

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»  
(ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»)

На правах рукописи

Шишаков Константин Валентинович

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ  
ДЛЯ РАЗРАБОТОК МНОГОСИСТЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ НАВЕДЕНИЯ  
БОЛЬШИХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами  
(в машиностроении и приборостроении)

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление  
и обработка информации (в науке и технике)

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант – доктор технических наук,  
профессор Алексеев Владимир Александрович

Ижевск – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр
ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1. МНОГОСИСТЕМНЫЕ КОМПЛЕКСЫ НАВЕДЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ БОЛЬШИХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	21
1.1. Современные большие оптические телескопы: общая характеристика, критерии, особенности управления .....	21
1.2. Проекты больших наземных оптических телескопов с многосистемным наведением .....	28
1.3. Проекты больших орбитальных оптических телескопов и их наведение .....	44
1.4. Постановка проблемы исследования.....	51
ГЛАВА 2. ДЕКОМПОЗИЦИЯ КОМПЛЕКСА НАВЕДЕНИЯ БОЛЬШИМИ ОПТИЧЕСКИМИ ТЕЛЕСКОПАМИ НА МОДУЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	54
2.1. Состав и общая характеристика многосистемного комплекса наведения большими оптическими телескопами.....	54
2.2. Декомпозиция комплекса наведения больших телескопов на модульные системы и режимы управления .....	60
2.3. Пространственно-временное частотное разделение модульных систем управления в комплексах наведения больших телескопов .....	67
2.4. Выводы по главе 2 .....	74

ГЛАВА 3. МОДЕЛИ ДЛЯ РАЗРАБОТОК УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМАХ СЛЕЖЕНИЯ БОЛЬШИХ ТЕЛЕСКОПОВ .....	76
3.1. Общие методики компьютерного анализа и идентификации моделей упругих управляемых элементов в составе механической конструкции большого телескопа .....	76
3.2. Низкочастотные модели следящего телескопа в альт-азимутальной монтировке .....	82
3.3. Модели управляемого по наклонам вторичного зеркала большого телескопа .....	84
3.3.1. Среднечастотные модели управляемого вторичного зеркала .....	85
3.3.2. Идентификация высокочастотной модели управляемого вторичного зеркала в составе конструкции его модуля .....	89
3.4. Моделирование динамических свойств управляемого по наклонам упругого третичного диагонального зеркала с обратной связью .....	92
3.5. Описание моделей плавно стабилизируемого космического аппарата как платформы следящего орбитального телескопа .....	98
3.6. Выводы по главе 3 .....	105
ГЛАВА 4. МОДЕЛИ ДЛЯ РАЗРАБОТОК УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМАХ КОРРЕКЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА .....	108
4.1. Моделирование управляемых деформаций главных зеркал телескопов для разработки модулей активной оптики .....	108
4.2. Модели гибких зеркал для разработки модулей адаптивной оптики, корректирующих влияние атмосферной турбулентности .....	117
4.3. Системы организации дополнительной оптической обратной связи для управления волновым фронтом .....	120
4.4. Выводы по главе 4 .....	127

ГЛАВА 5. ТРЕБОВАНИЯ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ РАЗРАБОТОК ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СЛЕЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ .....	129
5.1. Координатная увязка следящего телескопа с космическими объектами наблюдения .....	129
5.2. Задание начальных требований к разработке электроприводов слежения в альт-азимутальной монтировке телескопа .....	134
5.3. Модели прецизионных электроприводов наведения больших телескопов и синтез контуров управления ими в условиях возмущений .....	147
5.4. Выводы по главе 5 .....	157
ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ГИРОСКОПОВ ДЛЯ СИСТЕМ НАВЕДЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ .....	159
6.1. Факторы и модели неустойчивости дрейфа стоячих волн в твердотельном волновом гироскопе .....	161
6.2. Варианты алгоритмов формирования выходных измерительных сигналов твердотельного волнового гироскопа .....	170
6.3. Анализ технологических факторов, ухудшающих точность измерительных сигналов твердотельного волнового гироскопа .....	175
6.4. Выводы по главе 6 .....	184
ГЛАВА 7. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МНОГОСИСТЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ НАВЕДЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ БОЛЬШИХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ .....	186
7.1. Синтез алгоритмов управления следящим телескопом .....	187
7.2. Структурно-параметрический синтез многосистемного наведения больших наземных телескопов .....	192
7.2.1. Варианты режимов и структур взаимодействия автономно проектируемых модульных систем слежения .....	192

7.2.2. Согласование параметров синтезируемых регуляторов в многосистемных комплексах слежения .....	202
7.3. Структурно-параметрический синтез многосистемного наведения больших орбитальных телескопов .....	207
7.3.1. Синтез структур, режимов и алгоритмов управления модульными системами наведения .....	207
7.3.2. Влияние параметров измерительных средств на настройку структуры комплекса двухсистемного наведения .....	214
7.4. Выводы по главе 7 .....	224
<b>ГЛАВА 8. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМ В КОМПЛЕКСАХ СЛЕЖЕНИЯ БОЛЬШИХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ .....</b>	
8.1. Исследование факторов эффективности управления следящими электродвигателями наземного телескопа в условиях возмущений .....	227
8.2. Исследование возможностей повышения точности наведения телескопа с помощью управления вторичным зеркалом при низкочастотном накапливаемом оптическом сигнале ошибки .....	236
8.3. Прогнозирование эффективности повышения точности наведения орбитального телескопа с помощью управления вторичным зеркалом при высокочастотном сигнале восстановленной ошибки .....	242
8.4. Выводы по главе 8 .....	248
<b>ГЛАВА 9. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ОПТИМИЗАЦИИ МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМ КОРРЕКЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОСИСТЕМНОГО НАВЕДЕНИЯ БОЛЬШИХ ТЕЛЕСКОПОВ .....</b>	
9.1. Кластеризация и прореживание приводов управления для оптимизации пространственной структуры системы коррекции волнового фронта .....	251
9.2. Оптимизация градиентных методов коррекции волнового фронта по функционалам интенсивности светового поля .....	260

9.2.1. Построение градиентного управления при слабом световом сигнале .....	260
9.2.2. Ускорение градиентных алгоритмов пространственно распределенного управления формой гибких зеркал .....	264
9.3. Оптимизация систем адаптивной атмосферной оптики с обратной связью по волновому фронту .....	266
9.3.1. Оптимизация пространственных форм компенсации атмосферной турбулентности .....	266
9.3.2. Синтез алгоритмов модального управления гибкими зеркалами с настройкой на корреляционные свойства атмосферных аберраций .....	274
9.4. Анализ новых возможностей систем управления волновым фронтом при введении контуров оптической обратной связи.....	277
9.5. Выводы по главе 9 .....	281
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	284
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	290
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	292
ПРИЛОЖЕНИЕ. Акты внедрения научных разработок, выполненных по результатам исследований в диссертации Шишакова К.В. ....	323

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Стратегические цели в освоении космического пространства подтверждают возрастающую актуальность создания и развития широкого круга перспективных систем космического назначения. К ним, в том числе, относятся крупногабаритные оптические системы наблюдения за космическим пространством с большой апертурой, работающие в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах длин волн. Актуальность создания современных больших оптических телескопов (наземных и орбитальных) с расширенным списком оборудования для получения новой информации все более возрастает, что отражается в увеличении количества таких уникальных проектов.

При этом фундаментальные задачи наблюдения за развивающейся Вселенной требуют создания сверхбольших наземных телескопов с диаметром до 10 метров и более (до 30 м и даже 100 м), а также больших орбитальных космических телескопов с диаметром до 6 и более метров. В свою очередь, для прикладных задач наблюдения за околоземным пространством также требуется расширение возможностей наземных оптических систем: большая быстрота, увеличение апертуры, возможность подсветки космического объекта и другие.

Перечисленные направления разработки и создания больших оптических телескопов особенно быстро развиваются в последние десятилетия. При этом каждый новый проект является уникальным и дорогостоящим, так как обычно ставит перед собой новые задачи по получению фундаментальных и прикладных знаний о Вселенной.

Увеличение размеров крупноапертурной оптики до 10 и более метров неизбежно требует облегчения всей оптико-механической конструкции телескопа, подверженной эксплуатационным микродеформациям. Для этого применяются специальные сверхлегкие материалы и элементы конструкции. Чтобы в таких условиях обеспечить сохранность юстировки оптической схемы и обеспечить высокую точность наведения деформируемого большого телескопа, применяют все более широкий список активных систем управления. Их можно разделить на сле-

дующие три группы: системы слежения за объектами наблюдения, системы управления волновым фронтом и системы обеспечения сохранности юстировки оптической схемы в активном режиме.

Эффективная работа сверхбольших оптических телескопов становится напрямую зависима от эффективности их многосистемных комплексов наведения. Поэтому в состав последних стремятся включить: многоконтурные системы управления электроприводами углового слежения всем телескопом, корректирующие каналы слежения вторичными (третичными и другими) зеркалами в оптическом тракте, низкочастотные системы пространственно распределенной активной компенсации аберраций оптической схемы (которые принято называть системами активной оптики), высокочастотные системы пространственно-временной коррекции искажений волнового фронта в турбулентной атмосфере (системы адаптивной оптики), а также другие вспомогательные управляемые элементы, устройства и системы.

Перечисленные системы управления должны взаимно дополнять друг друга, оптимально перераспределять между собой роли в процессах наведения больших телескопов и совместно обеспечивать высокое качество оптического изображения в реальных эксплуатационных условиях. При этом могут присутствовать нестационарные ветровые, сейсмические, гравитационные и другие внешние возмущения, а также термонапряжения и упругие высокочастотные микроколебания оптико-механических элементов их конструкций. Достижение высокоточной работы многосистемного комплекса наведения больших телескопов (с точностью до 0.1 длины волн по волновому фронту и 0.1 угловой секунды по угловой ошибке) в таких условиях связывают с развитием интеллектуальных систем управления, подстраивающих свою структуру и алгоритмы под изменяющуюся обстановку.

Повышение сложности разработок и производства больших оптических телескопов при все большем увеличении размера их приемных апертур ставит множество новых теоретических и инженерных задач для каждого проекта. Необходимость создания прецизионных систем управления для уникальных комплексов

наведения в каждом проекте отражается и в увеличении количества научных публикаций в этом направлении.

Современные тенденции развития больших оптических телескопов связаны с дальнейшим повышением их точности, информативности и эффективности. Среди них выделим: 1) увеличение приемных апертур наземных телескопов до 10 и более метров; 2) объединение оптических систем в информационные комплексы с переменной многовариантной структурой и широким списком решаемых задач и потенциальных возможностей; 3) создание и выведение больших оптических телескопов (с апертурой до 6 и более метров) за пределы земной атмосферы и на удаленные космические орбиты; 4) доработку отлаженных на земле решений по управляемой оптике для применения в космосе; 5) использование облегченных конструкций и новых технологий; 6) расширение состава используемых активных и адаптивных систем пространственно-временного управления; 7) преобразование активных главных и вторичных зеркал, а также ряда других активных оптических элементов в разряд адаптивных (через расширение их полос частот от низких и средних до высоких частот); 8) повышение размерности обратной связи в активных и адаптивных оптических системах (с расширенными возможностями управления); 9) усложнение систем и алгоритмов управления в комплексе наведения; 10) интеграцию систем управления в оптико-механические комплексы наведения не только отдельных телескопов, но и их групп (интерферометры, оптические системы с разнесенными апертурами и другие).

Разработка проектов и изготовление современных больших оптических телескопов включает выполнение множества работ в соответствии с типовыми этапами жизненного цикла уникальных оптико-механических прецизионных приборов. С целью уменьшения затрат на их реализацию становится правилом параллельное создание сопровождающей имитационной модели телескопа, в основе которой лежит набор системно интегрированных математических и программных моделей отдельных элементов, узлов и систем.

Среди них отдельно выделяются модели и алгоритмы для сопровождения разработок и производства систем наведения телескопов, призванных обеспечи-

вать высокую проектную эффективность в изменяющихся условиях эксплуатации. Для больших оптических телескопов такая эффективность может быть достигнута только в результате действия интегрального эффекта от одновременной работы множества активных систем, в разных комбинациях и режимах оптимально конфигурируемых в единый комплекс наведения.

Их сопровождающие модели и алгоритмы становятся неотъемлемой частью автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами, так как обеспечивают выявление и понимание влияния тонких производственных факторов на достижение требуемых сверхвысоких точностей работы оптического телескопа в разных режимах. Кроме этого, для интеллектуальной поддержки процессов сборки, настройки и калибровки следящих больших оптических телескопов важна согласованная увязка отдельно разрабатываемых модульных активных систем и их элементов в единый комплекс наведения.

**Степень разработанности темы исследования.** Современный уровень исследований в области крупногабаритной оптики с многосистемными комплексами наведения отражается достигнутыми успехами в разработках, создании и эксплуатации больших оптических телескопов. Выделим следующие большие наземные оптические телескопы: Большой Телескоп Азимутальный БТА (1975г, диаметр апертуры 6 м), Канадско-Французско-Гавайский CFHT (1979 г, 3.58 м), Вильяма Гершеля WHT (1987г, 4.2 м), два телескопа-близнеца «W.M.Keck Telescopes» (1991 г и 1998 г, 9.82 м), Wisconsin-Indiana-Yale-NOAO (WIYN, 1994 г, 3.5 м), «Astrophysics Research Consortium Telescope (ARC, 1994 г, 3.5 м), Hobby-Eberly Telescope (HET, 1996 г, 10м × 11м), Итальянский Telescopio Nazionale Galileo (TNG, 1998 г, 3.58 м), Японский Subaru (1999 г, 8.3 м), Очень Большой Телескоп ESO VLT (1998 г и 2001 г, 8.2 м), Multiple-Mirror Telescope (MMT, 2000 г, 6.5 м), Gemini (GNT – 2000 г и GST – 2001 г, 8.1м), «Magellan 1,2» (2000 г и 2002 г, 6.5 м), Southern Observatory Astrophysical Research (SOAR, 2002 г, 4.25 м), «Gran Telescopio Canarias (GTC, 2002 г, 10.4 м), Large Binocular Telescope (LBT, 2004 г, 8.4 м), Southern African Large Telescope (SALT, 2005 г, 11 м), а также разрабатываемые и создаваемые проекты: Giant Segmented Mirror Telescope (GSMT, 30 м), Cali-

fornia Extremely Large Telescope (CELT, 30 м), Extremely Large Telescope (ELT, 35 м), eXtremely Large Telescope (XLT, 50 м), Европейский Чрезвычайно Большой Телескоп (E-ELT, 42 м), Thirty Meter Telescope (TMT, 30 м), Euro50 (50 м), Overwhelmingly Large Telescope (OWL, 100 м) и другие. Отметим также следующие большие орбитальные оптические телескопы: Hubble (1990 г, 2.4 м), Kepler Telescope (0.95 м), «Гершель» (3.5 м), Plank (1.55 м), проект James Webb Space Telescope (JWST, 6.5 м), российский проект Спектр-УФ (1.7 м) и другие.

Отечественные разработки по теме исследования проводились под руководством следующих ученых: акад. РАН Боярчука А.А., акад. РАН Балегга Ю.Ю., чл.кор. РАН Бисикало Д.В., чл.кор. РАН Шустова Б.М., Аванесова Г.А., Бакут П.А., Моишеева А.А., Стешенко Н.В., Сычева В.В., Теребиж В.Ю., Яскович А.Л. и др. – в области крупногабаритных наземных и орбитальных оптических телескопов; Воронцова М.А., Корниенко А.А., Кудряшова А.В., Лукина В.П., Лукьянова Д.П., Тараненко В.Г., Шмальгаузен В.И., Шанина О.И. и др. – в области адаптивной оптики; Дроздова В.Н., Калихман Д.М., Никифорова В.О., Попова А.П. и др. – в области прецизионных электроприводов управления и стендов; акад. РАН Журавлева В.Ф., акад. РАН Климова Д.В., Жбанова Ю.К., Липатникова В.И., Лунина Б.С., Матвеева В.А., Мачехина П.К. и др. – в области твердотельных волновых гироскопов. Еще более активно проводились и продолжают выполняться работы в перечисленных областях за рубежом, на что указывает большое количество созданных и разрабатываемых проектов крупногабаритных оптических телескопов, элементов и систем их комплексов наведения. Среди авторов монографий и справочников отметим: Tyson R.K., Fried D.L., Wilson R.N., Schroeder D.J., Lynch D.D. и др. Более полный список авторов исследований в перечисленных областях упоминается в списке литературы.

**Целью** диссертационной работы является решение важной научно-технической проблемы – повышение качественных и эксплуатационных показателей функционирования разрабатываемых и создаваемых уникальных больших оптических телескопов (наземных и орбитальных) за счет увеличения интегрального потенциала от улучшения характеристик и взаимодействия модульных сис-

тем управления, объединяющиеся в их настраиваемые многосистемные комплексы наведения.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Выявление научно-технических задач и определение направлений их решения для создания высокоэффективных комплексов многосистемного наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных), являющихся автоматизированными системами научных исследований (05.13.06, п. 20) .

2. Применение теории декомпозиции к совместному проектированию распределенных многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов для формализации и постановки задач системного анализа, оптимизации и управления его модульными системами, интегрально обеспечивающими проектную эффективность создаваемых телескопов (05.13.06, п. 7; 05.13.01, п. 2).

3. Разработка и анализ моделей объектов управления для модульных систем слежения в составе распределенных комплексов наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных), позволяющих учесть допуски производственных погрешностей их изготовления (05.13.06, п. 7).

4. Разработка и анализ моделей объектов управления с алгоритмами пространственно-распределенной обратной связи для модульных систем коррекции волнового фронта в составе распределенных комплексов наведения больших телескопов, призванных повысить их интегральную эффективность (05.13.06, п. 7).

5. Разработка моделей и алгоритмов управления прецизионными электроприводами, а также методик задания начальных требований к ним для интеллектуальной поддержки разработок и изготовления опорно-поворотных устройств в системах наведения больших наземных оптических телескопов (05.13.06, п. 7).

6. Разработка моделей и алгоритмов для интеллектуальной поддержки проектирования и производства твердотельных волновых гироскопов повышенной точности, являющихся перспективными высоконадежными измерительными средствами для систем угловой стабилизации космического аппарата с большим оптическим телескопом (05.13.06, п. 7).

7. Развитие теории, разработка методов и алгоритмов структурно-параметрического синтеза многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных) с ориентацией на автономность изготовления модульных систем управления с последующей настройкой и калибровкой межсистемных связей (05.13.06, п. 7; 05.13.01, п. 7).

8. Исследование методами моделирования влияния технических параметров, эксплуатационных факторов и условий на прогнозируемую эффективность модульных систем слежения в составе комплексов наведения больших оптических телескопов, обеспечивающих автоматизированную поддержку научных исследований (05.13.06, п. 20).

9. Исследование направлений совершенствования и разработка методов оптимизации модульных систем коррекции волнового фронта с целью повышения эффективности разрабатываемых и создаваемых больших оптических телескопов с комплексами многосистемного наведения (05.13.06, п. 20; 05.13.01, п. 9).

**Область исследования**, обозначенная в сформулированных задачах, соответствует пунктам паспорта научной специальности 05.13.06: п. 7 «Методы совместного проектирования организационно-технологических распределенных комплексов и систем управления ими», п. 20 «Разработка автоматизированных систем научных исследований», а также пунктам паспорта научной специальности 05.13.01: п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п. 7 «Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем», п. 9 «Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов».

**Объект исследования** – комплексы многосистемного наведения разрабатываемых и создаваемых проектов больших оптических телескопов (наземных и орбитальных).

**Предмет исследования** – методология, модели, методы, алгоритмы и средства анализа управления сложными системами, повышения эффективности и качества многосистемных комплексов управления.

**Научная новизна** работы заключается в разработанных методологии, формализованных подходах, моделях, методах и алгоритмах применительно к улучшению качественных и эксплуатационных показателей функционирования больших оптических телескопов (наземных и орбитальных) за счет использования интегрального потенциала их многосистемных комплексов наведения. Новизна научных результатов диссертационного исследования состоит в том, что:

1. Предложена методология для сопровождения разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов, основывающаяся на их пространственной и временной частотной декомпозиции и взаимно увязывающая методы, модели и алгоритмы разработок составных модульных систем управления, призванных интегрально обеспечить проектную эффективность создаваемых больших телескопов в условиях эксплуатационных микродеформаций их оптико-механических конструкций.

2. Разработана система моделей модульных систем слежения с учетом влияния допусков технологических погрешностей изготовления их элементов и конструкций для интеграции в распределенные комплексы наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных).

3. Разработана и исследована система моделей модульных систем коррекции волнового фронта с контурами управления распределенной обратной связью, включая оптическую обратную связь, для интеграции в распределенные комплексы наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных).

4. Предложена система взаимно дополняющих моделей и алгоритмов управления прецизионными электроприводами с учетом влияния упругих деформаций их элементов, а также внутренних микропульсаций и электромагнитных возмущений, для выбора конструктивных и электромеханических параметров, обеспечивающих требуемую эффективность наведения больших наземных оптических телескопов в опорно-поворотном устройстве.

5. В рамках задачи повышения точности измерительных сигналов комплексов наведения больших орбитальных оптических телескопов разработана расширенная и детализированная система моделей формирования сигналов твердотель-

ных волновых гироскопов, позволившая в процессе их производства уточнить влияние на выходные сигналы технологических допусков изготовления, а также алгоритмов управления внутренними волновыми процессами.

6. В рамках задачи совместного проектирования распределенных комплексов наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных) предложены методы и алгоритмы для проведения структурно-параметрического синтеза многосистемных комплексов слежения по критериям минимизации эксплуатационных деформаций облегченных конструкций больших телескопов, ориентированные на автономность процессов по созданию и начальной настройке модульных систем при сохранении их интегрального единства и согласования для достижения требуемой эффективности наведения.

7. Предложены комплексные модели, позволившие исследовать влияние алгоритмов и параметров систем управления, а также внешних и внутренних возмущающих факторов на эффективность двухсистемного слежения большими оптическими телескопами.

8. Предложена, разработана и исследована цельная система взаимно дополняющих методов настройки и оптимизации модульных систем коррекции волнового фронта, призванных в совокупности повысить интегральную эффективность больших оптических телескопов.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы состоит в создании методологической основы для повышения качественных и эксплуатационных показателей функционирования разрабатываемых и создаваемых уникальных больших оптических телескопов с многосистемным управлением. Предложенные и обоснованные положения в совокупности развивают новое перспективное научное направление разработки и создания прецизионных многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных), ориентированное на сопровождение разработок, производства и предэксплуатационной настройки их модульных активных систем и элементов.

**Практическая значимость** диссертационной работы состоит в том, что использование разработанных методологии, формализованных подходов, моделей,

методов и алгоритмов: 1) Расширяет возможности принятия решений при сопровождении разработок и распределенного изготовления многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов, а также их модульных систем;

2) Расширяет возможности и точность прогнозирования эксплуатационной эффективности наземных и орбитальных больших оптических телескопов с многосистемным управлением. В целом, предложенный комплексный подход к сопровождению разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов позволяет решать широкий круг практических задач повышения их эксплуатационных показателей на всех этапах жизненного цикла.

Материалы диссертационного исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» (имеется акт внедрения). Результаты диссертационной работы также внедрены в Физико-техническом институте Уральского отделения РАН (г.Ижевск), на АО «Ижевский электромеханический завод «ИЭМЗ «Купол» (г. Ижевск), на АО «Ижевский механический завод «ИМЗ», в ЗАО «Научно-производственный центр «НПЦ «Техинформ» (г. Королев) (имеются акты об использовании результатов исследований).

Кроме этого, результаты проведенных исследований в разное время были использованы в процессе выполнения научно-технических и исследовательских работ в: Институте космических исследований АН СССР (г. Москва), СКБ физического приборостроения АН СССР (г. Троицк Московской области), НПО «Ас-тофизика» (г. Москва), Физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова, Международном лазерном центре при МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва), Физико-техническом институте АН Туркменистана (г. Ашгабад), Институте Астрономии РАН (г. Москва), НПО им. Лавочкина (г.Москва), научно-техническом центре «НТЦ «Восход» (г.Ижевск).

**Методы исследования** базируются на методах решения задач системного анализа, оптимизации, теории управления, радиофизики, случайных процессов, теории полета искусственных спутников; вычислительной математики, аналитического, математического и статистического имитационного моделирования; ме-

ханики сплошных сред, теории упругости, прикладной оптики; методах структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем; методах теории эксперимента в исследовании систем.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Методологическая основа для проведения системного анализа, синтеза, оптимизации и управления на основе временной и пространственной частотных декомпозиций применительно к комплексам многосистемного наведения больших оптических телескопов (05.13.01, п. 2).

2. Модели и методы проектирования объектов управления для модульных систем слежения в составе распределенных комплексов наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных), позволяющие учесть производственные допуски погрешностей их изготовления (05.13.06, п. 7).

3. Модели и методы проектирования объектов управления с алгоритмами пространственно-распределенной обратной связи для модульных систем коррекции волнового фронта в составе распределенных комплексов наведения больших оптических телескопов (05.13.06, п. 7).

4. Методикой задания начальных требований, модели и алгоритмы управления прецизионными электроприводами с упругими элементами для интеллектуальной поддержки разработок и изготовления опорно-поворотных устройств в системах наведения больших наземных оптических телескопов (05.13.06, п. 7).

5. Модели и алгоритмы для интеллектуальной поддержки проектирования и производства твердотельных волновых гироскопов повышенной точности, являющихся перспективными высоконадежными измерительными средствами для модульной системы угловой стабилизации космического аппарата с большим оптическим телескопом (05.13.06, п. 7).

6. Структуры и алгоритмы управления для многосистемных комплексов слежения больших наземных и орбитальных оптических телескопов, полученные методами структурно-параметрического синтеза сложных систем и ориентированные на совместное проектирование распределенных комплексов наведения больших телескопов (05.13.06, п. 7; 05.13.01, п. 7).

7. Имитационные модели и результаты прогнозирования достигаемой эффективности комплексов двухсистемного слежения больших оптических телескопов с учетом выявления влияния на нее технических параметров, эксплуатационных факторов и условий (05.13.06, п. 20).

8. Система взаимно дополняющих методов настройки и оптимизации модульных систем коррекции волнового фронта, призванных в совокупности повысить интегральную эффективность больших оптических телескопов (05.13.06, п. 20; 05.13.01, п. 9).

**Степень достоверности.** Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат теоретическим и практическим результатам, известным из научных публикаций. Они базируются на использовании апробированных научных положений и методов исследования, корректном применении математического аппарата, сертифицированных программ моделирования, согласовании новых результатов с известными. Подтверждаются результатами апробации, внедрения и экспериментальной проверкой отдельных теоретических положений.

**Апробация работы.** Основные научные положения и практические результаты обсуждались в разной мере на следующих конференциях и семинарах: Всесоюзном семинаре «Адаптивная оптика и диагностика волнового фронта» (Черновцы, 1989), Десятом Всесоюзном симпозиуме по распространению лазерного излучения в атмосфере (Томск, 1989), Третьей Всесоюзной НТК «Применение лазеров в народном хозяйстве» (Шатура, 1989), Двадцатой Всесоюзной школе по когерентной оптике и голографии (Черновцы, 1989), Шестой Всесоюзной НТК «Оптика лазеров» (Ленинград, 1990), Второй Всесоюзной НТК «Обращение волнового фронта лазерного излучения в нелинейных средах» (Минск, 1989), Шестом Советско-американском семинаре по лазерной оптике конденсированных сред (USA, 1990), НПК «Дифференциальные уравнения и их приложения» (Ашгабад, 1993), НТК «Актуальные проблемы физики твердого тела, радиофизики и теплофизики» (Ашгабад, 1993), Первой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 1994), Всероссийской НТК «Алгоритмический анализ некорректных задач» (Екатеринбург, 1998), Втором межведомственном научно-

практическом семинаре «Проблемы и технологии создания и использования космических систем и комплексов на базе малых КА и орбитальных станций» (Москва, 1998), Техническом семинаре по малым КА в НПО Арсенал (г. Санкт-Петербург, 1999), Технических семинарах по малым КА в ИКИ РАН (г. Москва, ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, 1999), Технических семинарах по адаптивным зеркалам для телескопов в ИКИ РАН (г. Москва), Всероссийской НТК «Аэрокосмическая техника и высокие технологии» (Пермь, 2000), Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001), Всероссийской НТК «Аэрокосмическая техника и высокие технологии» (Пермь, 2001), Технических семинарах по Автономной системе гидрирования в рамках проекта «Спектр-УФ» в Институте Астрономии РАН и на НПО им. Лавочкина (г. Москва, 1994-2000), X Международной НПК «Системный анализ в проектировании и управлении» (г. Санкт-Петербург, 2006), XI Международной НПК «Системный анализ в проектировании и управлении» (г. Санкт-Петербург, 2007), V Всероссийской НТК с участием СНГ «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем» (г. Ульяновск, 2007), VIII Международной НТК «Кибернетика и высокие технологии XXI века» (г. Воронеж, 2007), Техническом семинаре по космическому интерферометру в рамках проекта «Озирис» в Институте Астрономии РАН (г. Москва, 2000-2010), на начальных стадиях проектирования Телескопа Алтайского оптико-лазерного центра с главным зеркалом диаметром 3.12 м, Междунар. НПК «Проблемы современных интеграционных процессов и пути их решения» (2017), Технических семинарах по твердотельному волновому гироскопу на ИЭМЗ «Купол» (г. Ижевск, 2001-2018), Междунар. НТК «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства» (г. Ижевск, 2006 - 2018) и других.

**Публикации материалов диссертации.** По материалам диссертации опубликовано 68 печатная статья, из них 44 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, из которых 17 работ выполнены соискателем лично, остальные в соавторстве. Написанию диссертации предшествовало написание учебного пособия:

«Шишаков К.В. Информационные оптические системы космического назначения с многоканальным управлением. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011. – 346 с.», в которой приведен более обширный и подробный обзор больших оптических телескопов и их комплексов, а также детализированы вопросы проведения их системного анализа и интеллектуальной поддержки разработок. По теме диссертации также выпущена монография: «Шишаков К.В. Твердотельные волновые гироскопы: волновые процессы, управление, системная интеграция. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2018. – 264 с.», в которой исследованы пути повышения точностных характеристик гироскопических измерительных устройств и построение на их основе многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов.

**Личное участие автора** состоит в выделении и системном рассмотрении исследуемой проблемы, в постановке и решении рассматриваемых в диссертации задач по ее раскрытию, в разработке методов, методик, алгоритмов и моделей. При личном участии автора проводились анализ и интерпретация полученных экспериментально и в процессе моделирования результатов.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, девяти глав, заключения, списка литературы из 344 наименований и приложения. Общий объем работы – 327 страниц, включая 71 рисунок.

Автор выражает благодарность своим наставникам, учителям, консультантам, постановщикам практико-ориентированных задач по теме диссертации, соавторам и участникам выполненных исследований, в том числе: д.т.н., профессору В.А. Алексееву, д.ф.-м.н., профессору Физического факультета МГУ В.И. Шмальгаузен, д.ф.-м.н., к.т.н., Главному конструктору Проекта «Автономная система гидирования» в рамках проекта «Спектр-УФ» А.Н. Исупову, Главному конструктору гироскопических устройств и приборов «ИЭМЗ «Купол», Действительному члену «Академии навигации и управления движением» П.К. Мачехину, а также коллегам за помощь в работе.

# **ГЛАВА 1. МНОГОСИСТЕМНЫЕ КОМПЛЕКСЫ НАВЕДЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ БОЛЬШИХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Глава является обзорной и посвящена рассмотрению объектов и проблемы исследования. Для этого дается обобщенная характеристика современных оптических телескопов, имеющих многосистемные комплексы наведения, а также кратко описываются параметры входящих в них модульных систем управления для конкретных конструктивных реализаций телескопов. Глава завершается постановкой проблемы исследования.

## **1.1. Современные большие оптические телескопы: общая характеристика, критерии, особенности управления**

Рассмотрению современных оптических систем и их активных систем управления посвящена обширная литература. Среди монографий и справочных изданий по оптическим системам выделим [33, 53, 78, 125, 173, и др. ], а по телескопам – [14, 134, 135, 141, 142, 152, 167, 170, 178, 198, 288, 322, 326, 340, 341, и др. ]. Среди статей по оптическим системам отметим [56, 126, и др.], по телескопам – [95, 96, 139, 162, 172, 205, и др. ].

Современные оптические телескопы для наблюдения космического пространства и их проекты имеют большие приемные апертуры – от 3 до 10 и более метров. По месту установки их делят на наземные и орбитальные. Так как стоимость космических проектов на порядки превышает стоимость аналогичных наземных проектов, поэтому в настоящее время в наибольшем количестве реализованы проекты больших наземных телескопов (обычно работают в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн). Полезной информацией являются изображения наблюдаемых космических объектов и угловых областей космического пространства, а также результаты спектрального анализа их излучения. При этом ра-

бота в инфракрасном диапазоне длин волн позволяет в ряде случаев улучшить наблюдения сквозь облака и космическую пыль.

Повышение углового разрешения космических объектов, наблюдаемых телескопами, требует ослабления влияния атмосферной турбулентности или же выведение телескопа на космическую орбиту. Отсутствие атмосферы в последнем случае позволяет расширить спектральный состав получаемой информации, переходя в ультрафиолетовую область оптического спектра.

Для улучшения условий наблюдения, наземные телескопы могут включать вспомогательные излучающие подсистемы: лазерную подсветку околоземного космического объекта наблюдения и создание лазерной звезды в верхних слоях атмосферы (для обеспечения условий работы атмосферной адаптивной оптики при наблюдении слабых астрономических объектов). Для повышения эффективности лазерной подсветки может применяться адаптивная фокусировка лазерного излучения на объект. Среди книг по управлению лазерным излучением отметим [80, 90, 111, 112, 166, 196, и др. ], а среди статей – [11, 65, 89, 91, 106, 299, 300, 308, 310, 317, и др. ].

Основными критериями получаемой оптической информации считаются оптическая чувствительность и разрешающая способность. Для повышения чувствительности стремятся увеличить диаметр  $D$  приемной апертуры. Это, в свою очередь, позволит повысить проникающую силу, характеризуемую предельной звездной величиной  $m$  наиболее слабой из наблюдаемых звезд. Связь параметров  $m$  и  $D$  для коротких экспозиций можно оценить по известной формуле:  $m = 2.1 + 5 \lg(D)$ , где  $D$  измеряется в мм. В частности, при  $D = 38, 100, 10000$  мм соответственно получаем:  $m = 10, 12, 22$  (для длинных экспозиций  $m$  будут увеличены).

Разрешающая способность характеризуется минимальным углом разрешаемых точечных объектов. В идеальном случае связана с  $D$  по формуле:  $\Delta = 1.22 \lambda/D$  (где  $\lambda$  - длина волны). Из-за атмосферного дрожания изображений ее значение для больших наземных телескопов обычно не опускается ниже 0.3 угл.сек.

Другими важными характеристиками больших телескопов являются:

- угловое увеличение  $\Gamma = f_{\text{объектива}} / f_{\text{окуляра}}$  ( $f$  – фокусное расстояние) – показывает, во сколько раз угол, под которым виден объект в телескоп, больше, чем при наблюдении глазом;
- относительное фокусное расстояние  $\phi = f / D$ , или относительное отверстие  $D / f$ , или светосила  $(D / f)^2$  (пропорциональна освещенности, создаваемой объективом в фокальной плоскости);
- диаметр круга  $d_{80}[\text{угл.сек}] \approx \lambda[\text{мкм}] / 2D[\text{м}]$ , в пределах которого сосредоточено 80% световой энергии в изображении точечного источника света;
- угловое поле зрения  $2w[\text{угл.мин}] \approx 0.276 \cdot \phi^2 \cdot d_{80}[\text{угл.сек}]$  (формула Боуэна).

В отношении обзорных исследований в качестве критерия информативности также используют величину *etendue* (протяжение):  $E = A \cdot \Omega = (\pi w D / 2)^2$ , где  $A = \pi D^2 / 4 [\text{м}^2]$  – площадь апертуры,  $\Omega = \pi w^2 [\text{угл.град}^2]$  – телесный угол, охватывающий поле зрения.

Исходя из приоритетности чувствительности или разрешающей способности, информационные оптические системы могут иметь заполненную или незаполненную приемную апертуру. К первому классу относятся отдельные большие телескопы, ко второму – интерферометры и оптически связанные комплексы пространственно-разнесенных телескопов. Среди книг по таким интерферометрам отметим [103, 192, и др.], а среди статей [27 и др.].

Большие телескопы имеют свои преимущества: возможность наблюдения удаленных слабых объектов (наиболее интересны для фундаментальной науки), а в ряде режимов и более широкое поле зрения (позволяет изучать протяженные объекты, включая галактики и области звездообразования). Для сравнения, поля зрения телескопов в интерферометрах составляет несколько угловых секунд.

Создание больших телескопов предполагает высокую стоимость работ (для наземных – десятки и сотни миллионов долларов: до 80-х годов она была оценочно пропорциональна  $D^{2.6}$ , для орбитальных – несколько миллиардов долларов). Поэтому, если приоритетным критерием является разрешающая способность, экономически выгоднее создавать интерференционные системы из меньших по

диаметру телескопов. Разнося их на большие расстояния, можно получать угловое разрешение, многократно превосходящее разрешение больших телескопов.

Оптические схемы больших телескопов состоят из зеркальных элементов, исключая хроматическую абберацию. Современные технологии создания облегченных относительно тонких зеркал с отношением [толщина / диаметр]  $< 1 / 20$  (для сравнения, в классических «тяжелых» телескопах [толщина / диаметр]  $> 1 / 8$ ) позволяют значительно уменьшить вес и габариты телескопа, но требуют применения активных систем обеспечения сохранности юстировки оптической схемы.

Главное зеркало телескопа в классических оптических схемах имеет параболическую форму, а в более современной схеме Ричи-Кретьена – гиперболическую. При проведении преимущественно спектральных наблюдений отдельных объектов с использованием узких полей зрения (в несколько угловых минут) для удешевления больших главных зеркал их иногда проектируют сферическими.

Сверхбольшие оптические телескопы обычно имеют три больших отражательных зеркала в оптической схеме: главное (ГЗ), вторичное (ВЗ) и третичное диагональное зеркало (ДЗ), перебрасывающее световой поток на оптические инструменты (размещаемые в разных фокусах со своими полями зрения). Поворачивая ДЗ вокруг оптической оси, легко реализовать переключение светового потока на фокусы Несмита (через полый вал высотной оси телескопа) и на изломанные фокусы Кассегрена. При выведении ДЗ из оптического тракта работают с классическими фокусами Кассегрена (или Грегори). Пропуская световой поток через фокусы Несмита, его можно направить дальше, к фокусам Кудэ. При этом трехзеркальная базовая схема приемной оптики дополняется многозеркальными оптическими схемами перебрасывающей оптики, направляющей световой поток к дополнительному стационарному измерительному оборудованию в лабораториях. Заметим, что фокусы Кудэ предназначены в основном для работы с одиночными объектами, так как размер поля в них из-за длинной перебрасывающей оптики обычно равен нескольким угловым минутам. С уменьшением размера поля уменьшается светосила инструмента. Для фокусов Кудэ она составляет порядка  $1:30^2$  (для сравнения: в фокусе Ричи-Кретьена – порядка  $1:8^2$ ).

Разработка уникальных и сложных систем управления большими оптическими телескопами обусловлена предъявляемыми к ним высокими требованиями. Так, они призваны обеспечивать высокие точности наведения: по сопровождению – до 0.1 угл.сек, а по коррекции искажений волнового фронта – до 0.1  $\lambda$ . Одновременное сочетание больших размеров и высоких точностей стало возможным только с использованием большого числа активных систем управления телескопом, решающим задачу не только эффективного наведения телескопа на выбранный световой объект, но и активного поддержания неизменной оптической схемы телескопа в условиях широкого спектра внешних и внутренних возмущений. Среди книги по управлению оптическими системами отметим [5, 40, 208, 332, и др. ], а среди статей – [9, 32, 50, 127, 297, 318, 321, 330, 337, 338, и др. ].

По решению поставленных задач такие системы управления принято разделять на две группы. Первая из них обеспечивает высокоточное сопровождение выбранного объекта наблюдения (системы слежения) и создает условия для работы второй группы (что особенно важно для длинных временных экспозиций). Вторая группа систем (системы управления волновым фронтом) реализует достижение практически безаберрационной регистрации оптического изображения, тем самым одновременно повышая отношение [сигнал / шум] в измерительных сигналах систем управления первой группы. Внутри каждой из групп часто можно выделить базовую систему управления и корректирующие ее работу более высокочастотные системы управления.

Так, в группе систем слежения сначала обеспечивают низкочастотное сопровождение объекта наблюдения всем большим телескопом. Из-за его деформируемости остаточную ошибку слежения в условиях широкого спектра возмущений эффективнее уменьшать управляемым по наклонам вторичным зеркалом. Для компенсации еще более высоких частот в ошибке сопровождения можно включать в работу и другие, более высокочастотные зеркала.

Основным критерием качества работы систем слежения является точность сопровождения выбранного объекта наблюдения. В частности, это точность удержания пятна изображения в центре ПЗС-матрицы оптического приемника.

Среди книг по оптическим датчикам и навигационным системам отметим [85, 143, 289, и др. ], а среди статей – [3, 4, 54, 58, 66, 79, 107, 344 и др.].

В свою очередь, важнейшим критерием качества работы систем коррекции волнового фронта является пространственное разрешение наблюдаемых объектов, определяющее качество их оптического изображения. Его наиболее сильно ухудшают пространственно-временные искажения волнового фронта, возникающие в оптической схеме и в турбулентной атмосфере (для наземных телескопов). Для их компенсации соответственно разделяют системы фазовой коррекции на активную оптику и адаптивную оптику.

Основной задачей активной оптики считается компенсация аберраций, возникающих в оптическом тракте телескопа. В первую очередь, это активное исправление деформаций поверхности ГЗ. Также могут активно компенсироваться эксплуатационные деформации и других крупногабаритных частей и элементов оптико-механической конструкции. Поэтому такие системы обычно являются низкочастотными - не выше нескольких Гц. Среди книг и статей по активной оптике отметим [96, 178 – 183, 302, и др. ].

В свою очередь, задачей адаптивной оптики является компенсация случайных атмосферных аберраций, имеющих место на трассе. Они возникают при прохождении оптического поля через турбулентную атмосферу. Так как время замороженности атмосферы оценивают в 0.1 сек, поэтому такие системы являются высокочастотными - до кГц и выше. Этому направлению посвящены многочисленные книги [6, 7, 39, 67, 116, 117, 120, 184, 188, 189, 292 – 296, 331, и др. ] и статьи [25, 26, 36, 42, 43, 44, 101, 108, 109, 118, 119, 202, 203, 298, 303, 304, 308, 309, 313, 314, 315, 316, 319, 320, 323, 328, 333, 336, и др. ].

В пространственной области активные и адаптивные системы отрабатывают близкие и даже совпадающие порядки аберраций. Для больших наземных телескопов порядок компенсируемых пространственных искажений адаптивными зеркалами обычно выше, чем в системах активной оптики. В то же время во временной области они имеют достаточно сильное частотное разделение, что на практике часто позволяет рассматривать их независимо. Среди статей по управ-

ляемым зеркалам отметим [2, 22, 29, 41, 59, 60, 88, 92, 161, 185 – 187, 301, 311, 312, 324, 325, 334, 335, 343 и др. ].

Среди компенсируемых пространственных aberrаций в первую очередь принято выделять средние наклоны волнового фронта, классические пространственные aberrации низших порядков (дефокусировка, астигматизм, кома) и пространственные aberrации более высоких порядков.

Учитывая большое различие амплитуд наклонов и пространственных деформаций волнового фронта для отработки адаптивными зеркалами, в ряде случаев используют два зеркала: одно управляется по наклонам, второе – с управляемой деформацией своей поверхности. При этом в деформируемом зеркале организация обратной связи по волновому фронту является многомерной – включает несколько десятков и даже сотен приводов управления.

Для встраивания элементов активной и адаптивной оптики в контура управления волновым фронтом с обратной связью используют четыре основных типа систем: компенсации волнового фронта, повышения резкости изображений, фазового сопряжения и апертурного зондирования.

Наиболее часто комплекс многосистемного наведения больших оптических облегченных телескопов функционально разделяется на следующие модульные системы: 1) общего углового наведения платформой телескопа – угловым положением всего телескопа; 2) корректирующего наведения – наклонами зеркал (ВЗ, ДЗ) в оптическом тракте телескопа; 3) активной оптики – для низкочастотной пространственной коррекция оптических aberrаций, возникающих в тракте телескопа; 4) адаптивной оптики – для высокочастотной компенсации искажений волнового фронта, возникающих вдоль трассы распространения светового поля; 5) обеспечивающие (включая лазерные излучающие системы подсветки, зажигания искусственных звезд и др.). При этом каждая из перечисленных систем может включать подчиненные подсистемы со своими разветвленными внутренними контурами обратных связей.

Главной задачей таких многосистемных оптико-механических комплексов наведения больших телескопов является интегральное обеспечение всеми систе-

мами управления высокого качества оптического изображения наблюдаемых объектов и других оптических критериев в условиях возмущений.

Отметим особенности многосистемных комплексов наведения больших орбитальных телескопов. Наведение всем телескопом здесь осуществляется системой управления угловой ориентацией космического аппарата (КА). Из систем активной оптики выделяется система коррекции формы ГЗ. Ее главной задачей является квазистатическая компенсация термдеформаций, создаваемых высокими температурными градиентами. С увеличением размеров приемной апертуры критичными также будут становиться инерционные нагрузки, возникающие в процессе работы системы активной угловой стабилизации КА. Для их уменьшения отработка более высоких временных частот слежения перекладывается на управляемое по наклонам ВЗ, работающее в допустимом угловом диапазоне. Из-за отсутствия атмосферы адаптивные системы обычно не требуются. Однако в отдельных случаях для компенсации высокочастотных микроколебаний зеркал телескопа они могут пригодиться.

## **1.2. Проекты больших наземных оптических телескопов с многосистемным наведением**

Современные большие наземные оптические телескопы имеют, как правило, альт-азимутальную монтировку и работают в оптическом и / или инфракрасном диапазоне длин волн. Их описанию посвящена обширная литература, включая соответствующие тематические сайты в интернете. Среди книг здесь отметим [146, 178, 190, 271, и др.], а среди статей – [14, 63, 168, 176, 284, 285, и др.]. Достаточно подробный обзор информации с точки зрения многосистемного управления приведен в книге автора [271] (с необходимыми ссылками). Поэтому ниже ограничимся сокращенным изложением материала.

***Большой Телескоп Азимутальный (БТА).*** Полная масса телескопа 850 т, высота телескопа – 42 м, высота купола – 53 м. Диаметр сплошного параболического главного зеркала (ГЗ) – 6 метров, фокусное расстояние – 24 м, масса – 42

тонны. Телескоп имеет маслянную систему подвески. Точность вращения вертикальной оси – около 2 угл.сек. Точность автоматической установки по заданным координатам  $\pm 10$  угл.сек.

Цифровой следящий привод азимутальной оси (был модернизирован в 2001 - 2002 гг) выполнен по двухмоторной схеме. Состоит из: 1) привода наведения (для быстрого перенаведения и автоматического ведения со скоростью до 45 угл.град/мин) и 2) привода ведения (для точного удержания объектов на оптической оси со скоростью до 2.5 угл.град/мин). Привод управления по высоте (привод оси зенитных расстояний) выполнен по одномоторной схеме: один двигатель выполняет функции наведения и ведения.

Управление приводами производится с помощью трехконтурной цифровой следящей системы с ЭВМ в главном контуре управления: 1) по току – с дискретностью 0.1 А, 2) по скорости – с дискретностью 0.012 угл.сек/сек; 3) по угловой ошибке. Регулятор по скорости поддерживает требуемую скорость вращения сервопривода, независимо от флуктуаций крутящего момента со стороны нагрузки (редуктора и телескопа). Четвертый цифровой следящий привод введен для наведения и ведения по позиционному углу аппаратуры, установленной на поворотном столе первичного фокуса БТА. Качество ведения ухудшается при скорости ветра  $> 2$  м/сек: все составляющие возрастают в 2-3 раза. При ветре 10 м/сек наблюдались отскоки звезды на 15 угл.сек с медленным возвращением в центр. Для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с остановкой больших масс при внезапном отключении питания, ускорения по осям ограничены  $0.1$  угл.град/сек<sup>2</sup>. Система сбора метеоданных включает датчики: температуры, влажности и скорости ветра (точность  $\pm 0.2$  м/сек до 15 м/сек и  $\pm 2\%$  выше 15 м/сек).

В спектре конструкции доминирует частота 0.1 Гц. По углу азимута частоты сосредоточены в полосе 0.7 – 1.2 Гц. Амплитуда колебаний выходной оси телескопа достигает 2.5 угл.сек (при штатном режиме – 1"). Время затухания колебаний – около 10 сек. По углу высоты доминируют частоты около 0.4 Гц с амплитудой до 2.5 угл.сек (при штатном режиме – 1") и временем затухания 28 сек.

Натурные эксперименты по использованию пассивного и активного демпфирования показали возможность снижения в 5 - 6 раз времени затухания колебаний. Разгрузка ГЗ проводится с помощью 60 оригинальных опор рычажного типа, расположенных по четырем окружностям.

Считается, что возможности повышения точности в штатном алгоритме управления почти исчерпаны. Поэтому было проведено моделирование нового алгоритма, инвариантного к внешним возмущениям, с демпфирующими и компенсирующими контурами, использующего ускорение, как параметр управления. Для него ожидается точность программного ведения  $0.1 - 0.2''$  с исключением трендовых и высокочастотных ошибок ведения. Ставится задача достичь современные требования к качеству управления: ошибки наведения - не хуже  $1''$  по обоим осям, трендовая ошибка ведения - не более  $0.2''$  за 30 минут экспозиции, амплитуда высокочастотных ошибок ведения - не более  $0.2''$ .

Канадско-Французско-Гавайский *телескоп CFHT* с диаметром апертуры 3.58 м был введен в эксплуатацию в 1979 г на вулкане Мауна Кеа (Гавайские острова). Построен по схеме Кассегрена. Имеет широкое поле зрения и адаптивную оптическую систему компенсации атмосферных аберраций. В адаптивной оптике сначала использовалось 13-ти элементное биморфное зеркало. Позднее оно было заменено на 19-ти элементное биморфное деформируемое зеркало с 19-ти канальным датчиком волнового фронта (ДВФ). В 1996 году была установлена 36-ти канальная адаптивная оптика. ДВФ работал в полосе от 0.5 до 1 мкм и имел частоту 1.2 кГц. Задержка на восстановление ВФ составляла 0.2 мсек, а контур обратной связи имел частоту 120 Гц.

*Телескоп Вильяма Гершеля* (William Herschel Telescope = **WHT**) весом 320 т первый свет увидел в 1987 г на острове Пальма Канарского архипелага. Главное зеркало - цельное, толстое (с отношением диаметр/толщина = 8), со сложной системой разгрузки. Разгрузка реализована на 60 пневматических приводах с помощью 2 подсистем: первая подсистема разгружает зеркало, вторая подсистема - следит за правильным осевым положением. Вес оптической системы - 80 т, вместе с альт-азимутальной монтировкой - 186 тонн. Ось вращения телескопа выне-

сена над землей на высоту 13.4 м. Телескоп плавает в слое масла под высоким давлением толщиной 0.1 мм. Монтровка имеет «слепое пятно» в зените радиусом 0.2 угл.град. При его прохождении (разворотом по азимуту на 180 угл.град) требуется 3 минуты. Телескоп собран по классической схеме Кассегрена с главным параболическим (диаметром 4.2 м) и вторичным гиперболическим (диаметром 1 м) зеркалами. Дополнительно используются линзовые корректоры. В световой поток может вдвигаться третичное зеркало (под 45 угл.град) для перехода от фокуса Кассегрена к изломанным кассегреновским фокусам, а также для переброса светового потока через полые подшипники к платформам Несмита (на которые устанавливаются большие или массивные инструменты). Диск дрожания звезды в зените у телескопа составил 0.69 угл.сек, причем 85% света удаленной звезды собиралось на площади 0.3 угл.сек.

