15) представляет только один – пятый атрибут математической модели ОРУ. Дополняя эту систему уравнений другими атрибутами, описанными в п. 2.1, получим математическую модель, отражающую причинно-следственные связи дестабилизации в ОДО. Такие модели будем называть диагностическими функциональными моделями (ДФМ).

Рассмотрим описание в общем виде элементов функциональной схемы ОРУ, изображенной на рис. 2.3. В общем виде ОДО может быть представлен следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \tilde{x}(t) &= A(\Lambda) \tilde{x}(t) + B(\Lambda) u(t) + N(\Lambda); \quad \tilde{x}(t_0) = \tilde{x}_0; \\ \tilde{y}(t) &= C \tilde{x}(t), \end{aligned} \quad (2.16)$$

где Λ – это множество параметров λ_i , т. е. $\lambda_i \in \Lambda$, $i = \overline{1, q}$, $\Lambda = \{\lambda_i\}_q^1$.

Средства восстановления работоспособности ОДО, такие как элементы сигнальной и параметрической подстройки, дополнительные функциональные элементы, коммутирующие элементы и ряд других, в первом приближении можно описать посредством такого векторно-матричного уравнения:

$$\dot{x}_B(t) = A_B x_B(t) + B_B u_B(t); \quad x_B(t) = 0, \quad (2.17)$$

где $x_B(t)$ – вектор состояния средств восстановления;

A_B и B_B – матрицы динамики и управления, соответственно.

Функциональный элемент – дополнительные измерители позволяют сформировать дополнительный вектор измерений $\tilde{y}_d(t)$ для получения полного диагноза. Этот функциональный элемент можно описать таким образом:

$$y_d(t) = C_d [\tilde{x}(t), x_B(t)]^T, \quad (2.18)$$

где C_d – матрица, отражающая связь составного вектора состояний с результатами измерений;

t – символ транспортирования составного вектора.

Для описания в целом всего ОРУ наилучшим представляется описание с помощью блочных матриц в такой форме:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}(t) \\ \dot{x}_B(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A(\Lambda) & 0 \\ 0 & A_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}(t) \\ x_B(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B(\Lambda) & 0 \\ 0 & B_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ u_B(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N(\Lambda) \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \tilde{x}(t_0) \\ x_B(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_0 \\ 0 \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} \tilde{y}(t) \\ y_d(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C & 0 \\ C_{d1} & C_{d1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}(t) \\ x_B(t) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

В более общей компактной форме эту систему уравнений можно представить так:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_0(t) &= A_B(\Lambda) x_0(t) + B_B(\Lambda) u_0(t) + N_B(\Lambda); \quad x_0(t_0) = x_{00}; \\ \tilde{y}_0(t) &= C_B \tilde{x}_0(t). \end{aligned} \quad (2.20)$$

где $\tilde{x}_0(t)$ – объединенный вектор состояния ОРУ;

$u_0(t)$ – объединенный вектор управления ОРУ;

$A_B(\Lambda)$, $B_B(\Lambda)$, $N_B(\Lambda)$ и C_B – блочные матрицы соответствующих размерностей.

Как утверждалось ранее, ОРУ должен обладать свойствами диагностируемости и восстанавливаемости. Информацией о появлении дестабилизирующего воздействия служит отклонение от желаемого динамического поведения (функционирования) ОДО – $\Delta y(t)$. Причина дестабилизирующего воздействия $\Delta \lambda_i$ связана с отклонением $\Delta y_i(t)$ в линейном приближении системой уравнений (2.15). Для выявления математической функциональной связи параметров дестабилизирующих воздействий Λ с косвенными признаками $\Delta y(t)$ вычтем из системы уравнений (2.20) уравнения соответствующих ОРУ размерностей и структуры эталонной модели в форме (2.11) и, представив блочные матрицы, зависящие от множества Λ , как это было сделано ранее в уравнениях (2.14) после соответствующих преобразований получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}(t) &= G \Delta x(t) + \Delta A_B(\Lambda) x_0(t) + \Delta B_B(\Lambda) u(t) + \Delta N_B(\Lambda); \quad \Delta x(t_0) = \Delta x_0; \\ \Delta y(t) &= C \Delta x(t), \end{aligned} \quad (2.21)$$

где $\Delta x(t) = \tilde{x}_0(t) - \hat{x}(t)$,

Анализ структуры полученной конструкции свидетельствует о динамической связи причины со следствием, а также о нелинейности этой связи в неявном виде.

Из предыдущего изложения следует, что ОДО требуется дополнить рядом компонентов, обеспечивающих его диагностируемость и восстанавливаемость в реальном масштабе времени, а значит и переход в новое функциональное назначение – объект рационального управления. Особенности функционирования ОРУ отражают ДФМ. Представим графическую модель ДФМ в виде функциональной схемы (рис. 2.4).

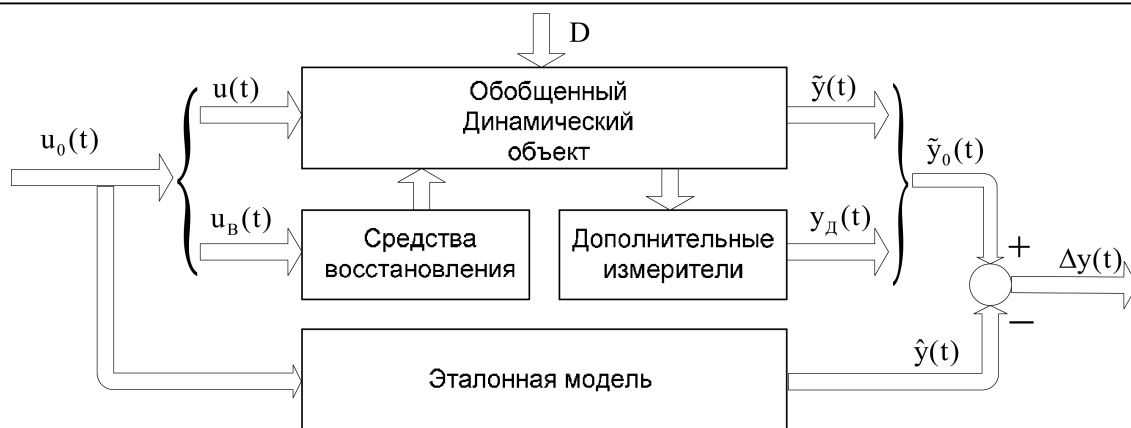


Рисунок 2.4 – Функциональная схема структуры диагностической функциональной модели

Итак, ОРУ в процессе его проектирования должен получаться из ОДО введением средств восстановления, дополнительных измерений и эталонной модели так, чтобы в совокупности обеспечивались свойства диагностируемости и восстанавливаемости в динамическом режиме его функционирования.

2.3 Анализ преобразовательных свойств моделей объектов рационального управления

Как следует из функциональной схемы ОРУ, основным, базовым функциональным элементом, характеризующим принципиальные фундаментальные свойства, другими словами, системообразующим является ОДО. В п. 2.1 были рассмотрены критериальные оценки его преобразовательных свойств по управляемости, наблюдаемости, устойчивости или чувствительности. Введение в рассмотрение множества дестабилизирующих воздействий, каждое из которых нужно адресно, конкретно парировать с целью восстановления работоспособности обуславливает необходимость анализа новых преобразовательных свойств, характеризующих возможность по отклонению $\Delta y(t)$ устанавливать причину его появления, т. е. элемент $d_i \in D$ по его параметрическим характеристикам. Такое свойство моделей характеризуется диагностируемостью. Первые результаты исследований по диагностируемости математических моделей непрерывных систем управления были представлены в учебном пособии [19]. В последующем критерии диагностируемости для временных и операторных моделей непрерывных систем управления были опубликованы в работах [20 – 22]. В дальнейшем были разработаны критерии

диагностируемости для класса линейных динамических систем [23 – 25], для классов систем с гладкими нелинейностями и существенными нелинейностями [26 – 28].

Рассмотрим возможности применения ранее полученных результатов к диагностированию ОРУ по уравнениям его математических моделей, полученным в п. 2.2. Математическими уравнениями, наиболее конструктивно отражающими влияние дестабилизирующих воздействий на отклонения выходных сигналов, представляется система уравнений (2.15). Введем ряд определений.

Диагностируемость – это свойство уравнений ДФМ, описывающих ОРУ, характеризующееся возможностью однозначного установления в нем факта наличия соответствующего прямого признака каждого дестабилизирующего воздействия $d_i \in D$ по доступным наблюдению косвенным признакам в течении конечного интервала времени.

ОРУ называется диагностируемым относительно множества прямых признаков $\Lambda = \{\Delta\lambda_i\}_q^1$, если факт наличия каждого из них может быть однозначно установлен по доступным измерению косвенным признакам $\Delta y(t)$ на конечном интервале времени.

Итак, уравнения математической модели, отражающей динамическую функциональную связь прямых признаков дестабилизирующих воздействий $\Delta\lambda_i$ с косвенными $\Delta y_i(t)$ для ОРУ представимы в преобразованном виде следующим векторно-матричным уравнением:

$$\Delta y_i(t) = CG\Delta x_i(t) + C[\mathcal{A}_i\hat{x}_i(t) + \mathcal{B}_i u(t) + \mathcal{N}_i]\Delta\lambda_i; \Delta y_i(t_0) = \tilde{y}_{i0}. \quad (2.22)$$

Таких векторно-матричных уравнений будет q , так как $i = \overline{1, q}$ и поэтому математическая модель ОРУ на первом этапе анализа диагностируемости будет состоять из q уравнений, идентичных по структуре (2.22).

С целью упрощения аналитического описания введем такие новые обозначения $CG = G'$; $C\mathcal{A}_i = \mathcal{A}'_i$; $C\mathcal{B}_i = \mathcal{B}'_i$; $C\mathcal{N}_i = \mathcal{N}'_i$ и с учетом единичных коэффициентов матрицы C получим

$$\Delta \dot{y}_i(t) = G'\Delta y_i(t) + [\mathcal{A}'_i\hat{x}_i(t) + \mathcal{B}'_i u(t) + \mathcal{N}'_i]\Delta\lambda_i; \Delta y(t_0) = \tilde{y}_{i0}. \quad (2.23)$$

Теоретические исследования диагностируемости [28] базируются на следующей, применительно к уравнению (2.23), лемме.

Динамическая система полностью диагностируема на интервале $[t_0, t_1]$ в отношении однократных прямых признаков, если $\exists t \in [t_0, t_1]$, что во всех попарных сочетаниях косвенных признаков выполняется условие $\Delta y_i(t) \neq \Delta y_j(t)$, $i \neq j$, $i, j = \overline{1, q}$.

Для доступности дальнейшего изложения преобразуем уравнение (2.23). С этой целью введем функцию $\varphi_i(t)$, отражающую влияние прямого признака $\Delta \lambda_i$ на отклонение вектора выходных переменных:

$$\varphi_i(t) = [\mathcal{A}'_i \hat{x}_i(t) + \mathcal{B}'_i u(t) + \mathcal{N}_i], \quad (2.24)$$

тогда, используя уравнение (2.23), преобразовательные процессы в ОРУ можно представить в таком виде:

$$\Delta \dot{y}(t) = G' \Delta y(t) + \varphi_1(t) \Delta \lambda_1 + \varphi_2(t) \Delta \lambda_2 + \dots + \varphi_q(t) \Delta \lambda_q; \Delta y(t_0) = \tilde{y}_0. \quad (2.25)$$

Если обозначить составную матрицу как

$$L_i = [\mathcal{A}'_i \mathcal{B}'_i \mathcal{N}'_i], \quad (2.26)$$

а составной вектор как

$$v_i^T(t) = [\hat{x}_i(t) \ u(t) \ 1], \quad (2.27)$$

тогда функцию $\varphi_i(t)$ можно представить так:

$$\varphi_i(t) = L_i v_i(t). \quad (2.28)$$

Новые введенные характеристики позволяют представить уравнение (2.25) в таком виде:

$$\Delta \dot{y}(t) = G' \Delta y(t) + \sum_{i=1}^q L_i v_i(t) \Delta \lambda_i; \Delta y(t_0) = \tilde{y}_0. \quad (2.29)$$

В соответствии с доказанными теоремами и их следствиями в работе [28] и применительно к ОРУ, можно сформировать следующие критерии диагностируемости.

Критерий полной структурной диагностируемости. Для полной структурной диагностируемости ОРУ по уравнениям ДФМ в форме (2.29)

необходимо и достаточно, чтобы матрицы $L_i, i = \overline{1, q}$ были линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

Матрицы L_i формируются в процессе разработки математической модели (2.25) исходя из описания ОДО (2.12). Число попарных сочетаний

$$C_q^2 = \frac{q!}{2!(2-q)!}.$$

Предложенный критерий позволяет посредством анализа зависимости всех C_q^2 попарных сочетаний составных матриц L_i выявить наличие свойства диагностируемости ОРУ по его диагностическим функциональным уравнениям, отражающим аналитические связи множества прямых признаков Λ с вектором отклонений $\Delta y(t)$ на интервале диагностирования $[t_0, t_1]$.

На первом этапе анализа диагностируемости ОРУ встречаются, как правило, ситуации не выполнения предложенного критерия. Для этих ситуаций предлагается следующие критерии.

Критерий частичной структурной диагностируемости. ОРУ частично структурно диагностируемо по уравнениям ДФМ в форме (2.29), если среди попарных сочетаний матриц $L_i, i = \overline{1, q}$ найдется хотя бы одна линейно зависимая пара, а все остальные пары будут линейно-независимы.

Критерий полной структурной недиагностируемости. ОРУ полностью структурно недиагностируемо по уравнениям ДФМ в форме (2.29), если матрицы $L_i, i = \overline{1, q}$ линейно-зависимы во всех попарных сочетаниях.

Использование этих критериев позволяет выявить дестабилизирующие воздействия, не диагностируемые с помощью анализируемых уравнений ДФМ.

Если ОРУ на первом этапе исследования не удовлетворяет критерию полной структурной диагностируемости, то используются три пути обеспечения полной структурной диагностируемости, сформированные в результате проведенных исследований [28]. Первый – декомпозиция ОРУ на полностью структурно-диагностируемые фрагменты. Второй – изменение структуры исходного ОРУ посредством введения различного рода избыточностей. Третий путь комплексный, состоящий в компромиссном использовании декомпозиции и изменения структуры ОРУ.

Критерии структурной диагностируемости позволяют выявить только структурные связи прямых признаков с косвенными. Для проявления существующих и выявленных в процессе анализа этих структурных связей требуется, чтобы ОРУ соответствующим образом функционировал, а это

возможно подачей конкретных управляющих воздействий. Каких? Ответ на этот вопрос формируется в результате использования следующего критерия.

Критерий полной сигнальной диагностируемости. Для полной сигнальной диагностируемости ОРУ с помощью уравнений ДФМ в форме (2.29) необходимо и достаточно, чтобы векторы $L_i^* v_i(t)$, $i = \overline{1, q}$ были линейно-независимы во всех попарных сочетаниях.

Из критерия следует, что для оценки сигнальных свойств ОРУ, полностью структурно диагностируемого, о чем свидетельствует обозначение L_i^* , требуется сформировать векторы $L_i^* v_i(t)$, $i = \overline{1, q}$, выбрав воздействия $v(t)$, обеспечивающие линейную независимость этих векторов во всех попарных сочетаниях. Если не удастся выбрать такие $v(t) \in U^r$, чтобы полностью выполнялись условия, тогда следующие критерии позволяют оценить такие свойства.

Критерий частичной сигнальной диагностируемости. ОРУ, полностью структурно диагностируемый по уравнениям ДФМ в форме (2.29) будет частично сигнально диагностируем, если среди попарных сочетаний векторов $L_i^* v_i(t)$, $i = \overline{1, q}$ найдется хотя бы одна пара линейно зависимых векторов, а все остальные векторы в попарных сочетаниях будут линейно-независимы при определенном управляющем воздействии $u(t) \in U^r$.

Критерий полной сигнальной недиагностируемости. ОРУ, полностью структурно диагностируемый по уравнениям ДФМ в форме (2.29), будет полностью сигнально недиагностируема, если векторы $L_i^* v_i(t)$, $i = \overline{1, q}$ линейно зависимы во всех попарных сочетаниях при $u(t) \in U^r$.

Итак, для оценки сигнальных свойств ОРУ требуется вначале произвести оценку его структурных свойств и, если объект будет полностью структурно диагностируем, только тогда можно приступить к выявлению возможности диагностирования ОРУ для управляющих воздействий $u(t) \in U^r$ или начальных условий $\tilde{y}_{i0}$. Если исследуемый объект частично структурно диагностируем или полностью недиагностируем, то никакими управляющими воздействиями или ненулевыми начальными условиями его нельзя сделать диагностируемым, т. е. недостатки и несовершенство структуры объекта не компенсируются никакими сигнальными воздействиями.

Для обеспечения полной сигнальной диагностируемости ОРУ требуется выбрать воздействия: управляющие, начальные условия, дестабилизирующие такие, которые бы обеспечили линейную независимость соответствующих пар

характеристических векторных функций. Например, от выбора вектора управляющих воздействий, обеспечивающих полную сигнальную диагностируемость, зависит режим функционирования объекта, а следовательно, и режим диагностирования [28]. Поэтому для обеспечения соответствующих сигнальных свойств возможен выбор таких режимов диагностирования:

- 1) тестовый;
- 2) рабочий;
- 3) комбинированный.

Свойство диагностируемости ОРУ – это только лишь одно свойство объекта для осуществления его рационального управления. Выявленную в процессе диагностирования причину дестабилизирующего воздействия требуется нейтрализовать путём использования соответствующего избыточного средства для достижения главной цели рационального управления – обеспечения работоспособности ОРУ. Восстановлению работоспособности динамических объектов посвящен ряд исследований, результаты которых представлены в работах [29 – 33]. Основываясь на этих и других работах рассмотрим свойство и оценки восстанавливаемости ОРУ.

Восстанавливаемость – это свойство ОРУ, характеризующее возможность его перевода из неработоспособного состояния в работоспособное, посредством парирования дестабилизирующих воздействий $d_i \in D$ на конечном интервале времени.

Объект рационального управления называется восстанавливаемым, если сформированы средства восстановления, позволяющие компенсировать влияние прямых признаков $\Delta\lambda_i \in P$ так, что $\Delta y_i(t) \rightarrow 0$ на конечном допустимом интервале времени.

Таблица 2.1.

P	Средства восстановления				Уровень
	v_1	v_2	• • •	v_μ	
$\Delta\lambda_1$	σ_{11}	σ_{12}	• • •	$\sigma_{1\mu}$	c_1
$\Delta\lambda_2$	σ_{21}	σ_{22}	• • •	$\sigma_{2\mu}$	c_2
• • •	• • •	• • •	• • • • • • • • •	• • •	• • •
$\Delta\lambda_q$	σ_{q1}	σ_{q2}	• • •	$\sigma_{q\mu}$	c_q
Ранг	ℓ_1	ℓ_2	• • •	ℓ_μ	

Количественную оценку восстанавливаемости ОРУ возможно формировать на основании следующей таблицы 2.1. В этой таблице по горизонтали размещены прямые признаки $\Delta\lambda_i$, а по вертикали – средства восстановления, используемые для их нейтрализации. Итак, для ОРУ в результате его проектирования и конструирования формируются

средства нейтрализации последствий прямых признаков $\Delta\lambda_i$. Причем одно средство может нейтрализовать несколько признаков $\Delta\lambda_i$, что отражается с помощью переменной σ_{ij} , принимающей значение «1», если можно нейтрализовать прямой признак $\Delta\lambda_i$ и значения «0», если нельзя. Параметры ℓ_j , $j=1,\mu$, численно равные количеству «1» в столбце, характеризуют ранг средств восстановления v_j . Чем больше прямых признаков $\Delta\lambda_i$ можно нейтрализовать путём использования средства v_j , тем выше его ранг ℓ_j . Параметр c_j , численно равный сумме «1» в строке, характеризует уровень восстанавливаемости ОРУ при появлении дестабилизирующего воздействия d_i . Чем больше c_i , тем большим количеством средств можно нейтрализовать прямой признак $\Delta\lambda_i$. И чем меньше величина c_i , тем меньшими средствами v_j можно восстановить работоспособность ОРУ.

Используя количественные характеристики c_i и ℓ_j , можно сформировать ряд критериев восстанавливаемости. Так, если ввести для ОРУ значение требуемого уровня восстанавливаемости как выполнение условия $\forall c_i \geq c_T, i=\overline{1,q}$. При невыполнении этого условия необходимо дополнить средства восстановления такими, чтобы выполнялось условие для всех уровней C_i . Для каждого ОРУ можно сформулировать требование по допустимому рангу средств восстановления – ℓ_D , тогда критерием ранга средств восстановления будет выполнение условия: $\forall \ell_j \geq \ell_D, j=\overline{1,\mu}$. Если это условие не выполняется, тогда необходимо заменить средства восстановления низкого ранга на средства с более высоким допустимым рангом. Предложенные критерии отражают, в основном структурные особенности средств восстановления. Применение этих критериев позволяет сформировать сбалансированное множество средств восстановления $V = \{v_j\}_{j=1}^{\mu}$.

Рассмотрим функциональные критерии восстанавливаемости ОРУ. Представим уравнение дестабилизирующего движения (2.23) в следующем виде:

$$\Delta\dot{y}_i(t) = G'\Delta y_i(t) + \begin{bmatrix} \mathcal{A}' & \mathcal{B}' & \mathcal{N}'_i \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_i(t) \\ u(t) \\ 1 \end{bmatrix} \Delta\lambda_i; \Delta y_i(t_0) = \tilde{y}_{i0}. \quad (2.30)$$

Появление в функционировании ОРУ отклонения $\Delta y_i(t)$ обусловлено дестабилизирующим воздействием d_i , величина которого и характер описывается вторым слагаемым представленного уравнения. Если сформировать с помощью выбранных средств восстановления работоспособности и полученных в результате диагноза оценочных значений прямых признаков $\Delta \hat{\lambda}_i$ такие матрицы:

$$A_i^B = \mathcal{A}'_i \Delta \hat{\lambda}_i; \quad B_i^B = \mathcal{B}'_i \Delta \hat{\lambda}_i; \quad N_i^B = \mathcal{N}'_i \Delta \hat{\lambda}_i, \quad (2.31)$$

тогда вектор нейтрализующего воздействия $n_i(t)$ можно представить так:

$$n_i(t) = \begin{bmatrix} A_i^B & B_i^B & N_i^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_i(t) \\ u_B(t) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2.32)$$

Этот вектор в соответствии с функциональной схемой (рис. 2.4) формируется в процессе его проектирования. На основании предыдущих рассуждений, если пренебречь запаздыванием, обусловленным диагностированием и принятием решения по восстановлению, уравнение движения ОРУ для дестабилизирующего воздействия d_i , характеризуемого прямым признаком $\Delta \lambda_i$, можно представить в таком виде:

$$\Delta \dot{y}_i(t) = G' \Delta y_i(t) + \begin{bmatrix} \mathcal{A}'_i & \mathcal{B}'_i & \mathcal{N}'_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_i(t) \\ u(t) \\ 1 \end{bmatrix} \Delta \lambda_i - \begin{bmatrix} A_i^B & B_i^B & N_i^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_i(t) \\ u_B(t) \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (2.33)$$

$$\Delta y_i(t_0) = \tilde{y}_{i0}.$$

Алгоритм управления $u_B(t) = f[\Delta y(t)]$ можно сформировать с помощью метода синтезирующих функции А. М. Ляпунова [10, 32] в такой форме:

$$V[\Delta y_i(t)] = \Delta y_i^T(t) Q \Delta y_i(t), \quad (2.34)$$

где $Q = Q^T \succ 0$ – симметричная, положительно определенная матрица в области Ω_i , $\Delta y_i(t) \in \Omega_i$.

При $\lim_{x \rightarrow \infty} \Delta y_i(t) = 0$ обеспечивается асимптотическая устойчивость нулевого положения равновесия, а следовательно, и минимум функции, что означает восстановление работоспособности ОРУ при дестабилизирующем воздействии d_i , характеризуемым прямым признаком $\Delta \lambda_i$.

Качество восстановления можно оценивать традиционными в ТАУ показателями во временной области:

- 1) временем переходного процесса – $t_{\text{пп}}$, с;
- 2) перерегулированием σ , %;
- 3) точностью $\Delta[\Delta y(t)]$.

При установлении обоснованных ограничений на эти показатели формируются соответствующие критерии восстановления работоспособности ОРУ.

2.4 Диагностические логические модели

В представленной на рис. 1.2. блок-схеме ключевым, другими словами, системообразующим блоком выступает блок диагностики, в котором формируется диагноз посредством последовательного решения задач обнаружения, локализации и идентификации дестабилизирующих воздействий. При решении этих диагностических задач требуется формировать множество косвенных признаков. К этим признакам, исходя из основных положений рационального управления, предъявляются следующие базовые требования. Первое. Для вычисления косвенных признаков должна быть доступность качественному измерению соответствующих переменных и цифровой их обработке с помощью микропроцессорных средств УАУ. Второе. Получение полного диагноза возможно посредством процедуры последовательного поиска, реализуемой в продукционной базе знаний. Третье. Требование оперативности диагноза, вызванной необходимостью удержания требуемых запасов устойчивости замкнутого контура системы рационального управления, обуславливает потребность оптимизировать множество косвенных признаков.

Эти базовые требования вызвали необходимость в переходе от косвенных признаков в форме дискретных функций времени $\Delta y_i(k)$ к косвенным признакам в форме булевых переменных z_j , получаемых с помощью двузначных предикатных уравнений.

$$z_j = S_2[\Delta y_i(k)],$$

(2.35)

где $S_2[.]$ – символ двузначного предиката.

С помощью таких предикатных уравнений формируются таблицы, связывающие прямые признаки дестабилизирующих воздействий $\Delta\lambda_i$ с косвенными z_j (табл. 2.2). Приведенная таблица применяется для решения задачи обнаружения дестабилизирующих воздействий.

При решении задач локализации и идентификации дестабилизирующих воздействий используются преобразования табл. 2.2 в соответствующие таблицы, отражающие попарную различимость прямых признаков $\Delta\lambda_i$. Описанные таблицы качественно отражают структуру связей прямых признаков дестабилизации ОРУ с косвенными. Очевидно, что эти связи

Таблица 2.2. можно описать и с помощью

$\Delta\lambda$	Косвенные признаки				
	z_1	• • •	z_j	• • •	z_m
$\Delta\lambda_1$	α_{11}	• • •	α_{1j}	• • •	α_{1m}
•	•	• • •	•	• • •	•
•	•	• • •	•	• • •	•
•	•	• • •	•	• • •	•
$\Delta\lambda_i$	α_{i1}	• • •	α_{ij}	• • •	α_{im}
•	•	• • •	•	• • •	•
•	•	• • •	•	• • •	•
•	•	• • •	•	• • •	•
$\Delta\lambda_q$	α_{q1}	• • •	α_{qj}	• • •	α_{qm}

дизъюнктивных и конъюнктивных булевых уравнений, что будет отражать один из атрибутов соответствующих математических моделей.

Если дополнить такие математические конструкции атрибутами, связанными с условиями их разрешения, то полученные модели будут представлять собой диагностические логические модели (ДЛМ), с помощью которых формируются

оптимальные множества косвенных признаков и оптимальные процедуры их поиска при решении задач диагностирования ОРУ. Как правило, представленные таким образом таблицы ДЛМ содержат избыточное количество признаков z_j , обладающих различной ценой с точки зрения технико-экономических критериев реализации процедур диагностирования. Для оптимального выбора косвенных булевых признаков можно использовать метод построения канонических форм таблиц ДЛМ [28], заключающийся в нахождении минимальных совокупностей косвенных признаков z_j , которые «доставляли» хотя бы «1» для каждой строки булевой таблицы. Применительно к табл. 2.2 используется следующая рекуррентная процедура:

$$\begin{aligned}
 M_1 &= \{z'_{j1}\}; \\
 M_2 &= \left\{ \min \left[\left\{ z'_{j2} \right\} \wedge M_1 \right] \right\}, \\
 &\quad \left\{ z'_{j2} \right\}
 \end{aligned}
 \tag{2.36}$$

где z'_{ji} – признаки z_j , содержащие «1» в i -ой строке таблицы;

M_1 – множество косвенных булевых признаков, содержащих «1» в первой строке таблицы;

$\wedge$ – символ конъюнкции;

M_i – множество минимальных совокупностей.

На последнем q -м шаге рекуррентной процедуры получаются все минимальные конъюнктивные формы с помощью уравнения

$$M_q = \left\{ \min \left[\left\{ z'_{jq} \right\} \wedge M_{q-1} \right] \right\}.
 \tag{2.37}$$

Выбор рациональной совокупности признаков производится исходя из условия конкретной задачи диагностирования посредством технико-экономического анализа полученных минимальных совокупностей множества M_q и выявления подходящей. Подходящая совокупность минимальных булевых признаков позволяет сформировать новую таблицу, связывающую прямые признаки дестабилизирующих воздействий $\Delta\lambda_i$ с минимальной совокупностью косвенных z_j . Такая связь в табличной форме как атрибут канонической ДЛМ позволяет при решении задач диагностирования формировать эффективные машинные продукционные базы знаний.

Итак, использование принципа управления по диагнозу приводит к необходимости формирования новых объектов – объектов рационального управления. Эти объекты управления в линейном математическом приближении должны обладать не только необходимыми свойствами: управляемостью, наблюдаемостью и устойчивостью, но и достаточными свойствами: диагностируемостью и восстанавливаемостью. Это обстоятельство и отражает специфику объектов рационального управления.

ГЛАВА

III

СИГНАЛЬНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Истинно знать что-либо – значит
знать его причины.*

*Ф. Бэкон (1561 – 1626) – английский философ,
основоположник эмпиризма.*

Диагностирование – это процесс выявления причин нарушения работоспособности объекта рационального управления. Для формирования такого процесса требуется решить ряд последовательных и взаимосвязанных базовых, ключевых, основных задач. Первая задача связана с обнаружением нарушений в работоспособности объекта. Эта задача обнаружения появления дестабилизирующих воздействий. Вторая задача после обнаружения – локализация дестабилизирующего воздействия, т. е. нахождения конструктивно-законченной компоненты объекта рационального управления, подверженной дестабилизирующему воздействию. Дестабилизация работоспособности компонента ОРУ может быть вызвана различными типами воздействий, начиная от внешних – шумов и помех, и, заканчивая внутренними – дрейфами, уменьшениями эффективности, обрывами и т. п. Поэтому третья задача диагностирования заключается в определении типов дестабилизирующих воздействий. Когда определен тип дестабилизирующего воздействия, вполне логично перейти к решению четвертой задачи – идентификации дестабилизирующего воздействия, что означает выявление конкретной физической причины нарушения работоспособности объекта рационального управления. С математической точки зрения задачи диагностирования принадлежат к классу обратных задач, особенность которых по Ж. С. Адамару – некорректность. Формированием диагностических моделей, удовлетворяющих критериям диагностируемости, и разработкой соответствующих методов их использования, эти задачи переводятся в класс условно корректных по А. Н. Тихонову [1]. Последовательное решение таких задач дает возможность перейти к формированию структуры машинного поиска нарушения работоспособности – что составляет содержание пятой задачи диагностирования.

Наиболее приемлема для поиска причин дестабилизации продукционная база знаний в форме дихотомических деревьев. В узлах дихотомических

деревьев размещаются двузначные предикатные уравнения, в которых используются как сигнальные, так и параметрические характеристики, получаемые из соответствующих диагностических моделей. В результате решения таких уравнений определяется траектория поиска причин нарушения работоспособности объекта рационального управления, т. е. осуществляется его диагностирование.

3.1 Истоки сигнально-параметрического диагностирования

Первая задача диагностирования – обнаружение или контроль, а также идеи и методы ее решения появились на заре человеческой цивилизации в таких областях деятельности как земледелие, астрономия, медицина, животноводство, физика, химия, другими словами, в естествознании. С развитием материального производства связано и совершенствование методов и средств контроля. Идейная сущность контроля не претерпела существенных изменений. Применительно к системам автоматического управления идея контроля начала использоваться в таких первых устройствах как капканы и ловушки, водяные часы Клепсибия (около I – II вв. до н. э.), в различных автоматических устройствах, описанных Героном Александрийским (около I в. н. э.). Позже эта идея воплотилась в принцип управления по возмущению в регуляторах А. Ромелли и Ж. Понселе, в принцип управления по отклонению в регуляторах И. Ползунова и Дж. Уатта [3, 4].

В классических замкнутых системах автоматического управления используется принцип управления по отклонению, реализуемый с помощью процедуры сравнения и соответствующих алгоритмов в устройстве автоматического управления. Процедура сравнения задающего воздействия с выходом объекта автоматического управления позволяет выявить в режиме функционирования все отклонения в работоспособности, вызванные возмущающими воздействиями. Такая процедура широко использовалась на начальных этапах решения технических задач контроля работоспособности различных объектов как в установившихся режимах, так и в динамических. Накопленный практический опыт позволил перейти к формированию новой отрасли знаний – технической диагностики.

Техническая диагностика как отрасль знания о моделях, методах и средствах оценки функционального состояния технических объектов [2] базируется на ряде положений применительно к диагностированию объектов рационального управления эти положения можно сформулировать следующим образом.

Первое. Полная информация о работоспособном состоянии объекта рационального управления в режиме его функционирования должна быть представлена в алгоритмической реализуемой на цифровой машине форме, другими словами, совокупностью алгоритмических эталонных моделей, воспроизводящих заданные функции объекта.

Второе. Полная информация об условиях функционирования объекта, т. е. о характере, величине и дестабилизирующем влиянии окружающей и внутренней среды на работоспособность объекта. Такая информация должна быть представлена в соответствующих моделях, приемлемых для решения последующих задач анализа и синтеза диагностических процедур, т. е. в диагностических моделях.

Третье. Объект рационального управления проектируется для выполнения множества функций $F = \bigcup_{i=1}^n F_i$, реализация которых обеспечивает его работоспособность. Каждой функции F_i соответствует множество сигналов $S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}\}$, отражающих качество ее выполнения, т. е. соответствующее свойство объекта рационального управления. Для последующей обработки этих сигналов требуется их измерить. Под измерением будем понимать процедуру количественной или качественной оценки соответствующего свойства объекта. В теории измерений [5] используют пять типов шкал: наименований, порядка, интервалов, отношений и абсолютные. «Измерительную шкалу следует выбирать максимально сильной, однако сила шкалы должна соответствовать природе наблюдаемого явления и не быть завышенной» [6].

Четвертое. Результаты адекватного измерения сигналов объекта рационального управления сравниваются с результатами воспроизведения его эталонных свойств – функций в реальном масштабе времени с целью формирования разностного сигнала, содержащего информацию о качестве выполнения функций, т. е. о степени его работоспособности.

Пятое. Степень работоспособности оценивается с помощью процедуры классификационной обработки разностного сигнала. В простейших задачах диагностики используются два класса состояний: работоспособное и неработоспособное. В более сложных задачах диагностики используется большее число классов, соответствующих причинам дестабилизации работоспособности объекта рационального управления, другими профессиональными словами, глубине диагностирования.

Интерес к технической диагностике систем управления появился в 70 – 80х годах прошлого столетия в связи с возрастающими требованиями к

качеству и безопасности, обусловленными техногенными авариями и катастрофами [7 – 25]. Количество моделей, описывающих нештатное функционирование систем автоматического управления, экспоненциально возрастало, что вызвало и подобный рост методов диагностирования. В условиях развивающейся области знания, а таковой представляется техническая диагностика динамических систем, упорядочить все множество известных диагностических моделей посредством классической – полной и выдержанной их классификации не представляется возможным. «Все научные проблемы начинаются как проблемы закрытого ящика, т. е. проблемы, в которых известно лишь небольшое число значимых переменных. Движение науки состоит в прогрессирующем раскрытии этих ящиков». Используя эту закономерность в эволюции знаний, множество диагностических моделей динамических систем можно систематизировать с использованием иерархического принципа, сформулированного в статье «Роль моделей в науке» [26].

«Последовательное добавление выходов или переменных ведет постепенно к все более полно проработанным теоретическим моделям: ведет, следовательно, к иерархии этих моделей от относительно простых, высоко абстрактных моделей, к более сложным, более конкретным теоретическим структурам». В результате такой систематизации приведенная в работе [27] иерархия диагностических моделей усовершенствована и представлена на рис. 3.1.

Методы диагностирования, базирующиеся на диагностических моделях четвертого и пятого уровней представленной иерархии, можно классифицировать, выделив ведущую идею, замысел, принцип, на три таких подхода: сигнальный, параметрический и сигнально-параметрический [27]. Характерная особенность сигнального подхода заключается в использовании косвенных диагностических признаков в форме отклонений выходных сигналов объекта диагностирования от эталонных сигналов. С помощью этих признаков решаются задачи обнаружения отказов и поиска места их возникновения. Первая работа по сигнальному диагностированию – это диссертация R. Beard [14]. В последующем это работы R. Glart [15], R. Frank [18], А. А. Мироновского [13] и др.

В основе параметрического подхода заложена идея параметрической идентификации объекта диагностирования и получения косвенных диагностических признаков в форме отклонений оценочных значений коэффициентов динамических моделей от их номинальных значений. В таком признаковом пространстве решаются задачи обнаружения, поиска места и

вида отказов. Первые модели и методы этого подхода были представлены в работе Я. А. Гельфандбейна [7], глубокое развитие этот подход получил в работах R. Isermann [16], А. К. Дмитриева, Р. М. Юсупова [22] и др.

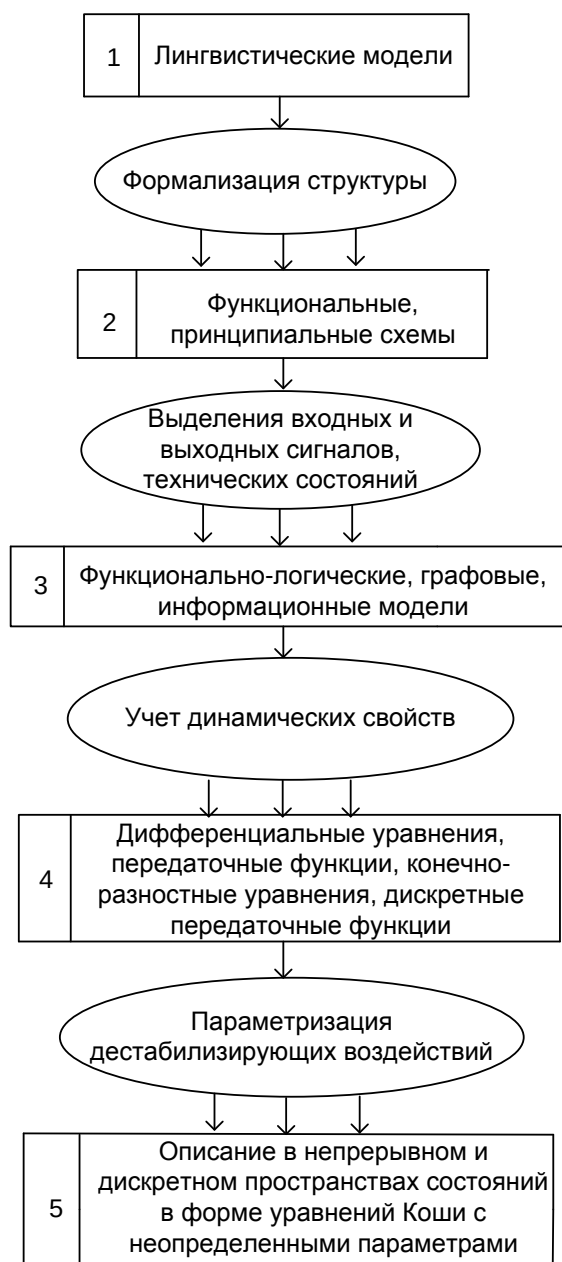


Рисунок 3.1 – Иерархия диагностических моделей динамических систем

Появление сигнально-параметрического подхода было обусловлено желанием так объединить сигнальный и параметрический, чтобы существенно увеличить глубину диагностирования до конкретного физического вида и значительно уменьшить при этом необходимые вычислительные ресурсы.



Рисунок 3.2 – Сигнально-параметрическое диагностирование

Для конструктивного объединения потребовалась разработка новой концепции для динамических систем – это концепция диагностических моделей, отражающих причинно-следственные связи в нештатных ситуациях, вызванных неисправностями, поломками, сбоями, в общем, отказами компонент. Первые такие модели – функционально-логические отражали качественно факт отказа компоненты с деформацией выходных сигналов системы управления [2, 8, 11, 28]. В последующем удалось отразить причинно-следственные связи количественно [24, 27, 29 – 33]. Итак, в основе сигнально-параметрического подхода диагностические модели – это новые классы математических моделей, связывающих косвенные сигнальные признаки с прямыми параметрическими признаками дестабилизирующих воздействий. С помощью этих моделей удастся разрабатывать алгоритмические процедуры поиска конкретных видов дестабилизирующих воздействий в форме машинно-реализуемых дихотомических деревьев.

В результате проводимых исследований [34, 35] удалось структурировать сигнально-параметрический подход в виде схемы, представленной на рис 3.2. В этом подходе последовательно снимается неопределенность момента времени появления дестабилизации посредством решения задачи обнаружения, неопределенность выявления неработоспособного фрагмента снимается решением задачи локализации, неопределенность типа дестабилизации – решением задачи определения типов, неопределенность вида дестабилизации устраняется при решении задачи идентификации вида.

Разработка диагностического обеспечения объекта рационального управления включает как формализованные этапы, так и не формализованные. Не формализованные этапы – левая часть представленной структуры (рис. 3.2.), это, как правило, этапы, связанные с формированием условий для соответствующих этапов решения формализованных задач, представленных в правой части схемы.

Направленность связей этапов свидетельствует об итерационном характере решения задач диагностирования объектов рационального управления.

Представленные исторические факты свидетельствуют о фундаментальных истоках сигнально-параметрического диагностирования динамических объектов, одним из новых классов которых выступают объекты рационального управления.

3.2 Обнаружение дестабилизации

Суть задачи обнаружения дестабилизации в обобщенном динамическом объекте можно представить с помощью графической модели в форме функциональной схемы (рис. 3.3).

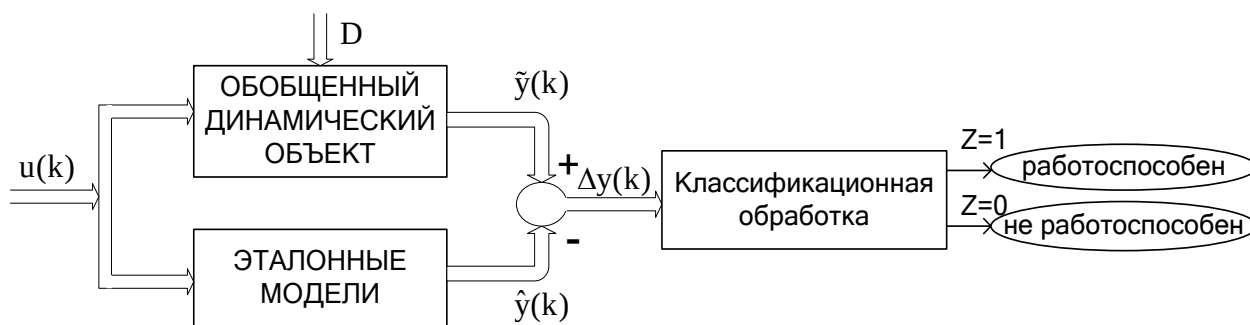


Рисунок 3.3 – Функциональная схема обнаружения дестабилизации

Итак, ОДО проектируется для выполнения множества функций $F = \{F_i\}_1^n$. Каждой функции объекта соответствует математическая модель M_i , отражающая преобразовательные свойства по отношению к соответствующим управляющим и дестабилизирующим воздействиям. Тогда все возможные состояния как в штатном, так и в нештатном режимах описываются совокупностью моделей $M = \{M_i\}_1^n$. Каждой модели M_i соответствует вектор управляющего воздействия в дискретной форме $u_i(k)$, подмножество дестабилизирующих воздействий $D_i \subset D$ и соответствующий набор сигналов s_{ij} , отражающих качество выполнения i -ой функции, в форме вектора выхода $y_i(k)$. На рис. 3.3 представлены $u(k)$ как вектор управляющих воздействий для выполнения всех возложенных на объект управления функций. Вектор $\tilde{y}(k)$ – вектор выходных сигналов всех моделей M . Каждой модели M_i объекта рационального управления выбирается в процессе проектирования эталонная модель $\hat{M}_i$, воспроизводящая наилучшим образом, с точки зрения технического задания, желаемое поведение объекта, иными словами, соответствующую функцию объекта. Множество эталонных моделей $\hat{M} = \{\hat{M}_i\}_1^n$ воспроизводит требуемые функции объекта посредством вектора оценочных значений $\hat{y}(k)$. Сравняющее устройство формирует вектор разностного сигнала – $\Delta y(k)$. Классификационная обработка этого сигнала

позволяет сформировать заключение о степени работоспособности контролируемого объекта.

Итак, основные задачи при обнаружении дестабилизации можно сформулировать следующим образом:

1) выбор структуры и параметров эталонных моделей, обеспечивающих приемлемое для контролируемого динамического объекта воспроизведение его эталонного поведения $\hat{y}(k)$;

2) выбор рациональной совокупности косвенных признаков обнаружения – $\Delta y(k)$ для последующей классификационной обработки;

3) разработка классификационных процедур обработки, позволяющих установить факт появления дестабилизирующего воздействия $d_i \in D$, $i = \overline{1, n}$.

Рассмотрим суть каждой задачи и возможные подходы к ее решению.

Первая основная задача обнаружения состоит в выборе эталонных моделей, воспроизводящих желаемое функциональное поведение объекта. Выбор эталонных динамических моделей рекомендуется производить исходя из множества трех классов моделей, использованных в главе 2 при выводе уравнений дестабилизирующего движения ОДО. Итак, структурно-подобная ОДО эталонная модель описывается уравнениями следующего вида:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + Bu(k); \hat{x}(k_0) = 0; \\ \hat{y}(k) &= C\hat{x}(k).\end{aligned}\tag{3.1}$$

Статическая эталонная модель может быть представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) &= A\tilde{x}(k) + Bu(k); \hat{x}(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \hat{y}(k) &= C\hat{x}(k).\end{aligned}\tag{3.2}$$

Эталонная модель в форме наблюдателя Люенбергера описывается такой системой уравнений:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) &= G\hat{x}(k) + K\tilde{y}(k) + Bu(k); \hat{x}(k_0) = 0; \\ \hat{y}(k) &= C\hat{x}(k).\end{aligned}\tag{3.3}$$

Функциональные возможности приведенных моделей различны как по динамике воспроизведения оценочного значения $\hat{y}(k)$, так и по точности. К примеру, эталонные модели, описываемые уравнениями (3.1) и (3.3) не могут

оценивать начальные условия $\tilde{x}(k_0)$ ОДО, так как их начальные условия $\hat{x}(k_0)=0$. А с помощью статической эталонной модели (3.2) это можно сделать и поэтому оценка $\hat{y}(k)$ в этом случае будет более точной, а следовательно, и признак $\Delta y(k)$ более информативным о появлении дестабилизирующего воздействия. Время переходного процесса в эталонных моделях, описываемых уравнениями (3.1) и (3.2), будет совпадать с временем переходного процесса ОДО, а использование наблюдателя Люенбергера в качестве эталонной модели позволяет с помощью матрицы G варьировать время реакции на управляющее воздействие $u(k)$. Для реализации статической эталонной модели необходимо вычисление вектора состояния ОДО – $\tilde{x}(k)$, что не всегда возможно. Эти и ряд других обстоятельств позволяют ставить и решать задачу не формализованного выбора структуры и параметров эталонных моделей, в наибольшей степени соответствующих целям рационального управления и условиям функционирования конкретного ОДО.

Напомним, что наблюдатель Д. Люенбергера представляет собой обобщенное описание уравнений эталонных моделей. Так, если матрица $K \equiv 0$, а матрица $G \equiv A$, то получаются уравнения в форме (3.1). Если же матрица $G \equiv 0$ и для матрицы C существует обратная матрица C^{-1} , тогда получаются уравнения статической эталонной модели (3.2).

Вторая основная задача. В соответствии с приведенной функциональной схемой обнаружения дестабилизации (рис. 3.3) косвенными признаками их появления служит вектор отклонения $\Delta y(k)$. Необходимость выбора компонент этого вектора возникает в связи со следующим обстоятельством. Каждой функции F_i объекта соответствует свой набор выходных сигналов $-\tilde{y}_i(k)$, на которых проявляются последствия дестабилизирующих воздействий. Для решения задачи обнаружения можно использовать полный вектор выходных сигналов $\tilde{y}(k)$. При избыточных объемах информации в векторе $\tilde{y}(k)$, а такое, как правило, встречается в практике разработки диагностического обеспечения, увеличивается потребность в ресурсах для получения диагностического заключения, что приводит к понижению оперативности и повышению расходов ресурсов на диагноз. Поэтому для рационального управления целесообразно производить выбор признаков для решения каждой задачи диагностирования (рис. 3.2). Математические средства для решения задачи выбора в пространстве изменяющихся сигналов $\tilde{y}(k)$ или $\Delta y(k)$ пока не найдены, поэтому используются косвенные средства,

базирующиеся на использовании ДЛМ (см. п. 2.4), соответствующих третьему уровню иерархии диагностических моделей (рис. 3.1). С помощью ДЛМ и метода их оптимизации осуществляется выбор рациональной совокупности косвенных признаков обнаружения [36].

Третья основная задача при обнаружении дестабилизирующих воздействий состоит в разработке алгоритмов обнаружения посредством классификационных процедур обработки косвенных признаков. Точность функционирования ОДО может оцениваться по различным критериям и с использованием оптимальных косвенных признаков в форме $\Delta y_0(k)$ это могут быть следующие функционалы:

$$\begin{aligned} I_0 &= \Delta y_0(k); I_1 = \sum_{k=k_0}^{k_1} \Delta y_0(k); \\ I_2 &= \sum_{k=k_0}^{k_1} |\Delta y_0(k)|; I_3 = \sum_{k=k_0}^{k_1} \Delta y_0^T(k) Q \Delta y_0(k). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Для установления факта появления в ОДО дестабилизирующего воздействия используются двузначные предикатные уравнения, обладающие следующими свойствами:

$$z_i = S_2(\delta_{ij} - I_{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{если } I_{ij} \leq \delta_{ij}(k); \\ 0, & \text{если } I_{ij} > \delta_{ij}(k), i = \overline{1, n}; j = \overline{0, 3}, \end{cases} \quad (3.5)$$

где $S_2(\cdot)$ – символ двузначного предиката;

δ_{ij} – допустимое пороговое значение;

I_{ij} – значение критерия для i -ой функции ОДО и для j -ой его формы.

Допустимое пороговое значение зависит как от управляющего воздействия $u(k)$, так и от начальных условий ОДО $\tilde{x}(k_0)$. Установив эту зависимость $\varphi[u(k), \tilde{x}(k_0)]$, можно формировать динамическое значение $\delta_{ij}(k)$ и обеспечить условия раннего обнаружения дестабилизации во всех режимах функционирования ОДО.

Развернутую процедуру обнаружения можно представить с помощью структурной схемы (рис. 3.4).

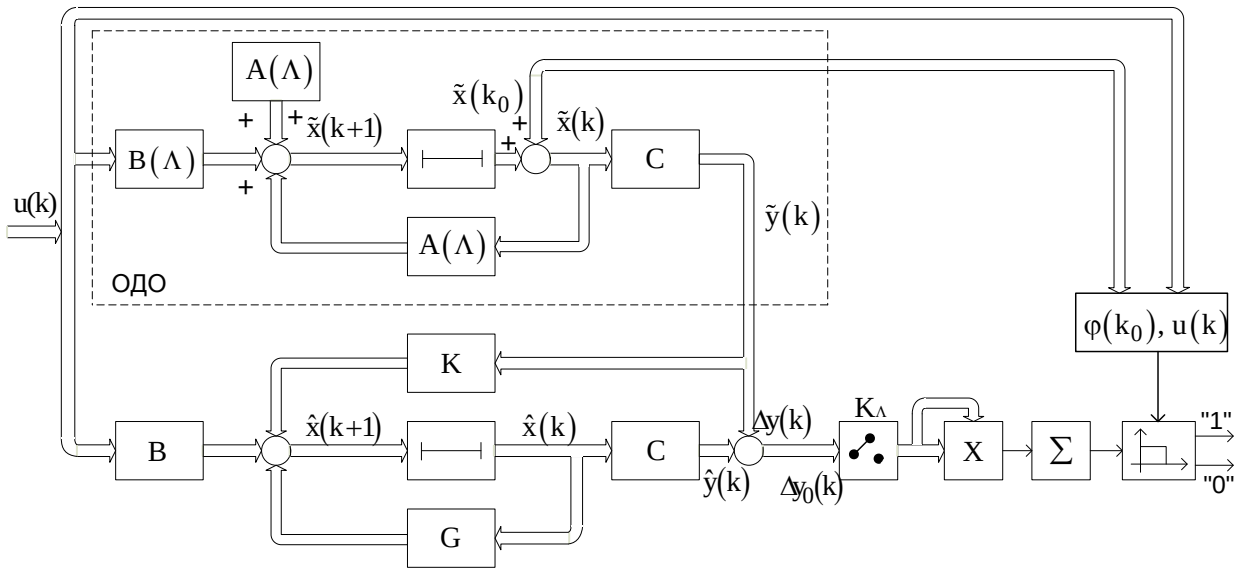


Рисунок 3.4 – Структурная схема обнаружения дестабилизации ОДО

В этой схеме ОДО представлен графическим изображением системы уравнений (2.16) в дискретном виде. Эталонная модель представлена графическим изображением системы уравнений (3.3). Из разностного сигнала $\Delta y(k)$ формируется совокупность оптимальных косвенных признаков обнаружения $\Delta y_0(k)$. При выборе показателей качества в форме суммы необходим ключ (K_λ), формирующий подачу сигналов в интервале $[k_0, k_1]$. В схеме реализован суммарный показатель качества $I_3[\Delta y_0(k)]$ с помощью блока перемножения и сумматора. В результате получается скалярная оценка показателя качества, которая сравнивается в блоке классификации, имеющем нелинейную характеристику, описываемую предикатным уравнением (3.5). Допустимые пределы изменения показателя качества формируются на основании $\tilde{x}(k_0)$ и $u(k)$ с помощью функции $\varphi[\cdot]$.

3.3 Локализация дестабилизирующих фрагментов

Локализация – устоявшийся термин в технической диагностике систем автоматического управления и означает поиск фрагментов ОРУ, подверженных действию дестабилизирующих факторов $D_i \subset D_u$, имеющих доступные измерению входы и выходы.

В практике проектирования систем управления объектами ракетно-космической техники используется традиционный принцип формирования

предельно возможного количества контрольных точек. Это обусловлено рядом следующих обстоятельств. Первое. Использование принципиально новых функциональных элементов, компонент и приборов или их модификаций, отработка которых требовала исчерпывающе больших объемов измерений для получения достоверного диагноза функционального состояния. Второе. Новое или модифицированное приборное оборудование в экстремальных условиях эксплуатации ракетно-космической техники нуждалось также в большом числе измерений для передачи их по телеметрии в центр управления полетом как для контроля, так и для выявления причин нештатного функционирования. Третья. Большие объемы бортовых измерений позволяли повысить «уровень защиты» подрядной фирмы от необоснованного, зачастую волевого и пристрастного заключения о причинах нештатных ситуаций в полете.

С теоретической точки зрения такая традиция формирования множества контрольных точек для диагностирования систем управления летательными аппаратами приводит к значительной избыточности сформированных множеств и, как следствие, к увеличению ресурсных потребностей для осуществления диагностирования и, в конечном итоге, к снижению эффективности использования изделия. Альтернативным подходом к формированию контрольных точек, а более конкретной, множества измеряемых переменных ОДО представляется подход, базирующийся на диагностических моделях: диагностических функциональных и диагностических логических [27, 37].

Итак, первый шаг при разработке процедуры локализации дестабилизирующих воздействий связан с формированием множества измеряемых переменных ОДО. Когда сформировано обоснованное, с точки зрения технико-экономических и профессиональных рациональных критериев, множество измеряемых переменных ОДО, вполне логично возникает следующий вопрос: как искать фрагменты, дестабилизирующие работоспособность ОДО?

Для ответа на этот вопрос необходимо выбрать принцип поиска дестабилизирующего фрагмента. Если исходить из такого обстоятельства, что процедура поиска – это разновидность процедуры выбора, то следуя положениям теории выбора и принятия решений [38 – 40], требуется:

- 1) сформировать альтернативы, а в терминах данного исследования это означает сформировать множество признаков, характеризующих дестабилизацию фрагмента;

- 2) выбрать способ сравнения альтернатив, что означает выбрать приемлемые процедуры поиска дестабилизирующего фрагмента ОРУ.

Так как ОРУ должен обладать свойством диагностируемости, то его диагностические функциональные модели в форме (2.23) дают возможность выбора признаков. Вектор выхода $\Delta y_i(t)$ представляет, по сути, множество признаков дестабилизации ОРУ. Эти признаки динамические по характеру, изменяющиеся во времени. В терминах таких признаков не представляется возможным с помощью математических средств выявить избыточность множества таких признаков и исключить ее. Отсутствуют также продуктивные процедуры перебора альтернатив в таком признаковом множестве. Эти обстоятельства обусловили необходимость перехода от временны'х динамических признаков $\Delta y_i(t)$ к булевым признакам $\bar{Z}_j$ посредством двужначных предикатных уравнений, преобразовывающих диагностические функциональные модели в диагностические логические [27, 29, 37]. Процедуры оптимизации структур диагностических логических моделей позволяют сформировать структурно полное множество булевых признаков, характеризующих дестабилизацию фрагментов ОРУ.

Тривиальная процедура поиска может быть сформирована с помощью метода прямого перебора. Такая процедура потребует значительных ресурсов при практической реализации. Использование методов направленного перебора позволяет сформировать более эффективные процедуры поиска, требующие меньших ресурсов. Задача поиска дестабилизирующего фрагмента ОРУ с использованием булевых признаков эквивалентна задаче определения фальшивых монет с помощью взвешиваний [41, 42]. Графически такая процедура адекватно представляется с помощью дихотомических деревьев [27, 37, 43].

Разработка машинной процедуры локализации дестабилизирующих воздействий базируется на последовательном решении таких основных задач:

- 1) выбор множества косвенных признаков для однозначной локализации;
- 2) получение оптимального структурно-полного множества булевых признаков;
- 3) формирование эффективных правил локализации.

Рассмотрим возможные методы решения этих задач. Сформулируем более подробно первую задачу. Исходными для решения задачи будут ДФМ, описывающие выделенные в ОРУ фрагменты, полностью диагностируемые относительно подмножества дестабилизирующих воздействий $D_i \subset D$. Требуется сформировать из вектора $\Delta y(k)$ диагностической функциональной модели ОРУ множество булевых признаков, обеспечивающих локализацию фрагментов ОРУ.