Два идентичных *телескопа-близнеца* «*W.M.Keck Telescopes*» установлены на расстоянии друг от друга 85 м на вершине Мауна-Кеа в 1991 (Keck1) и 1996 (Keck2) годах. Стоимость каждого из них соответственно 94 и 78 млн.\$. Диаметр входной апертуры – 9.82 м. Имеют размеры в восьмизэтажный дом и вес 300 тонн. В режиме интерферометра Майкельсона работают с 2002 г, давая такое же угловое разрешение, как 85-метровый телескоп (около 0.005 угл.сек). Оптические схемы – Кассегрена. Телескопы имеют активную и адаптивную оптику, работающую по естественной и лазерной (с 2003 г на Keck2) опорным звездам. В адаптивной оптике разделяется коррекция по наклонам и адаптивное деформируемое зеркало. Обратная связь замыкается от датчика Шека-Гартмана с 20×20 субапертурами. Из них в приемную апертуру попадают 304 субапертуры. Масштаб неоднородностей атмосферы составляет примерно 56, 40 и 20 см для разных длин волн. Поэтому в вариантах адаптивной оптики применялись 349, 500 и 2000 актюаторов. ГЗ состоят из 36 шестиугольных тонких сегментов (отношение всего диаметра зеркала к толщине сегмента составляет 133). Управляемая компьютером система датчиков и приводов взаимно согласует элементы с точностью 4 нм и частотой 2 Гц. Применение в 1999 г на Keck2 адаптивного маленького зеркала с

частотой 670 Гц на длине волны 2 мкм позволило получать изображения с разрешением 0.04 угл.сек.

В 1994 г. был построен 3.5 - метровый *телескоп WIYN* (Wisconsin-Indiana-Yale-NOAO). Его общий вес составил 46 т, в том числе: подвижной части – 33 т, ГЗ – 1.9 т, вторичного зеркала (ВЗ) - 119 кг (диаметр 1200 мм), третичного зеркала – 60 кг (размеры 1101 мм × 776 мм). Телескоп имеет 66 гидравлических приводов активной поддержки ГЗ, терморегулирование, активную вентиляцию его крепления, дополнительное управляемое по наклонам зеркало в фокальной плоскости.

*Телескоп «Astrophysics Research Consortium Telescope (ARC 3.5-m)»* имеет диаметр 3.5 м функционирует с 1994 года (Апаче Поинт, Нью Мексико). Оптическая схема – Ричи-Кретьена. Вращением третичного зеркала обеспечивается доступ к девяти портам инструмента. ВЗ активно управляется для компенсации наклонов и децентровки.

*Телескоп им. Хобби и Эберли* (Hobby-Eberly Telescope (*HET*)) построен в конце 1996 г. в штате Техас. Предназначен, в основном, для проведения спектральных наблюдений отдельных объектов с  $\phi = 1.4, 4.7$ . Имеет однозеркальную оптическую схему со сферическим и составным ГЗ размером 10м × 11м (из 91 сегмента поперечником 1м). ГЗ установлено под фиксированным углом в 55 градусов по отношению к горизонту и может вращаться только вокруг вертикальной оси (по азимуту). Максимальное время сопровождения объекта – от 45 минут у экватора до 2.5 часа у северной границы доступной области. Скорость движения телескопа – до 3 угл.град./сек, ускорение – до 0.5 угл.град./сек<sup>2</sup>. Ошибка сопровождения – 1 угл.сек./мин. К неподвижным спектрографам высокого разрешения свет передается волоконным кабелем.

Национальный (Итальянский) *Галилео телескоп TNG* (the Telescopio Nazionale Galileo) построен в 1998 г на острове Пальма с  $\phi = 2.5, 6.0, 11$ . ГЗ имеет диаметр 3.58 м, ВЗ – 0.875 м. Оптическая схема Ричи-Кретьена дополнена третичным зеркалом, создающим два противоположных фокуса Нэсмита. Общее наведение монтировкой имеет мертвую зону наблюдения вокруг зенита примерно в 1 угл. град. Управление электродвигателями производит компьютер по заданной

программе, синхронно с движением неба, которая корректируется по измеряемому дрейфу положения ведущей (опорной) яркой звезды. В телескопе присутствуют системы активной и адаптивной оптики. Поверхность ГЗ корректируется 78 механическими приводами. ВЗ управляется по крену и положению шестью приводами растяжки. Третичное зеркало управляется по положению тремя пьезоэлектрическими приводами (с частотой 5 Гц). Измерение волнового фронта (ВФ) в активной оптике производится двумя датчиками Гартмана (по одному для каждого фокуса). Адаптивная оптика для коррекции атмосферных фазовых искажений представлена двумя управляемыми зеркалами. Компенсация средних наклонов ВФ (для видимого и инфракрасного диапазонов) осуществляется путем наклона внеосевой параболы с частотой до 1.5 кГц. Компенсация aberrаций более высоких порядков производится деформируемым сплошным зеркалом с 96 магнито-стрикционными приводами.

Японский *телескоп Subaru* установлен на вершине Мауна Кеа. Начало наблюдений – с 1999 г. Эффективная апертура составляет 8.3 м. Работает в диапазонах длин волн с  $\lambda = 0.35 - 30$  мкм. Имеет активную и адаптивную оптику; семь наблюдательных приборов, установленных в четырех фокусах; новый купол цилиндрической формы (весом 2000 т, диаметром 40 м, высотой 43 м), оптимизирующий воздушные потоки. Высота телескопа – 22.2 м, ширина – 27.2 м, вес 555 т. При этом ГЗ выбрано сплошным из ULE с диаметром 8.2 м, толщиной 20 см, весом 22.8 т, фокусным расстоянием 15 м. Оно поддерживается 261 приводами. Оптическая схема – Ричи-Кретьена с  $f = 1.8$  (15/8.2 – первичный фокус), 12.2 (фокус Кассегрена), 12.6 (два фокуса Нэсмита: оптический и инфракрасный). В первичном фокусе поле зрения  $30' \times 30'$  (с дискретностью 0.07 угл.сек), в кассегреневском фокусе – поле  $6' \times 6'$ . Телескоп оснащен  $2048 \times 4096$  (15 мкм) ПЗС камерой, включающей мозаику из 10 матриц (эффективная площадь  $15 \times 12$  см). Точность определения положений наблюдаемых объектов  $\pm 0.01$  угл.сек. Наведение телескопа допускается со скоростями до 0.5 угл.град./сек, точность наведения – 0.1 угл.сек, электропитание – 110 В. Разработан специальный блок формирования изображений с адаптивной оптикой для обнаружения слабых объектов на фоне

более ярких с использованием затемняющих масок. Адаптивная оптика состоит из двух адаптивных зеркал, установленных после фокуса Кассегрена. Управляемое по наклонам вогнутое зеркало выравнивает поток в плоско-параллельный и направляет на деформируемое зеркало. Отраженный от него поток направляется на датчик ВФ, раскладывающий искажения ВФ по абберациям. Адаптивное биморфное деформируемое зеркало имеет 185 актюаторов, а датчик ВФ - 144 субапертуры для ярких звезд и 36 субапертур для слабых звезд. Возможно использование датчика ВФ (500 Гц) и инфракрасного датчика (200 Гц).

В проекте *Очень Большого Телескопа (ESO VLT, Серро Параналь, Чили)* созданы в 1998 и 2001 гг четыре однотипных телескопа с диаметрами главных зеркал 8.2 м и базой 57÷130 метров. Телескопы установлены в одном месте и работают в трех вариантах: а) автономно; б) в комбинации; в) как интерферометры. Оптическая схема - Ричи-Кретьена с  $\phi = 13.5, 15$  (фокусы Кассегрена и Несмита). Собирающая способность VLT эквивалента примерно 16 метровому телескопу, а разрешающая способность – 130 метровому. Полезный диапазон длин волн простирается от ультрафиолетового спектра до 25 мкм в инфракрасном. Используются облегченные цельные ГЗ с максимальной толщиной 17.5 см вблизи центра (отношение диаметра к толщине составляет 46.9), имеющие сложную систему разгрузки. ВЗ также облегчены до 51 кг при диаметре около 1 м. Активная оптика управляет формой отражающей поверхности ГЗ с помощью 150 осевых гидравлических приводов по 6 концентрическим кольцам установки с точностью усилий – в пределах нескольких граммов. Также используется перемещение вторичных зеркал по пяти степеням свободы: одна – для фокусировки, две – для центрирования и две – для наведения. Диапазон фокусировки составляет – 47 мм, децентрирования – 12 угл.сек. Полевая стабилизация имеет точность 0.1 угл.сек при полосе пропускания 10 Гц и 0.05 угл.сек - при полосе 6 Гц. Допустимый дрейф - 2 угл.сек/час. Анализатор изображения (Гартмановского типа) в системе активного управления главным зеркалом накапливает световой сигнал от опорной естественной звезды в течении 30 сек, после чего вычисляются расфокусировка, астигматизм, кома и другие абберации. При «быстрой» обратной связи (с учетом фак-

тора турбулентности атмосферы) частота изменения формы достигает до 1 Гц. Предусмотрен режим программного управления приводами без обратной связи. В телескопах выбраны оптимальные стратегии управления вентиляционной струей воздуха. Возможности комплекса еще более расширяются при включении в его состав двух вспомогательных (диаметром 1.8 м) телескопов с изменяемыми местами установки. Такая комбинация создает уникальный интерферометрический комплекс из шести телескопов с переменной базой до 202 м из 328 вариантов. При сведении лучей от всех телескопов, в фокусах Кудэ одно из зеркал - адаптивное. В инфракрасном диапазоне 1-5 мкм применялось адаптивное биморфное зеркало с 20 субапертурами (5×5) с частотой контура обратной связи 10 Гц (частота процессора – 100 Гц). Для ближнего инфракрасного диапазона использовалось адаптивное зеркало с 52 пьезоэлектрическими актюаторами. Датчик ВФ имел 32 субапертуры (из массива 7×7). Полоса контура обратной связи – 33 Гц.

Многозеркальный *телескоп ММТ* (Multiple-Mirror Telescope) в своем начальном виде был построен в 1979 г в обсерватории Маунт-Хопкинс, штат Аризона, США. Состоял из 6 зеркал с диаметром 1.8 м каждое. В 2000 г был модернизирован с заменой составного ГЗ на цельное облегченное тонкое зеркало диаметром 6.5 м (Monolithic Mirror Telescope), сотовой конструкции. Имеет схему Кассегрена с  $f = 5, 9, 15$ . Телескоп формирует изображения для длин волн 5-25 мкм и 1-5 мкм. Спектрографы имеют синий и красный каналы. Кривизна волнового фронта выявляется по взаимному положению изображений, по степени их контраста и другими методами. Данные для активной оптики накапливаются и усредняются на интервалах в 20-30 сек. По ним соответствующим образом деформируется ГЗ или слегка перемещается ВЗ. Для компенсации атмосферных aberrаций в инфракрасной области спектра в нем впервые использовано адаптивное ВЗ. За счет исключения лишних 5 переотражений чувствительность телескопа значительно увеличилась. Адаптивное ВЗ выполнено в виде стеклянной мембраны диаметром 70 см и толщиной 1.7 мм. Его частота достигает нескольких сотен Гц. Определение атмосферных aberrаций осуществляется по естественной гидрирующей звезде (NGS, до 10-ой звездной величины, в крайнем случае – до 13-ой), рас-

положенной в области изопланатизма (радиусом до 10 угл.сек для длин волн 1.2 - 2.5 мкм) или по лазерной гидирующей звезде (LGS). Последняя создается лазером в верхних слоях атмосферы при отсутствии NGS в области изопланатизма. Используется усовершенствованное адаптивное зеркало для компенсации атмосферной турбулентности диаметром около 60 см и толщиной менее 2 мм. Оно меняет свою форму в течение миллисекунд от 336 актюаторов. Управление производит компьютер со 168 процессорами. Датчик Гартмана с 80×80 пикселями.

В проекте *Gemini* созданы два 8.1 метровых телескопа: *GNT* (Gemini North Telescope = Северный Близнец) и *GST* (Gemini South Telescope = Южный Близнец), установленные в Северном (на Гавайях в 2000 г) и Южном (в чилийских Андах в 2001 г) полушариях. Оба телескопа имеют оптическую схему Ричи-Кретьена с  $\phi = 16$ . Обладают широким разнообразием оптических и инфракрасных способностей, включая технологию создания лазерной звезды, мультисопреженную адаптивную оптику МСАО (для компенсации трехмерной атмосферной турбулентности) и мультиобъектовую спектроскопию. Адаптивное деформируемое зеркало комбинируется с активной оптикой, включающей управление сплошными 8.1-метровыми главными (толщиной 20 см), 1-метровыми вторичными и третичными зеркалами. Используется датчик Гартмана с 8×8 субапертурами. При использовании 2-3 адаптивных зеркал и 3-4 опорных звезд, МСАО позволяет раскрыть поле зрения (с компенсацией атмосферной турбулентности) в 5-10 раз.

Два одинаковых *телескопа* «*Magellan 1,2*» диаметром 6.5 м построены в Чили (обсерватория Лас Кампанас) в 2000 и 2002 годах. Расположены на расстоянии 60 м друг от друга для работы в режиме интерферометра. Телескопы оснащены активной и адаптивной оптикой.

*Телескоп SOAR* (Southern Observatory Astrophysical Research) установлен в 2002 г в Чили (Серро Пашон). Имеет диаметр 4.25 м с  $\phi = 16$ . Активная оптика включает 120 приводов коррекции формы ГЗ (толщиной 4 дюйма), боковые опоры разгрузки и 6 степеней свободы ВЗ (диаметр 0.6 м) – для юстировки оптической схемы. Третичное зеркало установлено под углом 45 градусов, управляется по наклонам с частотой до 50 Гц и переключает поворотом направление оптиче-

ского потока на соответствующее оборудование (время переключения – до 60 сек). Установленное оборудование: 2 группы Нэсмита по 3 инструмента в каждом и 2 складных кассегреновских фокуса. Обратная связь осуществляется через датчик волнового фронта из массива микролинз (530 шт.). Программное обеспечение рассчитывает положение ВЗ и усилия приводов ГЗ. Телескоп имеет систему управления температурой посредством вентиляции через небольшую часть купола. Используются крупные подшипники для корректировки высоты и азимута. Обеспечивается высокое быстродействие:  $< 2$  угл.сек (СКО) – слепая точка;  $< 0.2$  угл.сек (СКО) – исправление ошибки;  $< 0.2$  угл.сек (СКО) – прослеживает неустойчивую синхронизацию. Наведение монтировкой имеет предельную точность до  $0.2$  угл.сек (СКО).

**Большой Канарский Телескоп** «Gran Telescopio Canarias (GTC, 2002, Ла Пальма)» имеет составное 10.4-метровое настраиваемое ГЗ с эффективным диаметром 10 м, состоящее из 36 шестиугольных стеклокерамических элементов. Используются специальные гидростатические подшипники для азимута и для оси возвышения. Оптическая схема - Ричи-Кретьена с  $f = 1.75, 15, 25$ . ВЗ имеет диаметр 1.176 м. Также присутствует управляемое третичное перебрасывающее эллиптическое зеркало и адаптивная оптика. Купол телескопа диаметром 33 м управляется автоматически для защиты от воздействия ветровых нагрузок и потоков. ГЗ образовано 36 независимыми зеркалами в гексагональной решетке. Расстояние между смежными сегментами 3 мм. Сторона каждого сегмента имеет размеры 936 мм. Используется активное совмещение сегментов: угол наклона вершины каждого сегмента может быть исправлен посредством трех устройств позиционирования. Взаимное положение между сегментами измеряется посредством преобразователей в смежных гранях между сегментами. Кроме этого, имеется функция активного управления формой сегментов: возможно деформировать каждый сегмент автоматически с 6 активными степенями свободы. ВЗ размером 1176 мм имеет систему активной оптики с пятью степенями свободы.

**Большой бинокулярный телескоп LBT** (Large Binocular Telescope) работает с 2004 г в штате Аризона на горе Маунт Грэхем (США). Состоит из двух теле-

скопов с диаметром входной апертуры по 8.4 м, установленных на единой механической раме в альт-азимутальной монтировке. Эквивалентен 11.8-метровому телескопу - по мощности собираемого потока и 23-метровому телескопу – по разрешающей способности. Вращение ВЗ дает возможность быстро переключать телескоп с одного типа наблюдений на другой. Для исключения микровозмущений, вся системы скользит на тонком слое масла с помощью гидравлических направляющих. Используются оптические схемы Грегори с  $f = 1.14, 5.4, 15$  и возможностью сочетания интерферометрии. ВЗ диаметром 0.911 м являются адаптивными. Каждое из них имеет по 672 управляемых магнита для компенсации атмосферных aberrаций. Частота изменения формы – до 2 кГц. Третичные зеркала вращаются для направления света к разному измерительному оборудованию. С помощью интерферометрии с адаптивной оптикой, резкость изображения LBT может быть до 10 раз лучше, чем у космического Hubble. Его масса – 700 т, масса ГЗ – по 15.700 т, высота -25 м, ширина 23 м, расстояние между зеркалами – 14.4 м, сохраняет высокую точность наведения при скорости ветра до 80 км/ч.

В ноябре 2005 г состоялось открытие на территории ЮАР Большого *Южно-Африканского Телескопа SALT* (Southern African Large Telescope) с  $f = 1.4, 4.7$ , как спектроскопического инструмента для длин волн от 320 до 2500 нм. Прототипом для него выбран Hobby-Eberly Telescope. Оптическая ось телескопа установлена под фиксированным углом 35 угл.град к зениту (допускается его изменение один раз в несколько лет в диапазоне 75 – 10 угл.град). Диаметр ГЗ – 11 м, рабочей области – 9.2 м. В системе коррекции формы составного сферического ГЗ из 91 гексагонального сегмента (радиус кривизны - 26.165 м) используется дополнительная юстировочная башня. Диаметр сегментов - примерно 1 м, толщина – 50 мм, масса – 100 кг. Для исправления сферической aberrации применяется специальный корректор. Разрешающая способность телескопа находится в пределах 0.25 – 0.5 угл.сек. Слежение телескопом осуществляется с помощью поворота всей платформы по азимуту на игольчатых подшипниках с точностью 5 угл.сек и прецизионным перемещением следящего модуля вторичного зеркала массой 4.5 т. Следящая система имеет 6 степеней свободы: поворот, линейные перемещения по

$X$  и  $Y$  (в плоскости, ортогональной оптической оси) - до 3.25 м, угловые перемещения относительно  $X$  и  $Y$  – до 17 угл.град, перемещение вдоль  $Z$  – 0.2 м. Частота собственных колебаний стальной фермы для поддержки главного и вторичного зеркал составляет 7 Гц, масса – 45 т. Специальная кольцевая стена вокруг телескопа высотой 17 м и диаметром 26 м позволяет эксплуатировать телескоп в интервале температур от -10 до +25 град. С и при скоростях ветра до 21 м/с.

Из военных информационных приложений в литературе наиболее часто упоминаются следующие две системы. Первая из них - U.S. Air Force Starfire Optical Range (**SOR**) состоит из 3.5 метрового телескопа с многоэлементной адаптивной оптической системой. Деформируемое зеркало имеет 941 актюатор, а датчик Гартмана – 700 каналов с частотой 2500 Гц. Частота контура обратной связи – 80 Гц. SOR включает также 1.5 метровый телескоп. Его адаптивное зеркало имеет 577 актюаторов, а датчик ВФ – 500 субапертур (1 кГц).

Вторая, U.S. Air Force Advanced Electro-optic System (**AEOS**; усовершенствованная оптико-электронная система), начала действовать с 1997 года для обзора космического пространства. Входит в состав станции обзора космического пространства MSSS. Включает несколько телескопов разных диаметров, специализирующихся на поиске или наблюдении космических объектов как дальнего, так и ближнего космоса. Наибольший из них ТЗ.6 имеет диаметр 3.6 метра. Активная оптика исправляет ГЗ телескопа и юстирует ВЗ. Третичное зеркало перенаправляет луч на разное измерительное оборудование, включая канал с адаптивной оптикой. Адаптивное зеркало имеет 941 актюатор. Данная система широко используется и в открытых научных программах. Типичные условия наблюдения на станции: качество изображения ~ 1 угл. сек., радиус Фрида (без учета купола): летом  $r_0 \approx 12$  см, зимой  $r_0 \approx 10$  см; скорость ветра  $v \sim 16 - 40$  км/ч и может достигать 80 км/ч; видимость – превышает 150 км. С учетом купола радиус Фрида уменьшается до 6 – 8 см. Система обеспечения наблюдений производит сбор текущих метеорологических данных: скорости ветра и его направления, температуры, точки росы, барометрического давления, видимости трассы и др. Оптическая схема типа Кассегрена с  $F/D = 200$ . ТЗ.6 включает ГЗ, ВЗ, третичное зеркало, адаптивную и

активную оптику, два дополнительных телескопа системы обнаружения и др. Полная величина углового поля в куде-тракте  $\sim 1$  угл.мин. и может быть переключена на  $\sim 3$  угл.мин. Телескоп ТЗ.6 имеет азимутальную угломестную монтировку. Скорость поворота – до 1.8 угл.град/сек по азимуту и до 4.75 угл.град/сек по углу места. Погрешность формы ГЗ (СКО) – менее  $\lambda/10$ . Компенсация гравитационной деформации ГЗ производится с помощью 84 аксиальных и 48 радиальных актюаторов. Датчик формы зеркала имеет предварительную калибровку.

Проект *GSMT* (Giant Segmented Mirror Telescope) направлен на создание 30-ти метрового телескопа по классической схеме Кассегрена с  $\phi = 18.8$  и полем зрения 20 угл.мин. В нем присутствует активная оптика. Параболическое ГЗ с  $\phi = 1.0$  состоит из 618 сегментов размером чуть более метра. ВЗ имеет диаметр 2 метра. Качество изображения в близкой инфракрасной области ожидается  $\approx 0.02$  угл.сек.

В проекте *CELT* (California Extremely Large Telescope) предполагается создание 30-ти метрового телескопа по схеме Ричи-Кретьена.

Американские астрономы предлагают проект *ELT* (Extremely Large Telescope) 35-метрового телескопа со сферическим ГЗ. Он похож на увеличенную копию действующего телескопа HET.

Предложенный шведскими учеными проект *XLT* (eXtremely Large Telescope)» предполагает построение телескопа кассегреновского типа с диаметром 50 метров. При этом ГЗ состоит из 585 шестигранных сегментов, направляющих лучи на 4-х метровое ВЗ.

*Европейский Чрезвычайно Большой Телескоп (E-ELT)* разработан как телескоп Nasmyth. Его купол будет иметь размеры  $\sim 100$  м в ширину и около 80 м высотой. Вес телескопа  $\sim 5000$  т. Механическая конструкция поддерживает пять зеркал оптического тракта и две платформы Nasmyth. Каждая платформа имеет размер теннисного корта и может размещать несколько инструментов. ГЗ имеет диаметр 42 м и составлено из 984 сегментов, каждый 1.45 м шириной. ВЗ – 6 м в диаметре. Третичное зеркало 4.2 м в диаметре, передает свет к разным фокусам, включая систему адаптивной оптики. Адаптивная оптика составлена из двух зеркал. Первое зеркало 2.5 м в диаметре имеет 5000 (или больше) приводов управле-

ния и полосу пропускания 1 кГц. Второе зеркало 2.7 м, предназначается для заключительного исправления изображения.

В проекте *телескопа ТМТ* (Thirty Meter Telescope) диаметр апертуры составит 30 метров. Диапазон рабочих длин волн: 0.31 - 28 мкм. Площадь приемной апертуры: 655 м<sup>2</sup>. Фокусное расстояние:  $f / 15$  (450 м). Купол – сферический. Движущаяся масса телескопа: ~ 1430 тонн (основная механическая конструкция – 1035 тонн; оптические системы – 140 тонн; инструменты и АО – 195 тонн; другое оборудование – 60 тонн). Оптическая схема: Ричи-Кретьена (ГЗ и ВЗ гиперболической формы). ГЗ имеет соотношение  $F / 1$  (фокусное расстояние 30 метров). Оно будет составным – из 492 шестиугольных сегментов с деформируемой формой поверхности. До 1,7 тысячи серверов могут потребоваться для автоматического расчета и подстройки положения всех управляемых сегментов ГЗ в полосе частот 750 Гц и точностью позиционирования в 0,002 миллиметра. Третичное зеркало находится в центре ГЗ и представляет собой плоское зеркало эллиптической формы, 3,5 x 2,5 м по осям. Используется для перенаправления светового потока в одну из восьми оптических систем, которые будут смонтированы на двух основных платформах Несмита. Адаптивная оптика системы NFIRAOS связывает три компонента на Nasmyth платформе. В нее входят два гибких зеркал с частотами более 1 кГц. Они состоят из тонкого листового стекла и имеют от трех до четырех тысяч управляемых компьютером приводов управления. Система NFIRAOS принимает свет от искусственных звезд, создаваемых шестью лазерами, и с помощью шести датчиков ВФ измеряет искажения. Измерения поступают в специализированный, высокоскоростной компьютер, который определяет гибкие настройки зеркал для получения наилучшего изображения этих лазерных точек.

Чрезвычайно большой оптический и инфракрасный *телескоп Euro50* проектируется диаметром 50 м. Вес составит ~ 3500 т, высота – 85 м. В проекте телескопа Euro50 используется апланатическая система Грегори с эллипсоидальными главным (диаметром 50 м) и вторичным (диаметром 4 м) зеркалами. Активная оптика ГЗ включает 4000 актюаторов. Адаптивное зеркало небольших размеров располагается после фокуса Грегори. Диаметр поля зрения, в пределах которого

изображения меньше 0.5 угл.сек, равен 8 угл.мин. Телескоп проектируется по схеме Грегори с сегментированным ГЗ и цельным ВЗ. ГЗ планируется асферическим (почти параболическим), состоящим из 618 двухметровых сегментов. Основное относительное фокусное расстояние оптической схемы  $f / 0,85$ , выходное –  $f / 13$ . В схеме Грегори упрощается тестирование и калибровка деформируемого ВЗ. Оно будет монолитным, деформируемым, с размером 4 м и 3169 силовыми приводами. Основные характеристики телескопа приведены ниже [271]:

Величина	Единицы	Значение величины
Азимут (наблюдаемая область)	град	540
Высота (наблюдаемая область)	град	20-91
Зенитное отверстие	град	0,5 диаметра
Скорость поворота	град/с	3
Ускорение	град/с <sup>2</sup>	0,3
Разрешение с адаптивной оптикой (АО), диапазон К	угл. сек.	Коэффициент Штреля > 0,4
Длинноволновая область	мкм	0,35-20 (можно до 28)
Ограничение звездных величин, диапазон К, АО		34,4
Ограничение звездных величин, видимая область, АО		37,7
Ограничение звездных величин, видимая область		32,2
Масса телескопа	т	3500
Высота телескопа	м	92
Скорость ветра, не влияющая на характеристики телескопа	м/с	Макс. 12 (на высоте 10 м)
Скорость ветра, снижающая характеристики телескопа	м/с	18 (на высоте 10 м)
Скорость ветра, которую выдерживает конструкция	м/с	55 (на высоте 10 м)
Привод двигателей		Прямой
Число сегментов ГЗ		618
Регулировка ГЗ		Регулировочная камера и сенсоры на краях
Фокусное расстояние		F/0,85
Поле обзора (ограниченное видение)	угл. мин.	10
Поле обзора (SCAO)	угл. сек.	30
Поле обзора (DCAO)	угл. мин.	1
Коэффициент Штреля АО		0,4
Выходное фокусное расстояние (система Несмита)		F/5
Выходное фокусное расстояние (SCAO, система Грегори)		F/13
Выходное фокусное расстояние (DCAO, система Грегори)		F/16
Выходное фокусное расстояние		F/13

(ДСАО, система Несмита)		
Число силовых приводов ВЗ		3169
Число силовых приводов DM2		3500-4000

Рассматривается вариант создания ВЗ из углеродного волокна, укрепленного полиэфиром. Адаптивная оптика (АО) будет выполнена на нескольких уровнях и входит в состав оптической схемы телескопа. Нижний уровень представляет собой односопряженную АО для диапазона К в фокусе Грегори, использующую ВЗ как деформируемое зеркало. На следующем уровне – двухсопряженная АО для диапазона К и в фокусе Грегори. На третьем уровне – двухсопряженная АО в фокусе Несмита. АО корректирует нерезкость изображений, возникающую вследствие атмосферных искажений. Более простая односопряженная АО корректирует лишь небольшую часть неба вблизи оптической оси, в то время как двусопряженная АО устраняет искажения на большей угловой области. Предварительно полосу частот ВЗ принимается меньше 1 Гц. ВЗ играет очень важную роль в системе Euro50. Это четырехметровое шестиугольное зеркало, сделанное из углеродного волокна, укрепленного полимерами. Толщина составляет 2-3 мм. Его деформация управляется компьютером и входит в систему АО. Также оно может быстро изменять свой наклон до 5 угловых градусов. ВЗ имеет 3169 силовых приводов, замкнутых обратной связью с линейными датчиками положения. Силовые приводы подсоединены с тыльной стороны зеркала присосками и контролируются датчиками пространственного положения. Имеется локальное управление каждого привода в отдельности. Частота системы контроля 500 Гц.

Наиболее крупным является проект ошеломляюще большого *телескопа* **OWL** (Ower Whelmingly Large Telescope) Создание к 2021 г. 100-метрового телескопа с ГЗ сферической формы из 3048 гексагональных сферических сегментов (по 1.6 метров) и плоским сегментированным 33.9-метровым ВЗ из более двухсот плоских сегментов (стандартизованных по тому же размеру - 1.6 метров). Его общий вес составит 17 тыс. тонн. Телескоп будет иметь стальную азимутальную конструкцию с использованием облегченных композиционных материалов. Ее низшая частота оценивается в 1.6 Гц (при боковом движении по высотной оси).

Если азимутальная ось заблокирована, то частота высотной оси оценивается от 2.58 Гц в зените до 2.06 Гц в  $60^\circ$  от зенита. Полоса частот дополнительного зеркала M2 рассчитана, чтобы работать в режиме 3.94 Гц для зенита и 3.63 Гц для  $60^\circ$  от зенита. Двигающаяся масса оценивается в 14 800 тонн. Для ее поворота предполагается использовать около 300 специальных тележек. Наличие двух активных сегментированных зеркал вносит некоторую сложность в одновременную юстировку обеих поверхностей. Сегменты должны быть соединены с точностью в пределах 0.5 мкм для видимого диапазона. Для этого предполагается измерять взаимные рассогласования с помощью емкостных или оптических датчиков. В проекте присутствуют активная и адаптивная оптика (компенсирующая, в том числе, и влияние сейсмофона). Исправление волнового фронта разделено на 4 части: 1) исправление крупномасштабных искажений в частотах до нескольких десятых Гц, 2) фазировка сегментов зеркал в частотах порядка 1 Гц, 3) полевая стабилизация в частотах до 5 Гц, 4) высокочастотная адаптивная коррекция атмосферных аберраций. Исправление сферических и волновых аберраций производится специальным корректором с 4 элементами, включающем: два гибких восьмиметровых активных зеркала, одно фокусирующее 4.2-х метровое зеркало и одно быстрое, управляемое по наклонам 2.35-ти метровое плоское зеркало. Предполагается в последующем заменить 4.2-метровое зеркало на адаптивное, компенсирующее атмосферную турбулентность. Направление оптического пучка на одну из фокальных станций обеспечивается простым вращением соответствующего зеркала. Оно же является активным и обеспечивает быструю полевую стабилизацию в двух осях (в умеренных частотах). Вес корректора – около 130 тонн.

### **1.3. Проекты больших орбитальных оптических телескопов и их наведение**

Проектов космических больших телескопов намного меньше по сравнению с наземными телескопами. Среди книг здесь отметим [15, 102, 103, 271, и др. ], среди статей – [4, 8, 19, 20, 28, 30, 31, 34, 35, 46, 62, 94, 165, 191, 193, 209, 291, и

др. ]. Большинство из современных проектов с точки зрения многосистемного управления описаны в книге автора [271] с соответствующими ссылками. Поэтому ниже ограничимся сокращенным материалом.

Развитие крупноапертурных космических телескопов началось с запуска *2.4-х метрового телескопа Hubble*, выведенного на околоземную орбиту высотой около 600 км в 1990 г. Вместе со спутником телескоп весит около 11 тонн и стабилизируется при программном наведении по трем осям с помощью ускорения или замедления маховиков по информации от гироскопов (из них 3 рабочих и 3 резервных). Для точного гидирования используются оптические датчики (включая два интерферометра с призмами Кастерса). Это позволяет обеспечить ошибку слежения (СКО) менее 0.007 угл.сек за 10 часов и 0.003 угл.сек. за 13 минут. Двигатели системы ориентации работают на гидразине. Оптическая схема – Ричи-Кретьена с  $f = 12.9, 30, 48, 96$ . Диаметр ГЗ – 2.4 м, ВЗ – 0.3 м. Эффективное фокусное расстояние — 57,6 м. На борту телескопа установлены две камеры, два спектрографа, фотометр и астродатчики. Может обнаруживать объекты 28 звездной величины с очень высоким разрешением. Камера для слабых объектов имеет рекордное угловое разрешение: до 0.01 угл.сек. Оптические датчики регистрируют излучение в диапазоне от 0.115 мкм (ультрафиолетовое излучение) до 1.1 мкм (инфракрасное излучение) с угловым разрешением 0.1 угл.сек. КА имеет длину 13.3 м; ширину 4.3 м; массу 10863 кг. Тип орбиты – эллиптическая: перигей 590 км; апогей 596 км; наклонение – 28.5 град. Период обращения – 97 мин; орбитальная скорость – 28 тыс.км/ч. Волновой диапазон: видимый, ультрафиолетовый, инфракрасный.

*Космический телескоп Spitzer* запущен НАСА 25 августа 2003 года и предназначен для наблюдения космоса в инфракрасном диапазоне. Принимает инфракрасные волны с длиной волны от 3 до 180 мкм. Другое его название: Space Infrared Telescope Facility (SIRTF). Волновой диапазон: видимый, ультрафиолетовый, инфракрасный. Тип орбиты: гелиоцентрическая. Период обращения: 1 год. Масса: 11 т. Тип телескопа: телескоп-рефлектор системы Ричи—Кретьена с диаметром 0,85 м и фокусным расстоянием: 10,2 м.

Новая космическая обсерватория *Kepler Telescope* (Телескоп Кеплера) работает в волновом диапазоне 400–865 нм. Тип орбиты: гелиоцентрическая. Период обращения: 372,5 дней. Масса: 1039 кг. Диаметр ГЗ: 0,95 м. Телескоп имеет тент  $55^\circ$  – предотвращает попадание Солнца. На входе применяется также корректор Шмидта с диафрагмой на 0.95 м. В КА входят астрокомпасы и инерционные преобразователи скорости, реактивные маховики, панель солнечных батарей и др. На гелиоцентрической орбите наиболее существенный внешний момент, действующий на КА, создается солнечным световым давлением. Точность стабилизации изображения 0.3 угл.сек. достигается комбинацией внутренних и внешних устройств. К внешним устройствам относятся измерительные гироскопы, солнечные датчики, астрокомпасы, газовые двигатели и др. У КА нет раскрывающихся элементов (солнечных панелей или других компонентов) кроме антенны. В фокальной плоскости размещены 21 матрица ПЗС: 2048x2048 ПЗС. Данные от них обрабатываются параллельно. Для работы с широким полем зрения выбрана оптическая схема Шмидта, предполагающая исправление аберраций ГЗ с помощью дополнительного корректора.

*Телескоп «Гершель»* был выведен на орбиту вместе с телескопом «Планк». Посвящен инфракрасной астрономии и предназначен для наблюдения 'холодной вселенной'. Орбита выбрана на удалении 1.5 млн. км от Земли вокруг второй Лангранжевой точки L2. Характеристики КА: масса запуска 3200 кг; высота 7,5 м; ширина 4 м; мощность 1500 Вт; рабочая температура 70-90 К. Рабочие длины волн 80-600 нм; продольная частота  $> 60$  Гц; поперечная частота  $> 45$  Гц. Общая масса телескопа вместе с зеркалом – всего 315 кг (за счет изготовления из карбида кремния SiC). Чисто Кассегреновский телескоп Herschel имеет вогнутое параболическое ГЗ и выпуклое гиперболическое ВЗ. Характеристики ГЗ: диаметр 3.5 м; радиус кривизны (-3.5) м; толщина – до 24 см; масса 210 кг; плотность  $21.8 \text{ кг/м}^3$ ; состоит из 12 спаянных SiC сегментов; толщина оптической поверхности – 2.5 мм; высота ребер жесткости – от 110 мм у центра до 10 мм на краю; основная частота 100 Гц, побочная 50 Гц. Характеристики ВЗ: диаметр 308.12 мм; радиус кривизны 345.2 мм; расстояние до ГЗ – 1588 мм; вес 2.1 кг; толщина оптической поверхности 2.4 мм. После ВЗ свето-

вой поток направляется на дополнительное отражающее вогнутое зеркало, расположенное на оптической оси ниже ГЗ. Его характеристики: диаметр 246 мм; радиус кривизны (-165) мм; расстояние до ГЗ (-1050) мм. В спутниковой части находятся устройства для измерения положения КА (звездные датчики и гироскопы), корректировки его положения (маховики, газовые двигатели), а также источники питания. КА стабилизируется по трем осям и может направляться на исследуемые объекты с точностью  $\pm 2$  угл. сек. Большой односторонний экран от излучения Солнца и Земли (оба источника излучения находятся на одном направлении и видны как объекты с угловым диаметром полградуса) позволяет получить в тени пассивное охлаждение зеркала телескопа, примерно до 80К (-193°C). Обращенная к Солнцу сторона отражающего экрана покрыта фотоэлементами. Поэтому, с учетом теплофизики и энергопитания, разрешается наклон оси телескопа до максимального значения  $\pm 30$  градусов. На входе аппаратуры PACS установлено зеркало-модулятор. Оно позволяет с частотой около 3 Гц сдвигать изображение небесного объекта на 1 - 3 угл. мин. В результате на ячейку детектора попадают попеременно сигналы "объект + фон" или только "фон". После их вычитания находится сигнал от объекта, освобожденный от собственного ИК излучения теплого телескопа. Модулятор работает при температуре -270°C и потребляет 2 мВт мощности.

Космический *телескоп Plank* призван наблюдать самое древнее излучение - космический микроволновый фон. Это уже третья космическая миссия по его изучению. Предыдущие миссии: КА COBE (*COsmic Background Explorer*, запущен NASA в 1989 г.) и КА WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*, запущен NASA в 2001 г.). Характеристики космического телескопа с КА: масса 1900 кг в запуске; максимальный диаметр 4.2 м; высота 4.2 м; номинальное время жизни 21 месяц; диапазон рабочих длин волн - от 0.012 до 0.0003 м (имеет высокочастотный и низкочастотный инструменты). Низкочастотный инструмент Планка представляет собой радиометр микроволновой излучения (диапазон 30-70 ГГц; охлажден до 20 К). Его длины волн: 0.01 – 0.0043 м. Имеет угловое разрешение: 33 – 14 угл.мин. Высокочастотный инструмент Планка на основе 62 шт. болометров, охлажденных до 0.1 К, предназначен для наблюдения неба в диапазоне 100 - 857

ГГц. Его угловое разрешение: 10 – 5 угл.мин. Телескоп является апланатическим внеосевым с диаметром 1.5 м. Его ГЗ и ВЗ изготовлены из углеродистого волокна сотовидной структуры «бутерброда» (толстое, подобное сотам ядро на 4-10 см, поверхности которого подвергаются машинной обработке к желательной форме с добавлением двух тонких плёнок на 1-1.5 мм). ГЗ весит всего 28 кг, но достаточно прочно, чтобы выдержать стартовые перегрузки. Его форма остается неизменной, несмотря на то, что температура при старте составляет 300К, а при работе в космосе опустится до 40К. Характеристики ГЗ: внеосевой параболоид; размеры: 1555.98мм на 1886.79 мм; радиус кривизны 1440.0 мм (фокусное расстояние 0.72м). Характеристики ВЗ: внеосевой эллипсоид; размеры: 1050.96 мм на 1104.39 мм; радиус кривизны (- 643.972) мм. Фокусное расстояние телескопа 1.8м, угол между осями ГЗ и ВЗ - 14 градусов.

*Проект JWST* (James Webb Space Telescope) планируется на смену оптическому телескопу Hubble и ИК телескопу Spitzer. Телескоп в точке Лагранже L2 (где уравновешены силы тяготения) будет отвернут от Солнца и защищен специальным экраном весом 4.5 т с размером в теннисный корт. Конструкция телескопа и его предполагаемое положение на орбите таковы, что все измерительные и наблюдательные приборы не будут подвержены ни солнечному, ни лунному свету. Период обращения вокруг Солнца – 1 год. JWST является большим, ИК-оптимизированным космическим телескопом. Диаметр его ГЗ в 2,5 раза превысит диаметр ГЗ Хаббла и составит 6.5 м, а вес телескопа будет на 2/3 меньше веса Хаббла. JWST будет ориентирован на работу в основном в инфракрасном диапазоне, но при этом у него будут некоторые возможности и в видимом диапазоне. Весь диапазон: 0,6 – 28 мкм (для сравнения: рабочий диапазон телескопа Хаббл составляет 0,1 – 2,5 мкм и включает ультрафиолетовую, видимую и часть ИК-областей спектра). Вес космической обсерватории JWST около 6.2 тонн. В случае необходимости срочной переориентации телескопа, это займет двое суток. Оптический модуль будет складным анастигматом с тремя зеркалами. Состоит из ГЗ, ВЗ, третичного зеркала и точного поворачивающегося зеркала. Тип телескопа – Кассегреновский с фокусным расстоянием – 131.4 м. Диаметр ГЗ ~ 6,5 м. Пло-

щадь апертуры  $\sim 25 \text{ м}^2$ . Оптика телескопа изготавливается из бериллия, обладающего чрезвычайно малым коэффициентом линейного расширения в температурном диапазоне 30 – 80 К. Ожидаемое угловое разрешение на длине волны 2 мкм составит 0,1 угловой секунды, показатель чувствительности оптики к абберациям (число Штреля) - 0,8 на длине волны 2 мкм. Эффективное фокусное расстояние телескопа составит 131,4 м. ГЗ с эффективным диаметром 6.5 м является составным из 18 шестиугольных элементов в виде развертываемой структуры. Выполняется из бериллия с тонким покрытием из золота. Заявленная точность ГЗ – 0,001 мкм отклонений на 1 кв. метр. Каждый из 18 сегментов зеркала шестиугольной формы составляет 1.3 м в диаметре и весит приблизительно 20 кг. Сегменты крепятся на каркасе. С помощью трёх телескопических приводов каждый сегмент способен изменять своё положение. Этим достигается максимальная чёткость изображения. Настройка зеркала производится с помощью системы измерения (путем обработки снимков) и управления волновым фронтом. Разрешается независимое регулирование каждого зеркального сегмента по перемещению, наклону и радиусу кривизны. ВЗ сделано таким же способом, и из того же материала. Оно представляет собой сферическое зеркало. Крепиться на трёх спицах из лёгкого сплава. Оно не имеет приводов. ВЗ устанавливается на треноге и имеет 6 степеней свободы для оптической юстировки и фокусировки. Для юстировки 19 элементов составного зеркала (18 элементов ГЗ и вторичное зеркало) разработана система контроля волнового фронта, которая позволит автоматически на орбите выполнить необходимые контрольные операции и передать их результаты на Землю. Затем с Земли будут переданы необходимые юстировочные команды. Автоматическая юстировка зеркал позволит обеспечить их совмещение с высокой (до долей длины волны) точностью, а также точно расположить вторичное зеркало. Помимо ВЗ и ГЗ, телескоп имеет и третичное зеркало, которое устанавливается в хвостовой части. Оно осуществляет перенаправление собранного пучка на нужный оптический инструмент, включая интегрированный модуль системы управления. Такое поворачивающееся зеркало имеет контур управления на 2 Гц и обеспечивает стабилизацию изображения с угловой миллисекундной точностью.

Датчик управления (широкополосная камера наведения и слежения) используется для "нахождения" ориентировочной звезды и последующего непрерывного наведения на неё оптической системы. Работает на длинах волн 1 - 5 мкм и имеет два вида датчика HgCdTe. Модуль с помощью датчика наведения (FGS), производит анализ изображения и находит некоторую звезду – ориентир наведения. После того, как телескопу задан объект (планета, похожая на Землю), система отслеживания поворачивает ГЗ на него. Одновременно с этим разворачиваются шторы так, чтобы они закрывали свет от особо ярких звезд и от Солнца. Имея габаритные размеры 13 × 21 метр, штора является очень большим элементом телескопа. При обнаружении дефектов настройки изображения, NIRCam посылает сигнал на приводы сегментов ГЗ. Они, в свою очередь, корректируют ориентацию сегментов в пространстве, доводя изображение до идеального. После этого третичное зеркало перенаправляет луч на другие имеющиеся оптические инструменты.

В паре с телескопом в космос полетит еще один КА – «звездный зонтик». Его щит в форме гигантской маргаритки предназначен для прикрытия звездного излучения систем, на которые нацелится телескоп. Пластиковая пластина в форме маргаритки размером приблизительно в половину футбольного поля ( $d = 45$  м) призвана затмевать свет звезд, у которых возможно наличие планеты. Таким способом нивелируется засветка от главного светила, и станет доступным изучение непосредственно планеты.

Среди Российских проектов с участием международной кооперации выделяется *проект Спектр-УФ* для работы в ультрафиолетовой области спектра. Диаметр цельного ГЗ здесь составляет 1.7 м. Первоначально комплекс наведения телескопа Т-170 включал в себя, кроме системы управления угловой ориентацией КА, также систему точного гидирования с помощью управляемого по наклонам ВЗ. В активную оптику входили юстировка положения модуля ВЗ в оптической схеме телескопа (по 5 координатам) и система коррекции формы ГЗ приводами усилия. После перехода к облегченному варианту телескопа система точного гидирования с помощью ВЗ была исключена, а ее функции переложены на систему управления угловой ориентацией КА.

В целом, орбитальные телескопы в сравнении с наземными проектами обычно имеют значительно более низкие частоты управляемых оптических элементов (которые определяются, главным образом, остаточными угловыми колебаниями КА и сверхнизкочастотными термодетформациями).

С увеличением размеров их ГЗ все большую значимость будут приобретать инерционные нагрузки, создаваемые системой стабилизации КА. Для их уменьшения часть функций высокоточного наведения потребует переключать на управление наклонами зеркал в оптической схеме телескопа.

#### **1.4. Постановка проблемы исследования**

Из проведенного обзора следует, что комплекс многосистемного наведения является неотъемлемой частью современных больших оптических телескопов, подверженных эксплуатационным деформациям из-за предельной облегченности своих конструкций. При создании таких телескопов их комплексы наведения включают множество новых технических решений, нацеленных на интегральное обеспечение высоких точностей сопровождения наблюдаемых космических объектов и коррекции искажений волнового фронта.

При разработке таких комплексов многосистемного наведения больших оптических телескопов необходимо придерживаться следующих принципов их синтеза: 1) многосистемность – их структуры определяются составом и организацией нескольких модульных систем, различающихся в пространственно-временном частотном диапазоне; 2) многообъектность обратной связи – каждая из таких систем имеет свой объект управления; 3) многоступенчатость процессов наведения – каждая последующая система является более высокочастотной и корректирующей остаточные ошибки работы предшествующих систем; 4) многомерность распределенной обратной связи в системах коррекции волнового фронта; 5) интеллектуальный выбор рабочей структуры комплекса наведения для решения поставленных задач; 6) возможность адаптивной перестройки рабочей структуры – реализация интеллектуальной поддержки для структурной и алгоритмической

оптимизации при «настройке» телескопа на конкретный наблюдаемый объект в конкретных эксплуатационных условиях; 7) уменьшение взаимовлияния модульных систем управления в структурах комплексов наведения и повышение автономности процессов их отладки; 8) многоконтурность и подчиненность обратных связей для компенсации внутренних эксплуатационных возмущений в электроприводах управления опорно-поворотными устройствами телескопов.

Среди наиболее важных модульных систем управления в составе комплекса выделяются: 1) низкочастотное двухкоординатное сопровождение объекта наблюдения всем телескопом (с помощью ОПУ или КА); 2) уточняющее его среднечастотное управление наклонами вторичного (или третичного) зеркал; 3) низкочастотная система активной оптики, корректирующая форму главного зеркала телескопа при эксплуатационных возмущениях; 4) высокочастотная система адаптивной оптики, распределено компенсирующая атмосферные фазовые искажения на трассе распространения светового поля. Обеспечение высоких точностей их работы требует учета множества главных и второстепенных эксплуатационных и производственных факторов. А выявление тонких взаимодействий систем управления в составе комплекса неразрывно связано с построением и анализом математических моделей составных его элементов и телескопа в целом.

Таким образом, *проблема* повышения качественных и эксплуатационных показателей функционирования разрабатываемых и создаваемых уникальных больших оптических телескопов (наземных и орбитальных) за счет увеличения интегрального потенциала от улучшения характеристик и взаимодействия модульных систем управления, объединяющихся в их настраиваемые многосистемные комплексы наведения, является актуальной. Для ее решения на этапах разработки многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов выбраны вопросы дальнейшего развития теоретических основ, методов, моделей и алгоритмов модульных систем управления, которые относятся к новым научно-обоснованным техническим решениям, внедрение которых внесет значительный вклад в создание многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных).

В рамках декомпозиции поставленной проблемы исследования определены следующие, наиболее важные направления и технические задачи:

1. Проведение декомпозиции комплексов многосистемного наведения больших оптических телескопов на модульные системы управления;
2. Разработка моделей для сопровождения разработок управляемых элементов в модульных системах слежения больших телескопов;
3. Разработка моделей для сопровождения разработок управляемых элементов в модульных системах коррекции волнового фронта;
4. Определение требований, построение моделей и алгоритмов для сопровождения разработок прецизионных электроприводов общего слежения наземных телескопов;
5. Исследование факторов, моделей и алгоритмов с целью повышения точности твердотельных волновых гироскопов, как измерительных устройств для систем общего наведения орбитальных телескопов;
6. Проведение структурно-параметрического синтеза многосистемных комплексов наведения при разработке больших оптических телескопов;
7. Прогнозирование эффективности разрабатываемых модульных систем в комплексах слежения больших оптических телескопов;
8. Исследование направлений оптимизации модульных систем коррекции волнового фронта для повышения эффективности многосистемного наведения больших телескопов.

Их детализации и решению посвящены следующие главы диссертации.

## **ГЛАВА 2. ДЕКОМПОЗИЦИЯ КОМПЛЕКСА НАВЕДЕНИЯ БОЛЬШИМИ ОПТИЧЕСКИМИ ТЕЛЕСКОПАМИ НА МОДУЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

Целью главы является проведение декомпозиции комплекса многоканального управления большими оптическими телескопами. Основными направлениями выбраны структурно-функциональная и пространственно-временная частотная декомпозиции. Методологической основе решения таких задач посвящены издания [64, 97, 145, 153 и др.], а также книга автора [271]. Рассматриваемые в главе вопросы отражены в публикациях автора [252, 254, 257, 260, 261, 264].

### **2.1. Состав и общая характеристика многосистемного комплекса наведения большими оптическими телескопами**

Большие оптические телескопы являются высокоточными измерительными инструментами, работающими в условиях широкого спектра различных внешних и внутренних возмущений. Для их нейтрализации применяется множество измерительных датчиков и исполнительных приводов, воздействующих через обратные связи на свои объекты управления (рисунок 2.1).

Так как допустимые погрешности телескопов оцениваются в сотых долях микрометра, поэтому при исследовании их комплексов наведения необходимо учитывать не только рабочие характеристики, но и малые погрешности их составных элементов, которые в ряде случаев могут стать причиной возникновения дополнительных паразитных связей между ними.

Такие «тонкие» взаимодействия модульных систем управления могут проявиться: а) через единую механическую деформируемую конструкцию оптической схемы, б) из-за технологических погрешностей установки элементов оптической схемы, в) через измерительную информацию (в частности, системы сопровождения предназначены для отработки наклонов волнового фронта, а системы коррекции волнового фронта – для компенсации оставшейся части фазового про-

филя светового поля), г) при разделении модулей и каналов управления внутри систем сопровождения и коррекции волнового фронта, д) через алгоритмы управления и так далее.

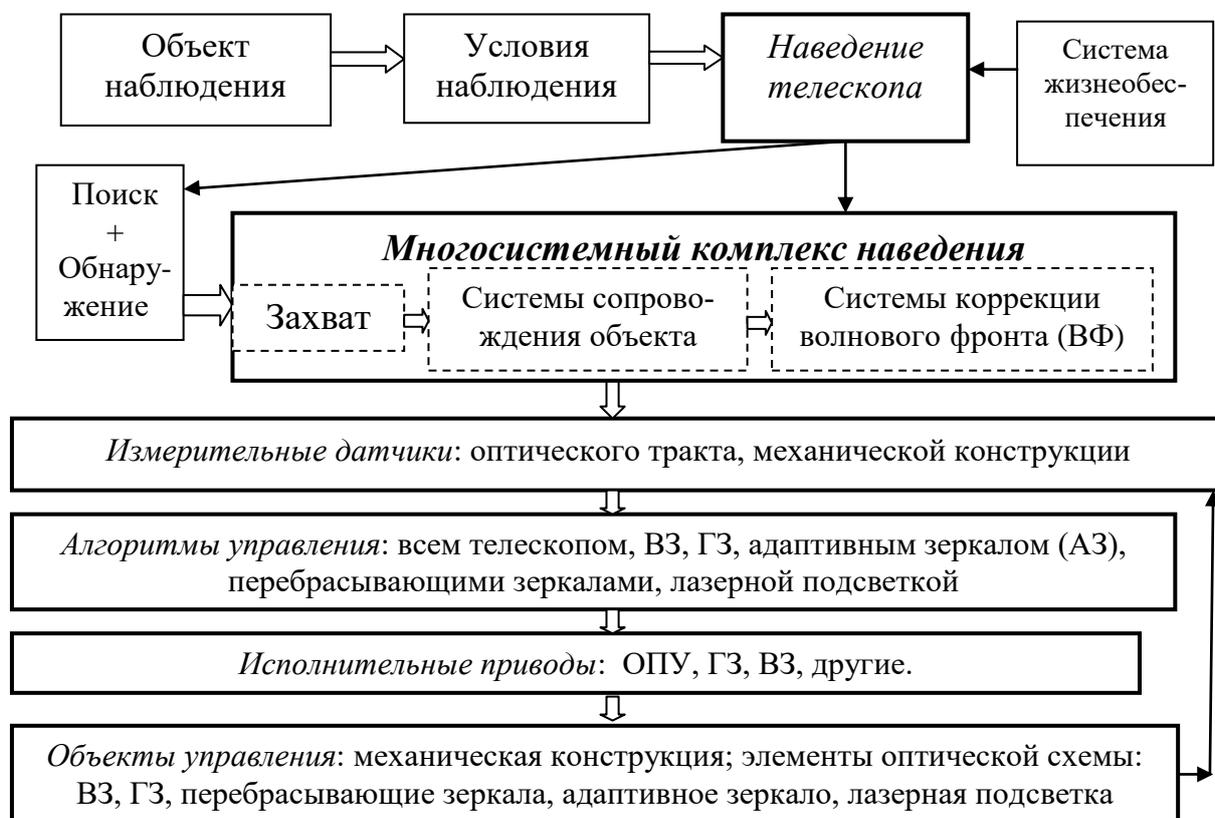


Рисунок 2.1 – Основные элементы комплекса многосистемного наведения

Для того, чтобы комплекс многосистемного наведения телескопом был эффективно скомпонован (исключалась его излишняя избыточность), требуется решить следующие задачи: 1) определить необходимый минимальный состав его систем и каналов управления, 2) эффективно разграничить области их работы, допуская переменность состава комплекса для различных условий, 3) определить необходимый состав обслуживающих многосистемное наведение оптических и позиционных датчиков с последующей развязкой измерительной информации на соответствующие системы управления.

Определение состава активных систем наведения в комплексе большого наземного телескопа начинается с анализа возможности перекрыть ими временной и пространственный частотные диапазоны внешних и внутренних возмущений. При

этом не исключены ситуации, когда некоторые системы наведения в процессе отработки своего пространственно-временного частотного сегмента будут создавать дополнительные возмущения, для коррекции которых потребуются уже новые активные элементы и системы управления.

Представление комплекса многосистемного наведения большим телескопом как единой системы проявляется в его нацеленности на решение единой задачи обеспечения высокого качества оптического изображения облегченного деформируемого телескопа в условиях внешних и внутренних возмущений, которая на практике преобразуется в перечень задач эффективной компенсации этого списка возмущений. В более общей постановке задачи его системного анализа для орбитального телескопа требуется также учесть характеристики радиоканала дистанционного управления и получения телеметрической информации [277, 278, 281].

Структурно-функциональное разделение комплекса многосистемного наведения большими наземными оптическими телескопами на основные активные элементы и системы показано на рисунке 2.2.

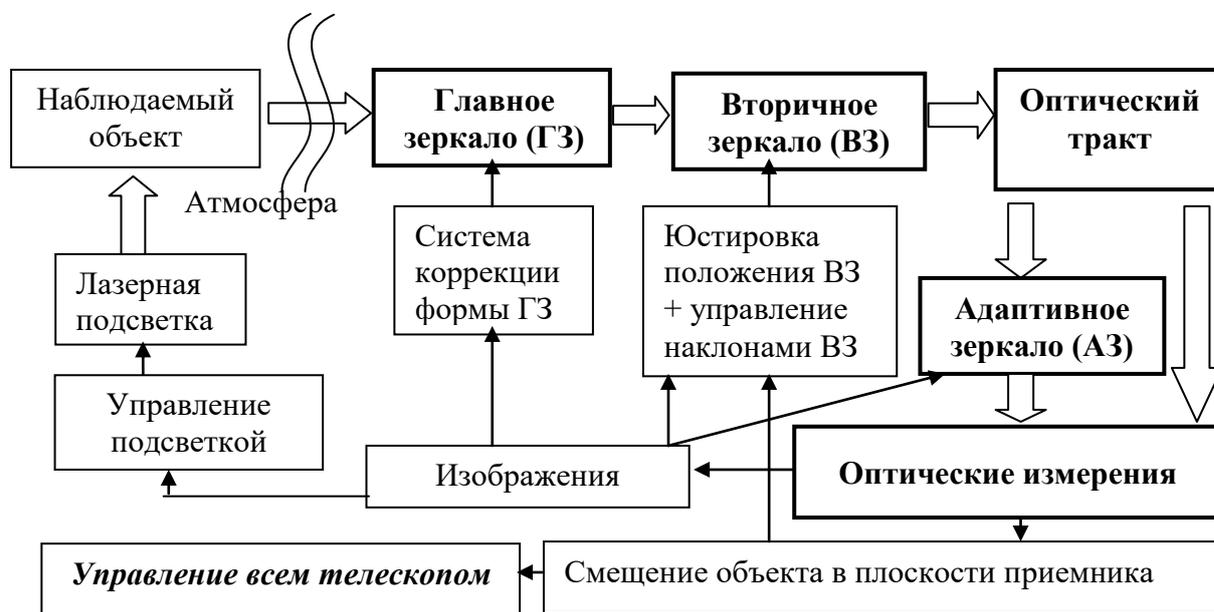


Рисунок 2.2 – Схема взаимной увязки модульных систем комплекса наведения

Исключая атмосферу и лазерную подсветку, такую схему можно отчасти применить и к большим орбитальным телескопам.

Представленные элементы комплекса в разных комбинациях участвуют в выполнении следующих основных программ наведения: 1) сканирование заданной угловой области (дежурный обзор или целенаправленный поиск); 2) угловое движение по заданной программе; 3) сопровождения яркого объекта наблюдения (непрерывное слежение за целью); 4) сопровождение слабого объекта наблюдения путем слежения за более яркими гидирующими световыми источниками и других.



Рисунок 2.3 – Последовательность взаимовлияния систем управления в полосах:

а) временных частот, б) пространственных частот возмущений

В целом, комплекс многосистемного наведения большого облегченного телескопа можно отнести к классу больших систем. В соответствии с их свойства-

ми, имеется возможность изолированного анализа входящих в него модульных систем с последующим исследованием взаимосвязей. Связи между системами могут проявляться через измерительные устройства контуров обратной связи, через их перекрывающиеся рабочие полосы частот, через механическую конструкцию с общими резонансными модами микроколебаний, через взаимное инерционное влияние объектов управления друг на друга и так далее (рисунок 2.3).

На самом верхнем уровне взаимовлияние элементов комплекса многосистемного наведения проявляется между группами систем сопровождения (слежения) и систем коррекции искажений волнового фронта. Так, влияние остаточной ошибки слежения может приводить к: 1) ухудшению координатной информации и дрожанию оптического изображения; 2) ограничению времени экспозиции (определяет класс наблюдаемых слабых объектов); 3) дополнительным инерционным нагрузкам, передаваемым на механические конструкции оптического тракта (в частности, они могут вызвать упругие деформации формы ГЗ) и так далее. С другой стороны, остаточные искажения волнового фронта могут ухудшать: 1) некоординатную информацию (изображения объектов); 2) координатную информацию; 3) работу оптических датчиков, включая отношение сигнал / шум при измерениях ошибки сопровождения и так далее.

Приведем характерный вариант причинно-следственной цепочки взаимовлияния каналов комплекса наведения: [движение космического объекта наблюдения]  $\Rightarrow$  [угловое перемещение телескопа для его сопровождения]  $\Rightarrow$  [инерционные и другие эксплуатационные нагрузки на деформируемые механические конструкции оптической схемы]  $\Rightarrow$  [абберации ГЗ]  $\Rightarrow$  [ухудшение качества изображения]  $\Rightarrow$  [ослабление светового сигнала на оптических датчиках]  $\Rightarrow$  [ухудшение точности измерения ошибки слежения]  $\Rightarrow$  [ухудшение точности наведения]. Существуют и другие сценарии тонкого взаимовлияния модульных систем наведения, которые на практике будут определяться конкретными исходными данными и условиями эксплуатации.

В качестве основной методологии анализа и синтеза комплекса многосистемного наведения большим телескопом естественно выбрать теорию автомати-

ческого регулирования. В этом случае обобщенная структурная схема комплекса наведения телескопа показана на рисунке 2.4. Для ее исследования следует выполнить стандартные шаги, перечисленные на рисунке 2.5.



Рисунок 2.4 – Многообъектная обратная связь в составе комплекса многосистемного наведения большого оптического телескопа



Рисунок 2.5 – Последовательность анализа многосистемного наведения

## 2.2. Декомпозиция комплекса наведения больших телескопов на модульные системы и режимы управления

Корректный анализ многоканального управления неразрывно связан с использованием методологии системного подхода и в данном случае предполагает выполнение следующих шагов. Сначала определяются и характеризуются внешние факторы. Это в первую очередь возмущения, действующие на оптико-

механическую конструкцию телескопа: ветровые, температурные, инерционные, гравитационные, вибрационные и другие. Для наземных телескопов дополнительно необходимо учитывать возмущения волнового фронта вдоль оптической трассы, создаваемые турбулентностью атмосферы.

После этого раскрывается внутренняя структура комплекса, определяются его состав и основные элементы, устанавливаются системные связи между ними. На практике такая структура часто походит на традиционную схему деления объектов и работ над ними. Далее структурная схема может быть дополнена процессной, функциональной, структурно-алгоритмической и организационной схемами. В процессной схеме задаются процессы работы выбранной структуры, которые удобно определять на основе сравнительного частотного анализа возмущений и процессов. В функциональной схеме звенья процессной структуры представляются в виде функций зависимостей выходов от входов, для чего удобно использовать передаточные функции. Структурно-алгоритмическая схема дополняет функциональную схему описанием и синтезом оптимальных алгоритмов работы каналов управления по сигналам от измерительных средств. Организационная схема уточняет структурно-алгоритмическую схему, определяя специфику, варианты, разделение и организацию режимов работы каналов управления для решения разных поставленных задач в разных эксплуатационных условиях.

При декомпозиции комплекса многосистемного наведения больших оптических телескопов следует учитывать, что его модульные системы управления имеют разные объекты управления. Кроме этого, управление ими для больших облегченных деформируемых конструкций телескопов строится по идеологии многоступенчатых процессов. Сначала отрабатываются низкочастотные возмущения с относительно большой амплитудой с соблюдением ограничений на допустимые инерционные воздействия на всю оптико-механическую конструкцию. Далее для уменьшения остаточных ошибок в работу включаются следующие, более высокочастотные системы управления, работающие в меньшем амплитудном диапазоне.

Основные элементы структуры комплекса многосистемного наведения больших оптических телескопов были рассмотрены в параграфе 2.1 (рисунок 2.2).

Объединение их в рабочие структуры функционирования комплекса зависит от поставленных задач, выбранных режимов и присутствующих эксплуатационных условий. Кратко охарактеризуем основные варианты таких рабочих структур.

При этом ограничимся наиболее часто используемыми модульными системами наведения, схематично изображенными для наземного телескопа на рисунке 2.6: 1) А = низкочастотное сопровождение по углу азимута; 2) Н = низкочастотное сопровождение по углу высоты; 3) ГЗ = низкочастотная коррекция формы поверхности главного зеркала (система активной оптики); 4) ВЗ = среднечастотная коррекция остаточной ошибки сопровождения с помощью управления наклонами вторичного зеркала [8]; 5) АЗ = высокочастотное управление формой поверхности адаптивного зеркала для компенсации атмосферной турбулентности (система адаптивной оптики).

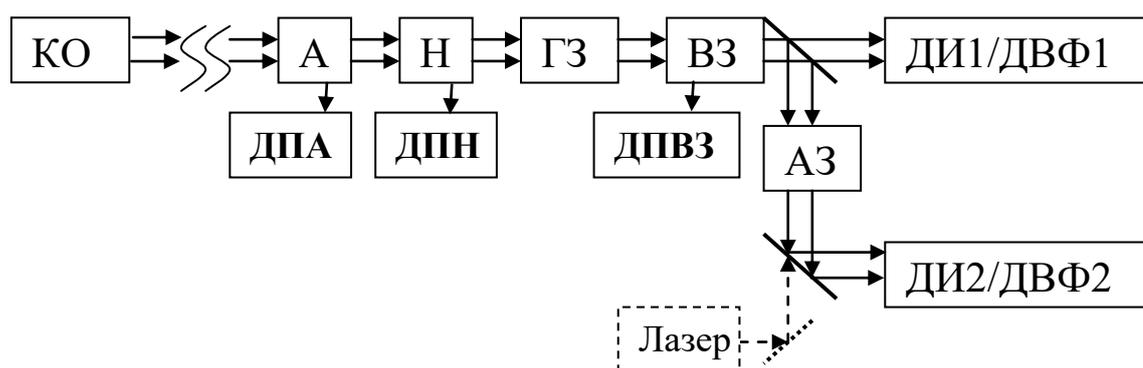


Рисунок 2.6 – Схема очередности прохождения оптического поля через активные элементы комплекса многосистемного наведения

На рисунке обозначены: КО – космический объект; ДП – датчик измерения углового положения; ДИ – датчик измерения интенсивности светового поля; ДВФ – датчик измерения формы волнового фронта; лазер – система лазерной подсветки при наблюдении космических объектов в околоземном пространстве или для зажигания искусственной звезды в атмосфере.

Основными базовыми режимами работы телескопа являются: 1) ожидание (покоящийся телескоп); 2) перенаведение (смена области наблюдения на небесной сфере); 3) сканирование в заданной области; 4) захват изображения наблюдаемого

КО; 5) сопровождение КО; 6) компенсация вращения Земли относительно звездного неба (сопровождение звездных источников) и другие.

Среди агрегированных (сгруппированных) режимов выделим следующие: поиск, захват и сопровождение объекта наблюдения (режимы № 2  $\Rightarrow$  3  $\Rightarrow$  4  $\Rightarrow$  5); наблюдение объекта на фоне участка звездного неба (режимы № 2  $\Rightarrow$  6); обход близзенитной «слепой» области для углов А и Н (режимы № 5  $\Rightarrow$  2  $\Rightarrow$  3  $\Rightarrow$  4  $\Rightarrow$  5).

Перечисленные режимы работы обеспечиваются соответствующими структурами многообъектной обратной связи. От ее полосы частот будут зависеть и используемые математические модели, например: 1) низкочастотная твердотельная модель (каналы управления: А + Н); 2) низкочастотная упругая модель (каналы: А + Н + ГЗ); 3) среднечастотная модель (каналы управления: А + Н + ГЗ + ВЗ); 4) высокочастотная модель (каналы управления: А + Н + ГЗ + ВЗ + АЗ).

При этом перечисленные ранее режимы № 1 ÷ 4 могут обеспечиваться каналами управления: А + Н (+ ГЗ); режим № 5 – каналами: А + Н + ГЗ + ВЗ + АЗ; режим № 6 – каналами управления: А + Н + ГЗ или А + Н + ГЗ + ВЗ + АЗ (в зависимости от требуемых точностей наведения).

Для обеспечения и разделения работы каналов и систем управления в выбранной структуре многообъектной обратной связи используют оптические и позиционные датчики. Применение позиционных датчиков (ДП – датчиков положения) помогает разделить одновременно работающие системы слежения по общему оптическому сигналу угловой ошибки. Они наиболее часто являются датчиками угла. К ним также можно отнести датчики угловой скорости, применяемые во внутренних контурах управления электродвигателями для каналов А и Н.

Информация с ДП также используется для обеспечения программного углового движения телескопа, в качестве помощи оптическим датчикам в режимах перенаведения, а также для восстановления сигналов ошибки наведения между интервалами ее оптического накопления (при сопровождении слабых объектов).

В каналах коррекции волнового фронта применяют в основном оптические датчики: датчики волнового фронта (ДВФ) и датчики интенсивности (ДИ – обычно ПЗС матрицы, но могут быть и отдельные фотодетекторы). При этом ДВФ

обеспечивают большее быстродействие для высокочастотной и многомерной обратной связи, но требуют и более сильного оптического сигнала. Они эффективно применяются в задачах компенсации атмосферной турбулентности при наблюдении относительно ярких звезд (или их ярких гидов). В свою очередь, ДИ позволяют работать по более слабому оптическому сигналу и поэтому могут оказаться предпочтительнее для некоторых случаев более низкочастотной и маломерной обратной связи. В них оптический сигнал собирается уже со всей приемной апертуры, а не по областям отдельных субапертур в ДВФ.

Построение многообъектной обратной связи большого оптического телескопа также зависит от особенностей его оптической схемы. В таких телескопах обычно устанавливают несколько рабочих фокусов для сбора различной оптической информации о наблюдаемых объектах. Для наземных телескопов ими являются: традиционный центральный фокус Кассегрена (или Грегори), боковые фокусы Несмита, удаленные фокусы Куде (в их оптических трактах устанавливают адаптивные зеркала). Перечисленные фокусы обычно работают последовательно, в соответствии с выбранной программой наблюдения. При этом автоматическая перестройка оптической схемы телескопа в общем случае будет требовать перестройку структуры и алгоритмов комплекса многосистемного наведения.

Не перечисляя все возможные варианты оптических структур конкретных многофокусных больших телескопов, в дальнейшем за основу будем выбирать наиболее часто используемую структуру, показанную на рисунке 2.7. Она характерна для многофокусного наземного телескопа с большим набором различного измерительного оборудования. Углы азимута  $A$  и высоты  $H$  (угол места) определяют ориентацию телескопа в пространстве с помощью его опорно-поворотного устройства (ОПУ). Для космических больших телескопов функции ОПУ будут выполняться системой угловой ориентации КА.

Если в приведенной оптической схеме рассмотреть два фокуса: для тракта без адаптивного зеркала АЗ (фокус Кассегрена или Несмита) и для тракта с АЗ (фокус Куде), то получим ее соответствие ранее приведенной на рисунке 2.6 структурной схеме комплекса многосистемного наведения.

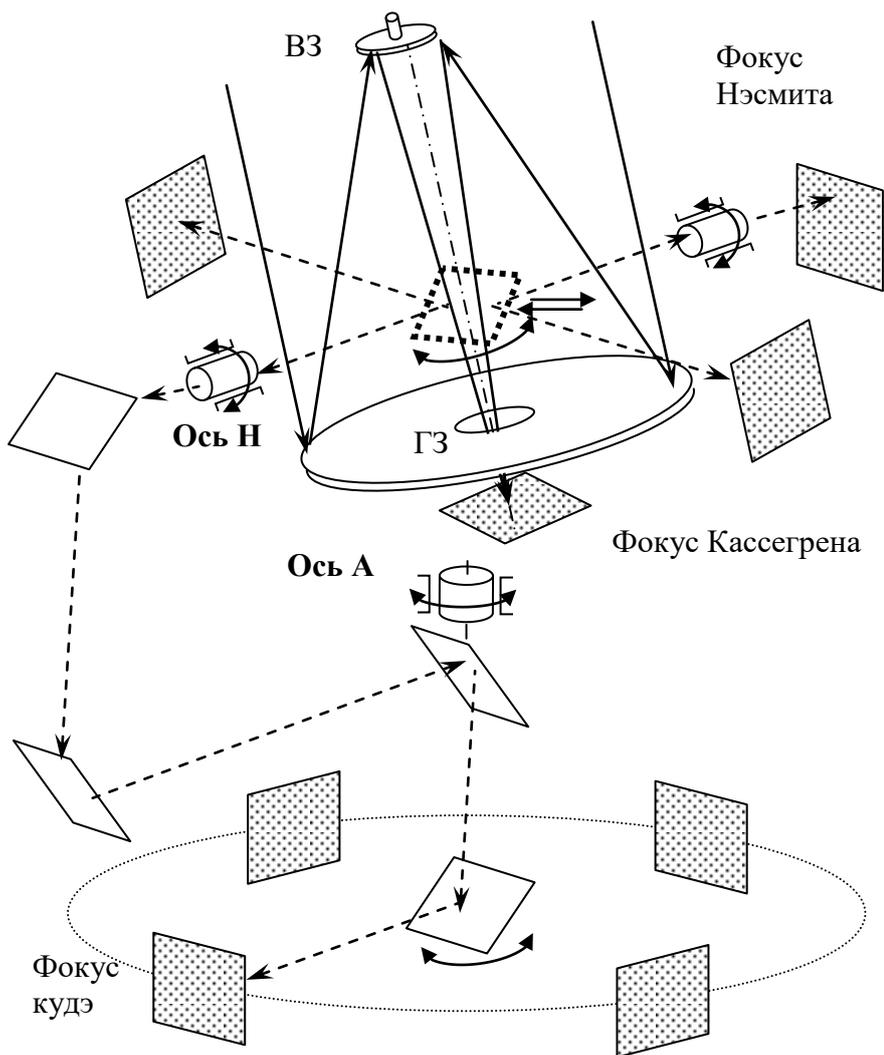


Рисунок 2.7 – Типовая оптическая схема большого телескопа

Последняя может комплектоваться следующими оптическими датчиками (рисунок 2.6): ДИ1 / ДВФ1 – измеряют изображение / волновой фронт для фокуса Кассегрена (или для одного из выбранных фокусов Несмита), ДИ2 / ДВФ2 – соответственно для фокуса Кудэ. Через эти оптические устройства может проводиться разделение модульных систем сопровождения объекта наблюдения и коррекции волнового фронта в оптическом тракте.

Для расчета оптической схемы телескопа, а также для нахождения коэффициентов пропорциональности между угловыми смещением его управляемых элементов и смещениями изображения на оптических датчиках может быть использована программа оптических расчетов Zemax и другие [258, 259, 269].

Для систем сопровождения обратная связь замыкается по смещению центра изображения относительно нуля отсчета ДИ1 (или ДИ2). Односистемное двухкоординатное сопровождение  $[(A + H) \Leftrightarrow \text{ДИ1}]$  состоит из управления  $[A + H]$  в зависимости от смещения изображения относительно нуля оптического приемника ДИ1 в двух угловых координатах. Если точности первой системы слежения оказывается недостаточно, переходят к двухсистемному сопровождению  $[(A + H) + \text{ВЗ} \Leftrightarrow \text{ДИ1}, \text{ДПВЗ}]$ , в которой для управления наклонами ВЗ обратная связь может замыкаться по ДИ1, а для ОПУ  $(A + H)$  - по ДИ1 и ДПВЗ.

Замыкание обратной связи в модульных системах коррекции волнового фронта возможно через следующие варианты оптических датчиков: 1) ДВФ1, ДВФ2; 2) ДИ1, ДИ2 (по функциям резкости изображения); 3) ДИ1, ДВФ2. При этом системы управления АЗ и формой поверхности ГЗ относительно автономны из-за разных плоскостей изображения и сильно разнесенных частотных полос.

Коррекция формы ГЗ часто производится по звездам. Она может выполняться периодически или непрерывно, например, с помощью следующих вариантов: 1) градиентной настройкой по ДИ1 (методом максимизации функции резкости изображения); 2) по ДВФ1; 3) градиентной настройкой по ДИ2; 4) по ДВФ2; 5) по ДВФ2 + ДИ1 (первый этап – по ДВФ2, второй – градиентная чистовая настройка по ДИ1) и другими вариантами. Дополнительный контроль работы систем коррекции волнового фронта может выполняться по свободным ДИ и ДВФ.

Адаптивное управление АЗ обычно также реализуют независимо: по ДВФ2 или ДИ2. В случае одновременной двухсистемной коррекции волнового фронта АЗ будет работать от ДВФ2 (или ДИ2), а ГЗ – от ДВФ1 (или ДИ1). Можно предложить и другие комбинации структур обратной связи в зависимости от списка используемых датчиков и от эксплуатационных условий.

От выбранных структур систем коррекции волнового фронта будут зависеть алгоритмы управления. Так, при работе по ДИ потребуется квазистатическое управление функциями отклика зеркал, а регуляторы в обратной связи будут настраиваться на отработку пробных ступенек с минимальными переходными процессами. Выбор последовательности пробных шагов может выполняться по гра-

диентному алгоритму или случайным образом. При организации же обратной связи по ДВФ будем иметь многомерную динамическую систему управления, для повышения эффективности которой следует в общем случае учитывать спектральные функции искажений волнового фронта.

Организационная интеллектуальная настройка структуры многообъектной обратной связи может осуществляться, например, по следующему алгоритму. Сначала для системы сопровождение (С) задается вопрос: достаточна или нет эксплуатационная точность сопровождения при односистемной обратной связи  $C1 = A + H$ ? Если точность желательно повысить, следует перейти к двухсистемной обратной связи  $C2 = A + H + B3$ . После этого для системы коррекции волнового фронта (ВФ) задается вопрос: требуется или нет компенсировать атмосферную турбулентность? Если «да», то используется двухсистемная обратная связь  $ВФ2 = Г3 + А3$ . Если «нет», то задается следующий вопрос: достаточна ли резкость оптического изображения? Если «да», то используется односистемная обратная связь  $ВФ1 = Г3$ , иначе - двухсистемная (ВФ2). В результате автоматически настраивается одна из четырех возможных организационных структур обратной связи:  $C1 + ВФ1$ ,  $C1 + ВФ2$ ,  $C2 + ВФ1$ ,  $C2 + ВФ2$ .

На практике при исследовании комплекса многосистемного наведения больших оптических телескопов выбор его рабочих структур будет определяться конкретными решаемыми задачами и силой возмущающих факторов.

### **2.3. Пространственно-временное частотное разделение модульных систем управления в комплексах наведения больших телескопов**

Управление телескопом при наблюдении заданного объекта в общем случае включает следующие режимы работы: 1) сканирование области наблюдения, 2) поиск объекта, 3) захват объекта в поле зрения телескопа, 4) грубое наведение на объект, 5) точное наведение на объект. При этом для моделирования первых четырех режимов часто не требуется сверхвысокая точность. Поэтому для них обычно достаточно использования относительно простых твердотельных низко-

частотных моделей, описывающих объекты управления как упруго связанные твердые тела (без учета эксплуатационных микродеформаций всех упругих конструкций). На таких моделях удобно анализировать идеологию наведения, строить алгоритмы наведения, а также проводить грубый анализ процессов наведения. Исследование же режима точного наведения большого оптического телескопа потребует построения уточняющих высокочастотных моделей его упругих конструкций (с использованием метода конечных элементов).

Выбор и анализ моделей элементов комплекса наведения больших телескопов применительно к исследованию конкретных режимов наведения зависят от его декомпозиции на включенные в работу системы управления, на что также влияют учитываемые внешние возмущения. На рисунке 2.8 показано условное сопоставление пространственно-временных частотных диапазонов возмущений и систем управления наземным телескопом. Здесь под эксплуатационными возмущениями подразумеваются возмущения, создаваемые в процессе работы систем жизнеобеспечения телескопа (в том числе, резонансные упругие микроколебания, генерируемые высокочастотным биением вентиляторов, исполнительных двигателей, работой каналов наведения и т.п.).

При анализе систем управления из внешних возмущений в первую очередь выделяются ветровые и инерционные нагрузки, а также атмосферная турбулентность. Сейсмозвозмущения здесь обычно рассеиваются в фундаменте телескопа и представляют интерес только с позиций прочности телескопа при землетрясениях. Термовозмущения являются квазистационарными. Из внутренних возмущений выделим микровозмущения обратной связи, вызываемые: пульсациями электроприводов ОПУ, упругостью вала передачи, непредсказуемыми изменениями моментов трения в подшипниках на сверхнизких угловых скоростях и другие.

Для орбитальных телескопов имеется ряд особенностей. Начальное наведение выполняется с помощью системы угловой ориентации КА. Чтобы уменьшить инерционные нагрузки на большой телескоп, для угловой стабилизации КА должен быть реализован сверхнизкочастотный режим, включая чередование активной угловой стабилизации КА с его свободным дрейфом.

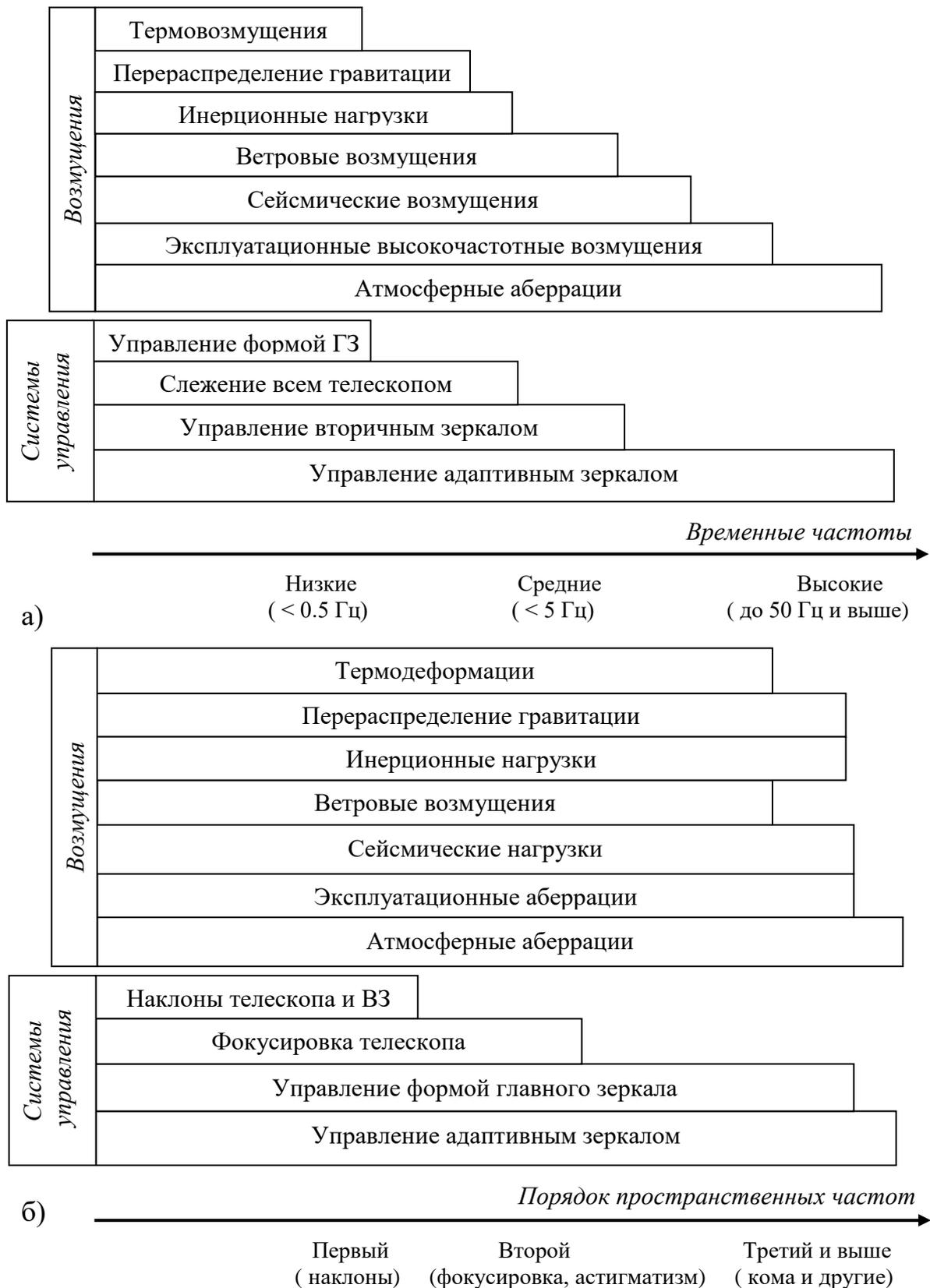


Рисунок 2.8 – Условное сопоставление временных (а) и пространственных (б) частотных диапазонов возмущений и систем наведения наземного телескопа

Работа системы коррекции искажений формы ГЗ (отрабатывает снятие силы тяжести после вывода телескопа на орбиту и термонапряжения при летной эксплуатации) относится в наибольшей мере к активной сверхнизкочастотной системе сохранности юстировки телескопа. Так как в космосе влияние атмосферы отсутствует, поэтому адаптивный атмосферный канал управления не применяется.

К эксплуатационным высокочастотным возмущениям здесь можно отнести микроколебания оптико-механической конструкции телескопа, вызванные биениями при работе маховиков стабилизации КА. Их подавление обычно обеспечивается пассивными демпфирующими средствами.

На практике при анализе многосистемного наведения большого космического телескопа наиболее приоритетной является задача исследования эффективности сеансов наблюдения слабых световых источников с использованием двухсистемного комплекса наведения [8] : [КА + ВЗ] – точнее, задача повышения точности наведения за счет компенсации ВЗ остаточных колебаний КА.

Рассмотренное сопоставление пространственно-временных частотных диапазонов модульных систем управления и характерных для них возмущений позволяет выполнить пространственно-временную частотную декомпозицию комплекса многосистемного наведения телескопа (рис. 2.9). На верхнем уровне иерархии выделяются: 1) системы сопровождения объекта наблюдения и 2) системы коррекции искажений формы волнового фронта (ВФ). При этом вторая группа активных систем призвана улучшить характеристики первой группы. В свою очередь, неэффективная работа первой группы систем управления может создавать дополнительные инерционные и другие возмущения для систем второй группы.

При временной декомпозиции группы модульных систем сопровождения для отработки низких частот ошибки слежения сначала применяют угловое наведение всем телескопом (для наземного телескопа – с помощью ОПУ, для орбитального – всем КА). Для дальнейшего уменьшения остаточной ошибки сопровождения и для подавления ее средних временных частот могут быть использованы управление наклонами ВЗ или третичного ДЗ в оптическом тракте телескопа. От-

слеживание же высоких временных частот (включая средние наклоны волнового фронта в атмосфере) следует переложить на адаптивное зеркало.



Рисунок 2.9 – Пространственно-временная частотная декомпозиция многосистемного комплекса наведения большого телескопа

Количество вовлеченных в процесс слежения активных систем управления зависит от предельной частоты измеряемого оптического сигнала ошибки. Чтобы ее повысить для слабых световых сигналов, на практике применяют наведение телескопа по более ярким гидирующим световым источникам.

При проведении декомпозиции группы систем активной коррекции формы волнового фронта выделяется низкочастотная система управления формой главного зеркала и высокочастотная система компенсации атмосферной турбулентности адаптивным зеркалом (в течении характерного времени замороженности атмосферы до 0.1 секунды; его обычно располагают в плоскости изображения атмосферного слоя в конце оптического тракта).

Из приведенной частотной декомпозицией комплекса многосистемного наведения большого телескопа следует, что его практическая реализация основывается сначала на пространственной, а потом уже на временной частотной декомпозиции. В то же время при теоретическом анализе комплекса многосистемного наведения сначала обычно изучают временную частотную декомпозицию, так как она определяет состав используемых модульных систем управления и глубину детализации их моделей. При этом удобно осваивать постепенно усложняемые модели: сначала в области низких частот, потом в области низких + средних частот и, наконец, в области низких + средних + высоких частот. По мере расширения полосы временных частот, в исследование будут вовлекаться все более высокочастотные каналы управления. Параллельно будут появляться и новые задачи по изучению их согласования с общим комплексом управления. Кроме этого, по мере учета все более высоких временных частот в модели будут включаться все новые неучтенные упругие элементы оптико-механической конструкции телескопа. Вследствие высокой чувствительности конструкций оптических систем к упругим механическим деформациям (до  $0.1 \lambda$ , где  $\lambda \sim 0.5$  мкм), в многообъектной обратной связи может проявиться дополнительная паразитная «перевязка» каналов управления, установленных на единой деформируемой конструкции.

Также не исключены ситуации, когда отдельные частоты упругих колебаний конструкции попадут в диапазон частот внешних возмущений. Это потребует исследовать следующие конструктивные варианты: а) перевод частот в более высокочастотную область за счет повышения жесткости конструкции; б) пассивное подавление частот - с помощью пассивных демпферов и виброгасителей; в) активное подавление частот - с помощью более высокочастотных активных систем.

В заключение выделим соответствующие пространственно-временные области частот, в которых модальные системы управления доминируют. Для них в первом приближении допускается изолированное исследование соответствующих систем наведения. Представим их в виде матрицы, показанной на рисунке 2.10. Внутри клеток матрицы указаны: [перечень основных возмущений]  $\Rightarrow$  [перечень измерительных датчиков]  $\Rightarrow$  [работающие системы управления].

	Низкие временные частоты (до 0.5 Гц)	Средние временные частоты (до 5 Гц)	Высокие временные частоты (> 5 Гц)
Низкие пространственные частоты (наклоны, сдвиги)	Сопровождение, <u>термо- и гравитационные возмущения</u> $\Rightarrow$ Оптический ПЗС датчик $\Rightarrow$ Угловое наведение телескопа в целом	Ошибка сопровождения, ветровые возмущения $\Rightarrow$ Оптический ПЗС датчик + <u>датчик углов ВЗ</u> $\Rightarrow$ Управление наклонами ВЗ	Атмосферные, упругие микроколебания конструкции $\Rightarrow$ Оптический ПЗС датчик + <u>датчик ВФ</u> $\Rightarrow$ Управление наклонами АЗ
Средние пространственные частоты (до третьего порядка)	Квазистатические деформации ГЗ (при сопровождении и др. возмущениях) $\Rightarrow$ Датчик ВФ или интенсивности $\Rightarrow$ Коррекция формы ГЗ	Атмосферные aberrации; моды колебаний ГЗ (от ветровых и эксплуатационных возмущений); остаточная ошибка <u>коррекции формы ГЗ</u> $\Rightarrow$ Датчик ВФ (или интенсивности) $\Rightarrow$ Управление АЗ (адаптивным зеркалом)	
Высокие пространственные частоты (выше третьего порядка)	Квазистатические деформации ГЗ (при сопровождении и др. возмущениях.) $\Rightarrow$ Датчик ВФ или интенсивности $\Rightarrow$ Управление формой ГЗ и АЗ		

Рисунок 2.10 – Пространственно-временная частотная матрица многосистемного наведения большого оптического телескопа

Малые остаточные ошибки процессов многосистемного наведения телескопов обосновывают правомерность широкого использования линейных моделей объектов управления. Это, в свою очередь, позволяет эффективно применять спектральный анализ и формализм передаточных функций, что особенно удобно в процедурах анализа и синтеза контуров управления. Для систем коррекции волнового фронта, работающих с микрометровыми фазовыми искажениями, линейность моделей также очевидна.

Контур обратной связи принципиально не нарушают линейность моделей, однако могут вносить их разделение на непрерывные и дискретно-непрерывные

линейные модели – в зависимости от такта выдачи оптического сигнала ошибки при наведении по слабым световым источникам.

В общем случае при моделировании процессов сопровождения могут потребоваться и отдельные нелинейные модели. К ним, в частности, относится модель углового движения телескопа в альт-азимутальной монтировке. Однако такие низкочастотные нелинейные модели обычно допускают линеаризацию в области высоких частот работы своих систем. В отдельных случаях нелинейные модели могут представлять интерес и с точки зрения выявления слабых нелинейных взаимовлияний контуров управления многосистемного комплекса наведения, не проявляющихся в линейном приближении.

## 2.4 Выводы по главе 2

1. Современные тенденции увеличения приемных апертур при создании современных крупногабаритных оптических телескопов (наземных и орбитальных) принципиально требуют предельного облегчения их подвижных конструкций. Для этого проектировщиками телескопов допускаются контролируемые и активно корректируемые в оптической схеме деформации оптико-механических конструкций. Характеристики таких эксплуатационных деформаций с учетом внешних воздействий и условий наблюдения будут определять состав модульных систем активного управления в комплексах наведения проектируемых уникальных больших оптических телескопов.

2. Распределение ролей модульных систем активного управления и выполняемых ими задач определяется в процессе декомпозиции многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов. В комплексах наведения наземных телескопов сначала должны быть распределены функциональные задачи следующих четырех основных модульных систем: общего углового слежения опорно-поворотным устройством телескопа, корректирующего слежения вторичным зеркалом, коррекции формы главного зеркала и компенсации атмосферной турбулентности. Для орбитального телескопа это системы: угловой ориентации

космического аппарата, корректирующего слежения вторичным зеркалам и коррекции формы главного зеркала телескопа. Перечисленные модульные системы наведения должны включаться в работу в первую очередь, что указывает на значимость их теоретического анализа и имитационного моделирования. Активные системы последующих уровней управления могут вводиться по мере необходимости – если основные активные системы принципиально не могут интегрально обеспечить требуемое качество получаемой телескопом оптической информации.

3. Входящие в комплекс наведения больших телескопов модульные системы управления на первых этапах их проектировании могут быть разделены на две условно независимые группы: системы сопровождения объекта наблюдения и системы коррекции формы волнового фронта. На последующих этапах их взаимное влияние можно учесть опосредованно, через ухудшение отношений [сигнал / шум] для входных сигналов соответствующих систем управления.

4. Предложенный метод пространственно-временной частотной декомпозиции комплекса многосистемного наведения больших телескопов позволил выделить и конкретизировать области взаимодействия и разделения каналов управления в соответствующих пространственных и временных частотах. При этом каналы следующих уровней обрабатывают остаточные погрешности каналов предыдущих уровней в более расширенной полосе временных частот. При этом полосы их пространственных частот сравнимы.

5. Проведенная декомпозиция комплексов многосистемного наведения больших оптических телескопов позволила предложить подходы к их проектированию, основывающиеся на обеспечении многообъектности (наличии своего объекта управления в каждой системе) и распределенной многомерности (при управлении волновым фронтом) интегральной обратной связи.

### **ГЛАВА 3. МОДЕЛИ ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ РАЗРАБОТОК УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМАХ СЛЕЖЕНИЯ БОЛЬШИХ ТЕЛЕСКОПОВ**

При создании современных больших оптических телескопов требуется обеспечивать взаимное согласование частотных свойств упругой оптико-механической конструкции с элементами активных систем управления. Оно обычно начинается с проведения анализа эскизов выбираемой конструкции телескопа. Параллельно встает задача синтеза упругой конструкции с элементами управления. Далее анализ и синтез чередуются, дополняя друг друга. Рассмотрение таких задач можно проводить с использованием аналитических и численных моделей. При этом аналитические модели являются более простыми и позволяют выделить наиболее важные факторы и комплексы параметров. Далее создают имитационные численные модели – на основе сертифицированных пакетов прикладных компьютерных программ.

В этой главе в рамках интеллектуальной поддержки сопровождению разработок управляемых элементов для модульных систем слежения эксплуатационно деформируемых больших оптических телескопов сначала прорабатываются общие подходы к построению моделей, а далее – получают и анализируются варианты моделей, нацеленных на исследование своих факторов.

#### **3.1. Общие методики компьютерного анализа и идентификации моделей упругих управляемых элементов в составе механической конструкции большого телескопа**

Этому направлению посвящены книги [45, 51, 84, 201 и др.] и статьи [10, 77 и др.]. Среди работ автора отметим [243, 244, 245, 247, 248, 249, 273].

Создание компьютерной 3D модели выбранной оптико-механической деформируемой конструкции большого облегченного оптического телескопа помогает в решении следующих важных процедур ее производственного анализа.

1) Проведение частотно-модального и прочностного динамического анализа упругой конструкции. Здесь определяются спектр частот и соответствующие динамические моды резонансных колебаний деформируемых модульных конструкций телескопа. По их виду и по получающемуся распределению напряжений выделяются «узкие места» конструкций для проработки.

2) Графическое построение амплитудно-фазовых частотных характеристик (АФЧХ) упругой конструкции – проводится на основе частотно-модального анализа. Здесь изучаются отклики исследуемых переменных на: а) управляющие воздействия, б) внешние возмущения, в) внутренние эксплуатационные возмущения. При этом АЧХ показывает силу отклика, а ФЧХ – помогает идентифицировать плохо проявленные резонансные частоты. По амплитуде резонансных откликов можно дополнительно оценить декременты затухания конструкции и степень влияния внешних возмущений и управляющих воздействий на ее динамическое поведение на резонансах. С резонансами упругой конструкции телескопа требуется увязать рабочие полосы контуров управления активных систем наведения.

3) Изучение влияния высокочастотных возмущений на микроколебания упругой конструкции телескопа – выполняется для конкретных спектров возмущений на основе предыдущих результатов. После этого формулируются задачи демпфирования резонансных частот или их вынесения за пределы спектра возмущений путем доработки оптико-механической конструкции.

4) Построение и анализ передаточных функций объектов управления. Здесь по графикам АФЧХ на управляющие воздействия идентифицируются аналитические передаточные функции  $W_{oy}(p)$  выбранной структуры. Если их дополнить передаточными функциями  $W_R(p)$  регуляторов систем наведения, можно получить передаточные функции для анализа ошибки замкнутых контуров управления  $W_e(p) = 1/[1 + W_R(p)W_{oy}(p)]$ .

Эти процедуры ориентированы на использование сертифицированных программ, включая САПРы конечно-элементного анализа и MATLAB Control Toolbox. В результате выявляются «узкие места» конструкций (слабые упругие элементы, нежелательные резонансные частоты и др.), изучаются возможности «раз-

вязки» упругих колебаний (например, «размещая» элементы контуров управления в узлах отдельных мод), уменьшается неопределенность в выборе конструктивных и системных параметров. Последнего добиваются процедурами структурно-параметрического синтеза конструкции телескопа с требуемыми свойствами.

При изучении создаваемых в процессе эксплуатации телескопа инерционных воздействий часто можно ограничиться следующей упрощенной схемой одностороннего «прямого» влияния: [низкочастотное угловое управление ОПУ телескопа]  $\Rightarrow$  [инерционные нагрузки на ВЗ и ГЗ]  $\Rightarrow$  [их отработка контурами управления ВЗ и ГЗ]. Обратным влиянием обычно можно пренебречь. Так, деформации формы ГЗ измеряются в микрометрах и не могут создавать заметных инерционных нагрузок. В свою очередь, движения ВЗ на средних частотах также не будут передаваться на низкие частоты углового перемещения телескопа в ОПУ. На низких же частотах относительные малые перемещения ВЗ (не более угловой минуты) будут влиять на углы ОПУ пропорционально сверхмалому отношению моментов инерции ВЗ и телескопа в целом.

Следует учитывать, что центр углового движения телескопа в ОПУ стремятся совместить с его центром масс. Это позволяет разделить переносное «твердотельное» и относительное «упругое» движения конструкции телескопа и моделировать их независимо. Тем не менее, создаваемые инерционные нагрузки от переносного движения всей «замороженной» конструкции большого телескопа будут передаваться на упругие колебания элементов его облегченной оптико-механической конструкции.

Выбранная приоритетность исследований с точки зрения многосистемного управления телескопами приводит к необходимости встраивания моделей упругих конструкций телескопов в модели теории автоматического регулирования систем с обратными связями. При этом для исследования контуров управления с ограниченными спектрами частот, полная упругая модель оптико-механической конструкции телескопа обычно становится избыточной. Ее, как модель объекта управления, достаточно рассматривать в виде системы передаточных функций

отклика упругой системы на управляющие и возмущающие воздействия. Такие функции имеют следующий общий вид:

$$W(p) = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}{a_n \cdot p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0} \quad , \quad (3.1)$$

где  $p$  – оператор дифференцирования по времени;  $a_i, b_j$  – постоянные коэффициенты соответствующих полиномов;  $a_0=1; n > m$ .

На практике их можно находить в рамках аналитических моделей или же через обработку динамического отклика упругой системы на типовые воздействия: на «ступеньку», на импульс, на гармоническое воздействие.

Если измеряется переходная характеристика  $h(t)$  (отклик упругой конструкции на ступенчатое воздействие), коэффициенты ( $a_i, b_j$ ) можно идентифицировать, например, известным методом площадей. Здесь для функции (3.1) с учетом  $Y(p) = W(p)X(p)$  используют соотношения:

$$K_0 = \lim_{p \rightarrow 0} W(p) = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = b_0 ;$$

$$\begin{aligned} K_1 &= \lim_{p \rightarrow 0} W_1(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \{ K_0 - W(p) \} / p = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t [ K_0 - h(t) ] dt = \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} h_1(t) = -b_1 + K_0 a_1 ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_2 &= \lim_{p \rightarrow 0} W_2(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \{ K_1 - W_1(p) \} / p = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t [ K_1 - h_1(t) ] dt = \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} h_2(t) = b_2 + K_1 a_1 - K_0 a_2 ; \end{aligned}$$

.....

$$\begin{aligned} K_r &= \lim_{p \rightarrow 0} W_r(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \{ K_{r-1} - W_{r-1}(p) \} / p = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t [ K_{r-1} - h_{r-1}(t) ] dt = \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} h_r(t) = (-1)^r b_r + K_{r-1} a_1 - K_{r-2} a_2 + \dots + (-1)^{r-1} K_0 a_r . \end{aligned}$$

По известной зависимости  $h(t)$  не составляет труда взять соответствующие интегралы. В результате имеем легко решаемую систему линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов  $a_i, b_j$ .

В известном методе моментов используется измеренная импульсная характеристика  $g(t)$  (отклик системы на импульсное воздействие, причем  $g(t) = dh(t) / dt$ ) и ее следующая связь с передаточной функцией:

$$W(p) = \int_0^{\infty} g(t) e^{-pt} dt = m_0 - p m_1 + p^2 m_2 / 2 - p^3 m_3 / 6 + \dots ;$$

где:  $e^{-pt} = 1 - pt + (pt)^2/2 - (pt)^3/6 + \dots$  ;  $m_i = \int_0^{\infty} t^i g(t) dt$  - моменты .

Тогда коэффициенты  $(a_i, b_j)$  могут быть вычислены из системы уравнений  $W(p) \sum a_i p^i = \sum b_j p^j$  или:  $(m_0 - p m_1 + p^2 m_2 / 2 - p^3 m_3 / 6 + \dots) \sum a_i p^i = \sum b_j p^j$  .

Наибольшую точность идентификации коэффициентов передаточной функции (3.1) обеспечивает использование частотного коэффициента передачи  $K(j\omega)$  (связан преобразованием Фурье с импульсной характеристикой). Здесь в процессе стендовых испытаний или компьютерного имитационного моделирования изучается отклик выходного сигнала на гармоническое воздействие с перестраиваемой частотой. В результате получаются амплитудная (АЧХ) и фазовая (ФЧХ) частотные характеристики: АЧХ будет показывать силу откликов на резонансных частотах (по ним оцениваются декременты затухания на резонансах), а ФЧХ – помогает идентифицировать плохо проявляемые на АЧХ резонансные частоты.