Метод решения этой задачи можно представить состоящим из двух этапов. На первом этапе производится преобразование

$$F_1 : \Delta Y^m \rightarrow F_1[\Delta y(k)], \quad (3.6)$$

где F_1 – параметрическое семейство действительных функций, преобразующих дискретные функции $\Delta y(k)$ в булевы. В качестве такой действительной функции может быть использовано двузначное предикатное уравнение

$$f_1(\Delta y_{ij}) > 0 = \begin{cases} 1, & \text{если } |\Delta y_{ij}| \geq 0; \\ 0, & \text{если } \Delta y_{ij} < 0. \end{cases} \quad (3.7)$$

Применение к ДФМ такого преобразования позволяет получить ДЛМ типа TL-модели [27]. Таким образом, преобразование F_1 позволят перейти из шкалы отношений, в терминах которой измеряются признаки $\Delta y(k)$, в шкалу наименований, где используется булева переменная для описания признаков. Исследование разделяющих свойств полученных признаков производится анализом строк TL-модели. Если в таблице, представляющей TL-модель, нет строк с одинаковой структурой, то это означает, что в полученном множестве булевых признаков все фрагменты ОРУ локализуемы, т. е. различимы. При наличии одного или нескольких подмножеств строк идентичной структуры требуется перейти ко второму этапу.

Суть второго этапа решения задачи в общем виде можно представить таким отображением:

$$F_2 : F_1 \rightarrow F_2[\Delta y_i(k), \phi_i(k)], \quad (3.8)$$

где F_2 – параметрическое семейство действительных функций, описывающих локальные свойства косвенных признаков с использованием функций чувствительности $\phi_i(k)$ ДФМ к признакам $\Delta \lambda_j$ дестабилизации i -го фрагмента ОРУ.

Для характеристики таких свойств, фрагментов ОРУ можно применить двузначные предикатные уравнения

$$f_2(\Delta y_i(k)) > 0 = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta y_i(k) \in C; \\ 0, & \text{если } \Delta y_i(k) \notin C, \end{cases} \quad (3.9)$$

где C – множество функций от прямого признака $\Delta \lambda_j$.

Применяя это предикатное уравнение к каждому подмножеству строк идентичной структуры TL-модели, получаем новую табличную модель, составленную из строк исходной таблицы, имеющих различную структуру, и строк, полученных в результате использования уравнения (3.9). Сформированную таким образом таблицу назовем диагностической логической моделью TLR-типа.

Применение отображения F_2 позволяет расширить множество признаков за счет использования более глубоких свойств косвенных признаков $\Delta y(k)$. Для «малых» дестабилизирующих воздействий справедливо уравнение $\Delta y_i(k) = \varphi_i(k) \Delta \lambda_i$, из которого следует, что

$$\Delta \lambda_i = \frac{\Delta y_i(k)}{\varphi_i(k)}. \quad (3.10)$$

Поскольку $\Delta \lambda_i \approx \text{const}$ на интервале диагностирования $[k_0, k_1]$, что следует из предположения о квазистационарности прямых признаков, то из выражения (3.10) следует линейная зависимость двух функций $\Delta y_i(k)$ и $\varphi_i(k)$. Свойством линейной зависимости между текущими значениями косвенного признака $\Delta y_i(k)$ и функцией чувствительности $\varphi_i(k)$ можно воспользоваться для локализации i -го фрагмента ОРУ. Так, если отношение $\frac{\Delta y(k)}{\varphi_i(k)} \approx \text{const}$, то в i -ом фрагменте ОРУ дестабилизирующее воздействие.

При $\frac{\Delta y(k)}{\varphi_i(k)} = \text{var}$ – в i -ом фрагменте ОРУ нет дестабилизирующего воздействия. Использование отношения $\frac{\Delta y(k)}{\varphi_i(k)}$ в качестве аргумента

предикатного уравнения (3.9) позволяет представить его в такой форме:

$$f_{2j}(\Delta y_j, \varphi_{ij}) = (\delta - |\Delta y_j(k+1)\varphi_{ij}(k) - \Delta y_j(k)\varphi_{ij}(k+1)| \geq 0) = \begin{cases} 1, & \text{если } | \cdot | \leq \delta; \\ 0, & \text{если } | \cdot | > \delta, \end{cases} \quad (3.11)$$

где $\Delta y_i(.)$ – i -я компонента вектора текущих косвенных признаков ОРУ $\Delta y(k)$;

$\varphi_{ij}(.)$ – i -я компонента вектора функции чувствительности для i -го прямого признака дестабилизации.

Применив предикатное уравнение (3.11) к подмножеству строк идентичной структуры, получим новые косвенные булевы признаки, позволяющие различать ранее эквивалентные фрагменты ОРУ.

Для определения количества дополнительных косвенных признаков воспользуемся следующим обстоятельством. Если обозначить через β_η η -е подмножество совпадающих k_η строк в таблице TL-модели, а через γ – число таких подмножеств, то для различения эквивалентных фрагментов, соответствующих строкам подмножества, требуется ввести $k_\eta - 1$ новых признаков. Тогда дополнительное количество косвенных признаков определяется с помощью выражения:

$$v = \sum_{\eta=1}^{\gamma} k_\eta - \gamma. \quad (3.12)$$

В терминах признакового пространства новое булево признаковое пространство Z^s будет иметь размерность $s = m + v$. Выбор того или иного дополнительного признака, порождаемого предикатным уравнением (3.11), зависит от ряда факторов, в частности, от объема исходной информации, времени получения значения признака, простоты машинной реализации и других. Учет таких факторов позволяет выбрать рациональное множество дополнительных признаков с точки зрения их практического формирования и построения TLR-модели. Полученное в результате описанных преобразований пространство представляет собой структурно полное признаковое пространство, в котором все фрагменты ОРУ локализуемы.

Вторая задача заключается в получении оптимального структурно полного множества булевых признаков. Формулируется задача следующим образом. На основании TLR-модели ОРУ требуется получить оптимальное, по обобщенному стоимостному критерию, множество булевых признаков, обеспечивающих попарную различимость фрагментов.

Рассмотрим двухэтапный метод решения этой задачи [27]. На первом этапе исходим из предположения о равноценности косвенных признаков. На основании TLR-модели с помощью метода построения булевых матричных

моделей (см. п. 2.4) получают ВМ-модель ОРУ. Эта модель преобразовывается методом построения канонических форм и в результате получается совокупность M булевых матричных канонических ВМК-моделей, исходя из которых формируется соответствующая совокупность TLK-моделей. На этом завершается первый этап решения задачи. На втором этапе учитываются обобщенные стоимости C_π косвенных признаков, представленных в TLK-моделях. В качестве критерия оптимальности используется минимум обобщенной стоимости косвенных признаков

$$I[c_\pi] = \min_{\pi, \pi \in M} c_\pi. \quad (3.13)$$

Здесь обобщенная стоимость C_π для i -ой TLK-модели вычисляется как

$$c_\pi = \sum_{C_j^\pi \in Q_\pi} c_j^\pi, \quad (3.14)$$

где Q_π – множество значений стоимостей признаков z_j , применяемых в π -й TLK;

c_j^π – обобщенная стоимость технико-экономических затрат на вычисление признака z_j , используемого в π -й канонической форме.

В результате оптимизации получается оптимальная каноническая форма TLK_о-модель, дающая множество косвенных булевых признаков z_j , образующих оптимальное структурно полное признаковое пространство, в котором все фрагменты ОРУ попарно различимы, т. е. локализуемы.

Третья задача заключается в формировании эффективных правил локализации. Постановка задачи состоит в следующем. Даны TLK_о-модель ОРУ, предикатные уравнения, преобразовывающие косвенные временные признаки $\Delta y(k)$ в булевы z_j . Требуется сформировать возможные правила поиска фрагментов (ППФ) и выбрать из них наилучшие с точки зрения технико-экономических затрат на реализацию.

Метод решения сформулированной задачи зависит от выбранного принципа поиска дестабилизированного фрагмента. Локализация фрагментов ОРУ может осуществляться с использованием принципов параллельного или последовательного поиска. Использование принципа параллельного поиска

порождает безусловные ППФ, а применение принципа последовательного поиска позволяет получить условные алгоритмы поиска, т. е. условные ППФ.

Рассмотрим решение задачи методом построения безусловных ППФ. Качественная связь прямых $\Delta\lambda_i$ и косвенных z_j признаков отражается TLK₀-моделью, представленной в форме прямоугольной таблицы. Каждая строка этой таблицы, соответствующая прямому признаку дестабилизирующего фрагмента $\Delta\lambda_i$, содержит свой набор булевых переменных – двоичный код, отличающийся от других. Поэтому для каждого фрагмента можно записать булеву функцию p_i как конъюнкцию признаков, содержащих «1» в данной строке и их отрицаний, если признак равен «0». Совокупность таких булевых функций будет представлять собой структуру безусловного ППФ. Если на ОРУ подействовало дестабилизирующее воздействие, при котором i -я булева функция $p_i = 1$, т. е. истинна, то это означает, что дестабилизация работоспособности произошла в i -м фрагменте. В результате проведенных исследований [27] установлена возможность записи булевых функций $p_i, i = \overline{1, \mu}$, другими словами, правил $\Phi[z_j]$, различными способами, отличающимися количеством используемых признаков и их отрицаний. Это обстоятельство порождает множество вариантов безусловных ППФ. Для выбора среди этих вариантов наилучшего целесообразно оценивать технико-экономические затраты каждого варианта в форме обобщенной стоимости c_ψ , вычисляемой по формуле:

$$c_\psi = \sum_{c_j^\psi \in R_\psi} c_j^\psi, \quad (3.15)$$

где c_j^ψ – стоимость получения и использования i -го аргумента булевых функций для ψ -го варианта безусловного ППФ;

R_ψ – множество стоимостей аргументов (признаков z_j и их отрицаний $\bar{z}_j$), применяемых в ψ -м варианте.

В качестве критерия используем минимум обобщенной стоимости

$$I[c_\psi] = \min_{\psi, \psi \in L} c_\psi, \quad (3.16)$$

где L – множество вариантов реализации безусловных ППФ. Поскольку в практических задачах мощность множеств L невелика, то для оптимального варианта применяется метод направленного перебора. Направленность достигается следующим образом. Первый вариант безусловного ППФ получается из таблицы TLKo-модели, при этом в описании булевых функций p_i участвуют все признаки и их отрицания. Следовательно, стоимость этого варианта будет наибольшей по сравнению с другими возможными вариантами, т. е. $C_1 = C_{1\max}$. Поэтому любое уменьшение количества используемых аргументов в булевых функциях будет приводить к снижению стоимости варианта $C_\psi < C_{1\max}$, $\psi \in L$. Перебор вариантов в таком направлении обеспечит получение наилучшего в смысле критерия (3.15) варианта.

Решить третью задачу можно с помощью принципа последовательного поиска. Метод, основанный на этом принципе, приводит к получению условных ППФ. Рассмотрим суть метода. Таблица TLKo-модель отражает качественную связь прямых признаков $\Delta\lambda_i$ с косвенными z_j в терминах булевой переменной. Любой косвенный признак делит все множество прямых признаков на два подмножества: в первое входят $\Delta\lambda_i$, для которых $z_j = 1$, второе включает $\Delta\lambda_i$, порождающие $z_j = 0$. Использование этого обстоятельства позволяет представить TLKo-модель в форме графовых древовидных схем, дихотомических деревьев. Методы построения схем поиска существенно зависят от формы представления исходных данных задачи. Использование таких моделей как TLKo позволило разработать на основе общих теоретических методов поиска специфические, применимые для данной задачи методы машинного построения условных ППФ. Первый метод заключается в построении всех возможных схем поиска, исходя из TLKo-модели, путем пошагового деления множества признаков $\Delta\lambda_i$ с помощью выбора соответствующей последовательности признаков z_j до получения подмножества, состоящего из одного конкретного прямого признака дестабилизирующего фрагмента. Установлено, что длина пути поиска такого фрагмента характеризуется количеством используемых признаков, их стоимостью и существенно зависит от выбора начального базового признака. Желательно сформировать такую древовидную структуру, стоимости путей которой для всех фрагментов примерно одинаковы. Для количественной оценки структуры древовидной схемы введем понятие средней стоимости пути C_{cp} , представляющую собой среднеарифметическую

величину всех стоимостей путей поиска фрагментов. Количественная оценка структуры определяется с помощью соотношения

$$c_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{\mu_1} c_i}{\mu_1}, \quad (3.17)$$

где C_i – стоимость пути к i -му фрагменту, равная стоимости используемых при этом признаков z_j .

С помощью этой количественной оценки из всех возможных схем поиска методом прямого перебора выбирается схема, имеющая $c_{\text{ср}} = c_{\text{ср min}}$. В этом методе для построения деревьев поиска выбираются все возможные последовательности признаков для исходной TLK₀-модели. При таком выборе учитываются частично только разделяющие свойства признаков при делении каждого множества признаков на два последующих. Такой выбор признаков приводит к необходимости формирования всех возможных последовательностей признаков и в последующем – к применению метода прямого перебора полученных вариантов схем для определения наилучшего среди них. Более полный учет разделяющих свойств косвенных признаков позволяет сформировать оптимальную древовидную схему другим рациональным путем, используя при этом метод направленного перебора.

Рассмотрим второй метод построения условных ППФ.

В основу этого метода положено использование весов косвенных признаков z_j . Вес p_j определяется с помощью формулы:

$$p_j = |2n_j - \mu'| c_j, \quad (3.18)$$

где n_j – количество «1» в таблице TLK-модели в j -м столбце, соответствующем анализируемому множеству;

c_j – стоимость j -го признака;

μ' – количество прямых признаков в текущем множестве.

Таким образом, характеристика p_j отражает информационно-стоимостные свойства косвенных признаков. Выбор признаков и построение дихотомического дерева осуществляется поэтапно. На каждом этапе, начиная с первого, производится вычисление для косвенных признаков веса,

позволяющего разделить текущее множество прямых признаков на два непересекающихся. При этом из всех возможных признаков выбирается тот, вес которого наименьший: $p_j = p_{j_{\min}}$. Если два и более признаков обладают одинаковыми весами, то можно использовать дополнительные технико-экономические характеристики этих признаков для выбора среди них наилучшего или использовать любой из них. Выбранный признак делит исходное множество прямых признаков на два меньших, для каждого из которых последовательно производится аналогичный выбор наилучшего косвенного признака. Полученное в результате такого выбора признаков условное ППФ будет оптимальным и сбалансированным с точки зрения суммарной весовой характеристики.

Рассмотренные в этом параграфе методы решения задач по локализации дестабилизирующего воздействия позволяют сформировать оптимальные безусловные и условные алгоритмы поиска в ОРУ фрагмента, подверженного дестабилизирующему воздействию, используя определенные характеристики и свойства диагностических функциональных и логических моделей.

3.4 Определение типов дестабилизирующих воздействий

Третья основная задача диагностирования сводится к решению следующих частных задач:

- 1) получение оценочных значений прямых признаков типов $\Delta\hat{\lambda}_i$, исходя из ДФМ для типов дестабилизирующих воздействий;
 - 2) формирование множества косвенных признаков с помощью ДФМ и ДЛМ;
 - 3) построение правил поиска типов дестабилизирующих воздействий.
- Рассмотрим более подробно эти задачи и возможные методы их решения.

Постановка первой задачи. Задана для фрагментов ОРУ совокупность полностью диагностируемых относительно признаков типов ДФМ, связывающих доступные измерению косвенные признаки $\Delta y(k)$ с признаками типов – $\Delta\lambda_i$. Требуется построить наиболее простые из возможных алгоритмы получения с заданной точностью оценочных значений $\Delta\hat{\lambda}_i$, используя сигналы и ДФМ.

Итак, располагая конкретной структурой ДФМ для i -го признака, требуется построить процедуру вычисления оценки $\Delta\hat{\lambda}_i$. Выбор подхода к решению этой задачи зависит от используемой структуры ДФМ. Так как в данной работе используются линеаризованные ДФМ, то наиболее приемлем

подход, базирующийся на связи прямых и косвенных признаков с помощью функций чувствительности в таком виде:

$$\Delta y(k+1) = \sum_{i=1}^{\mu_2} \varphi_i(k) \Delta \lambda_i + \xi(k), \quad (3.19)$$

где $\varphi_i(k)$ – векторная функция чувствительности используемой диагностической модели для i -го типа;

$\xi(k)$ – вектор помех измерений и ошибок моделирования;

μ_2 – количество типов.

На основании этого уравнения можно вычислить значения признаков типов, применяя методы решения систем линейных алгебраических уравнений. Так, если $\dim \Delta y(k+1) = m$, причем, $m = \mu_2$, то уравнение представим в форме

$$\Delta \tilde{y}(k+1) = Q(k) \Delta \lambda, \quad (3.20)$$

где $Q(k)$ – матрица, составленная из векторов чувствительности $\varphi_i(k)$;

$$\Delta \lambda^T = [\Delta \lambda_1, \dots, \Delta \lambda_{\mu_2}];$$

$\Delta \tilde{y}(k+1)$ – результат обработки измерений.

Выражение (3.20) разрешимо относительно вектора $\Delta \lambda$, если $\det Q(k) \neq 0$, при этом

$$\Delta \hat{\lambda} = Q^{-1}(k) \Delta \tilde{y}(k+1). \quad (3.21)$$

В случае недостаточного числа компонент косвенного признака, т. е. когда $m < \mu_2$, используют результаты измерений $\tilde{y}(k)$ и их обработки в другие моменты времени, например, в следующий $k+1$, тогда

$$\Delta \tilde{y}(k+2) = Q(k+1) \Delta \lambda. \quad (3.22)$$

Из двух векторно-матричных уравнений (3.20) и (3.22) формируют матрицу $\tilde{Q}(k)$ размером $\mu_2 \times \mu_2$ и такую, что $\det Q(k) \neq 0$. В связи с этим

$$\Delta\hat{\lambda} = \tilde{Q}^{-1}(k)\Delta y, \quad (3.23)$$

где Δy – вектор, составленный из компонент векторов $\Delta\tilde{y}(k+1)$ и $\Delta\tilde{y}(k+2)$.

Если $m < \mu_2$, то из матрицы $Q(k)$ (3.20) формируют новую квадратную невырожденную матрицу $\tilde{Q}(k)$ такую, что

$$\Delta\hat{\lambda} = \tilde{Q}^{-1}(k)\Delta\tilde{y}'(k+1), \quad (3.24)$$

где $\Delta\tilde{y}'(k+1)$ – вектор с μ_2 компонентами, полученными из вектора $\Delta\tilde{y}(k+1)$.

В проведенных алгоритмах точность вычисления оценки существенно зависит от вектора $\xi(k)$. Используя избыточность данных измерений можно повысить точность оценки с помощью метода наименьших квадратов [44, 45]. Представим уравнения (3.19) для случая, когда $m < \mu_2$, в таком виде:

$$\Delta\tilde{y}(k+1) - S'(k)\Delta\lambda = e(k), \quad (3.25)$$

где $\Delta\tilde{y}(k+1)$ – вектор отклонений;

$S'(k)$ – матрица векторных функций чувствительности;

$\Delta\lambda$ – вектор признаков классов;

$e(k)$ – вектор невязки уравнения.

Для квадратичного критерия

$$V[e(k)] = e^T(k)e(k) \quad (3.26)$$

минимум невязки обеспечивается при условии

$$\frac{\partial V[e(k)]}{\partial \Delta\lambda} = 0.$$

Определим это условие для компонент уравнения (3.25):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial V[e(k)]}{\partial \Delta \lambda} &= \frac{\partial e^T(k)}{\partial \Delta \lambda} e(k) + e^T(k) \frac{\partial e(k)}{\partial \Delta \lambda} = -S'^T(k) [\Delta \tilde{y}(k+1) - S'(k) \Delta \lambda] + \\
&+ [\Delta \tilde{y}(k+1) = S'(k) \Delta \lambda]^T [-S'(k)] = -S'^T(k) \Delta \tilde{y}(k+1) + S'^T(k) S'(k) \Delta \lambda + \\
&+ [\Delta \tilde{y}^T(k+1) - \Delta \lambda^T S'^T(k)] [-S'(k)] = -S'^T(k) \Delta \tilde{y}(k+1) + S'^T(k) S'(k) \Delta \lambda - \\
&- \Delta \tilde{y}^T(k+1) S(k) + \Delta \lambda^T S'^T(k) S'(k) = 2S'^T(k) S'(k) \Delta \lambda - 2S'^T(k) \Delta \tilde{y}(k+1) = 0.
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Разрешив полученное уравнение относительно $\Delta \lambda$, получим

$$\Delta \hat{\lambda} = [S'^T(k) S'(k)]^{-1} S'^T(k) \Delta \tilde{y}(k+1). \tag{3.28}$$

Вектор оценок, полученный с помощью этого алгоритма, будет оптимальным относительно критерия (3.26) – минимума среднеквадратической ошибки $e(k)$.

Все рассмотренные алгоритмы позволяют получить численные значения $\Delta \hat{\lambda}$ в режиме пакетной обработки данных. В ряде практических задач предпочтительной оказывается идентификация в реальном масштабе времени. Наиболее распространены рекуррентные алгоритмы. Использование рекуррентного метода наименьших квадратов [44] позволило получить алгоритм оценки в такой форме:

$$\Delta \hat{\lambda}(k+1) = \Delta \hat{\lambda}(k) + \gamma(k) [\Delta \tilde{y}(k+1) - S'(k) \Delta \hat{\lambda}(k)], \tag{3.29}$$

где $\Delta \hat{\lambda}(k)$ – текущее оценочное значение вектора признаков типов;

S' – матрица векторных функций чувствительности;

$\gamma(k)$ – вектор коррекции, вычисляемый по такому уравнению:

$$\gamma(k) = \frac{1}{S'^T(k) P(k) S'(k) + 1} P(k) S'(k), \quad P(k+1) = [I - \gamma(k) S'^T(k) P(k)]. \tag{3.30}$$

Исходные данные для алгоритма: $\Delta \hat{\lambda}(0) = 0$; $P(0) = \alpha I$;

где α – коэффициент, влияющий на скорость сходимости оценки.

Вторая частная задача – формирование множества косвенных признаков сводится к формальной задаче построения оптимальной канонической табличной логической модели TLK_o-модели, обеспечивающей однозначную

связь признаков на основании использования ДФМ и оценочных значений $\Delta\hat{\lambda}_i$, $i = \overline{1, \mu_2}$, а также их стоимостей.

Решение этой задачи можно представить, следуя работе [27], последовательностью таких этапов:

1) формирование TL-моделей для фрагментов ОРУ на основании соответствующих ДФМ-моделей и оценок $\Delta\hat{\lambda}_i$;

2) анализ полученной TL-модели и введение при необходимости дополнительных признаков с целью формирования TLR-модели;

3) построение ВМ-модели и всех ее канонических форм – ВМК-моделей;

4) формирование, исходя из ВМК-моделей, совокупности табличных канонических форм – TLK-моделей;

5) определение TLK-модели, удовлетворяющей минимуму стоимостного критерия.

Рассмотрим особенности решения задачи в соответствии с приведенными этапами. Итак, на первом этапе строится табличная TL-модель, связывающая признаки типов $\Delta\hat{\lambda}_i$ с косвенными булевыми признаками z_j . При формировании признаков z_j используются как сигналы, так и параметры ДФМ, описывающие исследуемый фрагмент ОРУ. Косвенные булевы признаки формируются с учетом специфических свойств сигналов и параметров диагностических моделей для типов дестабилизирующих воздействий. На основании опыта разработки ДЛМ установлено, что наиболее целесообразно использовать свойство квази-постоянства прямых признаков $\Delta\lambda_i$, а также постоянство выходных сигналов фрагментов ОРУ. Косвенные признаки дрейфа нуля – смещение статических характеристик фрагментов можно сформировать посредством следующего предикатного уравнения:

$$z_j = S_2 \left[\delta - |\Delta y(k+1) - \Delta y(k)| \right], \quad \forall k \in [k_0, k_1]. \quad (3.31)$$

Различного рода изменения преобразовательных свойств фрагментов (уменьшение коэффициента передачи, увеличение инерционности и т. п.) можно характеризовать такими признаками:

$$z_j = S_2 \left[\delta - |\Delta\hat{\lambda}_i(k)| \right]; \quad (3.32)$$

$$z_j = S_2 \left[\delta - |\Delta\hat{\lambda}_i(k+1) - \Delta\hat{\lambda}_i(k)| \right], \quad \forall k \in [k_0, k_1], \quad (3.33)$$

где $\Delta\hat{\lambda}(\cdot)$ – значение оценок в соответствующие моменты времени.

Для случая использования двух оценок $\Delta\hat{\lambda}_i(\cdot)$ и $\Delta\hat{\lambda}_l(\cdot)$ косвенный признак формируется следующим образом:

$$z_j = S_2 \left[\delta - |\Delta\hat{\lambda}_i(k+1) - \Delta\hat{\lambda}_i(k)| \right] \wedge S_2 \left[\delta_l - |\Delta\hat{\lambda}_l(k+1) - \Delta\hat{\lambda}_l(k)| \right],$$

$$\forall k \in [k_0, k_1]. \quad (3.34)$$

Аналогичным образом формируется признак z_j для случая использования более двух оценок признаков типов. Если тип включает различные обрывы связей в компонентах, то более приемлемо использование такого предикатного уравнения:

$$z_j = S_2 \left[\delta - |\tilde{y}(k+1) - \tilde{y}(k)| \right], \forall k \in [k_0, k_1]. \quad (3.35)$$

Рассмотренные способы формирования признаков z_j не исчерпывают всего многообразия возможных форм предикатных уравнений, описывающих свойства соответствующих типов дестабилизирующих воздействий. Итак, исходя из свойств проявления дестабилизирующих воздействий формируются посредством предикатных уравнений булевы признаки z_j и строится табличная TL-модель для всех типов каждого фрагмента ОРУ.

На втором этапе производится анализ таблицы TL-модели с целью выявления строк с одинаковой структурой. С помощью формулы (3.12) вычисляется количество дополнительных булевых признаков и посредством введения их с помощью соответствующих предикатных уравнений типа (3.31) – (3.35), формируется табличная расширенная TLR-модель. Эта модель описывает структурно полное признаковое пространство для установления типов дестабилизирующих воздействий для каждого фрагмента ОРУ.

Построение ВМ-модели производится на третьем этапе. Полученная таблица ВМ-модели обрабатывается с помощью рекуррентной процедуры (см. п. 2.4), в результате получаются ВМК-модели, отражающие канонические и различимые связи между прямыми $\Delta\hat{\lambda}_i$ и косвенными z_j признаками исследуемых фрагментов ОРУ.

Четвертый этап связан с формированием из каждой ВМК-модели соответствующей TLK-модели путем вычеркивания из последних избыточных столбцов.

На пятом этапе учитываются трудоемкость вычисления признаков z_j в форме их стоимости c_j и в соответствии с критерием (3.16) производится выбор наилучшей модели, обладающей минимальной обобщенной стоимостью c_ψ (3.15). В результате оптимизации получается TLK₀-модель, однозначно и оптимально связывающая признаки классов $\Delta\hat{\lambda}_i, i = \overline{1, \mu_2}$ с признаками z_j так, что, используя косвенные признаки z_j , можно установить тип текущего дестабилизирующего воздействия на исследуемый фрагмент ОРУ.

Третья частная задача – построение правил поиска типов дестабилизирующих воздействий. Совокупность этих правил сокращенно назовем ППТ. Формальная постановка задачи: даны TLK₀-модели фрагментов ОРУ, предикатные уравнения, формирующие косвенные признаки и условия их решения. Требуется построить все возможные ППТ и выбрать из них оптимальную по технико-экономическим затратам.

Как следует из постановки, сформулированная задача принадлежит к задачам поиска [46, 47]. Ключевым моментом при построении ППТ представляется выбор принципа поиска. Типы могут выявляться с использованием принципов как параллельного, так и последовательного поиска. Применение параллельного принципа поиска позволяет построить безусловные ППТ, а последовательного – порождает условные ППТ. Характерным для возможных методов решения служит наличие двух взаимосвязанных этапов. Первый заключается в формировании возможных вариантов ППТ, реализующих используемый принцип поиска. На втором этапе производится обоснованный выбор наилучшего варианта в соответствии с принятым технико-экономическим критерием. Такой двухэтапный подход к решению задачи позволяет построить эффективные ППТ с точки зрения целевого назначения, а также требуемых для их реализации машинных ресурсов.

Для построения безусловных ППТ применим метод формирования безусловных правил локализации, изложенный в п. 3.3.

Метод построения условных ППТ основан на дихотомическом последовательном делении множества признаков классов $\Delta\lambda_j$ с использованием TLK₀-модели с помощью косвенных признаков z_j . Описанный в п. 3.3 метод построения условных ППФ применим и для

построения условных ППТ. В результате использования этого метода получаются условные ППТ в форме сбалансированных ветвей поиска типов для каждого фрагмента ОРУ.

Таким образом, для построения эффективных ППТ применимы методы построения ППФ, позволяющие найти приемлемое, наилучшее решение третьей задачи.

Итак, при решении третьей основной задачи производится для каждого фрагмента ОРУ формирование типов, оптимального множества косвенных булевых признаков типов и оптимальных ППТ, обеспечивающих однозначное определение типа и оценки прямого признака $\Delta\hat{\lambda}_i$ текущего дестабилизирующего воздействия $d_i \in D_j \subset D$ на j -й фрагмент ОРУ, $j = \overline{1, \mu_1}$.

3.5 Идентификация видов дестабилизирующих воздействий

Четвертая основная задача диагностирования заключается в идентификации видов дестабилизирующих воздействий посредством классификационной обработки полученных оценок прямых признаков типов $\Delta\hat{\lambda}_i$. Решение этой комплексной задачи может быть сведено к решению следующих частных задач:

- 1) разработка ТЛ-моделей видов дестабилизирующих воздействий;
- 2) формирование признакового множества видов дестабилизирующих воздействий;
- 3) построение правил поиска видов (ППВ) дестабилизирующих воздействий.

Первая задача состоит в разработке для каждого типа дестабилизирующих воздействий ТЛ-модели видов – конкретных его физических проявлений, с использованием оценок прямых признаков типов $\Delta\hat{\lambda}_i$, сигналов $\Delta y(k)$ и $\tilde{y}(k)$ с диапазонами их возможных изменений. Ключевым моментом в решении этой задачи представляется формирование признаков видов. Для формирования признаков используются предикатные уравнения. Рассмотрим основные свойства предикатных уравнений [48], необходимые для описания признаков дестабилизирующих воздействий.

Пусть $p_i = F(\mu_i)$ есть функция непрерывного аргумента $\mu_i (-\infty < \mu_i < \infty)$, определенная в некоторой области H_i числового множества H , причем $\mu_i \in \{\Delta\hat{\lambda}_i', \Delta y(k), \tilde{y}(k)\}$. Если значения, которые может принимать эта функция в области H_i , принадлежат множеству

$B_v = \{0, 1, \dots, v-1\}$, то функция $p_i = F(\mu_i)$ есть v -значный предикат в области H_i .

Предикату $p_i = F(\mu_i)$ можно поставить в соответствие разбиение числового множества H_i на непересекающиеся подмножества $H_{i1}, H_{i2}, \dots, H_{iv}$, включив в подмножество $H_{i\ell}$ те значения множества H , в которых выполняется условие $F(\mu_i) = \ell$, представляющее предикатное уравнение подмножества $H_{i\ell}$.

В связи с тем, что значения, которые могут принимать v -значные предикаты, принадлежат множества B_v , их можно использовать как аргументы функций v -значной логики. Пусть, к примеру, $p_i = F(\mu_i) \in B_v$, $i = \overline{1, q}$ есть v -значные предикаты, а $\Phi(x_1, x_2, \dots, x_q)$ – функция v -значной логики с алфавитом B_v , тогда функцию $P = \Phi[F_1(\mu_1), F_2(\mu_2), \dots, F_q(\mu_q)]$ можно рассматривать как v -значный предикат, так как $p \in B_v$, а область определения есть множество H .

Из всех возможных предикатов будем применять самые простейшие – двузначные, обладающие таким свойством:

$$S_2(\rho) = \begin{cases} 1, & \text{при } \rho \geq 0; \\ 0, & \text{при } \rho < 0. \end{cases} \quad (3.36)$$

При формировании аргумента ρ двузначного предиката исходят из следующего [49]. В результате изучения и исследования характера проявления дестабилизирующих воздействий в ОРУ производится их параметризация, и для каждого вида определяют подмножество $H_{i\ell}$, $\ell = \overline{1, v}$. Если выбрать для каждого подмножества $H_{i\ell}$ нижнее значение $\eta_{i\ell}^H = \inf H_{i\ell}$ и верхнее значение $\eta_{i\ell}^B = \sup H_{i\ell}$, то в общем случае аргумент ρ можно сформировать для признака вида μ_i с помощью уравнений

$$\rho'_{i\ell} = \mu_i - \eta_{i\ell}^H; \quad \rho''_{i\ell} = \eta_{i\ell}^B - \mu_i. \quad (3.37)$$

Двузначные предикаты типа (3.36) с использованием таких аргументов характеризуют расположение μ_i по отношению к $\eta_{i\ell}^H$ и $\eta_{i\ell}^B$ следующим образом:

$$S_2(\rho'_{i\ell}) = \begin{cases} 1, & \text{при } \mu_i \leq \eta_{i\ell}^H; \\ 0, & \text{при } \mu_i > \eta_{i\ell}^B; \end{cases} \quad S_2(\rho''_{i\ell}) = \begin{cases} 1, & \text{при } \mu_i \leq \eta_{i\ell}^H; \\ 0, & \text{при } \mu_i > \eta_{i\ell}^B. \end{cases} \quad (3.38)$$

Применение таких предикатов позволяет сформировать булевы признаки видов z_j для подмножества D_j , соответствующего j -му типу дестабилизирующих воздействий. Полученные в результате такой параметризации исходные данные позволяют сформировать TL-модель видов, связывающую виды дестабилизирующих воздействий исследуемого типа $d_i, i = \overline{1, v}$ с косвенными булевыми признаками $z_j, j = \overline{1, \pi}$.

Вторая частная задача связана с формированием признакового множества видов дестабилизирующих воздействий. Исходными данными для задачи будут TL-модель и стоимость c_j булевых признаков z_j . Требуется сформировать TLKo-модель, оптимальную с точки зрения суммарной стоимости используемых в ней признаков и обеспечивающую однозначную связь прямых признаков видов с косвенными. Постановка этой задачи схожа с постановками задач формирования множества признаков для локализации фрагментов и поиска типов, поэтому для ее решения применимы ранее описанные методы в соответствии со следующей методикой. Решение второй задачи представим в форме последовательности взаимосвязанных этапов:

1) анализ TL-модели с точки зрения разрешимости обратной задачи и введение при необходимости новых дополнительных признаков, обеспечивающих разрешимость;

2) построение ВМ-модели и определение с помощью метода построения канонических форм всех ВМК-моделей, обеспечивающих попарную различимость видов по косвенным булевым признакам;

3) формирование на основании ВМК-моделей совокупности табличных канонических форм TLK-моделей;

4) определение TLKo-модели, наилучшей среди всех TLK-моделей по стоимостному критерию.

Опишем содержание выделенных этапов решения второй задачи. На первом этапе анализируется исходная TL-модель, связывающая прямые признаки видов с косвенными булевыми. Условие разрешимости обратной задачи: нахождение по косвенным признакам конкретных видов заключается в наличии в TL-модели различной структуры строк. В том случае, если в TL-модели имеются одна или несколько совокупностей одинаковых строк, задача не может быть разрешена, что означает невозможность однозначного

определения по косвенным признакам z_j видов дестабилизирующих воздействий. Таким образом, анализ TL-модели заключается в выявлении совокупностей одинаковых строк. Наиболее приемлемым методом анализа TL-моделей представляется следующий. Исходная TL-модель преобразуется в BM-модель. Для каждой строки BM-модели вводится сигнатура, представляющая сумму единичных символов. По нулевым значениям сигнатуры выбираются затем из BM-модели попарные сочетания строк, из которых формируются совокупности строк одинаковой структуры в TL-модели. После анализа видов, соответствующих строкам одинаковой структуры, а также их косвенных признаков, вводятся новые косвенные признаки, обеспечивающие различность этих видов. В результате использования такой процедуры формируется новая TLR-модель, обеспечивающая разрешимость поиска видов дестабилизирующих воздействий.

Второй этап связан с построением из TLR-модели соответствующей BM-модели и нахождением всех возможных канонических форм с помощью рекуррентной процедуры на основе функциональных уравнений (2.30) и (2.31).

В результате получаются BMK-модели. Формирование TLK-моделей производится на третьем этапе. Между BMK- и TLK-моделями существуют взаимно-однозначное соответствие. Это свойство позволяет перейти от конкретной BMK-модели к конкретной TLK-модели путем выбора из исходной TLR-модели столбцов, соответствующих столбцам в BMK-модели.

На последнем этапе решения задачи с использованием стоимостей признаков c_j определяется суммарная стоимость каждой TLK-модели в соответствии с критерием (3.13) осуществляется выбор наилучшей модели, обладающей минимальной суммарной стоимостью c_π (3.14). В результате получается TLK₀-модель, признаки z_j которой представляют собой оптимальную совокупность булевых признаков для однозначного выявления видов дестабилизирующих воздействий на ОРУ.

Третья задача заключается в построении правил поиска видов дестабилизирующих воздействий на ОРУ. В качестве исходных данных используется: TLK₀-модель, предикатные уравнения для признаков z_j , стоимости признаков c_j . Требуется сформировать оптимальные правила поиска видов. Формальная постановка задачи совпадает с постановками задач ППФ и ППТ. Проведенные исследования приемлемых методов решения задачи построения ППВ позволили установить, что наиболее эффективны

методы, разработанные для построения ППФ и примененные при формировании ППТ.

Задача построения ППВ, по сути, задача поиска и поэтому выбор принципа поиска – параллельного или последовательного – существенным образом влияет на технологию последующей разработки ППВ. Общим для технологий разработки безусловных и условных ППВ является наличие двух этапов. На первом этапе формируются возможные варианты ППВ, реализующие используемый принцип поиска видов, на втором осуществляется выбор наилучшего варианта по технико-экономическому критерию.

При построении безусловных ППВ используется те же методы, что и для формирования безусловных ППФ (п. 3.3). Безусловные ППВ могут описываться в терминах двузначных признаков z_j и переменных $\rho'_{i\ell}$ и $\rho''_{i\ell}$ (3.37) с помощью двузначных предикатов (3.38).

Построение условных ППВ производится с помощью соответствующих методов формирования сбалансированных дихотомических схем поиска, описанных в п. 3.3. В результате для каждого типа дестабилизирующих воздействий получается дихотомическая ветвь, обеспечивающая однозначное определение всех заданных видов дестабилизирующих воздействий.

Итак, построение как оптимальных безусловных, так и условных ППВ производится с помощью методов построения ППФ.

3.6 Организация диагностирования объектов рационального управления

В предыдущих параграфах представлены четыре основные комплексные задачи диагностирования ОРУ и методы их решения, составляющие основу сигнально-параметрического подхода. Результатом решения этих основных задач есть совокупность алгоритмов определения факта наличия прямых признаков дестабилизирующих воздействий, другими словами, характеристик дестабилизирующих воздействий. Такими характеристиками служат:

- 1) момент появления дестабилизирующего воздействия или факт его наличия в ОРУ;
- 2) компонент с дестабилизирующим воздействием;
- 3) тип дестабилизирующего воздействия;

4) конкретное физическое проявление дестабилизирующего воздействия – его вид.

Определение этих характеристик дестабилизирующих воздействий не может осуществляться в произвольном порядке из-за наличия между ними соответствующих связей, порожденных принципом последовательного снятия неопределенности и приводящим к иерархии основных задач диагностирования ОРУ. В связи с этим обстоятельством алгоритмы определения характеристик дестабилизирующих воздействий должны быть организованы в комплексную алгоритмическую систему, обеспечивающую последовательное снятие неопределенности в причинах дестабилизации ОРУ, это соответствует пятой основной задаче диагностирования. Рассмотрим особенности такой организации алгоритмов диагностирования.

Решение первой основной задачи – обнаружения дестабилизирующих воздействий – получается в форме взаимосвязанных алгоритмов формирования косвенных признаков ОРУ $\Delta u(k)$, вычисления текущих значений критерия $I[.]$ и его допусков, алгоритмов принятия решения. Совокупность этих алгоритмов может быть сформирована в алгоритмический модуль обнаружения дестабилизирующих воздействий, который обозначим символом О. Входными данными модуля будут массивы из сигналов $u(k)$ и $\tilde{y}(k)$, сформированные на интервале диагностирования $[k_0, k'_1]$, и номинальные атрибуты эталонных математических моделей ОРУ. Выходом модуля О служит заключение о наличии или отсутствии дестабилизирующих воздействий на ОРУ.

После получения заключения о наличии дестабилизации ОРУ, следующий шаг в диагностировании – локализация дестабилизированных фрагментов. Решение второй основной задачи диагностирования представляет собой совокупность ППФ условных или безусловных, в зависимости от выбранного принципа поиска. Алгоритмический модуль, включающий в себя ППФ, обозначим символом Ф. Входными данными этого модуля будут: заключение о наличии дестабилизации в ОРУ, массивы значений косвенных признаков, атрибуты математических моделей фрагментов, значения допусков, интервал диагностирования, коэффициенты доверия для вычисления признаков z_j . Выходом модуля Ф будет заключение о наличии дестабилизации в i -ом фрагменте, $i = \overline{1, \mu_1}$.

Следующей характеристикой дестабилизирующего воздействия, которую, в соответствии с принципом снятия неопределенности требуется определить – это его тип. В результате решения задачи поиска типа для

каждого фрагмента ОРУ получается совокупность ППТ. Обозначим такую совокупность символом T_i . Входными данными модуля T_i служат: заключение о наличии дестабилизации в i -м фрагменте ОРУ, массивы значений косвенных признаков типов дестабилизирующих воздействий, все атрибуты для вычисления булевых признаков z_j . Выходом модуля T_i будет заключение о принадлежности к g -му типу.

Заключительной характеристикой дестабилизирующего воздействия, выявляемой в процессе диагностирования, будет его вид. Решение задачи определения вида дестабилизирующего воздействия позволяет получить для каждого типа дестабилизирующих воздействий соответствующие ППВ, составляющие основу (ядро) алгоритмического модуля B_i^r , $r = \overline{1, \mu_3}$. Входными данными модуля B_i^r служат заключение о g -м типе дестабилизации, оценочные значения параметров, граничные значения областей их изменения, соответствующие видам, допуска, коэффициенты доверия. Выход модуля B_i^r - это имя вида и численное значение оценки прямого признака вида дестабилизирующего воздействия на ОРУ в текущий момент времени. Представим обобщенную схему организации процесса диагностирования в терминах описанных алгоритмических модулей (рис. 3.5).

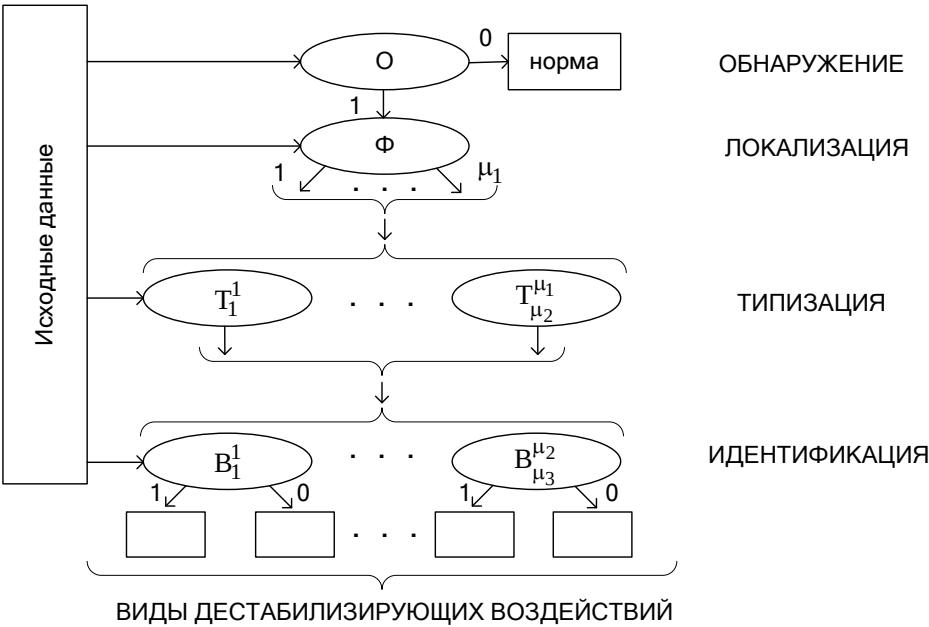


Рисунок 3.5 – Иерархическая схема организации алгоритмических модулей

Процесс диагностирования начинается с формирования исходных данных об ОРУ, касающихся паспортных сведений, массивов сигналов $u(k)$ и $\tilde{y}(k)$. На основании исходных данных алгоритмический модуль O позволяет

сформировать заключение о наличии – «1» или отсутствии – «0» дестабилизирующих воздействий в ОРУ, иными словами, о неработоспособном или работоспособном состояниях. Работоспособному состоянию соответствует нормальное выполнение ОРУ своих функций, т. е. все параметры, характеризующие работоспособность находятся в норме. Далее при наличии дестабилизирующих воздействий в ОРУ подключается алгоритмический модуль Φ , который на основании данных для модуля O и дополнительных массивов данных с контрольных точек, значений допусков, коэффициентов доверия, используемых при обработке аргументов предикатных уравнений на интервале $[k_0, k_1]$ и обеспечивающий «защиту» от помех измерения, производит вычисление косвенных признаков z_j и с помощью ППФ выдает заключение о конкретном дестабилизирующем фрагменте ОРУ.

Общее количество фрагментов μ_1 включает и ситуации, когда конструктивно-законченная часть ОРУ, подверженная дестабилизирующему воздействию, не может быть однозначно определена из-за малой выборки сигналов, высокого уровня помех и шумов измерений или по ряду других причин, требующих дальнейшего выяснения.

Полученное заключение о конкретном компоненте, подверженном дестабилизирующему воздействию, позволяет перейти с уровня локализации на следующий иерархический уровень – типизации, где используются модули T_i^j , позволяющие посредством обработки необходимых исходных данных о сигналах и характеристиках дестабилизированного фрагмента ОРУ установить тип дестабилизирующего воздействия из μ_2 возможных для этого фрагмента.

В соответствии с установленным типом активизируется модуль B_i^f , обеспечивающий посредством обработки соответствующих исходных данных об оценках параметров, характеристик видов допусков, коэффициентов доверия, формирование заключения о конкретном виде дестабилизирующего воздействия на ОРУ – $d_i \in D$.

Очевидно, что в представленной иерархической схеме организации алгоритмов диагностирования воплощен принцип последовательного снятия неопределенности о времени появления дестабилизирующего воздействия, о конкретном неработоспособном фрагменте, о типе дестабилизации и, наконец, о конкретном, парируемом в последующем, виде дестабилизирующего воздействия.

Представленная схема организации алгоритмов диагностирования ОРУ позволяет, как следует из опыта, создавать конструктивную технологию разработки программного обеспечения, базирующегося на принципах построения диагностических знаний-ориентированных систем. Представленные алгоритмические модули – это по сути n -значные предикаты на массивах исходных данных об объекте диагностирования. Эти предикаты отражают познанные закономерности влияния дестабилизирующих воздействий на доступные измерению сигналы ОРУ, т. е. представляют собой конкретные знания о свойствах неработоспособных ОРУ, получаемых в результате формирования диагностических функциональных и логических моделей, а также решения обратных задач при нахождении оценок соответствующих прямых признаков дестабилизирующих воздействий. Поэтому алгоритмические модули представляют основу для построения соответствующей продукционной базы знаний.

Технология разработки программного обеспечения процессов диагностирования значительно упрощается при небольшой мощности множества дестабилизирующих воздействий (10...30 видов) и применение условного принципа поиска признаков. В результате решения основных задач диагностирования с использованием этого принципа формируется совокупность соответствующих дихотомических ветвей. Объединение ветвей согласно последовательности решения задач диагностирования и взаимосвязи этих решений порождает дихотомическое дерево процесса диагностирования ОРУ. В узлах дерева размещаются признаки, булевы значения которых получаются решением соответствующих двузначных предикатных уравнений. Другими словами, в результате решения предикатного уравнения получается значение признака «0» или «1», что и определяет направление дальнейшего прохождения по дереву. Заканчивается дерево листьями, соответствующими диагностируемыми видам дестабилизирующих воздействий ОРУ. Построенное таким образом дихотомическое дерево, по сути, представляет собой алгоритмическую модель процесса диагностирования ОРУ. Компьютерная реализация такой модели не вызывает больших затруднений и позволяет получить программный продукт оперативного диагностирования ОРУ с глубиной до конкретных, физических видов дестабилизирующих воздействий.

Таким образом, сигнально-параметрический подход к диагностированию динамических объектов позволяет разрабатывать конструктивные алгоритмические средства для компьютерного диагностирования в реальном масштабе времени.

ГЛАВА

IV

ВОССТАНОВЛЕНИЕ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБЪЕКТОВ
РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Метод – самая первая, самая
основная вещь...*

*От метода, от способа зависит
вся серьёзность исследования.*

Всё дело в хорошем методе.

*И.П. Павлов (1849 – 1936) – физиолог,
первый русский Нобелевский лауреат.*

Восстановление работоспособности ОРУ – это процесс обеспечения такого его состояния, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, будут соответствовать требованиям ТЗ. Использование в рациональном управлении принципа управления по диагнозу приводит к замкнутым САУ (рис. 1.2).

Обеспечение работоспособности замкнутых САУ сопряжено с решением двух функциональных – взаимосвязанных и противоречивых задач:

1) выполнение необходимых условий работоспособности – требуемых запасов устойчивости;

2) выполнение достаточных условий работоспособности – требуемых показателей качества.

Поэтому процедуры восстановления работоспособности ОРУ требуется разрабатывать посредством компромиссного решения этих двух задач. Напомним, что восстанавливаемость – это свойство ОРУ, характеризующее возможность его перевода из неработоспособного состояния в работоспособное посредством нейтрализации (парирования) дестабилизирующих воздействий $d_i \in D$ на конечном интервале времени.

Свойство восстанавливаемости ОРУ формируется на этапе его проектирования введением в структуру соответствующих множеству прямых признаков дестабилизирующих воздействий P множества средств восстанавливаемости V (табл. 2.1). Для восстановления работоспособности ОРУ требуется, во-первых, оперативный и сбалансированный, с имеющимися средствами восстановления, диагноз, и, во-вторых, процедуры восстановления работоспособности, обеспечивающие как устойчивость процесса перевода ОРУ из неработоспособного состояния в работоспособное, так и его качество.

Приемлемыми средствами восстановления работоспособности для многих объектов класса ОДО могут быть сигнальная или параметрическая подстройки, реконфигурация алгоритмов или приборов. Для формирования процедур, обеспечивающих устойчивость и качество процесса восстановления работоспособности ОРУ, более приемлем подход, базирующийся на функциях А. М. Ляпунова. Специфика средств восстановления порождает и соответствующие методы синтеза алгоритмов восстановления работоспособности ОРУ.

4.1 Основные положения синтеза управлений с помощью функций А. М. Ляпунова

В фундаментальной работе А. М. Ляпунова [1] представлены методы анализа устойчивости нелинейных динамических систем посредством как линеаризованных представлений, так и квадратичных функций.

Уравнение дестабилизирующего движения ОРУ (2.23) отражает возмущенное линеаризованное движение ОДО относительно его эталонного поведения:

$$\Delta y_i(t) = G' \Delta y_i(t) + [A_i' \hat{x}_i(t) + B_i' u(t) + N_i'] \Delta \lambda_i; \Delta y_i(t_0) = \tilde{y}_{i0}, i = \overline{1, q}. \quad (4.1)$$

Дадим, следуя работе [2], ряд определений применительно к уравнению дестабилизирующего движения.

Решение системы (4.1) $\Delta y_i(t) = 0$ называется устойчивым в смысле Ляпунова, если для любого положительного числа ε можно указать положительное число δ такое, что из неравенства $|\Delta y(t_0)| < \delta$ следует при $t > t_0$ неравенство $|\Delta y(t)| < \varepsilon$. Если же, кроме того, всякое решение $\Delta y_i(t)$, начальные данные которого определяются условием $|\Delta y(t_0)| < h$, обладают свойством $\lim_{t \rightarrow \infty} y_i(t) = 0$, то нулевое решение называется асимптотически устойчивым в смысле Ляпунова.

Если ввести функцию $V[\Delta y(t)]$, определенную во всем пространстве переменных вектора $\Delta y(t)$, непрерывную и дифференцируемую в области дестабилизирующего движения Ω , включающей в себя начало координат, то такая функция будет называться положительно определенной, если всюду, кроме точки $\Delta y(0) = 0$ имеет место неравенство $V[\Delta y(t)] > 0$. Если

выполняется неравенство $V[\Delta y(t)] < 0$, то функция называется отрицательно определенной.

Если в области дестабилизирующего движения имеет место неравенство $V[\Delta y(t)] \geq 0$ или неравенство $V[\Delta y(t)] \leq 0$, то функция $V[.]$ называется знакопостоянной, причем в первом случае функция $V[.]$ знакоположительная, а во втором – знакоотрицательная.

Общего метода построения функций $V[\Delta y(t)]$ не существует. В работе А. М. Ляпунова [1] было показано, что для линейных систем вида

$$\Delta \dot{y}(t) = G' \Delta y(t) \quad (4.2)$$

квадратичная функция

$$V[\Delta y(t)] = \Delta y^T(t) Q \Delta y(t) \quad (4.3)$$

с числовой матрицей $Q = Q^T$, определяемой из уравнения

$$(G')^T Q + Q G' = -P, \quad (4.4)$$

где $P = P^T > 0$ – заданная положительно определенная матрица.

Возможно получить необходимые и достаточные условия асимптотической устойчивости в виде условий положительной определенности матрицы Q .

Для того, чтобы квадратная матрица P была положительно определенной, согласно критерия Сильвестра [3], необходимо и достаточно, чтобы ее миноры $\Delta_k > 0$ при $k = 1, \dots, m$.

Из критерия Сильвестра следуют необходимые и достаточные условия определенной отрицательности квадратной матрицы: миноры Δ_k должны последовательно чередовать знак, причем $\Delta_1 < 0$.

Функция $V[.]$, используемая для изучения поведения вдоль траектории дестабилизирующего движения с целью установления характера этого движения, называются функциями Ляпунова.

Теорема Ляпунова об устойчивости. Если для уравнения (4.1) существует в области дестабилизирующего движения знакоопределенная функция $V[.]$, производная которой по времени $\dot{V}[.]$, взятая в силу

уравнения (4.1), является знакопостоянной функцией, знака, противоположного знаку функции $V[\cdot]$, то положение равновесия устойчиво в смысле Ляпунова.

Теорема Ляпунова об асимптотической устойчивости. Если для уравнения (4.1) существует знакоопределенная функция $V[\cdot]$, полная производная которой по времени, найденная в силу уравнения (4.1), будет также знакоопределенной, знака, противоположного с $V[\cdot]$, положение равновесия будет асимптотически устойчивым.

Оценивать на практике устойчивость линейной системы (4.2) с помощью функции Ляпунова (4.3) нецелесообразно из-за больших вычислительных затрат. Значительно проще определить собственные значения матрицы G' и их расположение на комплексной плоскости. Вместе с тем, знание функций Ляпунова для линейных систем может быть использовано при исследовании устойчивости аналогичных систем с нелинейными слагаемыми в правой части [4]. Так, для класса нелинейных систем со скалярным нелинейным управлением

$$\begin{aligned}\Delta \dot{y}(t) &= G' \Delta y(t) + B \varphi[\sigma(t)]; \Delta y(t_0) = \Delta y_0; \\ \sigma(t) &= C^T \Delta y(t),\end{aligned}\tag{4.5}$$

где B – m -мерный вектор-столбец;

$\varphi[\sigma(t)]$ – нелинейная скалярная функция, удовлетворяющая условию $0 \leq \varphi(\sigma)\sigma \leq k\sigma^2$ – расположения статической характеристики в пределах угла $\arctg k$ первого и третьего квадрантов декартовой плоскости $\varphi(\sigma)$.

Основные результаты для таких систем получены в форме частотных критериев абсолютной устойчивости. Следуя работе [4], абсолютной устойчивостью системы (4.5) называется асимптотическая устойчивость в целом для класса нелинейностей $\varphi(\sigma)$.

Частотный критерий В. М. Попова. Система (4.5) абсолютно устойчива, если $\varphi(\sigma)$ – однозначная функция, принадлежащая классу нелинейностей в пределах $\arctg k$, линейная часть системы асимптотически устойчива и при всех $\omega \in [0, \infty]$ выполняется частотное неравенство

$$k^{-1} + \operatorname{Re}(1 + \Theta j\omega)W(j\omega) > 0,\tag{4.6}$$

где $W(j\omega)|_{j\omega=s}$ – передаточная функция линейной части системы;

Θ – произвольная постоянная, удовлетворяющая условию (4.6).

Справедливость этого критерия может быть доказана с помощью использования функции Ляпунова вида

$$V[\Delta y(t)] = \Delta y^T(t) Q \Delta y(t) + \Theta \int_0^{\sigma} \varphi(\sigma) d\sigma, \quad (4.7)$$

где $Q = Q^T$ – числовая ($m \times m$) матрица;

Θ – некоторое число, выбираемое из условия определенной положительности функций $V[\cdot]$ и $\dot{V}[\cdot]$ для заданного класса нелинейностей $\varphi(\sigma)$.

Частотный критерий справедлив и для векторного нелинейного управления. Другие критерии абсолютной устойчивости нелинейных как непрерывных, так и дискретных систем представлены в фундаментальной работе [4].

Условие абсолютной устойчивости для класса нелинейных систем (4.5) сформированы и во временной области [2]. Так, к примеру, если задаться симметричной матрицей P (4.4), все собственные числа которой положительны и разрешив уравнение (4.4) относительно матрицы Q , можно сформировать функцию А. М. Ляпунова в форме, предложенной А. И. Лурье [12]:

$$V[\Delta y(t)] = \Delta y^T(t) Q \Delta y(t) + \beta \int_0^{\sigma} \varphi(z) dz, \quad (4.8)$$

где при $\beta > 0$ обеспечивается знакоположительность этой функции.

Для асимптотической устойчивости нулевого решения системы (4.5) требуется, чтобы функция $\dot{V}[\Delta y(t)]$ была знакоотрицательной.

Изложенные особенности использования функций А. М. Ляпунова для синтеза управлений базируются только на косвенных характеристиках функций $V[\Delta y(t)]$ и $\dot{V}[\Delta y(t)]$, а именно, знакоположительности. Путем введения еще и количественных ограничений на значения этих функций можно сузить границы достаточных условий устойчивости [4].

Качество управления в рассматриваемом классе нелинейных систем можно оценивать с помощью функций Ляпунова. Так, следуя работе [2], такой показатель качества как время переходного процесса $t_{\text{пп}}$ можно оценить с помощью следующей формулы

$$t_{\text{пп}} = \lambda_n l_n \frac{\lambda_1 \varepsilon^2}{V_0[\cdot]}, \quad (4.9)$$

где λ_1 и λ_n – соответственно, наименьшее и наибольшее собственные числа матрицы Q (4.3), другими словами, наименьший и наибольший корни характеристического уравнения вида

$$|Q - \lambda I| = 0; \quad (4.10)$$

ε – допустимая точность управления;

$V_0[\cdot]$ – значение функции при t_0 , т. е. $V_0[\cdot] = \Delta y_0^T Q \Delta y_0$.