В этом подходе коэффициенты полиномов  $A(p)$ ,  $B(p)$  вычисляются через минимизацию квадратичного функционала, например, в пакете MATLAB:

$$\max_{a,b} \sum_{k=1}^n \gamma(k) \cdot [W(k) \cdot A(\omega(k)) - B(\omega(k))]^2,$$

где  $W(k)$  - таблично представленная частотная характеристика;  $\omega(k)$  - вектор табличных частот;  $A(\omega(k))$ ,  $B(\omega(k))$  - знаменатель и числитель с учетом замены  $p = j \cdot \omega(k)$ ;  $\gamma(k)$  - вектор весовых коэффициентов.

При идентификации соответствующих передаточных функций вида (3.1) для упругих оптико-механических конструкций больших телескопов желательно учитывать их типовую форму, получаемую из их теоретических упругих моделей. Так, для традиционных моделей упругих колебаний:

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \left( \mu \frac{\partial}{\partial t} + 1 \right) L \right] w = U(t) q_0(\vec{r}),$$

производя разложение по собственным формам оператора  $L$ :

$LW_j = \omega_j^2 W_j$ ,  $(W_k, W_j) = \|W_i\|^2 \delta_{kj}$ ,  $d_j = (q_0, W_j)$ , будем иметь систему уравнений:

$$\ddot{y}_j + \mu_j \dot{y}_j + \omega_j^2 y_j = U(t) d_j,$$

где  $w$  – вектор-функция перемещения;  $L$  – оператор упругих деформаций;  $q_0$  – нормированное пространственное распределение нагрузки;  $\vec{r}$  – пространственная координата;  $U(t)$  – временное изменение сигнала управления;  $\omega_j^2$  – собственные значения оператора  $L$ ;  $(\cdot, \cdot)$  – скалярное произведение функций;  $\delta_{kj}$  – символы Кронекера;  $\mu_j$  – эффективный коэффициент конструкционного демпфирования  $j$ -ой моды колебаний:  $\mu_j = \delta \omega_j / \pi$ ,  $\delta \equiv \ln(a_i / a_{i+1})$  – логарифмический декремент затухания колебаний,  $a_i$  – амплитуда  $i$ -го колебательного цикла; учет внутреннего рассеяния энергии выполнен в соответствии с моделью Фохта – путем замены модуля Юнга  $E$  на:  $E(1 + \partial \mu / \partial t)$ .

Передаточные функции распределенной управляемой системы строятся для конкретных точек наблюдения с координатами  $\vec{r}_*$ :

$$x = w(\vec{r}_*) = \sum_j y_j W_j(\vec{r}_*) = \sum_j y_j C_j / d_j, \quad C_j = d_j W_j(\vec{r}_*).$$

Используя:  $U = u_\omega \exp[i\omega t]$ ,  $y_j = Y_j \exp[i\omega t]$ ,  $x = X \exp[i\omega t]$ ;

$$X = u_\omega \sum_{j=1}^{\infty} \left[ C_j / (\omega_j^2 - \omega^2 + i \delta \omega_j \omega / \pi) \right],$$

получаем следующую внутреннюю структуру передаточных функций:

$$\tilde{W}(p) = \sum_j \frac{\tilde{C}_j}{p^2 + K \delta_j \omega_j p / \pi + \omega_j^2} \quad (3.2)$$

где поправочный коэффициент  $K = 1$  может быть увеличен для учета дополнительных потерь в механических соединениях; резонансные частоты  $\omega_j$  достаточно хорошо идентифицируются по АФЧХ; декременты затухания  $\delta_j$  можно задать оценочно; коэффициенты  $\tilde{C}_j$  вычисляются методом неопределенных коэффициентов через решение системы линейных уравнений.

На практике для построения передаточной функции вида (3.2) требуется произвести разложение знаменателя (3.1) на "колебательные звенья".

В ряде случаев для конкретных упругих элементов можно также использовать и другие методы построения передаточных функций: через построение конечно-разностных моделей упругих пластин, через сведение к обыкновенным дифференциальным уравнениям для балочных упругих элементов и другие.

### 3.2. Низкочастотные модели следящего телескопа в альт-азимутальной монтировке

Так как модульная система слежения всем телескопом путем его углового поворота в ОПУ обычно является крайне низкочастотной, поэтому модель следящего телескопа в альт-азимутальной монтировке на первых этапах ее разработки примем твердотельной. На последующих этапах изготовления телескопа уже потребуются имитационные конечно-элементные модели, построенные в соответствии с методиками предыдущего параграфа.

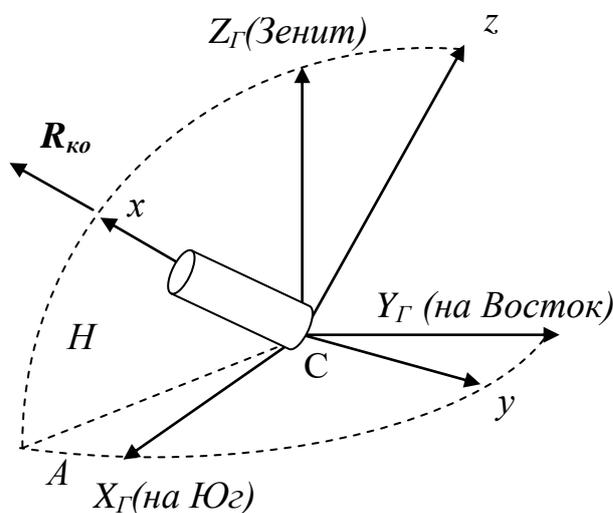


Рисунок 3.1 – Системы координат телескопа в альт-азимутальной монтировке

Основные системы координат (СК) телескопа в альт-азимутальной монтировке показаны на рисунке 3.1. Здесь  $xuz$  – собственная СК телескопа,  $X_G Y_G Z_G$  – горизонтальная СК места его расположения; ось  $x$  направлена вдоль линии визирования телескопа (по оптической оси), ось  $y$  – вдоль оси поворота телескопа по углу высоты  $H$ , ось  $Z_G$  – в зенит (является осью поворота по углу азимута  $A$ ).

Механическую часть телескопа в целом представим в виде двух кинематически связанных твердых тел [122]: непосредственно телескоп (его оптико-механическая конструкция, наклоняемая в вилке по углу высоты  $H$ ) и опорно-поворотное устройство (ОПУ – платформа установки телескопа, поворачиваемая по углу азимута  $A$ ). Их будем отмечать индексами «т» и «п».

Общая кинетическая энергия телескопа с платформой:

$$T = T_m + T_n, \quad T_n = (1/2) I_n \dot{A}^2,$$

$$T_m = (1/2) \boldsymbol{\omega} \mathbf{I}_m \boldsymbol{\omega} = (1/2) [I_x \omega_x^2 + I_y \omega_y^2 + I_z \omega_z^2] + I_{xy} \omega_x \omega_y + I_{xz} \omega_x \omega_z + I_{yz} \omega_y \omega_z,$$

$$\boldsymbol{\omega} = -\dot{H} \mathbf{y}^0 - \dot{A} \mathbf{z}_\Gamma^0, \quad \mathbf{z}_\Gamma^0 = \mathbf{x}^0 \sin(H) + \mathbf{z}^0 \cos(H) \Rightarrow$$

$$\omega_x = -\dot{A} \sin(H), \quad \omega_y = -\dot{H}, \quad \omega_z = -\dot{A} \cos(H).$$

где  $I_n$  – момент инерции платформы (по углу азимута),  $\mathbf{I}_m$  – тензор инерции телескопа,  $\boldsymbol{\omega}$  – вектор угловой скорости телескопа (верхние индексы «0» обозначает единичные вектора).

После соответствующих подстановок получим:

$$T = (1/2) \{ I_1 \dot{A}^2 + I_2 \dot{H}^2 \} + I_2 \dot{A} \dot{H},$$

$$I_1 \equiv I_n + I_x \sin^2(H) + I_z \cos^2(H) + I_{xz} \sin(2H), \quad I_2 \equiv I_{xy} \sin(H) + I_{yz} \cos(H).$$

Подставляя кинетическую энергию в уравнения Лагранжа второго рода, окончательно найдем следующие уравнения углового движения:

$$I_1 \ddot{A} + I_2 \ddot{H} + 2 I_3 \dot{A} \dot{H} + I_4 \dot{H}^2 = M_{UA} + M_{fA},$$

$$I_y \ddot{H} + I_2 \ddot{A} - I_3 \dot{A}^2 = M_{UH} + M_{fH},$$

где  $I_3 \equiv (I_x - I_z) \sin(2H) + I_{xz} \cos(2H)$ ,  $I_4 \equiv I_{xy} \cos(H) - I_{yz} \sin(H)$ ;

$M_U$  и  $M_f$  – соответственно управляющие и возмущающие моменты.

При проектировании механической конструкция телескопа на практике обычно стремятся уменьшить взаимовлияние каналов управления по  $A$  и  $H$ , добиваясь  $I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} = 0$ . При этом уравнения упростятся ( $I_A = I_1$ ,  $I_H = I_2$ ), однако они пока еще остались нелинейными и взаимосвязанными:

$$\ddot{H} + \kappa_H \dot{A}^2 = M_{UH} / I_H + f_H, \quad \ddot{A} - \kappa_A \dot{H} = M_{UA} / I_A + f_A \quad (3.3)$$

где  $f_H = M_{fH} / I_H$ ,  $f_A = M_{fA} / I_A$ ,  $\kappa_H \equiv - I_3 / I_y = [(I_z - I_x) / 2I_y] \sin(2H)$ ,

$$\kappa_A = - 2 I_3 / I_l = 2 \kappa_H I_y / I_l = [(I_z - I_x) \sin(2H)] / [I_n + I_x + (I_z - I_x) \cos^2(H)].$$

Развязка каналов наведения производится через алгоритмы управления с компенсацией нелинейных составляющих:

$$M_{UH} / I_H = \kappa_H \omega_A^2 + (e_H), \quad M_{UA} / I_A = - \kappa_A \omega_A \omega_H + U_A(e_A), \quad (3.4)$$

где  $e_{A,H}$  – ошибки наведения по углам  $A$  и  $H$ ;  $U_{A,H}$  – следящие управления.

Далее при расчете обратных связей контуров слежения, каналы  $A$  и  $H$  будем рассматривать независимо, часто ограничиваясь упрощенными уравнениями:

$$\ddot{H} = U_H + f_H, \quad \ddot{A} = U_A + f_A. \quad (3.5)$$

Они наиболее удобны для предварительного синтеза алгоритмов управления телескопом в ОПУ. Рассматриваемым вопросам также посвящена статья [140]. Заключительное моделирование процессов сопровождения объектов наблюдения следует выполнять на основе исходных нелинейных уравнений (3.3).

### **3.3 Модели управляемого по наклонам вторичного зеркала большого телескопа**

Сопровождающие разработку вторичного зеркала модели приведем в рамках двух формализмов. Аналитически полученная среднечастотная модель ВЗ удобна в последующем для синтеза многосистемного комплекса наведения телескопа. Кроме этого, при ее выводе выявляются тонкие нелинейные воздействия каналов управления ВЗ на механическую конструкцию его модуля. Численно получаемые с помощью программ конечно-элементного анализа модели управляемого ВЗ позволяют учесть упругие свойства всей конструкции модуля ВЗ. Они более точные, но соответствуют конкретному исполнению конструкции.

### 3.3.1 Среднечастотные модели управляемого вторичного зеркала

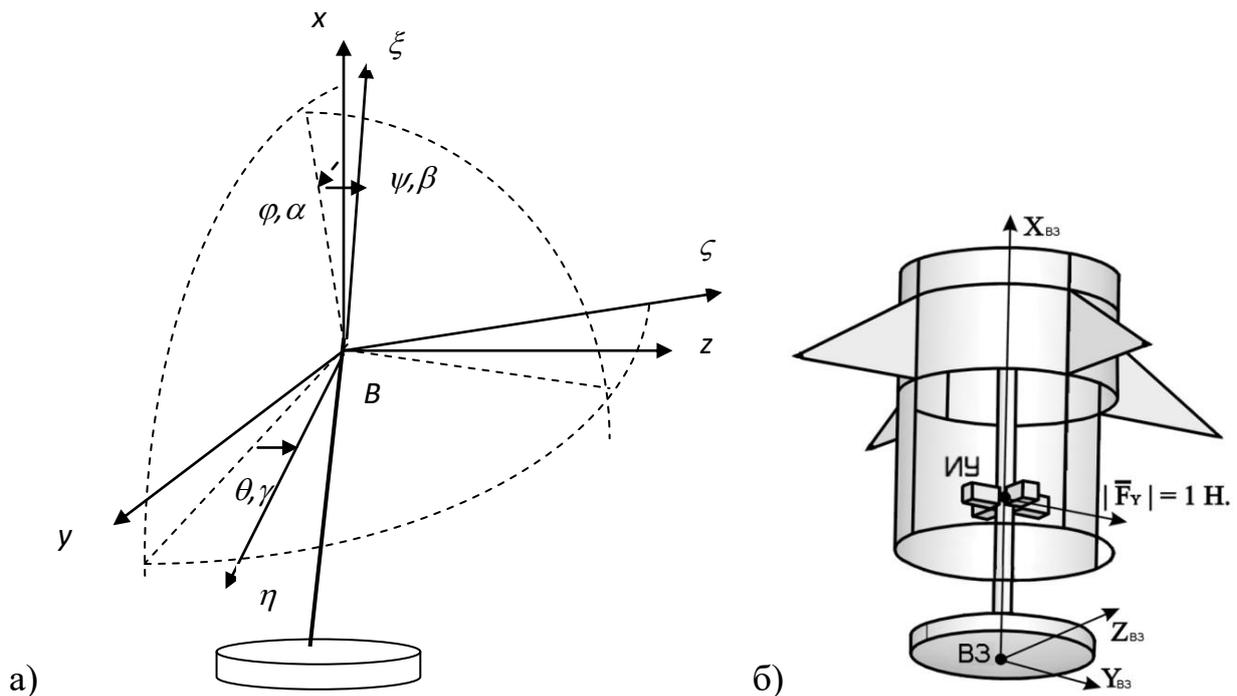


Рисунок 3.2 – Управляемое вторичное зеркало на штанге подвеса:

а) угловые и линейные координаты; б) конструктивная схема модуля ВЗ

В современных больших оптических телескопах вторичное зеркало ориентируется в пространстве по шести степеням свободы (рисунок 3.2): два наклона (в направлениях  $y$ ,  $z$ ), разворот вокруг оси симметрии (оси  $x$ ) и три линейных смещения (по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Из них последние четыре степени свободы относятся к системе юстировки оптической схемы телескопа и далее не рассматриваются.

Для корректирующего управления в системе сопровождения наблюдаемых объектов используются только наклоны в направлениях  $y$ ,  $z$ . Для того, чтобы наклоны вторичного зеркала минимально ухудшали качество оптического изображения в фокальной плоскости телескопа, ВЗ подвешивают на штанге специальной длины и управляют его маятниковыми перемещениями. Достаточно жесткая штанга подвешивается на слабо упругом элементе вблизи нейтральной точки подвеса. Для повышения суммарной жесткости крепления всего ВЗ, управление на него передается через упругие элементы приводов усилия.

Конструктивно модуль ВЗ крепится к достаточно жесткой конструкции тубуса телескопа на четырех (или трех) длинных распорках (рисунок 3.26). На рисунке также показан силовой корпус, в котором закрепляется ВЗ.

При рассмотрении уравнений движения ВЗ в составе углового движения телескопа следует учитывать действие на него инерционных нагрузок, создаваемых переносным движением. При этом обратным влиянием относительных угловых движений ВЗ на собственное движение телескопа можно пренебрегать из-за малости их амплитуд, а также моментов инерции.

Выбор математической модели модуля вторичного зеркала зависит от рассматриваемой полосы учитываемых частот. Его резонансные частоты по управляемым углам  $\varphi, \psi$  являются наиболее низкими для конструкции модуля. Выше их обычно располагаются частоты крутильных колебаний силового корпуса по углу  $\gamma$ , закручивания ВЗ в силовом корпусе по углу  $\theta$ , а еще выше – частоты изгибных колебаний силового корпуса по углам  $\alpha$  и  $\beta$ .

Рисунок 3.26 соответствует варианту модуля с массой ВЗ около 20 кг. Он был разработан в НТЦ «Восход» (г. Ижевск) для одной из первых конструкций космического телескопа российского проекта «Спектр-УФ» [8]. Для него частоты колебаний ВЗ по углам  $\varphi$  и  $\psi$  составили  $\sim 3$  Гц (с учетом упругости подвеса и упругих элементов приводов управления), крутильная частота всего модуля на упругих распорках его крепления к тубусу телескопа по углу  $\gamma \sim 20$  Гц, частоты взаимного закручивания ВЗ и силового корпуса модуля по углам  $\gamma$  и  $\theta \sim 35$  Гц, изгибные колебания ВЗ на изгибающейся штанге подвеса  $\sim 80$  Гц, всего модуля по оси X  $\sim 80$  Гц, всего модуля по углам  $\alpha$  и  $\beta \sim 120$  Гц. Поэтому в диапазоне частот почти до 20 Гц можно вполне ограничиться твердотельной моделью только по углам  $\varphi, \psi$ ; а в диапазоне частот почти до 80 Гц – в нее потребуется добавить углы осевого закручивания  $\gamma$  и  $\theta$ . Для учета более высоких частот правильнее применять уже конечно-элементные модели. Однако типовые конечно-элементные модели являются линейными и поэтому не будут описывать возмож-

ные нелинейные микровозбуждения одних степеней свободы другими, что может оказаться неучтенным фактором для сверхвысоких оптических точностей.

Для составления модели нелинейного взаимовлияния угловых координат свяжем с ВЗ систему координат  $\xi\eta\zeta$  (рисунок 3.2а). Кинетическая энергия ВЗ при этом будет равна:

$$T_{B3} = (1/2) \omega I_{B3} \omega + (1/2) m [V_B^2 - 2 l \xi^0 \cdot (V_B \times \omega)] = m V_B^2 / 2 + \\ + m l (\omega_\eta V_{B\zeta} - \omega_\zeta V_{B\eta}) + (1/2) [I_\xi \omega_\xi^2 + I_\eta \omega_\eta^2 + I_\zeta \omega_\zeta^2] + I_{\xi\eta} \omega_\xi \omega_\eta + I_{\xi\zeta} \omega_\xi \omega_\zeta + I_{\eta\zeta} \omega_\eta \omega_\zeta,$$

где:  $I_{B3}$  – тензор инерции ВЗ,  $\omega$  – вектор абсолютной угловой скорости,  $V_B$  – вектор абсолютной линейной скорости точки подвеса,  $m$  – масса,  $l$  – длина штанги подвеса; совершенно аналогично записывается кинетическая энергия и окружающего ВЗ силового корпуса (только со своими индексами).

Для рассматриваемого варианта модуля ВЗ в полосе частот почти до 80 Гц можно ограничиться учетом управляемых углов  $\varphi$  и  $\psi$ , а также неуправляемых углов  $\gamma$  и  $\theta$ . При этом в линеаризованных уравнениях для скоростей оставим только одну наиболее значимую нелинейную составляющую:

$$\omega = (\dot{\theta} + \dot{\varphi}\psi + \dot{\theta}_T) \xi^0 - (\dot{\psi} + \dot{\psi}_T) \eta^0 + (\dot{\varphi} + \dot{\varphi}_T) \zeta^0, \quad V_B = L\dot{\varphi}_T \eta^0 + L\dot{\psi}_T \zeta^0.$$

Здесь нижний индекс «Т» обозначает соответствующие скорости переносного углового перемещения всего телескопа относительно центра вращения,  $L$  – расстояние до него от точки подвеса.

В потенциальной энергии модуля ВЗ следует учесть упругость крепления его корпуса на длинных растяжках, упругость подвеса, упругость приводов управления и упругость штанги подвеса. Функция диссипации Раусса при этом формируется по аналогии с потенциальной энергией модуля с помощью формальной замены углов на их скорости. Обе функции получаются квадратичными формами с эффективными коэффициентами жесткости и диссипации энергии (из-за их громоздкости здесь не выписаны).

Подставляя кинетическую и потенциальную энергии, а также функцию диссипации в уравнения Лагранжа второго рода, после их квазилинеаризации получим следующую твердотельную нелинейную модель:

$$\begin{aligned}
 \ddot{\varphi} + 2\mu_{\varphi}\Omega_{\varphi}\dot{\varphi} + \Omega_{\varphi}^2\varphi &= u_{\varphi} - \delta_{\eta\zeta}\ddot{\psi} + \delta_{\xi\zeta}\ddot{\theta} - \kappa_{\varphi}\ddot{\varphi}_T, \\
 \ddot{\psi} + 2\mu_{\psi}\Omega_{\psi}\dot{\psi} + \Omega_{\psi}^2\psi &= u_{\psi} - \delta_{\eta\zeta}\ddot{\varphi} - \delta_{\xi\eta}\ddot{\theta} - \kappa_{\psi}\ddot{\psi}_T, \\
 \ddot{\theta} + 2\mu_{\theta}\Omega_{\theta}(\dot{\theta} - \dot{\gamma}) + \Omega_{\theta}^2(\theta - \gamma) &= \kappa_{\theta}(\delta_{\xi\zeta}\ddot{\varphi} - \delta_{\xi\eta}\ddot{\psi}) - \ddot{\theta}_T - \dot{\varphi}\dot{\psi} + \dot{\varphi}\dot{\psi}, \\
 \ddot{\gamma} + 2\mu_{\gamma}\Omega_{\gamma}\dot{\gamma} + \Omega_{\gamma}^2\gamma &= \kappa_{\gamma}[2\mu_{\theta}\Omega_{\theta}(\dot{\theta} - \dot{\gamma}) + \Omega_{\theta}^2(\theta - \gamma)] - \ddot{\theta}_T,
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

где соответственно:  $2\mu\Omega$  - коэффициенты демпфирования ( $\mu = \delta_k / 2\pi$ ,  $\delta_k$  - логарифмические декременты колебаний),  $\Omega$  - частоты упругих угловых колебаний;  $u$  – управляющие воздействия;  $\delta$  - отношения моментов инерции, оцениваемые:

$$\delta_{\xi\eta} \approx \eta_c/l, \delta_{\xi\zeta} \approx \zeta_c/l, \delta_{\eta\zeta} \approx \eta_c \zeta_c / l^2; \kappa_{\varphi} = \kappa_{\psi} = L/l - 1; \kappa_{\theta} = I_{\zeta}/I_{\xi}, \kappa_{\gamma} = I_{\xi}/I_x;$$

( $\eta_c, \zeta_c$ ) – погрешность совмещения центра масс ВЗ с точкой его крепления на штанге подвеса;  $I_x$  – момент инерции оставшейся части модуля без ВЗ.

Если ВЗ хорошо центрировано ( $\delta_{\xi\eta} \approx \delta_{\xi\zeta} \approx \delta_{\eta\zeta} \approx 0$ ), будем иметь:

$$\begin{aligned}
 \ddot{\varphi} + 2\mu_{\varphi}\Omega_{\varphi}\dot{\varphi} + \Omega_{\varphi}^2\varphi &= u_{\varphi} - \kappa_{\varphi}\ddot{\varphi}_T, \\
 \ddot{\psi} + 2\mu_{\psi}\Omega_{\psi}\dot{\psi} + \Omega_{\psi}^2\psi &= u_{\psi} - \kappa_{\psi}\ddot{\psi}_T, \\
 \ddot{\theta} + 2\mu_{\theta}\Omega_{\theta}(\dot{\theta} - \dot{\gamma}) + \Omega_{\theta}^2(\theta - \gamma) &= \dot{\varphi}\dot{\psi} - \dot{\varphi}\dot{\psi} - \ddot{\theta}_T, \\
 \ddot{\gamma} + 2\mu_{\gamma}\Omega_{\gamma}\dot{\gamma} + \Omega_{\gamma}^2\gamma &= \kappa_{\gamma}[2\mu_{\theta}\Omega_{\theta}(\dot{\theta} - \dot{\gamma}) + \Omega_{\theta}^2(\theta - \gamma)] - \ddot{\theta}_T.
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Здесь при малых амплитудах колебаний первые два уравнения для управляемых углов  $\varphi$  и  $\psi$  можно считать независимыми от остальных двух уравнений, записанных для неуправляемых углов  $\gamma$  и  $\theta$ . Однако через углы  $\varphi$  и  $\psi$  в ряде случаев допустима «раскачка» модуля по крутильным углам  $\gamma$  и  $\theta$ . В свою очередь, для возбужденных по  $\gamma$  и  $\theta$  микроколебаний принципиально возможно и обратное влияние на углы  $\varphi$  и  $\psi$ , появляющееся из-за смещения осей действия приводов управления при закручивании штанги подвеса ВЗ.

В диапазоне контура управления примерно до 15 – 20 Гц вполне достаточно использовать упрощенную твердотельную модель ВЗ в виде первых двух уравнений (3.7). Поэтому далее ее для каждого из углов  $\varphi$ ,  $\psi$  часто будем записывать в следующем обобщенном виде (легко преобразуется в передаточные функции):

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \mu_{\kappa} \frac{d\varphi}{dt} + \omega^2 \varphi = u, \quad u \equiv \frac{F_{\text{приводов}} l_u}{J}, \quad \mu_{\kappa} = \frac{\omega \cdot \delta}{\pi} \Rightarrow$$

$$\varphi = W_{\text{ВЗ}} \cdot U, \quad W_{\text{ВЗ}} = \frac{1}{s^2 + \mu_{\kappa} s + \omega^2}, \quad (3.8)$$

где:  $\omega$  и  $J$  – резонансная частота и момент инерции ВЗ относительно точки подвеса;  $l_u$  – расстояние от точки подвеса до приводов с усилиями  $F$ ;  $U \equiv F \cdot l_u / J \equiv \omega^2 \cdot \varphi_u$ ,  $\varphi_u \sim \varphi_{\text{стат}} \cdot (F / F_{\text{стат}})$  – превышение динамического усилия над статическим.

Ее наиболее удобно использовать в задачах синтеза алгоритмов многосистемного наведения телескопа. При решении же задач анализа влияния высокочастотных микровозмущений, воздействующих на модуль ВЗ, потребуется использовать более точную упругую конечно-элементную модель.

### 3.3.2. Идентификация высокочастотной модели управляемого вторичного зеркала в составе конструкции его модуля

Сформируем высокочастотную модель модуля управляемого вторичного зеркала (рисунок 3.2б), как систему передаточных функций в полосе частот до 100 Гц (она захватывает основные внешние и внутренние возмущения) в зависимости от: 1) управляющих усилий приводов; 2) переносного ускорения телескопа; 3) микровозмущений на посадочных местах крепления модуля ВЗ.

Коэффициенты числителя и знаменателя выписанных ниже передаточных функций были идентифицированы по рассчитанным АФЧХ в соответствии с методикой, описанной в параграфе 3.1 [248, 251]. Декременты затухания колебаний для определенности везде принимались равными 3%.

Передаточная функция угла наклона ВЗ от единичного управляющего усилия приводов по оси  $Y$  получена на основе АФЧХ рисунка 3.3:

$$W_1(s) = \frac{-0.0033458s - 2074)(s + 1717)}{(s^2 + 1105s + 339.4)(s^2 + 11s + 3.34e004)} \cdot \frac{(s^2 + 10.97s + 3.329e004)}{(s^2 + 34.62s + 3.329e005)}, \quad (3.8)$$

где ошибки аппроксимации: АЧХ  $\leq 0.00013\%$ , ФЧХ  $\leq 0.055\%$ .

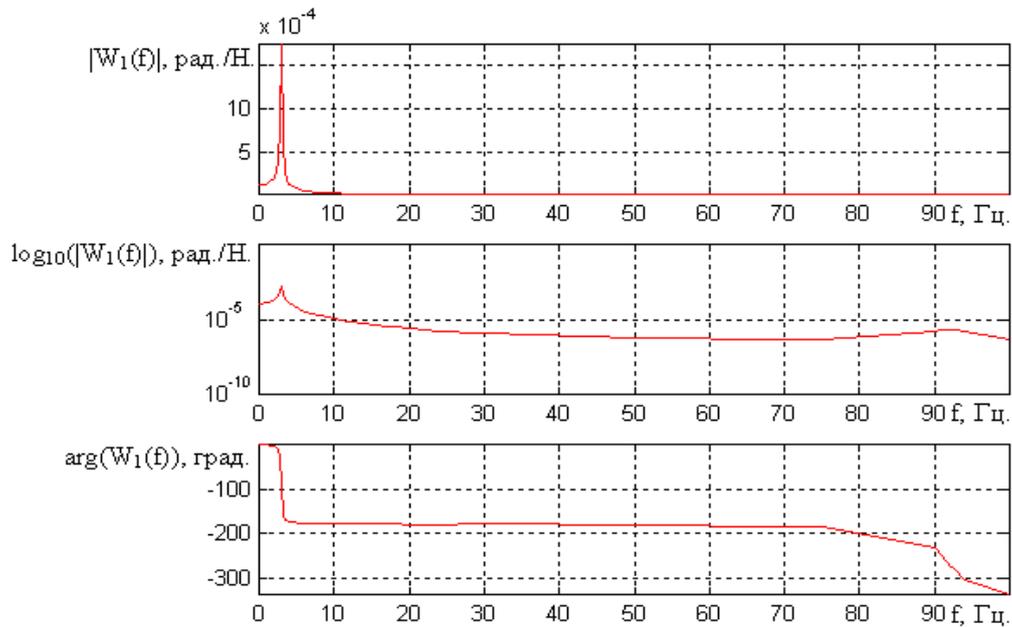


Рисунок 3.3 – АФЧХ угла наклона ВЗ от единичного усилия приводов по оси Y

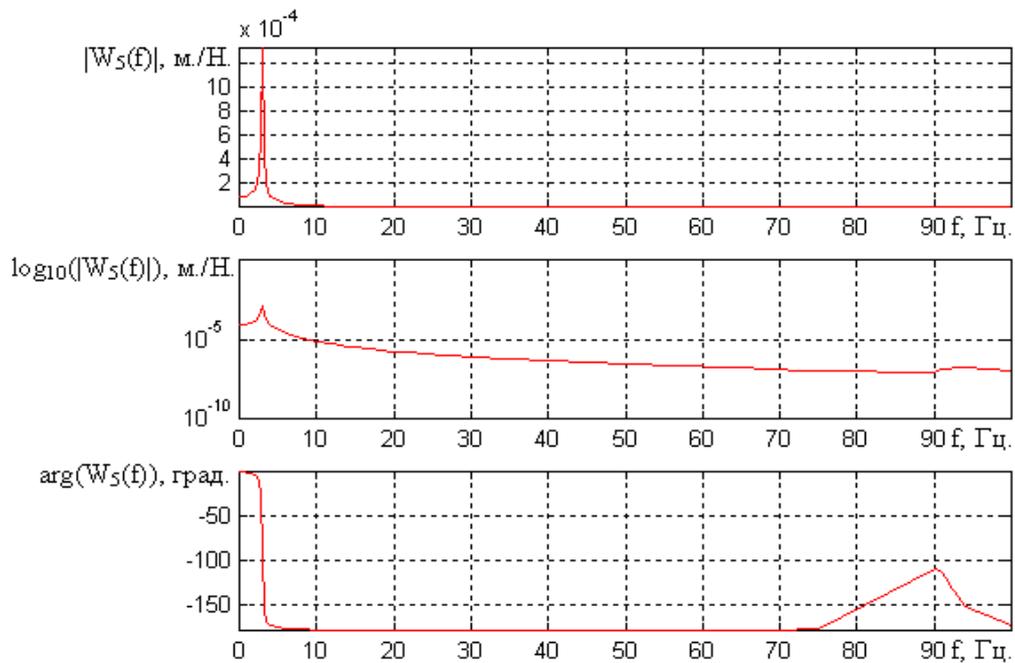


Рисунок 3.4 – АФЧХ смещения ДП по оси Y от единичного управляющего усилия приводов слежения, направленного вдоль оси Y

Из (3.8) видно, что первая резонансная частота  $\approx \sqrt{340} \text{ с}^{-1} \approx 3 \text{ Гц}$ . Это частота ВЗ с учетом упругого закрепления его жесткой штанги подвеса на упругих приводах управления и в точке подвеса. Следующие проявляемые резонансные частоты упругих колебаний модуля ВЗ превышают ее почти на порядок.

Передаточная функция смещения ДП по оси Y от единичного усилия приводов вдоль оси Y, получена на основе АФЧХ рисунка 3.4:

$$W_5(s) = \frac{0.029381(s^2 + 31.94 \cdot s + 3.064e005)}{(s^2 + 1.106 \cdot s + 339.5)(s^2 + 34.6 \cdot s + 3.328e005)},$$

где ошибки аппроксимации: АЧХ  $\leq 0.00013 \%$ , ФЧХ  $\leq 0.0057 \%$ .

Также были получены передаточные функции для угла наклона ВЗ: от переносного ускорения величиной  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ , действующего вдоль оси Y на всю конструкцию модуля ВЗ в целом; от ускорения величиной  $1 \text{ м/с}^2$ , действующего на точки крепления модуля ВЗ в направлении оси Y; от ускорения величиной  $1 \text{ м/с}^2$ , действующего на точки крепления модуля ВЗ в направлении оси Z. Передаточные функции смещения ДП по оси Y: от переносного ускорения величиной  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ , действующего на точки крепления модуля ВЗ в направлении оси Y; от ускорения величиной  $1 \text{ м/с}^2$ , действующего на точки крепления модуля ВЗ в направлении оси Y; от ускорения величиной  $1 \text{ м/с}^2$ , действующего на точки крепления модуля ВЗ в направлении оси Z.

В них вид знаменателя часто повторялся, так как он характеризует резонансные частоты колебаний. При этом вид числителя менялся в зависимости от чувствительности входных и выходных переменных к соответствующим модам колебаний. Были получены и другие передаточные функции, в том числе и для координаты Z (они практически совпали со случаем координаты Y). Отчасти с ними можно познакомиться в работе [248].

В рамках анализа влияния технологических погрешностей на передаточные функции рассматривался случай дисбаланса ВЗ. На внешний край ВЗ добавлялась масса 20 гр (около 0,1 % от массы ВЗ в оправе). При этом на передаточных функ-

циях это практически не отразилось для следующих важных случаев зависимостей: 1) угла наклона ВЗ от единичного управляющего усилия приводов слежения, направленного по оси  $Y$ ; 2) угла наклона ВЗ от переносного ускорения величиной  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ , действующего вдоль оси  $Y$  на всю конструкцию МВЗ в целом; 3) смещения ДП по оси  $Y$  от единичного управляющего усилия приводов слежения, направленного вдоль оси  $Y$ ; 4) смещения ДП по оси  $Y$  от переносного ускорения величиной  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ , действующего вдоль оси  $Y$  на всю конструкцию МВЗ в целом.

### **3.4. Моделирование динамических свойств управляемого по наклонам упругого третичного диагонального зеркала с обратной связью**

Рассматриваемым ниже вопросам посвящены также статьи автора [235, 239, 241, 244, 262]. Модель управляемого по наклонам деформируемого пластинчатого ТДЗ в расширенной полосе частот строится интегрированной с контуром активного демпфирования резонансных микроколебаний. Для этого она представляется в стандартном для MATLAB виде:  $\dot{x} = Ax + Bu$ ,  $y = Cx$ . Переход к нему для конструктивно проработанного варианта зеркала может быть выполнен с помощью описанной ранее методики численного получения передаточных функций с помощью САПР. Другим вариантом такого перехода является использование конечно-разностной аппроксимация упругого оператора, который характеризуется более широкими возможностями построения наблюдателя (по всей поверхности зеркала) для синтеза контура активного демпфирования.

Плоское третичное диагональное зеркало (ТДЗ) (рисунок 3.5) устанавливается после ВЗ обычно под углом  $45^0$  к оптической оси (рисунок 2.7). Его угловое перемещение напоминает управление альт-азимутальной монтировкой телескопа. Центр масс ТДЗ совпадает с центром его вращения. Поэтому действием на него инерционных нагрузок от переносного движения телескопа можно пренебречь. Кроме этого, ТДЗ имеют существенно меньшие размеры и массу по сравнению с ВЗ. Все это позволяет больше расширить его полосу частот управления.

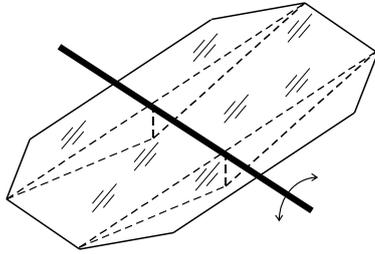


Рисунок 3.5 – Вариант ТДЗ

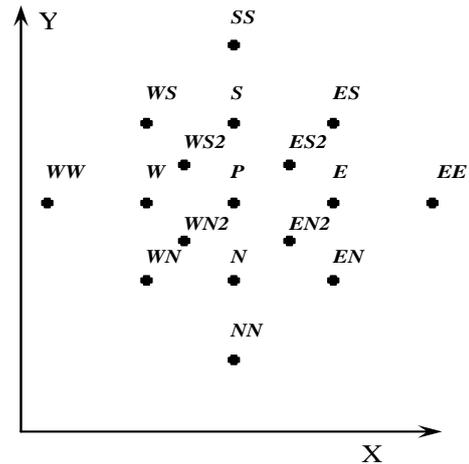


Рисунок 3.6 – Конечно-разностный шаблон

Управление ТДЗ можно использовать в двухсистемной (ОПУ + ТДЗ) и в трехсистемной системах сопровождения (ОПУ + ВЗ + ТДЗ). При этом угловой диапазон управления ТДЗ существенно меньше углового диапазона управления ВЗ, однако частоты управления выше. Предельная частота работы ТДЗ будет ограничиваться частотами его незадемпфированных упругих колебаний.

Для начальной оценки предельных по угловой скорости возможностей управления ТДЗ можно использовать его эквивалент в виде «качаемой» в центре упругой балки. Ее кососимметричный прогиб  $w(y,t)$  под действием инерционной нагрузки  $q = -\rho h y \ddot{\varphi}$ , создаваемой изменением угла наклона  $\varphi(t)$ , приближенно описывается уравнениями:  $w \approx \Phi(t) y^2 / b$ ,  $\ddot{\Phi} + (\omega \delta / \pi) \dot{\Phi} + \omega^2 \Phi = -B \ddot{\varphi}$ ,

где:  $\omega \approx (h/b^2) \sqrt{E/\rho}$  – низшая резонансная частота,  $E$  – модуль Юнга;  $y$  – расстояние от оси вращения,  $b = y_{max}$  – расстояние до края зеркала,  $\rho$  – плотность материала,  $h$  – толщина зеркала,  $\delta \ll 1$  – логарифмический декремент затухания,  $B = b(y, y^2) / (y^2, y^2) \approx 5/4$  – коэффициент разложения инерционной нагрузки по первой моде (круглые скобки обозначают скалярное произведение по области).

В диапазоне низких частот управления (значительно ниже резонансной частоты  $\omega$ ) решение можно считать квазистатическим:  $\Phi \approx -B \ddot{\varphi} / \omega^2$ .

Для точного исследования упругого поведения управляемого ТДЗ следует провести модальный анализ конкретной механической конструкции ТДЗ с использованием компьютерных программ конечно-элементного анализа.

При решении задачи синтеза контуров динамического управления формой пластинчатого зеркала на предельных частотах его работы также удобно использовать чуть менее точный конечно-разностный подход. В этом случае следует использовать уравнение колебаний пластины переменной толщины, записанное в декартовых координатах:

$$\rho h \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \left(1 + \mu \frac{\partial}{\partial t}\right) L W = q, \quad L \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( G \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( G \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \\ + \nu \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( G \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \nu \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( G \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) + 2(1 - \nu) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( G \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \right),$$

где  $G \equiv E h^3 / 12(1 - \nu^2)$  – цилиндрическая жесткость;  $q$  – внешняя нагрузка;  $h(x, y)$  – толщина;  $E, \nu, \rho, \mu$  – соответственно модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность, коэффициент внутреннего демпфирования;  $\mu = \delta / \pi \Omega$ ;  $\Omega$  – частота колебаний,  $\delta$  – логарифмический декремент затухания.

Конечно-разностная аппроксимация оператора  $L$  для внутренних и граничных узлов равномерной сетки (рисунок 3.6) изучалась в [235] (для общего случая учитывалось и подкрепление зеркала ребрами жесткости снизу). Для удобства моделирования вводились безразмерные величины:

$$X = \frac{x}{a}, \quad Y = \frac{y}{a}, \quad H = \frac{h}{h_0}, \quad Q = \frac{q}{q_m}, \quad \tau = \frac{t}{T_0}, \quad \tilde{\mu} = \frac{\mu}{T_0}, \quad \tilde{W} = \frac{\rho h_0 \Omega_0^2}{q_m} W = \frac{G_0}{a^4 q_m} W,$$

где  $\Omega_0^2 \equiv G_0 / \rho h_0 a^2$ ,  $G_0 \equiv E h_0^3 / 12(1 - \nu^2)$ ,  $T_0 = 2\pi / \Omega_0$ ,  $q_m$  – величина нормирования нагрузки,  $a$  и  $h_0$  – характерные размер и толщина.

В них безразмерная форма записи уравнения динамики принимала вид:

$$\left( \frac{\Delta_x^0 \Delta_y^0}{2\pi} \right)^2 H \frac{d^2 \tilde{W}}{d\tau^2} + \left( 1 + \tilde{\mu} \frac{d}{d\tau} \right) \tilde{L} \tilde{W} = Q \left( \Delta_x^0 \Delta_y^0 \right)^2,$$

$$\text{где: } \tilde{L}\tilde{W} = \left(\Delta_x^0 \Delta_y^0\right)^2 \bar{L}(G)W/q_m = \sum_{i,j} A_{ij} (H^3) \tilde{W}_{ij},$$

$$\Delta_x^2 \Delta_y^2 \bar{L}(G)W_p = A_{ww}W_{ww} + A_{nn}W_{nn} + A_{ee}W_{ee} + A_{ss}W_{ss} + A_{ww}W_{ww} +$$

$$+ A_{wn}W_{wn} + A_{en}W_{en} + A_{ws}W_{ws} + A_{es}W_{es} + A_pW_p - A_wW_w - A_eW_e - A_nW_n - A_sW_s,$$

$A$  – коэффициенты сеточной аппроксимации;  $\Delta_x^0 = \Delta_x/a = x_{\max}/a(N_x - 1)$ ,

$$\Delta_y^0 = \Delta_y/a = y_{\max}/a(N_y - 1), 0 \leq y \leq y_{\max}, 0 \leq x \leq x_{\max}, N_x, N_y – \text{максимальное}$$

количество узлов сетки вдоль направлений  $X$  и  $Y$ ;  $\tilde{\mu} = (\delta/2\pi^2)(\Omega_0/\Omega)$  ( $\mu = \delta/\pi\Omega$ ; в случае преобладания низшей формы колебания  $\tilde{\mu} \approx 0,05\delta$ ).

Ее исследование различными методами интегрирования приведено в работе [239]. Высокую точность расчета, в том числе, обеспечивал явный метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Было проведено сравнение результатов с расчетами в программе конечно-элементного анализа Pro/MECHANICA. На квадратную консольную пластину постоянной толщины действовала распределенная нагрузка  $q = -\rho h x \ddot{\varphi}$ ,  $\ddot{\varphi} = const$  (такая нагрузка создается при вращении оси закрепления с постоянным угловым ускорением). Если для сетки  $16 \times 16$  отличие результатов статических прогибов достигало 12%, то для сетки  $64 \times 64$  — не более 3% (а погрешности формы колебаний и частоты не превышали 1 %).

В рамках такой модели изучались режимы углового управления пластинчатым ТДЗ постоянной толщины с параметрами:  $E = 7 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>;  $\rho = 2700$  кг/м<sup>2</sup>;  $h_0/b = 0,1$ ;  $b/a = 0,5$  (некоторая удлиненность выбрана для обеспечения возможности переключать направления пучка на разную аппаратуру, расположенную вдоль тубуса телескопа).

Сначала был рассчитан следующий режим переключения угла наклона на величину  $A_\varphi$  за время  $T_\varphi$ :  $\varphi = 0,5A_\varphi [1 - \cos \pi t/T_\varphi]$  при  $0 \leq t \leq T_\varphi$  и  $\varphi = A_\varphi$  при  $t > T_\varphi$ , где  $T_\varphi = \tau_\varphi \cdot T_0$ ,  $T_0 = 2\pi/\Omega_0$ ,  $\Omega_0$  – оценка низшей резонансной частоты колебаний. При этом на зеркало действовала распределенная инерционная нагрузка:  $q = -\rho h x \ddot{\varphi}$ , а коэффициент демпфирования выбирался  $\mu = 5 \cdot 10^{-5}$ .

Для трех случаев:  $\tau_\varphi = 2; 1; 0,1$  на рисунке 3.7а показаны переходные процессы изгибных колебаний в дальней центральной точке на краю зеркала. Возникающие после прекращения действия нагрузки свободные колебания (специально выделены точками на рисунке) подвергались спектральному анализу в программе MATLAB. Получающиеся безразмерные амплитуды первой и второй форм колебаний в зависимости от параметра  $\tau_\varphi = T_\varphi / T_0$  показаны на рисунке 3.7б ( $\omega_1 = \Omega_1/\Omega_0 = 6,23 \cdot 10^{-01}$ ;  $\omega_2 = \Omega_2/\Omega_0 = 1,16 \cdot 10^{-01}$ ).

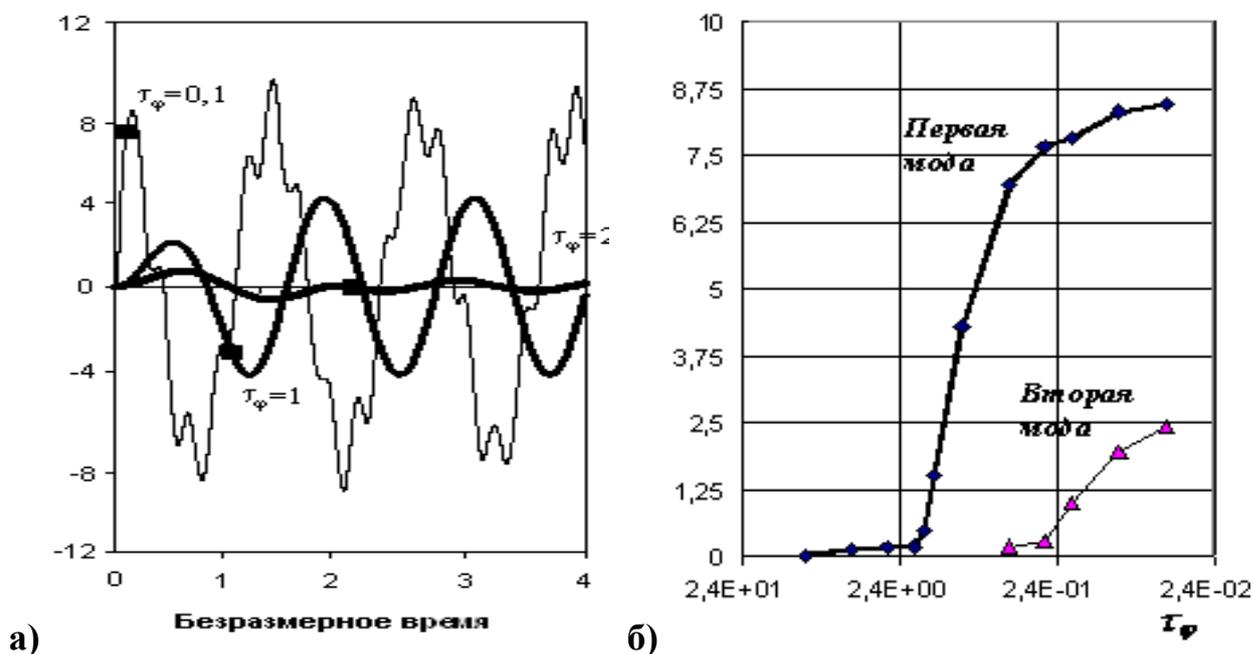


Рисунок 3.7 – Характеристики ТДЗ: а) переходные процессы изгибных колебаний; б) безразмерные амплитуды первой и второй форм колебаний.

Для пересчёта безразмерных величин в размерные необходимо использовать коэффициенты: для прогибов –  $k_W = 4,1570 \cdot 10^{-7}$  м; для времени –  $k_T = 4,0778 \cdot 10^{-3}$  сек; для частот –  $1/(\pi k_T) = 78,06$  Гц.

Были проанализированы возможности активного демпфирования таких остаточных колебаний с помощью контуров обратных связей при управлении моментом, приложенным к оси вращения зеркала. Для этого конечно-разностная модель зеркала записывалась в виде системы уравнений матричного вида:  $\dot{x} = Ax + Bu$ . Уравнение наблюдения  $y = Cx$  строилось для значения прогиба ( $y$ )

зеркала в наиболее удаленной от оси точке (находилось через двойное интегрирование сигнала акселерометра).

Используя стандартные процедуры Control System Toolbox (MATLAB), сначала был выполнен расчет зеркала с разомкнутой обратной связью. На рисунке 3.8а для значения прогиба ( $y$ ) зеркала в наиболее удаленной от оси точке показаны получающиеся ЛАЧХ и ФЧХ при наличии конструкционного демпфирования с  $\delta = 5 \cdot 10^{-6}$ , а на рисунке 3.8б – реакция на единичную ступеньку. При этом нормирующий коэффициент для прогибов был выбран:  $k_w = 8,4240 \cdot 10^{-8}$  м.

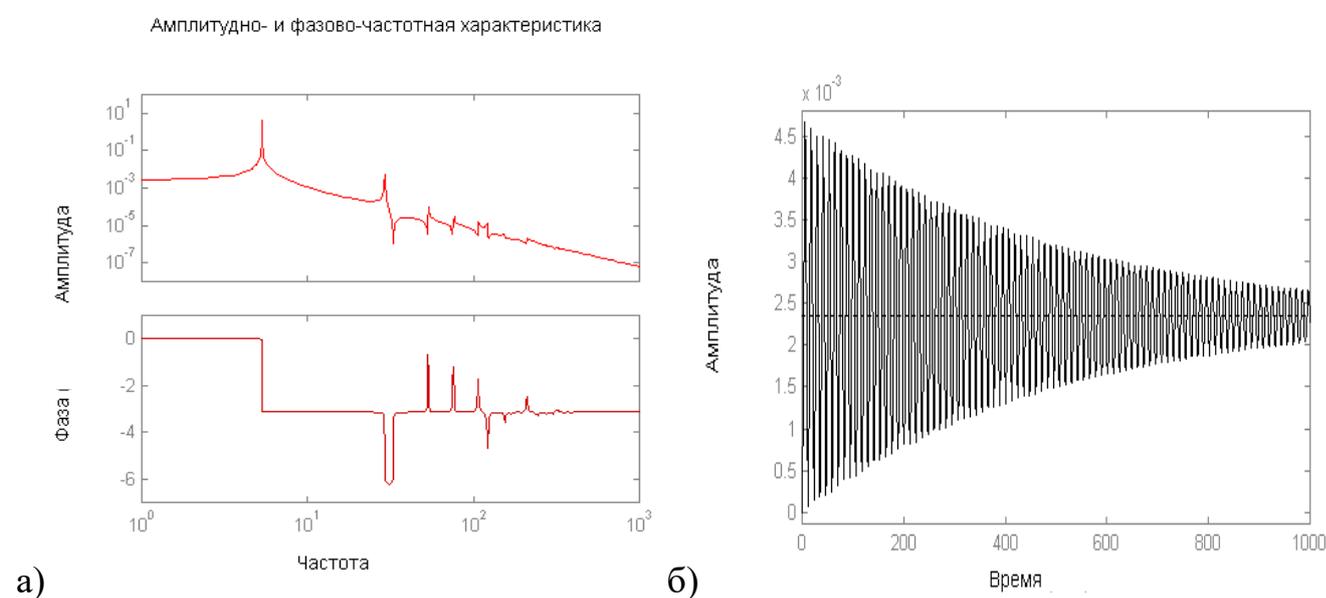


Рисунок 3.8 – Сигнал прогиба зеркала для ТДЗ без обратной связи:

а) ЛАЧХ и ФЧХ ; б) реакция на единичную ступеньку

Контур управления рассчитывался через решение задачи синтеза оптимального регулятора по сигналу прогиба в удаленной точке:

$$J(u) = \int_0^{\infty} (y^T Q y + y^T N u + u^T R u) dt, \quad u = -K \xi, \quad \frac{d\xi}{dt} = A \xi + B u + L(y - C \xi),$$

где  $\xi$  — оценка вектора состояния  $x$ ; весовые коэффициенты выбирались:  $Q = 1$ ,  $N = 0$ ,  $R = 20^{-5}$ ; вектор  $L$  формировался за счёт сдвига собственных значений матрицы  $A - LC$  на выбранную величину  $\Delta$  относительно полюсов исходного переда-

точного звена  $\dot{x} = Ax + Bu$ ,  $y = Cx$  (для повышения запаса устойчивости системы управления задавалась величина  $\Delta = -1$  в отрицательной полуплоскости).

Результаты активного демпфирования низшей резонансной частоты показаны на рисунке 3.9. Приведенные результаты моделирования конечно-разностной схемы были получены совместно с С.А. Бендером (в ходе научного руководства его диссертационной работы [21]). Такой регулятор позволил уменьшить время установления на два порядка по сравнению с естественным затуханием микроколебаний при слабом конструкционном демпфировании с  $\delta = 5 \cdot 10^{-6}$ .

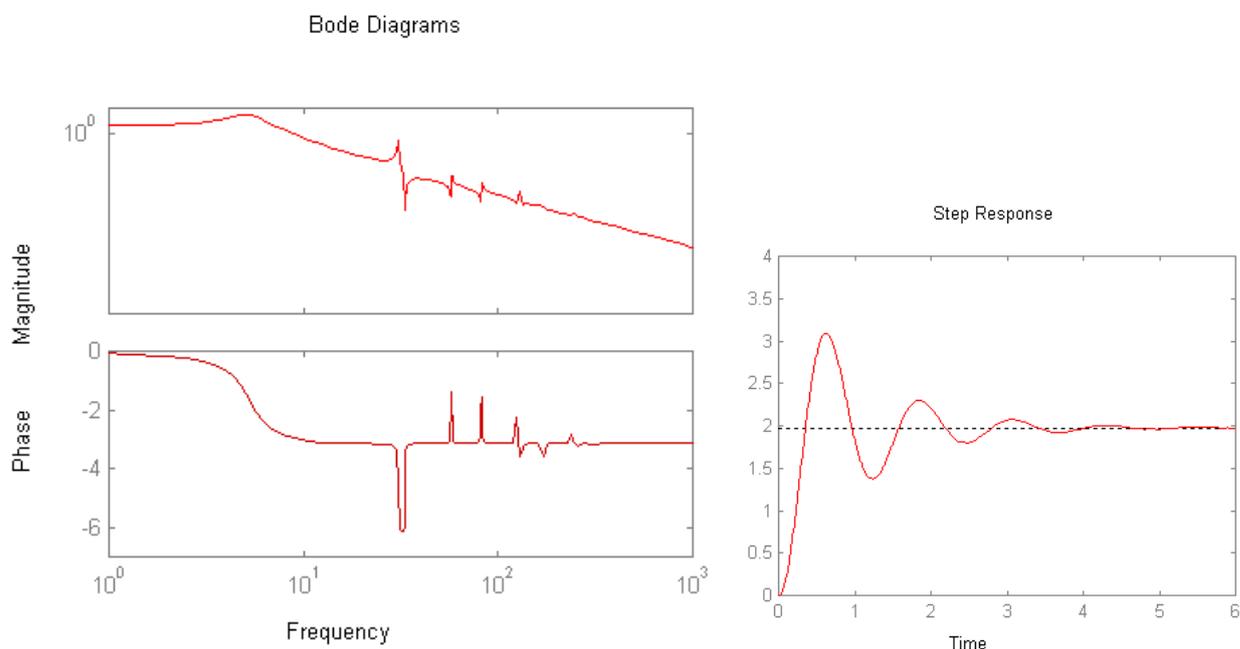


Рисунок 3.9 – Сигнал прогиба зеркала для ТДЗ с активным демпфированием:

а) ЛАЧХ и ФЧХ ; б) реакция на единичную ступеньку

### 3.5. Описание моделей плавно стабилизируемого космического аппарата как платформы следящего орбитального телескопа

Для синтеза комплекса многосистемного наведения больших орбитальных телескопов требуются модели остаточных угловых колебаний стабилизируемого в пространстве КА в низкочастотной области (с тем, чтобы не создавать существенные эксплуатационные деформации оптико-механической конструкции большого телескопа). Из-за этих требований к максимальной низкочастотности, огра-

начимся их упрощенным представлением в рамках линейных моделей и передаточных функций. Полноценное моделирование угловой стабилизации КА на начальных этапах проектирования комплекса наведения большого орбитального телескопа обычно не выполняют, так как оно требует детальной проработки конструкции КА и учета множества факторов. Рассматриваемым вопросам посвящены многочисленные книги [15, 16, 55, 68, 69, 70, 93, 98, 155, 174, 327, и др.] и статьи [13, 38, 48, 86, 100, 110, 113, 124, 163, 290, и др.]. Последующий материал излагается в соответствии со статьями автора [236 - 238, 265].

Введем две системы координат:  $S_{хуz}$  - жестко связанную с КА и имеющую начало отсчета в его центре масс  $C$  и  $S_{\xi\eta\zeta}$  - орбитальную систему координат. Абсолютное угловое движение точки  $C$  в плоскости орбиты относительно Земли описывается полярными координатами: расстоянием от центра Земли  $R_c$  и угловой координатой  $\Theta$ . Для случая круговых орбит ( $R_c = \text{const}$ ) абсолютная угловая скорость:  $\dot{\Theta} \approx \Omega_3 \equiv \sqrt{\mu/R_c^3}$ ,  $\mu = 398600 \text{ км}^3/\text{с}^2$ .

Движение связанной системы координат относительно орбитальной опишем с помощью самолетных углов Эйлера [122]:  $\varphi$  - угол крена,  $\psi$  - угол рыскания,  $\theta$  - угол тангажа (они характеризуют повороты соответственно вокруг осей  $x, y, z$ ). Направления осей  $x, y, z$  при  $\varphi = \psi = \theta = 0$  выберем:  $x$  - в направлении полета;  $y$  - по радиус-вектору  $\vec{R}_c$ . При этом преобразование орбитальной системы координат в связанную будет характеризоваться направляющими косинусами:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos\psi \cos\theta, & a_{12} &= \sin\theta, & a_{13} &= -\sin\psi \cos\theta, \\ a_{21} &= \sin\varphi \sin\psi - \cos\varphi \cos\psi \sin\theta, & a_{22} &= \cos\theta \cos\varphi, \\ a_{23} &= \sin\varphi \cos\psi + \cos\varphi \sin\psi \sin\theta, & a_{31} &= \cos\varphi \sin\psi + \sin\varphi \cos\psi \sin\theta, \\ a_{32} &= -\cos\theta \sin\varphi, & a_{33} &= \cos\varphi \cos\psi - \sin\varphi \sin\psi \sin\theta. \end{aligned}$$

Угловое движение КА относительно центр масс  $C$  в связанной системе координат  $x, y, z$  описывается уравнениями [174]:

$$\begin{aligned} I_x \dot{\omega}_x + (I_z - I_y) \omega_y \omega_z &= M_x, & I_y \dot{\omega}_y + (I_x - I_z) \omega_x \omega_z &= M_y, \\ I_z \dot{\omega}_z + (I_y - I_x) \omega_x \omega_y &= M_z, \end{aligned} \tag{3.9}$$

где  $I_x, I_y, I_z$  - моменты инерции КА (считаем, что оси  $x, y, z$  совпадают с главными осями тензора инерции);  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  - проекции угловой скорости;  $M_x, M_y, M_z$  - проекции моментов силовых воздействий.

Они замыкаются кинематическими соотношениями, записанными для относительной угловой скорости  $\omega^r$  (начальные условия для проекций абсолютной угловой скорости задаются с помощью обратных выражений):

$$\begin{aligned} \dot{\psi} &= (\omega_y^r \cos \varphi - \omega_z^r \sin \varphi) / \cos \theta, \quad \dot{\varphi} = \omega_x^r - \dot{\psi} \sin \theta, \quad \dot{\theta} = \omega_y^r \sin \varphi + \omega_z^r \cos \varphi, \\ \vec{\omega}^r &= \vec{\omega} - \vec{\omega}^e, \quad \omega_x^e \approx -\Omega_3 a_{13}, \quad \omega_y^e \approx -\Omega_3 a_{23}, \quad \omega_z^e \approx -\Omega_3 a_{33}. \end{aligned}$$

Учтем на околоземных круговых орбитах гравитационный момент:

$$M_g^x = 3\dot{\alpha}_0^2 (I_z - I_y) a_{22} a_{32}, \quad M_g^y = 3\dot{\alpha}_0^2 (I_x - I_z) a_{12} a_{32}, \quad M_g^z = 3\dot{\alpha}_0^2 (I_y - I_x) a_{12} a_{22}.$$

Если другими моментами можно пренебречь, из (3.9) будем иметь частоты угловых колебаний КА в режиме его пассивной стабилизации:

$$\Omega_x^2 = 4\Omega_3^2 (I_z - I_y) / I_x, \quad \Omega_y^2 = \Omega_3^2 (I_z - I_x) / I_y, \quad \Omega_z^2 = 3\Omega_3^2 (I_x - I_y) / I_z. \quad (3.10)$$

При этом для каждого из углов, обобщенно обозначаемых  $\alpha = (\varphi, \psi, \theta)$ , можно использовать следующие передаточные функции:

$$\alpha = W_{KA}(p) \cdot u_\alpha, \quad W_{KA}(p) \approx \frac{1}{p^2 + \Omega^2}, \quad p = \frac{d}{dt}, \quad u_\alpha \equiv \frac{M_\alpha}{J_\alpha}, \quad (3.11)$$

где  $M_\alpha$  - момент управления;  $J_\alpha$  - момент инерции КА;  $\Omega$  - частота гравитационной стабилизации КА.

В случае присутствия системы пассивного демпфирования угловых колебаний КА (обычно магнитными демпферами) в (3.9) следует ввести диссипативные моменты, в упрощенном варианте описываемые формулой:

$$\vec{M}_d = -d_x I_x \omega_x \vec{x}^0 - d_y I_y \omega_y \vec{y}^0 - d_z I_z \omega_z \vec{z}^0 \quad (3.12)$$

с заданием коэффициентов  $d_x, d_y, d_z$  на основе эмпирического опыта.

Тогда функция (3.11) примет следующий вид ( $\delta$  - декремент затухания):

$$W_{KA}(p) \approx \frac{1}{p^2 + \mu_\kappa p + \Omega^2}, \quad \mu_\kappa = \frac{\Omega \cdot \delta}{\pi}. \quad (3.13)$$

Управляющие моменты сверхточной угловой стабилизации КА часто создаются реактивными маховиками:

$$\vec{M}_M = \frac{d}{dt} \vec{K}_M = \dot{K}_M \vec{x}^0 + K_M (\omega_Z^{KA} \vec{y}^0 - \omega_Y^{KA} \vec{z}^0)$$

где  $K_M$  – кинетический момент вдоль оси  $x$ ,  $\vec{\omega}^{KA}$  – угловая скорость КА, индекс «0» отмечает единичные вектора.

Если используется твердотельный маховик с моментом инерции  $I_U$  и угловой скоростью  $\omega$ , его кинетический момент:  $K_M = I_U \omega$ . Для обеспечения повышенной мягкости воздействия такого маховика, он может быть выполнен в виде реактивного жидкостного маховика (РЖМ). Кинетический момент полностью заполненного осесимметричного РЖМ будет складываться из кинетических моментов твердотельного корпуса ("Т") и жидкостного наполнения ("Ж") [115, 207]:

$$\vec{K}_M = \vec{K}_T + \vec{K}_{жс}, \quad K_T = I_T \omega_T, \quad K_{жс} = I_{жс} (\omega_T + \omega_{жс}), \quad (3.14)$$

$$I_{жс} \omega_{жс} \equiv \rho_{жс} \int_{\bar{0}} v_{\psi} R d^3 \vec{R}, \quad \frac{\partial}{\partial t} v_{\psi} = v \left[ \frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} - \frac{1}{R^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] v_{\psi} - R \dot{\omega}_T, \quad v_{\psi} \Big|_{\Gamma} = 0.$$

Здесь:  $I_T$  – момент инерции твердотельного корпуса,  $\omega_T = \omega_{КА} + \omega_u$  – абсолютная угловая скорость вращения корпуса,  $\omega_{КА}$  – проекция угловой скорости КА на ось вращения маховика,  $\omega_u$  – управляемая относительная угловая скорость вращения корпуса РЖМ относительно КА,  $I_{жс}$  – эффективный момент инерции "замороженной" жидкости,  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости,  $v$  – кинематическая вязкость,  $(R, \psi, x)$  – цилиндрические координаты,  $\Gamma$  – граница канала,  $v_{\psi}$  – скорость движения жидкости относительно корпуса,  $\omega_{ж}$  – усредненная относительная угловая скорость жидкости.

Для каналов цилиндрического сечения (рисунок 3.10 а) последнее уравнение запишем в следующих безразмерных координатах:

$$\frac{\partial}{\partial t} \Omega = \chi \left[ \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} - \frac{\beta}{1 - \beta \eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \right] \Omega - \dot{\omega}_T, \quad \Omega(t=0) = 0, \quad (3.15)$$

$$\Omega(\eta=0) = \Omega(\eta=1) = \Omega(\xi = \xi_m) = \frac{\partial \Omega}{\partial \xi}(\xi=0) = 0, \quad ,$$

где:  $\xi = x/h_0$ ,  $\eta = (R_2 - R)/h_0 \in [0,1]$ ,  $\beta \equiv h_0/R_2 < 1$ ,  $\chi \equiv \nu/h_0^2$ ,  $h_0 \equiv R_2 - R_1$ ,  
 $\Omega \equiv \omega_\psi/R$  – угловая скорость вращения жидкости относительно оси корпуса;  $\eta$   
отсчитывается от верхней грани канала по направлению к оси вращения,  $\xi$  – отно-  
сительно плоскости симметрии канала ( $|\xi| < \xi_m \equiv b/2h_0$ ).

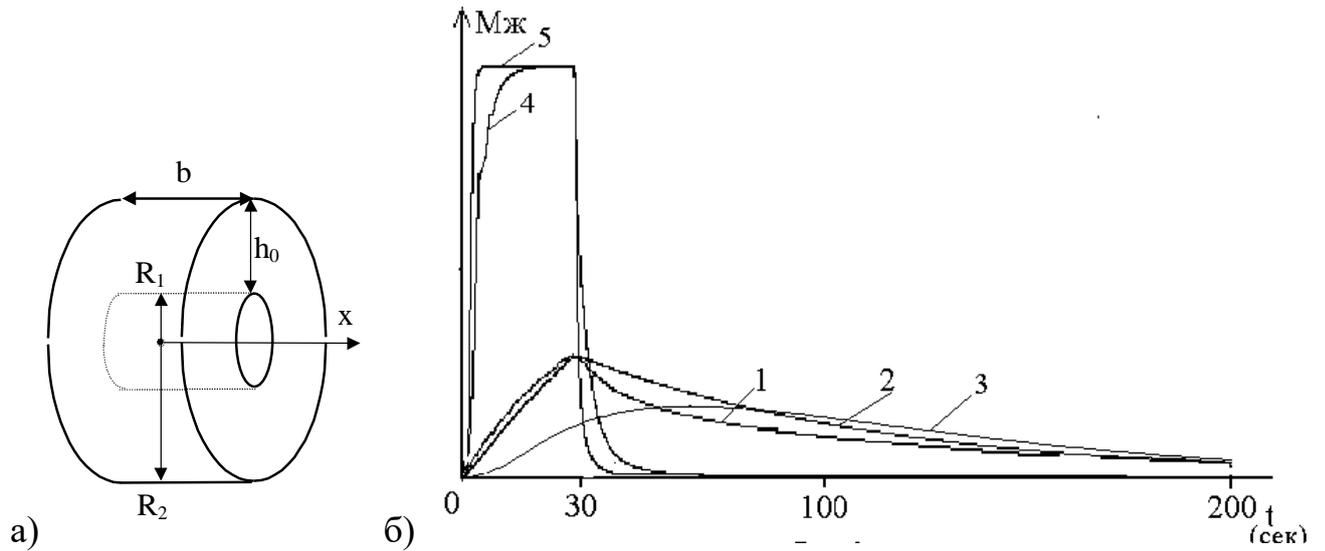


Рис. 3.10. Маховик РЖМ (а) и временное распределение вращательных моментов его жидкостного наполнения (б) при  $\beta = 0.2$ ,  $\chi_0 = 0.001 c^{-1}$ ,  $\xi_m = 3.5$ ,  $\dot{\omega}_u = const$  ( $t \leq 30c$ ),  $\dot{\omega}_u = 0$  ( $t > 30c$ ): 1 - 3 – для ламинарного режима течения с  $\dot{\omega}_{uT} = 0.01 c^{-1}$  (1 – расчет по (3.14); 2 – расчет по (3.16); 3 – расчет по (3.18) при учете скользящей пары с коэффициентом трения  $K_{TP} = 0.01 c^{-1}$ ); 4 – 5 – для турбулентного режима течения с  $\dot{\omega}_{uT} = 1 c^{-1}$  (4 – расчет по (3.14), 5 – расчет по (3.16); масштаб кривых уменьшен в  $\dot{\omega}_{uT} / \dot{\omega}_{uL} = 100$  раз).

Средняя угловая скорость жидкости при этом вычислится по формуле:

$$\omega_{жс} = \frac{4\beta}{[1 - (1 - \beta)^4] \xi_m} \cdot \int_0^{\xi_m} \int_0^1 \Omega (1 - \beta\eta)^3 d\eta d\xi.$$

Для решения (3.15) будем использовать конечно-разностный метод на пяти-  
точечном плоскостном шаблоне с узлами  $S \equiv \{i, j-1\}$ ,  $N \equiv \{i, j+1\}$ ,  
 $P \equiv \{i, j\}$ ,  $E \equiv \{i-1, j\}$ ,  $W \equiv \{i+1, j\}$  и шагами дискретизации  $\Delta_\xi, \Delta_\eta$ :

$$\dot{\Omega}_p = \frac{\chi_p}{\Delta_\xi^2} [\Omega_E + \Omega_W + A_{SP} \Omega_S + A_{NP} \Omega_N - A_{PP} \Omega_P] - \dot{\omega}_T.$$

где  $A_{SP, NP} = (\Delta_\xi / \Delta_\eta)^2 [1 \pm \beta \Delta_\eta / 2(1 - \beta \eta_P)]$ ,  $A_{PP} = 2[1 + (\Delta_\xi / \Delta_\eta)^2]$ ,

выбор шага  $\Delta_\eta$  должен гарантировать выполнение условия  $A_{NP} > 0$ .

Приведенная схема расчета соответствует предпочтительным для мягкого управления ламинарным режимам течения жидкости в РЖМ, которые имеют место при относительно невысоких скоростях вращения маховиков (числа Рейнольдса не превышают  $Re_\eta \approx 2 \cdot 10^3$ ). В форсированных режимах управления РЖМ, в нем могут создаваться высокие относительные скорости течения жидкости с числами Рейнольдса, большими  $Re_T \approx 1.3 \cdot 10^4$ , приводящие к турбулизации потока жидкости с соответствующим увеличением эффективной вязкости.

Учет турбулизации потока выполним в соответствии с гипотезой «длины пути смешения» Прандтля [115, 207]:

$$v = v_0 + v_T, v_T = 0.16 fl^2 \left| \frac{\partial v_\psi}{\partial r} \right|, f(Re) = \begin{cases} 0 & , Re \leq Re_c \\ (Re - Re_c) / (Re_T - Re_c), & Re_c < Re < Re_T \\ 1 & , Re \geq Re_T \end{cases}$$

$$\chi = \chi_0(1 + \delta_T), \delta_T \approx \frac{0.16}{\chi_0} fl_\eta^2 \left| \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ \left( \frac{1}{\beta} - \eta \right) \Omega \right] \right|, Re \equiv |\omega_{ж}| / \beta \chi_0,$$

где  $l$  - расстояние до ближайшей стенки канала (по координатам  $R$  или  $x$ ),  $l_\eta$  - расстояние до ближайшей стенки канала по  $\eta$ .

При рассмотрении РЖМ в составе контуров угловой стабилизации КА желательно заменить распределенную модель (3.15) на более простую. Для кольцевых каналов с  $\beta \ll 1$  решение (3.15) можно аппроксимировать произведением двух парабол по координатам  $\xi$  и  $\eta$ . Тогда получим:

$$M_{ж} = \dot{K}_{ж} = -I_{ж} k \omega_{ж}, \quad \dot{\omega}_{ж} + k \omega_{ж} = -\dot{\omega}_T, \quad \omega_T = \omega_{КА} + \omega_u, \quad (3.16)$$

$$k = 12 \chi_0 [1 + 1/4 \xi_m^2] \cdot [1 + 0.0266 Re \cdot f]$$

Погрешности такого приближения обычно несущественны. Например, на рисунке 3.10б кривые 1, 4 построены по распределенной модели (3.14), а кривые 2, 5 – по упрощенной модели (3.16). Из рисунка также видно, что турбулизация потока при высоких скоростях вращения РЖМ приближает его свойства к твердотельному маховику. Для обеспечения же ламинарности течения жидкости необходимо выполнить условие:  $|\omega_u|/\beta\chi_0 < 2 \cdot 10^3$ .

С учетом (3.16) будем иметь следующую модель КА, как объекта угловой стабилизации, в передаточных функциях:

$$\alpha = W_{KA}(p) \cdot u_\alpha, \quad W_{KA} \approx \frac{1}{p^2 + \mu_k p + \Omega^2}, \quad u_\alpha \equiv \frac{M_\alpha}{J_\alpha} = \frac{pK_\alpha}{J_\alpha}, \quad (3.17)$$

$$K_\alpha = I_T \omega_T + I_{жс}(\omega_T + \omega_{жс}) = [I_T + I_{жс}k/(k+p)]\omega_T, \quad \omega_T = \omega_{КА} + \omega_u.$$

Еще большей мягкости воздействия управляемого маховика на КА можно добиться, если соединить вал двигателя с РЖМ через скользящую пару с эффективным коэффициентом трения передачи  $K_{TP}$  (при этом могут быть использованы более маломощные электродвигатели):

$$\dot{\omega}_{жс} + k\omega_{жс} = -\dot{\omega}_T = -\dot{\omega}_{КА} - \dot{\omega}, \quad \dot{\omega} = -K_{TP}[\omega - \omega_u(t)]. \quad (3.18)$$

Получающееся более плавное распределение во времени момента  $M_{жс}$  (при  $\dot{\omega}_{КА} = 0$ ) показывает кривая 3 на рисунке 3.10 б. При этом в передаточной функции (3.17) объекта управления следует заменить:

$$K_\alpha = I_T \omega_T + I_{жс}(\omega_T + \omega_{жс}), \quad \omega_T = \omega_{КА} + \omega,$$

$$\omega_{жс} = -p(\omega_{КА} + \omega)/(k+p), \quad \omega = K_{TP}\omega_u/(K_{TP} + p).$$

Для экспериментальной оценки свойств РЖМ был изготовлен его малогабаритный макет из силфона, что делало его не критичным к изменению объема жидкости. Маховик приводился в движение с помощью шагового двигателя ДШР 50-0.015-1.8 с максимальной потребляемой мощностью 7 Вт. Корпус маховика имел ширину 70 мм, средний диаметр (силфона) 90 мм, массу  $\sim 0.2$  кг. Использовалось водяное наполнение при комнатной температуре (аналогичными вязкостью и плотностью обладает большое количество одновременно нетоксичных, не-

электризующихся жидкостей, имеющих небольшие коэффициенты температурного расширения и замерзания). Масса жидкостного наполнения составляла  $\approx 0.5$  кг. При этом эффективный момент инерции макета изменялся от  $3 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup> (момент инерции твердотельного корпуса) до  $7.5 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup> (момент инерции корпуса с жидкостью). РЖМ устанавливался на подвешенную на нити длиной 3 м легкую стержневую конструкцию с моментом инерции 5 кг·м<sup>2</sup> (типа крутильного маятника). Разгон маховика проводился плавным увеличением частоты питания до максимальной приемистости в 1100 шаг/сек. Поворот маятника за первые две минуты составил 30 угл. град. и в дальнейшем скорость вращения маятника изменялась слабо. При этом переданный на стержневую конструкцию кинетический момент достиг величины:  $5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot 30 \text{ угл.град} / 2 \text{ мин} \cdot 60 \text{ сек/мин} = 1.25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{угл.град} / \text{сек}$ . То есть, за это время произошло почти полное насыщение кинетического момента РЖМ, так как его предельное значение равно:  $1100 \text{ шаг/сек} \cdot 1.8 \text{ угл.град} \cdot 7.5 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \approx 1.5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{угл.град} / \text{сек}$ .

Также в макет РЖМ были дополнительно введены скользящая пара с трением и ускоряющий редуктор с числом редукции 6.6. В этом случае для максимальной приемистости в 1200 шаг/сек поворот маятника за 1 мин достигал 45 угл.град, что соответствует трехкратному увеличению ранее приведенного эффективного кинетического момента. Более детально описание и исследование свойств РЖМ изложено в работе автора [265].

### 3.6 Выводы по главе 3

1. Для расширенной полосы частот в качестве наиболее универсального метода построения моделей для сопровождения разработок и производства управляемых элементов в модульных системах слежения многосистемного комплекса наведения деформируемых больших оптических телескопов предложено использовать их представление в виде системы передаточных функций для управляющих и возмущающих воздействий, а также для сигналов измерений. Разработана

методика их идентификации с использованием сертифицированных компьютерных программ конечно-элементного моделирования и Matlab.

2. Так как система общего слежения всем большим телескопом путем его углового поворота в ОПУ является крайне низкочастотной, поэтому для ее рабочих полос частот в задачах синтеза многосистемного наведения телескопа модель следящего телескопа в альт-азимутальной монтировке получена в рамках твердотельного формализма. Используемые алгоритмы управления, нейтрализующие нелинейные взаимодействия каналов управления ОПУ по углам азимута и высоты, позволили заменить нелинейную модель на линейную для последующего формирования необходимых передаточных функций в задачах синтеза комплекса многосистемного наведения большого телескопа.

3. Разработанные модели управляемого по наклонам вторичного зеркала большого телескопа и приведенные методики их получения позволяют решать следующие важные задачи сопровождения его проектирования и производства. Аналитически полученная среднечастотная модель ВЗ предназначена для формирования передаточной функции объекта управления, используемой при синтезе многосистемного комплекса наведения телескопа. Кроме этого, она позволяет выявлять механизмы тонкого нелинейного воздействия каналов управления ВЗ на механическую конструкцию его модуля.

Численно получаемые с помощью программ конечно-элементного анализа модели управляемого ВЗ позволяют учесть все конструктивные детали создаваемого модуля ВЗ. Однако они линейные и поэтому не выявляют тонкие нелинейные взаимодействия переменных. При синтезе комплекса многосистемного наведения они будут востребованы на последних этапах его доработки и настройки в расширенной полосе частот.

4. Для разработок эффективно управляемого по наклонам диагонального третичного зеркала телескопа с активным демпфированием низших резонансных мод колебаний требуются модели, сочетающие в себе распределенную упругость зеркала и сосредоточенные управляющие воздействия с контурами обратных связей. Предложенный подход к их построению в рамках конечно-разностного фор-

мализма подтвердил свою корректность и эффективность. Так, при расширении полосы управления в область двух первых низших резонансных частот упругих колебаний выявлено сильное проявление паразитных слабозатухающих микроколебаний поверхности зеркала. После включения контура активного демпфирования с обратной связью, полученного в рамках решения задачи синтеза оптимальных регуляторов, время их успокоения было уменьшено на два порядка.

5. Исходя из требований к предельной низкочастотности стабилизируемого в пространстве космического аппарата вместе с облегченным деформируемым большим оптическим телескопом, модели остаточных угловых колебаний КА выбраны в рамках традиционного твердотельного формализма. Для задач синтеза комплекса многосистемного наведения больших орбитальных телескопов выполнено их упрощение, линеаризация и представление в виде передаточных функций объектов управления.

Для формирования плавных управляющих моментов, не приводящих к чрезмерным по оптическим меркам эксплуатационным деформациям оптико-механической конструкции большого орбитального телескопа в процессе его наведения, предложено использовать в системе управления КА реактивные жидкостные маховики. Предложенные варианты их исполнения и сопровождающие их модели применительно к задачам реализации сверхплавного наведения КА с большим орбитальным телескопом показали возможности повышения плавности момента управления в 3 – 6 раз, а также ряд других потенциальных преимуществ по сравнению с твердотельными реактивными маховиками.

Полученные передаточные функции для контура общего наведения орбитальным телескопом с таким управления предназначены для проведения структурно-параметрического синтеза его комплекса многосистемного наведения.

## **ГЛАВА 4. МОДЕЛИ ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ РАЗРАБОТОК УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМАХ КОРРЕКЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА**

Глава посвящена моделям и методам математического моделирования функциональных задач и объектов управления, а также их алгоритмизации применительно к интеллектуальной поддержке разработок и производства управляемых элементов в модульных системах коррекции волнового фронта, интегрированных в распределенные комплексы наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных). В ней приведены модели: управляемых деформаций больших главных зеркал телескопов для разработки модулей активной оптики; небольших гибких зеркал модулей адаптивной оптики; перспективных систем управления с дополнительной оптической обратной связью.

### **4.1. Моделирование управляемых деформаций главных зеркал телескопов для разработки модуля активной оптики**

Из-за больших размеров облегченное упругое главное зеркало крупногабаритных оптических телескопов обычно является низкочастотным. Однако из-за дополнительной упругости, вносимой сеткой упругих приводов его коррекции, низшая резонансная частота ГЗ может существенно увеличиться.

Выбор модели большого ГЗ зависит от полосы частот приводов коррекции его формы, которые могут работать в квазистатическом или динамическом режимах [29]. В первом случае их полосы управления значительно ниже резонансных частот зеркала, а во втором – выше (например, в режиме коррекции формы ГЗ с одновременным активным демпфированием его микроколебаний). Нацеленность динамического режима на эффективный синтез контуров управления упругими зеркалами требует сведение моделей систем с распределенными параметрами к традиционному для MATLAB виду:  $dx/dt = Ax + Bu$ ,  $y = Cx + Du$ .

Возможны разные варианты перехода к таким моделям в зависимости от постановки решаемой задачи. Так, для контуров автономной работы отдельных или нескольких приводов предлагается использовать передаточные функции, методика нахождения которых с использованием САПР конечно-элементного анализа описана в третьей главе. В свою очередь, для синтеза системы активного демпфирования относительно небольшого числа форм резонансных колебаний зеркала всеми приводами управления лучше применять модальный подход, используя разложение функции упругой деформации по резонансным формам.

Для решения более общих задач оптимального синтеза распределенной системы управления поверхностью ГЗ большим числом приводов с учетом адаптивной настройки их состава и областей преимущественного воздействия (в соответствии с алгоритмами главы 9), более удобной представляется конечно-разностная динамическая модель кольцевых зеркал, легко перестраиваемая при изменении состава приводов управления.

Рассмотрим эти подходы более подробно. В производственной практике в качестве программного обеспечения для сопровождения разработок управляемых ГЗ наиболее широко используются САПР конечно-элементного анализа, которые позволяют учитывать мелкие детали зеркала и непрерывно совершенствовать его модель по мере проработки конструкции и особенностей закрепления. Особенно это относится к квазистатическим режимам работы систем коррекции формы ГЗ (характеризуются сверхнизкими частотами управления и отсутствием микроколебаний от действия внешних возмущений), когда достаточно использовать статические функции отклика зеркала на действие приводов.

В задачах синтеза и отработки контуров динамического управления в обратных связях для каждого привода по отдельности можно также использовать САПР конечно-элементного анализа. При этом потребуется дополнительно построить передаточные функции отклика зеркала в точке действия привода в соответствии с методикой параграфа 3.1. В качестве примера приведем такой расчет [246] для кольцевого пластинчатого зеркала, закрепленного в трех точках на периметре внутреннего радиуса (рисунок 4.1а). При этом были выбраны: отношение

внутреннего радиуса зеркала к внешнему – 0.39, толщины к внешнему радиусу – 0.1, модуль упругости материала  $E = 93,86$  ГПа, коэффициент Пуассона 0,236, плотность  $\rho = 2457$  кг/м<sup>3</sup>. Силовое воздействие  $F$  прикладывалось в точке  $D$ , расположенной на краю зеркала. В ней же измерялся динамический отклик зеркала.

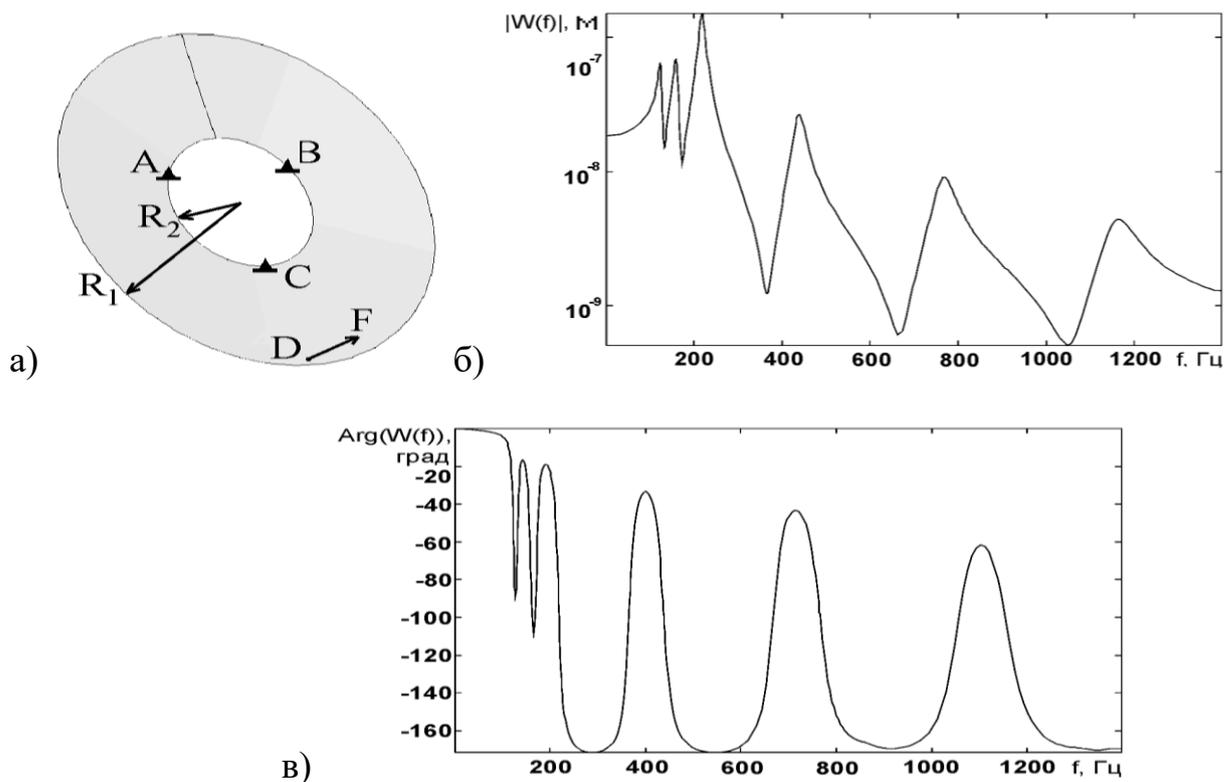


Рисунок 4.1 – Динамическое воздействие привода на кольцевое ГЗ: общая схема (а), АЧХ (б) и ФЧХ(в) отклика в точке воздействия

На основе АЧХ и ФЧХ отклика (рисунок 4.1 б,в) в диапазоне частот до 300 Гц была идентифицирована следующая аналитическая аппроксимация передаточной функции в нормированном виде:

$$\tilde{W}(s) = \frac{2.3 \cdot 10^{-4} s + 1}{s^2 + 55 s + 6 \cdot 10^5} + \frac{2.6 \cdot 10^{-4} s + 1.6}{s^2 + 59 s + 10^6} + \frac{4.2 \cdot 10^{-7} s + 7.3}{s^2 + 81 s + 2 \cdot 10^6}. \quad (4.1)$$

В ней, в частности, виден вклад первых трех резонансных частот (корни знаменателей), которые для данного зеркала оказались достаточно близки.

В задачах настройки активного управления формой поверхности ГЗ одновременно несколькими приводами потребуется уже матрица таких передаточных

функций, описывающая отклики поверхности зеркала от действия каждого привода в точках всех выбранных приводов управления.

При решении задач активного демпфирования резонансных микроколебаний поверхности упругого зеркала на его низших резонансных частотах с помощью всех приводов динамического управления предлагается применять демпфирование каждой моды по отдельности. Здесь в уравнении колебаний зеркала

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \left( \mu \frac{\partial}{\partial t} + 1 \right) L \right] W(t, \vec{r}) = q(t, \vec{r}), \quad (4.2)$$

формы поверхности  $W$  и нагрузки  $q$  раскладываются в ряд резонансных мод  $\{W_j\}$ :

$$W(t, \vec{r}) = \sum_{j=1}^{\infty} y_j(t) W_j(\vec{r}), \quad q(t, \vec{r}) = \sum_{j=1}^{\infty} U_j(t) W_j(\vec{r}). \quad (4.3)$$

Учитывая ортогональность мод ( $LW_j = \omega_j^2 W_j$ ,  $(W_k, W_j) = \|W_i\|^2 \delta_{kj}$ ), уравнение (4.2) сводится к более простым уравнениям для каждой моды:

$$\ddot{y}_j + \mu_j \dot{y}_j + \omega_j^2 y_j = U_j(t), \quad (4.4)$$

что позволяет легко выбрать свой регулятор в контуре обратной связи для  $U_j$ .

Далее переход к управляющим усилиям  $P_j$  сосредоточенных приводов с координатами  $\vec{r}_i$  выполняется через установление соответствия:

$$q(t, \vec{r}) \approx \sum_{j=1}^{\infty} U_j(t) W_j(\vec{r}) \approx \sum_{i=1}^n P_i(t) \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) \Rightarrow U_j(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) W_j(\vec{r}_i) / (W_j, W_j) \quad (4.5)$$

где  $\delta(\vec{r} - \vec{r}_i)$  – дельта-функция Дирака.

Для разрешения системы уравнений (4.5) относительно  $P_j$ , часто количество управляемых мод выбирают равным количеству  $n$  приводов управления [154].

Синтез такой системы активного демпфирования опирается на знание мод резонансных колебаний упругой конструкции, включающей упругие зеркало и приводы управления, а также упругую заделку (опору) зеркала. Их нахождение для конкретной конструкции с помощью модального анализа в программах конечно-элементного моделирования не представляет труда.

На практике описанные подходы к синтезу управления формой ГЗ, реализуемые с использованием САПР конечно-элементного анализа, приводят к нелинейному увеличению промежуточных вычислений по мере увеличения числа управляющих приводов (которое часто измеряется сотнями).

Так как синтез контуров управления приводами коррекции обычно мало чувствителен к детальной проработке конструкции ГЗ, поэтому в задаче синтеза параллельного динамического управления большим числом приводов с учетом их взаимовлияния можно также использовать более грубые модели управляемых ГЗ, получаемые в рамках других формализмов, включая конечно-разностный подход.

Преимуществом последнего является формирование стандартного матричного описания ГЗ как объекта управления в форме, полностью согласованной со стандартными процедурами синтеза контуров обратной связи в пакете программ MATLAB. При этом получаемые регуляторы приводов будут непосредственно учитывать все их тонкие динамические взаимовлияния друг на друга.

Такой подход оказывается удобным при решении задач синтеза распределенного управления с одновременной оптимизацией упругих параметров приводов. В частности, он не потребует отдельного пересчета упругой модели зеркала с упругими приводами при удалении некоторых из них. В итоге этот подход позволяет относительно просто решать еще более сложную задачу синтеза оптимального управления упругим зеркалом с помощью адаптивно настраиваемого, переменного состава активно работающих приводов.

Построение конечно-разностной модели ГЗ с приводами управления в общем случае проводится в два этапа. Сначала строится конечно-разностная модель пластинчатого зеркала без приводов. Далее к ней добавляются динамические модели приводов в виде дополнительных сосредоточенным масс, пружин и вязких звеньев (или звеньев сухого трения). Ниже рассмотрим только первый этап. Добавить к нему при необходимости второй этап не составляет труда, но потребует расширения списка учитываемых конструктивных параметров.

Конечно-разностная модель активного кольцевого ГЗ строится с помощью уравнений теории пластин в полярных координатах  $r, \varphi$  [49, 200]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial r}(Q_r r) + \frac{\partial}{\partial \varphi} Q_\varphi + q_\Sigma r = 0, \\ \frac{\partial}{\partial r}(M_r r) + \frac{\partial}{\partial \varphi} M_{r\varphi} - M_\varphi = Q_r r, \\ \left(r \frac{\partial}{\partial r} + 2\right) M_{r\varphi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} M_\varphi = Q_\varphi r, \end{cases} \quad \begin{cases} M_r = -G \left[ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \nu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right) \right] W, \\ M_r = -G \left[ \nu \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right] W, \\ M_r = -(1-\nu) G \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right) W, \end{cases}$$

или: 
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) + \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} M_\varphi + 2 \frac{\partial}{\partial \varphi} M_{r\varphi} \right) = -q_\Sigma,$$

где  $Q$  – перерезывающие силы,  $M$  – внутренние моменты,  $G = Eh^3/12(1-\nu^2)$ ,  $h$  – толщина,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $q_\Sigma$  – суммарная нагрузка,  $W$  — функция прогиба; граничные условия для свободных краев:

$$M_r = 0, \quad V_r \equiv Q_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r M_r) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} M_{r\varphi} - \frac{1}{r} M_\varphi = 0 \quad (\text{при } r = r_2, r_1).$$

Реализованная конечно-разностная аппроксимация этих уравнений на сеточном шаблоне рисунка 4.2 приведена в работе [235]. Чтобы получить динамическую модель ГЗ, дополнительно выделим инерционную нагрузку и используем модель Фохта рассеяния энергии в материале:

$$\rho h \frac{d^2 W}{dt^2} + \left( 1 + \mu \frac{d}{dt} \right) \frac{1}{r_p^2 \Delta_\varphi^2 \Delta_r^2} \sum A(G) W = q, \quad (4.6)$$

где  $\rho$  — плотность,  $\mu = \delta/\pi\Omega$ ,  $\delta$  — логарифмический декремент демпфирования,  $q$  — нагрузка от приводов,  $\Omega$  — частота собственных колебаний;  $A$  — коэффициенты сеточного оператора.

Для выделения определяющих совокупностей параметров модели удобно перейти к безразмерной форме записи, вводя величины:

$$R = \frac{r}{r_2}, H = \frac{h}{h_0}, \tau = \frac{t}{T_0}, \tilde{\mu} = \frac{\mu}{T_0}, Q = \frac{q}{q_m}, \tilde{W} = \rho h_0 \Omega_0^2 \frac{W}{q_m}, \quad (4.7)$$

где  $q_m \equiv \max|q|$ ,  $T_0 \equiv 2\pi/\Omega_0$ ,  $\Omega_0^2 \equiv G_0/\rho h_0 r_2^4$ ,  $\tilde{\mu} \sim \delta/2\pi^2$ ,  $G_0 \equiv G(h_0)$ ,

$h_0$  — характерная толщина (например, средняя или максимальная).

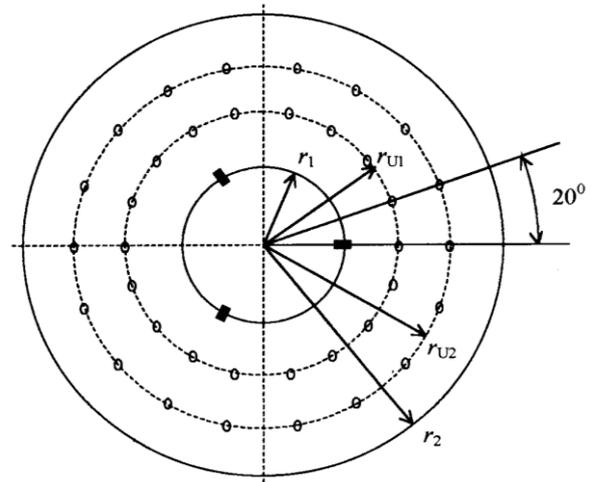
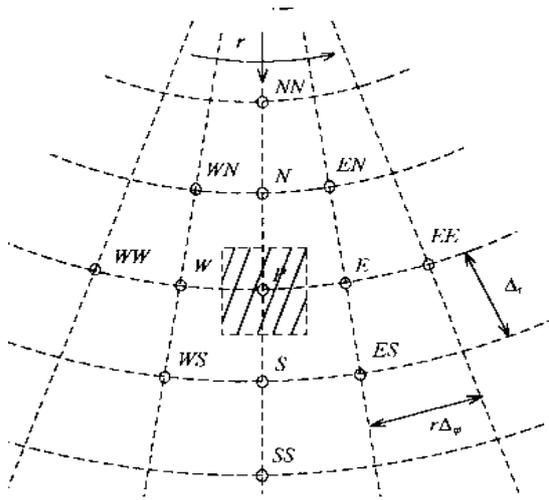


Рисунок 4.2 – Конечно-разностный шаблон      Рисунок 4.3 – Места приводов

В итоге на области  $R \in [r_1/r_2, 1], \varphi \in [0, 2\pi]$  будем иметь модель:

$$\left( \frac{R_p \Delta_\varphi^0 \Delta_R^0}{2\pi} \right)^2 H \frac{d^2 \tilde{W}}{d\tau^2} + \left( 1 + \tilde{\mu} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \sum A(H^3) \tilde{W} = Q_p (R_p \Delta_\varphi^0 \Delta_R^0)^2, \quad (4.8)$$

Для оценки ее точности выбирались  $r_1 = 0,1r_2$  и 10 участках сеточного разбиения вдоль радиуса. При этом получалась погрешность отклонения численно рассчитанной низшей частоты колебаний от теоретической - не более 2%, а погрешность среднеквадратичного отклонения формы зеркала от точной (при действии внешних нагрузок в виде круговых полиномов до третьего порядка) не превышала  $10^{-3} \%$  [235, 239, 246].

Далее (4.8) переводится в стандартный матричный вид:

$$dx/dt = A_{SYS}x + B_{SYS}u, \quad y = C_{SYS}x + D_{SYS}u, \quad (4.9)$$

где  $x$  – вектор, составленный из  $W$  и  $dW/dt$ ,  $u$  – вектор управления,  $y$  – вектор наблюдения, матрица  $A_{SYS}$  имеет вид:

$$A_{SYS} = \begin{bmatrix} -\left(2\pi/R_p \Delta_\varphi^0 \Delta_R^0\right)^2 \tilde{\mu}A/H & -\left(2\pi/R_p \Delta_\varphi^0 \Delta_R^0\right)^2 A/H \\ E & 0 \end{bmatrix}.$$

В качестве примера было рассмотрено кольцевое зеркало, опирающееся на три внутренние точки и имеющее отношение внутреннего диаметра к внешнему, равное 0.4 (рисунок 4.3). Управление формой поверхности может осуществляться

приводами, расположенными на радиусах  $r_{U1} = r_1 + 0,3 \cdot (r_2 - r_1)$  и  $r_{U2} = r_1 + 0,94 \cdot (r_2 - r_1)$  (на рисунке 4.3 показаны их точки приложения).

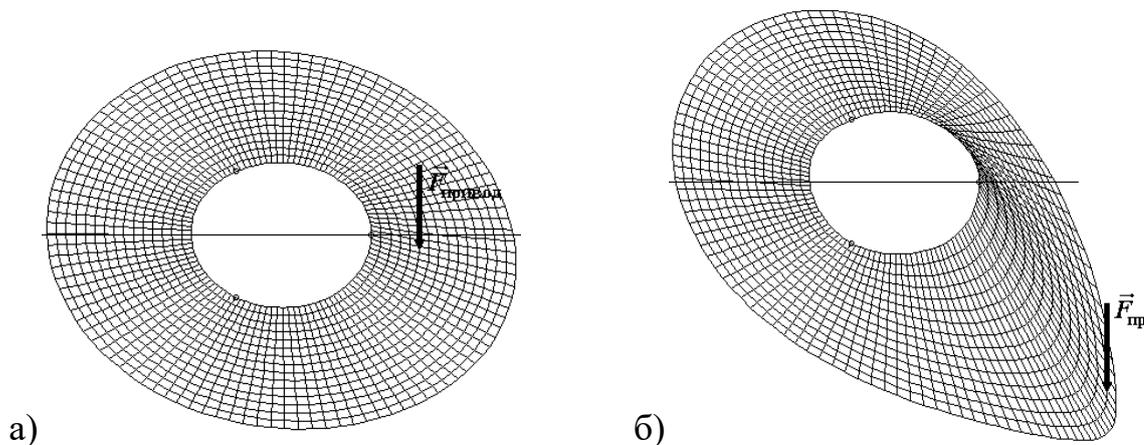


Рисунок 4.4 – Функции отклика главного зеркала на действие единичных приводов управления, расположенных: а) на радиусе  $r_{U1}$ , б) на радиусе  $r_{U2}$

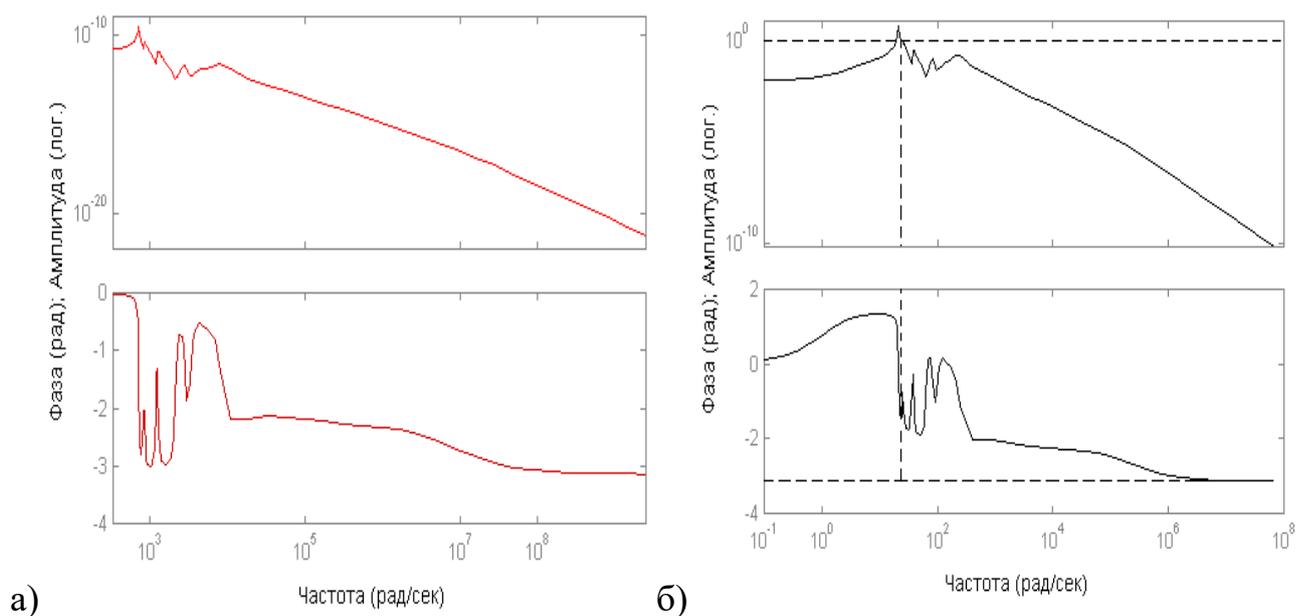


Рисунок 4.5 – ЛАЧХ и ФЧХ для привода управления внутреннего кольца (а) и для контура с пропорционально-дифференциальным регулятором (б)

В задаче квазистатического управления были рассчитаны статические функции отклика зеркала на действие приводов, расположенных на радиусах  $r_{U1}$  и  $r_{U2}$  (рисунок 4.4). Они получались через решение задачи (4.9) с большим демпфи-

рованием. На рисунке 4.4а максимальный прогиб составил:  $W_{\max}[\text{м}] = 1.86 \cdot 10^{-9}$   $[\text{м/Н}] \cdot F_{\text{привод}} [\text{Н}]$ , а на рисунке 4.4б –  $W_{\max}[\text{м}] = 1.42 \cdot 10^{-8} [\text{м/Н}] \cdot F_{\text{привод}} [\text{Н}]$ .