Качество управления в нелинейной системе (4.5) можно оценить и с помощью интегрального критерия качества вида

$$I = \int_0^{\infty} \Delta y^T(t) Q \Delta y(t) dt. \quad (4.11)$$

Наряду с понятием теоретической устойчивости в теории автоматического управления используется понятие прикладной устойчивости – диссипативность [4]. «Диссипативность (в широком смысле слова) – это свойство системы возвращаться в некоторую окрестность исходного режима из различных начальных состояний и остаться в ней в дальнейшем даже при наличии постоянно действующих возмущений». В этой же работе приведены конструктивные критерии диссипативности и для класса нелинейных систем как со скалярным (4.5), так и векторным нелинейным управлением.

Использование цифровых средств диагностирования и восстановления работоспособности объектов рационального управления обуславливает использование для описания как процессов дестабилизирующих движение, так и процессов восстановления дискретных функций в рекуррентных уравнениях такого вида

$$\begin{aligned}\Delta y(k+1) &= R\Delta y(k) + h\varphi[\sigma(k)]; \Delta y(k) = \Delta y_0; \\ \sigma(k) &= c^T \Delta y(k),\end{aligned}\tag{4.12}$$

где $\Delta y(k)$ – вектор отклонений ОРУ;

R, h, c – матрицы соответствующих размерностей;

$\varphi[\sigma(k)]$ – нелинейная дискретная скалярная функция, расположенная в соответствующем секторе.

Приведенные ранее определения устойчивости и асимптотической устойчивости нулевого решения справедливы и для дискретного описания, представляющего, по сути, аналог описания с помощью дифференциальных уравнений. Для нелинейных дискретных систем, описываемых уравнениями вида (4.12), синтез управлений, позволяющих обеспечивать условия асимптотической устойчивости в некоторой области и даже в целом, производится с помощью дискретного аналога прямого метода А. М. Ляпунова [4], базирующегося на задании специальной вспомогательной функции А. М. Ляпунова $\Delta V[k, k+1]$ и формировании с помощью уравнений (4.12) функции $V[\Delta y(k)]$, удовлетворяющей условию

$$\Delta V[k, k+1] = V[\Delta y(k+1)] - V[\Delta y(k)],\tag{4.13}$$

где $\Delta V[k, k+1]$ – определено отрицательная функция;

$V[\Delta y(k)], V[\Delta y(k+1)]$ – определено положительные функции для дискретных значений аргумента k и $k+1$.

В фундаментальной работе [4] представлены конструктивные методы синтеза асимптотически устойчивых дискретных систем как со скалярным, так и векторным управлением во временной и частотной областях. Эти методы принципиально применимы для решения задач восстановления работоспособности объектов рационального управления с помощью различных наличных избыточных средств.

Для перевода ОРУ из неработоспособного состояния, вызванного дестабилизирующим воздействием $d_i \in D$, в работоспособное требуется обеспечить при его проектировании свойство восстанавливаемости, о котором шла речь в п. 2.3. Напомним, что ОРУ называется восстанавливаемым, если сформированы средства восстановления, позволяющие компенсировать

влияние прямых признаков $\Delta\lambda_i \in P$ так, что $\Delta y_i(t) \rightarrow 0$ на конечном, допустимом интервале времени. Обеспечить свойство восстанавливаемости ОРУ можно с помощью различных дополнительных к ОДО средств восстановления работоспособности. С помощью табл. 2.1 и критериев уровня восстанавливаемости и ранга средств можно сформировать, как описано в п. 2.3, сбалансированное множество средств восстановления работоспособности ОРУ $-V = \{v_j\}_1^\mu$. В качестве средств восстановления работоспособности могут использоваться в зависимости от конструкции, принципа действия и технико-экономических требований, зарекомендовавшие себя на практике в самонастраивающихся и самоорганизующихся системах управления такие средства как сигнальная и параметрическая подстройки [5 – 7], а также дополнительные избыточные аппаратные и алгоритмические средства [7 – 10].

Совокупность возникающих при восстановлении работоспособности ОРУ задач и их связи можно представить, основываясь на работе [11] с помощью следующей схемы (рис. 4.1).

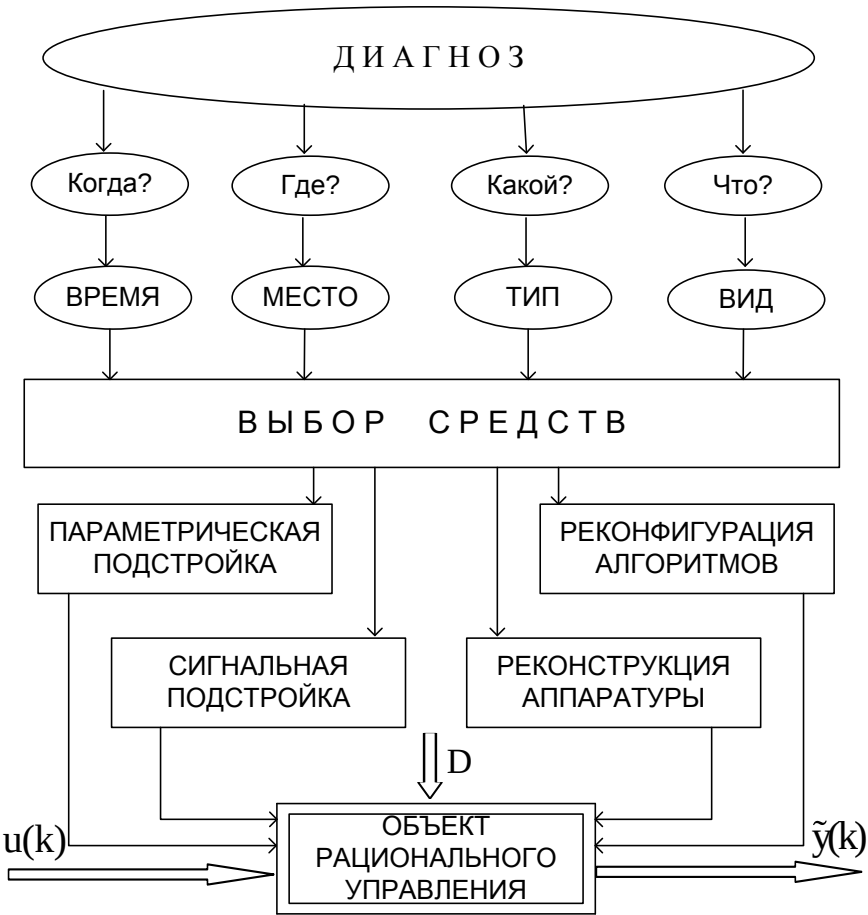


Рисунок 4.1 – Структуризация задач восстановления работоспособности ОРУ

Итак, в результате диагностирования в блоке диагностики (рис. 1.2) формируется диагноз, в котором есть ответ на вопрос, когда произошла дестабилизация ОРУ – в форме момента времени обнаружения нештатной ситуации. Далее, ответ на вопрос, где произошла дестабилизация – в форме имени конструктивно законченного фрагмента ОРУ. Тип дестабилизации выявляется в ответе на вопрос какой? И, наконец, на вопрос что произошло, получен ответ в форме названия конкретного физического вида дестабилизации. Первая задача восстановления заключается в выборе средств восстановления работоспособности ОРУ исходя из:

- 1) текущей базы данных в форме табл. 2.1 и текущих критериев восстановления;
- 2) текущих условий выполнения функциональных задач, возложенных на САРУ;
- 3) этапа и состояния выполнения объектом управления его миссии.

Следующие задачи заключаются в разработке алгоритмического обеспечения по использованию средств параметрической и сигнальной подстройки, средств реконфигурации алгоритмов и аппаратуры. Это алгоритмическое обеспечение формируется в результате решения задач синтеза управлений с помощью функций А. М. Ляпунова. Синтез производится с помощью различных методов, основные положения которых были изложены выше. Алгоритмическое обеспечение восстановления работоспособности призвано обеспечить асимптотическую устойчивость или диссипативность ОРУ, а также требуемые показатели качества его работоспособности.

4.2 Синтез алгоритмов параметрической подстройки

Для реализации параметрической подстройки ОРУ в его конструкцию при проектировании необходимо вводить функциональные элементы с изменяемым параметром. Технически такие элементы целесообразно вводить в конструкцию приводов (рис. 1.2). Изменение параметров должно производиться с помощью соответствующих алгоритмов, использующих информацию о конкретном дестабилизирующем воздействии в форме отклонения $\Delta y_i(t)$. Эти алгоритмы должны осуществить такое изменение параметров, чтобы нейтрализовать влияние диагностированного дестабилизирующего воздействия и обеспечить перевод ОРУ из неработоспособного состояния в работоспособное, другими словами, восстановить его работоспособность.

Рассмотрим простейший случай, когда производится подстройка одного параметра, изменяющего коэффициент передачи ОРУ с помощью элемента, описываемого нелинейной функцией $\varphi[\sigma(t)]$. Проанализируем структуры уравнения дестабилизирующего движения (4.1). Аддитивная составляющая уравнения

$$[\mathcal{A}'_i \hat{x}_i(t) + \mathcal{B}'_i u(t) + \mathcal{N}'_i] \Delta \lambda_i \quad (4.14)$$

по сути представляет собой характеристику дестабилизирующего воздействия, соответствующую прямому его признаку – $\Delta \lambda_i$. Это дестабилизирующее воздействие привело к появлению отклонения выходного сигнала ОРУ – $\Delta y_i(t)$. Для устранения этого отклонения требуется сформировать такое изменение параметра $\mu(t) = \varphi[\sigma(t)]$, которое будет нейтрализовать (компенсировать) влияние дестабилизирующего воздействия (4.14). Тогда уравнение дестабилизирующего движения (4.1) можно преобразовать к виду, в котором слагаемое (4.14) заменено слагаемым, отражающим особенности параметрической подстройки, и произведено переобозначение для удобства дальнейшего изложения матриц $G' = D$ и $b_i = h_i$:

$$\begin{aligned} \Delta y_i(t) &= D \Delta y(t) + \mu(t) h_i u(t); \Delta y_i(t_0) = \Delta \tilde{y}_{i0}; \\ \mu(t) &= \varphi[\sigma(t)]; \\ \sigma(t) &= c^T \Delta y_i(t), \end{aligned} \quad (4.15)$$

где h_i – вектор-столбец, соответствующий функциональной связи вектора управления $u(t)$ с отклонением $\Delta y_i(t)$, в которую введен функциональный элемент с изменяющимся параметром $\mu(t)$.

Таким образом, задача параметрической подстройки может быть сведена к известной и решенной задаче об абсолютной устойчивости [2], если $\varphi[\sigma(t)]$ – непрерывная функция, удовлетворяющая условию

$$\varphi[\sigma(t)] = 0 \text{ при } \sigma(t) = 0; \varphi[\sigma(t)] \sigma(t) > 0 \text{ при } \sigma(t) \neq 0. \quad (4.16)$$

Зададимся симметричной матрицей P , все собственные числа которой положительны, т.е. матрица P – положительно определенная. Для сформированного контура параметрической подстройки (4.15) будем использовать функцию А. М. Ляпунова в форме (4.8), матрица Q которой находится из уравнения

$$D^T Q + QD = -P. \quad (4.17)$$

Задача обеспечения абсолютной устойчивости нулевого положения равновесия сводится к выбору матрицы P и параметра β , обеспечивающих знакоотрицательность функции $\dot{V}[\Delta y(t)]$. Производная функции А. М. Ляпунова (4.8) в силу уравнений (4.15) получается в результате следующих преобразований:

$$\begin{aligned} \dot{V}[\Delta y(t)] &= \Delta \dot{y}^T(t) Q \Delta y(t) + \Delta y^T(t) Q \Delta y(t) + \beta \phi[\sigma(t)] \dot{\sigma}(t) = \\ &= \left[D \Delta y(t) + h_i \phi[\sigma(t)] \right]^T Q \Delta y(t) + \Delta y^T(t) Q \left[D \Delta y(t) + h_i \phi[\sigma(t)] \right] + \\ &+ \beta \phi[\sigma(t)] c^T \Delta \dot{y}(t) = \Delta y^T(t) \left(D^T Q \Delta y(t) + \phi[\sigma(t)] h_i^T Q \Delta y(t) + \right. \\ &+ \Delta y^T(t) Q D \Delta y(t) + \Delta y^T(t) Q h_i \phi[\sigma(t)] + \beta \phi[\sigma(t)] c^T D \Delta y(t) + \\ &+ \beta \phi[\sigma(t)] c^T h_i \phi[\sigma(t)] \left. \right) = \Delta y^T(t) \left(D^T Q + QD \right) \Delta y(t) + \\ &+ h_i^T Q \Delta y(t) \phi[\sigma(t)] + \Delta y^T(t) Q h_i \phi[\sigma(t)] + c^T D \Delta y(t) \beta \phi[\sigma(t)] + \\ &+ c^T h_i \beta \phi^2[\sigma(t)]. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Первое слагаемое полученного выражения обеспечивает знакоотрицательность функции $\dot{V}[\Delta y(t)]$, так как $D^T Q + QD = -P$. Пятое слагаемое будет знакоотрицательным при условии $c^T h_i \leq 0$. Знакоотрицательность всей функции $\dot{V}[\Delta y(t)]$, согласно теореме 3.1 работы [2], обеспечивается выполнением такого условия:

$$\left(Q h_i + \beta \frac{D^T c}{2} \right)^T P^{-1} \left(Q h_i + \beta \frac{D^T c}{2} \right) = -\beta c^T b. \quad (4.19)$$

При выполнении сформированных условий обеспечивается абсолютная устойчивость нулевого положения равновесия, а следовательно, перевод ОРУ из неработоспособного состояния, вызванного дестабилизирующим воздействием, характеризуемым прямым признаком $\Delta\lambda_i$, в работоспособное состояние посредством параметрической подстройки, обеспечивающей $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta y_i(t) = 0$.

Исходя из уравнений (4.15), с помощью графической модели представим особенности процесса параметрической компенсации влияния i -го дестабилизирующего воздействия (рис. 4.2).

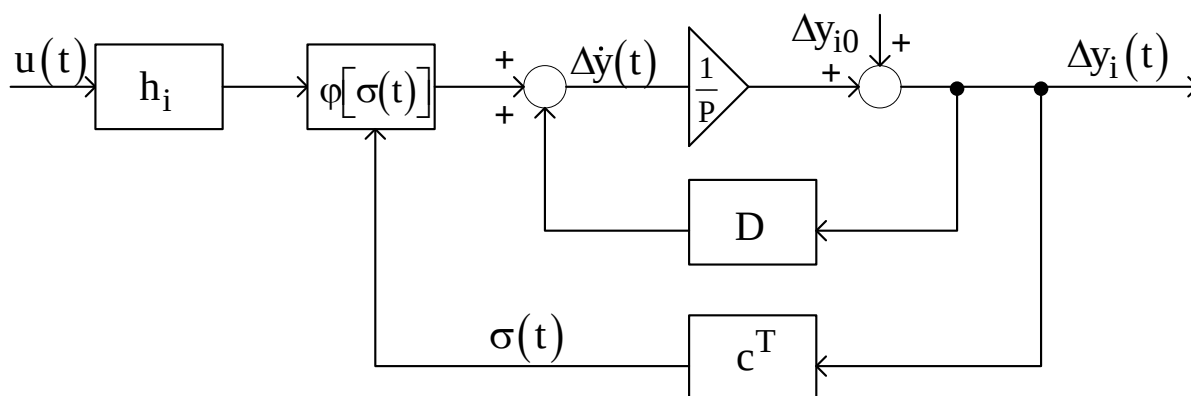


Рисунок 4.2 – Структурная схема контура параметрической подстройки

Соответствующим выбором матриц P и Q , а также удовлетворяя описанным условиям, обеспечивается абсолютная устойчивость замкнутого контура параметрической компенсации прямого признака $\Delta\lambda_i$ дестабилизирующего воздействия с помощью нелинейного элемента с нелинейной статической характеристикой $f[\sigma(t)]$. Качество компенсации обеспечивается выполнением следующего условия:

$$\int_0^{\infty} \Delta y_i^T(t) P \Delta y_i(t) dt \leq \int_0^{\infty} \Delta y_i^T(t) Q \Delta y_i(t) dt, \quad \forall \Delta y_i(t) \in \Omega. \quad (4.20)$$

На основании функциональной схемы ОРУ (рис. 2.4) контур параметрической подстройки можно представить с помощью развернутой структурной схемы (рис. 4.3).

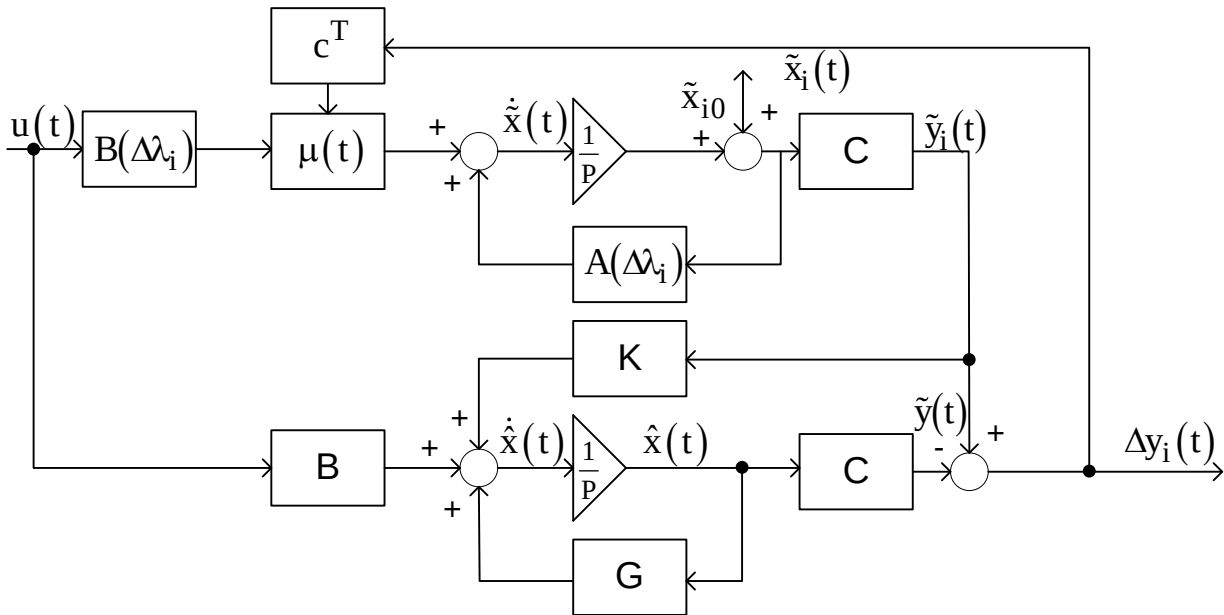


Рисунок 4.3 – Развернутая структурная схема контура параметрической подстройки параметра μ

На схеме изображен ОРУ посредством графического представления уравнений дестабилизирующего движения, обусловленного прямым признаком дестабилизации $\Delta\lambda_i$, и контур подстройки скалярного параметра μ в прямой связи сигналов $\tilde{y}(t)$ и $u(t)$.

При использовании в ОРУ нескольких подстроечных параметров алгоритмы их изменения могут быть синтезированы с помощью изложенного метода как для каждого скалярного параметра, так и для векторного их представления.

Если дестабилизирующее воздействие на ОРУ приводит к изменению его динамических свойств, то для компенсации возникшего дестабилизирующего движения целесообразно вводить в конструкцию функциональный элемент, влияющий на динамику объекта. Рассмотрим такой вариант параметрической подстройки на примере рекуррентного уравнения дестабилизирующего движения для i -го прямого признака в следующей форме:

$$\Delta y_i(k+1) = G\Delta y(k) + \mu(k)a_i\tilde{x}_i(k); \Delta y(k_0) \leq \Omega, \quad (4.21)$$

где a_i – n -мерный вектор-столбец, все компоненты которого нулевые, кроме одной: $a_{ij} = e_i^T A e_j$, где e_i и e_j – единичные орты;

A – матрица ОРУ для номинального режима функционирования;
 $\tilde{x}_i(k)$ – i -я компонента вектора состояния $\tilde{x}(k)$ дестабилизирующего движения ОРУ.

Качество восстановления работоспособности ОРУ будем оценивать с помощью функции

$$V[\Delta y_i(k)] = \Delta y_i^T(k) Q \Delta y_i(k), \quad (4.22)$$

где $Q = Q^T > 0$.

Это функция $V[\Delta y_i(k)] = 0$ при $\Delta y_i(k) = 0$ и $V[\Delta y_i(k)] > 0$ при $\forall \Delta y_i(k) \in \Omega$, т. е. функция является определенно положительной. В соответствии с дискретным аналогом второго метода А. М. Ляпунова определим первую разность в форме (4.13) функции (4.22) как

$$\begin{aligned} \Delta V[k, k+1] &= V[\Delta y_i(k+1)] - V[\Delta y_i(k)] = \\ &= \Delta y_i^T(k+1) Q \Delta y_i(k+1) - \Delta y_i^T(k) Q \Delta y_i(k). \end{aligned} \quad (4.23)$$

Подставив в это выражение значение отклонения $\Delta y_i(k+1)$ из уравнения (4.21), получим

$$\begin{aligned} \Delta V[k, k+1] &= [G \Delta y_i(k) + \mu a_i \tilde{x}_i(k)]^T Q [G \Delta y_i(k) + \mu a_i \tilde{x}_i(k)] - \\ &- \Delta y_i^T(k) Q \Delta y_i(k). \end{aligned}$$

Раскроем скобки в первом слагаемом, тогда

$$\begin{aligned} \Delta V[k, k+1] &= \Delta y_i^T(k) G^T Q G \Delta y_i(k) + \mu \tilde{x}_i^T(k) a_i^T Q G \Delta y_i(k) + \\ &+ \Delta y_i^T(k) G^T Q \mu(k) a_i \tilde{x}_i(k) + \mu^2(k) \tilde{x}_i^T(k) a_i^T Q a_i \tilde{x}_i(k) - \Delta y_i^T(k) Q \Delta y_i(k). \end{aligned}$$

Преобразуем это выражение следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta V[k, k+1] &= \Delta y_i^T(k) [G^T Q G - Q] \Delta y_i(k) + \mu(k) [2 \tilde{x}_i^T(k) a_i^T Q G \Delta y_i(k) + \\ &+ \mu(k) \tilde{x}_i^T(k) a_i^T Q a_i \tilde{x}_i(k)]. \end{aligned} \quad (4.24)$$

Согласно второму методу А. М. Ляпунова для того, чтобы нулевое решение уравнения (4.21) было асимптотически устойчивым в области Ω , достаточно обеспечить функции $\Delta V[k, k+1]$ такие свойства: $\Delta V[k, k+1] = 0$ при $\Delta y_i(k) = 0$ и $\Delta V[k, k+1] < 0$ при $\forall \Delta y_i(k) \in \Omega$, т. е. свойство определено отрицательной функции. Первое слагаемое функции (4.24) будет обеспечивать ей определенную отрицательность, если

$$G^T Q G - Q - P, \quad (4.25)$$

где $P = P^T > 0$. Одно из возможных условий, при котором второе слагаемое обеспечивает $\Delta V[k, k+1]$ требуемые свойства, состоит в выполнении равенства

$$\mu(k) \left[2\tilde{x}_i^T(k) a_i Q G \Delta y_i(k) + \mu(k) x_i^T(k) a_i^T Q a_i \tilde{x}_i(k) \right] = 0. \quad (4.26)$$

Выполнение этого равенства можно обеспечить выбором соответствующей скалярной функции $\mu(k)$.

Тривиальное решение $\mu(k) = 0$ не представляет практического интереса. Второе решение

$$\mu(k) = -2 \left[a_i^T Q a_i \right]^{-1} \tilde{x}_i^{-1}(k) a_i^T Q G \Delta y(k) \quad (4.27)$$

приемлемо с практической точки зрения и, по сути, представляет собой алгоритм подстройки параметра $\mu(k)$ по значениям отклонения $\Delta y_i(k)$. Такой алгоритм обеспечивает в области Ω асимптотическое восстановление работоспособности ОРУ со следующей оценкой качества:

$$\sum_{k=k_0}^{\infty} \Delta y_i^T(k) P \Delta y_i(k) \leq \Delta y_i^T(k_0) Q \Delta y_i(k_0). \quad (4.28)$$

Представим структуру полученного алгоритма с помощью графической развернутой схемы (рис. 4.4).

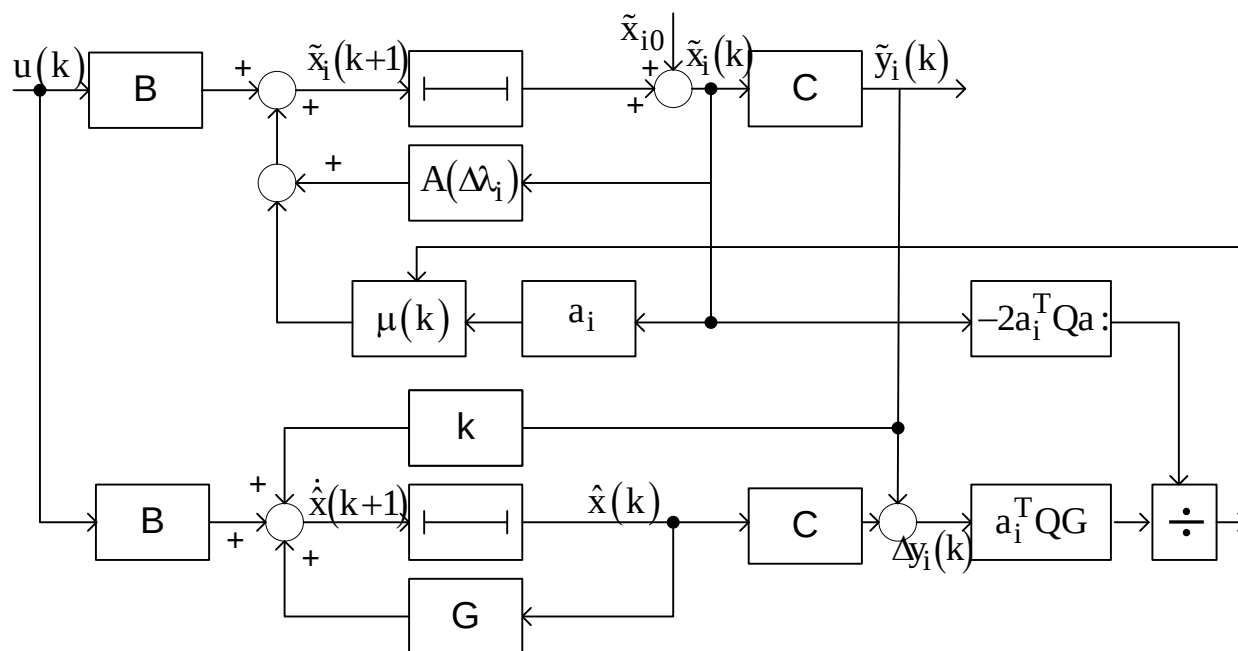


Рисунок 4.4 – Развернутая структурная схема цифрового контура параметрической подстройки динамики ОРУ

Как следует из представленной схемы, изменяющийся параметр $\mu(k)$ вносит коррекцию в матрицу динамики ОРУ – $A(\Delta\lambda_i)$, и в частности, в столбец a_i , в котором содержится прямой признак дестабилизирующего воздействия $\Delta\lambda_i$. Коррекция производится по сигналу $\Delta y_i(k)$ до тех пор, пока $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta y_i(k) = 0$.

Многообразие дестабилизирующих воздействий на ОРУ определяется его спецификой, что и порождает различные конструктивные варианты включения функциональных элементов изменяющимся параметром. Не регламентированный выбор функций, удовлетворяющих условиям А. М. Ляпунова, дает возможность формировать различные алгоритмы восстановления работоспособности ОРУ. Такая многовариантность порождает новую задачу поиска наилучшей, с точки зрения конкретных технико-экономических требований, вытекающих из технического задания на проектирование ОРУ, структуры алгоритмов параметрической подстройки.

4.3 Синтез алгоритмов сигнальной подстройки

Сигнальную подстройку можно использовать для формирования дополнительного для ОРУ управляющего воздействия $u_g(t)$, компенсирующего влияние дестабилизирующего воздействия с целью восстановления работоспособности.

Для реализации сигнальной подстройки в конструкции ОРУ или в алгоритмах блока управления (рис. 1.2, рис. 1.3) должна быть предусмотрена возможность подачи дополнительного управляющего воздействия $u_g(t)$.

Рассмотрим ситуацию, когда сигнально-компенсируемое дестабилизирующее воздействие d_i приводит к появлению дестабилизирующего движения (4.1). Слагаемое в квадратных скобках в правой части уравнения (4.1) $[A_i' \hat{x}_i(t) + B_i' u(t) + N_i] \Delta \lambda_i$ представим эквивалентным действием соответствующих начальных условий и тогда, переобозначив матрицу $G' = D$, уравнение дестабилизирующего движения ОРУ со скалярной сигнальной подстройкой будет в следующей форме:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{y}_i(t) &= D y_i(t) + b u_g(t); \Delta y_i(t_0) \in \Omega; i = \overline{1, q}; \\ \dot{u}_g(t) &= \psi(t), \end{aligned} \quad (4.29)$$

где b – вектор-столбец, определяющий направление подачи скалярного управляющего воздействия $u_g(t)$. Второе уравнение отражает интегрирующий характер сигнальной подстройки.

Функцию А. М. Ляпунова выберем следующего вида:

$$V[\Delta y_i(t), u_g(t)] = \Delta y_i^T(t) Q \Delta y_i(t) + u_g^2(t). \quad (4.30)$$

Взяв производную по времени от этой функции, после преобразования получим следующее выражение:

$$\begin{aligned}
\dot{V}[\Delta y_i(t), u_g(t)] &= \Delta \dot{y}_i^T(t) Q \Delta y_i(t) + \Delta y_i^T(t) Q \Delta y_i(t) + 2u_g(t) \dot{u}_g(t) = \\
&= [D \Delta y_i(t) + b u_g(t)]^T Q \Delta y_i(t) + \Delta y_i^T(t) Q [D \Delta y_i(t) + b u_g(t)] + \\
&+ u_g(t) \psi(t) = \Delta y_i^T(t) D^T Q \Delta y_i(t) + u_g(t) b^T Q \Delta y_i(t) + \\
&+ \Delta y_i^T(t) Q D \Delta y_i(t) + \Delta y_i^T(t) Q b u_g(t) + 2u_g(t) \psi(t) = \\
&= \Delta y_i^T(t) [D^T Q + Q D] \Delta y_i(t) + 2u_g(t) b^T Q \Delta y_i(t) + 2u_g(t) \psi(t) = \\
&= \Delta y_i^T(t) [D^T Q + Q D] \Delta y_i(t) + 2u_g(t) [b^T Q \Delta y_i(t) + \psi(t)].
\end{aligned} \tag{4.31}$$

Достаточное условие асимптотической устойчивости сигнальной подстройки получим, обеспечив знакоотрицательность выражения (4.31). Производная функции А. М. Ляпунова будет отрицательно определенной, если выполнить следующие условия:

$$D^T Q + Q D = -P; \tag{4.32}$$

$$2u_g(t) [b^T Q \Delta y_i(t) + \psi(t)] = 0, \tag{4.33}$$

где P – симметричная, положительно определенная матрица.

Условие (4.33) выполняется при $u_g(t) = 0$, не представляющим решение задачи подстройки, а также при

$$\psi(t) = -b^T Q \Delta y_i(t). \tag{4.34}$$

Такое значение $\psi(t)$ обеспечивает знакоотрицательность функции $\dot{V}[\Delta y_i(t), u_g(t)]$ во всем пространстве переменных $\Delta y_i(t)$ и $u_g(t)$, а следовательно, и асимптотическую устойчивость процесса подстройки относительно невозмущенного движения, т. е. устойчивое восстановление работоспособности ОРУ.

Уравнения (4.29) и (4.34) представим графически с помощью структурной схемы (рис. 4.5).

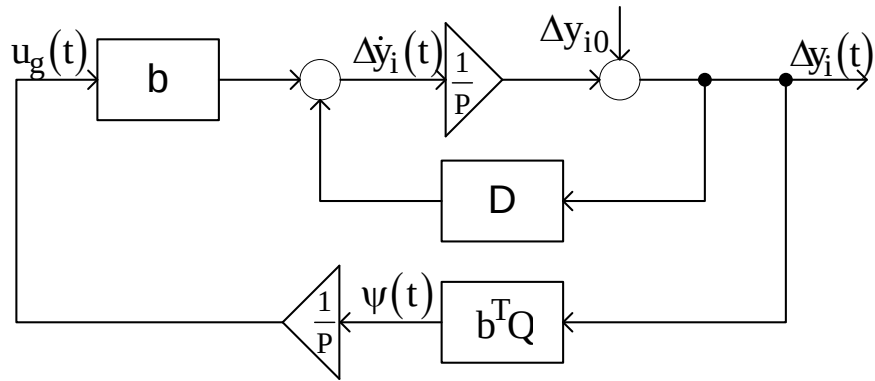


Рисунок 4.5 – Структурная схема контура сигнальной подстройки

Качество восстановления работоспособности обеспечивается таким выбором матриц Q и P (4.32), чтобы выполнялось следующее неравенство:

$$\int_0^{\infty} \Delta y_i^T(t) P \Delta y_i(t) dt \leq \Delta y_i^T(0) Q \Delta y_i(0). \quad (4.35)$$

Таким образом, при синтезе алгоритмов выбором матриц Q и P можно обеспечить компромисс между требованиями устойчивости и качества процесса сигнальной подстройки.

На основании функциональной схемы ОРУ можно представить развернутую функциональную схему сигнальной подстройки в следующем виде (рис. 4.6).

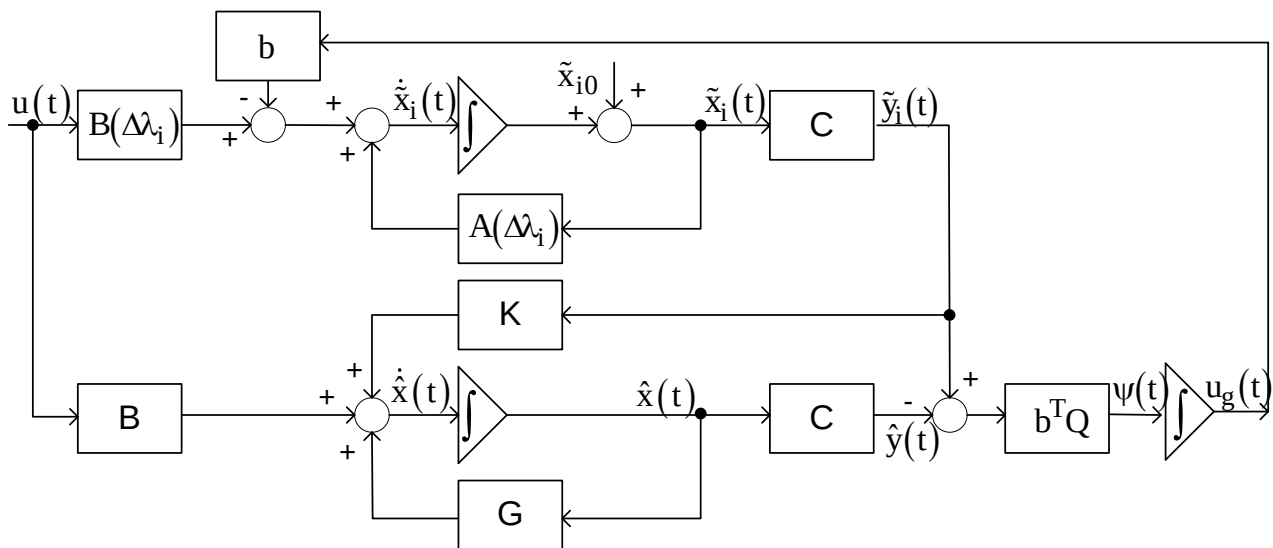


Рисунок 4.6 – Развернутая структурная схема контура сигнальной подстройки

Если при конструировании ОРУ возникает необходимость и возможность во введении нескольких дополнительных управляющих воздействий $u_g(t)$, тогда синтез алгоритмов сигнальной подстройки можно производить согласно изложенной схемы для каждого воздействия в отдельности, а также для всех воздействий, используя векторно-матричное представление второго слагаемого в уравнении (4.29).

Рассмотрим метод синтеза алгоритмов сигнальной подстройки для случая дискретного описания процесса восстановления работоспособности. Для парирования влияния прямого признака дестабилизации $\Delta\lambda_i$ на отклонение косвенного признака $\Delta y_i(k)$ воспользуемся следующим уравнением:

$$\Delta y_i(k+1) = G\Delta y_i(k) + bu_g(k), \Delta y(k) \in \Omega. \quad (4.36)$$

Функцию А. М. Ляпунова выберем в такой форме:

$$V[\Delta y_i(k)] = \Delta y_i^T(k) Q \Delta y_i(k), \quad (4.37)$$

где $Q = Q^T > 0$. Такая функция является определено положительной в области Ω и, следовательно, удовлетворяет требованиям функций А. М. Ляпунова.

Первую разность функции А. М. Ляпунова

$$\Delta V[k, k+1] = V[\Delta y_i(k+1)] - V[\Delta y_i(k)] \quad (4.38)$$

определим с использованием уравнения (4.36), в результате получим:

$$\begin{aligned} \Delta V[k, k+1] &= \Delta y_i^T(k+1) Q \Delta y_i(k+1) - \Delta y_i^T(k) Q \Delta y_i(k) = \\ &= [G\Delta y_i(k) + bu_g(k)]^T Q [G\Delta y_i(k) + bu_g(k)] - \Delta y_i^T(k) Q \Delta y_i(k) = \\ &= \Delta y_i^T(k) G^T Q R \Delta y_i(k) + \Delta y_i^T(k) G^T Q bu_g(k) + b^T Q G \Delta y_i(k) + b^T Q bu_g^2(k) - \\ &- \Delta y_i^T(k) Q \Delta y_i(k) = \Delta y_i^T(k) [G^T Q R - Q] \Delta y_i(k) + 2\Delta y_i(k) G^T Q bu_g(k) + \\ &+ b^T Q bu_g^2(k). \end{aligned} \quad (4.39)$$

Дополнительное управляющее воздействие $u_g(k)$ выберем из условия обеспечения в области Ω для конечной разности $\Delta V[k, k+1]$ выполнения условия определенной отрицательности функции (4.39). Функция (4.39) будет определено отрицательной при выполнении следующих условий:

$$G^T Q G - Q = -P, \text{ где } P = P^T > 0; \quad (4.40)$$

$$2\Delta y_i^T(k) G^T Q b u_g(k) + b^T Q b u_g^2(k) = 0. \quad (4.41)$$

Для выполнения первого условия зададим диагональную квадратную положительную матрицу P и вычислим, исходя из равенства (4.40), матрицу Q , удовлетворяющую требованию $Q = Q^T > 0$. Выполнение второго условия (4.41) связано с выбором $u_g(k)$, обеспечивающим нулевое значение суммы двух слагаемых в области Ω . Разрешив равенство (4.41) относительно скалярной функции $u_g(k)$, получим следующие два решения:

$$u_g(k) = 0; \quad u_g(k) = -2(b^T Q b)^{-1} \Delta y_i^T(k) G^T Q b. \quad (4.42)$$

Первое решение – тривиальное и физически неприемлемо. Второе решение представляет собой алгоритм формирования управляющего воздействия, обеспечивающего асимптотическую устойчивость относительно значения $\Delta y_i(k) = 0$ в области Ω . По сути, этот алгоритм обеспечивает асимптотическое сигнальное восстановление работоспособности ОРУ при дестабилизирующем воздействии d_i . Убедиться в таких свойствах синтезированного алгоритма можно подстановкой выражения для $u_g(k)$ в уравнение (4.36). После соответствующих преобразований получим:

$$\begin{aligned} \Delta y_i(k+1) &= G y_i(k) - 2b(b^T Q b)^{-1} y_i^T(k) G^T Q b = \\ &= \left[G - 2b(b^T Q b)^{-1} b b^T Q G \right] \Delta y_i(k). \end{aligned} \quad (4.43)$$

Рассмотрим случай, когда в векторе b только i -я компонента нулевая. Матрица $G = \sigma I$, причем $|\sigma| < 1$, т. е. корни матрицы G лежат внутри единичного круга, что следует из особенностей наблюдателя

Д. Люенбергера (2.11). Тогда все корни новой матрицы кроме i -го будут равны σ , а i -й корень будет равен σ . Такое значение корня удовлетворяет условию $|\sigma| < 1$, следовательно, все корни новой матрицы лежат внутри единичного круга, что означает асимптотическую устойчивость процесса сигнального восстановления работоспособности ОРУ.

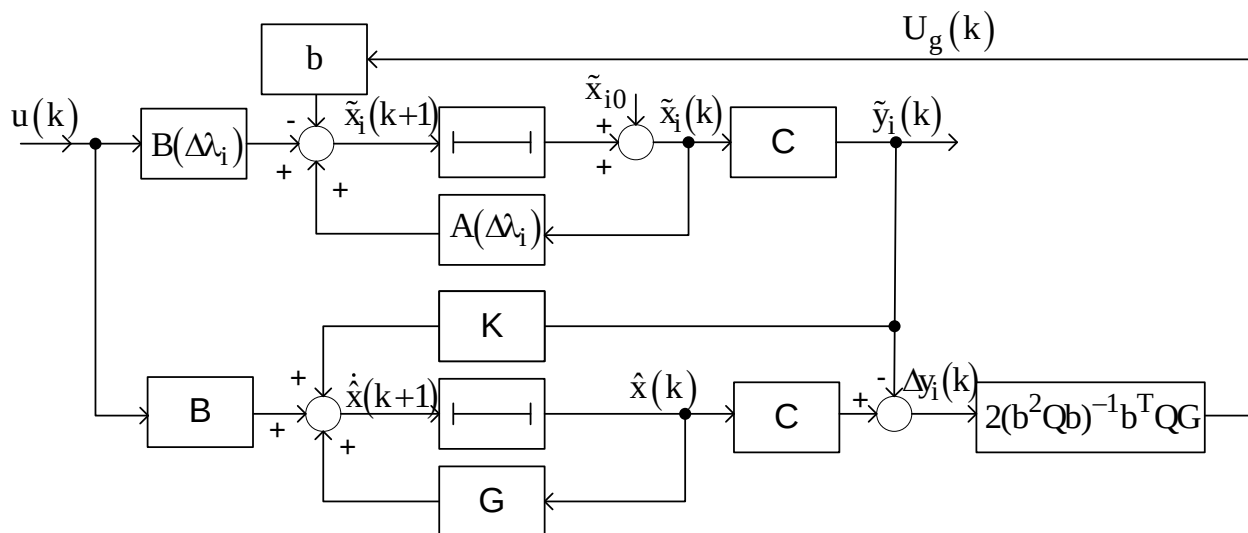


Рисунок 4.7 – Развернутая схема цифрового контура сигнальной подстройки

Оценка качества восстановления работоспособности ОРУ может производиться с помощью такого соотношения:

$$\int_{k=k_0}^{\infty} \Delta y^T(k) P \Delta y(k) \leq \Delta y^T(k_0) Q \Delta y(k_0), \quad \forall \Delta y(k) \in \Omega. \quad (4.44)$$

Для обеспечения определенной отрицательности конечной разности $\Delta V[k, k+1]$, условие (4.41) – не единственно возможное достаточное условие. Возможны и другие условия [4], обеспечивающие $\Delta V[k, k+1] < 0$, а следовательно, и другие алгоритмы сигнальной компенсации отклонений в работоспособности ОРУ.

4.4 Синтез алгоритмов реконфигурации аппаратуры

Избыточная резервная аппаратура широко используется в инженерной практике для обеспечения требуемого ресурса работоспособности систем управления объектами аэрокосмической техники. Известно два вида

резервирования: постоянное и динамическое. При использовании постоянного резервирования, как правило, в мажоритарных структурах зачастую появляется возможность и даже возникает необходимость восстановления работоспособности частично деградировавшей аппаратуры. При этом необходимо произвести ряд коммутаций входных и выходных сигналов аппаратуры, произвести оперативное диагностирование и соответствующую полученному диагнозу подстройку, обеспечивающую восстановление работоспособности аппаратуры, а также соответствующие коммутации, позволяющие ввести восстановленную аппаратуру в мажоритарную структуру.

Динамическое резервирование используется в ситуациях полной деградации аппаратуры и замене ее резервной. Замена неработоспособной аппаратуры резервной производится посредством коммутации энергетических и информационных связей, обеспечивающих выведение из системы одной аппаратуры и введение в функционирование другой, работоспособной. При этом переходные процессы, обусловленные коммутацией, должны быть такими, чтобы не вызывать вредного влияния на ресурс другой аппаратуры и работоспособность всей системы управления в целом.

Резервная аппаратура должна выводить на требуемый режим функционирования за время, допустимое временем восстановления работоспособности всей системы. Реализация реконфигурации аппаратуры связана с использованием дополнительных как аппаратных, так и программных средств. Аппаратные средства – это дополнительная резервная аппаратура, а также электронные или электромеханические коммутаторы в цепях питания (электрической, пневматической, гидравлической и других видов энергии) и цепях сигнальных, по которым передается управленческая информация.

Программные средства представляют собой машинные программы, формирующие управление процессом коммутации и подготовку резервной аппаратуры к работе, т.е. это программы управления реконфигурацией аппаратуры. В общем случае управление реконфигурацией аппаратуры заключается в выдаче команд по соответствующей циклограмме на коммутаторы, на процесс формирования машинных входных и выходных данных резервной аппаратуры и процесс подготовки этой аппаратуры к использованию, на контроль поведения ОРУ в процессе коммутации и на другие функциональные средства, используемые для реконфигурации аппаратуры.

Рассмотрим особенности реконфигурации аппаратуры применительно к ОРУ. В ряде практических ОРУ для блока датчиков состояния объекта

управления в качестве резервных могут использоваться такие же датчики, как и основные, или другие по принципу действия и устройству. В этом случае управление реконфигурацией датчиков будет заключаться в следующем. После получения сигнала о появлении в датчике неработоспособного состояния выдается команда отключения – $d_1(k)$ на коммутатор в цепи питания, и на коммутатор в цепи выходного сигнала. Этим обеспечивается изоляция, выведение отказавшего датчика из структуры ОРУ, иными словами, из процесса управления объектом. В зависимости от инерционных свойств резервного датчика, зависящих от его устройства и принципа действия, формируется по времени команда на подключение питания. Например, время подготовки к функционированию акселерометров меньше, чем время раскрутки гиromоторов при подготовке гироскопических датчиков. Поэтому, команда на подключение питания резервного датчика – $d_2(k + m)$ может подаваться как одновременно с командой на отключение отказавшего датчика, так и позже, в зависимости от инерционных свойств.

С момента возникновения в датчике неработоспособного состояния поведение ОРУ, а следовательно, и всей системы управления начинает существенно отличаться от желаемого. Например, устойчивая система управления при полном отказе датчика может стать неустойчивой. Если не ограничить такое поведение системы управления, то она может войти в такое неработоспособное состояние, из которого ее не выведет подключение резервного датчика или восстановление работоспособности будет связано с неоправданно большими расходами энергии (рабочего тела, горючего) и времени. Поэтому целесообразно предпринять на систему управления действия, удерживающие ее в области допустимых состояний. С этой целью требуется скорректировать соответствующим образом управляющее воздействие на систему, например, сформировать дополнительный сигнал вида

$$u_g(k) = k\Delta y(k), \quad \forall k \in T_1 \subset T,$$

где k – положительный коэффициент;

$\Delta y(k)$ – разностный сигнал $\Delta y(k) = \tilde{y}(k) - \hat{y}(k)$;

T_1 – подмножество моментов времени удержания системы управления в области допустимых состояний.

Следовательно, одновременно с командой отключения или после нее подается команда $d_3(k + n)$ на включение в работу алгоритма корректировки

управляющего воздействия. После того, как отработаны все команды $d_1(k)$, $d_2(k + m)$, $d_3(k + n)$ и датчик готов к функционированию, а система управления находится в приемлемом для дальнейшего восстановления работоспособности состоянии, производится выдача команды $d_4(k + l)$ на коммутатор выходного сигнала резервного датчика, чем обеспечивается введение его в процесс управления объектом. В тех случаях, когда за время диагностирования состояние системы управления существенно не изменяется, а резервный датчик практически безынерционный, управление реконфигурацией может быть упрощено до формирования команд $d_1(k)$ – на отключение основного и $d_2(k + m)$ – на включение резервного датчика.

Рассмотрим особенности реконфигурации аппаратуры в блоке приводов ОРУ. Блок приводов представляет собой силовую часть ОРУ и обычно включает усилительно-преобразовательные и исполнительные устройства. В качестве резервных для усилительно-преобразовательных устройств могут использоваться такие же взаимозаменяемые усилители – преобразователи или основанные на другом принципе действия.

Управление реконфигурацией усилительно-преобразовательной аппаратуры в общем случае заключается в следующем. При появлении сигнала диагноза выдается команда $d_1(k)$ на отключение с помощью коммутатора входного и выходного сигналов в отказавшей аппаратуре. Затем после окончания переходных процессов выдается команда $d_2(k + m)$ на коммутатор отключения питающих напряжений и подключения этих напряжений к аппаратуре резервного усилителя. После подготовки аппаратуры резервного усилителя к работе выдается команда $d_3(k + n)$ на подключение через коммутатор его выходных сигналов к соответствующим исполнительным устройствам. Затем посылается команда $d_4(k + l)$ на коммутатор во входной цепи, который производит окончательное включение резервной аппаратуры в процесс управления. Для исключения нежелательных в системе управления переходных процессов, возникающих при замене усилительно-преобразовательных устройств, могут быть предусмотрены режимы программного уменьшения управляющих воздействий до приемлемой величины на период реконфигурации, а затем программного увеличения до требуемых значений.

Для парирования отказов исполнительных устройств могут использоваться соответствующие резервные устройства. Так, например, при отказах газоструйных реактивных двигателей в системе ориентации космического аппарата подключаются идентичные по конструкции и

принципу действия двигателя или двигателя другой конструкции и принципа действия, предположим, плазменные, но позволяющие получить требуемый эффект. В ряде случаев исполнительные устройства конструируются таким образом, что в одном блоке расположены основной и резервный двигатели. Причем резервный двигатель может находиться как в холодном резерве, так и в рабочем режиме, обеспечивающем частичную выработку управляющего воздействия на объект управления.

При использовании холодного резерва управления реконфигурацией состоит в следующем. После получения диагноза об отказе основного исполнительного устройства выдается команда $d_1(k)$ на отключение с помощью коммутатора сигналов управления и подводимой энергии (электрической, пневматической, гидравлической и др.), а также в ряде конструкций на муфты, с помощью которых производится отключение нагрузки. Команда $d_2(k + m)$ на подключение к резерву требуемой энергии и через муфту нагрузки. Затем после окончания переходных процессов выдается команда $d_3(k + n)$ на подключение сигналов управления.

За время отсутствия управляющих воздействий ОРУ может претерпеть такие эволюции, что подключение резервного исполнительного устройства может привести к усугублению текущей нештатной ситуации или возникновению новой. В таких случаях целесообразно использовать соответствующее парируемой нештатной ситуации программное изменение сигналов управления, обеспечивающих допустимые переходные процессы для ОРУ.

Если в качестве резервного используют работающее не на полную мощность исполнительное устройство, то при управлении реконфигурацией требуется выполнить следующие основные операции. При появлении сигнала о выборе в качестве средства восстановления работоспособности (рис. 4.1) реконфигурации в структуре исполнительных органов выдается команда $d_1(k)$ на коммутаторы для отключения сигналов управления и используемой энергии отказавшего исполнительного устройства ОРУ. Далее при необходимости выдается команда $d_2(k + m)$ на отключение исполнительного устройства от нагрузки. После выполнения этих операций, обеспечивающих изоляцию отказавшего устройства, посылается команда $d_3(k + n)$ на использование соответствующей машинной программы формирования сигнала управления на резервное исполнительное устройство, обеспечивающее восстановление работоспособности блока приводов и, следовательно, всего ОРУ в целом.

В тех случаях, когда в качестве резервных используют устройства, основанные на другом, чем основные, принципе действия, а также обладающие специфической схемой управления, реконфигурация может быть осуществлена аналогичным описанному образом.

Формирование сигналов управления реконфигурацией аппаратуры можно осуществлять с помощью рассмотренных методов синтеза, использующих функции А. М. Ляпунова. Для этого опишем аналитические функции алгоритма коммутации. В результате диагностики и выбора средства реконфигурации аппаратуры формируется сигнал $\mu=1$, подаваемый на коммутатор. Коммутатор должен осуществлять при $\mu=1$ отключение отказавшей аппаратуры и подключение исправной резервной. Такую функцию, управляющую работой коммутатора для случая однократного резерва, опишем в терминах булевой алгебры следующей переключающей функцией:

$$\Phi(\mu, \varphi) = \begin{cases} \gamma_1 = \varphi \Lambda \bar{\mu}; \\ \gamma_2 = \varphi \Lambda \mu, \end{cases} \quad (4.45)$$

где γ_1 – выход переключающей функции на отключение отказавшей аппаратуры;

γ_2 – выход переключающей функции на подключение резервной аппаратуры;

φ – коммуникационное обеспечение аппаратуры.

Построим теперь функционально-логическую структуру алгоритма управления резервом аппаратуры. Для дестабилизирующего движения ОРУ, вызванного отказом аппаратуры, при наличии однократного резерва можно сформировать такое уравнение

$$\Delta y_i(k+1) = G \Delta y_i(k) + b \begin{Bmatrix} f_1(\gamma_{11}, \gamma_{21}) \\ f_2(\gamma_{12}, \gamma_{22}) \end{Bmatrix}; \quad \Delta y(k) \in \Omega, \quad (4.46)$$

$$\text{где } \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \Phi_1(\mu, \varphi); \quad \begin{bmatrix} \gamma_{21} \\ \gamma_{22} \end{bmatrix} = \Phi_2(\mu, u(t)).$$

Графически процесс коммутации можно представить с помощью структурной схемы (рис. 4.8).

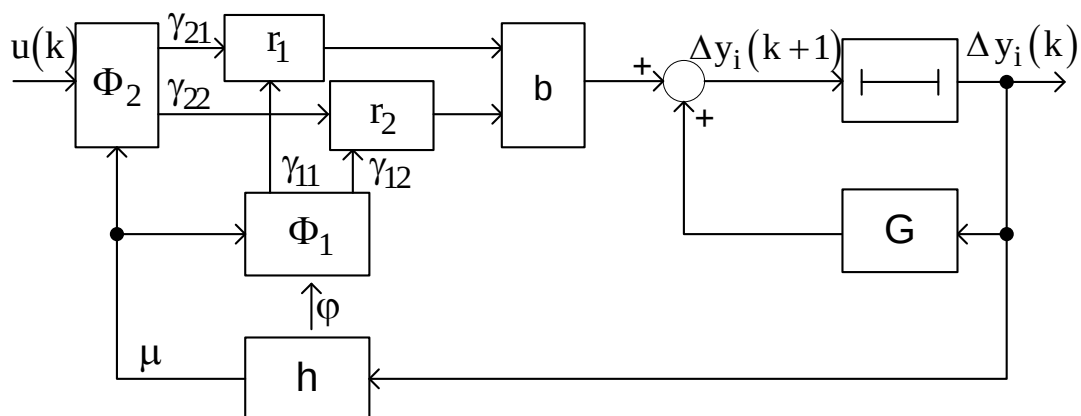


Рисунок 4.8 – Структурная схема алгоритма управления аппаратурой

Логика работы схемы заключается в следующем. Предположим, что в процессе функционирования ОРУ произошло событие d_i , состоящее в отказе исполнительного устройства r_1 . В этом случае в результате диагностики и выбора средства восстановления работоспособности, этот процесс на схеме представлен элементом h , выполняющим такую функцию, описываемую с помощью функции Хэвисайда:

$$\mu = h[|\Delta y_i(k)| - a]. \quad (4.47)$$

На выходе этого элемента будет сигнал $\mu = 1$, который обуславливает следующие значения выходов функций $\Phi_1(\cdot)$ и $\Phi_2(\cdot)$: $\gamma_{11} = 0$; $\gamma_{12} = 0$; $\gamma_{21} = 0$; $\gamma_{22} = u(k)$. Полученные значения выходов переключающих функций обеспечивают функционирование резервного исполнительного устройства r_2 и отключения в отказавшем устройстве r_1 цепей питания φ и управления $u(k)$. Сигнал управления μ формируется из условия обеспечения асимптотического убывания функции $\Delta y_i(k)$ с помощью синтезирующих функций А. М. Ляпунова.

Для обеспечения допустимых переходных процессов в ОРУ и системе управления в целом при коммутации аппаратуры в ряде случаев может возникнуть необходимость синтеза управляющих воздействий $u(k)$, обеспечивающих асимптотическую устойчивость процесса восстановления работоспособности. Для синтеза таких управляющих воздействий можно использовать инструментальные средства, изложенные в п. 4.3 для синтеза алгоритмов сигнальной подстройки.

4.5 Управление реконфигурацией алгоритмов

Особенность реконфигурации алгоритмов заключается в том, что вместо отказавшей аппаратуры или алгоритма, не обеспечивающего работоспособность ОРУ в нештатной ситуации, подключается резервный алгоритм, парирующий дестабилизирующее воздействие. К реконфигурации алгоритмов предъявляют ряд специфических требований, обусловленных необходимостью при практической реализации оперативного и эффективного восстановления работоспособности ОРУ. Эти требования связаны с проведением согласованных во времени коммутационных операций, обеспечением максимально возможного согласования начальных условий подключаемых резервных алгоритмов с начальными условиями ОРУ, созданием условий для «мягкого» включения алгоритмов в процесс функционирования ОРУ в целях исключения переходных процессов, невыгодных с энергетической, функциональной, надежностной точек зрения, а также такого включения, при котором обеспечивается предельно быстрое восстановление работоспособности с приемлемыми показателями качества.

Выполнение всех требований, предъявляемых к реконфигурации алгоритмов, достигается в результате формирования соответствующего управления реконфигурацией. В ряде случаев задачу управления реконфигурацией алгоритмов можно свести к задаче обеспечения алгоритмического процесса восстановления работоспособности ОРУ с помощью функций А. М. Ляпунова. Процесс реконфигурации алгоритмов рассмотрим более предметно для блока гироскопических датчиков углового положения летательного аппарата, содержащего неколлинеарно расположенные трехстепенные гироскопы и описываемые в первом приближении системой дискретных уравнений в следующей векторно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} u_v(k) \\ u_\psi(k) \\ u_\gamma(k) \\ u_p(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_v & 0 & 0 \\ 0 & K_\psi & 0 \\ 0 & 0 & K_\gamma \\ K'_v & K'_\psi & K'_\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(k) \\ \psi(k) \\ \gamma(k) \end{bmatrix}, \quad (4.48)$$

где $v(k)$, $\psi(k)$ и $\gamma(k)$ – углы соответственно тангажа, рыскания и крена летательного аппарата;

K_v, K_ψ и K_γ – коэффициенты передачи по углам соответствующих гироскопов;

K'_v, K'_ψ и K'_γ – коэффициенты передачи по углам дополнительного резервного гироскопа, ось которого расположена под определенными углами по отношению к осям основных гироскопов;

$u_v(k), u_\psi(k), u_\gamma(k)$ и $u_p(k)$ – выходные напряжения основных датчиков и резервного соответственно в дискретные моменты времени.