В задаче динамического управления формой ГЗ с помощью одного привода вычисленные ЛАЧХ и ФЧХ при  $\delta = 10^{-3}$  показаны на рисунке 4.5а. Для исследования эффективности активного демпфирования микроколебаний упругого зеркала выбирался регулятор, близкий к пропорционально-дифференциальному:  $H_{\text{рег}} = K(s+1)/(0.01s+1)$ . При выборе коэффициента  $K = 80$ , время успокоения колебаний уменьшалось в 6 раз (рисунок 4.6а) и составляло  $t_{\text{уст}} = 0,05$  сек при относительном уменьшении амплитуды колебаний по сравнению с начальным значением в 20 раз. При этом ЛАЧХ и ФЧХ разомкнутой системы управления приводом коррекции с таким регулятором показаны на рисунке 4.5б.

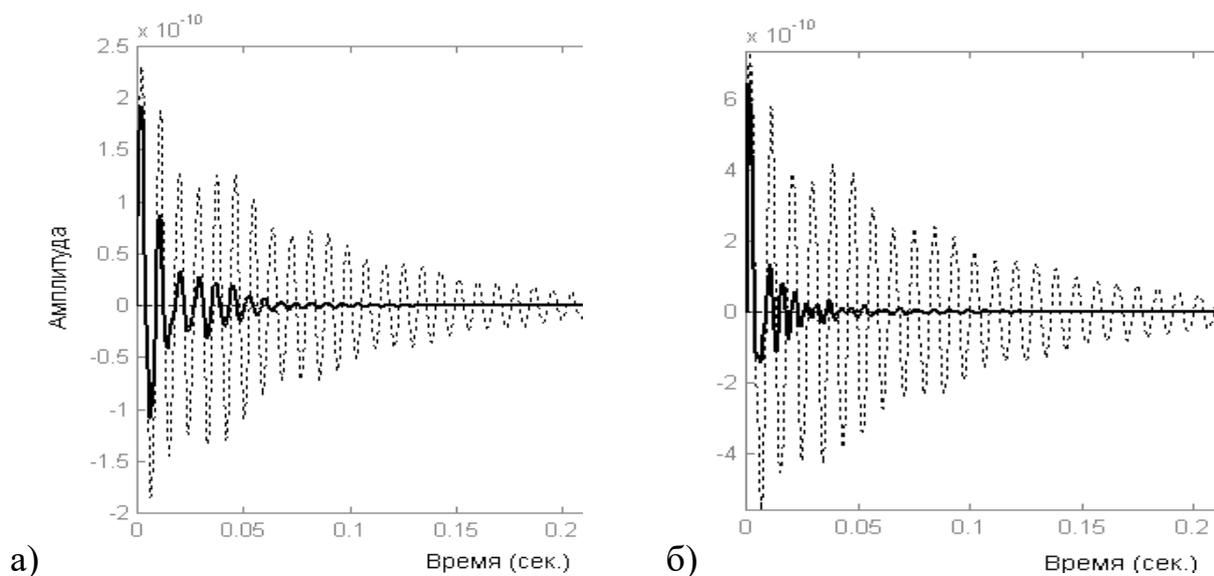


Рисунок 4.6 – Активное демпфирование ГЗ

пропорционально-дифференциальным (а) и оптимальным (б) регуляторами

Синтез оптимального управления приводом при наблюдении за всей поверхностью ГЗ выполнялся через решение линейно-квадратичной задачи:

$$J(u) = \int_0^{\infty} (y^T Q y + y^T N u + u^T R u) dt, \quad (4.10)$$

$$u = -K \xi, \quad \frac{d\xi}{dt} = A_{\text{SYS}} \xi + B_{\text{SYS}} u + L(y - C_{\text{SYS}} \xi),$$

где  $Q$ ,  $N$ ,  $R$  – весовые коэффициенты;  $\xi$  – оценка вектора состояния  $x$ ; наблюдающее устройство выбиралось в виде фильтра Калмана.

При  $Q = 100$ ,  $N = 0$ ,  $R = 10^{-5}$  найденный в MATLAB регулятор позволил уменьшить время установления в 8 раз (рисунок 4.6 б). Приведенные результаты моделирования были получены совместно с С.А. Бендером (в ходе научного руководства его диссертационной работы [21]). Они также приведены в совместных статьях автора [239, 246 и др.].

#### 4.2. Модели гибких зеркал для разработки модуля адаптивной оптики, корректирующего влияние атмосферной турбулентности

Адаптивные зеркала создаются высокочастотными и предназначены для компенсации атмосферной турбулентности. Они имеют множество разных конструкций [2, 22, 29, 41, 59, 60, 88, 92, 161, 185 – 187, 301, 311, 312, 324, 325, 334, 335, 343 и др.] и обычно малые размеры. Для их расчета, как объектов распределенного динамического управления, в общем случае можно использовать аналогичные описанным в параграфе 4.1 модели, так как они являются достаточно универсальными для упругих зеркал разных размеров и конструкций.

На практике небольшие адаптивные зеркала стараются создавать работающими в квазистатическом режиме управления (конструктивными решениями через повышение частот их резонансных колебаний). В этом случае расчет распределенного управления  $\{P_j\}$  приводами выполняются из решения задачи [222]:

$$\Delta = \frac{1}{S} \int_{\Omega} (\varphi(\vec{r}) - \sum_{j=1}^n P_j R_j(\vec{r}))^2 d^2\vec{r} \Rightarrow \min,$$

$$W(\vec{r}) = \sum_{j=1}^n P_j R_j(\vec{r}), \quad \sum_{j=1}^n P_j (R_j, R_k) = (\varphi, R_k), \quad (4.11)$$

где  $\varphi(\vec{r})$  – компенсируемые искажения волнового фронта;  $R_j(\vec{r})$  – статические функции отклика зеркала на действие приводов с единичным усилием.

Нахождение  $R_j(\vec{r})$  для сложных конструкций адаптивных зеркал следует проводить в программах конечно-элементного анализа. В то же время, для их простых конструкций широко используют и разные аналитические модели.

В частности, изгиб поверхности чисто мембранных зеркал (без изгибной жесткости) описывается уравнением:  $\Delta W = -q/T$ , где  $T$  – растягивающее усилие по контуру,  $W(r=R_0) = 0$  [301, 343]. Для распределенного круглого привода радиуса  $r_{II}$  получена следующая функция отклика в виде точного его решения [213]:

$$R_s(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi T} \begin{cases} \ln(B_s / r_{II}^2) + 1 - A_s / r_{II}^2, & A_s \leq r_{II}^2 \\ \ln(B_s / A_s), & A_s > r_{II}^2, \end{cases} \quad (4.12)$$

где:  $A_s = (x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 = r^2 + r_s^2 - 2rr_s \cos(\theta - \theta_s)$ ,  $B_s = \lambda_s^2 (x - x_s / \lambda_s^2)^2 + (y - y_s / \lambda_s^2)^2 = r^2 r_s^2 / R^2 + R^2 - 2rr_s \cos(\theta - \theta_s)$ ,  $\lambda_s^2 = (x_s^2 + y_s^2) / R^2$ ;

$\vec{r} = (x, y) = (r, \theta)$  – декартовы и полярные координаты с началом в центре круглого зеркала радиуса  $R$ ;  $(x_s, y_s) = (r_s, \theta_s)$  – координаты центра круглого привода.

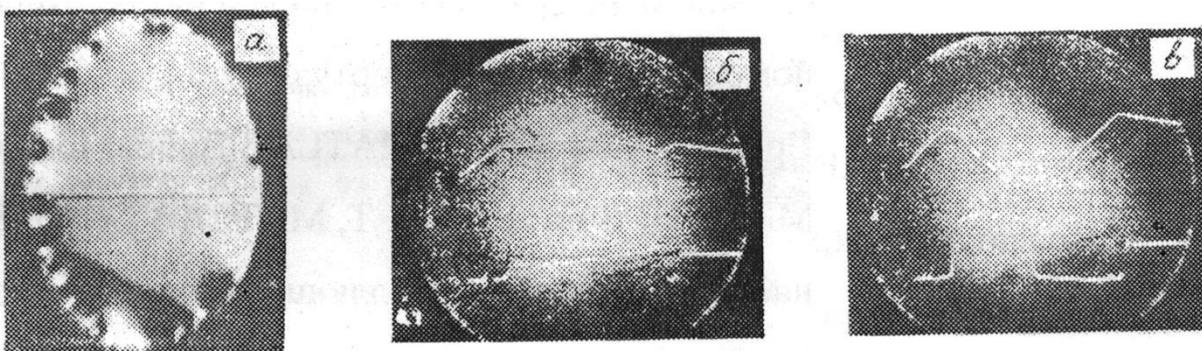


Рисунок 4.7 – Деформации мембранного зеркала: теневая картина исходной поверхности (а); профили поверхности и угла наклона зеркала в исходном состоянии (б) и при напряжении 200 В на центральном электроде (в)

В исследуемом экспериментальном макете зеркальная пленка, полученная методом вакуумного напыления слоев меди и алюминия и имеющая диаметр 110 мм, растягивалась с равномерным натяжением на кольцевую оправу [215]. В качестве электростатических приводов использовались контактные площадки диаметром 6,5 мм, расположенные на расстоянии 7,8 мм друг от друга на изолированном основании. Расстояние между контактными площадками и пленкой составляло 50-100 мкм. Деформации такого зеркала, измеренные с помощью теневого метода, показаны на рисунке 4.7. Изломы на краях кривых соответствуют

оправе зеркала. Вне их выбиралась активная область диаметром в 50 мм. Чувствительность стрелы прогиба зеркала к величине напряжения центрального электрода была квадратичной [213] и при напряжении 200 В составила 10 мкм.

Так как функция отклика на рисунке 4.7в получилась более пологой по сравнению с (4.12), поэтому в расчетной модели мембранного зеркала требуется учесть влияние цилиндрической жесткости  $D_3$ :  $(D_3 \Delta \Delta - T \Delta) W = q$ ;  $W(r = R_0) = 0$ ;  $\partial W / \partial r(r = R_0) = 0$ . В этом случае функция отклика на действие сосредоточенного усилия в точке  $(r_s, \theta_s)$  может быть выбрана следующей, приближенной:

$$R_s(\vec{r}) = \frac{1}{2\pi T} \left\{ \frac{1}{2} \ln \frac{B}{A} + K_0(\omega B) - K_0(\omega A) + C_0 [I_0(\omega B) - I_0(\omega A)] \right\}, \quad (4.13)$$

$$C_0 = [K_1(\omega_1) - 1/\omega_1] / I_1(\omega_1), \quad \omega_1 = (r_s + R_0)\omega,$$

где  $\omega^2 = T/D_3$ ;  $I_0, I_1, K_0, K_1$  – модифицированные функции Бесселя.

Однако для центрального привода ( $r_s = 0$ ) решение (4.13) будет точным. Рассчитанные графики функций отклика (4.12), (4.13) показаны на рисунке 4.8. Их сравнение с экспериментальной функцией отклика макета мембранного зеркала позволяет оценить значение  $D_3$  при идентификации расчетных моделей зеркала.

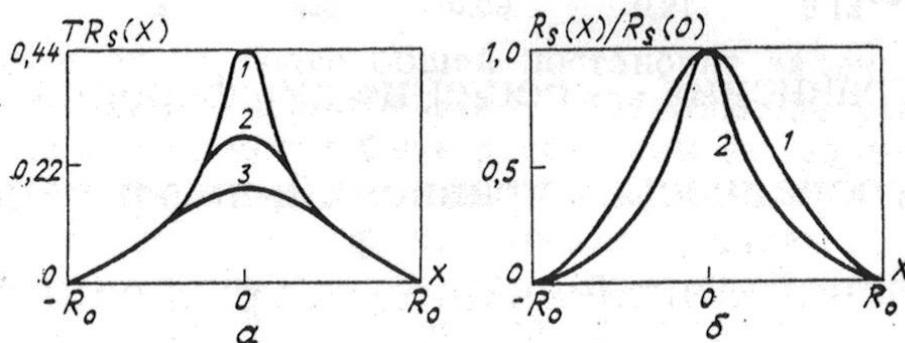


Рисунок 4.8 – Функции отклика мембранного зеркала на действие центрального

привода ( $r_s = 0$ ): а)  $D_3 = 0$ : 1 –  $r_{II} = 0.1 R_0$ , 2 –  $r_{II} = 0.3 R_0$ , 3 –  $r_{II} = 0.5 R_0$ ;

б)  $D_3 \neq 0$ ,  $r_{II} = 0$ : 1 –  $\omega = 2$ , 2 –  $\omega = 20$

В случаях, когда цилиндрическая жесткость будет значительно доминировать над растяжением, можно приближенно использовать вариант модели пластинчатого зеркала без растяжения:  $\Delta^2 W = q/D_3$ , где  $W$  – функция прогиба,  $\Delta$  –

оператор Лапласа,  $q$  – нагрузка от привода,  $D_3 = Eh^3/12(1-\nu^2)$  – цилиндрическая жесткость,  $E$  – модуль Юнга,  $h$  – толщина,  $\nu$  – коэффициент Пуассона. Для заземленного по внешнему краю круглого зеркала получаются функции отклика [123]:

$$R_S(\vec{r}) = [A_S \ln(A_S/B_S) - A_S + B_S] / 16\pi D_3 \quad (4.14)$$

где при  $A_S \rightarrow 0$ :  $R_S \rightarrow B_S/16\pi D_3$ ; а при  $\lambda_S \rightarrow 0$ :  $B_S \rightarrow R^2$ .

В [123] приведены и более сложные формулы для круглой пластины со свободным краем. Если дополнительно рассмотреть два близко расположенных, одинаковых по величине и противоположных по направлению усилия, то будем иметь функцию отклика на действие силового момента.

Для коррекции атмосферных aberrаций в виде полиномов Цернике низших порядков использование аналитических квазистатических функций отклика пластинчатого зеркала будет рассмотрено в пункте 9.3.1. Если же полоса частот контуров управления формой адаптивного зеркала приближается к его низшей резонансной частоте, требуется уже учитывать нестационарное поведение функций отклика. В такой постановке задача коррекции атмосферных aberrаций в виде полиномов Цернике низших порядков будет рассмотрена в пункте 9.3.2.

Если же полосы приводов управления формой зеркала выбраны выше его низших резонансных частот, тогда в контурах управления можно выделять системы их активного демпфирования (типа рассмотренных в параграфе 4.1).

### **4.3. Системы организации дополнительной оптической обратной связи для управления волновым фронтом**

Перспективные контура оптической связи открывают дополнительные возможности для каналов подсветки объектов наблюдения в околоземном пространстве, а также при зажигании искусственных звезд в областях изопланатизма слабых астрономических объектов (с целью обеспечения условий работы обратных связей высокочастотных систем адаптивной оптики). В больших оптических телескопах канал оптической обратной связи может быть использован в излучающих

лазерных системах, помогая решать задачи: 1) обращение волнового фронта, 2) подавление фазовых искажений в оптической среде усиления, 3) управление волновым фронтом интенсивных пучков со снижением лучевой нагрузки на зеркала.

Исследованию контуров оптической обратной связи посвящены монография [47] и статьи [61, 104, 305 – 307 и др.]. Рассматриваемый ниже материал соответствует статьям автора [214, 218 -221, 224, 231, 233, 329].

Рассмотрим сначала структурную схему системы для обращения волнового фронта с отражательным оптически управляемым нелинейным фазовым транспарантом  $T$ , приведенную на рисунке 4.9а.

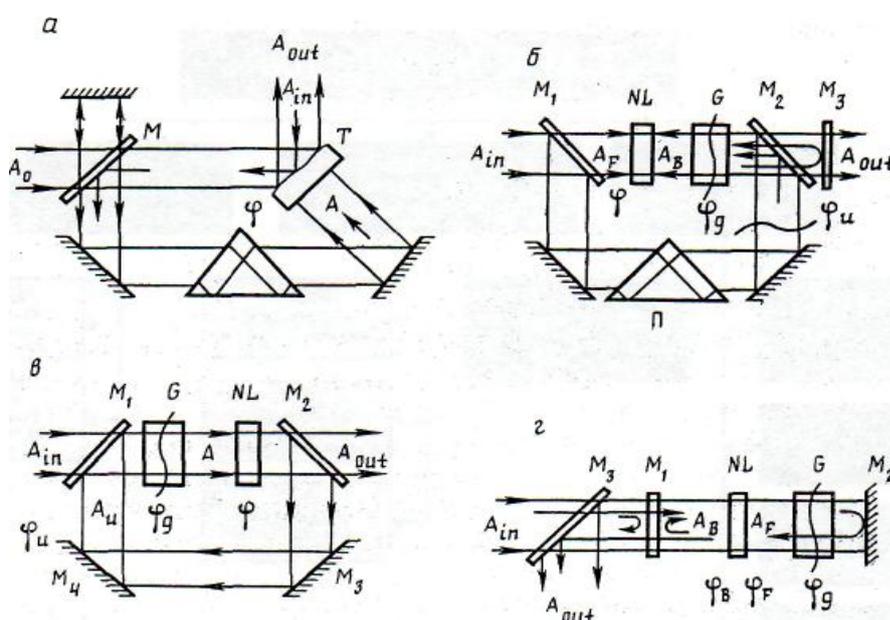


Рисунок 4.9 – Схемы систем с оптической обратной связью

Здесь  $A_{in} = |A_{in}| \exp[i\varphi_{in}]$  - комплексная амплитуда входного поля,  $A_0$  - опорная волна с неискаженным фазовым профилем  $\varphi_0$ ,  $M$  - светоделительное зеркало с коэффициентом отражения по интенсивности  $R$ ,  $\varphi$  - модуляция фазы волны при отражении от транспаранта. Комплексная амплитуда  $A$  светового поля в контуре обратной связи в приближении геометрической оптики:

$$A = R^{1/2}(1 - R)^{1/2}A_0 + R^{1/2}A_{ib} e^{i\varphi} .$$

Для керровской нелинейности наведенная фаза  $\varphi$  зависит от интенсивности светового поля  $A$  через релаксационное уравнение Дебая:

$$\tau \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \varphi = \kappa(AA^*) = k_0 \{f_0 + \gamma^2 f_{in} + 2\gamma [f_0 f_{in}]^{1/2} \cos(\varphi + \varphi_{in} + \varphi_0)\}, \quad (4.15)$$

где  $k_0 = \kappa R(1 - R)I_0^m$ ,  $\gamma^2 = I_{in}^m / I_0^m (1 - R)$ ,  $I_{0,in}^m = \max |A_{0,in}(r)|^2$ ,  $f_{0,in}(r) = |A_{0,in}(r)|^2 / I_{0,in}^m$ ;  $\kappa$  – коэффициент нелинейности,  $\tau$  – характерное время релаксации, временем запаздывания волны в контуре обратной связи пренебрегаем.

В дальнейшем полагаем  $\varphi_0 = 0$ . Тогда в случае равномерного распределения интенсивностей  $A_0, A_{in}$  ( $f_0 = f_{in} = 1$ ) для фазового рассогласования  $\psi = \varphi + \varphi_{in}$  стационарное решение  $\hat{\psi}$  определится из уравнения, вытекающего из (4.15):

$$\hat{\psi} - \varphi_{in} = k_0 \{1 + \gamma^2 + 2\gamma \cos \hat{\psi}\}. \quad (4.16)$$

В среде с сильным нелинейным откликом ( $k_0 \gamma \gg 1$ ) имеем решение:

$$\hat{\psi} = \hat{\varphi} + \varphi_{in} \approx \text{const}. \quad (4.17)$$

То есть, волна с комплексной амплитудой  $A_0$  после отражения от транспаранта приобретает обращенный фазовый профиль ( $\text{const} - \varphi_{in}(r)$ ).

Подавления фазовых искажений в однопроходном усилителе с керровской нелинейностью «проходного» типа  $NL$  рассмотрим на примере схемы на рисунке 4.9б. Здесь  $G$  – активная среда с коэффициентом усиления по интенсивности  $G_0$  и фазовым искажением  $\varphi_g$ . Часть выходного пучка отражается от зеркала  $M_3$  и интерферирует с полем из контура оптической связи с фазовым управлением  $\varphi_u$ . В обратном направлении создается поле:

$$A_B = G_0^{1/2} e^{i\varphi_g} \left[ A_{in} R_1^{1/2} R_2^{1/2} e^{i\varphi_u} + A_F (1 - R_2) R_3^{1/2} G_0^{1/2} e^{i(\varphi + \varphi_g)} \right], \quad (4.18)$$

где  $\varphi$  – модуляция фазы в тонком слое нелинейной среды для волны  $A_F = (1 - R_1)^{1/2} A_{in}$ , распространяющейся в прямом направлении.

При взаимодействии на тонком слое нелинейной среды прямой ( $A_F$ ) и обратной ( $A_B$ ) световых волн наведется нелинейная фазовая модуляция  $\varphi$ :

$$\tau \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \varphi = \kappa [A_F A_F^* + 2A_B A_B^*]. \quad (4.19)$$

Подставляя (4.18) в (4.19), получим уравнение:

$$\tau \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \varphi = c_0 f_{in}(r) \left\{ 1 + \frac{k_0}{c_0} \left[ 1 + \gamma^2 + 2\gamma \cos(\varphi + \varphi_g - \varphi_u) \right] \right\}, \quad (4.20)$$

где  $c_0 = \kappa(1 - R_1)I_{in}^m, k_0/c_0 = 2(1 - R_2)^2 R_3 G_0^2, \gamma^2 = R_1 R_2 / (1 - R_1)(1 - R_2)^2 R_3 G_0$ .

По аналогии с (4.15), при  $k_0 \gamma \gg 1, f_{in} = 1$  стационарное решение (4.20)  $\varphi \approx \varphi_u - \varphi_g + \text{const}$ . При этом фаза выходного излучения  $\varphi_{out} = \varphi_{in} + \varphi + \varphi_g$  станет  $\varphi_{out} \approx \varphi_{in} + \varphi_u + \text{const}$ . Это выражение не зависит от  $\varphi_g$ , т. е. фазовые искажения среды усиления будут подавляться. Управление фазовым профилем основного пучка здесь может быть осуществлено в контуре обратной связи с помощью  $\varphi_u$ . При этом интенсивность светового поля на управляемом зеркале:

$$I_u^{max} = I_{in}^m \left[ R_1^{1/2} + (1 - R_1)^{1/2} R_2^{1/2} G_0^{1/2} \right]^2 = I_{in}^{1/2} R_1 \left[ 1 + R_2 / R_3^{1/2} (1 - R_2) \gamma \right]^2 \quad (4.21)$$

может быть существенно понижена.

Рассмотрим также схему многопроходного оптического усилителя на рисунке 4.9в. Коэффициенты отражения зеркал  $M_1 - M_4$  выбираются так, чтобы порог возбуждения в кольцевом резонаторе не достигался. В такой схеме нелинейная фазовая модуляция  $\varphi$  опишется уравнением:

$$\tau \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \varphi = k_0 f_{in}(r) / \left[ 1 + \gamma^2 - 2\gamma \cos(\varphi + \varphi_g + \varphi_u) \right] \quad (4.22)$$

где  $k_0 = \kappa(1 - R_1)I_{in}^m G_0, \gamma^2 = G_0 R_1 R_2$ .

При этом выходное поле:  $A_{out} = (1 - R_2)^{1/2} A e^{i\varphi}$ ,

$$A = \frac{G_0^{1/2} (1 - R_1)^{1/2} \exp(i\varphi_g)}{1 - \gamma \exp[i(\varphi + \varphi_g + \varphi_u)]} A_{in} \quad (4.23)$$

Так как при  $k_0 \gamma \gg 1, f_{in} = 1$  стационарное решение (4.22) имеет вид:  $\hat{\varphi} \approx -\varphi_g - \varphi_u + \text{const}$ , поэтому на основании (4.23) получим  $\varphi_{out} \approx \varphi_{in} + \varphi_g + \hat{\varphi} + \text{const} \approx \varphi_{in} + \varphi_u + \text{const}$ , т. е. и в кольцевом резонаторе можно компенсировать фазовые искажения усиливающей среды.

Свойства оптической обратной связи для схемы на рисунке 4.9 в показаны на рисунке 4.10, где принято:  $\varphi_u = 0, \varphi_g = \text{const} \equiv \varphi_0$ . Из рисунке 4.10а видна многостабильная зависимость стационарного решения (4.22) от параметра  $k_0$  при  $\gamma = 0.5, \varphi_0 = 0$ . Здесь устойчивым решениям  $\varphi_j$  соответствуют сплошные линии, а

границам притяжения к ним – пунктирные. Каждому из решений  $\varphi_j$  отвечают свои значения интенсивности и фазы выходного излучения:

$$I_{out} = (1 - R_2)AA^* = (1 - R_2)\varphi_j / \kappa, \quad (4.24)$$

$$\varphi_{out} = \varphi_j + \varphi_0 + \varphi_{in} + \arctg \{ \sin(\varphi_j + \varphi_0) / [1/\gamma - \cos(\varphi_j + \varphi_0)] \}.$$

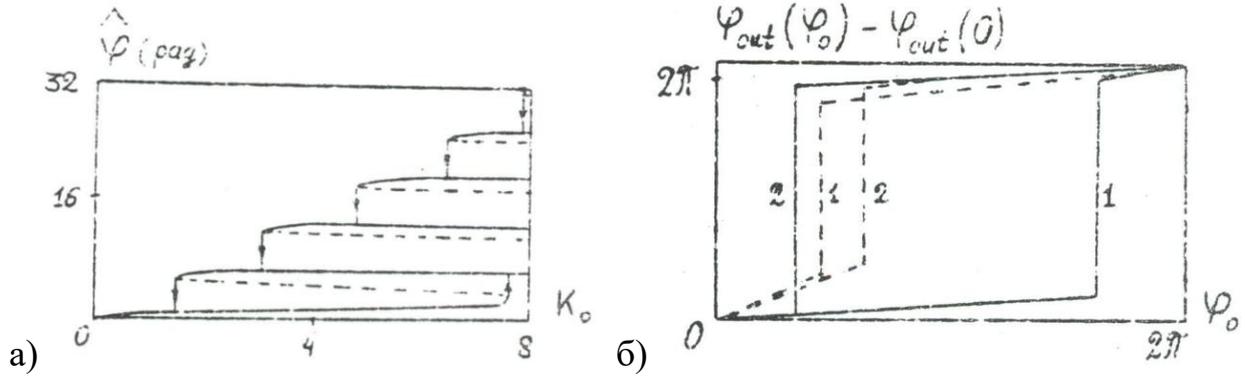


Рисунок 4.10 – Многостабильность: а) стационарной фазовой модуляции  $\varphi$  при  $\gamma = 0.5$ ,  $\varphi_0 = 0$ ; б) выходной фазы  $\varphi_{out}$  при  $k_0 = 5$ ,  $1 - \gamma = 0.5$ ,  $2 - \gamma = 0.7$

На рисунке 4.10б приведена зависимость  $\varphi_{out}$  от  $\varphi_0$  при  $k_0 = 5$  для высших (сплошные линии) и низших (пунктирные) состояний  $\varphi_j$ .

Компенсация неоднородностей активной среды возможна не только в кольцевых схемах, но и в линейном резонаторе Фабри – Перо с помещенным в него тонким слоем нелинейной среды, как показано на рисунке 4.9г. Комплексные амплитуды прямой и обратной световых волн здесь связаны соотношениями:

$$A_F = G_0 A_B e^{i(\varphi_B + 2\varphi_g)}, \quad A_B = (1 - R_1)^{1/2} (1 - R_3)^{1/2} A_{in} + A_F R_1^{1/2} e^{i\varphi_F}. \quad (4.25)$$

Комплексная амплитуда выходного поля зависит от фазового рассогласования  $\varphi + 2\varphi_g + \varphi_{in}$ , где  $\varphi = \varphi_F + \varphi_B$ ;  $\varphi_F$ ,  $\varphi_B$  – нелинейные фазовые добавки, вносимые средой  $NL$  в прямую и обратную световые волны.

В соответствии с (4.19) нелинейные фазовые модуляции:

$$\tau \frac{\partial \varphi_{F,B}}{\partial t} + \varphi_{F,B} = \kappa [A_{F,B} A_{F,B}^* + 2A_{B,F} A_{B,F}^*], \quad \tau \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \varphi = 3\kappa [A_F A_F^* + A_B A_B^*]. \quad (4.26)$$

Из уравнений (4.25), (4.26) для  $\varphi$  получается аналогичное (4.22) уравнение, в котором следует заменить  $\varphi_g + \varphi_u$  на  $2\varphi_g$ , а  $k_0$  и  $\gamma$  – соответственно на  $k_0 =$

$3\kappa(1 + G_0^2)(1 - R_1)(1 - R_3)I_{in}^m$  и  $\gamma = G_0R_1^{1/2}$ . Тогда при  $k_0\gamma \gg 1$ ,  $f_{in} = 1$  получим  $\hat{\varphi} \approx -2\varphi_g + \text{const}$ ,  $\varphi_{out} \approx \varphi_{in} + \text{const}$ , т. е. здесь тоже будет иметь место компенсация фазовых неоднородностей среды усиления.

Для задачи управления волновым фронтом интенсивного светового поля с помощью более слабого пучка в контуре оптической обратной связи наиболее подходят схемы на рисунке 4.9б,в, если коэффициенты отражения зеркал  $M_1, M_2$  положить много меньшими 1. Получаемая при этом интенсивность светового поля на управляемом зеркале  $M_5$  в схеме на рисунке 4.9б описывается выражением (4.21) и не зависит от коэффициента нелинейности  $\kappa$ . Сравнивая выражения для  $I_u^{макс}$  и  $k_0\gamma$ , нетрудно видеть, что параметры системы можно выбрать таким образом, чтобы при  $k_0\gamma \gg 1$  удовлетворить условию  $I_u^{макс} < I_{in}^m$ . В случае же кольцевых резонаторов (рисунок 4.9в) для уменьшения лучевой нагрузки на управляемое зеркало реализуется слабая интенсивность поля в обратной связи ( $\gamma^2 \ll 1$ ). Здесь с учетом (4.23):

$$A_u = R_2^{1/2} A \exp[i(\varphi + \varphi_u)], \quad I_u \approx I_{in}^m G_0 R_2 (1 - R_1). \quad (4.27)$$

Полагая, например,  $R_1 = 0.5$ , получим  $I_u/I_{in}^m \approx \gamma^2$ , то есть лучевая нагрузка на управляемое зеркало  $M_4$  значительно уменьшается.

Рассмотрим устойчивость оптических контуров обратной связи. Для определенности выберем кольцевую схему на рисунке 4.9в. Сначала исследуем устойчивость по отношению к временной задержке  $t_0$  в контуре «вырожденной» обратной связи (поперечными взаимодействиями световых полей пренебрегаем). В этом случае нелинейная фазовая модуляция  $\varphi$  определится уравнениями:

$$[\tau \partial / \partial t + 1] \varphi(t) = \kappa A(t) A^*(t), \quad (4.28)$$

$$A(t) = (1 - R_1)^{1/2} A_{in} + \gamma A(t - t_0) \exp\{i\varphi(t - t_0)\},$$

где  $\tau$  - время релаксации;  $\gamma^2 = R_1 R_2 < 1$ .

Рассчитанные зависимости критических значений временного запоздания  $t_0^*/\tau$  от  $\gamma$  показаны на рисунке 4.11, где кривые построены для значения  $\bar{\varphi}$ , соответствующих интегралам  $2n\pi < \bar{\varphi} < 2n\pi + \pi$  ( $n$  - натуральное число) устойчивых

стационарных решений  $\bar{\varphi}$  ( $\bar{\varphi} = \text{const} / [1 + \gamma^2 - 2\gamma \cos(\bar{\varphi})]$ ). При этом стремление  $\bar{\varphi}$  к верхнему пределу интеграла ( $2n\pi + \pi$ ) эквивалентно установлению в резонаторе низших устойчивых состояний и, наоборот, стремление  $\bar{\varphi}$  к нижнему пределу ( $2n\pi$ ) будет соответствовать установлению высших состояний нелинейной фазы. Выбор в расчетах значений  $n=2$  и  $n=3$  определялся тем, что для них эффективно подавляются фазовые искажения активной среды.

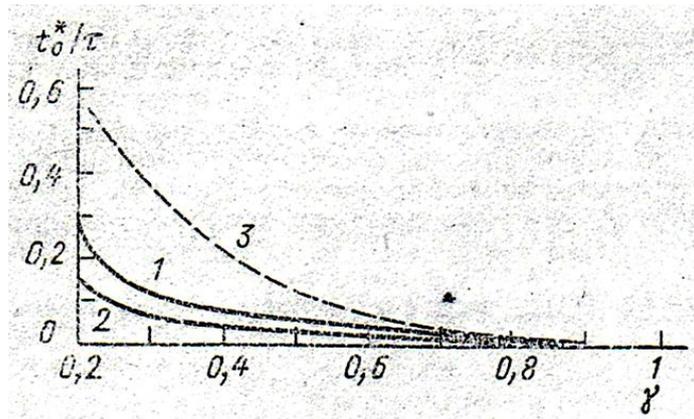


Рисунок 4.11 – Зависимость  $t_0^*/\tau$  от  $\gamma$  при  $\bar{\varphi} = 4.5\pi(1)$ ,  $6.5\pi(2)$ ,  $6.9\pi(3)$

Также в кольцевых резонаторах была исследована неустойчивость светового поля по отношению к сдвиговой разъюстировке зеркал  $M_i$ . Характер развития неустойчивости в таких системах зависит от величины диффузии частиц нелинейной среды и уровня дифракции световой волны. Для создания эффекта дифракции светового поля между зеркалами  $M_3$  и  $M_4$  помещался фильтр, состоящий из двух одинаковых линз и амплитудной гауссовой диафрагмы в их общем фокусе. Дополнительно для возвращения первоначальной ориентации светового поля вводился аналогичный линзовый элемент без диафрагмы.

В этом случае уравнения для плоской модели принимают вид:

$$[\tau \partial / \partial t + 1 - d_0 a_0^2 \partial^2 / \partial x^2] \varphi(x, t) = x A(x, t) A^*(x, t), \quad (4.31)$$

$$A(x, t) = (1 - R_1)^{1/2} A_{in} + \frac{\gamma \beta}{\sqrt{2\pi}} \int \exp \left\{ -\frac{\beta^2}{2} (x - x')^2 \right\} \cdot A(x' - x_0, t) \exp \{ i \varphi(x' - x_0, t) \} dx',$$

где  $d_0$  – коэффициент диффузии,  $\beta$  – отношение радиуса диафрагмы к радиусу фокального пятна гауссова пучка,  $x_0$  – суммарный линейный сдвиг зеркал  $M_i$ ; временем запаздывания  $t_0$  пренебрегаем.

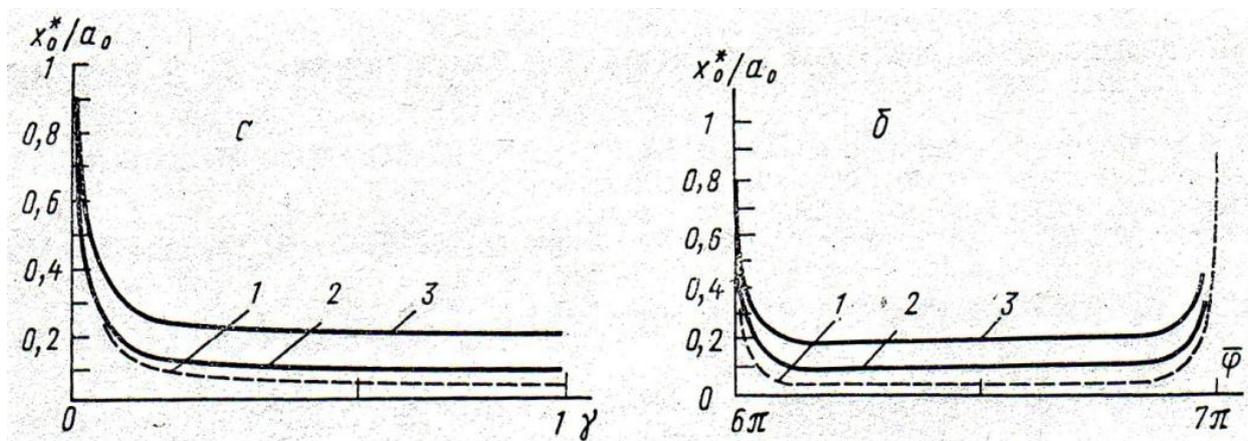


Рисунок 4.12 – Зависимости  $x_0^*$  от  $\gamma$  при  $\bar{\varphi} = 6.5\pi$  (а) и от  $\bar{\varphi}$  при  $\gamma = 0.5$  (б):  
 1 –  $d_0 = 0.01$ ,  $\beta = \infty$ ; 2 –  $d_0 = 0$ ,  $\beta = 10$ ; 3 –  $d_0 = 0$ ,  $\beta = 5$

В результате их решения, в работе автора [224] были получены зависимости критического линейного сдвига  $x_0^*$  от параметра  $\gamma$ , показанные на рисунке 4.12а. При этом внутри интервалов  $2n\pi < \bar{\varphi} < 2n\pi + \pi$  величина  $x_0^*$  изменялась незначительно, а вблизи их границ повышалась (рисунок 4.12б; в расчетах выбиралось характерное значение эффективного коэффициента диффузии  $d_0 = 0,01$ ). Как видно из графиков, дифракция светового поля может существенно повышать устойчивость системы по отношению к сдвиговой разъюстировке зеркал.

Таким образом, выявленные условия потери устойчивости контура оптической обратной связи являются достаточно слабыми. Поэтому при умеренных разъюстировках оптические автоволны возбуждаться не будут.

#### 4.4 Выводы по главе 4

1. Модели для сопровождения разработок управляемых зеркал в системах активной оптики и адаптивной оптики имеют свои особенности для больших телескопов. Так, частотные полосы работы приводов большого облегченного ГЗ мо-

гут превышать его низшие резонансные частоты. А частотные полосы работы приводов малого адаптивного зеркала стремятся выбирать не превышающими его низшие резонансные частоты.

2. Выбор модели, сопровождающей разработку системы управления ГЗ, зависит от решаемой задачи. Так, для контуров автономной работы отдельных приводов предложено использовать передаточные функции, получаемые с помощью САПР конечно-элементного анализа и MATLAB. Для системы активного демпфирования резонансных колебаний большого ГЗ рекомендуется применять модальный подход. Для оптимального синтеза системы управления с адаптивно настраиваемым переменным составом активно работающих приводов разработан конечно-разностный подход. Так, при организации обратной связи по прогибу в точке действия привода время успокоения микроколебаний зеркала уменьшилось в 6 раз, а при оптимальном синтезе обратной связи по информации со всей поверхности зеркала – в восемь раз.

3. Модели управляемых упругих деформаций адаптивных зеркал предложено преимущественно выбирать в рамках квазистатического анализа. Приведенные аналитические решения для функций отклика пластинчатых и мембранных адаптивных зеркал могут быть использованы для отработки их распределенного управления. Исследование макета мембранного зеркала показало лучшее соответствие результатов модели тонкой пластины с растяжением, чем модели идеальной мембраны без собственной изгибной жесткости.

4. Организация контуров оптической обратной связи в излучающих лазерных каналах телескопа может дать следующие потенциальные преимущества: обеспечить подавление фазовых искажений в среде усиления и ослабить лучевую нагрузку на управляемые зеркала. Показана достаточная для практического использования устойчивость таких оптических контуров.

## **ГЛАВА 5. ТРЕБОВАНИЯ, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ РАЗРАБОТОК ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СЛЕЖЕНИЯ НАЗЕМНОГО ТЕЛЕСКОПА**

Глава посвящена требованиям, моделям и алгоритмам для интеллектуальной поддержки разработок и производства прецизионных электроприводов слежения наземных телескопов по углам азимута  $A$  и высоты  $H$ . Так как их точность задает требования и влияет на работу модульных систем корректирующего слежения (ВЗ, ТДЗ), поэтому в моделях электроприводов проведен всемерный учет важных тонких технологических факторов и внутренних возмущений.

В главе последовательно выполнены: координатная увязка следящего телескопа с наблюдаемыми космическими объектами; задание начальных требований к разработке электроприводов слежения в альт-азимутальной монтажке телескопа; разработка моделей прецизионных электроприводов наведения больших телескопов; синтез контуров управления ими в условиях возмущений.

### **5.1. Координатная увязка следящего телескопа с космическими объектами наблюдения**

Выбор эксплуатационных параметров электроприводов сопровождения по углам азимута и высоты связан с особенностями отслеживаемого движения наблюдаемых космических объектов (КО). Ими в общем случае могут выступать как астрономические источники, так и объекты в околоземном пространстве (ими могут быть орбитальные спутники, метеориты, кометы и другие объекты).

Такие КО движутся предсказуемо по законам небесной механики в плоскостях своих орбит [174]. Поэтому их координатная увязка с углами азимута и высоты следящего телескопа позволит прогнозировать движение и более эффективно управлять ОПУ телескопа.

Пересчет их собственного движения в углы ОПУ выполняется последовательным перепроектированием орбитальной системы координат на оси [17, 81, 82,

122, 174 и др.]: абсолютной  $OX_A Y_A Z_A$ , экваториальной  $OX_3 Y_3 Z_3$ , географической  $MX_M Y_M Z_M$  ( $M$  – точка места) и собственной для телескопа  $Sxuz$  (связана с  $MX_M Y_M Z_M$  поворотами на углы азимута  $A$  и высоты  $H$ ) систем координат. Эти вопросы также рассматриваются в статье автора [266].

Для описания собственного движения КО используют абсолютную экваториальную систему координат (СК)  $OX_A Y_A Z_A$ , связанную с небесной сферой [174]. Здесь точка  $O$  – центр Земли,  $X_A Y_A$  – плоскость экватора Земли,  $Z_A$  – является осью мира (направлена на Север), направление  $X_A$  совпадает с направлением на точку весеннего равноденствия  $\gamma$ .

В ней положение звездных источников задается постоянными радиус-векторами  $R_A = const$ , а орбитальное движение КО в околоземном пространстве описывается трехмерными уравнениями движения:

$$\ddot{X}_A + \mu X_A / R_A^3 = 0, \quad \ddot{Y}_A + \mu Y_A / R_A^3 = 0, \quad \ddot{Z}_A + \mu Z_A / R_A^3 = 0, \quad (5.1)$$

где  $R_A(t) = X_A(t) X_A^0 + Y_A(t) Y_A^0 + Z_A(t) Z_A^0$ ;  $R_A^2 = X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2$ ;

$\mu = 398600.4 \text{ км}^3/\text{с}^2$  – гравитационная постоянная Земли; верхний индекс « $^0$ » обозначает единичные вектора:  $X_A^0, Y_A^0, Z_A^0$ .

Уравнения (5.1) удобны при одновременном моделировании движения нескольких КО. Для описания движения конкретного КО в плоскости своей орбиты ( $X_{ко} Y_{ко}$ ) с углами наклонения  $i_{ко}$  и долготы  $\varpi_{ко}$  (Рисунок 5.1а) их сводят к двумерным орбитальным уравнениям:

$$\ddot{X}_{ко} + \mu X_{ко} / R_{ко}^3 = 0, \quad \ddot{Y}_{ко} + \mu Y_{ко} / R_{ко}^3 = 0; \quad (5.2)$$

где  $R_{ко}(t) = X_{ко}(t) X_{ко}^0 + Y_{ко}(t) Y_{ко}^0$ ,  $R_{ко}^2 = X_{ко}^2 + Y_{ко}^2$ ;  $Z_{ко} = 0$ .

Начальные условия в уравнениях (5.2) наиболее удобно задавать в точке перигея  $\Pi$  (рисунок 5.1а) с координатами  $(R_{\Pi}, \varpi_{\Pi})$ :

$$X_{\Pi} = R_{\Pi} \cos(\varpi_{\Pi}), \quad Y_{\Pi} = R_{\Pi} \sin(\varpi_{\Pi}); \quad \dot{X}_{\Pi} = -V_{\Pi} \sin(\varpi_{\Pi}), \quad \dot{Y}_{\Pi} = V_{\Pi} \cos(\varpi_{\Pi}).$$

При этом скорость  $V_{\Pi}$  в перигее будет определять характер орбиты: круговая, эллиптическая (орбита КО без отрыва), гиперболическая (орбита КО с отрыва

вом) или параболическая (орбита комет). Для перечисленных типов орбит известны аналитические решения уравнений (5.2) [174].

В случае наиболее распространенных круговых околоземных орбит таким решением будут функции:

$$X_{ко}(t) = R_{ко} \cos[\varphi_{ко}(t)], \quad Y_{ко}(t) = R_{ко} \sin[\varphi_{ко}(t)]; \quad (5.3)$$

где:  $\varphi_{ко}(t) = \omega_{ко}t + \varphi_{ко}^0$ ,  $\omega_{ко} = (\mu/R_{ко}^3)^{1/2}$ ,  $R_{ко} = R_3 + h_{ко}$ ,  $\varphi_{ко}^0 = const$ ,  $R_3 = 6378$  км – средний радиус Земли,  $h_{ко}$  – высота орбиты.

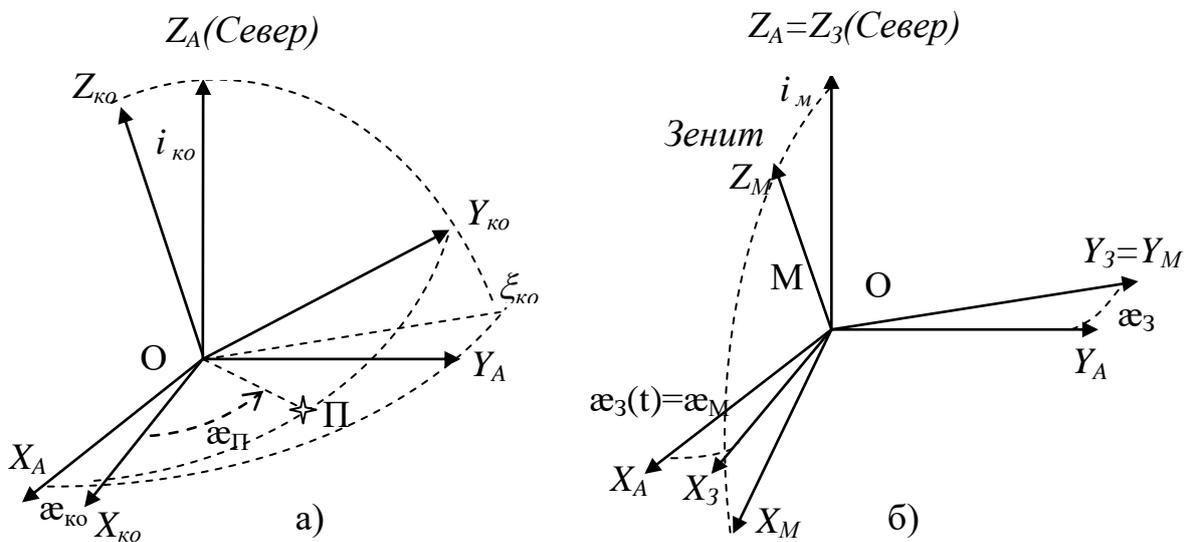


Рисунок 5.1 – Системы координат: а) наблюдаемого КО в абсолютной СК («А»); б) точки места телескопа в СК Земли («З»)

Используя угловые преобразования единичных векторов (Рисунок 5.1а):

$$\mathbf{R}_{ко}(t) = X_{ко}(t)\mathbf{X}_{ко}^0 + Y_{ко}(t)\mathbf{Y}_{ко}^0 = X_A(t)\mathbf{X}_A^0 + Y_A(t)\mathbf{Y}_A^0 + Z_A(t)\mathbf{Z}_A^0;$$

$$\mathbf{X}_{ко}^0 = \mathbf{X}_A^0 \cos \alpha_{ко} + \mathbf{Y}_A^0 \sin \alpha_{ко};$$

$$\mathbf{Y}_{ко}^0 = \xi_{ко}^0 \cos i_{ко} + \mathbf{Z}_A^0 \sin i_{ко}; \quad \xi_{ко}^0 = -\mathbf{X}_A^0 \sin \alpha_{ко} + \mathbf{Y}_A^0 \cos \alpha_{ко};$$

можно перейти к описанию движения КО в абсолютной СК  $OX_A Y_A Z_A$ :

$$X_A(t) = X_{ко}(t) \cos \alpha_{ко} - Y_{ко}(t) \sin \alpha_{ко} \cos i_{ко}; \quad (5.4)$$

$$Y_A(t) = X_{ко}(t) \sin \alpha_{ко} + Y_{ко}(t) \cos \alpha_{ко} \cos i_{ко}; \quad Z_A(t) = Y_{ко}(t) \sin i_{ко}.$$

Для учета собственного вращения Земли с угловой скоростью  $\omega_3 = 1 \text{ об } / 24 \text{ ч} = 7.3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/сек}$ , необходимо ввести связанную с Землей экваториальную СК  $OX_3Y_3Z_3$  с единичными ортами (Рисунок 5.1б):

$$\mathbf{X}_{ko}^0 = \mathbf{X}_3^0 \cos \varphi(t) + \mathbf{Y}_3^0 \sin \varphi(t) ; \quad (5.5)$$

$$\mathbf{Y}_{ko}^0 = \xi_{ko}^0 \cos i_{ko} + \mathbf{Z}_3^0 \sin i_{ko} ; \quad \xi_{ko}^0 = -\mathbf{X}_3^0 \sin \varphi(t) + \mathbf{Y}_3^0 \cos \varphi(t) ;$$

где:  $\varphi(t) = \varphi_{ko} - \omega_3 t$ ; ось  $Z_3 = Z_A$  направлена на Север,  $Y_3$  – по экватору на Восток,  $X_3$  – в экваториальной плоскости через меридиан точки места М.

Тогда в СК  $OX_3Y_3Z_3$  перемещение КО по аналогии с (5.4):

$$X_3(t) = X_{ko}(t) \cos \varphi(t) - Y_{ko}(t) \sin \varphi(t) \cos i_{ko} ; \quad (5.6)$$

$$Y_3(t) = X_{ko}(t) \sin \varphi(t) + Y_{ko}(t) \cos \varphi(t) \cos i_{ko} ; \quad Z_3(t) = Y_{ko}(t) \sin i_{ko} .$$

Учтем координаты точки места М установки телескопа в географической СК  $MX_MY_MZ_M$  (Рисунок 5.1б) с единичными векторами:

$$\mathbf{X}_3^0 = \mathbf{X}_M^0 \cos i_m + \mathbf{Z}_M^0 \sin i_m ; \quad \mathbf{Y}_3^0 = \mathbf{Y}_M^0 ; \quad \mathbf{Z}_3^0 = -\mathbf{X}_M^0 \sin i_m + \mathbf{Z}_M^0 \cos i_m . \quad (5.7)$$

Здесь  $Y_M = Y_3$ ,  $\varphi_m(t) = \varphi_3(t)$ , ось  $Z_M$  направлена в Зенит и отклонена от  $Z_3$  на угол наклона  $i_m$ , причем  $(\pi/2 - i_m)$  – угол широты.