Рассмотрим возможный способ алгоритмического восстановления измерений при отказе гироскопа по углу тангажа. После получения диагностической информации об отказе датчика угла тангажа и выборе алгоритмического средства реконфигурации требуется выполнить для восстановления измерений $u_v(k)$, такие действия:

1) заблокировать дальнейшее формирование массива данных u_v , поступающих с датчика угла тангажа, и его использование в формировании управляющих воздействий на ОРУ;

2) отключить в отказавшем датчике напряжения питающие гиromотор и потенциометр;

3) начать формирование массива данных u_v оценочными значениями $\hat{u}_v(k)$, которые получаются в результате включения в работу следующего алгоритма обработки дискретных значений напряжений с исправных датчиков:

$$\hat{u}_v(k) = \frac{K_v}{K'_v} \left[u_p(k) - \frac{K'_\gamma}{K_\gamma} u_\gamma(k) - \frac{K'_\psi}{K_\psi} u_\psi(k) \right]. \quad (4.49)$$

В этом алгоритме используют данные из массивов $u_p = \{u_p(k), u_p(k+1), \dots\}$, $u_\gamma = \{u_\gamma(k), u_\gamma(k+1), \dots\}$, $u_\psi = \{u_\psi(k), u_\psi(k+1), \dots\}$ и получают оценочные значения $\hat{u}_v(k), \hat{u}_v(k+1), \dots$, которые заносят в массив u_v и в дальнейшем используют для вычисления управляющих воздействий на ОРУ. Рассмотренное управление реконфигурацией можно представить следующей вектор-строкой:

$$d = [d_1(k), d_2(k+m), d_3(k+n)], \quad (4.50)$$

где $d_i(\cdot)$ – элементы этой строки, принимающие значения «0» или «1» по следующему правилу. В исходном состоянии все элементы нулевые. При

получении информации об отказе датчика $d_i(k)=1$, что является командой для блокирования формирования и использования массива u_v с данными $u_v(k)$. Следующий элемент связан с предыдущим соотношением $d_2(k+m)=d_1(k+m)$, т. е. $d_2(k+m)$ принимает значение «1» через m тактов квантования по отношению $d_2(k)$. Единичное значение элемента $d_2(k+m)$ приводит к отключению питания отказавшего датчика. Элемент $d_3(k+n)=d_1(k+n)$, т. е. принимает значение «1» после n тактов квантования с момента начала реконфигурации, и при этом значении включается в работу алгоритм (4.49).

При измерении углового положения летательного аппарата относительно центра масс в ряде случаев используют информационную избыточность, так как наряду с гироскопическими датчиками углов применяют и датчики угловых скоростей. В качестве таких датчиков обычно используют двухстепенные гироскопы. Рассмотрим канал тангажа летательного аппарата, в котором измеряется угол и угловая скорость, что отражается следующим уравнением:

$$\begin{bmatrix} u_v(k) \\ u_{wz}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_v & 0 \\ 0 & K_{wz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(k) \\ w_z(k) \end{bmatrix}, \quad (4.51)$$

где $w_z(k)$ – угловая скорость тангажа;

K_{wz} – коэффициент передачи датчика угловой скорости;

$u_{wz}(k)$ – выходное напряжение датчика, соответствующее угловой скорости тангажа.

При возникновении полного отказа датчика угла тангажа можно восстановить его измерения следующим способом. Угол тангажа и угловая скорость $w_z(t)$ связаны известным соотношением $\dot{v}(t)=w_z(t)$. Из этого

соотношения следует, что $v(t) = \int_{t_0}^t w_z(t) dt$. Следовательно, восстановить

значения датчика угла можно по показателям датчика угловой скорости путем использования соответствующего алгоритма обработки данных $u_{wz}(k)$. Очевидно, что такой алгоритм должен обеспечить численное интегрирование данных $u_{wz}(k)$. Известно несколько методов интегрирования. Применение

простейшего из них – метода прямоугольников позволяет получить алгоритм оценочных значений $\hat{u}_v(k)$ в таком виде:

$$\hat{u}_v(k+1) = \hat{u}_v(k) + \frac{T_0 K_v}{K_{wz}} u_{wz}(k). \quad (4.52)$$

Управление реконфигурацией в этом случае может осуществляться с помощью аналогичной (4.50) вектор-строки.

В ряде простейших одномерных ОРУ может использоваться только один датчик. В таком случае для обеспечения диагностируемости и восстанавливаемости работоспособности ОРУ в его структуру вводят эталонную модель, воспроизводящую текущее оценочное значение измерения. При полном отказе датчика посредством соответствующих коммутаций производится его изоляция и включение в работу массива оценочных значений измерений.

Исполнительные органы представляют собой силовую часть ОРУ и включают в себя усилители мощности и исполнительные устройства, преобразующие электрический сигнал в соответствующее физическое воздействие на объект управления. К примеру, в системах ориентации и стабилизации космических аппаратов используют газовые, ионные и другие реактивные двигатели, вырабатывающие управляющие моменты. Зачастую отказы в исполнительных органах не могут быть парированы алгоритмическими средствами. Однако при некоторых классах отказов усилителей мощности восстановить работоспособность возможно подключением соответствующего алгоритма формирования входного сигнала. Так, при использовании усилителей мощности с широтно-импульсной модуляцией распространенным отказом является срыв модуляции. В результате такого отказа на выходе усилителя мощности появляется в зависимости от полярности входного положительного или отрицательного сигнала постоянного уровня. В этом случае можно использовать алгоритм формирования полярности, восстанавливающий работоспособность исполнительного органа.

Объект управления представляет собой такую часть ОРУ, дестабилизирующие воздействия в которой в основном могут парироваться использованием алгоритмических средств формирования управляющих воздействий, обеспечивающих дальнейшее выполнение объектом своих функций. Для парирования дестабилизирующих воздействий, нарушающих работоспособность объекта управления, формируется совокупность

алгоритмов управления – $E = \{E_i(\Delta\lambda_i)\}_1^M$, представляющих алгоритмические ресурсы для восстановления работоспособности. Реконфигурация алгоритмов управления для каждого дестабилизирующего воздействия производится с помощью вектор-строки

$$d_i = [d_1(k), d_2(k+m), d_3(k+n), d_4(k+l)],$$

где $d_i(k)$ принимает значение «1» при диагностировании $\Delta\lambda_i$ признака дестабилизации. Такое значение $d_1(k)$ блокирует формирование массивов входных и выходных данных алгоритмов управления ОРУ и отключения прежних алгоритмов управления.

При $d_2(k+m)=1$ включается в работу соответствующий алгоритм $E_i(\Delta\lambda_i) \in E$, согласуются начальные условия, производится выбор требуемых каналов передачи управляющих воздействий для использования при данной ситуации исполнительных органов. При $d_3(k+n)=1$ начинает формироваться массив входных данных – результатов измерения состояния объекта. При $d_4(k+l)=1$ с помощью алгоритма $E_i(\Delta\lambda_i)$ рассчитываются значения управляющего сигнала и заполняется выходной массив. Если используемые алгоритмы $E_i(\Delta\lambda_i) \in E$ не дают положительного эффекта в восстановлении работоспособности ОРУ, то принимаются меры по прекращению дальнейшей эксплуатации.

Описанные способы дают представление об основных принципах и средствах, используемых при построении процедур реконфигурации алгоритмов. Для каждого конкретного дестабилизирующего воздействия с помощью представленных подходов, исходя из имеющихся избыточных ресурсов и особенностей функционирования восстанавливаемого фрагмента ОРУ, разрабатывается процедура управления реконфигурацией алгоритмов. Эта процедура должна быть исследована методом цифрового моделирования с целью рационального формирования моментов коммутации и оценивания качества неизбежно возникающих при коммутациях переходных процессов.

Представленные в главе модели и методы позволяют формировать компьютерные алгоритмы восстановления работоспособности ОРУ с использованием типовых избыточных средств.

ГЛАВА

V

**РАЦИОНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ БЛОКА
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
ЛЕТАЮЩИХ МОДЕЛЕЙ**

*Несмотря на очевидную несообразность
мнения о «строптивости»
неодушевленных предметов, мы
вынуждены констатировать, что
разнообразные устройства, процессы
и явления имеют тенденцию
отклоняться от намеченного для них
образа действия.*

*Р. Беллман (1920 – 1984) – американский
математик, «отец динамического
программирования».*

Летающие модели, по сути, представляют собой научно-исследовательский инструмент для получения достоверной информации о поведении будущего самолета на всех проектируемых режимах полета. В экспериментах летающие модели выполняют полет в автоматическом режиме по заданной программе. Для обеспечения такого полета летающие модели оснащаются бортовой аппаратурой и оборудованием, реализующей автоматическое управление аэродинамическими поверхностями в соответствии с программой полета. Информация об угловом положении летающей модели относительно центра масс поступает с блока датчиков, размещенных по осям связанной декартовой системы координат. На всех этапах разработки, изготовления и экспериментальных исследований существует потребность в проверке работоспособности блока датчиков угловых положений, выявлении причин неработоспособности и восстановлении работоспособности. Для автоматизации решения этих задач требуется спроектировать блок датчиков, как объект рационального управления, обладающий разнотипными избыточностями, обеспечивающими как диагностируемость, так и восстанавливаемость его работоспособности относительно сформированного множества дестабилизирующих воздействий. Затем в соответствии с сигнально-параметрическим подходом разработать диагностическое обеспечение блока датчиков и отработать его на макетных образцах для получения полного диагноза. Это дает основание для следующего шага – разработки аппаратно-программного обеспечения

процесса восстановления работоспособности. Совместная отработка процедур диагностирования и восстановления позволяет добиться рационального управления работоспособностью такого блока угловых положений летающих моделей.

5.1 Назначение, устройство и функции летающих моделей

Глубоко понять назначение и перспективность летающих моделей можно только исходя из истории их создания. История создания летающих моделей в Харьковском авиационном институте тесно связана с историей создания научной школы физического моделирования, а также первого и единственного в СССР и в Европе научно-исследовательского института проблем физического моделирования режимов полета самолетов (НИИ ПФМ). Впервые идея физического моделирования режимов полета проектируемого самолета была высказана в 1953 году известным советским авиаконструктором Борисом Ивановичем Черановским. Б.И. Черановский – основоположник самолетов серии БИЧ. Он спроектировал около 30 самолетов и планеров, а широкую известность принесли его “Параболы” – аппараты с параболической формой крыла в плане [1]. Вот как передает эту идею его племянник Олег Романович Черановский: “Вот если бы удалось создать такого летающего ученого-робота (летающую модель), который копировал бы проектируемый летательный аппарат и в опережающем темпе снабжал конструкторов достоверной информацией о поведении будущего самолета на всех режимах полета...” [2]. В 1956 году преподаватели кафедры конструкции самолетов П.В. Дыбский, Л.А. Арсон, С.И. Кузьмин и Ф.Г. Ясинский приступают к построению беспилотной летающей лаборатории для исследования аэродинамических характеристик новых профилей крыла. В 1957 – 1959 годах были произведены ряд удачных полетов летающей лаборатории ЛЛ-11. Успешные работы в освоении основ и технологии физического моделирования закономерно привели к сотрудничеству с ведущими конструкторами бюро Советского Союза. Так главный конструктор Сухой Павел Осипович определил начальный этап работ: “Хватит заниматься дальнейшими проверками способностей харьковчан. У нас на выходе самолет Су-27, необходимо как можно быстрее получить опережающие материалы по характеристикам полета нашего будущего самолета с помощью летающих моделей. Нужно, чтобы ЦАГИ и ЛИИ серьезно подключить к этой работе» [2].

Накопленный опыт, благодаря умелой и продуктивной, под руководством О.Р. Черановского организации работ с ОКБ им. П.О. Сухого, ОКБ им. А.И. Микояна, ОКБ им. В.М. Мясищева, ЦАГИ и ЛИИ, позволил выйти на новый научный и практический уровень понимания возможностей летающих моделей как эффективного научно-исследовательского инструмента получения характеристик проектируемого самолета.

Назначение летающих моделей состоит в выполнении соответствующих техническому заданию программ полета с целью определения характеристик устойчивости и управляемости на больших углах атаки, при сваливании и в штопоре до начала полетов на этих режимах. В экспериментах с летающими моделями решались такие задачи:

1) исследование характеристик устойчивости и управляемости на больших углах атаки;

2) исследование возможности предотвращения сваливания при различных положениях центра масс и влияния начальных условий (высоты полета, числа M , перегрузки и угловых скоростей);

3) исследование влияния массово-инерционных характеристик, изменения конфигураций модели на характеристики сваливания и штопора;

4) оценка эффективности различных методов вывода самолета из штопора с помощью органов управления, а также применения противоштопорного парашюта;

5) изучение влияния системы автоматического управления, в том числе и системы повышения устойчивости, на характеристики самолета на больших углах атаки и в штопоре;

6) отработка алгоритмов управления систем автоматического управления;

7) оценка влияния отказов системы автоматического управления и повреждений конструкции на характеристики устойчивости и управляемости [3].

Специфика летающих моделей позволяла проводить исследования критических режимов полета в более широком диапазоне условий с большей степенью риска, чем при испытаниях опытного самолета. Полученные экспериментальные материалы позволяли обоснованно разрабатывать рекомендации руководства по летной эксплуатации самолетов, а также инструкции летчику по методике пилотирования в сложных и особых ситуациях, а также при отказах бортового оборудования.

“Испытания летающих моделей позволили разработать новые режимы полета, такие, как сверхманевренность и суперманевренность, а 28 апреля 1989 г. на самолете Су-27 впервые в мире выполнено

динамическое торможение с выходом на углы атаки от 120^0 до 130^0 – маневр, получивший название “кобра Пугачева” по имени летчика-испытателя ОКБ им. П.О. Сухого В.Г. Пугачева. В целом применение летающих моделей позволило внести изменения в конструкцию машины и значительно повысило эффективность аэродинамической схемы самолета Су-27. Данные масштабные научные исследования выполнялись в тесном единстве работ ЦАГИ, ЛИИ, ОКБ им. П.О. Сухого и ХАИ” [3].

В НИИ ПФМ под руководством О.Р. Черановского было изготовлено около 30 свободнолетающих моделей и выполнено свыше 300 экспериментальных полетов, позволивших получить качественные данные о поведении проектируемых самолетов в критических режимах полета.

Летающая модель представляет собой беспилотный летательный аппарат специального назначения, выполняющий автономный или дистанционно-пилотируемый полет по заданной программе и обеспечивающий возможность получения и регистрации полетных данных. Такая летающая модель представляет собой научно-исследовательский инструмент для изучения наиболее опасных режимов полета и явлений, которые связаны с риском потери летательного аппарата. На летающих моделях апробируются принципиальные решения, принимаемые на всех этапах жизненного цикла самолета, от выработки концепции проектирования самолета к формированию его облика и до реализации модификаций серийно выпускаемого самолета.

Создание летающей крупномасштабной модели включает в себя широкий круг связанных между собой работ: теоретических исследований по обеспечению адекватности отображения в модели изучаемых явлений и режимов полета, рациональному выбору ее общих параметров и масштабов, оптимальному проектированию конструкций агрегатов и разработке соответствующих технологических процессов, формированию схемных решений бортовых систем, определению комплектности бортового оборудования и его компоновке (а при необходимости – проектированию новых малогабаритных элементов), разработке принципов запуска летающей модели и конструкции реализующих их стартовых систем, возвращения на землю после окончания эксперимента и спасения модели из наиболее опасных режимов, выход на которые натурного самолета ведет к катастрофе. Особо следует подчеркнуть комплексность процесса создания летающих моделей, непосредственную взаимосвязь перечисленных научно-исследовательских и проектно-конструкторских, технологических и производственных работ.

На рис. 5.1 представлена схема свободнолетающей модели самолета Т-10-СЛМТ-10 [4].

В этой летающей модели были реализованы основные принципы моделирования критических режимов полета самолетов ОКБ им. П.О. Сухого, используемых в ряде последующих разработок НИИ ПФМ и их испытаниях.

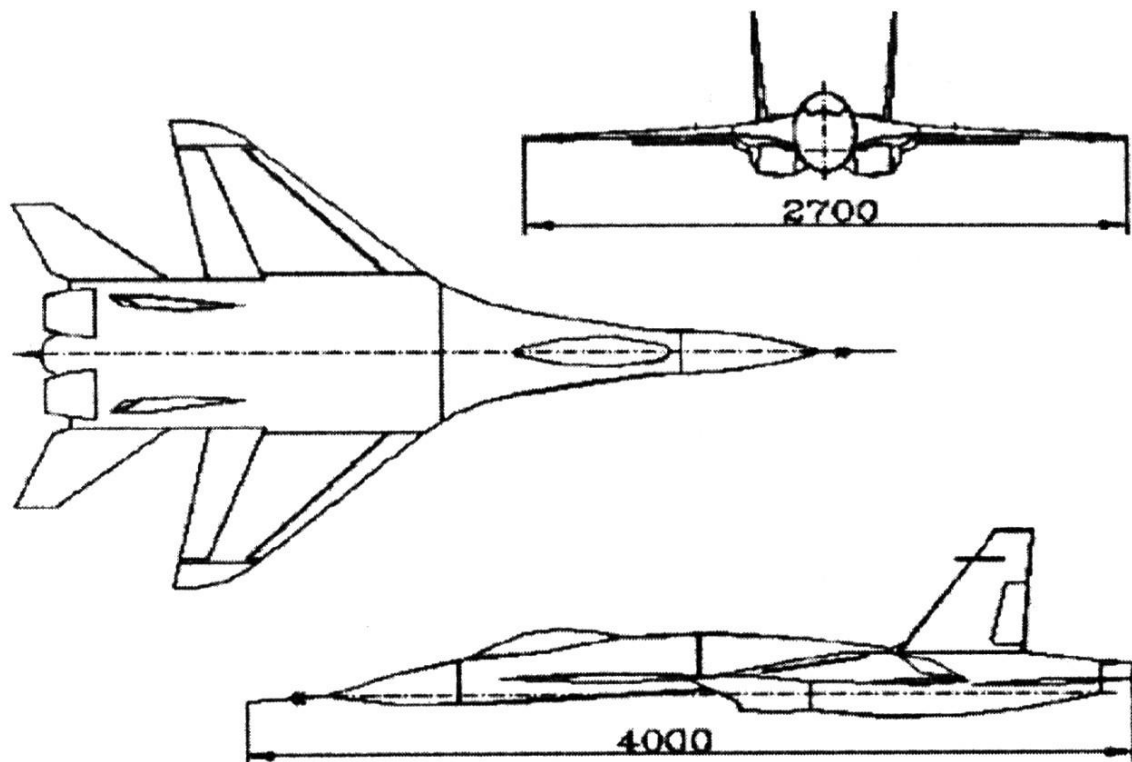


Рисунок 5.1 – Схема летающей модели самолета Т-10

К первой группе относятся системы, обеспечивающие полет летающей модели по программе эксперимента:

- 1) система запуска летающей модели в полет;
- 2) система автоматического управления и радиоуправления;
- 3) система спасения летающей модели;
- 4) система энергосбережения.

Во вторую группу входят системы, обеспечивающие получение, регистрацию и передачу на наземную станцию экспериментальных данных. К таким системам относятся:

- 1) системы измерения высотно-скоростных характеристик;
- 2) система измерения углов атаки и скольжения, а также местных аэродинамических углов;
- 3) система измерения углов и угловых скоростей;
- 4) система измерения линейных ускорений (перегрузок);
- 5) система измерения распределения давлений на обтекаемой поверхности модели;

- 6) система измерения шарнирных моментов;
- 7) система измерения параметров пограничного слоя;
- 8) система регистрации спектра обтекания;
- 9) система бортовых регистраторов измерений;
- 10) радиометрическая система с антенно-фидерными устройствами;
- 11) система внешнетраекторных измерений.

В соответствии с тематикой монографии рассмотрим более подробно функции системы автоматического управления летающими моделями. Устойчивость и управляемость высокоманевренного самолета при полете на критических режимах зависит не только от его аэродинамической схемы, а и от активно работающей системы автоматического управления. При моделировании критических режимов полета такого самолета несоблюдение подобия в алгоритмах управления может привести к ошибочным результатам эксперимента. Для получения достоверных результатов в летных экспериментах необходимо обеспечить следующие условия:

1) летающая модель должна выполнять все эволюции в своем масштабе времени и соответственно с большими скоростями, что обуславливает более высокие требования к быстродействию бортовой системы автоматического управления;

2) система автоматического управления должна обеспечивать возможность имитации определенных действий летчика;

3) в зависимости от поставленных задач система должна обеспечить выполнение специальных маневров в автоматическом режиме в пределах ограничений по прочности конструкции и возможностей системы спасения.

Кроме основных задач, связанных с моделированием критических режимов полета самолета, система автоматического управления должна обеспечить управление полетом при отходе от самолета-носителя, на активном участке полета, при пуске с наземной установки с помощью ракетного двигателя, на предпосадочных режимах.

В состав бортового оборудования входят датчики и приводы: СГ-3-2Р (γ , ν , ψ) – свободные гироскопы; МП-10, МП-05 – датчики давления; ДУСУ1 – 180 Б, ДУСМ 60 – датчики угловой скорости; ППН-24 – пневматические рулевые машинки.

На рис. 5.2 представлено размещение основного бортового оборудования системы автоматического управления СЛМТ-10.

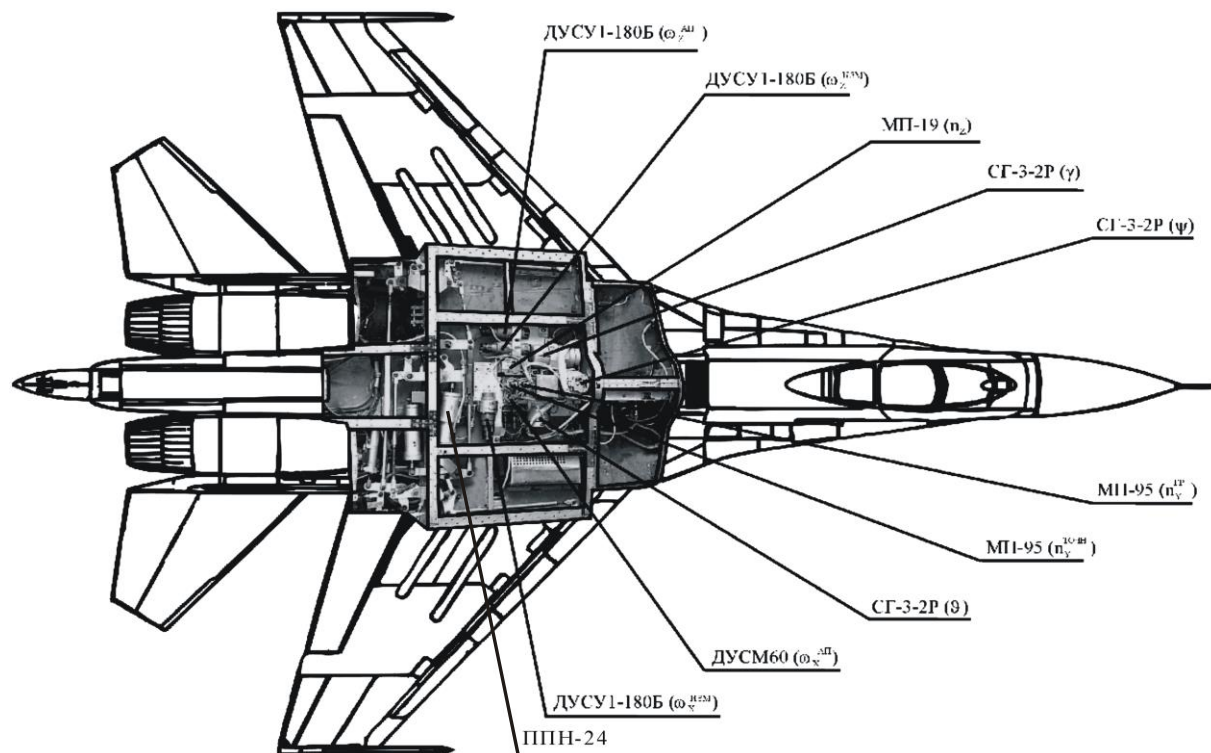


Рисунок 5.2 – Схема размещения приборного и агрегатного оборудования СЛМТ-10

Итак, система автоматического управления летающей модели состоит из разнородных функциональных элементов, действие которых основано на разных физических принципах и различных видах энергии. Каждый функциональный элемент представляет собой конструктивно законченное устройство, состоящее из десятков и сотен компонент, участвующих в его функционировании. Неисправность каждого компонента может быть источником отказа, а следовательно, причиной ухудшения или потери работоспособности функционального элемента и всей системы автоматического управления как при транспортировке, предполетной подготовке, так и в жестких условиях выполнения критических режимов полета [6]. Рациональное управление работоспособностью функциональных элементов системы автоматического управления летающей модели позволяет повысить эффективность их использования на всех этапах жизненного цикла этого уникального научно-исследовательского инструмента критических режимов полета.

5.2 Блок измерителей. Назначение, устройство, принцип действия

Первые исследования принципиальной возможности диагностировать блок измерителей по выходным сигналам на стадии предполетной подготовки летающей модели были осуществлены вначале в лаборатории разработки и изготовления систем автоматического управления летающих моделей, а затем в отделе технической диагностики НИИ ПФМ под руководством автора. В разработке исследовательского стенда приняли участие И.А. Булгаков, А.П. Козий и С.Н. Пасичник. Разработка и отладка алгоритмического и программного обеспечения производилась на стенде А.П. Козиным и Н.П. Отрадной. Проведенные на стенде экспериментальные исследования позволили выявлять до 11 видов отказов в каждом датчике. Результаты исследований описаны в пособиях [6, 7], в статьях [8 – 11], и в диссертации [12]. Эти исследования создали базовую платформу для последующего развития и совершенствования рационального управления работоспособностью блоков измерителей.

Рассмотрим типовую структуру блока измерителей. Свободные гироскопы СГ-3-2Р и датчики угловых скоростей ДУСУ1-180Б, ДУСМ 60 летающей модели СЛМТ-10 объединены в один конструктивно-законченный блок измерителей, размещенный в центре масс. Назначение блока измерителей состоит в допустимых паспортными данными датчиков преобразования угловых движений летающей модели относительно связанной декартовой системы координат в соответствующие изменения напряжения постоянного тока. Допустимые диапазоны измерения углов тангажа, крена, рыскания и соответствующих угловых скоростей, а также точности преобразования и времена переходных процессов датчиков – это характеристики, которые используются в процессе проектирования системы угловой ориентации и стабилизации летающей модели и влияют на условия работоспособности.

Конструкция блока измерителей и его установка на летающей модели позволяет получать информацию об угловых эволюциях по трем каналам. В каждом канале блока размещены один датчик угла – свободный гироскоп СГ-3-2Р и два датчика угловых скоростей. ДУСУ1-180Б, ДУСМ 60. Всего в блоке используются 3 датчика угла и шесть датчиков угловых скоростей (рис. 5.3).

Ротор гироскопа 1 создает кинетический момент $H = I_p \omega_z$, где I_p – момент инерции ротора относительно оси OZ ; ω_z – угловая скорость относительно оси OZ . Ротор укреплен во внутренней рамке 2, свободно вращающейся вокруг оси OY и конструктивно закрепленной на внешней рамке 3, свободно вращающейся относительно оси OX , закрепленной в корпусе 4 блока измерителей. Ротор гироскопа обладает свойством сохранять неизменное положение в инерциальном пространстве. С увеличением кинетического момента H уменьшается влияние всякого рода возмущений на положение ротора в пространстве. Если поворот летающей модели и соответственно блока измерителей будет происходить вокруг оси OX , то будет изменяться угол между внешней рамкой и корпусом. Это изменение угла преобразуется с помощью потенциометрического преобразователя 5 в соответствующий электрический сигнал датчика угла – $U_{дв}(t)$.

Принцип действия датчиков угловой скорости основан на свойстве двухстепенного дифференциального гироскопа осуществлять прецессионное движение при повороте оси его подвеса. Одна степень свободы обусловлена наличием оси собственного вращения ротора, вторая – наличием оси вращения рамки, несущей ротор. Рамка имеет упругую связь с корпусом, демпфером, а также потенциометрическим преобразователем угла ее поворота. Упругая связь обеспечивается при помощи механической или “электрической” (датчиков моментов или силы) системы пружин. За счет действия таких пружин создаются уравнивающие силы и моменты. На рис. 5.5 представлена упрощенная кинематическая схема такого датчика.

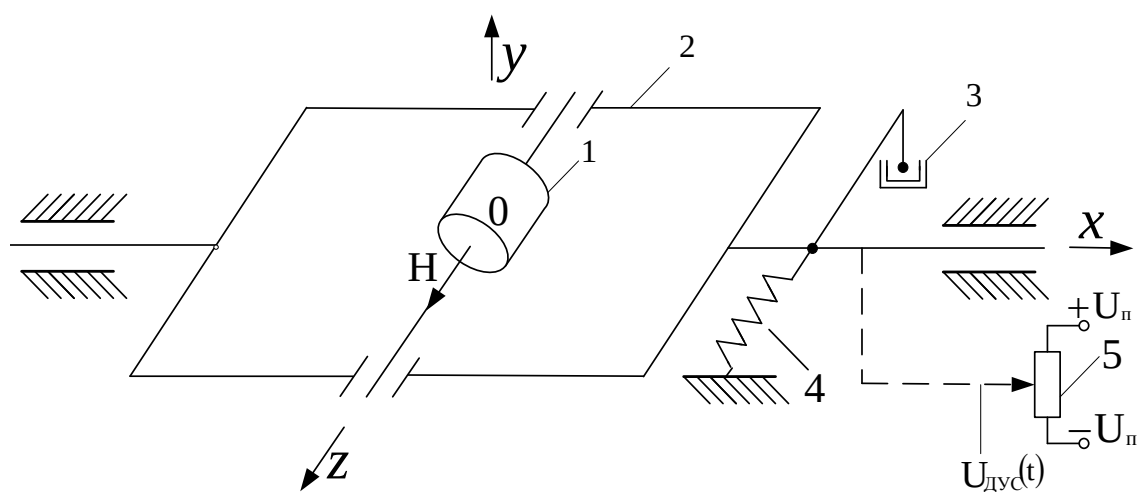


Рисунок 5.5 – Упрощенная кинематическая схема датчика угловых скоростей

Ротор гироскопа 1 создает гироскопический момент H , направленной вдоль оси OZ , связанной с блоком измерителей системы координат. Ось Oy является осью чувствительности, а ось Ox – выходной осью датчика. Ротор укреплен на подвижной рамке 2, свободно вращающейся вокруг оси Oy , закрепленной в корпусе блока измерителей.

С осью подвижной рамки связано демпфирующее устройство 3 и механическая противодействующая пружина 4, а так же потенциометрический преобразователь угла поворота 5. При вращении блока измерителей вокруг оси Oy на выходе потенциометрического преобразователя появляется напряжение $U_{\text{ДУС}}(t)$, соответствующее угловой скорости вращения.

Для отработки моделей, алгоритмов и программ рационального управления работоспособностью блока измерителей на кафедре систем управления летательными аппаратами был разработан стенд для исследования датчиков канала курса в соответствии с функциональной схемой (рис. 5.6).

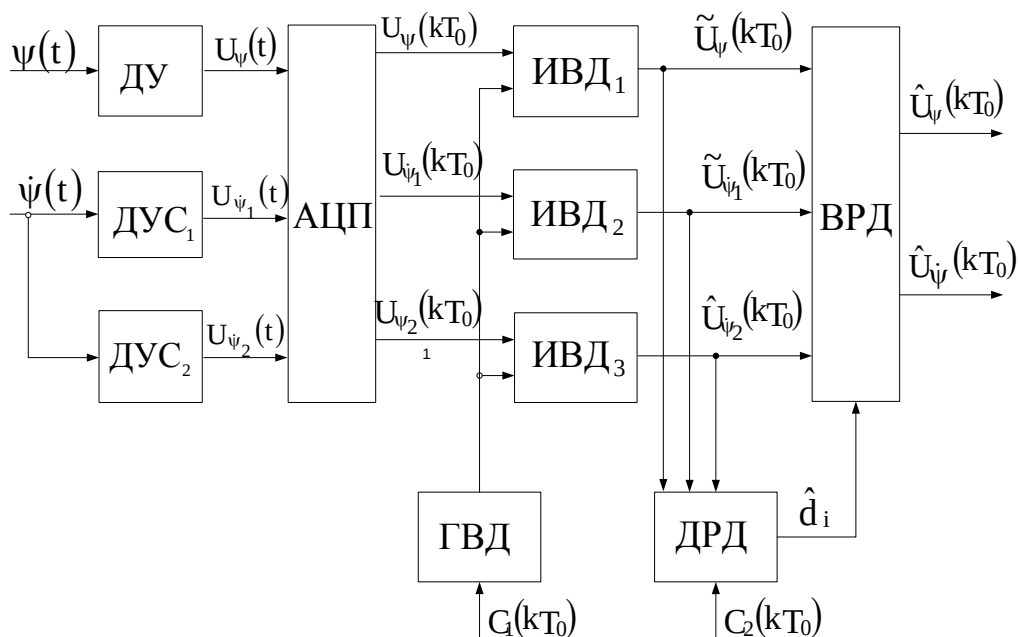


Рисунок 5.6 – Функциональная схема исследовательского фрагмента блока измерителей для канала курса

Напряжения с датчиков угла и угловой скорости, оцифрованные АЦП, поступают на соответствующие блоки $ИВД_i$, $i = \overline{1, 3}$, выполняющие функцию имитации видов дестабилизации по командам с генератора видов дестабилизирующих воздействий (ГВД). $ИВД_i$ совместно с ГВД

осуществляют по определенным сценариям, задаваемым командой $C_1(kT_0)$, деформацию сигналов с датчиков. Деформированные сигналы, соответствующие влиянию текущего дестабилизирующего воздействия на датчик, поступают в блок диагностирования работоспособности датчиков (ДРД), где выявляется по косвенным признакам причина нарушения работоспособности и формируется диагноз $\hat{d}_i$. ДРД включается в работу по команде $C_2(kT_0)$. Результаты диагностирования – диагноз $\hat{d}_i$ поступает на блок, выполняющий функцию восстановления работоспособности датчиков (ВРД), где в соответствии с диагнозом и с помощью имеющихся средств восстанавливается деформированный, искаженный дестабилизирующим воздействием сигнал и получаются оценочные значения напряжений и $\hat{U}_\psi(kT_0)$ и $\hat{U}_{\bar{\psi}}(kT_0)$.

На рис. 5.7 представлен общий вид стенда для исследования датчиков курса в режимах программной имитации видов дестабилизации и парирования их последствий с целью восстановления работоспособности датчиков или другими словами, восстановления их измерений.

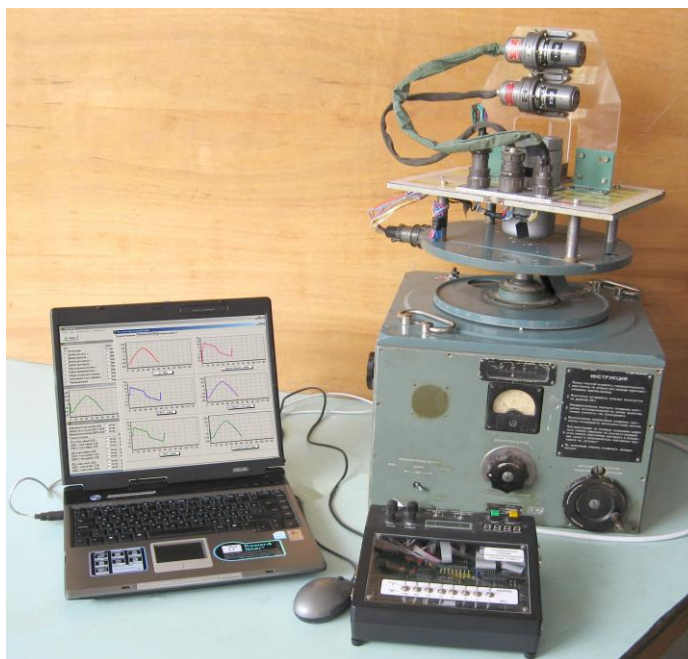


Рисунок 5.7 – Общий вид стенда для исследования датчиков в канале курса

Разработка стенда и цикл экспериментальных исследований были выполнены сотрудниками кафедры доцентом В.Г. Джулгаковым и ассистентом К.И. Руденко. В процессе экспериментальных исследований

имитировались по 9 видов дестабилизаций для каждого датчика, т.е. 36 видов для всех датчиков канала курса. Далее производилось диагностирование работоспособности датчиков по сигналам $\tilde{U}_{\psi}(kT_0)$, $\tilde{U}_{\psi_1}(kT_0)$ и $\hat{U}_{\psi_2}(kT_0)$, а затем по диагнозу $\hat{d}_i$, $\hat{d}_i = \overline{1, 36}$ восстановление их работоспособности с помощью аппаратно-программных средств в реальном масштабе времени.

5.3 Диагностическое обеспечение фрагмента блока измерителей

В соответствии с сигнально-параметрическим диагностированием объектов рационального управления опишем особенности диагностического обеспечения фрагмента блока измерителей. Диагностическое обеспечение включает в себя модели, методы, алгоритмы, процедуры и средства диагностирования. Рассмотрим конфигурацию датчиков, показанную на рис. 5.6. Сигналы датчиков связаны на линейных участках статических характеристик такими соотношениями:

$$\begin{aligned} U_{\psi}(t) &= k_{\psi} \psi(t); \\ U_{\psi_1}(t) &= k_{\psi_1} \dot{\psi}(t); \\ U_{\psi_2}(t) &= k_{\psi_2} \ddot{\psi}(t); t \in T, \end{aligned} \quad (5.1)$$

где k_{ψ} , k_{ψ_1} и k_{ψ_2} – коэффициенты передачи датчиков;

T – период измерения.

Зависимость выходного напряжения от входного сигнала можно представить следующей статической характеристикой, справедливой как для ДУ, так и для ДУСов (рис. 5.8).

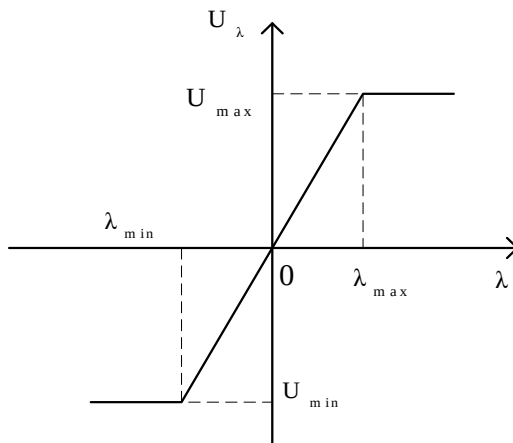


Рисунок 5.8 – Типовая статическая характеристика датчиков

Входной сигнал $\lambda \in \{\psi, \dot{\psi}\}$, а выходной $U_\lambda \in \{U_\psi, U_{\dot{\psi}_1}, U_{\dot{\psi}_2}\}$.

Напряжения насыщения $U_{\max}$ и $U_{\min}$, а также значения входного сигнала $\lambda_{\max}$ и $\lambda_{\min}$ отражают паспортные диапазоны функционирования датчика. Наклон характеристики определяется коэффициентом передачи k_λ .

Опыт эксплуатации датчиков и анализ их функциональных и надежности свойств позволяют сформировать для каждого датчика множество характерных дестабилизирующих изменений, например, таких, как показаны на рис. 5.9.

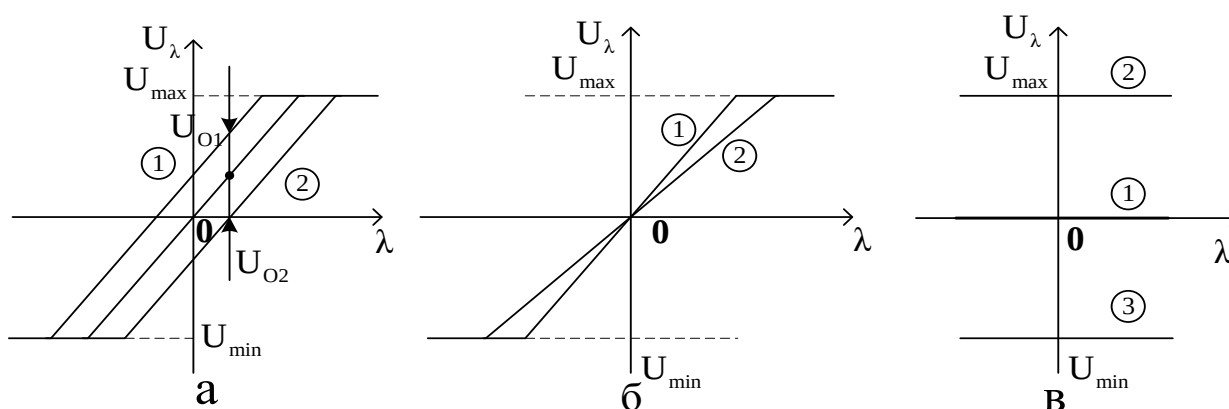


Рисунок 5.9 – Статические характеристики датчиков при различных видах дестабилизации

Опишем представленные виды дестабилизации. Вид дестабилизации d_1 – дрейф нуля положительный устранимый, если $U_0^1 \leq U_0$, например, $U_0 = 1\text{В}$ (рис. 5.9, а, 1); d_2 – дрейф нуля отрицательный устранимый, если $U_0^2 \geq -U_0$ (рис. 5.9, а, 2); d_3 – дрейф нуля положительный неустранимый, если $U_0^1 > U_0$ (рис. 5.9, а, 1); d_4 – дрейф нуля отрицательный неустранимый, если $U_0^2 < -U_0$ (рис. 5.9, а, 2); d_5 – уменьшение коэффициента передачи датчика устранимое, если $\tilde{k}_\lambda > \tilde{k}_y$ (рис. 5.9, б, 2); d_6 – уменьшение коэффициента передачи датчика неустранимое, если $\tilde{k}_\lambda < \tilde{k}_y$; d_7 – обрыв сигнального провода датчика (рис. 5.9, в, 1); d_8 – обрыв отрицательного провода питания (рис. 5.9, в, 2); d_9 – обрыв положительного провода питания (рис. 5.9, в, 3); d_{10} – неизвестный вид дестабилизации.

Каждому физическому виду дестабилизации d_i , $i = \overline{1, 9}$ ставится в соответствие диагностический параметр α_i . Так, виды дестабилизации $d_1, \dots, d_4$ описываются параметром U_0 , виды дестабилизации d_5 и d_6 характеризуются параметром $\tilde{\kappa}_\lambda$, а видам дестабилизации d_6, d_7 и d_8 соответствует постоянство выходного напряжения $U_\lambda = \text{const}$. С учетом введенных параметров видов дестабилизации, уравнения возмущенного движения датчиков примут такой вид:

$$\begin{aligned} U_\psi(t) &= \tilde{\kappa}_\psi \psi(t) + U_0^\psi; \\ U_{\psi 1}(t) &= \tilde{\kappa}_{\psi 1} \dot{\psi}(t) + U_0^{\psi 1}; \\ U_{\psi 2}(t) &= \tilde{\kappa}_{\psi 2} \dot{\psi}(t) + U_0^{\psi 2}, t \in T, \end{aligned} \quad (5.2)$$

где $U_\psi(t)$, $U_{\psi 1}(t)$ и $U_{\psi 2}(t)$ – выходные напряжения аварийных датчиков;

$\tilde{\kappa}_\psi, \tilde{\kappa}_{\psi 1}$ и $\tilde{\kappa}_{\psi 2}$ – текущие коэффициенты передачи датчиков;

$U_0^\psi, U_0^{\psi 1}$ и $U_0^{\psi 2}$ – текущие величины дрейфов для каждого датчика.

В результате изучения свойств аварийных датчиков и опыта их эксплуатации используют при разработке диагностического обеспечения следующие рабочие гипотезы:

- 1) в текущий момент времени отказывает лишь один датчик;
- 2) причиной отказавшего датчика является один вид дестабилизации;
- 3) другие виды дестабилизации в период измерения T не появляются;
- 4) характер изменения входных сигналов $\psi(t)$ и $\dot{\psi}(t)$ обеспечивает выявление любого вида дестабилизации из заданного множества $D_1 = \{d_1, \dots, d_9\}$;
- 5) виды дестабилизации появляются независимо один от другого;
- 6) параметры видов дестабилизации существенно не изменяются на периоде измерения T .

Представим уравнение (5.2) в переобозначенной векторно-матричной форме для дискретного времени, опустив для упрощения записи период квантования T_0 :

$$\begin{bmatrix} U_1(k) \\ U_2(k) \\ U_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\tilde{\kappa}_1 & 0 \\ 0 & \Delta\tilde{\kappa}_2 \\ 0 & \Delta\tilde{\kappa}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi(k) \\ \psi_1(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_0^1 \\ U_0^2 \\ U_0^3 \end{bmatrix}; k \in K, \quad (5.3)$$

или в компактной форме

$$\tilde{U}(k) = \tilde{D}\psi'(k) + F; k \in K, \quad (5.4)$$

где K – множество измерений.

Диагностическая функциональная модель (ДФМ) для фрагмента блока измерителей получается в следующей форме:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1(k) \\ \Delta U_2(k) \\ \Delta U_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\kappa_1 & 0 \\ 0 & \Delta\kappa_2 \\ 0 & \Delta\kappa_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi(k) \\ \psi_1(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_0^1 \\ U_0^2 \\ U_0^3 \end{bmatrix}; k \in K. \quad (5.5)$$

Прямые диагностические признаки видов дестабилизации представлены здесь параметрами $\Delta\kappa_1$, $\Delta\kappa_2$, $\Delta\kappa_3$ и сигналами U_0^1 , U_0^2 , U_0^3 . Косвенные диагностические признаки в этой модели – это отклонения сигналов $\Delta U_1(k)$, $\Delta U_2(k)$ и $\Delta U_3(k)$.

В компактной форме диагностическая модель имеет следующий вид:

$$\Delta U(k) = \Delta D\psi'(k) + F; k \in K. \quad (5.6)$$

Анализ зависимости матриц ΔD и F от прямых признаков видов дестабилизации с помощью критерия структурной диагностируемости свидетельствует о полной структурной диагностируемости всех видов дестабилизации по косвенным признакам – отклонениям сигналов.

Полная сигнальная диагностируемость фрагмента блока измерителей по ДФМ (5.5) обеспечивается при выполнении условия $\psi'(k) \neq 0$, $\forall k \in K$.

Итак, критерии структурной и сигнальной диагностируемости свидетельствуют о принципиальной возможности определения по косвенным признакам $\Delta U(k)$ прямых $\Delta\kappa_1$, $\Delta\kappa_2$, $\Delta\kappa_3$, U_0^1 , U_0^2 и U_0^3 с помощью ДФМ (5.6).

Рассмотрим особенности алгоритмического и программного обеспечения основных задач диагностирования фрагмента блока измерителей для канала курса.

В цифровой векторно-матричной форме уравнения (5.1) для номинального режима описываются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} U_1(k) \\ U_2(k) \\ U_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_1 & 0 \\ 0 & \kappa_2 \\ 0 & \kappa_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi(k) \\ \psi_1(k) \end{bmatrix}; \quad k \in K. \quad (5.7)$$

Применив процедуру приведения измерений датчиков ко входу и формулу численного дифференцирования Эйлера, сформируем следующие алгебраические соотношения для возмущенного состояния датчиков:

$$\Delta\psi_1(k) = \frac{\tilde{U}_1(k+1) - \tilde{U}_1(k)}{\kappa_1 T_0} - \frac{1}{2} \left[\frac{\tilde{U}_2(k)}{\kappa_2} + \frac{\tilde{U}_3(k)}{\kappa_3} \right]; \quad (5.8)$$

$$\delta_0 = \max_{\text{ном}} |\Delta\psi_1(k)|.$$

Из полученных соотношений можно сформировать такой двузначный предикат:

$$Z_0 = S_2 \{ |\Delta\psi_1(k)| > \delta_0 \}; \quad k = \overline{1, N}. \quad (5.9)$$

Предикат вычисляют N раз, и в результате вычисления в каждой точке будет значение 0 или 1. Счетчик N_0 подсчитывает количество единиц, т.е. точек, в которых «дестабилизация обнаружена». После N проведенных сравнений осуществляется окончательное «обнаружение», если $N_0 \geq N \cdot p_0$, где p_0 – коэффициент доверия, позволяющий отбросить «ложные» измерения, «нулевые» точки, игнорировать погрешности, случайные воздействия и другие факторы.

Итак, для обнаружения дестабилизации в фрагменте блока измерений необходимо:

1) сформировать массив разностей $\Delta\psi_1(k)$, $k = \overline{1, N}$, $N = \frac{(t_1 - t_0)}{T_0}$ для номинального режима функционирования датчиков и вычислить δ_0 и p_0 ;

2) занести полученные значения допуска и коэффициента доверия в файл базы данных и в дальнейшем использовать для обнаружения отказа;

3) сформировать разности $\Delta\psi_1(k)$, $k = \overline{1, N}$ из текущих значений напряжений в соответствии с формулой (5.8);

4) вычислить для каждой точки $k = \overline{1, N}$ предикат (5.9), подсчитав количество единиц с помощью счетчика N_0 ;

5) сравнить содержимое счетчика N_0 с произведением общего числа измерений на коэффициент p_0 и сообщить один из возможных диагнозов:

а) обнаружена дестабилизация;

б) датчики функционируют нормально.

Этапы 1 и 2 выполняются один раз, и в дальнейшем процедура обнаружения начинается с этапа 3. Схематично алгоритм обнаружения дестабилизации для блока измерителей показан на рис. 5.10.

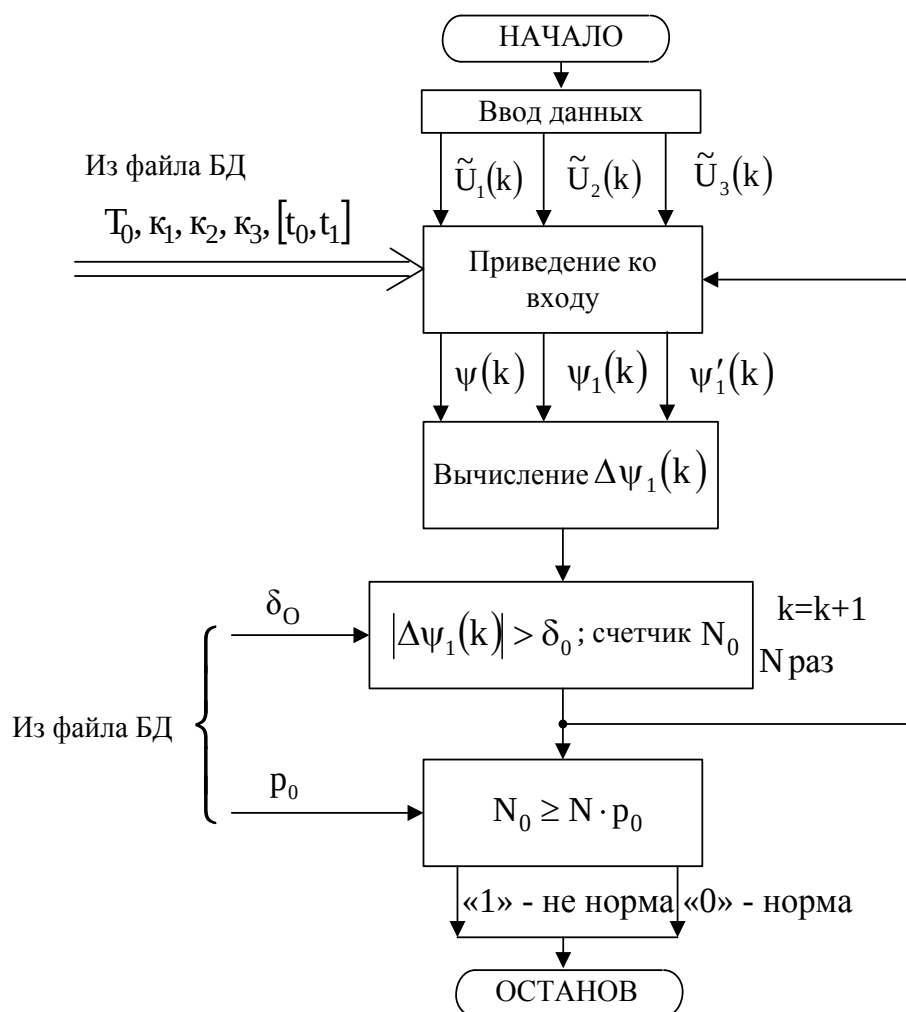


Рисунок 5.10 – Алгоритм обнаружения дестабилизации в датчиках курса

Программное обеспечение обнаружения дестабилизации создается на основе разработанных алгоритмов. Отладка алгоритмов и программного обеспечения осуществляется с использованием стандартных средств отладки и первоначально выполняется на файлах данных, полученных с помощью имитационного модуля блока измерителей для всех номинальных и аварийных режимов. После этой отладки алгоритмов и программ переходят к отладке на стендах блока измерителей. Дестабилизация может обнаружиться на стенде в пакетном и оперативном режимах. В первом случае данные со стенда записываются в файл и обрабатываются так же, как имитируемые напряжения. Рекомендуется записывать информацию в файл только в установившихся режимах, т.е. когда дестабилизация уже произошла, до начала периода измерения T , а не в сам период.

Во втором, «оперативном» режиме данные небольшими порциями, например, 10...20 точек, обрабатываются через равные промежутки времени (например, через 1 секунду), в том числе и в переходном режиме, где диагноз может быть недостоверным. Если на следующих итерациях диагноз подтверждается, то он принимается как окончательный.

Для проведения отладки в оперативном режиме рекомендуется заранее спланировать эксперимент с учетом рабочих гипотез. Для этого имитируемые на стенде виды дестабилизации должны разделяться хотя бы одним периодом нормального функционирования датчиков. Характер входного сигнала прокачки датчиков должен обеспечивать сигнальную диагностируемость, т.е. возможность обнаруживать дестабилизацию и выявлять их нормальное функционирование.

Последующие задачи диагностического обеспечения: локализация фрагментов, определение типов и идентификация видов дестабилизации решаются с помощью методов, описанных в главе III. Результаты исследований по стендовому компьютерному диагностированию блока гироскопических датчиков [8] могут быть использованы при формировании алгоритмического и программного обеспечения.

Результатом разработки диагностического обеспечения фрагмента блока измерителей канала курса получен в форме алгоритмического и программного обеспечения, которое укрупненно можно представить в форме дихотомического дерева поиска видов дестабилизации (рис. 5.11).

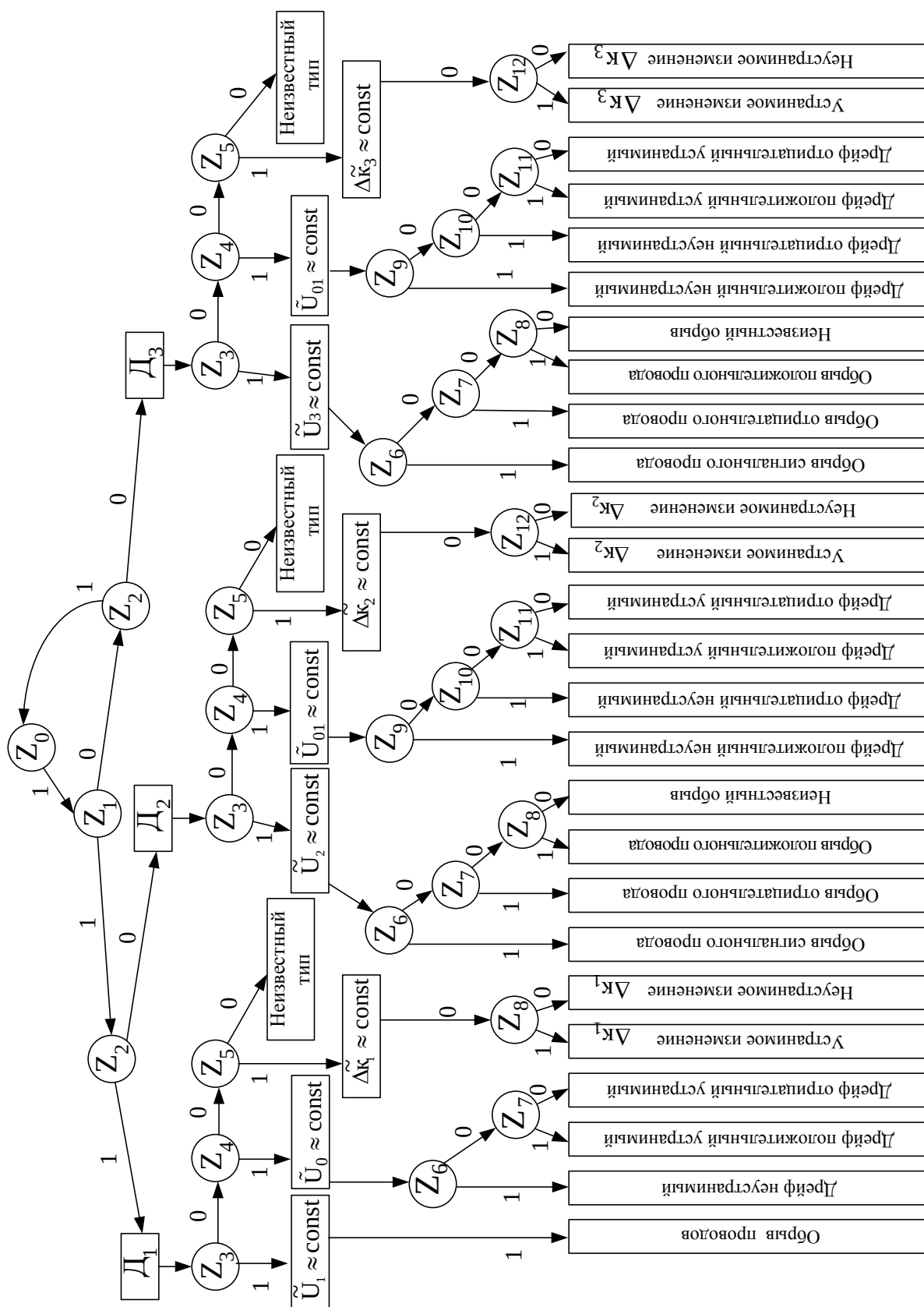


Рисунок 5.11 – Дихотомическое дерево поиска видов дестабилизации в датчиках канала курса

В узлах дерева используются предикатные уравнения, получаемые в результате решения соответствующих задач диагностирования. Так, предикаты для локализации неработоспособности датчика описываются следующими математическими конструкциями:

$$\begin{aligned}
 Z_1(k+1) &= S_2 \left\{ \left| \frac{\tilde{U}_1(k+1)}{\kappa_1} - \frac{1+T_0}{\kappa_2} \tilde{U}_2(k) \right| < \delta_1 \right\}; \\
 Z_2(k+1) &= S_2 \left\{ \left| \frac{\tilde{U}_1(k)}{\kappa_1} - \frac{1+T_0}{\kappa_3} \tilde{U}_3(k) \right| < \delta_2 \right\}; \\
 \delta_1 &= \max_{\text{ном}} \left| \frac{U_1(k)}{\kappa_1} - \frac{1+T_0}{\kappa_2} U_2(k) \right|; \\
 \delta_2 &= \max_{\text{ном}} \left| \frac{U_1(k)}{\kappa_1} - \frac{1+T_0}{\kappa_3} U_3(k) \right|.
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

Например, предикатное уравнение для типов обрыва имеют такой вид:

$$Z_3(k) = S_2 \left\{ \left| \tilde{U}_\lambda(k) - \tilde{U}_\lambda(k+m) \right| < \delta_3 \right\}; k = \overline{1, N-m}. \tag{5.11}$$

Предикат для идентификации положительного неустранимого дрейфа описывается следующим уравнением:

$$Z_9(k) = S_2 \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta U_\lambda(k) > U_{0\max}^\lambda \right\}. \tag{5.12}$$

Отработка и отладка диагностического обеспечения фрагмента блока измерителей для канала курса позволила перейти к решению следующей задачи – восстановления работоспособности фрагмента, что по сути означает восстановление измерений сигналов угла курса и угловой скорости курса.