Из (5.5), (5.7) получаем связь единичных векторов:

$$\mathbf{X}_{ko}^0 = \mathbf{X}_M^0 \cos i_m \cos \varphi(t) + \mathbf{Z}_M^0 \sin i_m \cos \varphi(t) + \mathbf{Y}_M^0 \sin \varphi(t) ;$$

$$\mathbf{Y}_{ko}^0 = -\mathbf{X}_M^0 [ \cos i_{ko} \cos i_m \sin \varphi(t) + \sin i_{ko} \sin i_m ] + \quad (5.8)$$

$$+ \mathbf{Y}_M^0 \cos \varphi(t) \cos i_{ko} + \mathbf{Z}_M^0 [ \cos i_{ko} \sin i_m \sin \varphi(t) + \sin i_{ko} \cos i_m ] ,$$

а из:  $\mathbf{R}_{ko}(t) = X_{ko}(t)\mathbf{X}_{ko}^0 + Y_{ko}(t)\mathbf{Y}_{ko}^0 = X_m^{ko}(t)\mathbf{X}_M^0 + Y_m^{ko}(t)\mathbf{Y}_M^0 + [Z_m^{ko}(t) + R_3]\mathbf{Z}_M^0$

найдем описание движения КО в СК  $MX_MY_MZ_M$ :

$$X_m^{ko}(t) = X_{ko}(t) \cos i_m \cos \varphi(t) - Y_{ko}(t) [ \cos i_{ko} \cos i_m \sin \varphi(t) + \sin i_{ko} \sin i_m ] ,$$

$$Y_m^{ko}(t) = X_{ko}(t) \sin \varphi(t) + Y_{ko}(t) \cos \varphi(t) \cos i_{ko} , \quad (5.9)$$

$$Z_m^{ko}(t) = X_{ko}(t) \sin i_m \cos \varphi(t) + Y_{ko}(t) [ \cos i_{ko} \sin i_m \sin \varphi(t) + \sin i_{ko} \cos i_m ] - R_3 ,$$

Для описания перемещения КО в поле зрения телескопа введем собственную СК телескопа  $Sx_{uz}$ , связанную с  $MX_MY_MZ_M$  углами азимута  $A$  и высоты  $H$ . В ней выбраны:  $S = M$  – центр вращения телескопа; ось  $x$  – ось визирования (направлена по оси наблюдения на КО); преобразование орт:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_M^0 &= \mathbf{x}^0 \sin H + \mathbf{z}^0 \cos H, & \boldsymbol{\eta}^0 &= \mathbf{x}^0 \cos H - \mathbf{z}^0 \sin H, \\ \mathbf{X}_M^0 &= \boldsymbol{\eta}^0 \cos A - \mathbf{y}^0 \sin A, & \mathbf{Y}_M^0 &= \boldsymbol{\eta}^0 \sin A + \mathbf{y}^0 \cos A. \end{aligned}$$

После их подстановки в соотношение:

$$x_{\text{ко}}(t) \mathbf{x}^0 + y_{\text{ко}}(t) \mathbf{y}^0 + z_{\text{ко}}(t) \mathbf{z}^0 = X_M^{\text{ко}}(t) \mathbf{X}_M^0 + Y_M^{\text{ко}}(t) \mathbf{Y}_M^0 + Z_M^{\text{ко}}(t) \mathbf{Z}_M^0$$

получим следующее описание перемещения КО в поле зрения телескопа:

$$\begin{aligned} x_{\text{ко}}(t) &= X_M^{\text{ко}}(t) \cos A \cos H + Y_M^{\text{ко}}(t) \sin A \cos H + Z_M^{\text{ко}}(t) \sin H, \\ y_{\text{ко}}(t) &= -X_M^{\text{ко}}(t) \sin A + Y_M^{\text{ко}}(t) \cos A, \\ z_{\text{ко}}(t) &= -X_M^{\text{ко}}(t) \cos A \sin H - Y_M^{\text{ко}}(t) \sin A \sin H + Z_M^{\text{ко}}(t) \cos H. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Если в (5.10) положить  $y_{\text{ко}}(t) = 0$ ,  $z_{\text{ко}}(t) = 0$ , будем иметь функции движения КО, определяемые в углах азимута и высоты:

$$\begin{aligned} \text{tg } A_{\text{ко}}(t) &= Y_M^{\text{ко}}(t) / X_M^{\text{ко}}(t); \\ \text{tg } H_{\text{ко}}(t) &= Z_M^{\text{ко}}(t) / [X_M^{\text{ко}}(t) \cos A_{\text{ко}}(t) + Y_M^{\text{ко}}(t) \sin A_{\text{ко}}(t)]. \end{aligned} \quad (5.11)$$

При этом ошибки углового сопровождения КО телескопом будут вычисляться в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta H &= H_{\text{ко}} - H; & \Delta B &\equiv \Delta A \cos H_{\text{ко}}, & \Delta A &= A_{\text{ко}} - A; \\ \varepsilon &\approx \text{sqrt} [(\Delta H)^2 + (\Delta B)^2] = \text{sqrt} [(\Delta H)^2 + (\Delta A)^2 \cos^2 H_{\text{ко}}], \end{aligned}$$

где измерение угловых ошибок  $(\Delta B, \Delta H)$  выполняются двухкоординатными оптическими ПЗС приемниками в собственных координатах  $(y_{\text{пзс}}, z_{\text{пзс}})$ :

$$\Delta H \approx z_{\text{пзс}}/f = z_{\text{ко}}/R^{\text{ко}} \approx z_{\text{ко}}/x_{\text{ко}}, \quad \Delta B \approx y_{\text{пзс}}/f = y_{\text{ко}}/R^{\text{ко}} \approx y_{\text{ко}}/x_{\text{ко}},$$

где  $f$  – фокусное расстояние телескопа.

Подставляя в (5.11) функции  $X_M^{\text{ко}}(t)$ ,  $Y_M^{\text{ко}}(t)$ ,  $Z_M^{\text{ко}}(t)$ , задаваемые в соответствии с (5.9) через функции движения  $X_{\text{ко}}(t)$ ,  $Y_{\text{ко}}(t)$  по конкретной орбите, вычисляются угловые функции  $A_{\text{ко}}(t)$ ,  $H_{\text{ко}}(t)$ , моделирующие отслеживаемую траекторию КО относительно телескопа. На их основе можно определить скоростные требования к электроприводам слежения, а также можно сформировать базовое программное управление угловым движением телескопа в его ОПУ (с дополнительной настройкой по ошибке слежения с учетом ее экстраполяции).

## 5.2. Задание начальных требований к разработке электроприводов слежения в альт-азимутальной монтировке телескопа

Разработаем логически связанную методику задания самых первых оценок обоснованных технических требований к параметрам следящих электроприводов телескопа в ОПУ. Так, на этапе анализа начальных вариантов его исполнения важно определиться с оценками следующих групп параметров: 1) скоростных, 2) частотных, 3) точностных, 4) силовых, 5) жесткостных, 6) электромеханических.

В зависимости от наблюдения астрономических (звезд) или орбитальных объектов в околоземном пространстве методики будут различаться. Так как управление ОПУ астрономических наземных телескопов компенсирует только вращение Земли ( $\omega_3 = 360 \cdot 60 \text{ угл.мин} / 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ сек} = 0.25 \text{ угл.мин/сек}$ ), поэтому в требованиях к ним много общего. В свою очередь, характеристики систем наблюдения за околоземным космическим пространством будут зависеть еще и от класса наблюдаемых объектов (особенно от высоты их орбиты).

При разработке управления наземным астрономическим телескопом самые начальные оценки большинства из перечисленных параметров могут быть сделаны по аналогии с прототипами и похожими реализованными проектами. Для их уточнения следует дополнительно учитывать также пока еще грубо обозначенные внутренние связи параметров на уровне логики построения моделей. В этом направлении предлагается придерживаться следующей цепочки оценок:

[Заданный диаметр главного зеркала телескопа  $D$ ]  $\Rightarrow$  [поворачиваемая по углу масса  $m$ ]  $\Rightarrow$  [момент инерции поворачиваемой массы  $I$ ]  $\Rightarrow$  [момент трения в подшипниках поворачиваемой массы  $M_{mp}$ ]  $\Rightarrow$  [момент «трогания» с места  $M_{mp}^{max}$ ]  $\Rightarrow$  [усредненные моменты ветровых нагрузок  $M_e$  для разных условий, зависящие от скорости ветра и площади неуравновешенности по ветровому давлению конструкции поворачиваемой массы]  $\Rightarrow$  [случайные ветровые силовые моменты  $\delta M_e$ ]  $\Rightarrow$  [требуемые максимальные силовые моменты управления  $M_U^{max}$ ]  $\Rightarrow$  [максимальные достижимые угловые ускорения  $\varepsilon^{max}$ ]  $\Rightarrow$  [максимальные дости-

жимые угловые скорости  $\omega^{max}$ ]  $\Rightarrow$  [требуемая полоса частот управления  $\Omega^{max}$ ]  $\Rightarrow$  [жесткость  $C_y$  силовой упругой передачи от электродвигателя к телескопу]  $\Rightarrow$  [моменты инерции роторов электродвигателей  $I_p$ ]  $\Rightarrow$  [частоты резонансных колебаний двухмассовой системы «ротор – упругая передача – нагрузка»  $\Omega_y$ ]  $\Rightarrow$  [реализация эффективного демпфирования таких колебаний с логарифмическим декрементом затухания  $\delta$ ]  $\Rightarrow$  [жесткость крепления статоров электродвигателей  $C_{cm}$ ]  $\Rightarrow$  [частоты резонансных колебаний упруго закрепленных статоров  $\Omega_{cm}$ ]  $\Rightarrow$  [внутренние электромеханические параметры электродвигателя].

Трудоемкость проведения расчетов в соответствие с этими шагами зависит от меры проработки оптико-механической конструкции большого телескопа. На начальных стадиях можно использовать пропорции, реализованные в проектах прототипов, а также грубые теоретические зависимости. Приведем выборку наиболее важных параметров, определяющих требования к электроприводам.

Телескопы «Кеск» с диаметром ГЗ  $D = 9.82$  м имеют вес по  $P \approx 300$  т (т.е.  $P \approx 30 D$ ), бинокулярный телескоп LBT из двух телескопов ( $D = 8.4$  м) – 700 т (т.е.  $P = 700 / 2 \approx 40 D$ ), в телескопе ТМТ ( $D = 30$  м) движущаяся масса  $\sim 1430$  т (т.е.  $P \approx 50 D$ ), в телескопе Euro50 ( $D = 50$  м) вес составит  $\sim 3500$  т (т.е.  $P \approx 70 D$ ), в телескопе OWL ( $D = 100$  м) двигающаяся масса оценивается в 14 800 т (т.е.  $P \approx 150 D$ ). Заметим, что в выделенный вес телескопов могут входить подвижные и неподвижные части. Если их доли поделить поровну, то выписанные оценки соотношения веса и диаметра следует уменьшить оценочно в два раза.

Скорость ведения телескопа БТА ( $D=6$  м) достигает до 2.5 угл.град / мин, а перенаведения – до 45 угл.град/мин. В целях предотвращения аварийных ситуаций, связанных с остановкой больших масс при внезапном отключении питания, ускорения по обеим осям ограничены до 0.1 угл.град / сек<sup>2</sup>. Телескоп WHT ( $D = 4.2$ м) обходит разворотом по азимуту на 180 угл.град «слепое пятно» в зените радиусом 0.2 угл.град примерно за 3 минуты. Скорость движения телескопа HET ( $D = 10$  м) – до 3 угл.град./сек, ускорение – до 0.5 угл.град./сек<sup>2</sup>. Ошибка сопровождения – 1 угл.сек./мин. Слепое пятно телескопа TNG ( $D = 3.58$  м) составляет при-

мерно 1 угл. град вокруг Зенита. Наведение телескопа Subaru ( $D = 8.3$  м) допускается со скоростями до 0.5 угл.град./сек, точность наведения – 0.1 угл.сек. В телескопе ESO VLT ( $D = 8.2$  м) полевая стабилизация имеет точность 0.1 угл.сек при полосе пропускания 10 Гц и 0.05 угл.сек - при полосе 6 Гц. Допустимый дрейф - 2 угл.сек/час. В проекте телескопа Euro50 ( $D = 50$  м) скорость поворота 3 угл.град./сек, ускорение 0.3 угл.град./сек<sup>2</sup>.

Точность наведения телескопа Subaru ( $D = 8.3$  м) – 0.1 угл.сек., телескопа SOAR ( $D = 4.25$  м) – 0.2 угл.сек (СКО), но вблизи слепого пятна < 2 угл.сек (СКО). В телескопе БТА точность вращения вертикальной оси – около 2 угл.сек и решается задача достичь: ошибки наведения  $\leq 1$  угл.сек. по обеим осям, трендовой ошибки ведения  $\leq 0.2$  угл.сек. за 30 минут экспозиции, амплитуды высокочастотных ошибок ведения  $\leq 0.2$  угл.сек.

При скорости ветра до 80 км/ч телескоп LBT ( $D = 8.4$  м) сохраняет высокую точность наведения. Телескоп SALT ( $D = 11$  м) работает при скоростях ветра до 21 м/с. В проекте телескопа Euro50 скорость ветра на высоте 10 м: не влияющая на характеристики телескопа – до 12 м/с, снижающая характеристики телескопа – 18 м/с, которую выдерживает конструкция – 55 м/с. В телескопе БТА качество ведения ухудшается (все составляющие возрастают в 2-3 раза) при скорости ветра  $> 2$  м/сек. При ветре около 10 м/сек наблюдались отскоки звезды на 15 угл.сек с медленным возвращением в центр.

В спектре конструкции БТА доминирует частота 0.1 Гц. По углу азимута частоты сосредоточены в полосе 0.7 – 1.2 Гц. Амплитуда колебаний выходной оси телескопа достигает 2.5 угл.сек (при штатном режиме – 1 угл.сек). Время затухания колебаний – около 10 сек. По углу высоты доминируют частоты  $\approx 0.4$  Гц с амплитудой до 2.5 угл.сек (при штатном режиме – 1 угл.сек) и временем затухания 28 сек. Натурные эксперименты по использованию пассивного и активного демпфирования показали возможность снижения в 5-6 раз времени затухания колебаний. В проекте телескопа OWL стальная азимутальная конструкция с использованием облегченных композиционных материалов будет иметь низшую частоту  $\sim 1.6$  Гц (при боковом движении по высотной оси). Если азимутальная ось блоки-

рована, то частота высотной оси оценивается от 2.58 Гц в зените до 2.06 Гц в  $60^\circ$  от зенита. Полоса частот дополнительного корректирующего зеркала М2 рассчитана, чтобы работать в режиме 3.94 Гц для зенита и 3.63 Гц для  $60^\circ$  от зенита.

Для наблюдения космических объектов в околоземном пространстве разработаем математическое обеспечение пошаговой методики расчета начальных требований к приводам слежения телескопа в альт-азимутальной монтировке [256]. Чтобы не выписывать аналитические подстановки и громоздкие итоговые формулы, приведем алгоритм вычислений на примере конкретного количественного расчета. В качестве нижней высоты круговых орбит наблюдаемых объектов (характеризуется максимальными скоростями сопровождения) выберем  $h_{КО} = 400$  км.

*Оценка скоростных требований по углу азимута А.* Угловая скорость, период обращения КО вокруг Земли и линейная скорость подспутниковой точки на поверхности Земли составят:

$$\begin{aligned}\omega_{КО} &= [\mu / (R_3 + h_{КО})^3]^{1/2} = [\mu / R_3^3]^{0.5} / (1 + \delta h)^{1.5} = \\ &= 0.00124 / (1 + \delta h)^{1.5} \text{ рад/сек} = 0.00113 \text{ рад/сек} = 3.9 \text{ угл.мин/сек};\end{aligned}$$

$$T_{об} = 2\pi / \omega_{КО} = 97 \text{ мин} = 1.6 \text{ ч}; \quad V_{nm} = \omega_{КО} \cdot R_3 = 7.2 \text{ км/сек.}$$

где  $h_{КО} = 400$  км,  $\mu = 398600 \text{ км}^3/\text{сек}^2$  – гравитационная постоянная,  $R_3 = 6378$  км – радиус Земли,  $\delta h = h_{КО}/R_3$ ,  $T_{об}$  – время одного оборота вокруг Земли.

При таком малом  $T_{об}$  влиянием вращения Земли с периодом в 24 ч можно пренебречь, что значительно упростит вычисления. Тогда угол наблюдаемой траектории и предельное время наблюдения (время нахождения КО над горизонтом):

$$\gamma_n = 2 \arccos [R_3 / (R_3 + h_{КО})] = 2 \arccos [1 / (1 + \delta h)] = 0.69 \text{ рад} = 39 \text{ угл.град};$$

$$T_n = (\gamma_n / 2\pi) T_{об} = 10 \text{ мин.}$$

Наибольшая угловая скорость КО относительно телескопа будет в зените:

$$\omega_z = \omega_{КО} \cdot (R_3 + h_{КО}) / h_{КО} = 0.02 \text{ рад/сек} = 1.1 \text{ угл.град/сек.}$$

Границу «слепого пятна» альт-азимутальной монтировки зададим углом отклонения от вертикали:  $\Delta H_{сл} = 5 \text{ угл.град}$ . Наибольшие скорости слежения по углу азимута  $A$  будут иметь место для траекторий, касающихся границы слепого пятна. Для них ближайшее расстояние от телескопа до подспутниковой точки:

$l^* = \Delta H_{cl} \cdot h_{KO} = 35 \text{ км}$  (при  $A = 0$  – нуль угла азимута выбрали в плоскости, ортогональной плоскости орбиты).

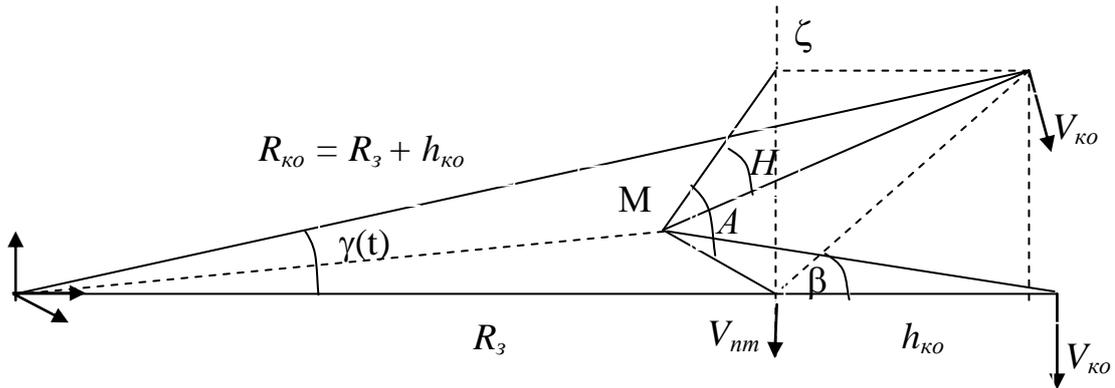


Рисунок 5.2 – Схема для расчета углов  $A$  и  $H$

В соответствии с рисунком 5.2 временное изменение угла азимута:

$$\operatorname{tg}[A(t)] \approx [R_{KO} \cdot \sin \gamma(t)] / l^*, \quad R_{KO} = R_3 + h_{KO};$$

где:  $\gamma(t) = \omega_{KO} t$  – угол отклонения КО от вертикальной оси, проходящей через ближайшую к телескопу подспутниковую точку (т.е.  $\gamma = 0$  при  $A = 0$ ).

Дифференцируя это выражение по времени, найдем:

$$\omega_A(t) / \cos^2 A(t) = [R_{KO} \cdot \cos \gamma(t) \cdot \omega_{KO}] / l^*, \quad \cos^2 A = 1 / [1 + \operatorname{tg}^2 A].$$

Вблизи точки с  $A = 0$  имеем  $\gamma(t) \approx 0$  и поэтому удобнее записать:

$$\omega_A \approx \omega_A^* \cos^2 A, \quad \cos^2 A = 1 / [1 + \zeta^2], \quad \zeta = \operatorname{tg} A;$$

$$\omega_A^* = R_{KO} \cdot \omega_{KO} / l^* \approx 0.2 \text{ рад/сек} = 12 \text{ угл.град/сек}.$$

Угловое ускорение поворота по азимуту  $\varepsilon_A$  вычислим через дифференцирование  $\omega_A$  по времени:  $\varepsilon_A \approx -2(\omega_A^*)^2 \zeta / [1 + \zeta^2]^2$ .

Его максимальное значение будет достигаться при  $\zeta^* = 1/3$ :

$$\varepsilon_A^* = 0.65 \cdot (\omega_A^*)^2 = 0.026 \text{ рад/сек}^2 = 1.5 \text{ угл.град/сек}^2.$$

При этом скорость изменения углового ускорения:

$$\dot{\varepsilon}_A = -4(\omega_A^*)^3 \cdot [1 - 3\zeta^2] / [1 + \zeta^2]^3,$$

а ее максимальное значение получается при  $\zeta = 0$ :

$$\dot{\varepsilon}_A^* = 4(\omega_A^*)^3 = 0.032 \text{ рад/сек}^3 = 1.8 \text{ угл.град/сек}^3.$$

Для процесса сопровождения КО максимальная угловая скорость  $\omega_A^*$  будет задавать требования к скорости электропривода слежения по углу азимута, мак-

симальное угловое ускорение  $\varepsilon_A^*$  – требование по создаваемому моменту, а  $\dot{\varepsilon}_A^*$  – максимальную скорость изменения управляющего момента.

Если участок траектории максимальной кривизны аппроксимировать гармонической зависимостью  $A = A_a \sin(\Omega_A t)$ , то можно оценить снизу полосу частот силового воздействия приводов на конструкцию телескопа:

$$\Omega_A = \dot{\varepsilon}_A^* / \varepsilon_A^* = 1.2 \text{ рад/сек} = 0.2 \text{ Гц}.$$

Оценка скоростных требований по углу высоты  $H$ . Из рисунка 5.2 имеем оценку траектории:  $tg[H(t)] \approx [R_{КО} \cos \gamma(t) - R_3] \cos A(t) / l^*$ .

Условно максимальную угловую скорость  $\omega_H^*$  будем иметь при прохождении через зенит:  $\omega_H^* = \omega_{КО} R_{КО} / h_{КО} = 0.02 \text{ рад/сек} = 1.1 \text{ угл.град/сек}$ .

Для траекторий КО, касающихся «слепого пятна» сбоку, движение по  $H$  останавливается вблизи точки с  $A = 0$ , а вблизи ее будем иметь:  $\omega_H(t) \approx \omega_H^* \sin A(t)$ . Отсюда после дифференцирования по времени найдем:

$$\varepsilon_H(t) \approx \omega_H^* \omega_A \cos A(t), \quad \dot{\varepsilon}_H = \omega_H^* (\varepsilon_A \cos A - \omega_A^2 \sin A).$$

$$\text{В точке с } A = 0: \quad \varepsilon_H^* = \omega_H^* \omega_A^* = 0.004 \text{ рад/сек}^2 = 0.22 \text{ угл.град/сек}^2,$$

$$\dot{\varepsilon}_H^* = \omega_2 \varepsilon_A^* = 0.0005 \text{ рад/сек}^3 = 0.03 \text{ угл.град/сек}^3.$$

Это позволяет оценить снизу полосу частот силового воздействия приводов на конструкцию телескопа:  $\Omega_H \approx \dot{\varepsilon}_H^* / \varepsilon_H^* = 0.16 \text{ рад/сек} = 0.025 \text{ Гц}$ .

Рассмотрим отдельно траектории КО, проходящие сквозь «слепое пятно». Большинство телескопов обходят его по границе, разворачиваясь по углу азимута с  $\omega_H = 0$ , что требует больших азимутальных скоростей  $\omega_A$ .

Альтернативным вариантом является «опрокидывание» телескопа через зенит (если это предусмотрено его конструкцией). В этом случае имеем  $\omega_H \approx \omega_H^*$ , а движение по углу азимута  $A$  будет производиться по схеме: подход к «слепому пятну»  $\Rightarrow$  остановка по  $A \Rightarrow$  переброс через зенит по углу  $H \Rightarrow$  возврат по азимуту на некоторый угол  $A_{ВД}$  до встречи с КО  $\Rightarrow$  захват КО телескопом.

Выбирая закон такого возвратного движения (ВД) в виде:

$$A \approx A_{ВД} \cos(\pi / T_{ВД}), \quad \text{получим оценку ускорения: } \varepsilon_A^* \approx A_{ВД} (\pi / T_{ВД})^2.$$

Например, для  $A_{ВД} = \pi/6 = 30$  угл.град,  $T_{ВД} = 5$  угл.град /  $\omega_{КО} = 73$  сек будем иметь:  $\varepsilon_A^* = 0.056$  угл.град/сек<sup>2</sup>.

Для случаев быстрого «перенаведения» телескопа с одной области наблюдения на другую в этом же угловом направлении, максимальными изменениями углов примем: по азимуту  $\Delta A = \pi/4 = 45$  угл.град, по высоте  $\Delta H = \pi/2 = 90$  угл.град. Чтобы инерционные нагрузки на оптико-механическую конструкцию большого телескопа были наименьшими, процесс углового перенаведения определим по гармоническому закону:

$$A_n = (\pi/8) \cos(\pi/T_n), \quad H_n = (\pi/4) \cos(\pi/T_n),$$

где  $T_n$  – время перенаведения,  $t$  – текущее время, отсчитываемое от нуля.

Если выбрать  $T_n = 30$  сек, потребуются:  $\omega_A = (\pi/8)\pi/T_n = 0.04$  рад/сек = 2.35 угл.град/сек,  $\varepsilon_A = (\pi/8)(\pi/T_n)^2 = 0.004$  рад/сек<sup>2</sup> = 0.24 угл.град/сек<sup>2</sup>;

$\omega_H = (\pi/4)\pi/T_n = 0.08$  рад/сек = 4.7 угл.град/сек,  $\varepsilon_H = (\pi/4)(\pi/T_n)^2 = 0.008$  рад/сек<sup>2</sup> = 0.5 угл.град/сек<sup>2</sup>.

Оцениваемые при этом частоты составят:

$$\Omega_{A,H} = \varepsilon_{A,H}/\omega_{A,H} = \pi/T_n = 1$$
 рад/сек = 0.017 Гц.

Для сравнения, в телескопе ТЗ.6 системы обзора космического пространства АЕОС скорость поворота по углу по углу высоты достигает 4.75 угл.град/сек, а по углу азимута – 1.8 угл.град/сек.

*Оценка частотных требований.* Для случая захвата КО полем зрения оптической системы выберем оценку амплитуды  $A_a$ , как половину размера поля зрения (с учетом «введения» КО в центр ПЗС-приемника). Например, для гармонического закона при  $A_a = 2$  угл.мин,  $\varepsilon_A = 1.5$  угл.град/сек<sup>2</sup> (вычислено ранее) потребуются:  $\Omega_A = (\varepsilon_A/A_a)^{1/2} \approx 6.5$  рад/сек  $\approx 1$  Гц,  $\omega_A = A_a \Omega_A = 12$  угл.мин/сек.

В режиме сопровождения КО имеем малую амплитуду ошибки и более высокую частоту управления. Например, для  $A_a = 2$  угл.сек и  $\varepsilon_A = 1.5$  угл.град/сек<sup>2</sup> получаем:  $\Omega_A = (\varepsilon_A/A_a)^{1/2} \approx 50$  рад/сек  $\approx 8$  Гц,  $\omega_A = A_a \Omega_A = 1.6$  угл.мин/сек.

Чтобы уменьшить инерционные нагрузки на конструкцию большого телескопа, частоту желательно понизить (например, до 1 Гц), а достижение высоких точностей слежения поручить управляемому по наклонам вторичному зеркалу.

Чтобы иметь примерно одинаковое инерционное воздействие на конструкцию большого телескопа по углам  $A$  и  $H$ , естественно потребовать примерное равенство их угловых ускорений. При этом для угла высоты будем иметь те же оценки, что и для угла азимута.

*Оценка точностных требований.* Ограничимся оценками при использовании ПИД регуляторов в контурах управления. С целью обеспечения компромисса между плавностью (для уменьшения создаваемых инерционных нагрузок) и достижением высокой точности слежения, сведем передаточные функции замкнутых систем к полиномам Баттерворта третьего порядка:

$$(p^3 + 2\Omega p^2 + 2\Omega^2 p + \Omega^3) e = p^3 \varphi_{ko} - p f,$$

где  $p = d / dt$ ,  $e = \varphi_{ko} - \varphi$  – ошибка сопровождения КО;  $\Omega$  – частота замкнутой системы;  $\varphi$  – один из углов:  $A$  или  $H$ .

Тогда для уравнения объекта управления  $I p^2 \varphi = M + f$  (принятого в упрощенном виде) будем иметь третий порядок астатизма по сигналу сопровождения  $\varphi_{ko}$  (что будет обеспечивать полное подавление средней скорости и среднего ускорения на плавных участках траекторий по углам  $A$  и  $H$ ), а также первый порядок астатизма по моментам внешних возмущений (ветра). Подставляя в уравнение замкнутой системы  $e = A_e \exp(j\omega t)$ ,  $\varphi_{ko} = A_{ko} \cdot \exp(j\omega t)$ ,  $f = A_f \exp(j\omega t)$ , получим АЧХ по ошибке и по возмущениям:  $A_e^{ko} = A_{ko} / \text{sqrt}[1 + (\Omega/\omega)^6]$ ,

$$A_e^f = (A_f/\omega^2) / \text{sqrt}[1 + (\Omega/\omega)^6] = (A_f/\Omega^2) (\omega/\Omega) / \text{sqrt}[1 + (\omega/\Omega)^6].$$

В близзенитной области аппроксимируем углы  $A$  и  $H$  гармоническими функциями на одном полупериоде:  $A(t) \approx A^* \sin(\Omega_A t)$ ,  $H(t) \approx H^* \sin(\Omega_H t)$ .

Для случая  $h_{KO} = 400$  км в соответствии с ранее приведенными оценками примем:  $\omega_A^* = 0.2$  рад/сек,  $\omega_H^* = 0.02$  рад/сек,  $\Omega_A = 1.2$  рад/сек,  $\Omega_H = 0.16$  рад/сек;  $A^* = \varepsilon_A^* / \Omega_A^2 = 1$  угл.град,  $H^* = \varepsilon_H^* / \Omega_H^2 = 8.6$  угл.град.

Тогда при выборе частоты  $\Omega = 1 \text{ Гц} = 6.28 \text{ рад/сек}$ , найдем:

$$A_{eA}^{KO} = 0.4 \text{ угл.мин} = 25 \text{ угл.сек}, \quad A_{eH}^{KO} = 0.008 \text{ угл.мин} = 0.5 \text{ угл.сек}.$$

Для данного случая получили неудовлетворительную точность сопровождения по углу  $A$  вблизи «слепого пятна». Для ее улучшения можно: повысить частоту  $\Omega$  контура обратной связи, синтезировать специальные алгоритмы управления с настройкой на прогноз траектории КО, а также включить канал управления наклонами ВЗ. Точности сопровождения также должны улучшиться для более высоких орбит КО, а также для орбит, проходящих ближе к горизонту.

Перейдем к оценке точности компенсации создаваемых ветром силовых моментов. В силу астатизма первого порядка, среднее значение ветрового момента скомпенсируется интегральными звеньями в обратных связях.

Если в ветровом моменте доминирует одна гармоника с низкой частотой  $\omega \ll \Omega$ , то для амплитуды ошибки будем иметь:  $A_e \approx (A_f / \Omega^2) (\omega / \Omega)$ . Например, при  $\Omega = 6.28 \text{ рад/сек}$ ,  $A_f = M_{\text{в}} / I = 1000 \text{ н} \cdot \text{м} / 100000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $\omega = 3 \text{ рад/сек}$  получим  $A_e \approx 25 \text{ угл.сек}$ . Чтобы ее уменьшить, можно использовать ветрозащиту, ввести контура управления по возмущениям, а также включить канал управления ВЗ.

*Оценка силовых требований к приводам сопровождения.* Для определенности выберем диаметр ГЗ телескопа  $D_a = 3 \text{ м}$ . Массу его поворачиваемой части по углу азимута оценочно зададим с двадцатикратным увеличением:  $m_A = 20 D_a = 60 \text{ т}$ , а массу наклоняемой части по углу высоты – в три раза меньше:  $m_H = m_A / 3 = 20 \text{ т}$ . Моменты инерции по осям оценим сверху по формулам:

$$I_A = m_A (1.3 D_a / 2)^2 / 2 = 120 \text{ т} \cdot \text{м}^2, \quad I_H = m_H D_a^2 / 3 = 60 \text{ т} \cdot \text{м}^2$$

соответственно по расчетным моделям диска и стержня.

Тогда для создания ускорения  $\varepsilon_A^* = 0.026 \text{ рад/сек}^2$  потребуется силовой момент привода по углу азимута:  $M_A^* = I_A \varepsilon_A^* = 3120 \text{ н} \cdot \text{м}$ , а для создания ускорения  $\varepsilon_H^* = 0.004 \text{ рад/сек}^2$  – момент по углу высоты:  $M_H^* = I_H \varepsilon_H^* = 240 \text{ н} \cdot \text{м}$ .

Через массы подвижных частей также оценим возникающие моменты трения:  $M_{mp} = mg R_n f_{mp}$ . Так, для подшипников с радиусом  $R_n = 0.5 \text{ м}$  и коэффициентом трения  $f_{mp} = 0.003$  соответственно получим:  $M_{A,mp} = 1000 \text{ н} \cdot \text{м}$ ,  $M_{H,mp} = 300 \text{ н} \cdot \text{м}$ .

При строгании с места увеличим их примерно в 1.5 раза:  $M_{mp}^{max} = 1.5 M_{mp} \Rightarrow M_{A,mp}^{max} = 1500 \text{ н} \cdot \text{м}$ ,  $M_{H,mp}^{max} = 450 \text{ н} \cdot \text{м}$ .

Кроме моментов трения, важнейшими моментами сопротивления являются моменты ветровых нагрузок:  $M_e = F_e l_e = l_e S \rho_a V^2 / 2$ , где сила ветра  $F_e = p_e S$  действует на плече  $l_e$  с давлением ветра  $p_e = \rho_a V^2 / 2$  и площадью неуравновешенности  $S$ . Для плотности атмосферы  $\rho_a = 1.5 \text{ кг/м}^3$ , выбирая максимальную скорость ветра  $V = 20 \text{ м/сек}$  (при сильном ветре), получим  $p_e = 300 \text{ н/м}^2$ . Например, для  $S = 4 \text{ м}^2$  и  $l_e = 2.5 \text{ м}$  будем иметь  $M_e = 3000 \text{ н} \cdot \text{м}$ , что почти в три раза превосходит момент трения:  $M_{A,e}^{max} = 3M_{A,mp} = 3000 \text{ н} \cdot \text{м}$ .

Случайные флуктуации  $\delta M_e$  ветрового момента  $M_e$  оцениваются через флуктуации скорости ветра  $\delta V$  по формуле:  $\delta M_e \approx M_e (2 \delta V / V)$ . Принимая  $\delta V / V \approx 1/6$ , получим:  $\delta M_{A,e}^{max} = M_{A,e}^{max} / 3 = 1000 \text{ н} \cdot \text{м}$ .

С учетом «закона  $3\sigma$ » оценим максимальный противодействующий момент относительно вертикальной оси:  $M_A^{max} = M_{A,mp}^{max} + M_{A,e}^{max} + 3 \delta M_{A,e}^{max} = 7500 \text{ н} \cdot \text{м}$ . Его примем за максимальное значение управляющего момента  $M_{A,U}^{max} = 7500 \text{ н} \cdot \text{м}$  (данное значение можно при необходимости дополнительно увеличить с учетом запаса на динамичность от 1.2 до 1.5 раз).

В условиях среднего ветра разумно не работать на предельных возможностях электроприводов, а ограничиваться номинальным значением момента управления, например:  $M_{A,U}^{ном} = 4000 \text{ н} \cdot \text{м}$ . В этом случае максимальное и номинальное развиваемые угловые ускорения соответственно составят:

$$\varepsilon_A^{max} = (M_{A,U}^{max} - M_{A,mp}) / I_A = 0.054 \text{ рад/сек}^2 = 3.1 \text{ угл.град/сек}^2 ;$$

$$\varepsilon_A^{ном} = (M_{A,U}^{ном} - M_{A,mp}) / I_A = 0.025 \text{ рад/сек}^2 = 1.4 \text{ угл.град/сек}^2 .$$

Для того, чтобы переходные процессы по углам  $A$  и  $H$  протекали примерно одинаково, такие же угловые ускорения примем и по углу высоты:  $\varepsilon_H^{max} = 0.054 \text{ рад/сек}^2 = 3.1 \text{ угл.град/сек}^2$ ,  $\varepsilon_H^{ном} = 0.025 \text{ рад/сек}^2 = 1.4 \text{ угл.град/сек}^2$ . Отсюда:

$$M_{H,U}^{ном} = I_H \varepsilon_H^{ном} + M_{H,mp} = 1800 \text{ н} \cdot \text{м}, M_{H,U}^{max} = 2M_{H,U}^{ном} = 3600 \text{ н} \cdot \text{м}.$$

При этом на ветровые нагрузки отводится  $M_{H,U}^{max} - M_{H,mp}^{max} \approx 3000 \text{ н} \cdot \text{м}$  (для сравнения – по углу  $A$  отводилось  $6000 \text{ н} \cdot \text{м}$ ).

Выбрав угловые ускорения, можно также оценить эксплуатационную полосу частот приводов (по аналогии с предыдущими формулами).

*Оценка жесткостных требований к приводам сопровождения.* В качестве примера рассмотрим ранее выбранные параметры: максимальные и номинальные моменты управления:  $M_{A,U}^{max} = 7500 \text{ н}\cdot\text{м}$ ,  $M_{H,U}^{max} = 3600 \text{ н}\cdot\text{м}$ ,  $M_{A,U}^{ном} = 4000 \text{ н}\cdot\text{м}$ ,  $M_{H,U}^{ном} = 1800 \text{ н}\cdot\text{м}$ ; точность:  $\delta\varphi = 1 \text{ угл.сек}$  и моменты инерции:  $I_A = 120 \text{ т}\cdot\text{м}^2$ ,  $I_H = 60 \text{ т}\cdot\text{м}^2$ . Моменты инерции роторов электродвигателей примем в 1000 раз меньшими:  $I_{Ap} = 120 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $I_{Hp} = 60 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

Оценим сначала жесткость  $C_y$  силовой упругой передачи от двигателя к телескопу. Чтобы возникающие упругие деформации не превышали точность наведения, требуется:  $C_y > C_y^* = M_U^{ном}/\delta\varphi$ ;  $C_{yA}^* = 0.82 \cdot 10^9 \text{ н}\cdot\text{м/рад}$ ,  $C_{yH}^* = 0.37 \cdot 10^9 \text{ н}\cdot\text{м/рад}$  (если использовать максимальные значения моментов, данные значения следует примерно удвоить).

Оценим частоты резонансных колебаний двухмассовой системы «ротор – упругая передача – нагрузка»:  $\Omega_y = [C_y^* (1/I + 1/I_p)]^{1/2} \approx [C_y^*/I_p]^{1/2} = \Omega_{yp}$ .

Тогда  $\Omega_{yp A,H} \approx 0.25 \cdot 10^4 \text{ рад/сек} \approx 400 \text{ Гц}$ . Так как такие высокие частоты имеют быстрое затухание, поэтому их не принимаем во внимание.

Значительно больший интерес представляют частоты упругих колебаний инерционной нагрузки (телескопа) на упругом валу. Ротор при этом фиксируется активно, через обратную связь. Здесь будем иметь:  $\Omega_y = [C_y^*/I]^{1/2}$  или  $\Omega_{y A,H} \approx 0.25 \cdot 10^2 \text{ рад/сек} \approx 4 \text{ Гц}$ .

Такие частоты могут возбуждаться, например, флуктуациями ветра. Для их активного демпфирования потребуются частоты контуров управления по углам  $A$  и  $H$  выше 4 Гц. Иначе демпфирование частот за полосой пропускания контуров управления придется обеспечивать менее эффективными пассивными демпферами. В случае же их отсутствия будем иметь только очень слабое конструкционное демпфирование в материале.

Оценим механические параметры статоров электродвигателей. На них противодействуют электромагнитные моменты управления. В свою очередь, возни-

кающие упругие колебания статоров могут передаваться через противоЭДС на роторы и через упругую передачу на телескоп. Поэтому их резонансные частоты желательно выбирать выше ранее оцененных частот в 4 Гц.

Заметим, что в полосе частот встроенных контуров электродвигателей по току (часто немногим выше 10 Гц), влияние статора через противоЭДС на ротор будет активно уменьшаться.

Упругие деформации статоров зависят от частот их колебаний и могут быть оценены по формулам:  $\delta\varphi_{cm} = M_U^{ном}/C_{cm}$ ,  $C_{cm} = I_{cm} \Omega_{cm}^2$ . Например, при  $\Omega_{cm} = 10 \text{ Гц} = 62.8 \text{ рад.сек}$ ,  $I_{cm} = I_p$  будем иметь:  $C_{cm,A} = 4.6 \cdot 10^5 \text{ н}\cdot\text{м/рад}$ ,  $C_{cm,H} = 2.3 \cdot 10^5 \text{ н}\cdot\text{м/рад}$ ,  $\delta\varphi_{cm,A,H} \approx 30 \text{ угл.мин}$ . Это указывает на целесообразность значительного увеличения резонансных частот статоров.

*Оценка электромеханических требований к приводам сопровождения.*

Проведем ее без учета встроенных контуров управления по току и угловой скорости (они будут проанализированы в следующем параграфе). В этом случае наиболее важна стационарная зависимость электромагнитного момента от угловой скорости:  $M = \beta(\omega_{xx} - \omega)$ ,  $\beta = c_J c_e / R$ ,  $\omega_{xx} = u / c_e$ ,  $c_J = M / J$ , где  $\beta$  – жесткость механической характеристики;  $\omega_{xx}$  – скорость холостого хода;  $c_J$  – постоянная по току  $J$ ;  $c_e$  – постоянная противоЭДС (обычно  $c_e \approx c_J$ ),  $R$  – сопротивление обмоток,  $u$  – управляющее напряжение,  $U = \beta\omega_{xx}$  – управляющее воздействие,  $\beta\omega$  – его ослабление из-за противоЭДС (действует как пассивное демпфирование с коэффициентом  $\beta$ ).

Для угла  $A$ , подставляя номинальный момент и угловую скорость  $\omega_A^* = 0.2 \text{ рад/сек}$ , получим зависимость:  $4000 = \beta_A(\omega_{xx,A} - 0.2)$ . В качестве примера выберем номинальные ток и напряжение:  $J^{ном} = 4 \text{ А}$ ,  $u^{ном} = 300 \text{ В}$ . Для них:  $c_J = M^{ном} / J^{ном} = 1000 \text{ н}\cdot\text{м/А}$ ,  $c_e \approx 1000 \text{ В}\cdot\text{сек/рад}$ ,  $\omega_{xx} = u^{ном} / c_e = 0.3 \text{ рад/сек}$ ,  $\beta = M^{ном} / (\omega_{xx} - \omega^*) = 40000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{сек}$ ,  $R = c_J c_e / \beta = 25 \text{ Ом}$ .

Рассмотрим уравнение для скорости:

$$[T_m p (T_{эм} p + 1) + 1] \omega = T_m T_{эм} [p^2 + 2\xi\Omega p + \Omega^2] \omega = U/\beta,$$

где  $T_{эм} = L/R$  - электромагнитная постоянная;  $T_m = (I + I_p)/\beta \approx I/\beta = 3$  сек - электромеханическая постоянная (при жесткой связи ротора с телескопом).

Например, для индуктивности обмоток  $L = 0.05$  Гн :  $T_{эм} = 0.002$  сек. При этом резонансная частота:  $\Omega = 1 / (T_m T_{эм})^{1/2} = 13$  рад/сек = 2 Гц, а коэффициент демпфирования:  $\xi = 0.5 (T_m / T_{эм})^{1/2} = 19 \gg 1$ . Из-за такой сильной задемпфированности можно использовать упрощенное уравнение:  $[T_m p + 1] \omega = U/\beta$  (соответствует:  $I\varepsilon = M = \beta(\omega_{xx} - \omega) = U - \beta\omega$ ).

В более общем случае можно учесть функцию «зубцовых» пульсаций вида:  $\varepsilon_{\Delta} \approx \Sigma \Delta_k \cos [(k-1)N\varphi]$ . В первом приближении четные номера можно не учитывать, а для нечетных принять оценки:  $\Delta_k < 1/3, 1/5, 1/7$  для  $k = 3, 5, 7$  и т.д. При этом уравнение изменится:  $\{T_m p + 1\} \omega = \omega_{xx} + \varepsilon_{\Delta}(\omega_{xx} - \omega)$ . Наименьший период пульсаций и соответствующая ему максимальная частота пульсаций составят:  $T_n = 2\pi/kN\omega^* = 0.6/k$  сек,  $f_n = 1/T_n = 1.7k$  Гц ( $\Omega_n = 2\pi f_n = 10k$  рад/сек).

Например, при отклонении угловой скорости от стационарного значения в 1% будем иметь для  $k = 3$  гармоническое возмущение угловой скорости с частотой 5 Гц и амплитудой  $(\omega_{xx} - \omega^*)/3 = 0.01 \omega^*/3 = 2$  угл.мин / сек.

Аналогичные оценки можно выполнить и для угла  $H$ . Принимая:  $\omega_H^* = 0.02$  рад/сек = 1.1 угл.град / сек,  $M^{ном} = 1800 = \beta_H(\omega_{xx,H} - 0.02)$ ,  $J^{ном} = 1.8$  А,  $R = 50$  Ом, здесь найдем:  $c_J = M^{ном}/J^{ном} = 1000$  н·м/А,  $c_e \approx 1000$  В·сек / рад,  $\beta = c_J c_e / R = 20000$  кг·м<sup>2</sup>/сек,  $\omega_{xx} = \omega^* + M^{ном}/\beta = 0.11$  рад/сек,  $u^{ном} = \omega_{xx} c_e = 110$  В,  $T_m \approx 1/\beta = 3$  сек.

В заключение отметим, что элементы приведенной методики расчета с небольшими изменениями можно применить и к случаям более высоких орбит, требующих учета собственного вращения Земли, а также для астрономических объектов. Однако правильнее здесь использовать формулы предыдущего параграфа.

В итоге, предложенная методика задания оценочных комплексных требований к приводам сопровождения в альт-азимутальной монтировке включает взаимосвязанный многофакторный учет множества эксплуатационных условий и режимов работы большого наземного телескопа. Ее легко реализовать в Excell и применять в качестве мобильного приложения для обсуждения текущих вопросов.

Вычисляемые при этом значения параметров и выявляемые закономерности их взаимосвязи рекомендуется рассматривать как предварительные значения для формирования заданий на уточненное моделирование. Последние по мере повышения глубины проработки конструкции большого телескопа будут являться необходимыми этапами многомерной градиентной параметрической оптимизации многоканального управления большими наземными телескопами.

### **5.3. Модели прецизионных электроприводов наведения больших телескопов и синтез контуров управления ими в условиях возмущений**

Разработке данной темы посвящены многочисленные статьи [12, 57, 83, 87, 114, 147, 148 – 151, 164, 177, и др. ]. В данном параграфе в наибольшей мере будем использовать [137, 138], а также книги [133, 169]. Изложение материала соответствует статьям автора [253, 270].

В электроприводах ОПУ больших оптических телескопах наиболее широко применяются низкоскоростные бесконтактные магнитные двигатели постоянного тока без редукторов. Для синтеза и анализа их контуров управления требуется рассмотреть три задачи: 1) построение модели создаваемого электроприводом управляющего момента с учетом внутренних возмущений; 2) ее увязка с моделью телескопа и построение модели объекта управления; 3) синтез внутренних контуров обратных связей, компенсирующих внутренние и внешние возмущения.

Для уточненного исследования влияния электрических и механических параметров электроприводов на эффективность отслеживания выбранных космических объектов разработаем детализированную модель, в которой учтем следующие неблагоприятные факторы: 1) резонансные микроколебания упруго закрепленного статора, влияющие на электромагнитный момент через противоЭДС  $\beta(\omega_d + \omega_{ст})$ ; 2) функция периодических электрических пульсаций момента управления  $\varepsilon_{\Delta}(\varphi_d + \varphi_{ст})$ ; 3) упругость передачи от ротора двигателя к телескопу и др.

*Построение модели управляющего момента электропривода.* В электродвигателе постоянного тока ротор состоит из постоянных магнитов, а статор имеет трехфазную схему возбуждения. Электромагнитный момент:

$$M_{эм} = C_{эм} (\Phi_x J_y + \Phi_y J_x); \quad J_x = (J_3 - J_2) \cos(\pi/6), \quad J_y = J_1 - (J_3 + J_2) \sin(\pi/6),$$

$$J_j = (\gamma_j - e_j)/(R_j + L_j p); \quad e_j = -p \psi_j,$$

где  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования;  $C_m$  – конструктивная постоянная двигателя; индексы «x» и «y» обозначают проекции тока (J) и магнитного потока (Φ) на оси x и y;  $J_j$  ( $j=1,2,3$ ) – фазовые токи;  $u_j$  – фазовые напряжения;  $\gamma$  – коэффициент усиления;  $e_j$  – противоЭДС;  $\psi_j$  – потокосцепления поля ротора с j-ой обмоткой.  $R_j, L_j$  – сопротивление и индуктивность обмоток.

Для ротора с  $N$  парами полюсов магнитный поток задается проекциями:

$$\Phi_x(N\varphi) = \Phi \cdot [\cos(N\varphi) + \varepsilon_{\phi x}] = \Phi \cdot [\exp(iN\varphi) + \varepsilon_{\phi x}],$$

$$\Phi_y(N\varphi) = \Phi \cdot [\sin(N\varphi) + \varepsilon_{\phi y}] = \Phi \cdot [\exp(i(N\varphi + \pi/2)) + \varepsilon_{\phi y}],$$

где  $\varphi$  – угловая координата ротора,  $\Phi = \text{const}$ ,  $\varepsilon_\phi$  – ошибки разложения периодического по углу магнитного потока в ряд Фурье:

$$\varepsilon_{\phi x} = \Sigma [\Delta_k \exp(ikN\varphi)], \quad \varepsilon_{\phi y} = \Sigma [\Delta_k \exp(i(kN\varphi + \pi/2))], \quad k = 2,3,4, \dots$$

Фазовые напряжения формируются микропроцессором через управляющее напряжение  $u$  в виде:

$$U_j = u \cos(\alpha_j) = u \exp(i\alpha_j), \quad \alpha_j = N\varphi + (2\pi/3)(j - 1), \quad j = 1,2,3.$$

Потокосцепления  $\psi_j$  пропорциональны числу витков  $w_j$  в обмотках (в дальнейшем полагаем  $w_j = w = \text{const}$ ) и магнитному потоку. Для фазовых противоЭДС:  $e_j = wN\Phi \omega [\exp(i\alpha_j) + \Sigma(k\Delta_k \exp(ik\alpha_j))]$ . Тогда:

$$J_j = [(\gamma_j - c_e \omega) \exp(i\alpha_j) - c_e \omega \Sigma(k\Delta_k \exp(ik\alpha_j))]/(R_j + L_j p),$$

где  $c_e = wN\Phi$  – постоянная противоЭДС.

Для случая  $L_j = L = \text{const}$ ,  $R_j = R = \text{const}$ ,  $j = 1,2,3$  получим:

$$J_x = [(\gamma_j - c_e \omega)/(R + L p)] \exp(i N\varphi) [\exp(i4\pi/3) - \exp(i2\pi/3)] 3^{1/2}/2 + \varepsilon_{Jx} =$$

$$= (3/2) [(\gamma_j - c_e \omega)/(R + L p)] \sin(N\varphi) + \varepsilon_{Jx},$$

$$J_y = [(\gamma u - c_e \omega)/(R + L p)] \exp(i N \varphi) \{1 - 0.5[\exp(i 4 \pi/3) + \exp(i 2 \pi/3)]\} + \varepsilon_{Jy} = \\ = (3/2) [(\gamma u - c_e \omega)/(R + L p)] \cos(N \varphi) + \varepsilon_{Jy},$$

где возмущения  $\varepsilon_{Jx}$ ,  $\varepsilon_{Jy}$  порождаются неравномерностью противоЭДС:

$$\varepsilon_{Jx} = - [c_e \omega/(R + L p)] \Sigma \{k \Delta_k \exp(i k N \varphi) [\exp(i k 4 \pi/3) - \exp(i k 2 \pi/3)]\} 3^{1/2}/2, \\ \varepsilon_{Jy} = - [c_e \omega/(R + L p)] \Sigma \{k \Delta_k \exp(i k N \varphi) [1 - 0.5(\exp(i k 4 \pi/3) + \exp(i k 2 \pi/3))]\}.$$

В итоге электромагнитный момент опишется зависимостью:

$$M_{эм} = c_J J (1 + \varepsilon_{\Delta}), \quad J = (\gamma u - c_e \omega)/(R + L p); \quad (5.12)$$

$$\varepsilon_{\Delta} = C_m (\varepsilon_{\Phi x} J_y + \varepsilon_{\Phi y} J_x + \Phi_x \varepsilon_{Jy} + \Phi_y \varepsilon_{Jx} + \varepsilon_{Jx} \varepsilon_{\Phi y} + \varepsilon_{Jy} \varepsilon_{\Phi x}) / c_J J \approx \\ \approx \Sigma \Delta_k \cos[(k-1)N\varphi] + [\Phi_x \varepsilon_{Jy} + \Phi_y \varepsilon_{Jx}] C_m / c_J J$$

где  $c_J = 3\Phi C_m/2$  – постоянная по току (обычно принимают  $c_J = c_e$ , хотя для некоторых электродвигателей постоянные  $c_J$  и  $c_e$  могут не совпадать).