5.4 Восстановление работоспособности фрагмента блока измерителей

Получив полный диагноз причин дестабилизации работоспособности датчиков в канале курса, можно приступить к проектированию алгоритмов и программ процедур восстановления работоспособности. Рассмотрим особенности алгоритмического обеспечения процесса восстановления

работоспособности. Восстановление работоспособности базируется на гибком использовании избыточных средств. Для рассматриваемого фрагмента блока измерителей имеются следующие избыточные средства:

- 1) приборные – 2 ДУСа;
- 2) функциональные – $\dot{\psi}(t) = \frac{d\psi(t)}{dt}$;
- 3) алгоритмические – сигнальная подстройка;
- 4) алгоритмические – параметрическая подстройка.

Все виды дестабилизации (рис. 5.11) для каждого датчика и для всего фрагмента в целом можно, исходя из имеющихся избыточных средств, распределить в три следующих класса. Первый класс составят: неизвестный тип, обрыв проводов, дрейф неустранимый, неустранимое изменение Δk_i , $i = \overline{1,3}$. Во второй класс войдут устранимые дрейфы как положительный, так и отрицательный. Третий класс – это устранимое изменение Δk_i , $i = \overline{1,3}$.

Для оценки свойства восстанавливаемости фрагмента составим по образцу таблицы 2.1 следующую таблицу. В таблице используются следующие обозначения. Для ДУ: $\Delta\lambda_1$ – это первый класс дестабилизации; $\Delta\lambda_2$ – второй класс и $\Delta\lambda_3$ – третий класс. Для ДУС1: $\Delta\lambda_4$ – первый класс дестабилизации; $\Delta\lambda_5$ – второй класс и $\Delta\lambda_6$ – третий класс. Для ДУС2: $\Delta\lambda_7$ – первый класс, $\Delta\lambda_8$ – второй и $\Delta\lambda_9$ – третий класс дестабилизации. Средства восстановления используются следующие: v_1 – это ДУС1; v_2 – ДУС2; v_3 – сигнальная подстройка; v_4 – параметрическая подстройка и v_5 – ДУ (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Оценка свойства восстанавливаемости ОРУ

	Р	Средства восстановления					уровень
		v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	
ДУ	$\Delta\lambda_1$	1	1	0	0	0	2
	$\Delta\lambda_2$	0	0	1	0	0	1
	$\Delta\lambda_3$	0	0	0	1	0	1
ДУС1	$\Delta\lambda_4$	0	1	0	0	1	2
	$\Delta\lambda_5$	0	0	1	0	0	1
	$\Delta\lambda_6$	0	0	0	1	0	1
ДУС2	$\Delta\lambda_7$	1	0	0	0	1	2
	$\Delta\lambda_8$	0	0	1	0	0	1
	$\Delta\lambda_9$	0	0	0	1	0	1
Ранг		2	2	3	3	2	

Если ввести допустимый ранг восстанавливаемости $\ell_d = 2$, тогда критерий ранга восстанавливаемости $\forall \ell_j \geq \ell_d$ будет выполняться для всех $j = \overline{1, 5}$. Если требуемый уровень восстанавливаемости определить как $c_T = 1$, тогда по критерию уровня восстанавливаемости $\forall c_i \geq c_T$ фрагмент восстанавливаем для каждого $i = \overline{1, 9}$.

Виды дестабилизации первого класса свидетельствуют о полной неработоспособности датчика и поэтому для датчика курса, например, восстановить его измерение, соответствующее текущему курсу летающей модели можно, воспользовавшись функциональной связью измерений датчика курса и одного из датчиков угловой скорости курса, а именно $\psi(t) = \int_{t_0}^t \dot{\psi}(t) dt$.

Применяя формулу Эйлера, представим связь в цифровой форме:

$$\dot{\psi}(t) \approx \frac{\psi(k+1) - \psi(k)}{T_0} \approx \psi_1(k), \quad (5.13)$$

тогда для получения оценочных значений угла получаем такое соотношение:

$$\hat{\psi}(k+1) = \hat{\psi}(k) + T_0 \psi_1(k). \quad (5.14)$$

Воспользовавшись линейной зависимостью между выходными и входными сигналами датчиков, получим следующее рекуррентное уравнение:

$$\hat{U}_1(k+1) = \hat{U}_1(k) + T_0 \frac{K_1}{K_2} U_2(k). \quad (5.15)$$

Если использовать выходной сигнал второго ДУСа, тогда

$$\hat{U}_1(k+1) = \hat{U}_1(k) + T_0 \frac{K_1}{K_3} U_3(k). \quad (5.16)$$

При неработоспособности одного из ДУСов, его измерения можно восстановить как с помощью подключения к работоспособному второму ДУСу, так и с помощью численного дифференцирования сигнала с датчика курса, воспользовавшись соотношением (5.13) и связью сигналов:

$$\psi(k+1) = \frac{U_1(k+1)}{\kappa_1}; \quad \psi(k) = \frac{U_1(k)}{\kappa_1}; \quad \psi_1(k) = \frac{U_2(k)}{\kappa_2}. \quad (5.17)$$

Подставив эти выражения в соотношение (5.13), получим:

$$\frac{U_1(k+1) - U_1(k)}{\kappa_1 T_0} = \frac{U_2(k)}{\kappa_2}. \quad (5.18)$$

Тогда с учетом практической реализации алгоритма получим такое рекуррентное уравнение:

$$\hat{U}_2(k+2) = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} T_0 [U_1(k+1) - U_1(k)]. \quad (5.19)$$

При большом уровне шумов в выходном сигнале датчика угла использование алгоритма (5.19) приведет к низкой точности оценки измерения ДУС2. В этом случае нужны другие алгоритмы численного дифференцирования зашумленного сигнала датчика угла.

Для класса дрейфов – параметры $\Delta\lambda_2$, $\Delta\lambda_5$ и $\Delta\lambda_8$ (табл. 5.1), по результатам диагноза получается оценочное значение дрейфа $\hat{U}_0^i, i = \overline{1, 3}$ и знак дрейфа «+» или «-». Восстановление измерения неработоспособного датчика $\tilde{U}_i(k)$ при таком виде дестабилизации может осуществляться с помощью средств сигнальной подстройки по следующему алгоритму:

$$\hat{U}_i(k) = \tilde{U}_i(k) \mp \hat{U}_0^i, \quad i = \overline{1, 3}. \quad (5.20)$$

Третий класс видов дестабилизации – это устранимое изменение $\Delta\kappa_i, i = \overline{1, 3}$, в табл. 5.1 это прямые признаки третьего класса: $\Delta\lambda_3, \Delta\lambda_6$ и $\Delta\lambda_9$. Восстановить измерения неработоспособного датчика можно с помощью такого средства восстановления как параметрическая подстройка – v_4 (таб. 5.1). Рассмотрим особенности формирования алгоритма параметрической подстройки для ДУ. Оценочное значение напряжения $\hat{U}_1(k)$ датчика угла можно получить, например, для ситуации уменьшения коэффициента передачи датчика на величину $\Delta\kappa_1$, воспользовавшись таким соотношением:

$$\hat{U}_1(k) = \tilde{\kappa}_1 \psi(k) + \Delta \kappa_1 \psi(k). \quad (5.21)$$

Если принять во внимание, что первое слагаемое описывает выходной сигнал неработоспособного датчика – $\tilde{U}_1(k)$, а угол $\psi(k)$ во втором слагаемом можно выразить как $\frac{\tilde{U}_1(k)}{\tilde{\kappa}_1}$, то тогда оценочное значение выходного сигнала будет определяться таким выражением:

$$\hat{U}_1(k) = \tilde{U}_1(k) + \Delta \kappa_1 \frac{\tilde{U}_1(k)}{\tilde{\kappa}_1}. \quad (5.22)$$

Раскроем структуру коэффициента $\tilde{\kappa}_1$ как $\tilde{\kappa}_1 = \kappa_{1н} - \Delta \kappa_1$ и подставив в выражение (5.22), сделаем преобразование:

$$\begin{aligned} \hat{U}_1(k) &= \tilde{U}_1(k) + \Delta \kappa_1 \frac{\tilde{U}_1(k)}{\kappa_{1н} - \Delta \kappa_1} = \left(1 + \frac{\Delta \kappa_1}{\kappa_{1н} - \Delta \kappa_1} \right) \tilde{U}_1(k) = \\ &= \left(\frac{\kappa_{1н}}{\kappa_{1н} - \Delta \kappa_1} \right) \tilde{U}_1(k) = \frac{\kappa_{1н}}{\kappa_{1н} - \Delta \kappa_1} \tilde{U}_1(k). \end{aligned} \quad (5.23)$$

В результате преобразований получили алгоритм параметрической подстройки выходного сигнала неработоспособного ДУ в таком виде:

$$\hat{U}_1(k) = \frac{\kappa_{1н}}{\kappa_{1н} - \Delta \kappa_1} \tilde{U}_1(k). \quad (5.24)$$

Аналогично для ДУС1

$$\hat{U}_2(k) = \frac{\kappa_{2н}}{\kappa_{2н} - \Delta \kappa_2} \tilde{U}_2(k) \quad (5.25)$$

и для ДУС2

$$\hat{U}_3(k) = \frac{\kappa_{3н}}{\kappa_{3н} - \Delta \kappa_3} \tilde{U}_3(k). \quad (5.26)$$

Представим укрупненно основные функции по восстановлению работоспособности фрагмента блока измерителей (рис. 5.12). Итак, в

результате диагноза обнаруживается, когда возникла дестабилизация, затем в результате поиска – где произошла дестабилизация, выявляется неработоспособный датчик, после устанавливается тип дестабилизации и определением вида дестабилизации завершается процесс формирования характеристик неработоспособного состояния фрагмента блока измерителей. Задача функционального блока «Выбор средств восстановления» заключается в реализации функций соответствий, представленных в табл. 5.1, другими словами, в выборе блока, реализующего функцию восстановления измерений неработоспособного датчика. В табл. 5.1 шесть функций соответствия однозначны, и только три – двузначны. Поэтому для признаков $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_4$ и $\Delta\lambda_7$ выбор средств восстановления более сложный – двухэтапный, зависящий от технического состояния соответствующих средств восстановления. Так, если появилась дестабилизация в ДУ, описываемая признаком $\Delta\lambda_1$, а средство v_7 уже претерпело ранее дестабилизацию, и было восстановлено, тогда происходит выбор средств v_2 , т.е. ДУС2.

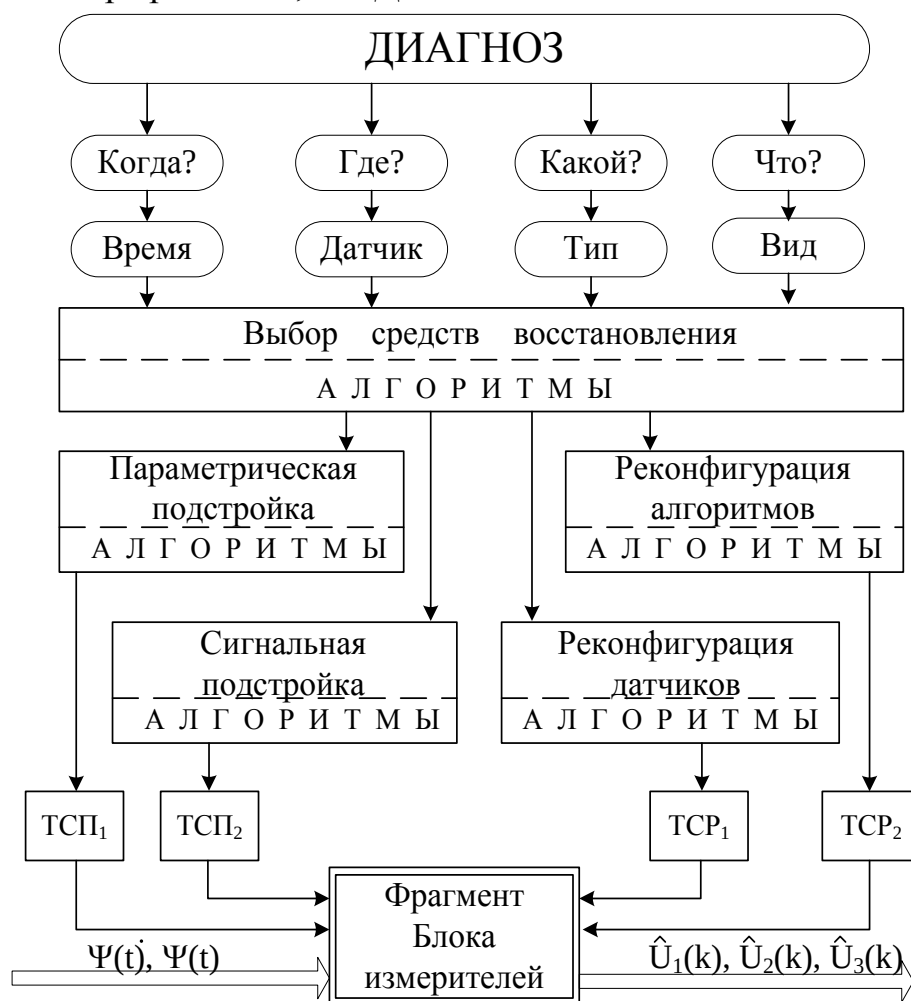


Рисунок 5.12 – Функциональная схема восстановления работоспособности датчиков канала курса

В ситуации, когда средство v_2 – ДУС2 был ранее не работоспособен, а затем восстановлен, целесообразней выбрать средство v_1 , т.е. ДУС1. Если оба средства v_1 и v_2 не были ранее дестабилизированы и оба равноценны, то выбирается одно из них. Аналогичным образом осуществляется выбор средств восстановления для признаков $\Delta\lambda_4$ и $\Delta\lambda_7$. Таким образом, алгоритмы выбора средств восстановления работоспособности формируются на основании функций соответствия и технического состояния используемых двухуровневых средств восстановления работоспособности.

Последующие блоки функциональной схемы, реализуют с помощью описанных ранее алгоритмов функции восстановления работоспособности посредством параметрической и сигнальной подстроек, а также реконфигурацией алгоритмов и датчиков. Для изменения функционального состояния неработоспособных датчиков используются встроенные технические средства подстройки – ТСП₁ и ТСП₂, а также технические средства реконфигурации – ТСП₁ и ТСП₂. В совокупности фрагмент блока измерителей, средства диагностирования и восстановления работоспособности представляют новый модифицированный фрагмент, в котором реализовано рациональное управление работоспособностью датчиков в условиях действия дестабилизации.

5.5 Результаты стендовых экспериментальных исследований датчиков канала курса летающих моделей

Стенд для исследования процедур рационального управления работоспособностью датчиков в канале курса (рис. 5.7) разработан на основании функциональной схемы (рис. 5.13).

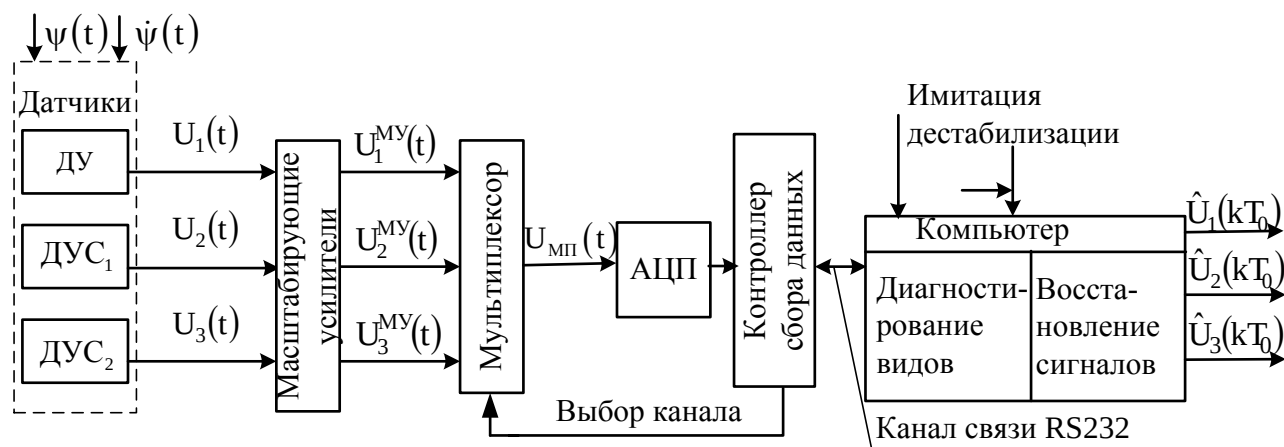


Рисунок 5.13 – Функциональная схема стенда для исследования рационального управления работоспособностью датчиков в канале курса

На рис. 5.14 представлены результаты экспериментов в нормальном режиме функционирования датчиков в канале курса. Левый ряд графиков отражает характер изменения угла – $\psi(t)$ и угловой скорости – $\dot{\psi}(t)$ поворотной платформы, на которой установлены датчики. Правый ряд графиков представлен оценочными значениями угловой скорости $\hat{\dot{\psi}}(t)$, полученными посредством численного дифференцирования выходного сигнала ДУ – $U_1(t)$. Оценочные значения угла $\hat{\psi}^1(t)$ и $\hat{\psi}^2(t)$ получены в результате соответствующей обработки выходных сигналов $U_2(t)$ и $U_3(t)$ соответственно с ДУС1 и ДУС2. Очевидно, что характеры выходных сигналов и их оценок по выходным сигналам датчиков свидетельствуют об удовлетворительном их совпадении.

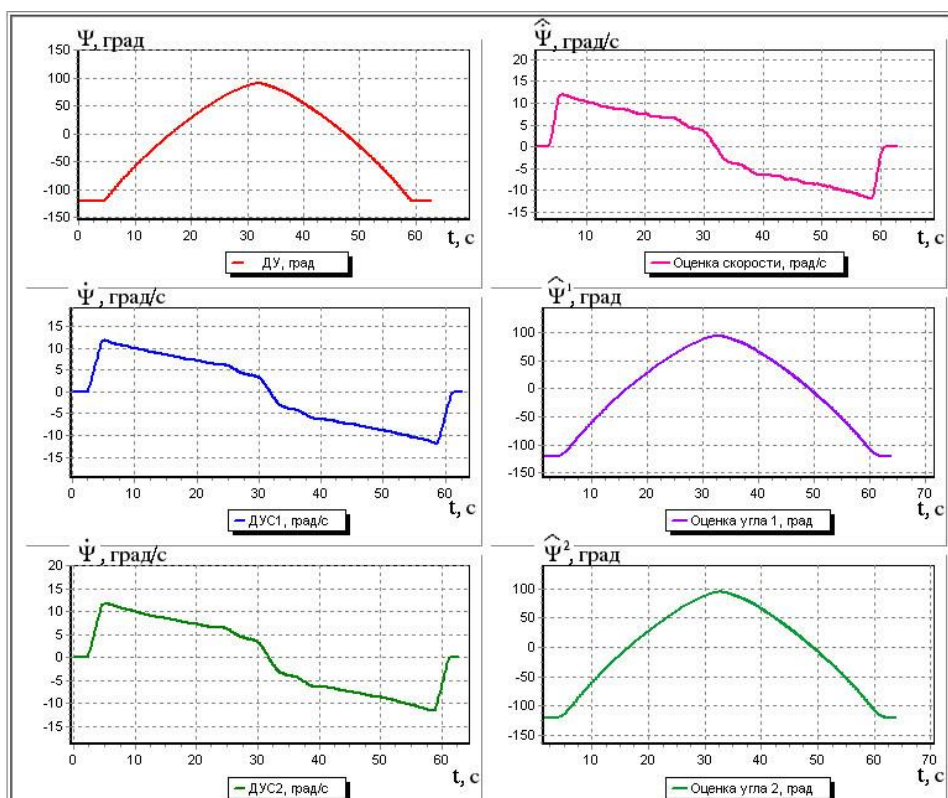
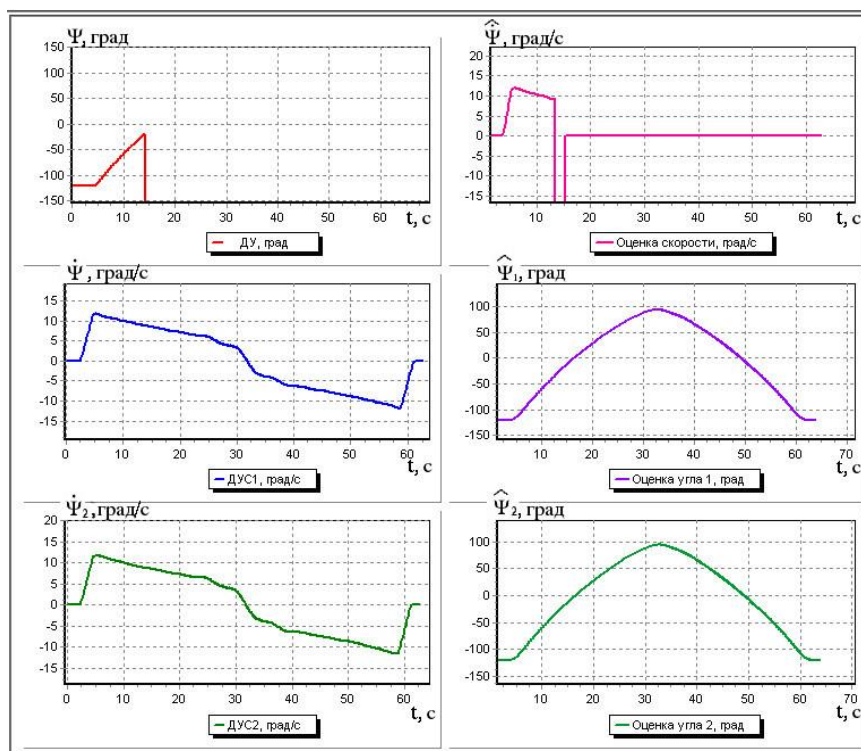


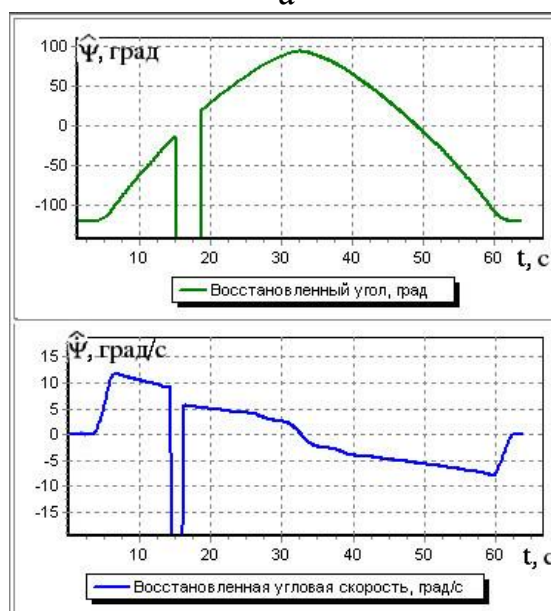
Рисунок 5.14 – Нормальный режим функционирования датчиков

На рис. 5.15, а представлены результаты диагностирования с использованием тех сигналов, что и на рис. 5.14. Программно на 15 с был симулирован обрыв в ДУ положительного провода питания, о чем свидетельствуют графики $\psi(t)$ и $\hat{\dot{\psi}}(t)$. На рис. 5.15, б представлены результаты восстановления измерений ДУ с помощью соответствующей обработки выходного сигнала с ДУС1 – $U_2(t)$, а также представлены

результаты оценивания скорости $\hat{\psi}(t)$, свидетельствующие об удовлетворительном качестве восстановления выходного сигнала ДУ при обрыве его положительного провода питания.



а

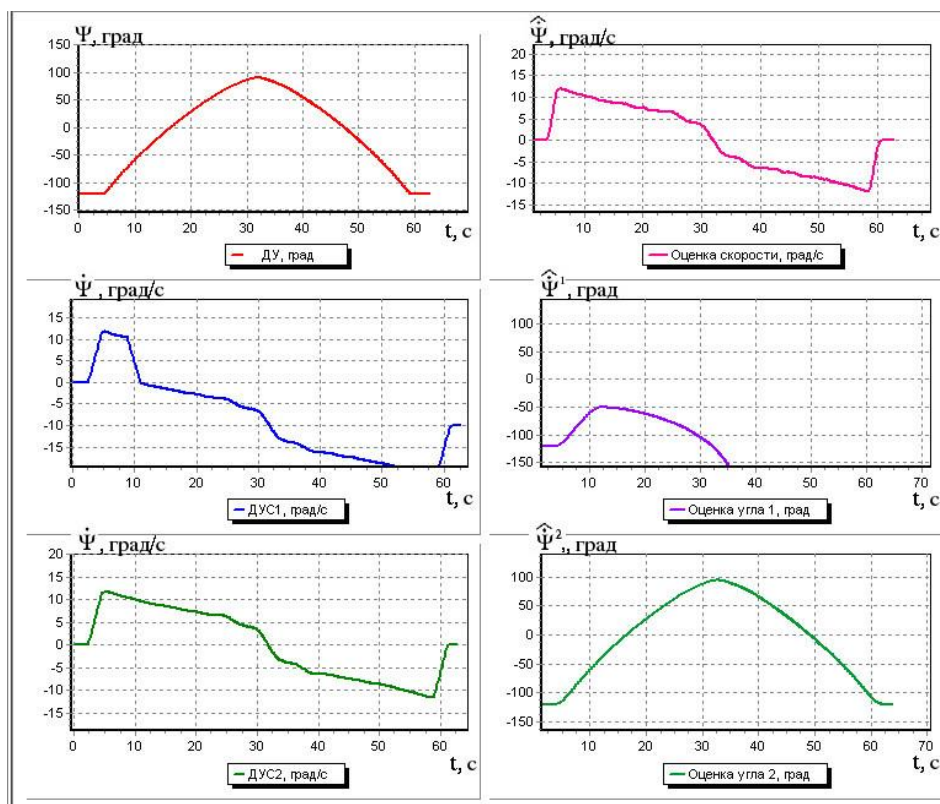


б

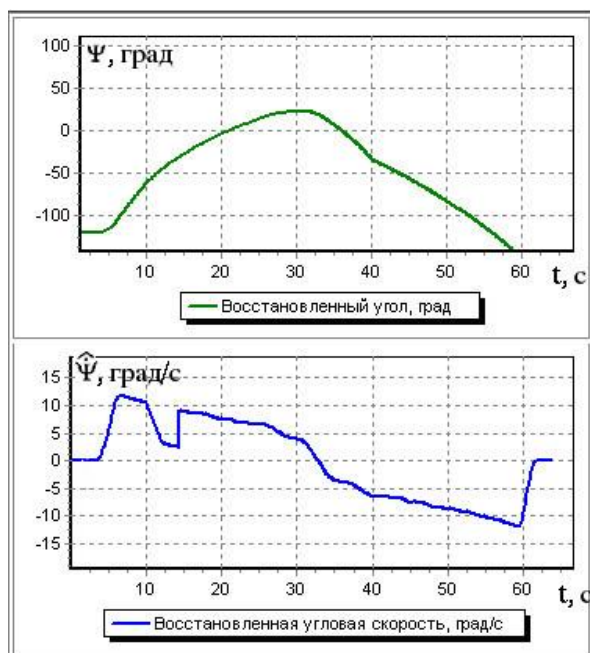
а – диагностирование; б – восстановление

Рисунок 5.15 – Дестабилизация в ДУ: обрыв на 15 с положительного провода питания

На рис.5.16 представлены результаты диагностирования и восстановления работоспособности ДУС1 при дестабилизации в виде неустранимого дрейфа нуля в течение 9 с функционирования.



а

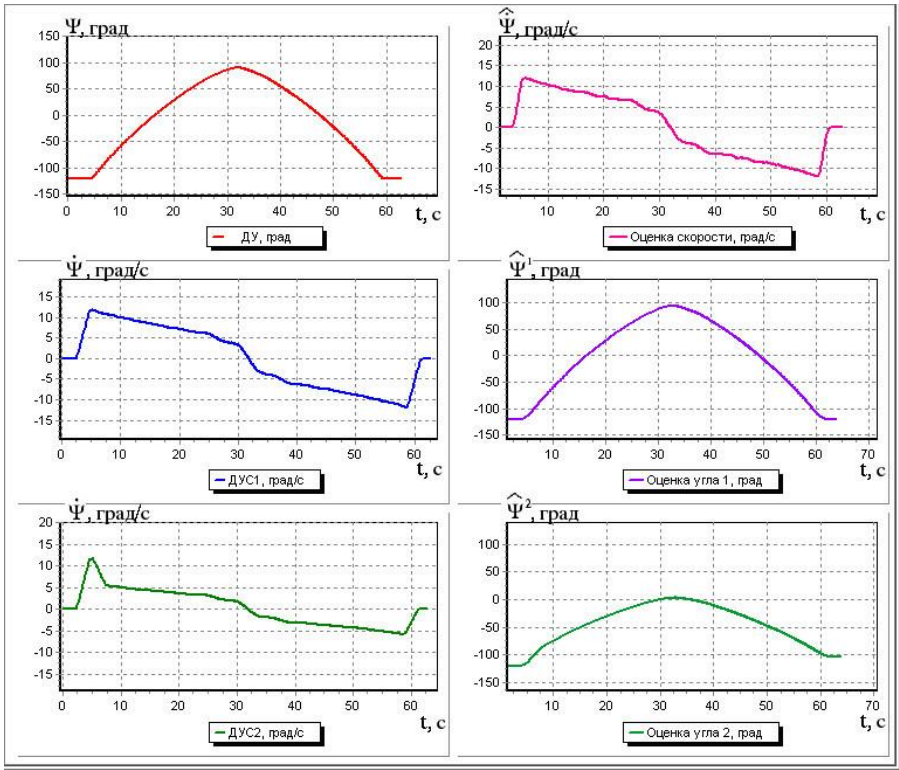


б

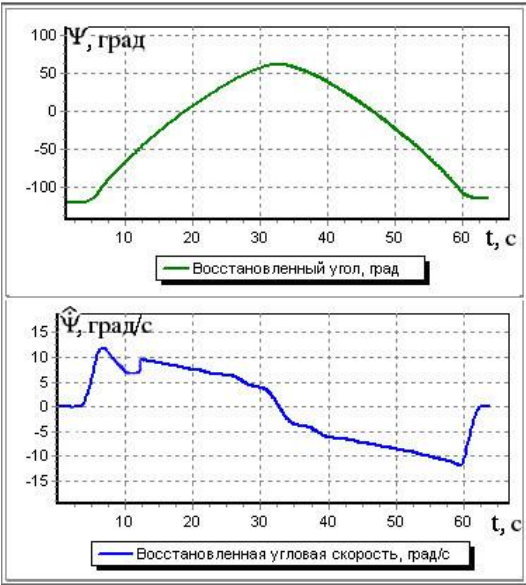
а – диагностирование; б – восстановление

Рисунок 5.16 – Дестабилизация в ДУС1: неустранимый дрейф нуля в течение 9 с

На рис. 5.17, а приведены сигналы и оценки входных сигналов датчиков для дестабилизации на 5 с ДУС2 в виде уменьшения его коэффициента передачи. Нижний ряд графиков отражает существенную их деформацию по сравнению с нормальным режимом функционирования ДУС2. На рис. 5.17, б отражен процесс восстановления измерений ДУС2.



а



б

а – диагностирование; б – восстановление
Рисунок 5.17 – Дестабилизация в ДУС2: уменьшение коэффициента передачи

Проведенные исследования показали принципиальную возможность для блока датчиков летающих моделей:

1) формировать диагностические модели, отражающие однозначные связи входных сигналов и видов дестабилизации с выходными сигналами датчиков;

2) на основании диагностических моделей разрабатывать алгоритмы и программы диагностирования с целью получения удовлетворительно диагноза;

3) разрабатывать алгоритмы и программы восстановления работоспособности датчиков до приемлемого на практике уровня.

Модифицированный блок измерителей с рациональным управлением его работоспособностью требует больших ресурсных затрат на разработку и изготовление, чем традиционный. Существенные выгоды от его использования ожидаются как на этапах отладки систем управления летающих моделей, на этапе предполетной их подготовки, так и на этапе эксплуатации летающих моделей в критических режимах полета.

ГЛАВА

VI

**РАЦИОНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ БЛОКА
ЭЛЕКТРОМАХОВИЧНЫХ ПРИВОДОВ**

Практика эксперимента – это дело вкуса.

*П.А. Капица (1894 – 1984) – советский,
физик, лауреат Нобелевской премии.*

В космическом полете на летательные аппараты оказывают внешнее возмущающее действие гравитационные, магнитные, аэродинамические, электрические, солнечные и другие силы и моменты. Для парирования таких возмущающих воздействий с целью поддержания требуемой ориентации используются исполнительные органы, создающие реактивные моменты для сохранения момента количества движения космического аппарата. В качестве исполнительных органов нашли эффективное применение электромаховичные приводы – двигатели-маховики, из которых конструируются блоки приводов, создающих управляемые векторы реактивных моментов. Структура из трех таких приводов, размещенных по осям ортогональной системы координат, позволяет парировать только внешние возмущающие воздействия. Блоки с избыточной структурной электромаховичных приводов позволяют парировать и внутренние блочные возмущающие воздействия, связанные с отказами. Для придания таких свойств блокам приводов с избыточной структурой требуется так их сконструировать, чтобы обеспечить не только необходимые и достаточные условия их работоспособности в номинальных режимах функционирования, а и сохранить работоспособность в нештатных режимах. Использование принципа управления работоспособностью по диагнозу позволяет при проектировании блока приводов обеспечить его диагностируемость и восстанавливаемость по отношению к потенциальному множеству видов дестабилизации. Разработка диагностических моделей и алгоритмического обеспечения процессов диагностирования и восстановления работоспособности блока с избыточной структурой электромаховичных приводов представляет самостоятельную актуальную научно-прикладную задачу. Решение этой задачи позволит рационально управлять работоспособностью блока электромаховичных приводов в условиях дестабилизирующих воздействий.

6.1 Назначение, принцип действия и устройство электромаховичных приводов

При управлении движением космического аппарата любого назначения решаются четыре относительно самостоятельные задачи: навигации, наведения, ориентации и стабилизации. По мнению Б.В. Раушенбаха – одного из пионеров космонавтики, «можно без преувеличения утверждать, что управление ориентацией космического летательного аппарата является в большинстве случаев главным режимом управления его движением» [1]. Системы управления ориентацией и стабилизацией решают следующие основные задачи:

- 1) успокоение космического аппарата после отделения от ракеты-носителя;
- 2) приведение космического аппарата из произвольного углового положения в требуемое (ориентация);
- 3) поддержание требуемого углового положения (стабилизация);
- 4) выполнение угловых маневров космического аппарата;
- 5) управление ориентацией и стабилизацией космического аппарата при орбитальных маневрах;
- 6) управление угловым положением космического аппарата при решении целевой задачи [2].

На космический аппарат в общем случае действует суммарный вектор внешнего возмущения, обусловленный:

- 1) притяжением Солнца, Луны и планет Солнечной системы;
- 2) сопротивлением атмосферы;
- 3) световым давлением;
- 4) деформацией земли вследствие приливов;
- 5) электромагнитными силами;
- 6) притяжением атмосферы;
- 7) релятивистскими эффектами [2].

Для нейтрализации вектора внешнего возмущения, приводящего к нарушению требуемого пространственного углового положения космического аппарата, используется принцип управления по отклонению. В качестве исполнительных органов замкнутой системы ориентации и стабилизации нашли применение гиромаховики [3]. Основным функциональным элементом гиромаховиков является электродвигатель с инерционным маховиком на валу. Закон сохранения момента количества движения позволяет понять особенности применения электродвигателей-маховиков для нейтрализации

вектора внешнего возмущения [4]. На рис. 6.1 представлена схема нейтрализации внешних возмущений посредством маховика.

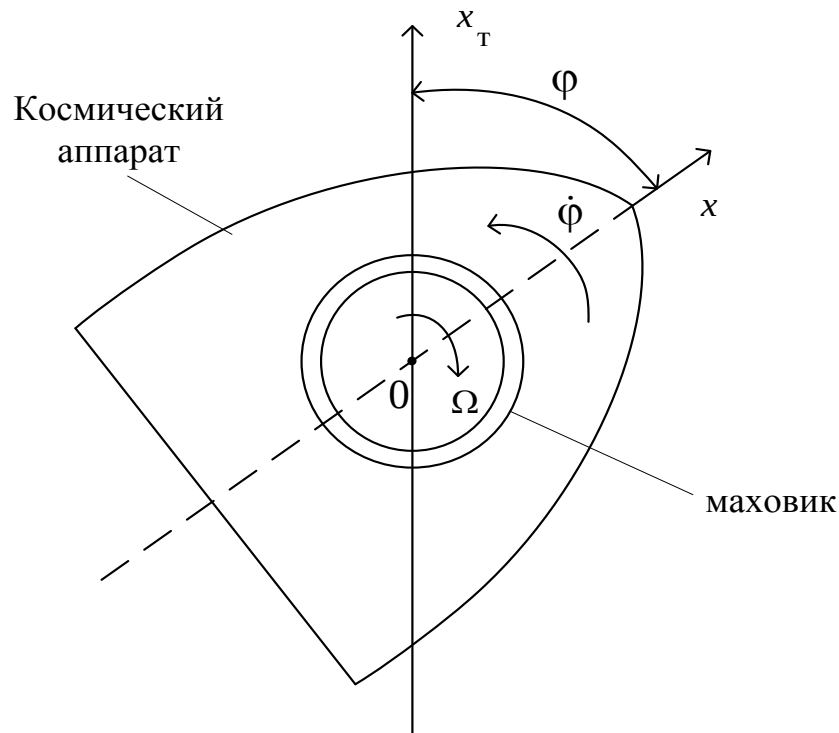


Рисунок 6.1 – Схема использования маховика

Согласно теореме о моменте количества движения

$$\frac{dK_x}{dt} + \frac{dH_x}{dt} = M_{BH}, \quad (6.1)$$

где K_x и H_x – кинетические моменты аппарата и маховика;

M_{BH} – момент внешних возмущающих сил.

Так как $K_x = I_x \omega_x$; $H_x = I \Omega$, где I_x и I – моменты инерции аппарата и маховика; $\omega_x = \dot{\phi}$ и Ω – угловые скорости аппарата и маховика, тогда

$$I_x \frac{d\omega_x}{dt} = M_{BH} - I \frac{d\Omega}{dt}. \quad (6.2)$$

Из этого выражения следует, что посредством изменения угловой скорости $\frac{d\Omega}{dt}$ маховика можно изменять угловую скорость аппарата и обеспечить совмещение оси $0x$ и аппарата с требуемым угловым положением – осью x_T . Следовательно, компенсирующий возмущения момент

создается при ускоренном или замедленном вращении маховика. Качественное контролируемое управление в условиях дестабилизирующих воздействий изменением угловой скорости маховика – Ω в зависимости от величины и знака углового отклонения аппарата от требуемого возможно с помощью системы автоматического позиционирования (рис. 6.2).

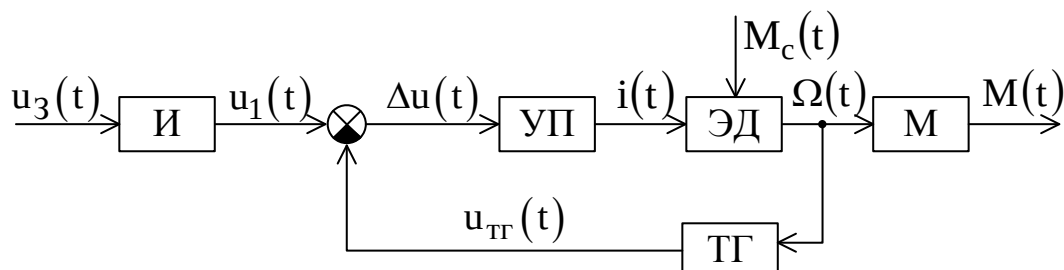


Рисунок 6.2 – Функциональная схема простейшей замкнутой системы управления моментом

Здесь И – интегратор; УП – усилитель-преобразователь; ЭД – электродвигатель; М – маховик; ТГ – тахогенератор; $u_3(t)$ – задающее значение управляющего момента; $i(t)$ – ток управления; $M_c(t)$ – момент сопротивления. Очевидно, что в основу привода заложен принцип управления по отклонению $\Delta u(t) = u_1(t) - u_{тг}(t)$, позволяющий с заданной точностью управлять изменением угловой скорости, а следовательно, и моментом $M(t)$. Приведенная схема по сути своей представляет схему управляемого электромаховичного привода.

Место расположения электромаховичных приводов на космическом аппарате не имеет значения, так как управление его угловым положением производится путем изменения кинетического момента маховика. Взаимное положение осей связанной системы координат аппарата и осей приводов определяется только лишь углами (рис. 6.3). На рис. 6.4 приведена схема расположения электромаховичных приводов на космическом аппарате «Кулон» с системой управления разработки НПП «Хартрон-Аркас» [2].

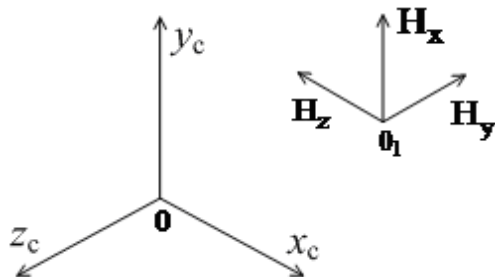


Рисунок 6.3 – Схема расположения кинетических моментов приводов

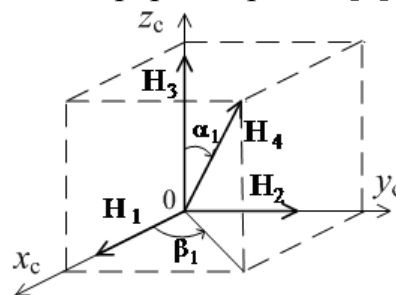


Рисунок 6.4 – Схема установки приводов «куб» на космическом аппарате «Кулон»

Здесь α_1 и β_1 – углы установки приводов; $H_1 \div H_4$ – векторы кинетических моментов приводов. Угол α_1 определяют из условия одинаковости проекций вектора H_4 на оси связанной системы координат $H_{4x} = H_{4y} = H_{4z}$, тогда $H_{4x} = \sin \alpha_1 \cos \beta_1 H_4$; $H_{4y} = \sin \alpha_1 \sin \beta_1 H_4$; $H_{4z} = \cos \alpha_1 H_4$.

При такой установке оси кинетических моментов приводов взаимно ортогональны. Центр масс аппарата расположен в точке 0, а центр масс блока приводов – в точке 0₁. Чтобы обеспечить управление угловым положением космического аппарата при различных отказах приводов применяются избыточные структуры с такими вариантами схем установки.

Вариант 1. Три основных привода устанавливаются по осям связанной системы координат аппарата. Четвертый привод устанавливается под определенными углами к осям связанной системе координат (рис. 6.4).

В результате преобразований получаем, что $\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{1}{\cos \beta_1}$, а следовательно, при $\beta_1 = 45$ град имеем $\alpha_1 = 54^\circ 44' 8''$.

Вариант 2. Четыре одновременно работающих привода устанавливаются по схеме «пирамида» (рис. 6.5). Здесь α_2 и β_2 – углы установки приводов относительно осей связанной системы координат космического аппарата. Осью симметрии схемы установки может быть любая ось связанной системы. Углы α_2 и β_2 выбираются обычно из условия равной эффективности приводов по всем каналам управления.

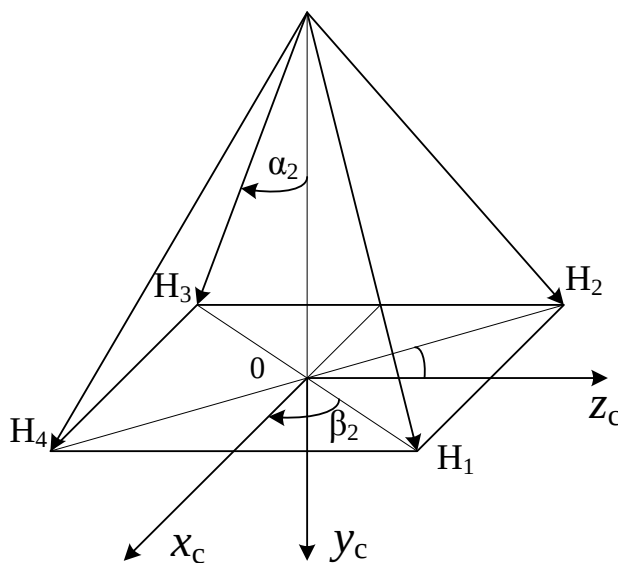


Рисунок 6.5 – Схема установки приводов «пирамида»

Тогда

$$\frac{4H \sin \alpha_2 \cos \beta_2}{I_{xx}} = \frac{4H \cos \alpha_2}{I_{yy}} = \frac{4H \sin \alpha_2 \sin \beta_2}{I_{zz}}. \quad (6.3)$$

В результате преобразований получаем: $\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{I_{zz}}{I_{xx}}$ и, к примеру, для спутника наблюдения средних габаритов и массы $I_{xx}=4554 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $I_{yy}=5410 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и $I_{zz}=8282 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $\beta_2 = 41^\circ 35' 21''$; $\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{I_{xx}}{I_{yy} \cos \beta_2}$ и конкретно $\alpha_2 = 52^\circ 01' 22''$.

Проведенные на кафедре экспериментальные исследования серийного блока 17М71 (рис. 6.6) двигателей-маховиков, канонической структуры (рис. 6.3) в различных нештатных ситуациях показали низкую эффективность как по диагностированию имитируемых нештатных ситуаций, так и по парированию их последствий. Главная причина – низкий уровень избыточных средств в блоке [5].



Повысить эффективность и существенно расширить функциональные возможности блока электромаховичных приводов по парированию дестабилизирующих воздействий можно посредством введения структурной, информационной и временной избыточностей, а также рациональным управлением работоспособностью по диагнозу.

Рисунок 6.6 – Общий вид серийного прибора 17М71. Для обеспечения расширения функциональных возможностей блока электромаховичных приводов рассмотрим модифицированный вариант формирования контура позиционирования кинетического момента, который обозначен как $m_i(t)$.

С этой целью для каждого двигателя-маховика формируется избыточная структура объекта рационального управления и соответствующий контур автоматического управления по диагнозу. Простейшая функциональная схема такой цифровой системы рационального позиционирования изображена на рис. 6.7.

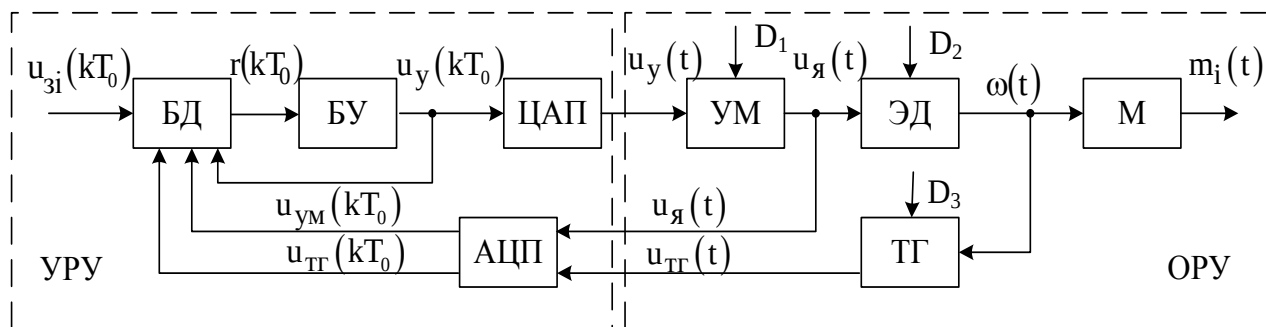


Рисунок 6.7 – Функциональная схема цифровой системы рационального управления моментом

Здесь БД – блок диагностики; БУ – блок управления; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; УМ – усилитель мощности; ЭД – электродвигатель; М – маховик; ТГ – тахогенератор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ОРУ – объект рационального управления; УРУ – устройство рационального управления; $u_{zi}(kT_0)$ – задающее действие; $u_{уМ}(t)$ – напряжение с УМ; $\omega(t)$ – изменяющаяся угловая скорость маховика; $m_i(t)$ – кинетический момент; $u_{ТГ}(t)$ – напряжение тахогенератора; $u_{ТГ}(kT_0)$ – дискретный сигнал тахогенератора; $u_{уМ}(kT_0)$ – дискретный сигнал с УМ; D_1 , D_2 и D_3 – множество видов дестабилизации соответственно УМ, ЭД и ТГ.



Рисунок 6.8 – Макет микроспутника с электромаховичными приводами пирамидальной структуры

В разработанном на кафедре макетном варианте микропутника был использован блок электромаховичных приводов пирамидальной структуры и проведено его исследование при потенциально возможных нештатных ситуациях с целью их диагностирования и парирования. Разработанные аппаратные, алгоритмические и программные средства позволили провести серию экспериментальных исследований на макетном образце микропутника (рис. 6.8) и получить удовлетворительные результаты по рациональному управлению работоспособностью сконструированного блока электромаховичных приводов [6].

6.2 Математические описания номинального режима функционирования

Номинальный режим функционирования ОРУ характеризуется отсутствием дестабилизирующих воздействий D_1 , D_2 и D_3 и поэтому в линейном приближении преобразовательные свойства функциональных элементов и всей подсистемы можно описать с помощью передаточных функций. В приведенной схеме (рис. 6.7) УМ выполняет функцию интегрирующего усилителя мощности, которая описывается на линейном участке статической характеристики следующей передаточной функцией:

$$W_{\text{ум}}(s) = \frac{U_{\text{я}}(s)}{U_{\text{y}}(s)} = \frac{K_{\text{ум}}}{s}, \quad (6.4)$$

где $K_{\text{ум}}$ – коэффициент усиления.

Преобразовательные свойства электрического двигателя в результате линеаризации исходных уравнений могут быть представлены передаточной функцией вида

$$W_{\text{эд}}(s) = \frac{\Omega(s)}{U_{\text{я}}(s)} = \frac{K_{\text{эд}}}{T_{\text{эд}}s + 1}, \quad (6.5)$$

где $K_{\text{эд}}$ – коэффициент передачи;

$T_{\text{эд}}$ – постоянная времени.

Преобразовательные свойства ТГ на линейном участке описываются так:

$$W_{\text{т}}(s) = \frac{U_{\text{т}}(s)}{\Omega(s)} = k_{\text{т}}, \quad (6.6)$$

где $k_{\text{т}}$ – коэффициент передачи.

В векторно-матричной форме преобразование изображений сигналов в ОРУ можно представить в следующей форме:

$$\begin{bmatrix} U_{\text{я}}(s) \\ U_{\text{т}}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{\text{ум}}(s) \\ W_{\text{ум}}(s)W_{\text{эд}}(s)W_{\text{т}}(s) \end{bmatrix} U_{\text{y}}(s). \quad (6.7)$$

В пространстве непрерывных состояний преобразование временных сигналов в ОРУ может быть представлено системой векторно-матричных уравнений:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_{\text{эд}}}{T_{\text{эд}}} & -\frac{1}{T_{\text{эд}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{\text{ум}} \\ 0 \end{bmatrix} u_{\text{y}}(t); \quad x_1(t_0) = x_{10}; \quad x_2(t_0) = x_{20}; \quad (6.8)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\text{я}}(t) \\ u_{\text{т}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & k_{\text{т}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}.$$

Для перехода к описанию в пространстве дискретных состояний примем следующее предположение. Преобразование сигналов в функциональных элементах АЦП и ЦАП безинерционное с коэффициентами передачи, равными единице. Использование этого предположения позволит упростить последующее изложение особенностей рационального управления. При формировании дискретных уравнений воспользуемся формулой Эйлера:

$$\dot{x}_1(t) \approx \frac{x_1(k+1) - x_1(k)}{T_0}; \quad \dot{x}_2(t) \approx \frac{x_2(k+1) - x_2(k)}{T_0}, \quad (6.9)$$

где T_0 – период квантования.

После соответствующих преобразований получим следующую систему дискретных уравнений в векторно-матричной форме:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\kappa_{эд} T_0}{T_{эд}} & 1 - \frac{T_0}{T_{эд}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \kappa_{ум} T_0 \\ 0 \end{bmatrix} u_y(k); & \begin{aligned} x_1(k_0) &= x_{10}; \\ x_2(k_0) &= x_{20}; \end{aligned} \\ \begin{bmatrix} u_y(k) \\ u_{тг}(k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \kappa_{тг} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6.10)$$

Проанализируем свойства управляемости и наблюдаемости ОРУ по Калману. В соответствии с (2.6) сформируем матрицу R:

$$R = [b, Ab] = \begin{bmatrix} \kappa_{ум} T_0 & \kappa_{ум} T_0 \\ 0 & \frac{\kappa_{эд} \kappa_{ум} T_0}{T_{эд}} \end{bmatrix}. \quad (6.11)$$

Очевидно, что $\text{rang } R = 2$, следовательно, ОРУ полностью управляем. Далее сформируем матрицу наблюдаемости Q:

$$Q = [C^T, (CA)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & \frac{\kappa_{тг} \kappa_{эд} T_0}{T_{эд}} \\ 0 & \kappa_{тг} & 0 & \kappa_{тг} \left(1 - \frac{T_0}{T_{эд}} \right) \end{bmatrix}. \quad (6.12)$$

В матрице Q два первых столбца линейно независимы, поэтому $\text{rang } Q = 2$, что означает полную наблюдаемость ОРУ.

Для анализа устойчивости ОРУ формируется характеристическое уравнение вида $\dim [zI - A] = 0$. Для ОРУ характеристическое уравнение будет таким:

$$(z-1) \left(z - 1 + \frac{T_0}{T_{эд}} \right) = 0. \quad (6.13)$$

Из этого уравнения следует, что $z_1 = 1$, а $z_2 = 1 - \frac{T_0}{T_{эд}}$. Значение первого

корня свидетельствует, что z_1 находится на границе устойчивости. Второй корень z_2 находится внутри круга единичного радиуса. Следовательно, ОРУ

В пространстве непрерывных состояний связи переменных можно представить в следующей векторно-матричной форме:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_{эд}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\kappa_{ум}\kappa_{эд}}{T_{эд}} \end{bmatrix} u_y(t); & \begin{aligned} x_1(t_0) &= x_{10}; \\ x_2(t_0) &= x_{20}; \end{aligned} \\ \begin{bmatrix} u_{тг1}(t) \\ u_{тг2}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \kappa_{тг1} & 0 \\ \kappa_{тг2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6.16)$$

В пространстве дискретных состояний преобразовательные свойства ОРУ можно представить системой конечно-разностных уравнений вида:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 - \frac{T_0}{T_{эд}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\kappa_{ум}\kappa_{эд}T_0}{T_{эд}} \end{bmatrix} u_y(k); & \begin{aligned} x_1(k_0) &= x_{10}; \\ x_2(k_0) &= x_{20}; \end{aligned} \\ \begin{bmatrix} u_{тг1}(k) \\ u_{тг2}(k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \kappa_{тг1} & 0 \\ \kappa_{тг2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6.17)$$

Анализ полученной системы уравнений по критериям Калмана и Ляпунова свидетельствует о полной управляемости и наблюдаемости ОРУ в номинальном режиме функционирования, а также о неустойчивости в реакции на управляющее воздействие $u_y(k)$. Устойчивость ОРУ может быть обеспечена формированием соответствующего алгоритма управления в УРУ.

Управляющие моменты $m_i(t)$, развиваемые двигателями-маховиками (рис. 6.7, рис. 6.9), оказывают на космический аппарат различное влияние, зависящее от схемы установки. Так, для схемы установки приводов «куб» (рис. 6.4) управляющие моменты по осям связанной системы координат будут формироваться следующим образом:

$$\begin{bmatrix} m_x(t) \\ m_y(t) \\ m_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \sin \alpha_1 \cos \beta_1 \\ 0 & 1 & 0 & \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \\ 0 & 0 & 1 & \cos \beta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1(t) \\ m_2(t) \\ m_3(t) \\ m_4(t) \end{bmatrix}. \quad (6.18)$$

Для схемы установки приводов «пирамида» так:

$$\begin{bmatrix} m_x(t) \\ m_y(t) \\ m_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha_2 \sin \beta_2 & -\sin \alpha_2 \sin \beta_2 & -\sin \alpha_2 \sin \beta_2 & \sin \alpha_2 \cos \beta_2 \\ \cos \alpha_2 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_2 \\ \sin \alpha_2 \cos \beta_2 & \sin \alpha_2 \cos \beta_2 & \sin \alpha_2 \cos \beta_2 & \sin \alpha_2 \cos \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1(t) \\ m_2(t) \\ m_3(t) \\ m_4(t) \end{bmatrix}. \quad (6.19)$$

Блок двигателей-маховиков, установленных по схеме «куб», может быть описан с помощью блочных матриц и векторов в дискретном пространстве состояний с использованием системы (6.17) в такой форме:

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_1(k+1) \\ \bar{x}_2(k+1) \\ \bar{x}_3(k+1) \\ \bar{x}_4(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_1(k) \\ \bar{x}_2(k) \\ \bar{x}_3(k) \\ \bar{x}_4(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{y1}(k) \\ u_{y2}(k) \\ u_{y3}(k) \\ u_{y4}(k) \end{bmatrix}; \quad (6.20)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_1(k_0) & \bar{x}_2(k_0) & \bar{x}_3(k_0) & \bar{x}_4(k_0) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_{10} & x_{20} & x_{30} & x_{40} \end{bmatrix}^T ;$$

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_{\text{тг}}(k) \\ \bar{u}_{\text{тг}}(k) \\ \bar{u}_{\text{тг}}(k) \\ \bar{u}_{\text{тг}}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_1(k) \\ \bar{x}_2(k) \\ \bar{x}_3(k) \\ \bar{x}_4(k) \end{bmatrix}, \quad (6.21)$$

где $\bar{x}_i(k) = \begin{bmatrix} x_1(k+1) & x_2(k+1) \end{bmatrix}^T$;

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 - \frac{T_0}{T_{\text{эд}}} \end{bmatrix}; \quad b_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\kappa_{\text{ум}} \kappa_{\text{эд}} T_0}{T_{\text{эд}}} \end{bmatrix}; \quad C_{ii} = \begin{bmatrix} \kappa_{\text{тг1}} & 0 \\ \kappa_{\text{тг2}} & 0 \end{bmatrix}.$$

Таким образом $\dim \bar{x}(k) = 8$ блочной матрицы A -(8x8); блочной матрицы B -(8x4); блочной матрицы C -(8x8).

Итак, в этом параграфе представлены различные формы математического описания преобразовательных свойств в номинальном режиме для двух функциональных схем ОРУ.

6.3 Диагностическое обеспечение блока электромаховичных приводов

Диагностическое обеспечение состоит из диагностических моделей, алгоритмов и программ, получаемых в результате решения задач сигнально-параметрического диагностирования (рис. 3.2).

Опишем множества возможных дестабилизирующих воздействий для функциональной схемы, представленной на рис. 6.7. Множество $D_1 = \{d_{11}, d_{12}, \dots, d_{16}\}$, состоит из следующих видов отказов: d_{11} – уменьшение коэффициента усиления УМ; d_{12} и d_{13} – соответственно положительный и отрицательный дрейфы; d_{14} и d_{15} – соответственно пробой положительного и отрицательного плеча; d_{16} – обрыв входа. Для ЭД множество $D_2 = \{d_{21}, d_{22}, \dots, d_{25}\}$ состоит из пяти таких видов отказов: d_{21} – уменьшение коэффициента передачи ЭД; d_{22} – увеличение момента сопротивления вращению ротора; d_{23} – увеличение постоянной времени; d_{24} – короткое замыкание в цепи управления; d_{25} – обрыв в цепи управления. Для ТГ выделим четыре дестабилизирующих воздействия $D_3 = \{d_{31}, d_{32}, \dots, d_{34}\}$ следующих видов: d_{31} – уменьшение коэффициента передачи ТГ; d_{32} и d_{33} – положительный и отрицательный дрейфы, соответственно; d_{34} – обрыв сигнального привода.

Для обнаружения дестабилизации в блоке электромаховичных приводов согласно п. 3.2 требуется сформировать эталонные модели. Рассмотрим особенность формирования эталонной модели для i -го канала блока. Начнем с простейшей структурно подобной (3.1). Для функциональной схемы, представленной на рис. 6.7, будем для обнаружения дестабилизации использовать один вход $u_y(kT_0)$ и один выход $u_{тг}(kT_0)$. Связь между этими сигналами можно представить для эталонной модели в такой форме:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(k+1) \\ \hat{x}_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 - \frac{T_0}{T_{эд}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_c T_0}{T_{эм}} \end{bmatrix} u_y(k); \quad \begin{bmatrix} x_1(k_0) \\ x_2(k_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (6.22)$$

$$\hat{u}_{тг}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix},$$

где $k_c = k_{ум} k_{эд} k_{тг}$. В более простой форме, удобной для программной реализации, можно представить в форме конечно-разностного уравнения:

$$\hat{u}_{\text{тг}}(k+2) = \left(2 - \frac{T_0}{T_{\text{эд}}}\right) \hat{u}_{\text{тг}}(k+1) + \left(\frac{T_0}{T_{\text{эд}}} - 1\right) \hat{u}_{\text{тг}}(k) + \frac{\kappa_{\text{с}} T_0}{T_{\text{эд}}} u_y(k); \hat{u}_{\text{тг}}(k_0) = 0. \quad (6.23)$$

Любая дестабилизация в ОРУ из множества $D = D_1 \cup D_2 \cup D_3$ (рис. 6.7) приводит или к изменению параметров в системе уравнений (6.10), или к «размытости» выходного сигнала $\tilde{u}_{\text{тг}}(k)$.

Все такие изменения в ОРУ можно обнаружить с помощью следующего отклонения:

$$\Delta u_{\text{тг}}(k+2) = \tilde{u}_{\text{тг}}(k+2) - \hat{u}_{\text{тг}}(k+2) \quad (6.24)$$

при использовании простейшего предикатного уравнения вида

$$z_0 = S_2 \left\{ \left| \Delta u_{\text{тг}}(k+2) \right| \geq \delta_0 \right\}; k = \overline{1, n_0}; p_0 = 0,9, \quad (6.25)$$

где δ_0 – допуск на отклонение;

n_0 – количество измерений на интервале диагностирования;

p – коэффициент доверия.

В рассматриваемой функциональной схеме (рис. 6.7) выделены три фрагмента дестабилизации, а именно, УМ, ЭД и ТГ, на которые действуют соответствующие дестабилизирующие воздействия из множеств D_1 , D_2 и D_3 . Локализовать дестабилизированный УМ возможно, используя сигналы $u_y(kT_0)$ и $u_{\text{ум}}(kT_0)$.

Для локализации этого фрагмента функциональной схемы можно использовать ДФМ в такой форме:

$$\Delta u_{\text{ум}}(k+1) = \Delta u_{\text{ум}}(k) + T_0 \Delta \kappa_{\text{ум}} u_y(k), \quad (6.26)$$

где $\Delta \kappa_{\text{ум}} = \tilde{\kappa}_{\text{ум}} - \kappa_{\text{н}}$ – отклонение коэффициента передачи УМ.

С использованием предикатного уравнения

$$z_{\text{им1}} = S_2 \left\{ \left| \Delta u_{\text{ум}}(k+1) \right| \geq \delta_1 \right\}; k = \overline{n_0, n_1}; p_1 = 0,7 \quad (6.27)$$

можно локализовать дестабилизирующие воздействия из множества D_1 .

Локализация фрагментов ЭД и ТГ, подверженных дестабилизирующим воздействиям из множеств D_2 и D_3 возможна посредством использования

ДФМ для соединения ЭД+ТГ. Так при дестабилизации ТГ прямым признаком выберем $\Delta k_{\text{тг}} = \tilde{k}_{\text{тг}} - k_{\text{тг}}$, тогда косвенный признак $\Delta u_{\text{тг}}(k+1)$ будет определяться следующим выражением:

$$\Delta u_{\text{тг}}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{эд}}}\right) \Delta u_{\text{тг}}(k) + \frac{T_0}{T_{\text{эд}}} k_{\text{эд}} u_{\text{я}}(k) \Delta k_{\text{тг}}. \quad (6.28)$$

При некоторых видах дестабилизации ЭД в качестве прямого признака можно использовать $\Delta T_{\text{эд}} = \tilde{T}_{\text{эд}} - T_{\text{эд}}$, тогда уравнение ДФМ будет таким:

$$\Delta u_{\text{тг}}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{эд}}}\right) \Delta u_{\text{тг}}(k) + \frac{T_0}{T_{\text{эд}}^2} u_{\text{тг}}(k) \Delta T_{\text{эд}} - \frac{T_0}{T_{\text{эд}}^2} k_{\text{эд}} k_{\text{тг}} u_{\text{я}}(k) \Delta T_{\text{эд}}. \quad (6.29)$$

Локализация дестабилизирующих воздействий из множеств в D_2 или D_3 в ряде практических случаев может быть осуществлена с использованием следующего предикатного уравнения:

$$z_{\text{имд1}} = S_2 \left\{ \delta_2 - \left[\Delta u_{\text{тг}}(k+1) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{эд}}}\right) \Delta u_{\text{тг}}(k) \right] u_{\text{я}}(k+1) - \right. \\ \left. - \left[\Delta u_{\text{тг}}(k+2) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{эд}}}\right) \Delta u_{\text{тг}}(k+1) \right] u_{\text{я}}(k) \right\}; \quad k = \overline{n_1, n_2}; p_2 = 0, 7. \quad (6.30)$$

При выполнении условия $\delta_2 \geq |\cdot|$ в аргументе предиката $z_{\text{имд1}}=1$, что означает дестабилизацию в ТГ, а при $\delta < |\cdot| - z_2=0$, что свидетельствует о неработоспособности ЭД.

Для решения задачи определения типов дестабилизации требуется посредством параметризации элементов множеств D_1 , D_2 и D_3 сформировать типы. В результате параметризации видов дестабилизирующих воздействий УМ сформировано множество $\alpha_{\text{ум}} = \{\alpha_{\text{ум1}}, \alpha_{\text{ум2}}, \alpha_{\text{ум3}}\}$, содержащее такие типы: $\alpha_{\text{ум1}}$ – тип, объединяющий виды дестабилизирующих воздействий d_{11} , d_{16} и характеризующийся параметром $\tilde{k}_{\text{ум}}$; $\alpha_{\text{ум2}}$ – тип для видов d_{12} , d_{13} с параметром $\tilde{u}_{\text{ум0}}$; $\alpha_{\text{ум3}}$ – тип дестабилизации, объединяющий виды d_{14} , d_{15} и характеризующийся параметрами $\tilde{k}_{\text{ум}}$ и $\tilde{u}_{\text{ум0}}$.

Параметризация видов дестабилизирующих воздействий ЭД позволила сформировать множество $\alpha_{эд} = \{\alpha_{эд1}, \alpha_{эд2}, \alpha_{эд4}\}$ следующих типов дестабилизации: $\alpha_{эд1}$ – тип для видов d_{21}, d_{24} с параметром $\tilde{\kappa}_{эд}$; $\alpha_{эд2}$ – тип с видом d_{22} и характеризующийся параметром $\tilde{m}_c$; $\alpha_{эд3}$ – тип, совпадающий с видом d_{33} и описываемый параметром $\tilde{T}_{эд}$; $\alpha_{эд4}$ – тип, включающий вид d_{25} с параметром $\tilde{\kappa}_{об}$.

В результате параметризации видов дестабилизирующих воздействий ТГ сформировано множество $\alpha_{тг} = \{\alpha_{тг1}, \alpha_{тг2}\}$, содержащее такие типы: $\alpha_{тг1}$ – тип, покрывающий виды d_{31}, d_{34} и характеризующийся параметром $\tilde{\kappa}_{тг}$; $\alpha_{тг2}$ – тип, включающий виды d_{32}, d_{33} с параметром $\tilde{u}_{тг0}$.

Представим теперь уравнение ДФМ для типов дестабилизации УМ:

$$\alpha_{ум1} : \Delta u_{ум}(k+1) = \Delta u_{ум}(k) + T_0 \Delta \kappa_{ум} u_y(k);$$

$$\alpha_{ум2} : \Delta u_{ум}(k+1) = \Delta u_{ум}(k) + T_0 \tilde{u}_{ум0};$$

$$\alpha_{ум3} : \Delta u_{ум}(k+1) = \Delta u_{ум}(k) + T_0 \Delta \kappa_{ум} u_y(k) + T_0 \tilde{u}_{ум0}.$$

Уравнение ДФМ для типов дестабилизации соединения ЭД+ТГ будут иметь следующий вид:

$$\alpha_{эд1} : \Delta u_{тг}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{эд}}\right) \Delta u_{тг}(k) + \frac{T_0}{T_{эд}} \kappa_{тг} \Delta \kappa_{эд} u_y(k);$$

$$\alpha_{эд2} : \Delta u_{тг}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{эд}}\right) \Delta u_{тг}(k) + \frac{T_0}{T_{эд}} \kappa_{тг} \Delta m_c;$$

$$\alpha_{эд3} : \Delta u_{тг}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{эд}}\right) \Delta u_{тг}(k) + \frac{T_0}{T_{эд}} \left(u_{тг}(k) - \kappa_{эд} \kappa_{тг} u_y(k)\right) \Delta T_{эд};$$

$$\alpha_{эд4} : \Delta u_{тг}(k+1) = -\hat{u}_{тг}(k+1);$$

$$\alpha_{тг1} : \Delta u_{тг}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{эд}}\right) \Delta u_{тг}(k) + \frac{T_0}{T_{эд}} \Delta \kappa_{тг} \kappa_{эд} u_y(k);$$

$$\alpha_{тг2} : \Delta u_{тг}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{эд}}\right) \Delta u_{тг}(k) + \frac{T_0}{T_{эд}} \tilde{u}_{тг0}.$$

Для обеспечения условий диагностируемости типов дестабилизации с помощью представленных ДФМ требуется произвести анализ структурных и

сигнальных свойств с помощью соответствующих критериев, затем с использованием ДЛМ и процедур оптимизации сформировать оптимальную совокупность булевых признаков для дихотомической структуры поиска типов. Выполнив эти процедуры, получим каноническую совокупность признаков типов дестабилизации. Приведем описание некоторых признаков. Так, для определения трех типов дестабилизации УМ можно использовать два булевых признака такой структуры:

$$z_{\text{умд1}} = S_2 \left[\delta_1 - \left| \left(\Delta u_{\text{ум}}(k+1) - \Delta u_{\text{ум}}(k) \right) u_y(k+1) - \left(\Delta u_{\text{ум}}(k+2) - \Delta u_{\text{ум}}(k+1) \right) u_y(k) \right| \right];$$

$$k = \overline{n_1, n_2}; p = 0,8;$$

$$z_{\text{умд2}} = S_2 \left[\delta_1 - \left| \left(\Delta u_{\text{ум}}(k+2) - 2\Delta u_{\text{ум}}(k+1) + \Delta u_{\text{ум}}(k) \right) \right| \right]; k = \overline{n_2, n_3}; p = 0,8.$$

Для определения в ЭД типа дестабилизации $\alpha_{\text{эд1}}$ можно использовать следующее предикатное уравнение:

$$z'_{\text{эдд1}} = S_2 \left[\delta_2 - \left| \left(\Delta u_{\text{тг}}(k+1) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{эд}}} \right) \Delta u_{\text{тг}}(k) \right) u_y(k+1) - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(\Delta u_{\text{тг}}(k+2) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{эд}}} \right) \Delta u_{\text{тг}}(k+1) \right) u_y(k) \right| \right]; k = \overline{n_1, n_2}; p = 0,8,$$

а для типа дестабилизации $\alpha_{\text{эд2}}$ такое уравнение:

$$z_{\text{эдд2}} = S_2 \left[\delta_2 - \left| \left(\Delta u_{\text{тг}}(k+2) - \left(2 - \frac{T_0}{T_{\text{эд}}} \right) \Delta u_{\text{тг}}(k+1) + \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{эд}}} \right) \Delta u_{\text{тг}}(k) \right) \right| \right];$$

$$k = \overline{n_2, n_3}; p = 0,8.$$

Следующая основная задача диагностирования после определения типов – это идентификация видов дестабилизирующих воздействий. Для множества дестабилизирующих воздействий для ЭД – множество D_2 , тип $\alpha_{\text{эд2}}$ совпадает с видом d_{22} , тип $\alpha_{\text{эд3}}$ – это вид d_{33} , а тип $\alpha_{\text{эд4}}$ означает вид d_{25} . Для других типов дестабилизации ОРУ требуется решить задачи формирования процедур идентификации видов дестабилизирующих воздействий. Ключевым моментом при этом для рассматриваемой функциональной схемы ОРУ (рис 6.7) представляется формирование предикатных уравнений. Приведем ряд таких уравнений. Так, для идентификации таких видов

дестабилизирующих воздействий на УМ, как обрыв входа – d_{16} и уменьшение коэффициента усиления – d_{11} можно использовать следующее предикатное уравнение:

$$z_{\text{обум}} = S_2 \left[\delta_1 - \left| \tilde{u}_{\text{ум}}(k+1) - \tilde{u}_{\text{ум}}(k) \right| \right]; k = \overline{n_2, n_3}; p = 0, 7.$$

Для идентификации видов дестабилизирующих воздействий d_{21} и d_{24} , попавших в тип $\alpha_{\text{эд1}}$, используется следующее двузначное предикатное уравнение:

$$z_{\text{обэд}} = S_2 \left[\delta_2 - \left| \tilde{u}_{\text{тг}}(k+1) - \tilde{u}_{\text{тг}}(k) \right| \right]; k = \overline{n_2, n_3}; p = 0, 7.$$

Для идентификации знака дрейфа дестабилизирующих воздействий в ТГ можно использовать такую предикатную конструкцию:

$$z_{\text{полтг}} = S_2 \left[\Delta u_{\text{тг}}(k+1) \geq \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{эд}}} \right) \Delta u_{\text{тг}}(k) \right]; k = \overline{n_2, n_3}; p = 0, 7.$$

В результате решения основных задач диагностирования ОРУ сформировано дихотомическое дерево его диагностирования (рис. 6.10) при дестабилизирующих воздействиях из множества $D = D_1 \cup D_2 \cup D_3$.

Представленное дихотомическое дерево, дополненное уравнениями получения значений булевых признаков, представляет собой алгоритмическую основу для обнаружения дестабилизации в ОРУ, локализации дестабилизированного фрагмента УМ, ЭД или ТГ, определении типов дестабилизации и идентификации конкретных физических видов дестабилизирующих воздействий.

6.4 Восстановление работоспособности блока электромаховичных приводов

Дестабилизирующие воздействия из множества D приводят к искажению функционирования электромаховичных приводов, т.е. к нарушению их работоспособности. Для восстановления работоспособности необходимо в конструкции приводов располагать избыточными ресурсами и средствами их ввода в действие (рис. 4.1).

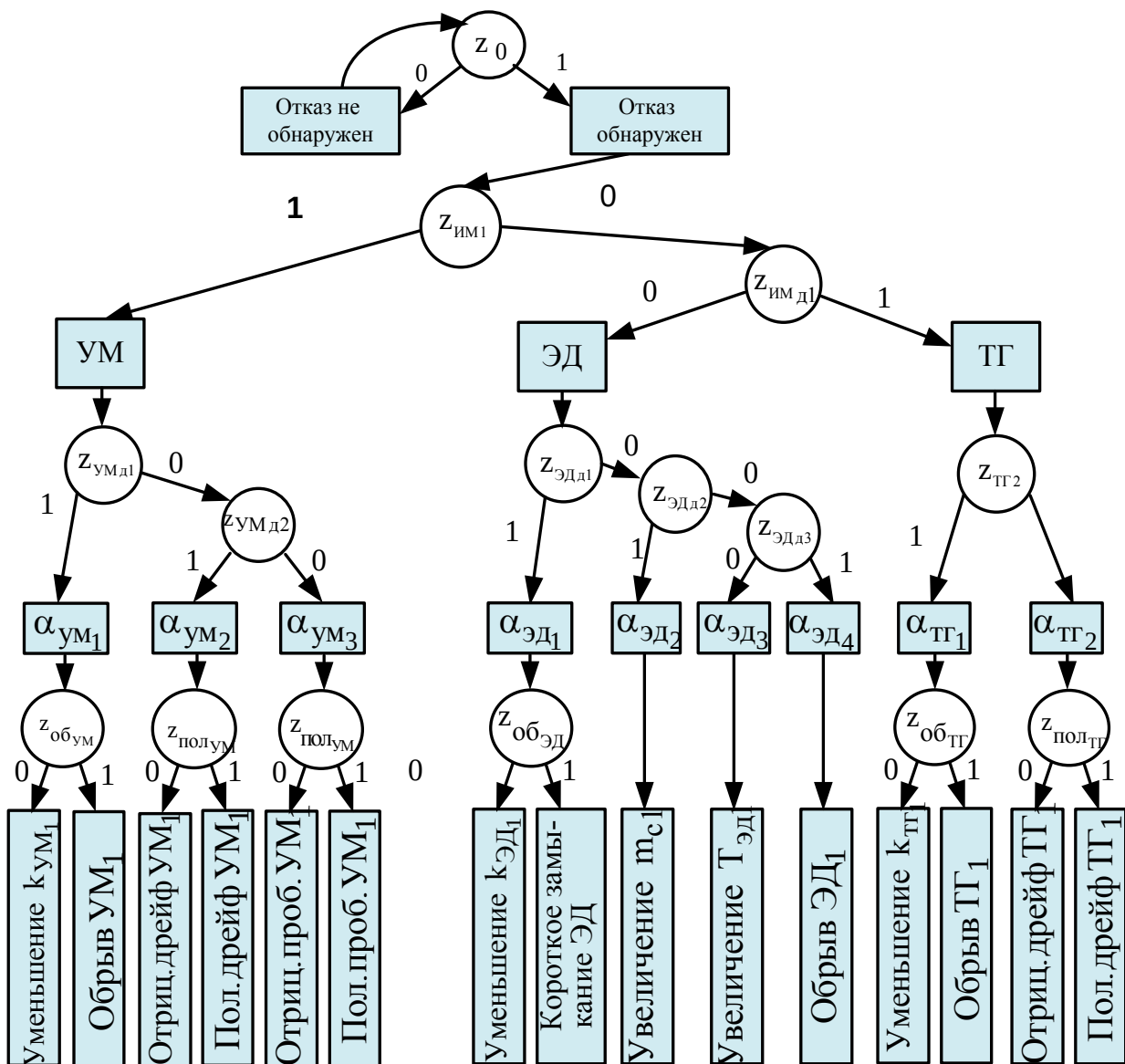


Рисунок 6.10 – Дихотомическое дерево диагностирования объекта рационального управления моментом

Рассмотрим особенности восстановления работоспособности УМ, ЭД и ТГ на примере функциональной схемы цифровой системы рационального управления моментом (рис. 6.7).

В результате диагностирования УМ (рис. 6.10) идентифицируются такие виды, как d_{11} – уменьшение коэффициента усиления $k_{ум}$; d_{12} – положительный дрейф $\tilde{y}_{ум0}$; d_{13} – отрицательный дрейф $-\tilde{y}_{ум0}$; d_{14} – пробой положительного плеча; d_{15} – пробой отрицательного плеча; d_{16} – обрыв входа.

При диагностировании дестабилизирующего воздействия d_{11} восстановить работоспособность УМ возможно посредством его компенсации как параметрической, так и сигнальной подстройкой. Для осуществления параметрической подстройки в УМ должна быть предусмотрена подстройка коэффициента усиления. Для интегрирующего усилителя мощности процесс подстройки можно свести к одноразовому установлению приращения коэффициента усиления $\Delta\hat{k}_{\text{УМ}}$ и поэтому необходимость в синтезе алгоритмов параметрической подстройки с помощью второго метода А.М. Ляпунова отпадает. Величина приращения коэффициента усиления вычисляется по следующим алгоритмам:

$$\Delta k_{\text{УМ}}(k+1) = \frac{\Delta u_{\text{УМ}}(k+1) - \Delta u_{\text{УМ}}(k)}{T_0 u_y(k)} ; \Delta\hat{k}_{\text{УМ}} = \frac{1}{n} \sum_{k=k_0}^n \Delta k_{\text{УМ}}(k+1) .$$

Такая статическая параметрическая подстройка может обеспечить как необходимую устойчивость, так и достаточное качество процесса восстановления работоспособности УМ при дестабилизирующем воздействии d_{11} .

Реализация сигнальной подстройки конструктивно проще, так как дополнительный сигнал $\Delta\hat{u}_{\text{УМ}}$ к основному $\Delta u_y(kT_0)$ (рис. 6.7) формируется в блоке управления – БУ. Оценочное значение дополнительного сигнала

$$\Delta\hat{u}_{\text{УМ}} = \frac{1}{n} \sum_{k=k_0}^n \Delta u_{\text{УМ}}(k+1)$$

суммируется с основным и в результате на вход ЦАП поступает следующая цифровая последовательность:

$$u'_y(n+1) = u_y(n+1) + \Delta\hat{u}_{\text{УМ}} ,$$

обеспечивающая устойчивую и качественную компенсацию дестабилизирующего воздействия d_{11} .

Положительный $\tilde{u}_{\text{УМ}0}$ и отрицательный – $\tilde{u}_{\text{УМ}0}$ дрейфы УМ компенсируются сигнальной подстройкой на величину

$$\hat{u}_{\text{ум}0} = \frac{1}{n} \sum_{k=k_0}^n \frac{\Delta u_{\text{ум}}(k+1) - \Delta u_{\text{ум}}(k)}{T_0}$$

основного сигнала управления

$$u_y''(n+1) = u_y(n+1) \mp \hat{u}_{\text{ум}0},$$

что обеспечивает компенсацию вредного влияния дестабилизирующих воздействий d_{12} и d_{13} , а следовательно, желаемое восстановление работоспособности УМ в этих условиях.

Восстановление работоспособности УМ при видах d_{14} , d_{15} и d_{16} возможно посредством реконфигурации аппаратуры и в частности, замены отказавшего УМ резервным. При этом, после появления сигнала о виде d_{14} или d_{15} или d_{16} выдается команда $d_1(k)$ на отключение входного и выходного сигналов отказавшего УМ. Затем выдается команда $d_2(k+m)$ на отключение питающего напряжения от отказавшего УМ и подключение его к резервному УМ. После подготовки аппаратуры резервного усилителя к работе выдается команда $d_3(k+m)$ на подключение резервного УМ в контур управления, вначале к ЭД, а затем к ЦАП с подачей управляющего сигнала $u_y(kT_0)$, обеспечивающего устойчивое и качественное восстановление работоспособности электромаховичного привода.

Диагностирование ЭД (рис. 6.10) позволяет идентифицировать дестабилизирующие воздействия таких видов: d_{21} – уменьшение коэффициента передачи; d_{22} – увеличение момента сопротивления вращению ротора; d_{23} – увеличение постоянной времени; d_{24} – короткое замыкание в цепи управления и d_{25} – обрыв в цепи управления.

При уменьшении $k_{\text{эд}}$ до 10 % восстановить работоспособность ЭД возможно посредством статической подстройки, заключающейся в таком постоянном увеличении сигнала управления $u_y(kT_0)$ (рис. 6.7), что восстанавливается прежнее значение угловой скорости $\omega(t)$, а, следовательно, и момента $m_i(t)$. Дополнительный постоянный сигнал, компенсирующий уменьшение $k_{\text{эд}}$, вычисляется таким образом:

$$\hat{u}_y = \frac{T_{\text{эд}}}{T_0 k_{\text{ум}} k_{\text{тг}}} \frac{1}{n} \sum_{k=k_0}^n \Delta u_{\text{тг}}(k+1)$$

и тогда новый сигнал управления формируется так:

$$u'_y(n+1) = u_y(n+1) + \hat{u}_y,$$

что обеспечивает качественную компенсацию дестабилизирующего воздействия d_{21} и восстановление работоспособности ОРУ.

Увеличение момента сопротивления вращению ротора – вид d_{22} , возможно с помощью динамической сигнальной подстройки. Для рассматриваемой функциональной схемы (рис. 6.7) с простыми передаточными функциями функциональных элементов возможен синтез сигнальной подстройки не только с помощью второго метода А.М. Ляпунова. Компенсировать увеличение момента сопротивления Δm_c можно формированием управляющего воздействия по отклонению от задающего, т.е. организацией замкнутого контура управления моментом $m_i(t)$. При замыкании УМ и ЭД отрицательной обратной связью с помощью ТГ происходит уменьшение коэффициента передачи управляющего воздействия $u_y(kT_0)$. Поэтому для восстановления работоспособности ОРУ требуется новое управляющее воздействие на ЦАП, сформированное следующим образом:

$$u'_y(k) = \frac{k_{ум}^2 k_{эд}^2 k_{тг}}{1 + k_{ум}^2 k_{эд}^2 k_{тг}} u_y(k) - k_k \tilde{u}_{тг}(k),$$

где k_k – коэффициент коррекции в цепи обратной связи.

Если диагностирован вид дестабилизирующего воздействия d_{33} – увеличение постоянной времени, то компенсировать его можно посредством формирования управляющего воздействия $u_y(k)$, обеспечивающего допустимое время переходного процесса в ОРУ, что будет соответствовать восстановлению работоспособности.

Восстановление работоспособности ЭД при дестабилизирующих воздействиях d_{24} и d_{25} возможно только использованием процедуры реконфигурации аппаратуры (рис. 4.1). Если использовать холодный резерв ЭД, то после получения диагноза об отказе основного ЭД выдается команда $d_1(k)$ на отключение сигнала управления и питающей электрической энергии. Команда $d_2(k+m)$ подается на подключение к резервному ЭД

электрической энергии. После окончания в подключенном ЭД переходных процессов выдается команда $d_3(k+n)$ на подключение сигнала управления, обеспечивающего «мягкое» введение ЭД в процесс восстанавливающего функционирования ОРУ.

Диагностирование ТГ позволяет, согласно рис. 6.10, идентифицировать виды дестабилизирующих воздействий из множества D_3 (рис. 6.7). А именно: d_{31} – уменьшение коэффициента передачи; d_{32} – положительный дрейф; d_{33} – отрицательный дрейф; d_{34} – обрыв сигнального провода. При идентификации вида d_{31} восстановление работоспособности ТГ, в этом случае, возможно использованием статической сигнальной подстройкой выходного сигнала ТГ – $\tilde{u}_{\text{ТГ}}(k)$. Алгоритмически это означает следующее. Вначале формируется оценка отклонения выходного сигнала ТГ

$$\Delta \hat{u}_{\text{ТГ}} = \frac{1}{n} \sum_{k=k_0}^n \Delta u_{\text{ТГ}}(k+1),$$

а затем восстановленный сигнал с ТГ

$$u_{\text{ТГ}}(k) = \tilde{u}_{\text{ТГ}}(k) + \Delta \hat{u}_{\text{ТГ}}.$$

Такая процедура обеспечивает как восстановление работоспособности ТГ, так и всего ОРУ.

Для компенсации дрейфов ТГ целесообразно воспользоваться принципом сигнальной подстройки посредством смещения возмущенного выходного сигнала $\tilde{u}_{\text{ТГ}}(k)$ на величину оценки дрейфа

$$\Delta \hat{u}_{\text{ТГ}} = \frac{1}{n} \sum_{k=k_0}^n \Delta u_{\text{ТГ}}(k+1).$$

Следовательно, восстановленный выходной сигнал ТГ будет формироваться таким образом:

$$u_{\text{ТГ}}(k) = \tilde{u}_{\text{ТГ}}(k) \mp \Delta \hat{u},$$

что обеспечивает устойчивое и качественное восстановление работоспособности ТГ при дрейфовых видах дестабилизации.

При обрыве сигнального провода – вид d_{34} восстановление сигнала ТГ возможно только посредством реконфигурации аппаратуры, т.е. отключением отказавшего ТГ и подключением резервного. При этом после получения диагноза об отказе ТГ выдается команда $d_1(k)$ на отключение выходного сигнала от АЦП (рис. 6.7) и подводимой электроэнергии (если в этом есть необходимость). Далее выдается команда $d_2(k+m)$ на подключение к резервному ТГ электроэнергии и после окончания переходных процессов выдается команда $d_3(k+n)$ на подключения выходного сигнала к АЦП. Таким образом, осуществляется процесс восстановления информации об угловой скорости ЭД.

Для функциональной схемы (рис. 6.9) с двумя ТГ процесс восстановления измерений угловой скорости ЭД при отказе одного из ТГ осуществляется более простым способом. При получении, например, диагноза об отказе ТГ₁ производится по сигналу $d_1(k)$ отключение выхода $u_{тг1}(t)$ от АЦП. Затем по сигналу $d_2(k+m)$ в УРУ производится переход на новый алгоритм обработки только сигнала с выхода ТГ₂, а именно $u_{тг2}(k)$. Такой процедурой осуществляется парирование дестабилизации, вызванной отказом ТГ₁.

Описанные способы и алгоритмические средства не исчерпывают всего многообразия возможных способов, зависящих как от конструкции и множества дестабилизирующих воздействий, так и особенностей избыточных резервных средств а, главное, условий функционирования ОРУ моментом.

6.5 Исследования рационального управления работоспособностью электромаховичного привода

Исследование представленных моделей, методов диагностирования и восстановления работоспособности электромаховичных приводов осуществлялось на кафедральном программном комплексе, позволяющем выполнять следующие операции: моделирование движения системы позиционирования момента в номинальном и нештатных режимах функционирования; введение в функциональные элементы системы видов дестабилизирующих воздействий из заданного множества; диагностирование работоспособности с глубиной до вида дестабилизирующего воздействия; восстановление работоспособности с использованием избыточных ресурсов; визуализация параметров, отражающих функциональное состояние системы. На рис. 6.11 представлено основное окно этого комплекса.

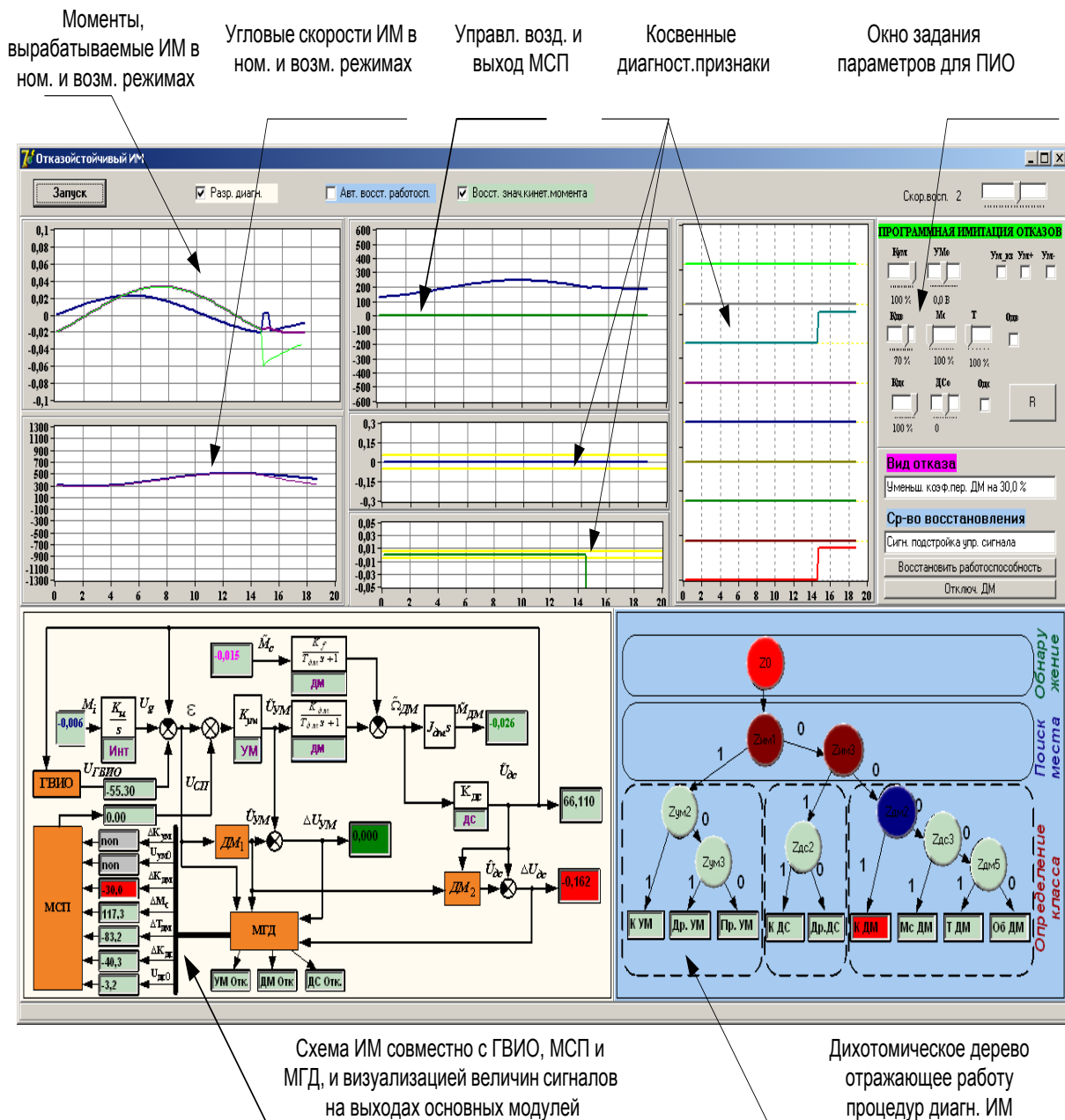


Рисунок 6.11 – Основное окно программного комплекса

На рис. 6.12 – рис. 6.14 представлены процедуры обработки данных в модулях обнаружения и локализации фрагментов, а также восстановления функционального состояния системы позиционирования.

На рис. 6.15 – рис. 6.19 представлены результаты работы модулей диагностирования и восстановления работоспособности системы позиционирования момента при введении различных видов дестабилизирующих воздействий на функциональные элементы.

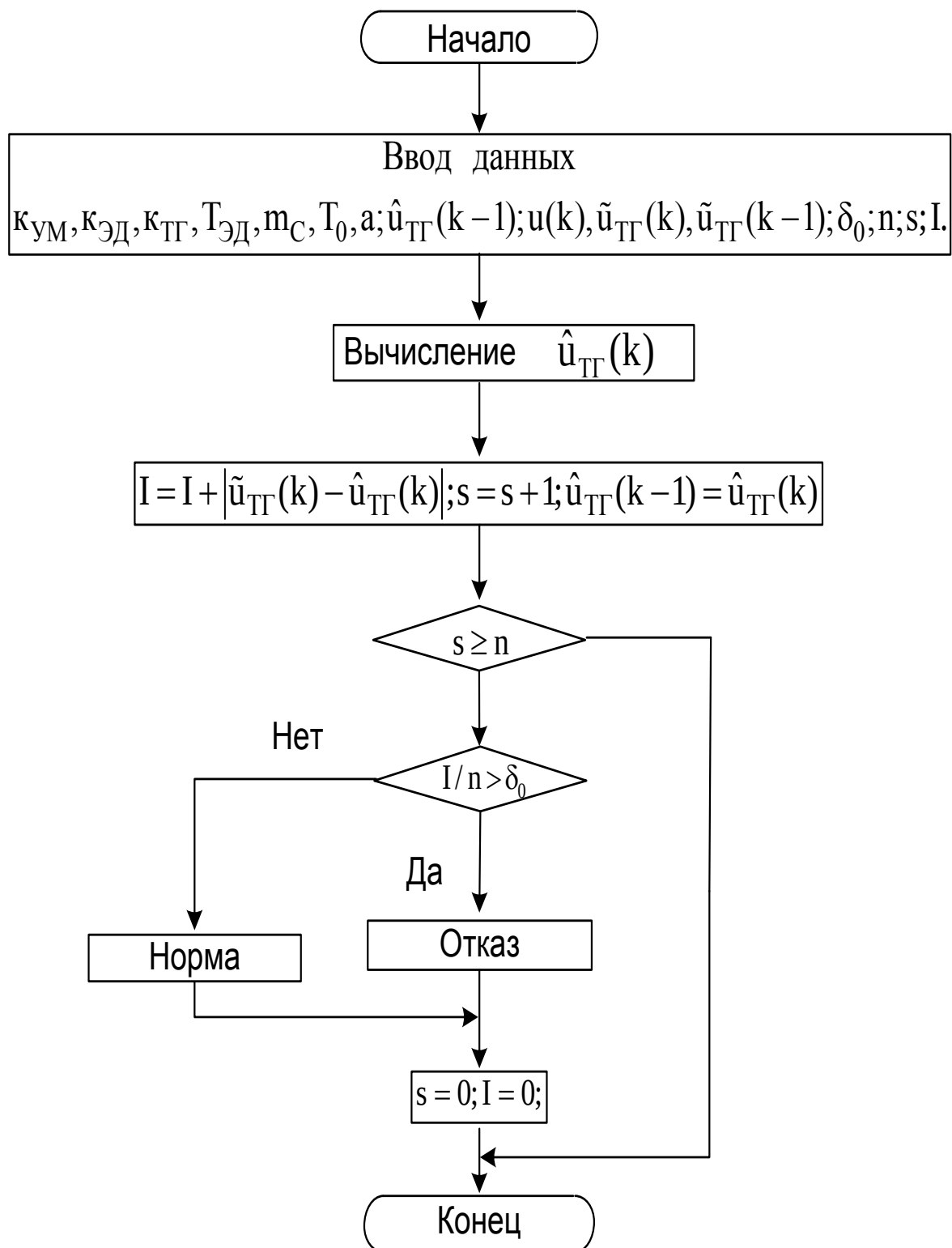


Рисунок 6.12 – Процедура обработки данных в модуле обнаружения

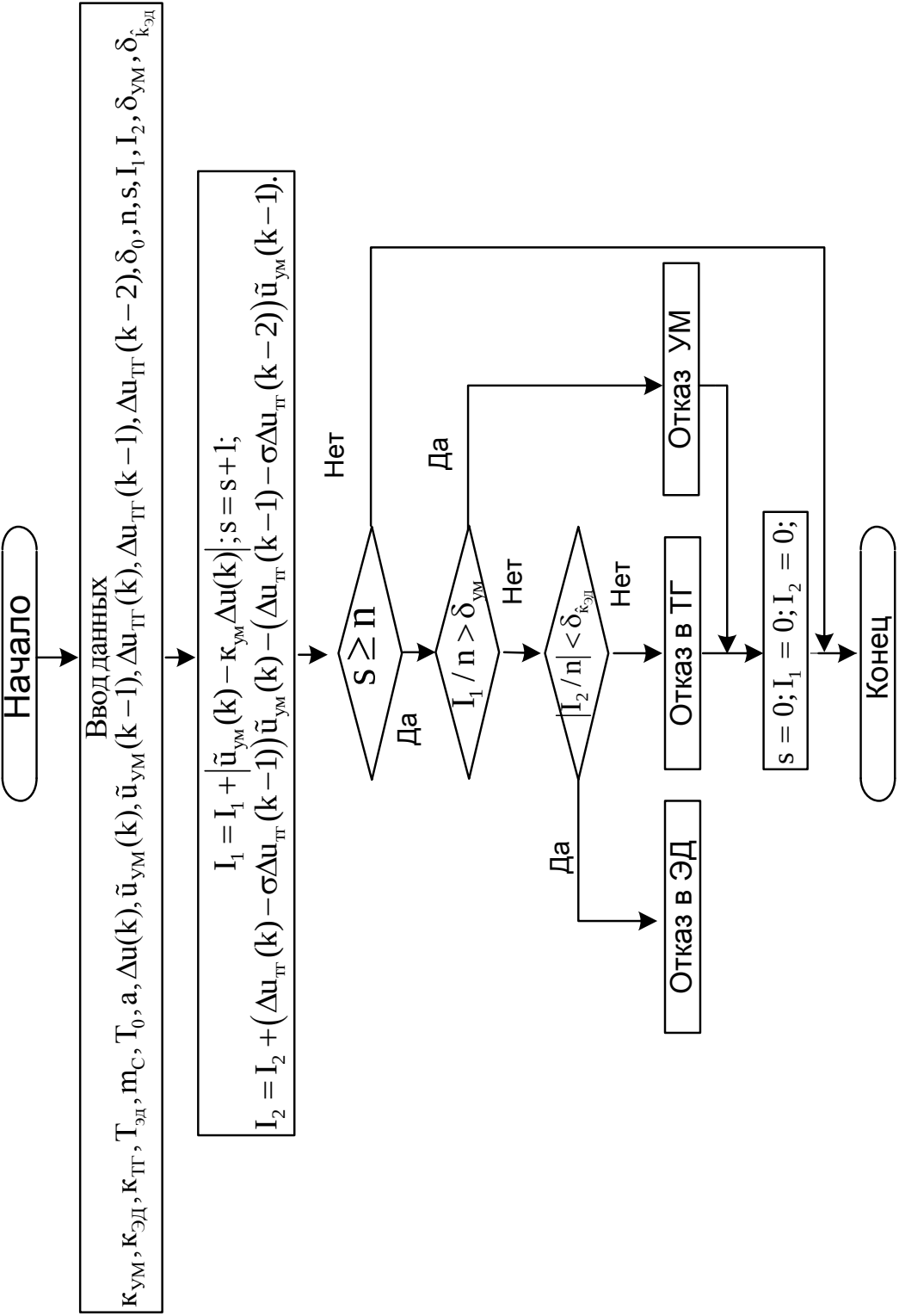


Рисунок 6.13 – Процедура обработки данных в модуле локализации фрагментов

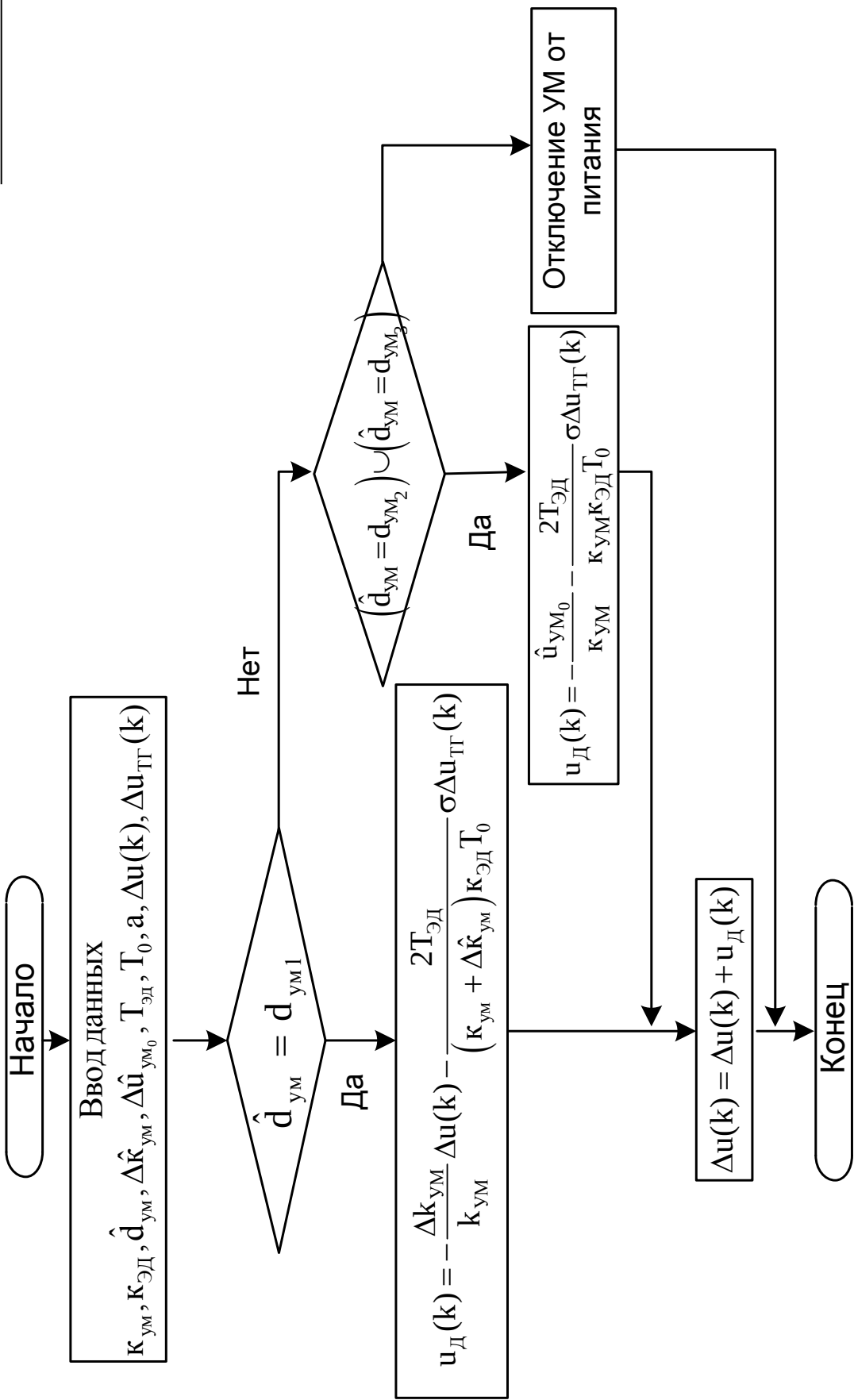


Рисунок 6.14 – Процедура обработки данных в модуле восстановления работоспособности для случая отказа УМ

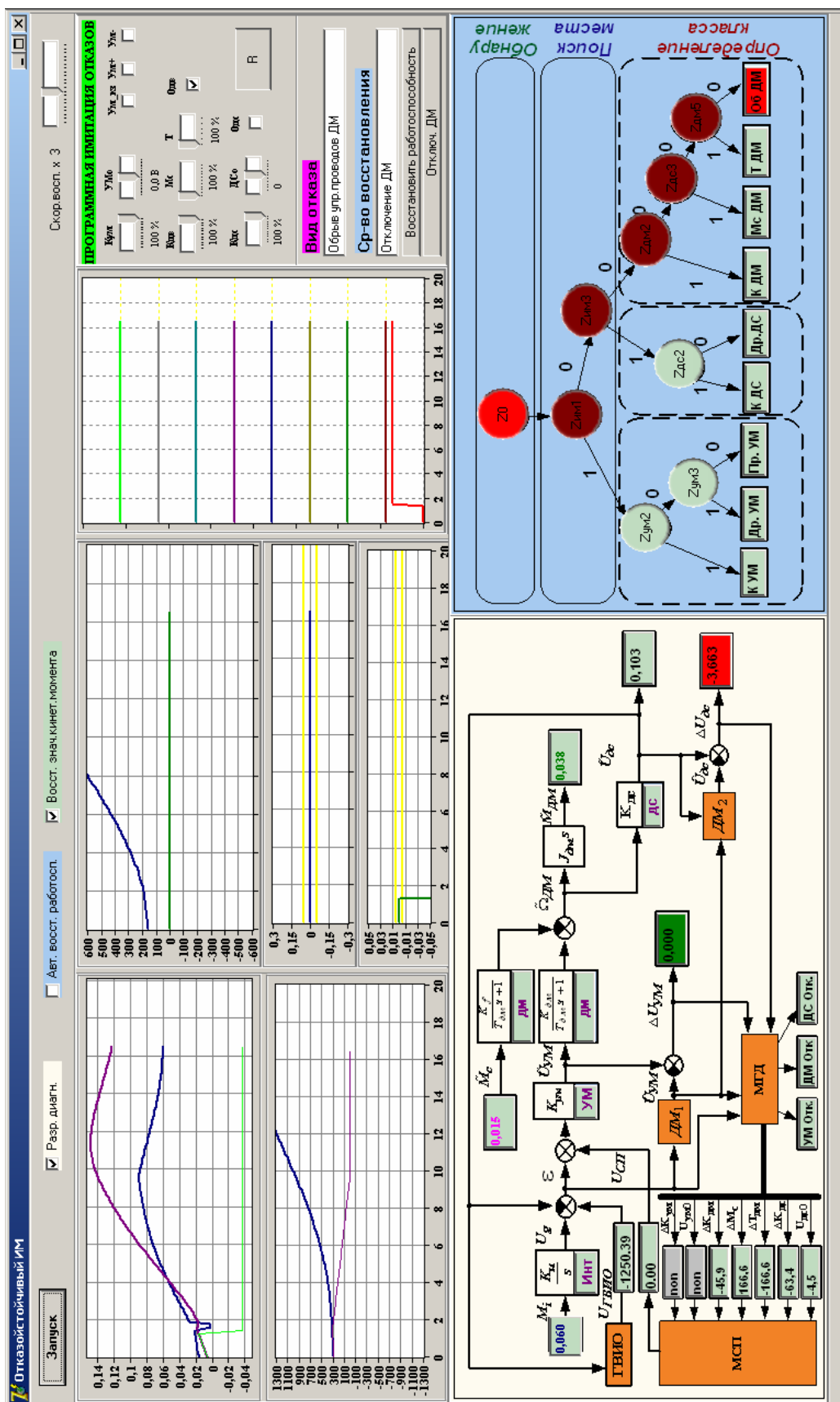


Рисунок 6.15 – Результат работы модуля диагностирования при обрыве управляющего провода ЭД

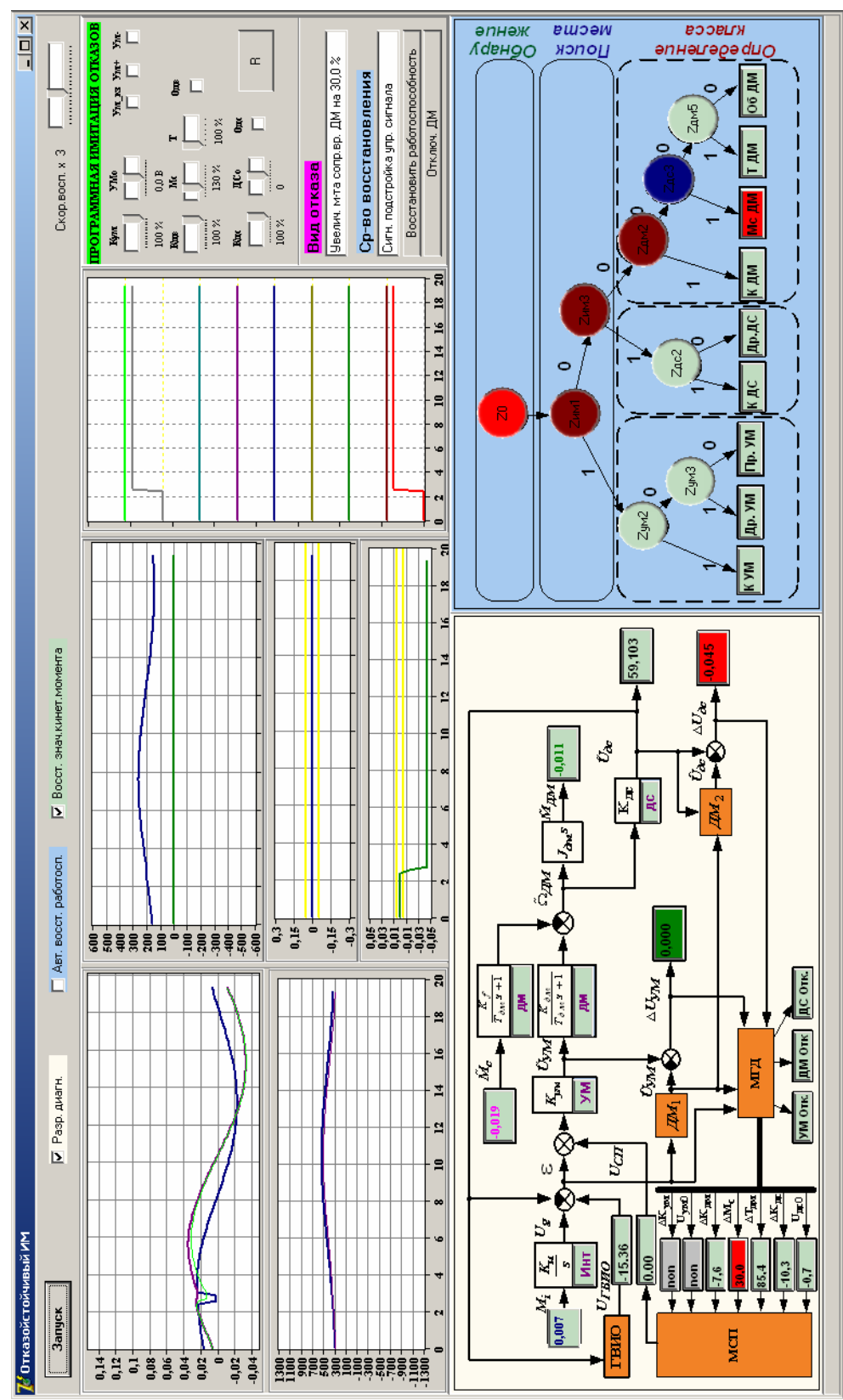


Рисунок 6.16 – Результат работы модуля диагностирования при увеличении момента сухого трения на валу ЭД

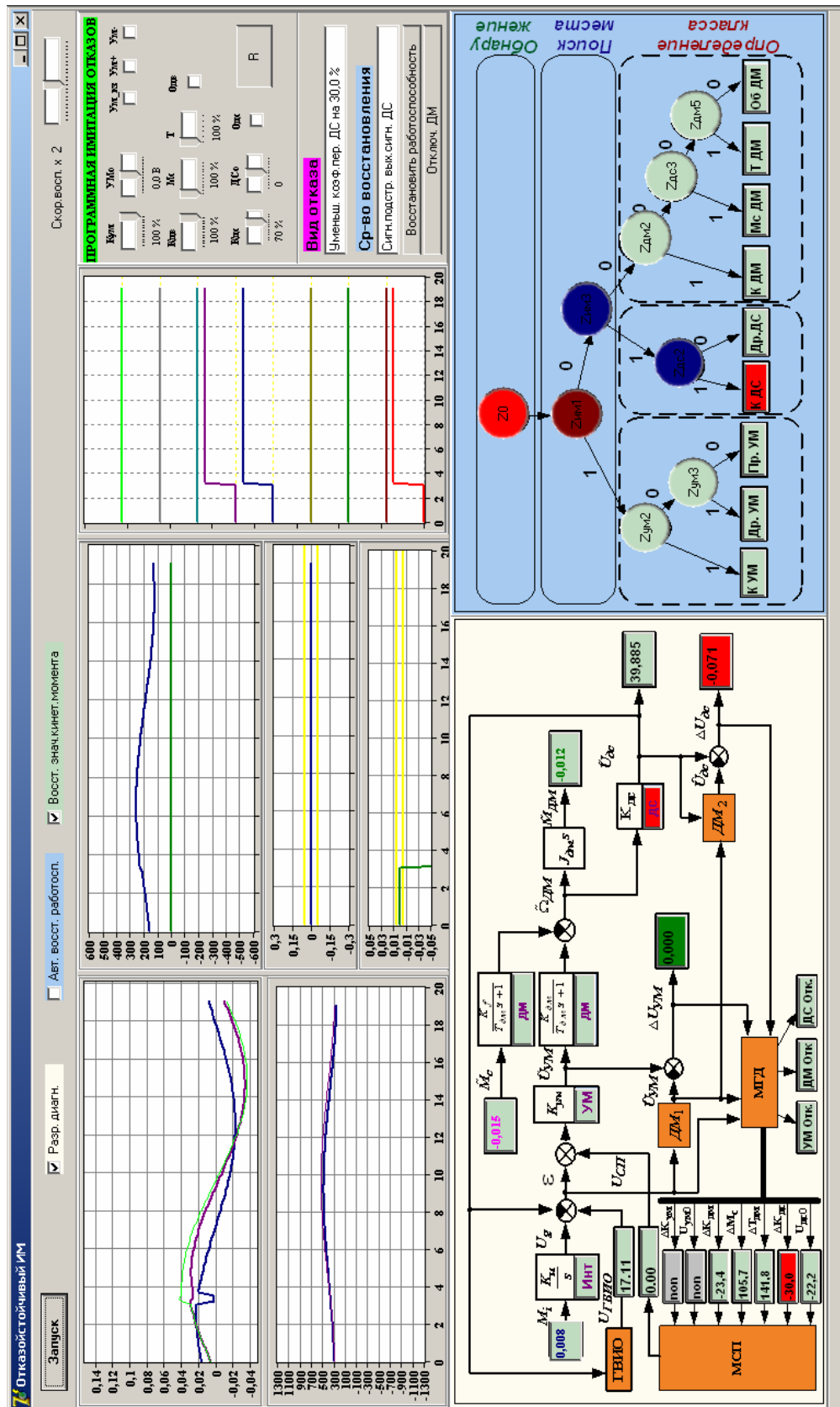


Рисунок 6.17 – Результат работы модуля диагностирования при уменьшении коэффициента передачи ТГ



Рисунок 6.18 – Результат работы модуля восстановления при уменьшении коэффициента передачи ЭД

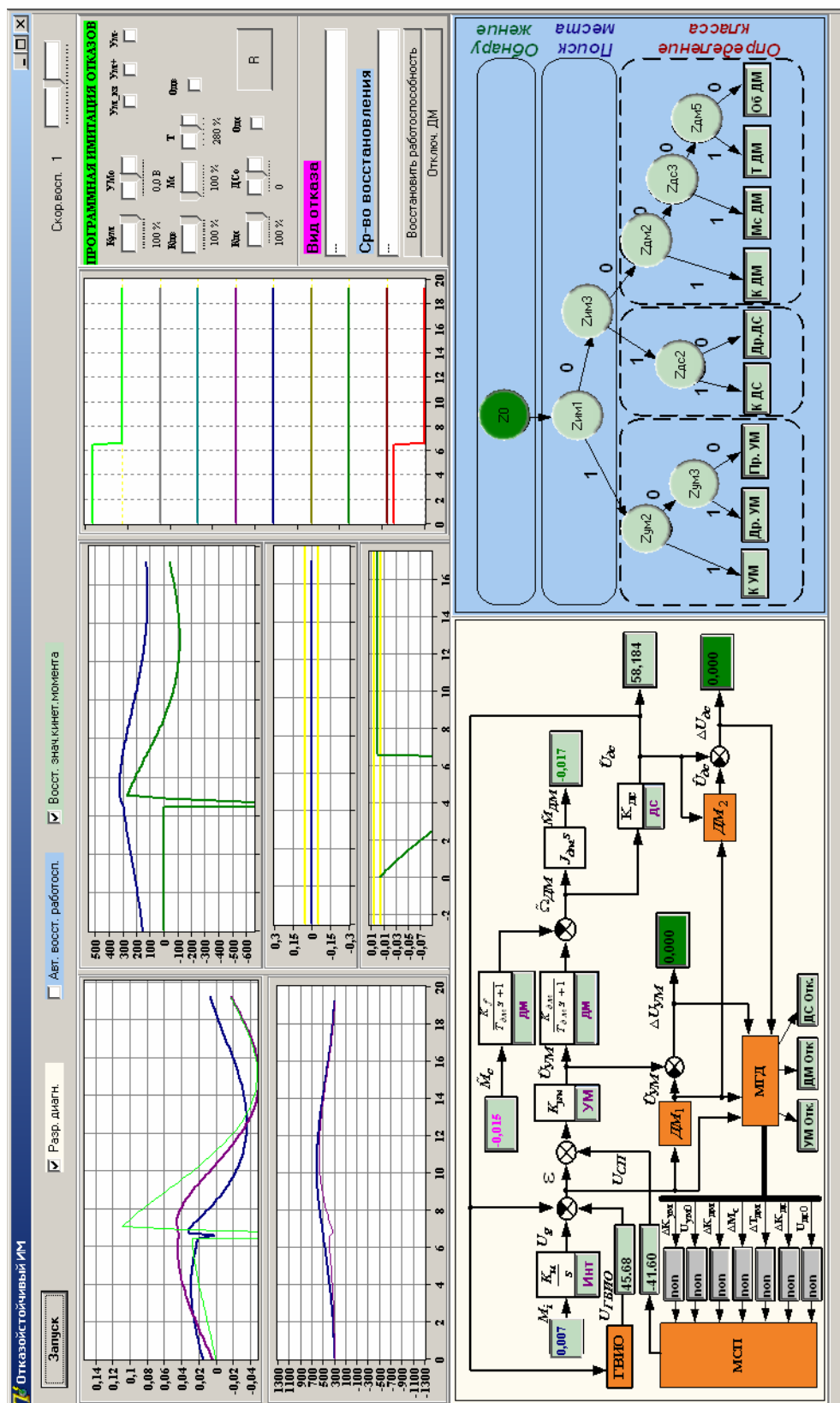
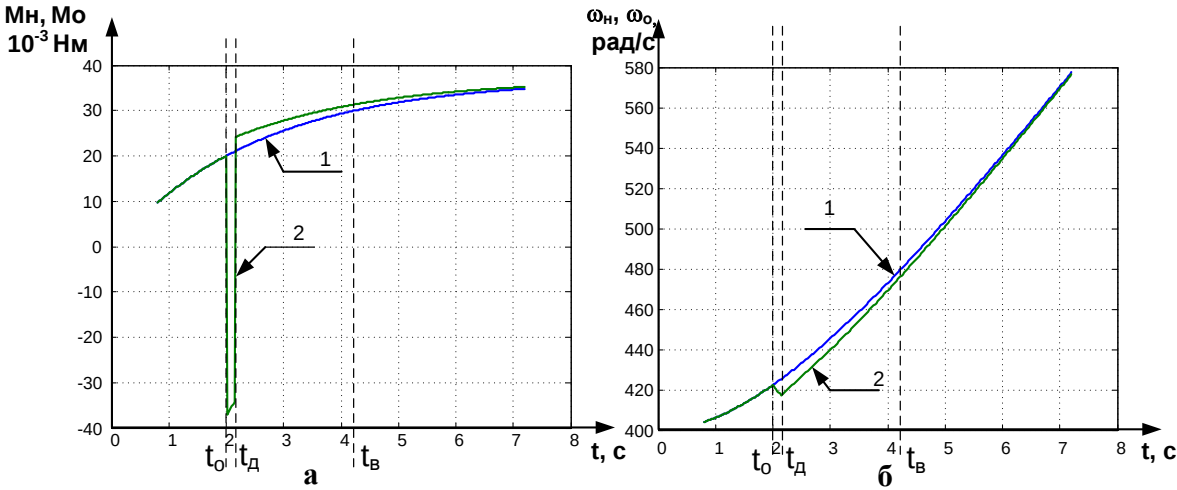


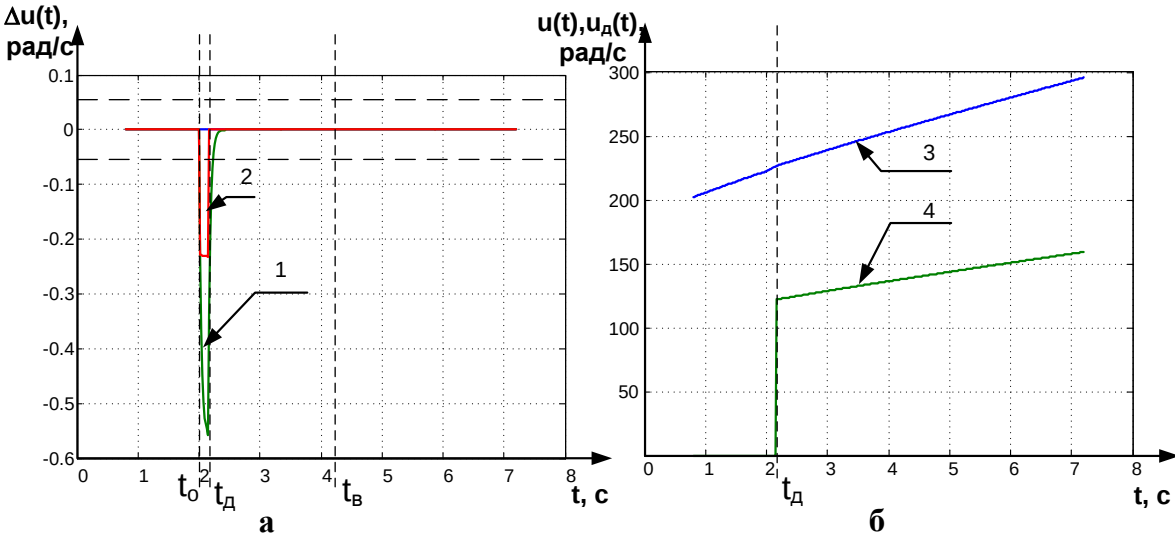
Рисунок 6.19 – Результат работы модуля восстановления при увеличении инерционности ЭД

На рис. 6.20 и рис. 6.21 более подробно представлены временные диаграммы процессов в системе позиционирования управляющего момента двигателя-маховика в случае возникновения нештатной ситуации, вызванной уменьшением коэффициента передачи электродвигателя на 30 %.



а – по управляющему моменту ДМ; б – по угловой скорости ДМ; 1 – для номинального режима функционирования; 2 – для нештатного режима с диагностированием и восстановлением

Рисунок 6.20 – Временные диаграммы переходных процессов в системе позиционирования



а - времени и локализации фрагмента в системе позиционирования; б – управляющих воздействий в системе позиционирования; 1 – признак момента обнаружения; 2 – признак локализации фрагмента; 3 – номинальное значение управления; 4 – дополнительное управление для парирования дестабилизирующего воздействия

Рисунок 6.21 – Временные диаграммы изменения косвенных диагностических признаков

На рисунках введены следующие обозначения: t_0 – время обнаружения дестабилизации в системе; t_d – время завершения процедур диагностирования; t_b – время окончательного восстановления работоспособности системы.

Результаты совместной отработки модулей диагностирования и восстановления работоспособности на программном комплексе представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты исследования процедур

№ п/п	Вид дестабилизирующих воздействий	Время обнаружения, с.	Время диагностирования, с.	Время восстановления, с.
1	Уменьшение $k_{умi}$ на 30 %	0,05	0,17	1,49
2	Увеличение m_{ci} на 40 %	0,05	0,17	1,03
3	Увеличение $T_{эди}$ на 35 %	0,1	0,22	1,04
4	Уменьшение $k_{эди}$ на 25 %	0,03	0,15	2,15
5	Положительный дрейф УМ $U_{умi0}=0,3В$	0,05	0,17	1,37
6	Обрыв в ЭД _i	0,32	0,05	1,54
7	Короткое замыкание выхода УМ _i	0,12	0,21	1,65

Из обработки данных табл. 6.1 следует, что среднее время обнаружения дестабилизации составило 0,1 с, среднее суммарное время диагностирования – 0,16 с, а среднее время восстановления функционального состояния – 1,47 с. Таким образом, среднее время, затрачиваемое на диагностирование и восстановление работоспособности системы позиционирования момента составило 1,47 с. Это время намного меньше времени переходного процесса системы позиционирования момента в штатном режиме ($t_{пп} = 9$ с), что свидетельствует об эффективности используемых моделей и методов, а также о принципиальной возможности рационального управления парировать нештатные ситуации в блоке электромаховичных приводов.

ГЛАВА

VII

РАЦИОНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

При изучении наук, примеры полезнее правил.

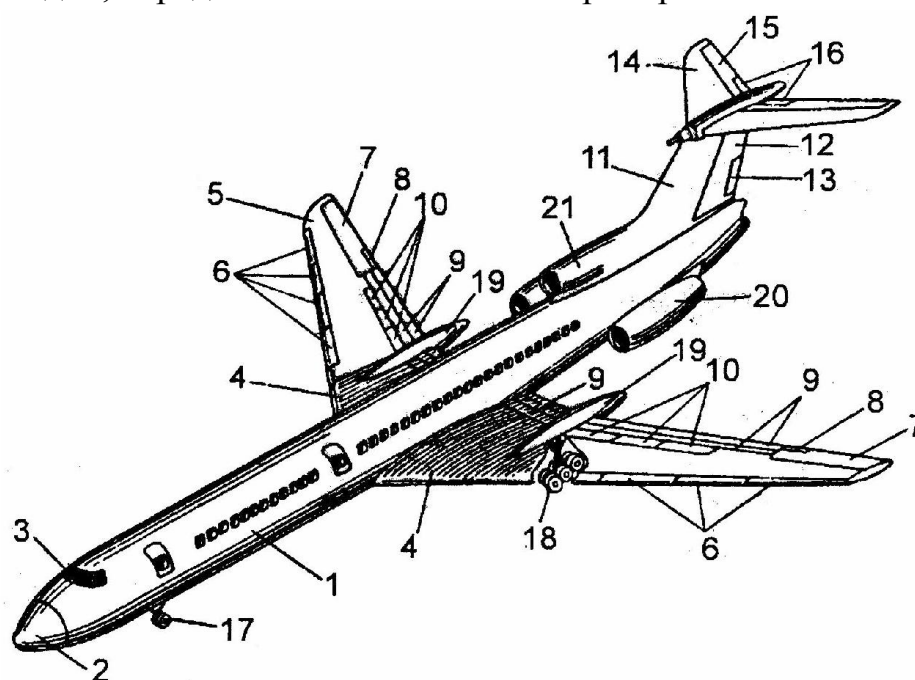
*И. Ньютон (1643 – 1727) – английский
учёный, гений в области
естествознания.*

Множество известных конструкций летательных аппаратов упорядочивают с помощью классификаций по различным признакам. Так, согласно простейшей классификации, по признаку – конструктивная реализация создания подъёмной силы, все летательные аппараты можно представить следующими типами: аэростаты, дирижабли, планеры, самолёты, вертолёты, ракеты, космические аппараты [1]. На каждый такой тип действуют свои специфические, характерные для условий эксплуатации, разнообразные возмущающие воздействия, а также технические поломки, неисправности – отказы, приводящие к дестабилизации работоспособности летательных аппаратов как объектов управления. Выявление причин дестабилизации посредством глубокого и оперативного диагностирования работоспособности позволяет сформировать полный диагноз в реальном масштабе времени. Полный диагноз служит основанием для следующей процедуры рационального управления – восстановления работоспособности дестабилизированного летательного аппарата с помощью имеющихся на борту избыточных средств. Эффективность рационального управления работоспособностью закладывается на стадии проектирования летательного аппарата посредством формирования обоснованного множества видов дестабилизирующих воздействий D_2 (рис. 1.3) и введения в конструкцию и в блок управления сбалансированного с D_2 множества V_2 – избыточных средств восстановления работоспособности.

7.1 Причины нарушения работоспособности летательных аппаратов как объектов управления

Рассмотрим наиболее изученный и распространённый тип летательных аппаратов – самолёт. На рис. 7.1 представлена типовая конструкция одного из

видов пассажирского самолёта. Конструкция представляет собой планер, состоящий из фюзеляжа, крыльев, оперения, оснащённый силовой установкой и шасси. Фюзеляж – это основная часть конструкции самолёта, служащая для соединения в одно целое всех его частей, а также для размещения авионики, экипажа, пассажиров и грузов. Крылья представляют собой несущие поверхности самолёта, предназначенные для создания аэродинамической подъёмной силы. Оперение – это несущие поверхности, обеспечивающие продольную устойчивость и управляемость самолёта. Силовая установка, основными элементами которой являются двигатели, служит для создания тяги. Шасси представляют собой систему опор самолёта, служащую для взлёта и посадки, передвижения и стоянки в аэропортах.



- 1 – фюзеляж; 2 – обтекатель радиолокатора; 3 – фонарь кабины экипажа;
 4 – центроплан крыла; 5 – консоль крыла; 6 – предкрылки; 7 – элерон;
 8 – триммер элерона; 9 – закрылки; 10 – интерцепторы; 11 – киль; 12 – руль
 направления; 13 – триммер руля направления; 14 – стабилизатор; 15 – руль
 высоты; 16 – триммер руля высоты; 17 – носовая стойка шасси; 18 – основная
 стойка шасси; 19 – гондола основной стойки шасси; 20 – мотогондола;
 21 – воздухозаборник внутрифюзеляжного двигателя

Рисунок 7.1 – Общее устройство самолета

В условиях эксплуатации на работоспособность планера оказывают существенное влияние ряд факторов, обусловленных особенностями конструкции самолёта и условиями полёта. Самолёт совершает полёт в нестационарных внешних условиях, связанных с изменением характеристик атмосферы, изменением веса и моментов инерции и т.п. причин, приводящих

к изменению его динамических параметров и реакций на внешние условия. Причиной нарушения работоспособности планера могут быть следующие явления:

- 1) упругие деформации планера, приводящие к изменению его аэродинамических характеристик;
- 2) вертикальные и горизонтальные порывы ветра;
- 3) изменение полётного веса, связанного с расходом топлива;
- 4) изменение эшелона полёта;
- 5) движение тел внутри фюзеляжа;
- 6) обледенение крыльев и оперения;
- 7) поражение разрядами атмосферного электричества – молниями;
- 8) отклонение сил, действующих на планер, от расчётных;
- 9) изменение тяги силовой установки;
- 10) заклинивание управляемых несущих поверхностей (рулей высоты, направления, элеронов и др.);
- 11) пробоины в крыльях, частичные потери несущих и управляющих поверхностей, обрывы обшивки и другие нарушения целостности планера;
- 12) другие причины, влияющие на отклонение характеристик работоспособности планера от расчётных значений.

Беспилотная авиационная техника находится в стадии бурного развития. Воздушные пространства многих государств бороздят беспилотные летательные аппараты (БПЛА) различного назначения, разнообразных конструкций, широкого спектра массогабаритных характеристик и функциональных возможностей. Прогресс в области разработки, производства и эксплуатации БПЛА обусловлен интенсивным развитием микропроцессорных средств обработки цифровой информации, средств и методов навигации, автоматического управления и искусственного интеллекта. Совершенные образцы современных БПЛА осуществляют полёт в автоматическом режиме от взлёта до посадки и при этом эффективно решают задачи мониторинга в жёстких условиях эксплуатации.

Принципиальное преимущество БПЛА заключается в отсутствии лётчика на борту, что приводит к существенному упрощению конструкции летательного аппарата и его авионики. Эта особенность даёт возможность при конструировании находить оптимальные аэродинамические схемы, использовать новые, более лёгкие и прочные композиционные материалы, более функциональную авионику, наиболее продуктивное применение.

Среди множества БПЛА наибольший интерес для исследования возможностей рационального управления вызвали малогабаритные

маневренные летательные аппараты со способностью вертикального взлёта и посадки. В этом классе летательных аппаратов наиболее «капризными» при управлении оказались малоизученные дискообразные «летающие тарелки», использующие для дополнительной подъёмной силы эффект Коанда. Румынский авиатор Анри Коандэ в 1910 году обнаружил при первых испытаниях своего реактивного самолёта эффект прилипания струи газа, вытекающей из сопла, к металлическим отражателям.

На рис. 7.2. представлены модели «тарелок» британской компании AESIR, в которых используется явление прилипания струи газа к криволинейной стенке при подаче её через узкий канал, чем обеспечивается разрежение, а, следовательно, и появление подъёмной силы.



Рисунок 7.2 – Модели БПЛА компании AESIR

На рис. 7.3 представлена конструкция разработанного на кафедре дискообразного летающего изделия, названного ДОЛИ, в котором использовался эффект Коанда. На этом летающем изделии отрабатывались элементы рационального управления угловой стабилизацией [2].



Рисунок 7.3 – Дискообразное летающее изделие

На рис. 7.4 представлен автономный БПЛА вертикального взлёта, на котором производились исследования возможности рационального управления центром масс и ориентацией. Этот тип БПЛА был назван как маневренное автономное летающее изделие – МАЛИ [3].

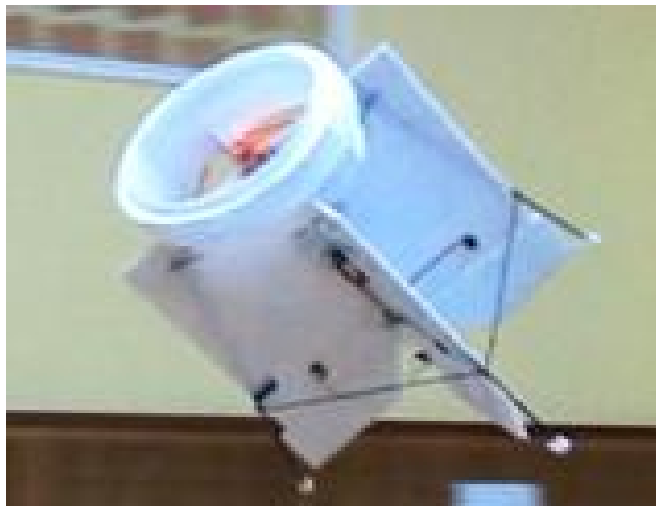


Рисунок 7.4 – Маневренное автономное летающее изделие

В работе [4] описаны этапы становления и развития БПЛА. Третий – современный этап развития БПЛА характеризуется расширением способностей аппаратов ориентироваться в незнакомых ситуациях и находить рациональные решения полётных заданий с помощью методов и средств искусственного интеллекта. Становление этого этапа обусловлено интенсивным развитием нанотехнологий, микросхемотехники, теории искусственного интеллекта и потребностями практики использования.

На представленные типы БПЛА при их практическом использовании действует ряд дестабилизирующих факторов, приводящих к нарушению работоспособности аппарата:

- 1) горизонтальные и вертикальные порывы ветра при полётах в открытом пространстве, приводящие к большим отклонениям от траектории полёта и требуемой ориентации;
- 2) отклонение сил и моментов, действующих на аппарат, от их расчётных значений;
- 3) изменение тяги двигателей;
- 4) уменьшение инерционных характеристик при сбросе груза;
- 5) повреждение аэродинамических поверхностей и корпуса при столкновении с препятствиями (деревьями, зданиями, линиями электропередач и др.);

6) заклинивание управляемых аэродинамических поверхностей;
7) потери управляющих аэродинамических поверхностей;
8) разрушение корпуса аппарата;
9) потеря управляемости аппарата при столкновении с препятствиями;
10) при переходе из режима зависания в режим горизонтального полёта и наоборот возникают критические состояния, приводящие к уменьшению или потере управляемости аппарата;

11) столкновения с другими БПЛА, приводящие как к отклонениям от траекторий полёта, так и к разрушениям корпуса;

12) факторы, вытекающие из конкретных условий эксплуатации и приводящие к нарушению работоспособности БПЛА.

Анализ современных мировых тенденций развития космонавтики свидетельствует об интенсификации исследований по уменьшению массогабаритных характеристик космических аппаратов, увеличению срока активного их существования при расширении функциональных возможностей бортовых систем управления. При этом разработчики систем ориентации и стабилизации перспективных малогабаритных космических аппаратов (МКА) с длительным сроком существования (10 – 15 лет) сталкиваются с рядом «трудных задач» [5]. Длительная эксплуатация МКА на орбите сопряжена с целым рядом дестабилизирующих факторов, приводящих к различного рода повреждениям корпуса МКА и изменениям его инерционных свойств, т.е. к нарушению работоспособности МКА как объекта ориентации и стабилизации.

При эксплуатации МКА на околоземных орбитах наблюдается влияние ряда дестабилизирующих факторов, приводящих к нарушению их работоспособности, как объектов ориентации и стабилизации:

1) солнечное давление, изменяющее требуемое угловое положение МКА относительно центра масс;

2) гравитационные силы других планет, создающие возмущающие моменты;

3) разреженная атмосфера, создающая при полёте возмущающие аэродинамические силы и моменты;

4) метеориты;

5) магнитные поля, создающие возмущающие моменты;

6) столкновения с космическим мусором;

7) удары при взаимодействии с другими космическими управляемыми объектами;

8) «грубые» стыковки при выполнении монтажных работ;

9) повреждение солнечных панелей;

10) частичные или неполные невыходы антенн, солнечных панелей и других элементов выдвижных конструкций;

11) температурные деформации корпуса;

12) упругие колебания выдвижных конструкций.

Итак, на рассмотренные типы летательных аппаратов действуют разнообразные дестабилизирующие воздействия, виды которых вытекают из условий эксплуатации и особенностей конструкции. Очевидно, что такие дестабилизирующие воздействия приводят к отклонению от требуемых значений динамических характеристик летательного аппарата. Следствием является нарушение работоспособности летательного аппарата как объекта управления.

7.2 Математические описания номинальных движений летательных аппаратов

Изучение движений любого типа летательного аппарата (ЛА) начинают с рассмотрения простейших его движений центра масс и движения вокруг центра масс как абсолютно твёрдого жёсткого тела. Используя основные законы динамики для поступательного и вращательного движений в проекции на оси скоростной системы координат, получают систему нелинейных дифференциальных уравнений [6]. Учёт особенностей конкретного типа летательного аппарата даёт возможность вводить ряд допущений, позволяющих произвести линеаризацию и разделение движений на относительно независимые, что приводит к линеаризованным уравнениям, связывающим отклонения выходных переменных со входными.

Так, уравнения кинематики движения центра масс ЛА получают, спроектировав на оси стартовой системы координат $Ox_0y_0z_0$ векторное равенство:

$$\dot{D}(t) = V(t), \quad (7.1)$$

где $D(t)$ – вектор дальности;

$V(t)$ – вектор скорости ЛА относительно стартовой системы координат.

Очевидно, что годографом будет траектория ЛА, а вектор $V(t)$ – это касательная к годографу.

Уравнения динамики движения центра масс ЛА получают, спроектировав на оси скоростной системы координат – $Oxyz$ следующее векторное равенство закона сохранения количества движения:

$$m \left(\frac{dV}{dt} + \Omega \times V \right) = \sum_{i=1}^n F_i, \quad (7.2)$$

где m – масса ЛА;

Ω – вектор угловой скорости вращения скоростной системы координат относительно стартовой;

F_i – i -я внешняя сила, действующая на ЛА.

В общем случае, на ЛА действует сила тяги двигателя, равнодействующая всех аэродинамических сил, сила тяготения, равнодействующая управляющих сил и равнодействующая дестабилизирующих сил.

Уравнения кинематики движения ЛА относительно центра масс в форме Эйлера получают, спроектировав на оси связанной системы координат – $Ox_1y_1z_1$ векторное равенство:

$$\omega = \dot{\vartheta} + \dot{\psi} + \dot{\gamma}, \quad (7.3)$$

где $\dot{\vartheta}, \dot{\psi}$ и $\dot{\gamma}$ – угловые скорости тангажа, рыскания и крена соответственно.

Уравнение динамики углового движения ЛА – движения относительно центра масс получают, спроектировав на оси связанной системы координат – $Ox_1y_1z_1$ векторное равенство закона сохранения момента количества движения:

$$\frac{dL}{dt} + \omega \times L = \sum_{k=1}^m M_k, \quad (7.4)$$

где L – момент количества движения ЛА (кинетический момент), взятый относительно начала связанной системы координат;

M_k – k -й внешний момент, взятый относительно начала связанной системы координат.

Метод малых возмущений, он же метод малого параметра, представляет собой универсальный метод упрощения полученных скалярных нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений движения до линеаризованных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами [7].

Для получения математических уравнений номинальных движений центра масс и угловых движений ЛА используют только управляющие силы и моменты.

В результате проектирования векторных равенств (7.1) – (7.4) на оси соответствующих систем координат получают в общем виде такие уравнения:

$$\dot{y}_i(t) = f_i[y_j(t), u_k(t)]; j = \overline{1, n}; k = \overline{1, m}, \quad (7.5)$$

где $y_i(t)$, $y_j(t)$ – параметры движения ЛА;

$u_k(t)$ – управляющие воздействия.

Уравнения опорной траектории полёта принимает такой вид:

$$\dot{y}_{oi}(t) = f_i[y_{oj}(t), u_{ok}(t)]. \quad (7.6)$$

При использовании метода малых возмущений вводят новые переменные:

$$\Delta y_i(t) = y_i(t) - y_{oi}(t). \quad (7.7)$$

В результате разложения в ряд Тейлора уравнений (7.5) по новым переменным (7.7) получают ряд следующего вида:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{y}_i(t) &= f_i[y_{oj}(t) + \Delta y_j(t), u_{ok}(t) + \Delta u_k(t)] - f_i[y_{oj}(t), u_{ok}(t)] = \\ &= \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial f_i[\cdot]}{\partial y_j} \right)_0 \Delta y_j(t) + \sum_{k=1}^m \left(\frac{\partial f_i[\cdot]}{\partial u_k} \right)_0 \Delta u_k(t) + O[\Delta y_j(t), \Delta u_k(t)], \end{aligned} \quad (7.8)$$

где $O[\cdot]$ – сумма бесконечно малых более высокого порядка малости по сравнению с предыдущими слагаемыми ряда.

Уравнения (7.8) описывают возмущенное движение ЛА в зависимости от малых отклонений управляющих воздействий $\Delta u_k(t)$.

В результате линеаризации и ряда физических допущений получают линеаризованные уравнения движения ЛА как управляемого процесса. Представим эти уравнения в полиномиально-матричной форме операторного векторно-матричного уравнения:

$$A(s)Y(s) = B(s)U(s), \quad (7.9)$$

где $A(s)$ – (9×9) -мерная матрица полиномов;

$Y(s)$ – 9-мерный вектор изображений параметров движения ЛА;

$B(s)$ – (9×4) -мерная матрица коэффициентов;

$U(s)$ – 4-мерный вектор изображений управляющих воздействий.

Конкретно:

$$A(s) = \begin{bmatrix} s + a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & -s + a_{22} & s + a_{23} & a_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32_0} + a_{32} & s^2 + a_{33_0} s & a_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 0 & s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s & a_{67} & a_{68} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{74} & 0 & 0 & s + a_{77} & -s & 0 \\ a_{81} & 0 & 0 & a_{84} & 0 & 0 & a_{89_0} s + a_{87} & s^2 + a_{99_0} s & a_{89_0} s \\ a_{91} & 0 & 0 & a_{94} & 0 & 0 & a_{97} & a_{98_0} s & s^2 + a_{99_0} s \end{bmatrix}; \quad (7.10)$$

$$B(s) = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 & 0 \\ b_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{83} & b_{84} \\ 0 & 0 & b_{93} & b_{94} \end{bmatrix}; \quad Y(s) = \begin{bmatrix} V(s) \\ \lambda(s) \\ \vartheta(s) \\ Y_0(s) \\ X_0(s) \\ Z_0(s) \\ \beta(s) \\ \psi(s) \\ \gamma(s) \end{bmatrix}; \quad U(s) = \begin{bmatrix} \delta_p(s) \\ \delta_b(s) \\ \delta_h(s) \\ \delta_9(s) \end{bmatrix}. \quad (7.11)$$

Такая форма описания заимствована из работы [8]. Аналитические выражения для используемых коэффициентов и их численные значения для некоторых типовых ЛА можно найти в ряде источников, например [6, 9 – 13].

Из уравнения (7.9) можно получить передаточные функции для бокового и продольного, короткопериодического и длиннопериодического движений. В этих передаточных функциях коэффициенты будут постоянными и, следовательно, будут отражать мгновенные значения реальных изменений.

Так, например, для случая «чистого рыскания» для ЛА с существенными перекрестными связями [8] из векторно-матричного уравнения (7.9) получится такая система уравнений, описывающих боковое короткопериодическое движение ЛА:

$$\begin{cases} [s^2 + (a_{88_0} + a_{87_0})s + a_{87}] \psi(s) + a_{89_0} s \gamma(s) = b_{83} \delta_H(s) + b_{84} \delta_\gamma(s); \\ (a_{98_0} s + a_{97}) \psi(s) + (s^2 + a_{99_0} s) \gamma(s) = b_{93} \delta_H(s) + b_{94} \delta_\gamma(s). \end{cases} \quad (7.12)$$

Преобразование изображений управляющих воздействий руля направления – $\delta_H(s)$ и отклонения элеронов – $\delta_\gamma(s)$ в изображения отклонений углов рыскания $\psi(s)$ и крена $\gamma(s)$ можно представить в виде структурной схемы (рис. 7.5).

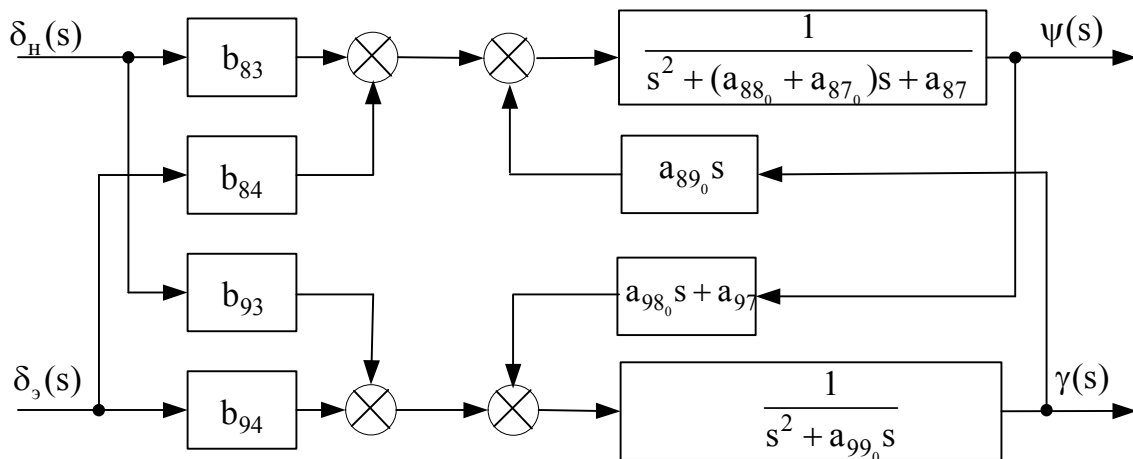


Рисунок 7.5 – Структурная схема бокового короткопериодического движения ЛА

Приведенная система уравнений (7.12) может быть сведена к системе двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными – $\psi(s)$ и $\gamma(s)$ и с двумя правыми частями, зависящими от изображений отклонений руля направления и элеронов $\delta_H(s)$ и $\delta_\gamma(s)$. Разрешая последовательно эту систему уравнений относительно изображений $\psi(s)$ и $\gamma(s)$, получим четыре передаточных функции, отражающие преобразовательные свойства ЛА в боковом короткопериодическом движении:

$$\begin{aligned}
W_1(s) &= \frac{\psi(s)}{\delta_H(s)} = \\
&= \frac{b_{83}s + b_{83}a_{98_0} - b_{93}a_{89_0}}{s^3 + (a_{88_0} + a_{87_0} + a_{98_0})s^2 + (a_{87} + a_{88_0}a_{98_0} + a_{87_0}a_{98_0} - a_{98_0}a_{89_0})s + a_{87}a_{98_0} + a_{97}a_{89_0}}; \\
W_2(s) &= \frac{\gamma(s)}{\delta_H(s)} = \\
&= \frac{b_{93}s^2 + (a_{88_0} + a_{87_0} - a_{98}b_{83})s + a_{87}b_{93} - a_{97}b_{83}}{s[s^3 + (a_{88_0} + a_{87_0} + a_{98_0})s^2 + (a_{87} + a_{88_0}a_{98_0} + a_{87_0}a_{98_0} - a_{98_0}a_{89_0})s + a_{87}a_{98_0} + a_{97}a_{89_0}]};
\end{aligned} \tag{7.13}$$

$$\begin{aligned}
W_3(s) &= \frac{\psi(s)}{\delta_3(s)} = \\
&= \frac{b_{84}s + b_{84}a_{98_0} - b_{94}a_{89_0}}{s^3 + (a_{88_0} + a_{87_0} + a_{98_0})s^2 + (a_{87} + a_{88_0}a_{98_0} + a_{87_0}a_{98_0} - a_{98_0}a_{89_0})s + a_{97}a_{89_0}}; \\
W_4(s) &= \frac{\gamma(s)}{\delta_3(s)} = \\
&= \frac{b_{94}s^2 + (a_{88_0} + a_{87_0} - a_{98}b_{84})s + a_{87}b_{94} - a_{97}a_{84}}{s[s^3 + (a_{88_0} + a_{87_0} + a_{98_0})s^2 + (a_{87} + a_{88_0}a_{98_0} + a_{87_0}a_{98_0} - a_{98_0}a_{89_0})s + a_{97}a_{89_0}]}.
\end{aligned}$$

В пространстве непрерывных состояний передаточной функции $W_1(s)$ будет соответствовать в управляемой фробениусовой канонической форме следующее векторно-матричное уравнение:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \delta_H(t); \quad \psi(t) = [b_0 \quad b_1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}, \tag{7.14}$$

где $a_0 = a_{87}a_{98_0} + a_{97}a_{89_0}$; $a_1 = a_{87} + a_{88_0}a_{98_0} + a_{87_0}a_{98_0} - a_{98_0}a_{89_0}$;
 $a_2 = a_{88_0} + a_{87_0} - a_{98}$; $b_0 = b_{83}a_{98_0} - b_{93}a_{89_0}$; $b_0 = b_{83}a_{98_0} - b_{93}a_{89_0}$; $b_1 = b_{83}$.

Векторно-матричное уравнение бокового короткопериодического движения ЛА в зависимости от $\delta_H(t)$ будет таким:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -a_0 & -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \delta_H(t); \quad \begin{bmatrix} \psi(t) \\ \gamma(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & b_0 & b_1 & 0 \\ b'_0 & b'_1 & b'_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}, \quad (7.15)$$

где $b'_0 = a_{87}b_{93} - a_{97}b_{83}$; $b'_1 = a_{88_0} + a_{87_0} - a_{98}b_{83}$; $b'_2 = b_{93}$.

Для продольного короткопериодического движения ЛА передаточные функции для изображений угла атаки $\alpha(s)$ и угла тангажа $\nu(s)$ в зависимости от изображения отклонения руля высоты $\delta_B(s)$ будут иметь следующий вид:

$$W_1(s) = \frac{\alpha(s)}{\delta_B(s)} = \frac{b_{32}(s + a_{23})}{s^3 + (a_{33_0} + a_{32_0} + a_{22})s^2 + (a_{32_0}a_{23} + a_{32} - a_{22}a_{33_0})s + a_{32}a_{23}}; \quad (7.16)$$

$$W_2(s) = \frac{\nu(s)}{\delta_B(s)} = \frac{b_{32}(s - a_{22})}{s^3 + (a_{33_0} + a_{32_0} + a_{22})s^2 + (a_{32_0}a_{23} + a_{32} - a_{22}a_{33_0})s + a_{32}a_{23}}.$$

При горизонтальном полёте ЛА $a_{23} = 0$, тогда передаточные функции принимают вид:

$$W_1(s) = \frac{\alpha(s)}{\delta_B(s)} = \frac{b_{32}}{s^2 + (a_{33_0} + a_{32_0} + a_{22})s + a_{32} - a_{22}a_{33_0}}; \quad (7.17)$$

$$W_2(s) = \frac{\nu(s)}{\delta_B(s)} = \frac{b_{32}(s - a_{22})}{s(s^2 + (a_{33_0} + a_{32_0} + a_{22})s + a_{32} - a_{22}a_{33_0})}.$$

Этим передаточным функциям соответствует векторно-матричное уравнение, описывающее продольное короткопериодическое движение ЛА во временной области:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \delta_B(t); \quad \begin{bmatrix} \alpha(t) \\ \nu(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & b_2 & 0 \\ b_0 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}, \quad (7.18)$$

где $a_1 = a_{32} - a_{22}b_{33_0}$; $a_2 = a_{33_0} + a_{32_0} + a_{22}$; $b_2 = b_{32}$; $b_0 = -b_{32}a_{22}$; $b_1 = b_{32}$.

Дальнейшее эффективное использование векторно-матричных уравнений, отражающих преобразовательные свойства ЛА как объектов управления, возможно посредством выбора наиболее приемлемой для решения последующих задач диагностирования и восстановления

канонической формы. Канонические формы получаются в результате эквивалентных преобразований с помощью инвариантов Кронекера и Эрмита, приводящих к восьми различным по структуре каноническим формам [15]. Анализ преобразовательных свойств полученных канонических векторно-матричных форм производится с помощью критериев управляемости, наблюдаемости и устойчивости (п. 2.1).

Итак, в общем виде линеаризованное движение ЛА как объекта управления можно представить в пространстве непрерывных состояний следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t); \\ y(t) &= Cx(t); x(t_0) = x_0.\end{aligned}\tag{7.19}$$

Здесь векторы и матрицы соответствующие размерности описываемого движения ЛА.

Особенность полученных линеаризованных уравнений движения ЛА как управляемого процесса заключается в их нестационарности. Поэтому получаемые в результате решения алгебраического векторно-матричного уравнения (7.9) передаточные функции не отражают в полной мере реальных переходных процессов. Эти передаточные функции, полученные формально при условии постоянства коэффициентов, именуются «мгновенными значениями передаточных функций». Вместе с тем, если за время переходного процесса относительное изменение всех коэффициентов мало и допустимо по условиям решаемой задачи, тогда возможно использовать мгновенные значения передаточных функций для описания возмущенного движения ЛА в пределах ограниченных временных интервалов, а также описания в векторно-матричной форме в пространстве непрерывных состояний.

7.3 Диагностическое обеспечение летательных аппаратов

Эффективность рационального управления зависит от уровня сбалансированности множества D_2 – дестабилизирующих воздействий на ЛА с множеством R_2 – возможных средств восстановления работоспособности. Уровень сбалансированности определяется качеством найденного практического компромисса при совместной отработке диагностического обеспечения ЛА и обеспечения восстановления его работоспособности.

Основу диагностического обеспечения ЛА составляют диагностические модели. Диагностические модели ЛА – это математические средства,

функционально связывающие прямые диагностические признаки $\Delta\lambda_i$ с косвенными $\Delta y_i(t)$ в форме (2.15) и дополненные соответствующими атрибутами математических моделей. Функциональная связь диагностических признаков выявляется в результате анализа причин нештатных ситуаций или анализа возможных аварийных состояний ЛА. Рассмотрим на примере одной научно-исследовательской темы как формировались функциональные связи диагностических признаков. Тема выполнялась в НИИ ПФМ и была посвящена исследованию боевой живучести Су-17. Летающие модели этого класса были изготовлены в 1980 году и с их помощью проводились исследования до 1993 года. Под руководством начальника отдела перспективных научно-исследовательских работ А.И. Рыженко были выполнены следующие программы экспериментальных исследований:

- 1) изучение динамики полёта манёвренного самолёта классической аэродинамической схемы со стреловидным крылом при потере значительной части крыла (от 27 до 40 % его размаха);
- 2) изучение динамики полёта при утрате значительной части цельноповоротного стабилизатора (до 75 % его размаха) при выполнении энергичных маневров по тангажу;
- 3) изучение динамики полёта при повреждении узлов крепления элементов управления стабилизатора [16].

Полученные результаты экспериментальных исследований позволили в НИИ ПФМ приступить в 1990 году к выполнению под руководством автора научно-исследовательской темы по разработке и имитационному моделированию устойчивой к боевым повреждениям системы стабилизации самолёта по крену. Для изучения аварийного поведения летающей модели Су-17 были использованы данные телеметрии, бортовых регистраторов информации и внешнетраекторных измерений для одного изолированного движения по крену. Изучение движения летающей модели по крену для программных повреждений аэродинамических органов управления позволило сформировать ряд физических моделей, отражающих новые эволюции в динамике полёта. Отработка физических моделей нештатных полётов со специалистами-аэродинамиками НИИ ПФМ позволила перейти к следующему этапу – этапу формирования математических зависимостей. Так, вначале для описания потери площади консоли крыла с концевой части, не затрагивающей флапероны, было использовано следующее соотношение:

$$\alpha_{\kappa}^{\text{л}} = \frac{\ell}{2\ell_n}, \quad (7.20)$$

где ℓ – размах крыльев летающей модели;

ℓ_n – длины потерянной части крыла;

$\alpha_k^л$ – коэффициент потери площади левого крыла. Коэффициент потери площади для правого крыла – $\alpha_k^п$ определяется аналогично.

В результате формирования физической модели движения самолёта при потере части площади крыла было установлено, что потеря площади консоли крыла приводит к возникновению асимметрии подъемной силы и появлению дополнительного вращающего момента. При этом существенного смещения центра масс не происходит и демпфирующие свойства ЛА в движении по крену изменяются незначительно, а также отсутствует скольжение после повреждения.

В летающей модели Су-17 управляющие поверхности – правый и левый флапероны, жестко связаны механической связью и отклоняются дифференциально на один и тот же угол. Потеря площади флаперонов описывалась параметром α_ϕ , который отражал долю потерянной площади двух управляющих поверхностей. В работе было принято, что потеря площади управляющей поверхности приводит к пропорциональному уменьшению её эффективности в полёте.

В результате идентификационной обработки результатов экспериментальных исследований были получены уравнения возмущенного движения летающей модели Су-17 по крену [17] в следующем виде:

$$\begin{aligned}\tilde{\omega}_x[(k+1)T_0] &= (1 - 6,038T_0)\tilde{\omega}_x(kT_0) - 1,706T_0(1 - \alpha_\phi)\delta_\phi(kT_0) + \\ &+ 27,813T_0[(1 - \alpha_k^л)^2 - (1 - \alpha_k^п)^2]; \\ \tilde{\gamma}[(k+1)T_0] &= \tilde{\gamma}(kT_0) + T_0\tilde{\omega}_x(kT_0); \quad k = \overline{1, n},\end{aligned}\tag{7.21}$$

где $\tilde{\omega}_x(kT_0)$ – дискретные значения угловой скорости крена;

$\delta_\phi(kT_0)$ – дискретные значения углового отклонения флаперонов;

$\tilde{\gamma}(kT_0)$ – дискретные значения углов крена.

Для решения задачи диагностирования в работе использовались две эталонные модели движения по крену. Первая эталонная модель управляется сигналом датчика угла крена – $\tilde{y}_\gamma(kT_0)$ и описывается следующим конечно-разностным уравнением:

$$\begin{aligned}\hat{\omega}'_x[(k+1)T_0] &= (1 - 6,038T_0)\hat{\omega}'_x(kT_0) + 1,706T_0\delta_\phi(kT_0); \\ \hat{\gamma}[(k+1)T_0] &= T_0\hat{\omega}'_x(kT_0) + \hat{\gamma}(kT_0) + g_\gamma[\tilde{\gamma}(kT_0) - \hat{\gamma}(kT_0)],\end{aligned}\quad (7.22)$$

где $\hat{\omega}'_x(kT_0)$, $\hat{\gamma}(kT_0)$ – эталонные дискретные значения угловой скорости и угла крена;

$\tilde{\gamma}(kT_0)$ – измеренные дискретные значения угла крена, полученные обработкой сигнала $\tilde{u}_\gamma(kT_0)$;

g_γ – параметр эталонной модели, выбором которого обеспечивались требуемые динамические свойства.

Вторая эталонная модель управляется сигналом датчика угловой скорости – $\tilde{u}_{\omega_x}(kT_0)$ и описывается таким конечно-разностным уравнением:

$$\begin{aligned}\hat{\omega}_x[(k+1)T_0] &= (1 - 6,038T_0)\hat{\omega}_x(kT_0) + 1,706T_0\delta_\phi(kT_0) + \\ &+ g_{\omega_x}[\tilde{\omega}_x(kT_0) - \hat{\omega}_x(kT_0)],\end{aligned}\quad (7.23)$$

где $\hat{\omega}_x(kT_0)$ – эталонные дискретные значения угловой скорости;

$\tilde{\omega}_x(kT_0)$ – измеренные дискретные значения угловой скорости, полученные из сигнала $\tilde{u}_{\omega_x}(kT_0)$;

g_{ω_x} – параметр управления динамикой эталонной модели.

Обнаружение повреждений в конструкции летающей модели производилось по рассогласованиям по крену

$$\Delta\gamma(kT_0) = \tilde{\gamma}(kT_0) - \hat{\gamma}(kT_0) \quad (7.24)$$

и по угловой скорости крена

$$\Delta\omega_x(kT_0) = \tilde{\omega}_x(kT_0) - \hat{\omega}_x(kT_0) \quad (7.25)$$

с помощью простейших предикатных уравнений.

Поиск места повреждения осуществлялся с использованием статической эталонной модели вида:

$$\hat{\omega}_x[(k+1)T_0] = (1 - 6,038T_0)\tilde{\omega}_x(kT_0) + 1,703\delta_{cp}(kT_0) \quad (7.26)$$

и косвенного диагностического признака $\Delta\omega_x(kT_0) = \tilde{\omega}_x(kT_0) - \hat{\omega}_x(kT_0)$, удовлетворяющих критериям диагностируемости.

Определение величины параметров повреждения – прямых диагностических признаков производилось с использованием соответствующих диагностических моделей. Так, конкретный физический вид повреждения крыла определялся с помощью следующего соотношения:

$$\hat{\alpha}_k^{\text{п}} = \hat{\alpha}_k^{\text{л}} = \sqrt{\left| 1 - \frac{\Delta\omega_x[(k+1)T_0]}{27.813T_0} \right|}, \quad (7.27)$$

а физический вид повреждения флаперонов

$$\hat{\alpha}_\phi = \frac{\Delta\omega_x[(k+1)T_0]}{1.706T_0\delta_\phi(kT_0)}. \quad (7.28)$$

После нахождения величины повреждения планера ЛА производилась классификационная обработка с целью выявления степени повреждения для последующего принятия решения по восстановлению работоспособности системы стабилизации по углу крена. Часть результатов исследования по этой теме представлена в последующие годы в работе [18].

В последующие годы в отделе технической диагностики НИИ ПФМ проводилась научно-исследовательская работа по разработке высокоточного диагностического обеспечения беспилотного ЛА [18]. Были исследованы следующие классы повреждений:

- 1) для руля высоты – заклинивание; уменьшение эффективности вследствие повреждений;
- 2) для элеронов – заклинивание; уменьшение эффективности левого и правого элерона вследствие повреждений;
- 3) для крыла – потеря части левого полукрыла; потеря части правого полукрыла.

Для этих классов были введены соответствующие параметры. Так, для заклинивания элеронов и руля высоты

$$\alpha_{\text{эл}} = \frac{\delta_{\text{эл}}^{\phi}}{\delta_{\text{эл}}^3}; \quad \alpha_{\text{рв}} = \frac{\delta_{\text{рв}}^{\phi}}{\delta_{\text{рв}}^3}, \quad (7.29)$$

где δ^Φ и δ^3 – фактическое и заданное отклонение управляющего органа (виды дестабилизации, входящие в этот класс – значение углов заклинивания).

Для характеристики остальных классов введены параметры, характеризующие относительное уменьшение площади ΔS элеронов – $\alpha_{\alpha 2} = \Delta S_{\alpha}^{\text{л}}; \alpha_{\alpha 3} = \Delta S_{\alpha}^{\text{п}}; \alpha_{\text{рв}2} = \Delta S_{\text{рв}}; \alpha_{\text{к}1} = \Delta S_{\text{пк}}^{\text{л}}; \alpha_{\text{к}2} = \Delta S_{\text{пк}}^{\text{п}}$.

Рассмотрим, как использовались при исследовании движения по крену, например, параметры $\alpha_{\text{к}1}$ и $\alpha_{\text{к}2}$. Подъемная сила крыла определяется формулой [19]:

$$Y_a = c_{ya} q S, \quad (7.30)$$

где c_{ya} – коэффициент подъемной силы;

q – скоростной напор;

S – площадь крыла.

Аэродинамический момент крена равен

$$M_x = m_x q S \ell, \quad (7.31)$$

где m_x – коэффициент аэродинамического момента крена, зависящий в номинальном режиме от отклонения элеронов, угловой скорости крена и угла скольжения;

ℓ – размах крыла.

При повреждении крыла возникает разность подъемных сил полукрыльев – подъемная сила поврежденного полукрыла уменьшается, что вызывает дополнительный вращающий момент

$$M_x = m_x q S \ell + M_x^{\text{л}}, \quad (7.32)$$

где

$$M_x^{\text{л}} = (Y_a^{\text{л}} - Y_a^{\text{п}}) z_{\text{д}}, \quad (7.33)$$

где z_d – координата точки приложения изменения подъемной силы крыла, за которую принимается расстояние от плоскости симметрии до нового центра крыла;

Y_a^l, Y_a^p – подъемные силы левого и правого полукрыла соответственно, которые могут быть выражены как

$$Y_a^l = -c_{xa} q \frac{S}{2} \alpha_{k1}; Y_a^p = -c_{xa} q \frac{S}{2} \alpha_{k2}. \quad (7.34)$$

При отсутствии повреждений $\alpha_{k1} = \alpha_{k2} = 0$ и дополнительный вращающий момент не возникает.

Аналогичным образом используются и другие введенные параметры в соответствующих выражениях для моментов, зависящих от отклонения элеронов и руля высоты. Полученные соотношения, отражающие влияние повреждений, были введены в уравнения динамики вращательного движения беспилотного ЛА относительно центра масс. На основании этих уравнений были сформированы соответствующие классам повреждений уравнения диагностических функциональных моделей. Так, например, для класса «потеря части левого полукрыла» получено уравнение в следующем виде:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_1(t) \\ \Delta \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_k} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(t) \\ \Delta x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_k}{T_k} \end{bmatrix} \delta_3^3(t); & \Delta x_1(t_0) = \Delta x_{10}; \\ & & \Delta x_2(t_0) = \Delta x_{20}; \\ \begin{bmatrix} \Delta \gamma(t) \\ \Delta \omega(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(t) \\ \Delta x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_k \end{bmatrix} (1 - \alpha_{k1}), \end{aligned} \quad (7.35)$$

а для класса «потеря части правого полукрыла»:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_1(t) \\ \Delta \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_k} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(t) \\ \Delta x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_k}{T_k} \end{bmatrix} \delta_3^3(t); & \Delta x_1(t_0) = \Delta x_{10}; \\ & & \Delta x_2(t_0) = \Delta x_{20}; \\ \begin{bmatrix} \Delta \gamma(t) \\ \Delta \omega(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(t) \\ \Delta x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_k \end{bmatrix} (\alpha_{k2} - 1), \end{aligned} \quad (7.36)$$

где T_k, k_k – параметры движения ЛА по крену;

$\Delta \gamma(t)$ – отклонение угла крена;

$\Delta\omega(t)$ – отклонение угловой скорости крена;

$\delta_3^3(t)$ – заданное отклонение элеронов.

Представленные уравнения были исследованы по критериям диагностируемости с положительным результатом. Разработанное диагностическое обеспечение было исследовано на стенде полунатурного моделирования беспилотного ЛА.

При разработке диагностического обеспечения для макетного образца маневренного автономного летающего изделия вертикального взлёта [3] были рассмотрены такие классы повреждений, как заклинивание аэродинамических управляемых поверхностей как в канале тангажа, так и в канале крена. Для этих повреждений разработаны соответствующие диагностические функциональные модели, обеспечивающие структурную и сигнальную диагностируемость, а также алгоритмы и программы глубокого диагностирования, обеспечивающие получение полного диагноза о повреждениях фюзеляжа маневренного автономного летающего изделия.

На кафедре были проведены, в рамках диссертационной работы [21], исследования возможности диагностирования поврежденных малых космических аппаратов. Рассматривались повреждения солнечных панелей, антенн, выдвижных штанг и других внешних устройств, приводящих к изменению главных моментов инерции космического аппарата относительно связанных осей. В исследовании использовались уравнения движения космического аппарата в форме Эйлера:

$$\begin{cases} I_x \dot{\omega}_x(t) + (I_z - I_y)\omega_y(t)\omega_z(t) = m_x(t); \\ I_y \dot{\omega}_y(t) + (I_x - I_z)\omega_x(t)\omega_z(t) = m_y(t); \\ I_z \dot{\omega}_z(t) + (I_y - I_x)\omega_x(t)\omega_y(t) = m_z(t), \end{cases} \quad (7.37)$$

где I_x, I_y, I_z – главные моменты инерции аппарата относительно связанных осей;

$\omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)$ – проекции вектора мгновенной угловой скорости на связанные оси;

$m_x(t), m_y(t), m_z(t)$ – проекции суммарного момента внешних сил на связанные оси координат.

В результате линеаризации системы (7.37) получены следующие уравнения в векторно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_x(t) \\ \dot{\omega}_y(t) \\ \dot{\omega}_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & 0 & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x(t) \\ \omega_y(t) \\ \omega_z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x(t) \\ m_y(t) \\ m_z(t) \end{bmatrix}; \quad \begin{matrix} \omega_x(t_0) = \omega_{x0}; \\ \omega_y(t_0) = \omega_{y0}; \\ \omega_z(t_0) = \omega_{z0}, \end{matrix} \quad (7.38)$$

где a_{ij} и b_{ij} – соответствующие значения коэффициентов. К примеру, $a_{12} = (I_z - I_y)\omega_{z0} / I_x$; $a_{13} = (I_z - I_y)\omega_{y0} / I_x$; $b_{11} = 1 / I_x$.

Уравнение диагностических функциональных моделей для прямых признаков ΔI_x , ΔI_y и ΔI_z в структурном виде можно представить так:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x(t) \\ \dot{\omega}_y(t) \\ \dot{\omega}_z(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & a'_{12} & a'_{13} \\ 0 & 0 & a'_{23} \\ a'_{31} & a'_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_x(t) \\ \hat{\omega}_y(t) \\ \hat{\omega}_z(t) \end{bmatrix} \Delta I_x + \begin{bmatrix} b'_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x(t) \\ m_y(t) \\ m_z(t) \end{bmatrix} \Delta I_x; \\ \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x(t) \\ \dot{\omega}_y(t) \\ \dot{\omega}_z(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & a''_{12} & a''_{13} \\ a''_{21} & 0 & a''_{23} \\ a''_{31} & a''_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_x(t) \\ \hat{\omega}_y(t) \\ \hat{\omega}_z(t) \end{bmatrix} \Delta I_y + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b''_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x(t) \\ m_y(t) \\ m_z(t) \end{bmatrix} \Delta I_y; \quad (7.39) \\ \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x(t) \\ \dot{\omega}_y(t) \\ \dot{\omega}_z(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & a'''_{12} & a'''_{13} \\ a'''_{21} & 0 & a'''_{23} \\ a'''_{31} & a'''_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_x(t) \\ \hat{\omega}_y(t) \\ \hat{\omega}_z(t) \end{bmatrix} \Delta I_z + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b'''_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x(t) \\ m_y(t) \\ m_z(t) \end{bmatrix} \Delta I_z, \end{aligned}$$

где, к примеру, $a'_{12} = -(I_z - I_y)\omega_{z0} / I_x^2$; $a'_{13} = (I_z - I_y)\omega_{y0} / I_x^2$; $b'_{11} = -1 / I_x^2$.

С использованием функциональных диагностических моделей, сформированных на базе уравнений (7.39), проанализирована возможность структурной и сигнальной диагностируемостей, решены задачи, разработаны алгоритмы и программы диагностирования. Результаты экспериментальных исследований на макетном образце малого спутника свидетельствует о практической возможности диагностирования в реальном масштабе времени повреждений космического аппарата.

Приведенные результаты научно-исследовательских работ свидетельствуют о том, что номинальное угловое движение любого ЛА относительно центра масс может быть представлено в линейном приближении в непрерывном пространстве состояний векторно-матричной системой уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t); \quad x(t_0) = x_0; \\ y(t) &= Cx(t).\end{aligned}\tag{7.40}$$

Параметризация различных возможных повреждений ЛА как объекта управления позволяет перейти к разработке функциональных диагностических моделей описываемых следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{x}_i(t) &= G_{\Delta} x_i(t) + [A_i \hat{x}_i(t) + B_i u(t)]; \quad \Delta x_i(t_0) = \tilde{x}_{i0}; \\ \Delta y_i(t) &= C_{\Delta} x_i(t); \quad i = \overline{1, q}.\end{aligned}\tag{7.41}$$

С помощью критериев диагностируемости формируются условия, обеспечивающие структуру и управляющие воздействия для получения диагноза о повреждениях. В результате решения основных задач диагностирования ЛА с целью обнаружения повреждения, поиска конструктивной части ЛА, где произошло повреждение, затем устанавливается тип повреждения и конкретный физический вид повреждения, последствия которого могут быть парированы имеющимися на борту ЛА средствами.

7.4 Восстановление работоспособности летательных аппаратов

Разнообразие типов ЛА и их назначений, условий эксплуатации и дестабилизирующих воздействий порождает множество методов восстановления работоспособности. Для восстановления работоспособности необходимо, чтобы ЛА обладал свойством восстанавливаемости. Согласно п. 2.3, восстанавливаемость – это свойство ЛА, характеризующее возможность его перевода из неработоспособного состояния в работоспособное посредством нейтрализации (парирования) дестабилизирующих воздействий $d_i \in D$ на конечном интервале времени. ЛА называется восстанавливаемым, если сформированы средства восстановления, позволяющие компенсировать влияние прямых признаков $\Delta \lambda_i \in P$ так, что $\Delta y_i(t) \rightarrow 0$ на конечном допустимом интервале времени. Средства восстановления формируются с помощью табл. 2.1 и критериев восстанавливаемости, соответствующих типу ЛА. Сбалансированное множество средств восстановления ЛА – $V = \{v_j\}_1^{\mu}$ может включать такие средства, как параметрическую и сигнальную подстройку, реконфигурацию органов и алгоритмов управления (рис. 4.1). Процесс восстановления работоспособности ЛА формируется исходя из

условий обеспечения как устойчивости, так и качества процесса управления средствами восстановления с целью парирования последствий дестабилизирующих воздействий. Формирование процесса восстановления работоспособности производится посредством решения задач синтеза управлений с помощью функций А.М. Ляпунова (глава IV).

Рассмотрим схематично на примерах решенных задач описание возможностей использования средств восстановления работоспособности ЛА.

Параметрическая подстройка. При разработке устойчивой к боевым повреждениям системы стабилизации самолёта [17] использовался для управления флаперонами алгоритм вида:

$$\delta_{\phi}(k) = K_{\gamma}[\gamma_3(k) - \gamma(k)] + K_{\omega_x} \omega_x(k), \quad (7.42)$$

где $\gamma_3(k)$ – заданное значение угла крена;

$\gamma(k)$, $\omega_x(k)$ – соответственно текущие значения угла и угловой скорости крена ЛА;

K_{γ} , K_{ω_x} – коэффициенты, подстраиваемые в процессе восстановления работоспособности ЛА.

Параметрическая подстройка может осуществляться как с использованием косвенного признака повреждения $\Delta y_i(t)$ (7.41), так и по оценке конкретного физического вида повреждения, например, $\hat{\alpha}_{\phi}$ (7.28). При использовании косвенного признака $\Delta y_i(t)$ синтезируется алгоритм параметрической подстройки в форме (4.15) или в графическом виде (рис. 4.2, рис. 4.3). При использовании оценки вида повреждения процесс восстановления работоспособности ЛА в ряде простейших уравнений его динамики движения, а таковыми были исследуемые уравнения возмущенного движения по крену (7.21), сводится к вычислению новых значений коэффициентов алгоритма (7.42). Так, при повреждении флаперона новые значения коэффициентов вычисляются с использованием оценочного значения $\hat{\alpha}_{\phi}$ по следующим формулам:

$$\tilde{K}_{\gamma} = \frac{K_{\gamma}}{1 - \hat{\alpha}_{\phi}}; \quad \tilde{K}_{\omega_x} = \frac{K_{\omega_x}}{1 - \hat{\alpha}_{\phi}}. \quad (7.43)$$

Полученные значения коэффициентов $\tilde{K}_{\gamma}$ и $\tilde{K}_{\omega_x}$ вводятся в алгоритм управления флаперонами (7.42). После окончания переходного процесса,

обусловленного одноразовым введением новых значений коэффициентов, процесс восстановления работоспособности ЛА с поврежденным флапероном завершается.

Потеря части крыла приводит к увеличению статической ошибки крена. Восстановление требуемого угла крена ЛА возможно как с использованием косвенных признаков повреждений $\Delta y_i(t)$, так и с помощью оценок прямых признаков – $\hat{\alpha}_k^П$ и $\hat{\alpha}_k^Л$ (7.27). При использовании косвенных признаков синтезируется контур восстановления работоспособности с помощью параметрической подстройки коэффициентов K_γ (7.42). Если используются оценки прямых признаков $\Delta \hat{\alpha}_k^П$ и $\hat{\alpha}_k^Л$, тогда в алгоритм управления флаперонами вводится новое расчетное значение коэффициента K_γ , обеспечивающее в установившемся режиме восстановления углового положения ЛА.

Для малых космических аппаратов с повреждениями, приводящими к изменению главных моментов инерции, могут быть синтезированы алгоритмы параметрической подстройки динамики аналогичной развернутой структурной схеме (рис. 4.4).

Сигнальная подстройка. Сигнальная подстройка применяется для формирования дополнительного для ЛА управляющего воздействия, которое компенсирует влияние диагностированного дестабилизирующего воздействия так, что происходит восстановление работоспособности.

Так, при боевом повреждении 75 % площади флаперонов беспилотного самолёта, время переходного процесса в контуре управления креном увеличивается в 2.4 раза по сравнению с номинальной величиной, что является следствием снижения эффективности управления. Если преобразовать уравнение динамики беспилотного самолёта по крену к виду (4.36) и выбрать функцию А.М. Ляпунова в форме (4.37), то из условия обеспечения определенной отрицательности конечной разности $\Delta V[k, k+1]$ можно сформировать алгоритм параметрической подстройки (4.42), обеспечивающей асимптотическое восстановление работоспособности. В общем виде развернутая схема цифрового контура сигнальной подстройки представлена на рис. 4.7.

При потере 25 % площади левого крыла без повреждения флаперонов появляется дополнительный момент от асимметрии подъемной силы, приводящие к возникновению отклонения от заданного угла крена беспилотного самолёта. В результате диагностирования этой ситуации формируется оценка повреждения с помощью алгоритма (7.26). На основании

полученной оценки повреждения вычисляется сигнал управления отклонением флаперонов, обеспечивающий парирование асимметрии подъёмной силы. В рассматриваемой ситуации $\Delta\delta_\phi = -7$ град. При использовании рассогласования по крену $\Delta\gamma(kT_0)$ и функций А.М. Ляпунова формируется контур сигнальной подстройки (рис. 4.7), парирующей последствия потери 25 % площади левого крыла беспилотного самолёта.

Целый ряд описанных ранее дестабилизирующих факторов для БПЛА вертикального взлёта – МАЛИ может быть парирован формированием дополнительных к основным сигналам управления угловым положением и положением центра масс. Формирование может быть произведено с помощью методов синтеза сигнальной подстройки.

При разработке МКА с длительным сроком существования дестабилизирующие факторы космического полёта, к примеру, такие как возмущающие моменты, изменения главных моментов инерции, приводящие к нарушению угловой ориентации, могут быть парированы формированием дополнительных сигналов управления, восстанавливающих требуемую ориентацию.

Реконфигурация алгоритмов. Для обеспечения устойчивости системы управления самолёта Су-27 к боевым повреждениям рассматривался сценарий заклинивания руля направления в нейтральном положении [22]. Обычная система управления не справляется с такими повреждениями и самолёт теряет управляемость по каналу курса. Была разработана система автоматического управления с развитыми функциями диагностирования и восстановления работоспособности самолёта на примере Су-27 и произведено цифровое моделирование, позволившее провести исследование функциональных возможностей. На рис. 7.5 представлены графики процесса восстановления работоспособности самолёта при заклинивании руля направления в нейтральном положении с помощью подключенного алгоритма управления углом крена $\gamma(t)$, обеспечивающим требуемый угол курса $\psi(t)$, который достигается за 0,8 с от момента начала парирования аварийной ситуации.

При отработке процедур реконфигурации алгоритмов для модели Су-27 моделировался сценарий: в момент времени $t = 0$ происходит потеря 77 % площади флаперонов и одновременно подается команда совершить маневр по курсу $\gamma_3 = 15$ град [22].

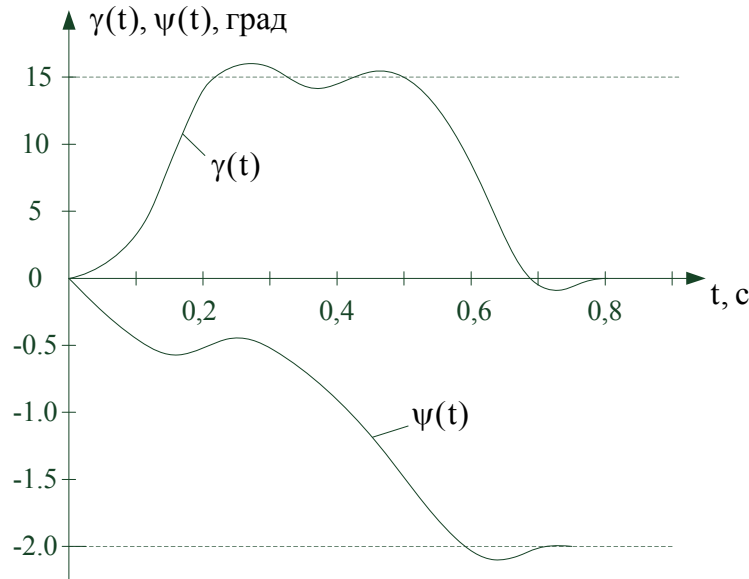


Рисунок 7.5 – Графики процесса восстановления работоспособности самолёта при заклинивании руля направления

На рис. 7.6 приведен график 1, отражающий изменения угловой скорости курса $\omega_x(t)$ при традиционном управлении в этой ситуации. График 2 описывает изменение угловой скорости модели при использовании рационального управления. График 3 характеризует поведение летающей модели Су-27 в номинальном режиме.

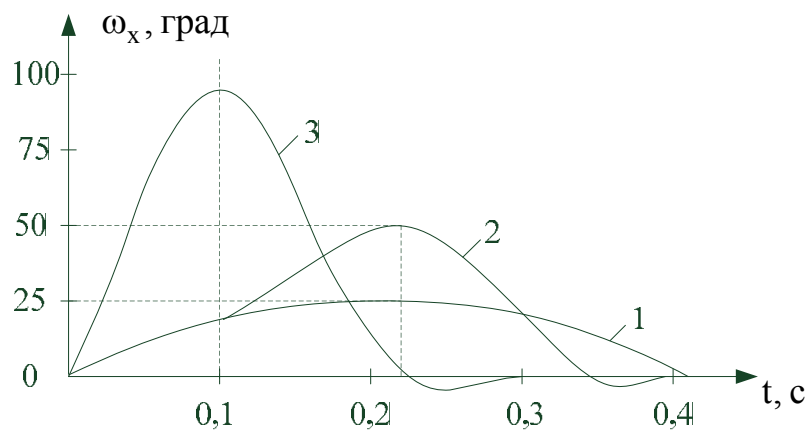


Рисунок 7.6 – Графики процесса восстановления работоспособности самолёта при разрушении флаперонов

Из графиков следует, что рациональная система управления в момент времени $t = 0,1$ с диагностирует дестабилизирующее воздействие и начинает его парирование. Парирование в этом сценарии осуществлялось посредством

дополнительного отклонения флаперонов и дифференциального отклонения стабилизаторов. К моменту времени $t = 0,4$ с система восстанавливает работоспособность.

Для обеспечения эффективной адаптации к существенно изменяющимся условиям полёта уникального летательного аппарата, каким был «Буран» продуктивно использовались на различных этапах полёта свои алгоритмические средства, обеспечивающие решение задач ориентации и навигации, что позволило автоматически в течение 205 минут совершить два витка вокруг Земли и выполнить посадку на аэродроме «Юбилейный» на Байконуре 15 ноября 1988 года [23].

Реконфигурация избыточных средств управления. Для обеспечения устойчивости, управляемости и балансировки планеров самолётов при различных дестабилизирующих воздействиях нашло широкое применение секционирование управляемых аэродинамических поверхностей: элеронов, триммеров, предкрылков, закрылков, интерцепторов, флаперонов, рулей высоты и курса и других конструктивных узлов планера. Раздельное управление такими секционированными аэродинамическими поверхностями позволяет парировать возмущающие силы и моменты, обусловленные изменениями условий полета, турбулентностью, порывами ветра, отказами и повреждениями отдельных секций и др. факторами.

Используемые в ряде самолётов конструкции изменения стреловидности крыльев для полётов в более широких диапазонах скоростей и высот также представляют собой средство реконфигурации, обеспечивающее планеру выполнение функционального назначения, посредством парирования дестабилизации, вызванной изменяющимися условиями полёта.

Избыточное количество двигателей на летательных аппаратах позволяет парировать единичные отказы и поломки в их работе и обеспечивать приемлемую работоспособность летательного аппарата как объекта управления. Так, в июне 1960 года лётчик-испытатель Ю.В. Курлин выполнил уникальный эксперимент на Ан-10. В полёте были последовательно выключены первый, второй и третий двигатели и самолёт устойчиво продолжал управляемый полёт с одним работающим двигателем [24]. На «десятке» были установлены турбовинтовые двигатели АИ-20, спроектированные в ОКБ А.Г. Ивченко, с четырёхлопастными автоматическими флюгерными винтами АВ-68 И. Самолёт Ан-10 дал первый импульс для создания высокоэффективного в своём классе самолёта Ан-12, которые строились на трёх авиазаводах: Иркутском (построено 155), Воронежском (построено 258 машин) и Ташкентском (построено 830 машин).

Ан-12 продуктивно эксплуатировался в различных авиакомпаниях мира более 40 лет.

«Ан-12 можно отнести к категории самолётов выдающихся. Созданный своевременно, построенный в достаточном количестве, простой и неприхотливый в эксплуатации, он принес признание и мировую известность О.К. Антонову и всему коллективу. За его создание О.К. Антонову и ведущим специалистам – А.Я. Белолипецкому, В.Н. Гельприну, Е.К. Сенчуку и Е.А. Шахатуни – была присуждена Ленинская премия» [25].

При проектировании планера самолетов с помощью надёжных расчетов выявляют «узкие места» и «слабые звенья» в конструкции, так как показатели надёжности, безопасности и живучести имеют важное значение наряду с лётными характеристиками самолётов. Выявленные в результате расчётов малонадёжные узлы, агрегаты и подсистемы планера резервируются наиболее распространенным способом – замещением с помощью аварийных устройств, включаемых только в случае отказа основных. Например, аварийные подсистемы выпуска закрылков, выпуска шасси, торможения и др. [26].

Ряд конструктивных мероприятий, повышающих живучесть планера самолёта, заключается в использовании структурной избыточности. Так, в практике проектирования тяжёлых самолётов поверхности рулей, элеронов и интерцепторов секционируются. По каналу тангажа самолёт управляется с помощью четырёх секций рулей высоты и изменением угла установки стабилизатора. При наихудшей ситуации – отказе всех секций рулей высоты в полностью отклоненном положении управление стабилизатором обеспечивает управляемость самолётом. Применяется также 3-х и 4-х кратное резервирование электродистанционной подсистемы управления приводами или дублированная механическая проводка управления аэродинамическими поверхностями.

Бустеры аэродинамических поверхностей запитывают от трёх или четырёх независимых гидросистем. Каждый элерон и секция руля направления управляется двумя или тремя бустерами, питаемыми от различных гидросистем. Управление приводами предкрылков и закрылков обеспечивается от двух различных гидросистем. Для уборки и выпуска опор шасси и тормозов колёс используются дублированные приводы.

Приведенные примеры не исчерпывают всего многообразия возможных видов структурных избыточностей, используемых в конструкциях планеров самолётов различного назначения.

Для реконфигурации избыточных средств управления работоспособностью планера самолёта требуется разработка соответствующего алгоритмического и программного обеспечения, позволяющего эффективно парировать каждый возможный вид дестабилизирующего воздействия, ухудшающего управляемость самолёта. При ряде дестабилизирующих воздействий на планер самолёта может потребоваться совместное использование тех или иных совокупностей описанных средств восстановления работоспособности и, следовательно, разработка более сложных алгоритмов и программ, чем при отдельном их использовании.

В научно-производственном объединении «Молния», руководимом Г.Е. Лозино-Лозинским, начиная с 1976 года в течение многих лет параллельно с работами по «Бурану» проводились исследования и опытно-конструкторские работы по созданию крылатых космических транспортных систем, использующих аэродинамическую подъёмную силу на этапах выведения и возвращения многоцелевого орбитального самолёта, а также автоматических аппаратов различного назначения [23].

Трудности создания крылатых аэрокосмических аппаратов были обусловлены условиями полёта. Так, при движении в атмосфере с гиперзвуковыми скоростями поверхность аппарата может нагреваться до двух тысяч градусов и выше, причём нагрев вызывает высокие механические нагрузки. Диапазон скоростей от 0 до 28000 км/час на высотах от 0 до 100 км и более. Аэрокосмические аппараты должны лететь в двух средах, при этом давление и плотность воздуха уменьшаются по сравнению с их значениями на уровне моря в 2 раза на высоте 6 км, в 5 раз на высоте 12 км, в 100 раз на высоте 30 км и так далее.

Такие диапазоны изменения параметров полёта представляет собой существенные дестабилизирующие воздействия на объект управления – беспилотный орбитальный ракетоплан (БОР). Моменты появления этих воздействий, характер влияния и диапазоны их изменения детально были изучены при проведении многочисленных экспериментов с изделиями серии «БОР» и с другими самолётами-имитаторами аэрокосмических аппаратов [23, 27]. Это обстоятельство позволило процесс диагностирования функционального состояния упростить посредством привязки обнаружения, локализации и идентификации дестабилизации к скорости, высоте, ориентации в пространстве и другим параметрам полёта. Такие результаты диагностирования позволили определённому этапу полёта

поставить в соответствие алгоритмы управления, обеспечивающие выполнение программы полёта.

Такой, заранее сформированный диагноз, не учитывает изменившиеся условия полёта из-за состояния атмосферы и что более существенно, влияние дестабилизации на функции объекта управления – орбитального ракетоплана, а также его состояния работоспособности. Другими словами, реакцию ракетоплана на дестабилизацию, отражающую момент её появления, локализацию и идентификацию её характеристик, т.е. полный диагноз. Несовершенство процедуры диагностирования влияет на качество парирования дестабилизации, а следовательно, на восстановление работоспособности ракетоплана.

В летающих изделиях «БОР-4» и «БОР-5» была впервые применена для обеспечения устойчивости, управляемости и балансировки летательного аппарата схема «несущий корпус» с управляемыми консолями крыла, позволяющая в диапазоне от 45 до 95 градусов изменять их угловое положение относительно вертикальной оси. Результаты аэрокосмических полётов подтвердили эффективность управляемых консолей как средства адаптации к изменяющимся условиям полёта с целью поддержания работоспособности орбитального ракетоплана. Итак, управляемые консоли позволяют расширить возможности систем рационального управления по обеспечению работоспособности аэрокосмических летательных аппаратов при дестабилизирующих воздействиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

*Учись, мой сын: наука сокращает нам опыты
быстротекущей жизни.*

*А.С. Пушкин (1799 – 1837) – родоначальник
новой русской литературы.*

С завидной настойчивостью Природа демонстрирует нам различные механизмы адаптации. В монографии предпринята попытка освоить простейший механизм адаптации посредством диагностирования и парирования воздействий, мешающих объекту автоматического управления выполнять свои функции. Это только первые шаги, позволившие провести ряд экспериментов, давших надежду и породивших убеждение в продуктивности выбранного направления в научно-исследовательской деятельности. Для дальнейшего развития направления рационального управления динамическими объектами предстоит решение ряда взаимосвязанных задач:

1) разработать методическое обеспечение всего жизненного цикла систем рационального управления на иерархической основе совершенствования моделей, методов и средств, реализующих принцип управления по диагнозу.

2) расширить класс диагностических моделей, учитывающих нелинейные и нестационарные свойства реальных объектов, а также причинно-следственные связи реальных дестабилизирующих воздействий.

3) завершить формирование принципов, моделей, методов выбора дестабилизирующих воздействий и характера их проявления в объектах рационального управления.

4) разработать модели, методы и алгоритмы замкнутого диагностирования работоспособности объектов рационального управления с целью обеспечения требуемой достоверности, полноты и точности диагноза.

5) разработать методы синтеза алгоритмов восстановления работоспособности объектов рационального управления, обеспечивающие требуемые запасы устойчивости и показатели качества.

6) разработать модели и методы формирования диагностической продукционной базы знаний, адаптирующейся в течение жизненного цикла систем рационального управления и изменяющимся дестабилизирующим воздействиям.

7) разработать модели, методы и средства формирования множества избыточных ресурсов, сбалансированных с множеством дестабилизирующих воздействий динамического объекта.

8) проведение полномасштабных лётных экспериментов на летающих моделях беспилотников с программной имитацией видов дестабилизации в реальном масштабе времени для получения количественных характеристик продуктивности и эффективности рационального управления и формирования критериальной основы.

9) разработка сбалансированной, гармоничной системы понятий и определений в этой новой области знания адаптивного управления посредством интеллектуализации функций диагностирования и восстановления работоспособности динамических объектов.

Решение этих и других задач, которые неизбежно возникнут в результате научно-исследовательской работы, позволит существенно продвинуться как в понимании механизмов адаптации с помощью диагностирования и восстановления работоспособности, так и в разработке моделей, методов и средств «зелёной» ресурсосберегающей технологии проектирования жизненного цикла более безопасных и живучих систем автоматической стабилизации и позиционирования динамических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

К главе 1

1. *Вернадский, В. И.* Биосфера и ноосфера [Текст] / В.И. Вернадский. – М. : Рольф, 2002. – 576 с.
2. *Мень, А.* История религии [Текст]: учеб. пособие в 2-х кн. / А. Мень. – М.: Издательская группа «Форум-Инфра-М», Кн. 1, 2000. – 216 с., Кн. 2, 2000. – 224 с.
3. *Аристотель.* Сочинения [Текст]: ред. сост. Т. Г. Тетенькина / Аристотель. – Калининград : ФГУИПП «Янтар сказ», 2002. – 544 с.
4. *Ильин, И. А.* Путь к очевидности [Текст] / И.А. Ильин. – М. : Республика, 1993. – 431 с.
5. *Гумилев, Л. Н.* Этногенез и биосфера Земли [Текст] / Л.Н. Гумилев. – М. : Рольф, 2001. – 500 с.
6. *Рассел, Б.* История западной философии и ее связи с политическими и социальными условиями от Античности до наших дней [Текст] : в 3-х книгах. Издание 5-е, стереотипное / Б. Рассел. – М. : Академический проект, 2006. – 1008 с.
7. *Моисеев, Н. Н.* Человек и ноосфера [Текст] / Н.Н. Моисеев. – М. : Мол. гвардия, 1990. – 351 с.
8. *Моисеев, Н. Н.* Судьба цивилизации. Путь разума [Текст] / Н.Н. Моисеев. – М. : Яз. рус. культуры, 2000. – 223 с.
9. *Кулик, А. С.* Приложение теории линейных систем управления [Текст] : учеб. пособие / А.С. Кулик. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1984. – 109 с.
10. *Максвелл, Д. К.* О регуляторах [Текст] / Д.К. Максвелл, Н. А Вышнеградский, А. Стодола // Теория автоматического регулирования (линеаризованные задачи). Редакция и комментарии академика А. А. Андропова и члена корреспондента АН СССР И. Н. Вознесенского. – Изд-во АН СССР, 1949. – С. 9–29.
11. *Вышнеградский, Н. А.* О регуляторах прямого действия [Текст] / Д.К. Максвелл, Н. А Вышнеградский, А. Стодола // Теория автоматического регулирования (линеаризованные задачи). Редакция и комментарии академика А. А. Андропова и члена корреспондента АН СССР И. Н. Вознесенского. – Изд-во АН СССР, 1949. – С. 43–95.
12. *Андронов, А. А.* И. А. Вышнеградский и его роль в создании теории автоматического регулирования (сто лет со дня опубликования работ

- И. А. Вышнеградского по теории автоматического регулирования) [Текст] / А.А. Андронов // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 4. – С. 5–17.
13. *Стодола, А.* О регулировании турбин [Текст] // Д.К. Максвелл, Н. А Вышнеградский, А. Стодола // Теория автоматического регулирования (линеаризованные задачи). Редакция и комментарии академика А. А. Андропова и члена корреспондента АН СССР И. Н. Вознесенского. – Изд-во АН СССР, 1949. – С. 101–176.
14. *Автоматика и телемеханика* [Текст]. Журнал посвящен 25-летию Института автоматике и телемеханики и вкладу ученых института в развитие теории и практики автоматического управления. – 1964. – Т. 25. – № 6.
15. *Петров, Ю. П.* Очерк истории автоматического управления [Текст] / Ю.П. Петров. – Спб. : НИИХ СПбГУ, 2004. – 271 с.
16. *Ту, Ю.* Современная теория управления [Текст] : пер. с англ. Я. Н. Гибадулина / Ю. Ту. ; под. ред. В. В. Солодовникова. – М. : Машиностроение, 1971. – 472 с.
17. *Эйкхофф, П.* Основы идентификации систем управления [Текст] / П. Эйкхофф. – М. : Мир, 1975. – 676 с.
18. *Rosenblueth, A.* The Role of Models in Science [Text] / A. Rosenblueth, N. Wiener // Philosophy of Science. – 1945. – Vol. 12, № 4. – P. 316–321.
19. *Штоф, В. А.* Проблемы методологии научного познания [Текст] / В.А. Штоф. – М. : Высш. ак., 1978. – 296 с.
20. *Блехман, Н. Н.* Механика и прикладная математика: Логика и особенности приложений математики [Текст] / Н.Н. Блехман, А. Д. Мышкин, Я. Г. Половко. – М. : Наука, 1990. – 360 с.
21. *Морозов, К. Е.* Математическое моделирование в научном познании [Текст] / К.Е. Морозов. – М. : Наука, 1969. – 210 с.
22. *Неумин, Я. Г.* Модели в науке и технике [Текст] / Я.Г. Неумин. – Л. : Наука, 1984. – 200 с.
23. *Ляпунов, А. М.* Общая задача об устойчивости движения [Текст] / А.М. Ляпунов. – Харьков, 1892. – 250 с.
24. *Колмогоров, А. Н.* Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей [Текст] / А.Н. Колмогоров // Известия АН СССР, серия математическая. – 1941. – Т. 5, № 1. – С. 3–14.
25. *Винер, Н.* Кибернетика. Второе издание [Текст] / Н. Винер. – М. : Сов. радио, 1968. – 326 с.
26. *Солодовников, В. В.* Введение в статистическую динамику систем автоматического управления [Текст] / В.В. Солодовников. – Л. : Гостехфиздат, 1952. – 367 с.

27. *Андронов, А. А.* Теория колебаний [Текст] / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. – М. : Наука, 1981. – 568 с.
28. *Андронов, А. А.* Грубые системы [Текст] / А.А. Андронов, Л. С. Понтрягин // Доклады АН СССР. – 1937. – Т. 14, № 5. – С. 247–250.
29. *Beard, R.* Failure Accommodation in Linear Systems Through Self-Reorganization [Text]: Ph.D Thesis / R. Beard. – MIT, Cambridge, 1971. – 364 p.
30. *Clark, R. M.* Instrument Fault Detection [Text] / R. M. Clark // IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems. – 1978. – Vol. 14, № 3. – P. 456–465.
31. *Isermann, R.* Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods. A Survey [Text] / R. Iserman // Automatica. – 1984. – Vol. 20, № 4. – P. 387–404.
32. *Frank, R. M.* Fault Diagnosis in Dynamic Systems using Analytical and Knowledge – Based Redundancy – A Survey and some new results [Text] / R. M. Frank // Automatica. – 1990. – Vol. 26, № 3. – P. 459–474.
33. *Мозгалеvский, А. В.* Техническая диагностика (непрерывные объекты). Обзор [Текст] / А.В. Мозгалеvский // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 1. – С. 145–166.
34. *Кулик, А. С.* Синтез систем приспособляющихся к изменению параметров элементов и их отказам [Текст] / А.С. Кулик, В.Г. Рубанов, Ю.Н. Соколов // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 1. – С. 96–107.
35. *Приспосабливающиеся автоматические системы* [Текст] / под ред. Э. Мишкина и Л. Брауна. – М. : Изд-во иностр. лит., 1963. – 672 с.
36. *Петров, Б. Н.* Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами [Текст] / Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков. – М. : Наука, 1980. – 244 с.
37. *Саридис, Дж.* Самоорганизующиеся стохастические системы управления [Текст] / Дж. Саридис. – М. : Наука, 1980. – 400 с.
38. *Гришин, Ю. П.* Динамические системы, устойчивые к отказам [Текст] / Ю.П. Гришин, Ю.М. Казаринов. – М. : Радио и связь, 1985. – 176 с.
39. *Глумов, В. М.* Алгоритмическое обеспечение отказоустойчивости систем автоматического управления [Текст] / В.М. Глумов, С.Д. Земляков, В.С. Рутковский, А.В. Силаев // Автоматика и телемеханика. – 1988. – № 9. – С. 3–33.
40. *Мамедли, Э. М.* Концепция обеспечения отказоустойчивости систем управления и безопасности экипажа МТКК [Текст] / Э. М. Мамедли, М.А. Соболев [Текст] // Зарубежная электроника. – 1978. – № 8. – С. 3 – 38; № 9. – С. 3–23.

41. *Chingiz Hajiyeu. Fault Diagnosis and Reconfiguration in Flight Control Systems [Text] / Chingiz Hajiyeu, Fikret Caliskan. – Springer, 2003. – 342 p.*
42. Кулик, А.С. Становление и развитие рационального управления объектами в нештатных ситуациях [Текст] / А. С. Кулик // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 5 (24). – С. 8–15.
43. Kulik, A. Formation of Rational Object of Control in Abnormal Mode [Text] / A. Kulik // Proc. 15th East-West Fuzzy Colloquium, September 17-19, Zittau, German. – 2008. – P. 186–191.
44. *Экспериментальная отработка систем управления объектов ракетно-космической техники [Текст] : учеб. пособие / А. Н. Батырев, Б. Н. Батырев, Г. К. Бондарец [и др.] ; под общ. ред. Ю. М. Златкина, В. С. Кривцова, А. С. Кулика, В. И. Чумаченко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», НПП «Хартрон-Арко», 2008. – 501 с.*
45. Кулик, А. С. Концепция активной отказоустойчивости спутниковых систем ориентации и стабилизации [Текст] / А.С. Кулик // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 2 (36). – С. 101–108.

К главе 2

1. Каргу, Л. И. Системы угловой стабилизации космических аппаратов [Текст] / Л.И. Каргу. – М. : Машиностроение, 1973. – 176 с.
2. Боднер, В. А. Системы управления летательными аппаратами [Текст] / В.А. Боднер. – М. : Машиностроение, 1973. – 506 с.
3. *Бортовые машины управления космическими аппаратам : учеб. пособие / А.Г. Бровкин, Б.Г. Бордычов, С.В. Гордийко [и др.] ; под ред. А.С. Сырова. – М.: Изд-во МАН-ПРИНТ, 2010. – 340 с.*
4. *Проектирование систем управления объектов ракетно-космической техники в 3 т. Т.2. Проектирование систем управления космических аппаратов и модулей орбитальных станций [Текст] : учебник / Ю.С. Алексеев, А.И. Батырев, Б.И. Батырев [и др.] ; под. общ. ред. Ю.С. Алексеева, Ю.М. Златкина, В.С. Кривцова, А.С. Кулика, В.И. Чумаченко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», НПП «Хартрон-Арко», 2012. – 680 с.*
5. Кулик, А. С. Основы моделирования систем [Текст] : учеб. пособие / А.С. Кулик. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1998. – 95 с.
6. Мышкис, А. Д. Лекции по высшей математике [Текст] / А.Д. Мышкис. – М. : Наука, 1969. – 640 с.

7. Мышкис А. Д. Элементы теории математических моделей [Текст] / А.Д. Мышкис. – М. : Физмалит, 1994. – 192 с.
8. Ту, Ю. Современные теория управления [Текст] / Ю. Ту. – М. : Машиностроение, 1971. – 472 с.
9. Калман, Р. Об общей теории систем управления [Текст] / Р. Калман // Труды первого конгресса ИФАК. Изд. АН СССР, 1961. – Т. 1. – С. 521–547.
10. Ляпунов, А. М. Общая задача об устойчивости движения [Текст] / А.М. Ляпунов. – Харьков, 1892. – 472 с.
11. Кулик, А. С. Введение в теорию цифровых систем управления [Текст] : учеб. пособие / А.С. Кулик, И.Ю. Дыбская. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 165 с.
12. Розенвассер, Е. Н. Чувствительность систем управления [Текст] / Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов. – М. : Наука, 1981. – 464 с.
13. Экспериментальная отработка систем управления объектов ракетно-космической техники [Текст] : учеб. пособ. / А.И. Батырев, Б.И. Батырев, Г.К. Бондарец [и др.] : под. общ. ред. Ю.М. Златкина, В.С. Кривцова, А.С. Кулика, В.И. Чумаченко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», НПП «Хартрон-Аркос», 2008. – 501 с.
14. Кулик, А. С. Становление и развитие рационального управления объектами в нештатных режимах [Текст] / А.С. Кулик // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 5. – С. 8–15.
15. Коул, Дж.Д. Методы возмущений в прикладной математике [Текст] / Дж. Д. Коул. – М. : Мир, 1972. – 274 с.
16. Найфе, А.Х. Методы возмущений [Текст] / А.Х. Найфе. – М. : Мир, 1976. – 455 с.
17. Блехман, И.Н. Механика и прикладная математика: Логика и особенности приложений математики [Текст] / И.Н. Блехман, А.Д. Мышкис, Я.Г. Пановко – 2-е изд. – М. : Наука, 1990. – 360 с.
18. Luenbergen, D. Observing the State of Linear System [Text] / D. Luenbergen // IEEE / Trans and Military Electronics. – 1964. – № 2. – P. 74–80.
19. Кулик, А.С. Введение в теорию диагностирования линейных непрерывных систем управления [Текст] : учеб. пособие / А.С. Кулик, В.И. Успенко. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1982. – 92 с.
20. Кулик, А.С. Критерий диагностируемости линейных систем [Текст] / А.С. Кулик // Автоматизированные системы управления, Харьков. – 1984. – Вып. 5. – С. 100–107.

21. Кулик, А.С. Исследование диагностируемости одного класса нелинейных систем по операторным моделям [Текст] / А.С. Кулик // Радиоэлектроника летательных аппаратов, Харьков. – 1987. – С. 102–106.
22. Кулик, А.С. Оценка степени диагностируемости линейных динамических систем [Текст] / А.С. Кулик // Радиотехнические системы и устройства, Харьков. – 1988. – С. 142–147.
23. Кулик, А.С. Диагностируемость линейных непрерывных систем [Текст] / А.С. Кулик // Автоматика и телемеханика. – 1987. – № 6. – С. 148–155.
24. Кулик, А.С. Диагностируемость линейных динамических систем [Текст] / А.С. Кулик // Докл. АН УССР. Сер. Физико-математические и технические науки. – 1990. – № 1. – С. 68–71.
25. Кулик, А.С. Оценка диагностируемости линейных динамических систем [Текст] / А.С. Кулик // Автоматика и телемеханика. – 1992. – № 1. – С. 184–187.
26. Кулик, А.С. Диагностируемость одного класса нелинейных систем [Текст] / А.С. Кулик // Автоматика. – 1989. – № 3. – С. 95–101.
27. Kulik, A.S. Fault Diagnosis in Dynamic Systems via Signal-Parametric Approach [Text] / A.S. Kulik // IFAC / IMACS Symposium of Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process. – Safeprocess'91, sept. 10 – 13, Baden – Baden / FRG – 1991. – Vol. 1. – P. 157–162.
28. Кулик, А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления [Текст] / А.С. Кулик. – Харьков. : Гос. аэрокосм. ун-т. “ХАИ”, Бизнес-Информ, 2000. – 260 с.
29. Кулик, А.С. Синтез систем приспособляющихся к изменению параметров элементов и их отказам [Текст] / А.С. Кулик, В.Г. Рубанов, Ю.Н. Соколов // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 1. – С. 96–107.
30. Кулик, А.С. Обеспечение отказоустойчивости сервопривода [Текст] / А.С. Кулик // Автоматика. – 1986. – № 5. – С. 68–71.
31. Kulik, A. Synthesis Fault-Tolerant Dynamic Control Systems with Fault-Identification [Text] / A. Kulik, V. Salyga, I. Sirodge // Problems of Control and Internation Theory. – 1989. – Vol. 18(1). – P. 43–54.
32. Кулик, А.С. Обеспечение отказоустойчивости систем управления [Текст] : учеб. пособие / А. С. Кулик. – Х. : «Харьк. авиац. ин-т», 1991. – 90 с.
33. Кулик, А.С. Обеспечение отказоустойчивости систем управления статически неустойчивыми динамическими объектами [Текст] / А.С. Кулик, О.И. Гавриленко // Успехи современной радиоэлектроники. – 2004. – № 2. – С. 32–75.

К главе 3

1. *Тихонов, А.Н.* Методы решения конкретных задач, [Текст] / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – 2 изд. – М. : Наука, 1986. – 287 с.
2. *Основы технической диагностики* [Текст] : под ред. П.П. Пархоменко. – М. : Энергия, 1976. – 464 с.
3. *Черепнев, А.И.* Истоки автоматизации [Текст] / А.И. Черепнев. – М. : Наука, 1975. – 159 с.
4. *Введение в теорию цифровых систем автоматического управления* [Текст] : учеб. пособие / А.С. Кулик, И.Ю. Дыбская. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 165 с.
5. *Брянский, Л.Н.* Краткий справочник метролога [Текст] / Л.Н. Брянский, А.С. Дайников. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 79 с.
6. *Перегудов, Ф.И.* Введение в системный анализ [Текст]: учеб. пособие для вузов / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – М. : Высш. шк., 1989. – 367 с.
7. *Гельфенбейн, Я.А.* Методы кибернетической диагностики. Идентификация функциональных систем математическими моделями [Текст] / Я.А. Гельфенбейн. – Рига: Зинатне, 1967. – 544 с.
8. *Сердаков, А.С.* Автоматический контроль и техническая диагностика [Текст] / А.С. Сердаков. – К. : Техніка, 1971. – 244 с.
9. *Боднер, В.А.* Системы управления летательными аппаратами [Текст] / В.А. Боднер. – М. : Машиностроение, 1973. – 506 с.
10. *Мозгалеvский, А.В.* Техническая диагностика [Текст] / А.В. Мозгалеvский, Д.В. Галкаров. – М. : Высшая школа, 1975. – 205 с.
11. *Чегис, Н.А.* Логические способы контроля работы электрических схем [Текст] / Н.А. Чегис, С.В. Яблонский // Тр. матем. ин-та им. В.А. Стеклова. – М. : 1958. – Т. 51. – С. 270–360.
12. *Евланов Л.Г.* Контроль динамических систем [Текст] / Л.Г. Евланов. – М. : Наука, 1979. – 432 с.
13. *Мироновский, Л.А.* Функциональное диагностирование линейных динамических систем [Текст] / Л.А. Мироновский // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 8. – С. 120–128.
14. *Beard, R.V.* Failure Accommodation in Linear Systems through Self-Reorganization [Text] / R.V. Beard // Ph. D. Thesis. MIT, Cambridge, 1971. – 324 p.
15. *Clark, R.M.* Instrument Fault Detection [Text] / R. M. Clark // IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems. AES – 14. – 1978. – № 3. – P. 456–465.

16. *Isermann, R.* Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods – A Survey [Text] / R. Iserman // *Automatica*. – 1984. – Vol. 20, № 4. – P. 387–404.
17. *Basseville, M.* Detecting changes in signal and systems. – A Survey [Text] / M. Basseville // *Automatica*. – 1988. – Vol. 24, № 3. – P. 309–326.
18. *Frank, R.M.* Fault Diagnosis in Dynamic Systems using Analytical and Knowledge – Based Redundancy – A Survey and some new results [Text] / R. M. Frank // *Automatica*. – 1990. – Vol. 26, № 3. – P. 459–474.
19. *Willsky, A.S.* A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems [Text] / A.S. Willsky // *Automatica*. – 1976. – Vol. 12. – P. 601–611.
20. *Tovvil, D.R.* Automating Testing of Control Systems –Past, Present and Future [Text] / D.R. Tovvil // *Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers*. – 1987. – Vol. 57, № 2. – P. 67–80.
21. *Доценко, Б.И.* Диагностирование динамических систем [Текст] / Б.И. Доценко. – К. : Техніка, 1983. – 159 с.
22. *Дмитриев, А.К.* Идентификация и техническая диагностика [Текст] / А.К. Дмитриев, Р.М. Юсупов. – М. : МО СССР, 1987. – 521 с.
23. *Береговой, Г.Т.* Безопасность космических полетов [Текст] / Г.Т. Береговой, А.А. Тищенко, Г.П. Шибанов, В.И. Ярополов. – М. : Машиностроение, 1977. – 264 с.
24. *Кулик, А.С.* Введение в теорию диагностирования линейных непрерывных систем управления : учеб. пособие [Текст] / А.С. Кулик, В.И. Успенко. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1982. – 92 с.
25. *Майоров А.В.* Безопасность функционирования автоматизированных объектов [Текст] / А.В. Майоров, Г.К. Москатов, Г.П. Шибанов. – М. : Машиностроение, 1988. – 264 с.
26. *Rosenblueth, A.* The Role of Models in Science / A. Rosenblueth, N. Wiener // *Philosophy of Science*. – 1945. – Vol. 12, № 4. – P. 316–321.
27. *Кулик, А.С.* Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления [Текст] / А.С. Кулик // Бизнес-Информ. Харьков. : Гос. аэрокосм. ун-т. “ХАИ”, 2000. – 260 с.
28. *Рубанов, В.Г.* Синтез оптимального алгоритма контроля работоспособности САУ по ее функционально логической модели [Текст] / В.Г. Рубанов, А.С. Кулик // *Автоматика*. – 1975. – № 4. – С. 9–14.
29. *Кулик, А.С.* Построение диагностических моделей при разработке диагностического обеспечения динамических систем [Текст] / А.С. Кулик, И.Б. Сироджа, А.Н. Шевченко // Препринт ИПМаш АН УССР Харьков. – 1989. – Ч. I, № 302. – 56 с., 1990. – Ч. II, № 312. – 61 с.

30. Кулик, А.С. Диагностируемость линейных непрерывных систем [Текст] / А.С. Кулик // Автоматика и телемеханика. – 1987. – № 6. – С. 148–155.
31. Кулик, А.С. Диагностируемость одного класса нелинейных систем [Текст] / А.С. Кулик // Автоматика. – 1989. – № 3. – С. 95–101.
32. Кулик, А.С. Диагностируемость линейных динамических систем [Текст] / А.С. Кулик // Докл. АН УССР. Сер. Физико-математические и технические науки. – 1990. – № 1. – С. 68–71.
33. Кулик, А.С. Диагностические модели динамических систем [Текст] / А.С. Кулик, И.Б. Сирожда // АСУ и приборы автоматики. – 1989. – Вып. 19. – С. 46–53.
34. Kulik, A. Formation of Rational Object Control in Abnormal Model [Text] / A. Kulik // Proc. 15th East-West Fuzzy Colloquium, September 17-19, Zittau, German. – 2008. – P. 186–191.
35. Кулик, А.С. Концепция активной отказоустойчивости спутниковых систем ориентации и стабилизации [Текст] / А.С. Кулик // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 2 (36). – С. 101–108.
36. Кулик, А.С. Обнаружение дефектов в динамических системах [Текст] / А.С. Кулик, И.Б. Сироджа, А.Н. Шевченко // Препринт ИПМаш АН УССР Харьков. – 1990. – № 344. – 37 с.
37. Кулик, А.С. Поиск места и идентификация дефектов в динамических системах [Текст] / А.С. Кулик, И.Б. Сироджа, А.Н. Шевченко // Препринт ИПМаш АН УССР Харьков. – 1991. – № 344. – 69 с.
38. Перегудов, Ф.И. Введение в системный анализ [Текст] : учеб. пособ. для вузов / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – М. : Высшая школа, 1989. – 367 с.
39. Макаров, И.М. Теория выбора и принятия решений [Текст] / И.М. Макаров [и др.]. – М. : Наука, 1987. – 328 с.
40. Трахтенгерц, Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений [Текст] / Э.А. Трахтенгерц. – М. : Синтег, 1998. – 280 с.
41. Первозванский, А.А. Поиск [Текст] / А.А. Первозванский. – М. : Наука, 1970. – 264 с.
42. Яглом А.М. Вероятность и информация [Текст] / А.М. Яглом, И.М. Яглом. – М. : Физматлит, 1960. – 315 с.
43. Кормен Т. Алгоритмы: построение и анализ [Текст] / Т. Кормен, И. Лейзерсон, Р. Ривест. – М. : МЦНМО, 2000. – 960 с.
44. Изерман, Р. Цифровые системы управления [Текст] / Р. Изерман. – М. : Мир, 1984. – 541 с.

45. *Линник, Ю.Ю.* Метод наименьших квадратов и основы математической теории обработки наблюдений [Текст] / Ю.Ю. Линник. – М. : Физматгид, 1962. – 211 с.
46. *Альсведе, Р.* Задачи поиска [Текст] / Р. Альсведе, Н. Венгер. – М. : Мир, 1982. – 368 с.
47. *Грэхсм, Р.* Конкретная математика. Основание информатики [Текст] : пер. с англ. / Р. Грэхсм, Д. Кнут, О. Паташник. – М. : Мир, 1998. – 703 с.
48. *Рвачев, В.Л.* Теория R-функций и некоторые ее приложения [Текст] / В.Л. Рвачев. – К. : Наук. думка, 1982. – 552 с.
49. *Кулик, А.С.* Определение видов дефектов в динамических системах [Текст] / А.С. Кулик // Проектирование комплексно-автоматизированных производств, Харьков. – 1990. – С. 58–65.

К главе 4

1. *Ляпунов, А.М.* Общая задача об устойчивости движения [Текст] / А.М. Ляпунов. – Москва-Ленинград: Гостехиздат, 1950. – 470 с.
2. *Барабашин, Е.А.* Функции Ляпунова [Текст] / Е.А. Барабашин. – М. : Наука, 1970. – 240 с.
3. *Гантмахер, Ф.Р.* Теория матриц [Текст] / Ф.Р. Гантмахер. – М. : Наука, 1966. – 576 с.
4. *Кунцевич, В.М.* Синтез систем автоматического управления с помощью функций Ляпунова [Текст] / В.М. Кунцевич, М.М. Лычак. – М. : Наука, 1977. – 400 с.
5. *Петров, Б.Н.* Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления [Текст] / Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова, С.Д. Земляков. – М. : Машиностроение, 1972. – 260 с.
6. *Петров, Б.Н.* Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами [Текст] / Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков. – М. : Наука, 1980. – 244 с.
7. *Кулик, А.С.* Синтез систем приспособляющихся к изменению параметров элементов и их отказам [Текст] / А.С. Кулик, В.Г. Рубанов, Ю.Н. Соколов // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 1. – С. 96–107.
8. *Справочник по теории автоматического управления* [Текст]: под. ред. А. А. Красовского. – М. : Наука, 1987. – 721 с.
9. *Кулик, А.С.* Обеспечение отказоустойчивости систем управления [Текст]: учеб. пособие / А.С. Кулик. – Х. : «Харьк. авиац. ин-т», 1991. – 90 с.

10. Кулик, А.С. Обеспечение отказоустойчивости систем управления статически неустойчивыми динамическими объектами [Текст] / А.С. Кулик, О.И. Гавриленко // Успехи современной радиоэлектроники. – 2004. – № 2. – С. 32–75.

11. Кулик, А.С. Рациональное управление работоспособностью аэрокосмических объектов при дестабилизирующих воздействиях [Текст] / А.С. Кулик // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 1 (108). – С. 31–37.

12. Лурье, А.И. Некоторые нелинейные задачи теории автоматического регулирования [Текст] / А.И. Лурье. – М. : Гостехиздат, 1951. – 216 с.

К главе 5

1. Шавров, В.Б. История конструкций самолетов в СССР до 1938 года [Текст] / В.Б. Шавров. – 3-е изд. исправл. – М. : Машиностроение, 1986. – 752 с.

2. Черановский, О.Р. Мечты и реальность или путь в науку [Текст] / О.Р. Черановский. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2010. – 87 с.

3. Набатов, А.С. Крылья ХАИ [Текст] / А.С. Набатов, А.Г. Гребенников. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2005. – 352 с.

4. Они покоряли небо [Текст] / С.А.Бычков, Л.А. Малашенко, В.Н. Кобрин [и др.] ; под ред. В.С. Кривцова, М.Н. Федотова. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т.», 2005. – 563 с.

5. Черановский, О.Р. Автоматизация диагностирования систем управления летающих моделей при стендовых испытаниях [Текст] : учеб. пособие / О.Р. Черановский, А.С. Кулик, С.Н. Садовничий. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1990. – 84 с.

6. Черановский, О.Р. Алгоритмические и программные средства диагностирования систем управления летательных аппаратов [Текст]: учеб. пособие / О.Р. Черановский, А.С. Кулик, С.Н. Садовничий, И.А. Булгаков. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1992. – 95 с.

7. Кулик, А.С. Стендовое компьютерное диагностирование блока гироскопических датчиков [Текст] : учеб. пособие / А.С. Кулик, А.П. Козий, Н.П. Отраднова. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1995. – 63 с.

8. Кулик, А.С. Диагностирование блока гироскопических датчиков канала тангажа летающей модели [Текст] / А.С. Кулик, Н.А. Булгаков, С.Н. Садовничий // Проблемы информатики в создании автоматизированных систем : сб. науч. тр. / Харьк. авиац. ин-т. – Харьков, 1990. – С. 60–76.

9. Kulik, A. Automatic control systems diagnostic support of flying models [Text] / A. Kulik, S. Sadovnichy, I. Bulgacov // Proc. of International Conference of Fault Diagnosis – TOOLDIAG'93, FRANCE, Toulouse. – 1993. – Vol. 1. – P. 99–108.

10. Kulik A. Sensor unit Fault – Toleration Enhancement by means of Failure Diagnosis and Serviceability restoration [Text] / A. Kulik, A. Kozij // Proc. IFAC Workshop on Intelligent Autonomus Wehicles. Southampton, UK. – 1993. – P. 515–521.

11. Kulik, A. Systems Fault – Tolerant Support for a Gyroscopic – Sensor Unit [Text] / A. Kulik, A. Kozij // Engineering Simulation. – 1996. – Vol. 13. – P. 955–966.

12. Разинькова, Н.П. Обеспечение отказоустойчивости гироскопических измерителей угловых положений беспилотных самолетов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук. / Н.П. Разинькова. – Х. : ХАИ, 1998. – 164 с.

13. Бороздин, В.Н. Гироскопические приборы и устройства систем управления [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.Н. Бороздин. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.

К главе 6

1. Раушенбах, Б.В. Управление ориентацией космических аппаратов [Текст] / Б.В. Раушенбах, Е.Н. Токарь. – М. : Наука, 1974. – 600 с.

2. Проектирование систем управления объектов ракетно-космической техники. Том 2. Проектирование систем управления космических аппаратов и модулей орбитальных станций [Текст] : учебник / Ю.С. Алексеев, Е.В. Белоус, Г.В. Беляев [и др.] ; под общ. ред. Ю.С. Алексеева, Ю.М. Златкина, В.С.Кривцова, А.С. Кулика, В.И. Чумаченко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», НПП Хартрон-Аркос, 2012. – 680 с.

3. Алексеев, К.Б. Управление космическими летательными аппаратами [Текст] / К.Б. Алексеев, Г.Г. Бебенин. – М. : Машиностроение, 1974. – 340 с.

4. Боднер, В.А. Системы управления летательными аппаратами [Текст] / В.А. Боднер. – М. : Машиностроение, 1983. – 506 с.

5. Лученко, О.А. Модели и методы активной отказоустойчивости спутниковых систем ориентации и стабилизации [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.03 : защищена 20.04.12 / Лученко Олег Алексеевич. – Х., 2012. – 173 с.

6. Таран, А.Н. Обеспечение активной отказоустойчивости объекта автоматической ориентации и стабилизации с двигателями-маховиками [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.03 : защищена 18.05.12 / Таран Александр Николаевич. – Х., 2012. – 175 с.

7. Батаев, В.А. Система стабилизации космического аппарата с электромаховичными управляющими органами [Текст] : учеб. пособие / В.А. Батаев, А.В. Комков. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. – 17 с.

К главе 7

1. Кулик, А.С. Введение в аэрокосмическую технику [Текст] : учеб. пособие / А.С. Кулик. – Х. : Гос. аэрокосмич. ун-т, 1999. – 48 с.

2. До, К.Т. Модели и методы обеспечения активной отказоустойчивости угловой стабилизации дискообразного летающего изделия [Текст]: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.03 : защищена 18.06.10 / Куак Туан До. – Х., 2010. – 201 с.

3. Нгуен, В.Т. Обеспечение отказоустойчивости системы управления манёвренным автономным летающим изделием на доэволютивных скоростях [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.03 : защищена 15.11.13 / Ван Тхинь Нгуен. – Х., 2013. – 196 с.

4. Kulik, A. Progressive tendencies of unmanned aerial vehicle functions intellectualization [Text] / A. Kulik // VI International Scientific Conference «Transport problems», Silesian University of Technology, 2014. – P. 379–383.

5. Лученко, О.А. Модели и методы активной отказоустойчивости спутниковых систем ориентации и стабилизации [Текст] : дис. ... кандидата техн. наук : 05.13.03 : защищена 20.04.12 / Лученко Олег Алексеевич. – Х., 2012. – 173 с.

6. Боднер, В.А. Системы управления летательными аппаратами [Текст]: учебник / В.А. Боднер. – М. : Машиностроение, 1973. – 506 с.

7. Мышкис, А.Д. Лекции по высшей математике [Текст] : учеб. пособие / А.Д. Мышкис. – М. : Наука, 1969. – 640 с.

8. Горбань, А.В. Математические модели динамики летательных аппаратов [Текст]: учеб. пособие / А.В. Горбань, В.А. Северилов. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1978. – 55 с.

9. *Лебедев, А.А.* Встреча на орбите. Динамика полёта и управления космическим аппаратом [Текст] / А.А. Лебедев, В.Б. Соколов. – М. : Машиностроение, 1969. – 368 с.
10. *Шаталов А.С.* Летательные аппараты как объекты управления [Текст] / А.С. Шаталов, Ю.И. Топчеев, В.С. Кондратьев. – М. : Машиностроение, 1972. – 240 с.
11. *Кулик, А.С.* Системный анализ и машинное моделирование объектов управления [Текст] : учеб. пособие / А.С. Кулик, И.В. Шостак. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1994. – 29 с.
12. *Управление и информатика в авиакосмических системах* [Текст] / под ред. В.Я. Распопова. – Приложение к журналу «Мехатроника, автоматизация, управление». – 2008. – № 10. – 25 с.
13. *Распопов, В.Я.* Микросистемная авионика [Текст] : учеб. пособие / В.Я. Распопов. – Тула: Гриф и К, 2010. – 248 с.
14. *Авіоніка безпілотних літальних апаратів* [Текст] / В.П. Харченко, В.І. Чепіженко, А.А. Тунік [и др.] ; за ред. В.П. Харченко. – К. : ТОВ «Абрис-принт», 2012. – 464 с.
15. *Мироновский, Л.А.* Аналоговое и гибридное моделирование. Многомерные системы [Текст] : учеб. пособие / Л.А. Мироновский. – Л. : Ленинградский ин-т авиац. приборостроения, 1986. – 88 с.
16. *Черановский, О.Р.* Мечты и реальность или путь в науку [Текст] / О.Р. Черановский. – Х. : Нац. аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2010. – 87 с.
17. *Разработка и имитационное моделирование устойчивой к боевым повреждениям системы стабилизации самолёта по крену* [Текст] : отчёт о НИР / ХАИ, НИИ ПФМ, Харьков, 1991. – 53 с.
18. *Кулик, А.С.* Разработка и исследование отказоустойчивой системы управления движением самолёта по крену [Текст] / А.С. Кулик, А.П. Козий // Знание-ориентированные системы поддержки принятия решений : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 1992. – С. 43–50.
19. *Кулик, А.С.* Формирование алгоритмов замкнутого диагностирования БПЛА [Текст] / А.С. Кулик, Н.Л. Процко // Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – № 11. – С. 77–80.
20. *Аэромеханика самолёта: Динамика полёта* [Текст] / под ред. А.Ф. Бочкарёва и В.В. Андриевского. – М. : Машиностроение, 1985. – 361 с.
21. *Таран, А.Н.* Обеспечение активной отказоустойчивости объекта автоматической ориентации и стабилизации с двигателями-маховиками

[Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.03 : защищена 18.05.12 / Александр Николаевич Таран. – Х., 2012. – 175 с.

22. *Кулик, А.С.* Отказоустойчивое управление: состояние и перспективы [Текст] / А.С. Кулик // *Авиационно-космическая техника и технология.* – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – 2000. – Вып.15. – С. 18–31.

23. *Авиационно-космические системы* [Текст] : сборник статей / под редакцией Г.Е. Лозино-Лозинского и А.Г. Братухина. – М. : Изд-во МАИ, 1997. – 416 с.

24. *Якубович, Н.В.* Все самолёты О.К. Антонова [Текст] / Н.В. Якубович. – М. : ООО «Издательство Астрель, ООО «Издательство АСТ», 2001. – 192 с.

25. *О.К. Антонов – многогранность таланта* [Текст] / составитель В.Г. Анисенко. – 3-е издание, дополненное. – К. : «Аэро Хобби», 2012. – 192 с.

26. *Анцелиович, Л.Л.* Надёжность, безопасность и живучесть самолёта [Текст] : учебник / Л.Л. Анцелиович. – М. : Машиностроение, 1985. – 296 с.

27. *Лукашевич, В.П.* Космические крылья [Текст] / В.П. Лукашевич, И.Б. Афанасьев. – М. : ООО «ЛенТаСтранствий», 2009. – 496 с.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Кулік Анатолій Степанович

ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ РАЦІОНАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ

Монографія

Адреса редакції:

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Україна, 61070, Харків – 70, вул. Чкалова, 17
e-mail: khai@khai.edu

Віддруковано ФОП Лисенко І.Б.

61070, Харків – 70, вул. Чкалова, 17, моторний корпус, к. 147

Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготовників
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 2607 від 11.09.06 р.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»

Кулик Анатолий Степанович

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ

Монография

Редактор С. Н. Пасичник

Св. план, 2016

Подписано в печать 03.03.2016 г.

Формат 60х84 1/16. Бум. офс. №2. Офс. печ.

Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 14,17. Тираж 100 экз.

Заказ 7 . Цена свободная

Адрес редакции:

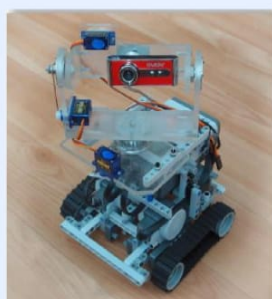
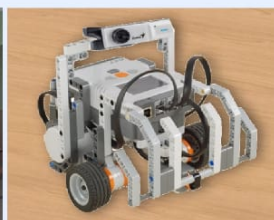
Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»

Украина, 61070, Харьков–70, ул. Чкалова, 17
e-mail: khai@khai.edu

Отпечатано ФЛП Лысенко И. Б.

61070, Харьков – 70, ул. Чкалова, 17, моторный корпус, к. 147

Свидетельство о внесении субъекта издательского дела в государственный реестр издателей,
изготовителей и распространителей издательской продукции
ДК № 2607 от 11.09.06 г.



- Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт" основан в 1930 году.

- Кафедра систем управления летательными аппаратами начинает свою историю с 1959 года.

- В становление и развитие кафедры внесли неоценимый вклад заведующие: Александр Иванович Лопатин, Николай Иванович Брёхин, Яков Ейнович Айзенберг.

- В 1977 году кафедра вошла в состав факультета "Системы управления летательных аппаратов".

- Заведующий кафедрой с 1998 года – Анатолий Степанович Кулик.