Функция  $\varepsilon_{\Delta}$  периодических пульсаций в случае доминирования одной гармоники:  $\varepsilon_{\Delta} \approx \Delta \cos(kN\varphi)$ , другие частные случаи  $\varepsilon_{\Delta}(\varphi)$  приведены в [253].

*Построение модели электропривода в составе телескопа.* Сначала отдельно рассмотрим уравнение движения ротора электродвигателя:

$$I p \omega = M_{\Sigma} = M_{эм} - M_n - M_{nm},$$

где:  $\omega$  – угловая скорость ротора;  $I$  – его момент инерции;  $M_{\Sigma}$  – суммарный момент;  $M_{эм}$  – электромагнитный момент управления (5.12);  $M_n$  – момент, передаваемый через упругую передачу от нагрузки (телескопа);  $M_{nm} = I_v \omega + S \operatorname{sign}(\omega)$  – момент потерь;  $I_v$  и  $S$  – соответственно малые константы вязкого (создаются вихревыми токами) и сухого (в подшипниках) трения.

После подстановки (5.12), преобразуем уравнение ротора к виду:

$$(p + \nu) \omega = \{c_J J (1 + \varepsilon_{\Delta}) - M_c\} / I, \quad J = (\gamma u - c_e \omega) / [R(1 + T_{эм} p)], \quad (5.13)$$

где  $T_{эм} = L/R$  – электромагнитная постоянная (сек),  $M_c \equiv M_n + S \operatorname{sign}(\omega)$ .

С учетом шумов напряжения ( $\eta_u$ ) и противоЭДС ( $\eta_e$ ), представим модель (5.13) электродвигателя с пульсациями в виде схемы на рисунке 5.3. Из нее получаем следующую передаточную функцию:

$$\omega = W_{\delta}(p) \{ (1 + \varepsilon_{\Delta}) (\gamma u + \eta) / c_e (1 + T_{эм} p) - M_c T_m / I \}, \quad (5.14)$$

где:  $W_{\delta}(p) = (1 + T_{эм} p) / \{ 1 + \varepsilon_{\Delta} + T_m(p + \nu)(1 + T_{эм} p) \}$ ;  $T_m = I R / c_J c_e$  – электро-механическая постоянная (сек);  $\eta = \eta_u + \eta_e$  – суммарные шумы.

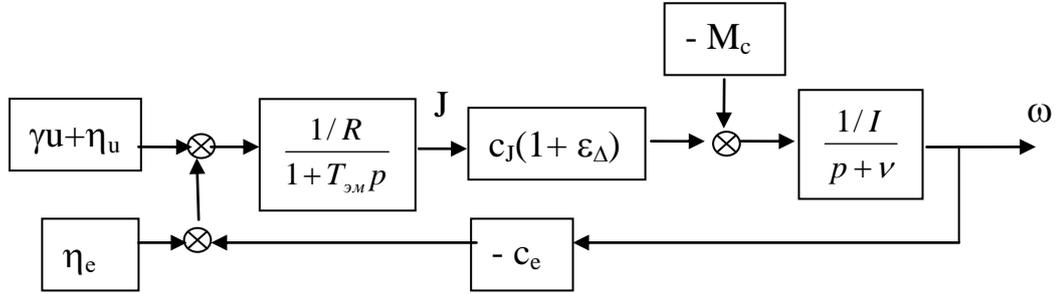


Рисунок 5.3 – Структурная схема электродвигателя с пульсациями

Для упрощения аналитических выкладок примем:  $\eta = 0$ ,  $\nu = 0$ . Тогда стационарное решение (5.14) при  $p = 0$ :  $(1 + \varepsilon_{\Delta}) (\omega_{cm} - \omega_{xx}) = -M_c / \beta$ , где,  $\omega_{xx} = \gamma u / c_e$  – скорость холостого хода (при  $M_c = 0$ );  $\beta = I / T_m = c_J c_e / R$  – жесткость механической характеристики. Видно, что функция пульсаций  $\varepsilon_{\Delta}$  ( $N\varphi$ ) влияет и на момент  $M_c$ , идущий на нагрузку, и на выходную скорость  $\omega_{cm}$ .

Для случая постоянного напряжения  $u$  уравнение (5.14) принимает вид:

$$\{ T_m T_{эм} p^2 + T_m p + 1 + \varepsilon_{\Delta} \} \omega - (1 + \varepsilon_{\Delta}) \omega_{xx} = - (1 + T_{эм} p) M_c / \beta.$$

Полагая здесь  $M_c = 0$  и вводя управляющий сигнал  $U = \gamma u / c_e$  ( $U = \omega_{xx}$ ), преобразуем его к виду:

$$T_m T_{эм} \{ p^2 + 2\xi\Omega p + \Omega^2 \} \omega = U + \varepsilon_{\Delta} (U - \omega), \quad (5.15)$$

$$\Omega \equiv \text{sqrt}(1 / T_m T_{эм}) = \text{sqrt}(c_J c_e / L I), \quad \xi \equiv 0.5 \text{sqrt}(T_m / T_{эм}) = 0.5 R \text{sqrt}(I / c_J c_e).$$

Для постоянного управляющего сигнала  $U_0 = \text{const}$  при  $\varepsilon_{\Delta} = 0$  имеем установившееся стационарное решение  $\omega = \omega_0$ . Если подставить  $\varphi = \omega_0 t$  в  $\varepsilon_{\Delta} \approx \Delta \cos(kN\varphi)$ , найдем период пульсаций по углу:  $T_n = 2\pi / kN\omega_0$  и соответствующую ему частоту пульсаций:  $\Omega_n = 2\pi / T_n = kN\omega_0$ .

Перейдем к более полной упругой модели электроприводов сопровождения в составе телескопа. Для ее составления выделим четыре важнейших механических элемента: ротор электродвигателя с постоянными магнитами (индекс «д»), упруго закрепленный статор (индекс «ст»; принимает на себя момент управления с обратным знаком), нагрузку на двигатель со стороны телескопа (индекс «т»; в первом приближении – твердотельную) и упругую передачу, связывающую ротор с телескопом (индекс «у»; обычно ее считают безинерционной). Их динамические модели выберем в виде:

$$\begin{aligned} A_d(p) \omega_d &= M_{эм} - M_y - M_{nd}, & A_d(p) &\equiv I_d p, & M_{эм} &= M \{1 + \varepsilon_\Delta (\varphi_d + \varphi_{cm})\}, \\ A_m(p) \omega_m &= M_y - M_{nm} + M_f, & M_y &= (\mu + C/p)(\omega_d - \omega_m), \\ A_{cm}(p) \omega_{cm} &= M_{эм}, & A_{cm}(p) &\equiv I_{cm} (p^2 + 2\xi_{cm}\Omega_{cm}p + \Omega_{cm}^2)/p, \end{aligned} \quad (5.16)$$

где:  $p \equiv d/dt$ ;  $\omega_d = p\varphi_d$ ,  $\omega_{cm} = p\varphi_{cm}$ ,  $\omega_m = p\varphi_m$  - угловые скорости соответственно ротора электродвигателя, его статора (в противоположном направлении) и телескопа;  $A_d$ ,  $A_{cm}$ ,  $A_m$  - дифференциальные операторы, обратные передаточным функциям  $W_d(p) = 1/A_d$ ,  $W_{cm}(p) = 1/A_{cm}$ ,  $W_m(p) = 1/A_m$ ;  $I_d$ ,  $I_{cm}$  - моменты инерции ротора и статора;  $\Omega_{cm}$  - низшая резонансная частота колебаний упруго закрепленного статора,  $\xi_{cm}$  - соответствующий ей коэффициент демпфирования;  $M_{nd}$ ,  $M_{nm}$  - моменты потерь по отношению к ротору и нагрузке (вызванные сухим и вязким трением; в частности для сухого трения:  $M_n = S \text{sign}(\omega)$ );  $M_y$  - момент, создаваемый упругой передачей с коэффициентами упругости  $C$  и вязкости  $\mu$ ;  $M_f$  - момент от внешних воздействий.

Если внутренними пульсациями пренебречь ( $\varepsilon_\Delta = 0$ ), для момента (5.12) удобнее использовать следующее преобразованное уравнение:

$$(T_{эм} p + 1) M = U - \beta(\omega_d + \omega_{cm}), \quad (5.17)$$

где:  $T_{эм} = L/R$  - электромагнитная постоянная (сек),  $\beta = c_J c_e / R$  - жесткость механической характеристики,  $U = \gamma i_{cJ} / R$  - управляющее воздействие.

Уравнения (5.16), (5.17) описывают модель телескопа с упругой передачей по каждому из углов:  $A$  или  $H$ . Варианты их упрощения обсуждаются в [270].

Отметим присущие такому электроприводу внутренние возмущения. Во-первых, на электромагнитный момент через противоЭДС  $\beta(\omega_d + \omega_{ст})$  могут влиять резонансные микроколебания упруго закрепленного статора. Вторым источником возмущений может стать функция периодических пульсаций  $\varepsilon_{\Delta}(\varphi_d + \varphi_{ст})$ . В третьих, упругая передача от ротора двигателя к телескопу может стать причиной соответствующих резонансных колебаний (нескольких типов).

*Синтез внутренних контуров обратных связей.* На практике его обычно сначала проводят на более грубых (упрощенных) механических моделях объекта управления, а в последующем вводят дополнительные составляющие управления для учета более тонких упругих свойств конструкции телескопа.

Для повышения точностных характеристик прецизионных электроприводов управления телескопом в ОПУ применяют три вложенных контура управления: 1) контур по току – призван подавлять низкие и средние частоты возмущений, приходящие через противоЭДС; 2) контур по скорости – призван на средних частотах активно демпфировать возможные упругие микроколебания конструкции, а на низких частотах – обеспечивать демпфирование переходных процессов в контуре по ошибке слежения; 3) контур по ошибке слежения – призван обеспечивать низкочастотный плавный процесс слежения.

Обобщенная схема такой трехконтурной системы подчиненного управления электроприводом приведена на рисунке 5.4. Она преобразует входную координату  $y_3$  в выходную  $x_3$  с подавлением возмущений  $f_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

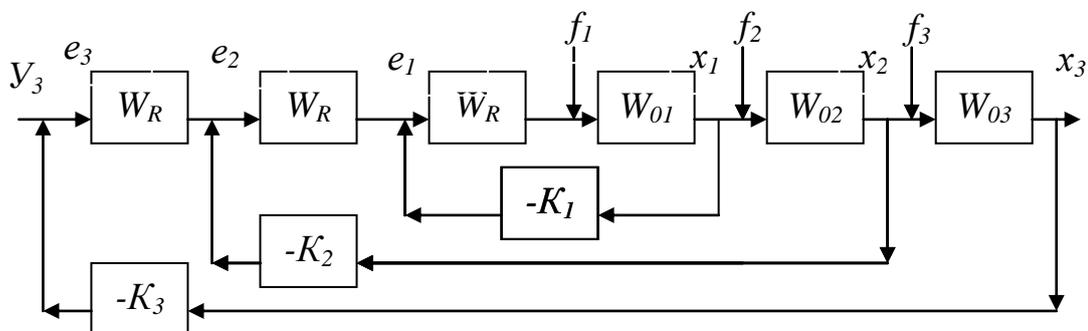


Рисунок 5.4 – Общая схема трехконтурной системы подчиненного управления

Здесь:  $W_{Ri} = 1/A_{Ri}$ ,  $W_{0i} = 1/A_{0i}$  – соответственно передаточные функции регуляторов и объектов управления,  $K_i$  – коэффициенты усиления обратных связей.

Выпишем зависимости выходных переменных от входных:

$$x_1 = W_{\Sigma 1} (y_1 + \delta y_1), \quad \delta y_1 = f_1 / W_{R1};$$

$$x_i = W_{\Sigma i} (y_i + \delta y_i), \quad \delta y_i = (f_i / W_{\Sigma, i-1} + \delta y_{i-1}) / W_{Ri}, \quad i = 2, 3;$$

где:  $1 / W_{\Sigma i} = K_i + 1 / W_{0i} W_{Ri} W_{\Sigma, i-1}$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;  $W_{\Sigma 0} = 1$ .

Точность воспроизведения выходными переменными входных с подавлением возмущений  $f_i$  будут характеризовать ошибки:

$$e_i = y_i - K_i x_i = W_{e1i} y_i - W_{e2i} \delta y_i, \quad W_{e1i} \equiv 1 - K_i W_{\Sigma i} = 1 / (1 + W_{0i} W_{Ri} W_{\Sigma, i-1}),$$

$$W_{e2i} \equiv K_i W_{\Sigma i} = 1 / (1 + 1 / W_{0i} W_{Ri} W_{\Sigma, i-1}), \quad i = 1, 2, 3.$$

В рамках такой схемы рассмотрим более детально каждый из контуров управления электродвигателями и их подчиненную взаимосвязь.

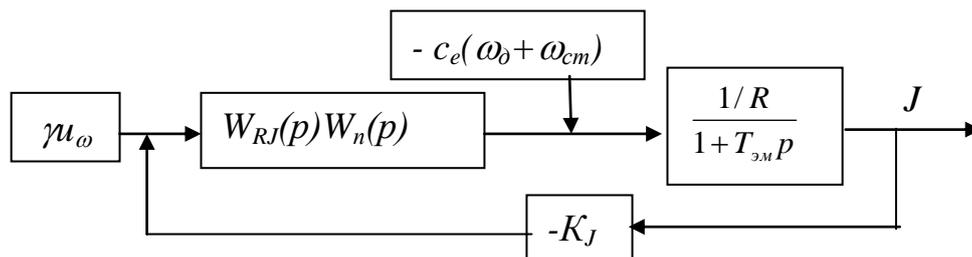


Рисунок 5.5 – Схема подчиненного контура по току

Для схемы контура по току (Рисунок 5.5):  $y_1 = \gamma u_\omega$ ;  $W_n(p) = K_n / (1 + \tau p)$  – передаточная функция силового преобразователя (преобразует переменный ток в постоянный с коэффициентом усиления  $K_n$  и малым временным запаздыванием  $\tau \ll 1$ ; часто  $\tau \approx 0.01$  сек).

После введения такого контура по току, уравнение (5.17) примет вид:

$$R (T_{эм}p + 1) J = \gamma u - c_e (\omega_d + \omega_{cm}), \quad \gamma u = W_{RJ} W_n (\gamma u_\omega - K_J J).$$

Регулятор рекомендуется настраивать на получение полинома Баттерворта соответствующего порядка в замкнутом контуре. На практике обычно выбирают простой ПИ регулятор:  $W_{RJ}(p) = K_{RJ} (1 + T_{эм}p) / T_{эм}p$ .

Для него передаточные функции разомкнутого и замкнутого контуров:

$$W_{J,раз} = W_{RJ}W_{II}/R(1 + T_{эм}p) = K_{\Sigma}/p(1 + \tau p), \quad W_J = W_{J,раз}/[1 + K_J W_{J,раз}] = \\ = 1/[K_J + 1/W_{J,раз}] = K_{\Sigma J}/[\tau^2 p^2 + p + K_{\Sigma J} K_J]; \quad K_{\Sigma J} \equiv K_{RJ} K_n / RT_{эм}.$$

Чтобы получить полином Баттерворта второго порядка в замкнутом контуре, коэффициент усиления  $K_{RJ}$  следует выбрать из условия:

$$2\tau K_J K_{\Sigma J} = 1 \quad \Rightarrow \quad W_J(p) = 1/[d^2 + 2^{1/2}d + 1] K_J \approx 1/[2\tau p + 1] K_J, \\ J = W_J(p) \{ \gamma u_{\omega} - c_e(\omega_{\delta} + \omega_{cm}) / W_{RJ} W_n \},$$

где:  $d \equiv 2^{1/2} \tau p$ ;  $K_{RJ} K_n = RT_{эм} / 2\tau K_J$ ; частота  $\Omega_J = 1/(2^{1/2} \tau)$ ; при этом перерегулирование  $\approx 4.3\%$ ; длительность переходных процессов  $\approx 4.7 \tau$ ; в стационарном режиме (при  $p = 0$ ) имеем подавление возмущений противоЭДС:  $J \approx \gamma u_{\omega} / K_J$ .

Для типичного значения  $\tau \approx 0.01$  сек будем иметь  $\Omega_J/2\pi = 1/(2^{1/2} \tau) 2\pi \approx 11$  Гц. Более же высокочастотные упругие колебания статора с ротором, вносящие вклад в противоЭДС, придется пассивно демпфировать.

В итоге, в полосе частот контура по току получили упрощенную модель:

$$[2\tau p + 1] K_J J \approx \gamma u_{\omega} \quad \Rightarrow \quad [2\tau p + 1] M \approx (c_J / K_J) \gamma u_{\omega}. \quad (5.18)$$

В соответствии со схемой на рисунке 5.6 контур по скорости и внешний контур по ошибке слежения имеют один и тот же объект управления.

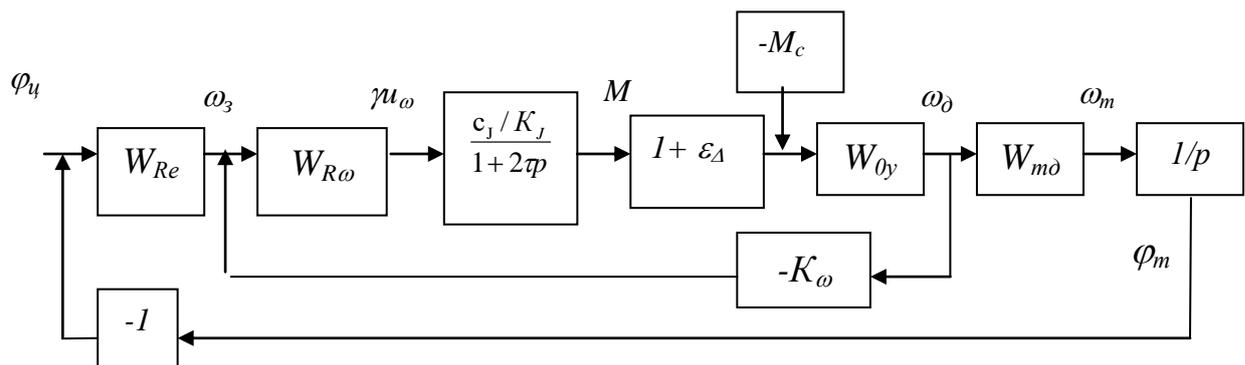


Рисунок 5.6 – Схема контуров по скорости и угловой ошибке слежения

На рисунке обозначены:  $\varphi_c$  – функция углового движения цели (или функция программного углового перемещения);  $W_{0y} = 1/\{A_m(p) + A_{\delta}(p)\}$  – передаточная функция объекта управления,  $W_{m\delta} = 1/\{1 + A_m(p)/\mu_{\Sigma}\}$  – передаточная функция уп-

ругой передачи от  $\omega_d$  к  $\omega_r$ ;  $M_c$  – момент сопротивления. Обратная связь замыкается через измерение угловой скорости  $\omega_\delta$  встроенным датчиком. Это позволяет с помощью пропорционального регулятора ввести в систему управления дифференциальное звено для активного демпфирования колебательных процессов. Частоты контура по скорости при этом должны быть ниже частот подчиненного контура по току, чтобы последний успевал подавить зависящую от  $\omega_\delta$  противоЭДС.

Синтез контура по скорости проведем без учета функции пульсаций, полагая  $\varepsilon_A = 0$ . Также в грубой модели примем:  $W_{0y} = 1 / I_\Sigma p$ ,  $I_\Sigma \equiv I_m + I_\delta$ . Тогда передаточная функция разомкнутого контура:  $W_{\omega, \text{раз}} = W_{R\omega}(p) (c_J / K_J I_\Sigma) / (2\tau p^2 + p)$ .

Если замкнутый контур настроить на фильтр Баттерворта второго порядка, следует выбрать П-регулятор:  $W_{R\omega} = K_{R\omega} = \text{const}$  с настройками:

$$W_\omega(p) = 1 / [K_\omega + 1/W_{\omega, \text{раз}}] = K_\Sigma / [2\tau p^2 + p + K_\Sigma K_\omega] = 1 / [d^2 + 2^{1/2}d + 1];$$

$$d \equiv 2^{1/2} 2\tau; \quad K_\omega \approx 1 / [4\tau + 1] K_\Sigma, \quad K_\Sigma \equiv K_{R\omega} c_J / K_J I_\Sigma; \quad 4\tau K_\omega K_\Sigma = 1.$$

В этом случае для выбранного  $K_\omega$  сначала вычисляется  $K_\Sigma$ , а потом –  $K_{R\omega}$ . Здесь получим резонансную частоту  $\Omega_\omega = 1/(2^{1/2} 2\tau)$ ; перерегулирование  $\approx 4.3\%$ , а длительность переходного процесса  $\approx 9.4\tau$ .

Если же замкнутый контур настраивать на фильтр Баттерворта третьего порядка, следует выбрать ПИ-регулятор:  $W_{R\omega}(p) = K_{R\omega} (1 + T_{R\omega} p) / T_{R\omega} p$  с настройками:  $T_{R\omega} = 8\tau$ ,  $4\tau K_\omega K_\Sigma = 1$ . В этом случае функцию:

$$W_\omega(p) = K_\Sigma (1 + T_{R\omega} p) / [(2\tau p^3 + p^2) T_{R\omega} + K_\Sigma K_\omega (1 + T_{R\omega} p)]$$

потребуется еще дополнить внешним фильтром  $W_\phi(p) = 1 / (1 + T_{R\omega} p)$ , присоединенным к регулятору  $W_{Re}$  на схеме рисунка 5.6 :

$$W_\omega W_\phi = 1 / (d^3 + 2d^2 + 2d + 1) K_\omega \approx 1 / [8\tau + 1] K_\omega,$$

где  $d = 4\tau$ ;  $K_\omega$  - задается;  $K_\Sigma$  и  $K_{R\omega}$  те же, как для П-регулятора; резонансная частота  $\Omega_\omega = 1/(4\tau)$ , перерегулирование  $\approx 8\%$ .

В итоге на выходе контура по скорости получаем:

$$\omega_\delta = W_\omega(p) \{ \omega_s - M_c / W_J W_{R\omega} R \}, \quad (5.19)$$

причем в стационарном случае (при  $p = 0$ ) для П-регулятора малый вклад  $M_c$  остается, для ПИ-регулятора – нет:  $\omega_\delta \approx \omega_3 / K_\omega$ .

Контур по скорости получается согласованным с контуром по току и зависит от величины  $\tau$ . Для  $\tau \approx 0.01$  сек имеем частоты: контур по току  $\approx 11$  Гц, контура по скорости в случае П-регулятора  $\Omega_\omega / 2\pi \approx 5.5$  Гц и в случае ПИ-регулятора  $\approx 4$  Гц. При этом верхняя часть полосы частот может использоваться в системе активного демпфирования микроколебаний конструкции телескопа за пределами полосы слежения, а нижняя часть полосы частот – для стабилизации процессов слежения относительно программного движения  $\omega_3$ .

Синтез контура по ошибке слежения  $e = \varphi_\zeta - \varphi_m \approx \varphi_\zeta - \varphi_\delta$  рекомендуется проводить из требования получения плавных переходных процессов, близких к желаемым (которые дополнительно выбираются согласованно с резонансными частотами конструкции большого телескопа). При этом понижение частот контура слежения позволит уменьшить инерционные нагрузки на деформируемую оптико-механическую конструкцию большого телескопа, а также ослабить требования к электроприводам (для оценки, запас по управляющему моменту на динамические нагрузки, по сравнению со статическими, можно выбирать не выше 1.5). Кроме этого, контур по ошибке слежения должен быть согласован с подчиненным контуром по скорости.

Для синтеза передаточной функции регулятора  $W_{Re}(p)$  рассмотрим два подхода. В первом случае с помощью ПИ-регулятора сведем замкнутый контур к плавному фильтру Баттерворта второго порядка ( $\Omega$  - частота контура):

$$p\varphi_\delta \approx \omega_3 / K_\omega = W_{Re}e / K_\omega = (2^{1/2}\Omega + \Omega^2/p)e.$$

Для повышения его астатизма введем комбинированное управление, добавляя к сигналу  $\omega_3$  рассчитываемую низкочастотную оценку  $K_\omega p\varphi_\zeta^*$  для скорости движения наблюдаемого объекта (см. рис. 5.6):  $p\varphi_\delta - p\varphi_\zeta^* \approx -pe = (2^{1/2}\Omega + \Omega^2/p)e$ .

Во втором подходе сначала выбирается желаемый момент управления электроприводом (из условия получения желаемого плавного переходного процесса):  $M = A_M(p)e$ ,  $A_M(p) = a_\delta p + a_n + a_{u1}/p + a_{u2}/p^2$ , где коэффициент  $a_\delta$  влияет на меру

демпфирования,  $a_n$  – на частоту,  $a_{u1}$  и  $a_{u2}$  – на точностные характеристики, повышая астатизм следящей системы (часто выбирают  $a_{u2} = 0$ ).

Далее он сравнивается с моментом, формируемым с помощью внутренних контуров электродвигателя с учетом схемы на рисунке 5.6:

$$M = \frac{c_J / K_J}{1 + 2\tau p} W_{R\omega}(p) \{ \omega_3(e) - K_\omega \omega_0 \}.$$

Например, для наиболее простого П-регулятора  $W_{R\omega} = K_{R\omega} = \text{const}$ , из такого сравнения будем иметь (пренебрегая  $\tau \leq 0.01$  сек):

$$a_0 = K_\omega K_{R\omega} c_J / K_J, \quad \omega_3(e) = (K_\omega / a_0) (a_n + a_{u1}/p + a_{u2}/p^2) e = W_{Re} e.$$

Объединение рассмотренных моделей трехконтурной системы управления электроприводами с оптико-механической моделью упругого большого телескопа позволяет сформировать полную модель процесса управления телескопом с помощью электроприводов по углам азимута  $A$  и высоты  $H$ .

Приведенные формулы являются также основой параметрического синтеза электро-механических параметров электроприводов наведения больших наземных телескопов в ОПУ. Они входят составной частью в более общий структурно-параметрический синтез многосистемного наведения, проводимый в главе 7. Получаемые там желаемые переходные процессы для ошибки общего наведения телескопа в ОПУ (характеризуемые, в том числе, полиномами Баттерворта соответствующих порядков) нетрудно по приведенным зависимостям декомпозировать в конкретные значения определяющих параметров электроприводов наведения.

## 5.4 Выводы по главе 5

1. Координатная увязка следящего телескопа с космическими объектами наблюдения позволяет преобразовать абсолютные координаты астрономических и движущихся по околоземным орбитам космических объектов в отслеживаемую наземным телескопом траекторию его углового движения, которая формирует основные требования к электроприводам к следящего наземного телескопа.

2. Предложенная методика задания начальных требований к приводам слежения телескопа в альт-азимутальной монтировке позволяет при формировании производственного задания на их разработку на первых этапах эскизного проекта взаимосвязано оценить следующие шесть групп определяющих параметров: 1) скоростных, 2) частотных, 3) точностных, 4) силовых, 5) жесткостных, 6) электромеханических. Найденные значения параметров следует рассматривать как предварительные для проведения последующей многомерной градиентной параметрической оптимизации многосистемного управления телескопом.

Выполненные расчеты для отслеживания низкоорбитального объекта наблюдения показали ее непротиворечивость с известными результатами.

3. Для создания сверхточных электроприводов слежения больших наземных телескопов требуется вводить в них трехконтурную подчиненную обратную связь, включающую: 1) контур по току – для подавления возмущений, приходящие через противоЭДС; 2) контур по скорости – для демпфирования упругих микроколебаний конструкции на верхних частотах и переходных процессов в контуре слежения на нижних частотах; 3) контур по ошибке слежения – для обеспечения желательного плавного низкочастотного процесса сопровождения, инерционно чрезмерно не деформирующую упругую конструкцию большого телескопа. Параметры контуров и частоты выбираются согласованно, зависят от времени запаздывания  $\tau$  в контуре обратной связи по току и оцениваются несколькими Гц, что удовлетворяет требованиям к их быстродействию. Приведенные параметрические зависимости являются основой параметрического синтеза параметров электроприводов и входят составной частью в более общий структурно-параметрический синтез многосистемного наведения большим телескопом.

4. Для выявления производственных факторов, потенциально ухудшающих прогнозируемую точность углового слежения большим телескопом в ОПУ, в предложенные модели для сопровождения разработок электроприводов введена детализация упругих и электрических параметров их основных внутренних конструктивных элементов, а также варианты внутренних и внешних возмущений.

## **ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ГИРОСКОПОВ ДЛЯ СИСТЕМ НАВЕДЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ**

Глава посвящена детальному исследованию факторов, влияющих на точность измерительных сигналов твердотельных волновых гироскопов (ТВГ) применительно к их использованию в системах угловой инерциальной навигации КА с большим космическим оптическим телескопом.

Их особая значимость и вынесение в отдельное исследование объясняется следующими причинами: 1) точностью гироскопических измерителей определяется потенциальная точность собственной угловой стабилизации КА (при идеальной работе механизмов управления), и от этого будут зависеть требования к системам корректирующего слежения более высоких уровней большого оптического телескопа; 2) такие измерители (в режиме комплексированных измерений) являются обязательным элементом комплексов многосистемного управления больших оптических телескопов для разделения их каналов наведения; 3) в режимах наведения по слабым световым источникам они в режиме комплексирования с другими измерительными средствами используются для восстановления сигнала ошибки между тактами замедленной выдачи оптического сигнала ошибки.

Выбор в качестве гироскопических измерителей твердотельных волновых гироскопов обусловлено тем, что они обладают повышенной надежностью для проведения длительных автоматизированных космических измерений (т.к. не имеют в своем составе движущихся элементов). На технологии ТВГ в США фирма «Litton Guidance & Control System» создала SIRU – блок получения инерциальной информации для космоса, а во Франции фирма «Sagem» выпустила REGYS 20 – устройство определения ориентации для космоса.

В России разработки и изготовление ТВГ выполнялись в ИПМ АН СССР (г. Москва), МИЭИА (г. Москва), ОАО «РПКБ» (г. Раменское), ЧП «Медикон»

(г.Миасс), ОАО «ИЭМЗ «Купол» (г. Ижевск) и в других организациях. В декабре 2018 г производимый ОАО «ИЭМЗ «Купол» ТВГ был использован в космосе.

К настоящему времени общая теория ТВГ считается в целом созданной [74, 85, 121, 128, и др. ]. Тем не менее, для сопровождения разработок, производства и технологической калибровки все более совершенствуемых конструктивных реализаций ТВГ требуется повышение детализация учитываемых факторов в сопровождающих моделях и алгоритмах с учетом конкретных технологий их изготовления. Актуальность производственного совершенствования ТВГ в направлении повышения точности выходного сигнала сохраняется, на что указывают многочисленные исследования и статьи [18, 23, 24, 37, 58, 71, 72, 73, 75, 76, и др. ].

Данная глава посвящена этому же направлению, но с точки зрения использования ТВГ в системе наведения орбитального телескопа. В этом случае: 1) наиболее эффективным будет исследуемый ниже режим интегрирующего гироскопа (режим датчика угла); 2) из-за низкочастотной динамики КА с телескопом разрешается дополнительная фильтрация выходного сигнала ТВГ, позволяющая значительно уменьшить высокочастотные составляющие сигнала (включая случайные шумы); 3) для режимов комплексированных измерений угловой ориентации космического телескопа наибольшую значимость приобретает анализ низкочастотных составляющих выходного сигнала, входящих в его систематический дрейф.

Так как ТВГ является только одним из важных элементов многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов, поэтому нижеследующий материал изложен выборочно и сокращенно. Его расширенное и более подробное раскрытие с выводом всех зависимостей и описанием присущих ТВГ свойств приведено в монографии автора [283]. Вопросы развития ТВГ и интеграции в навигационные системы затронуты в [283] и в статьях автора [279, 280, 282].

В соответствии со сказанным, в последующих параграфах построены уточненные модели для описания дрейфа волновой картины, детализированы алгоритмы формирования выходных сигналов в измерительном устройстве, обсуждаются факторы и технологические допуски, влияющие на точность сигналов ТВГ.

## 6.1. Факторы и модели неустойчивости дрейфа стоячих волн в твердотельном волновом гироскопе

При написании параграфа использовались монография [283] и материал статей [263, 267, 268] автора.

Наиболее важными внутренними характеристиками ТВГ принято считать: 1) рабочую резонансную частоту резонатора ( $f$ ); 2) разночастотность ( $\Delta f$ ); 3) добротность резонатора ( $Q$ ); 4) разноточность ( $\Delta Q$ ); 5) масштабный коэффициент ( $K$ ); 6) нелинейность масштабного коэффициента ( $\Delta K$ ); 7) систематический дрейф стоячей волны ( $D$ ). К выходным характеристикам ТВГ, определяющим класс его точности, относят: 1) шум выходного сигнала; 2) несистематический дрейф (его средне-квадратическое отклонение – СКО); 3) несистематическая нелинейность выходного сигнала (его СКО); 4) время готовности; 5) чувствительность прибора (минимальная регистрируемая скорость вращения).

В зависимости от реализации системы управления, ТВГ может работать в двух режимах: в режиме датчика угла (ДУ) и в режиме датчика угловой скорости (ДУС). В режиме ДУС используется принудительное возвращение отклоняющейся стоячей волны в заданное положение. В нем систематическая составляющая погрешности сигнала обычно получается значительно большей по сравнению с режимом ДУ, так как на величину дрейфа сигнала начинают также влиять и параметры контуров стабилизации угла положения стоячей волны.

Поэтому далее рассматривается только режим интегрирующего гироскопа (режим датчика угла), в наибольшей мере удовлетворяющий режиму угловой стабилизации большого телескопа вместе с КА. Кроме этого, в нем рабочая стоячая волна не испытывает специальных воздействий со стороны системы управления и поэтому имеет меньший систематический дрейф.

Реализация этого режима может осуществляться с помощью одного кольцевого электрода параметрического возбуждения колебаний резонатора ТВГ (Рисунок 6.1) или с помощью распределенной системы электродов динамического управления. В первом случае обе резонансные моды колебаний одновременно

возбуждаются одним сигналом, во втором – допускается раздельное возбуждение каждой моды своим сигналом [282, 283].

Для измерения пространственного положения созданной рабочей стоячей волны резонатора обычно используют 8 емкостных датчиков (рис. 6.2).

Для обеспечения высокой точности выходного сигнала ТВГ вводится сложная внутренняя система управления волновыми процессами. В исследуемом далее ТВГ производства ОАО «ИЭМЗ «Купол» (г. Ижевск) параллельно работают три основные взаимосвязанные контура обратных связей: 1) контур фазовой автоподстройки частоты – выполняет высокоточную настройку частоты блока генератора сигналов на резонансную частоту кварцевого резонатора ТВГ; 2) контур электронного управления разночастотностью резонатора – с помощью 16 электродов осуществляет настройку напряжения на управляющих электродах и сведение разности фаз к нулю между синусным и косинусным каналами измерений; 3) контур управления кольцевым электродом (или системой распределенных электродов) – выполняет настройку переменного напряжения на кольцевом электроде для поддержания заданной амплитуды колебаний резонатора.

Важно отметить, что на практике с уменьшением размером резонатора обеспечить высокую точность выходного сигнала ТВГ становится все труднее, так как повышаются требования к технологии изготовления его составных частей и к качеству сборки и предэксплуатационной настройки.

Требование к моделям ТВГ описывать сложные волновые динамические процессы микрометровых амплитуд определило доминирование аналитического подхода в их построении (так как погрешности типовых программ конечно-элементного моделирования часто оказываются сравнимы с величинами анализируемых дефектов упругой конструкции ТВГ).

Для разработки ТВГ используют множество различных аналитических моделей описания его внутренней волновой динамики в зависимости от особенностей поставленных задач. Среди них наиболее широко используются модели упругого кольца и идеальной полусферы [128]. Из них модели кольца удобны только для качественного объяснения наблюдаемых эффектов. А классические аналитиче-

ские модели упругой полусферической оболочки переменной толщины на упругой ножке получаются достаточно громоздкими и не очень наглядными для понимания происходящих волновых процессов в резонаторе ТВГ. Кроме этого, они чрезмерно усложняются при наличии технологических дефектов упругого резонатора (микрометровая разнотолщинность стенок резонатора, нарушение центричности крепления ножки и другие), а также при учете упругости всей конструкции ТВГ. Ситуация еще более усложняется при необходимости учета действия сложных эксплуатационных возмущений на упругую конструкцию ТВГ. Поэтому в итоге такие обобщенные модели на практике редко используются.

В данном параграфе разработана достаточно универсальная модель, объединяющая конечно-элементное моделирование детализированной механической конструкции ТВГ и аналитическую модель модального анализа ее резонансных колебаний. В ней сначала выполняется расчет и анализ резонансных мод с помощью программ конечно-элементного моделирования в рамках САПР, сопровождающих производство твердотельных волновых гироскопов. Далее системой внутреннего управления ТВГ формируются условия для обеспечения его узкополосных волновых процессов. На выделенной таким образом достаточно универсальной узкополосной модели волновой динамики ТВГ углубленно исследуются сверхмалые погрешности выходного измерительного сигнала с учетом его систематического дрейфа. Разработанные модели описания внутренних волновых процессов с учетом контуров управления ими позволяют интеллектуально поддерживать процессы изготовления и калибровки высокоточных ТВГ.

Типовая конструкция ТВГ показана на рисунке 6.1. Его резонатор представляет собой кварцевую «юбку» формы  $R = R(\theta, \varphi)$  (похожую на полусферу), закрепленную в верхней точке по оси  $z$  (рис. 6.1а, 6.2а).

Его уравнения, как деформируемой оболочки, сводятся к виду:

$$\rho h \{ \partial^2 \mathbf{W} / \partial t^2 + 2[\boldsymbol{\Omega}_z \times (\partial \mathbf{W} / \partial t)] \} = [1 + \mu(\partial / \partial t)] \cdot L_y \mathbf{W} + \mathbf{F} + \boldsymbol{\xi}, \quad (6.1)$$

где  $\mathbf{W} = (u, v, w)$  – вектор упругих деформаций в сферических координатах  $\mathbf{R} = (\theta, \varphi, R)$ ,  $L_y$  – оператор упругих деформаций,  $\mathbf{F}$  – вектор управляющих распределен-

ных нагрузок,  $\Omega_z$  – проекция на ось  $z$  вектора угловой скорости поворота ТВГ как целого,  $\xi$  – вектор возмущающих воздействий.

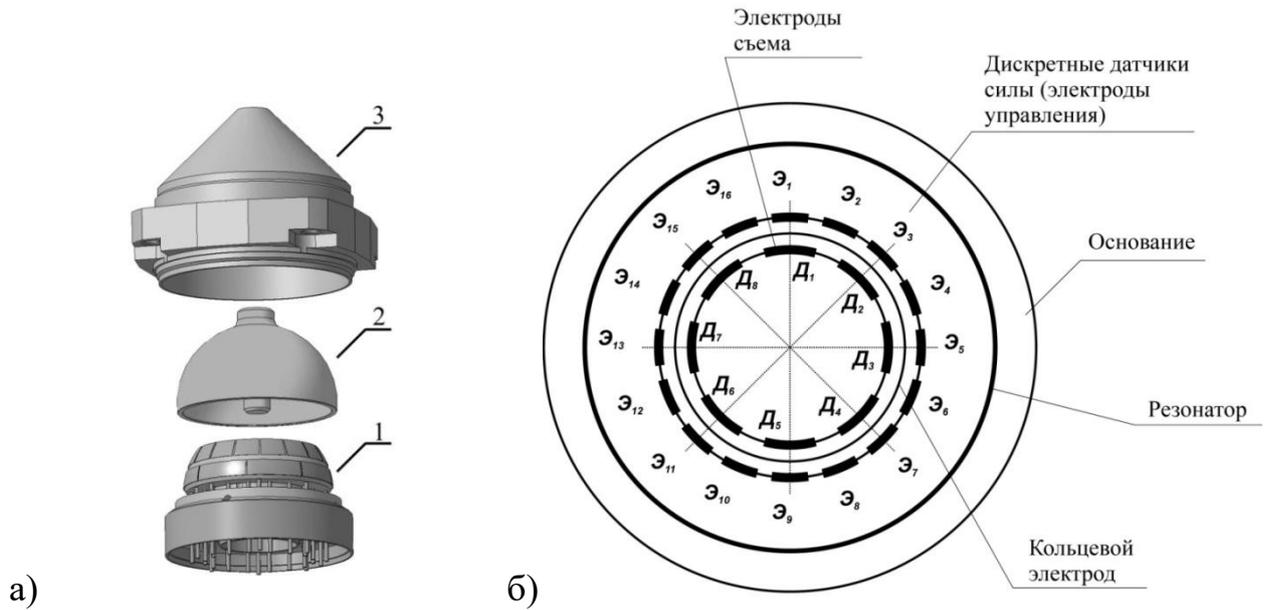


Рисунок 6.1 – Твердотельный волновой гироскоп: а) основные элементы: 1 – керамическое основание с напыленными датчиками, 2 – кварцевый резонатор, 3 – металлический корпус; б) схема расположения управляющих электродов и измерительных датчиков.

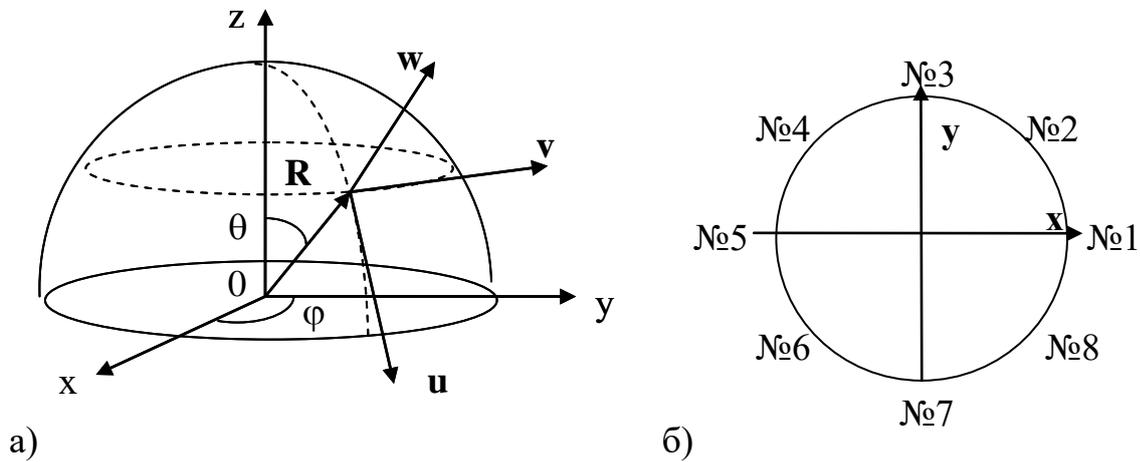


Рисунок 6.2 – Система координат резонатора ТВГ (а) и схема расположения его емкостных датчиков с номерами (б)

После разложения в ряд резонансных форм  $W_i(\mathbf{R})$ :  $\mathbf{W}(\mathbf{R}, t) = \sum_i f_i(t) \mathbf{W}_i(\mathbf{R})$ ,  $L_y \mathbf{W}_i = \rho h \omega_i^2 \mathbf{W}_i$ ,  $\mathbf{W}_i(\mathbf{R}) = U_i(\varphi, \theta) \mathbf{u}^0 + V_i(\varphi, \theta) \mathbf{v}^0 + W_i(\varphi, \theta) \mathbf{w}^0$ , имеющих про-

екции ( $U_i, V_i, W_i$ ) на единичные вектора  $\mathbf{u}^0, \mathbf{v}^0, \mathbf{w}^0$  (Рисунок 6.2а), из (6.1) получается система уравнений для амплитуд мод:

$$\begin{aligned} \partial^2 f_i / \partial t^2 + (\omega_i / Q_i) \cdot \partial f_i / \partial t + \omega_i^2 f_i + 2\Omega_z \cdot \Sigma_j [K_{ij} \cdot \partial f_j / \partial t] &= F_i + \xi_i, \\ K_{ij} &\equiv \int [ \sin \theta (W_j V_i - V_j W_i) + \cos \theta (U_j V_i - V_j U_i) ] d^2 \mathbf{R}, \end{aligned} \quad (6.2)$$

где  $\omega_i$  – резонансные частоты мод,  $f_i$  – их комплексные амплитуды колебаний,  $Q_i$  – добротность мод ( $\mu = 1 / \omega Q$ ),  $F_i = (\mathbf{F}_i / \rho h, \mathbf{W}_i)$ ,  $\xi_i = (\boldsymbol{\xi}_i / \rho h, \mathbf{W}_i)$ ,  $K_{ii} = 0$ ,  $K_{ij} = -K_{ji}$ , круглые скобки  $(, )$  обозначает операцию скалярного произведения по поверхности резонатора.

Контура внутреннего управления волновой динамикой ТВГ выполняют селективное возбуждение колебаний резонатора на второй угловой гармонике, которые являются низшими модами свободной полусферической «юбки» резонатора. Для этой гармоники из (6.2) выделяется следующая частная модель, описывающая деформации свободной кромки резонатора:

$$\ddot{p} + 2\nu_p \dot{p} + \omega_p^2 p - 2\Omega K \dot{q} = F_p, \quad \ddot{q} + 2\nu_q \dot{q} + \omega_q^2 q + 2\Omega K \dot{p} = F_q; \quad (6.3)$$

$W(\theta, t) = p(t) \cos 2(\theta - \theta_0) + q(t) \sin 2(\theta - \theta_0)$ ;  $F(\theta, t) = F_p(t) \cos 2(\theta - \theta_0) + F_q(t) \sin 2(\theta - \theta_0)$ ;  
 $\theta_0$  – угол ориентации одной из резонансных мод;  $\Omega \equiv \Omega_z$ ;  $p(t), q(t)$  – резонансные переменные;  $\nu_p, \nu_q$  – коэффициенты демпфирования;  $\omega_p, \omega_q$  – резонансные частоты;  $F_p, F_q$  – проекции управляющего воздействия.

Различные варианты перехода от комплексных переменных  $p, q$  к их действительным составляющим рассмотрены в работе [268]. Из них наиболее удобным является амплитудно-фазовое представление выделенных из колебательного процесса рабочей  $A$  и паразитной квадратурной  $B$  стоячих волн:

$$\begin{aligned} W &= A \cos 2(\theta - \theta_A) + B \sin 2(\theta - \theta_A); \quad A = p \cos \Psi + q \sin \Psi = a_A(t) \cos [\omega t - \varphi_A] \\ B &= -p \sin \Psi + q \cos \Psi = \tilde{a}_B(t) \sin [\omega t - \varphi_A], \quad \Psi \equiv 2(\theta_A - \theta_0); \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$F = F_A \cos 2(\theta - \theta_A) + F_B \sin 2(\theta - \theta_A); \quad F_A(t) = a_{FA} \cos(\omega t - \varphi_{FA}), \quad F_B(t) = a_{FB} \sin(\omega t - \varphi_{FB});$$

где  $\tilde{a}_B \equiv \pm a_B(t)$ ;  $a, \varphi$  – амплитуды и фазы;  $\omega$  – частота возбуждения.

При этом уравнения (6.3) сводятся к следующим:

$$\begin{aligned}
\dot{a}_A + (v_p \cos^2 \psi + v_q \sin^2 \psi) a_A &= (a_{FA} / 2\omega) \sin(\varphi_A - \varphi_{FA}) + 0.5 \tilde{a}_B \Delta\omega_{qp} \sin 2\psi, \\
\dot{a}_B + (v_q \cos^2 \psi + v_p \sin^2 \psi) a_B &= \pm \{ (a_{FB} / 2\omega) \cos(\varphi_A - \varphi_{FB}) - 0.5 a_A \Delta\omega_{qp} \sin 2\psi \}, \\
\dot{\psi} + \Omega K &= (a_{FB} / 2\omega a_A) \sin(\varphi_A - \varphi_{FB}) + \\
&+ (\tilde{a}_B / a_A) [\Delta\omega_q \cos^2 \psi + \Delta\omega_p \sin^2 \psi + \dot{\varphi}_A] - 0.5 \Delta v_{qp} \sin 2\psi, \\
\dot{\varphi}_A &= (a_{FA} / 2\omega a_A) \cos(\varphi_A - \varphi_{FA}) - \\
&- [\Delta\omega_p \cos^2 \psi + \Delta\omega_q \sin^2 \psi] + (\tilde{a}_B / a_A) [\dot{\psi} + \Omega K - 0.5 \Delta v_{qp} \sin 2\psi],
\end{aligned} \tag{6.5}$$

и из них, в том числе, получается зависимость для дрейфа полезного сигнала:

$$\begin{aligned}
\dot{\psi} &= -\Omega K + D, \quad \dot{\psi} = 2\dot{\theta}_A - 2\dot{\theta}_0 \approx 2\dot{\theta}_A, \\
D &= (\tilde{a}_B / a_A) \Delta\omega_{qp} \cos 2\psi - 0.5 \Delta v_{qp} \sin 2\psi + \\
&+ (1/2\omega a_A^2) [a_{FB} a_A \sin(\varphi_A - \varphi_{FB}) + a_{FA} \tilde{a}_B \cos(\varphi_A - \varphi_{FA})].
\end{aligned} \tag{6.6}$$

где  $\varphi_{FA} = \varphi_A - \pi/2 + \delta\varphi_{FA}$ ,  $\varphi_{FB} = \varphi_A + \delta\varphi_{FB}$ ,  $v \equiv (v_q + v_p) / 2$ ;  $\Delta v_{qp} \equiv v_q - v_p$  – разность добротности;  $\Delta\omega_{qp} = (\omega_q - \omega_p) (\omega_q + \omega_p) / 2\omega \approx \omega_q - \omega_p$  – разность частотности.

Первые два уравнения (6.5) удобны при построении контура стабилизации амплитуды рабочей стоячей волны ( $a_{A0} = const$ ) и контура подавления амплитуды квадратурной волны ( $a_{B0} \rightarrow 0$ ). При  $\delta\varphi_{FA} \rightarrow 0$ ,  $\delta\varphi_{FB} \rightarrow 0$  их можно упростить:

$$\begin{aligned}
\dot{a}_A + v a_A &\approx a_{FA} / 2\omega, \\
\dot{a}_B + v a_B &\approx \pm \{ a_{FB} / 2\omega - 0.5 a_A \Delta\omega_{qp} \sin 2\psi \},
\end{aligned}$$

при этом временное изменение фазы рабочей стоячей волны будет следующим:

$$\dot{\varphi}_A \approx v \delta\varphi_A - [\Delta\omega_p + \Delta\omega_{qp} \sin^2 \psi] + (\tilde{a}_B / a_A) [D - 0.5 \Delta v_{qp} \sin 2\psi],$$

$$\text{Если в квазистатике принять: } a_{FA} \approx 2\omega v a_{A0}, \quad a_{FB} \approx a_{A0} \omega \Delta\omega_{qp} \sin 2\psi,$$

то функция систематического дрейфа (2.55) примет вид:

$$\begin{aligned}
\dot{\psi} &= -\Omega K + D, \\
D &= (\tilde{a}_B / a_A) [\Delta\omega_{qp} \cos 2\psi + v \delta\varphi_{FA}] - 0.5 \sin 2\psi [\Delta v_{qp} + \Delta\omega_{qp} \delta\varphi_{FB}],
\end{aligned} \tag{6.7}$$

Физический механизм присутствия систематического дрейфа рабочей стоячей волны объясняется появлением малой паразитной квадратурной стоячей волны. По своим свойствам она ортогональна в пространстве и во времени рабочей стоячей волне. Ее подавление обеспечит и компенсацию дрейфа сигнала ТВГ.

При учете более тонких факторов неидеальности модели, конструкции ТВГ и его внутренних контуров управления, функция дрейфа начинает включать в себя и другие угловые гармоники [58]:

$$D(\theta_A, t) = D_0(t) + \Sigma [ D_{Ci}(t) \cos i\theta_A ] + \Sigma [ D_{Si}(t) \sin i\theta_A ] .$$

Различные причины их возникновения обсуждаются в [267]. В качестве примера на рисунке 6.3 показана одна из реализаций зависимости измеренной на промежуточном технологическом образце скорости дрейфа (угл. град / час) от угла стоячей волны (угл. град).

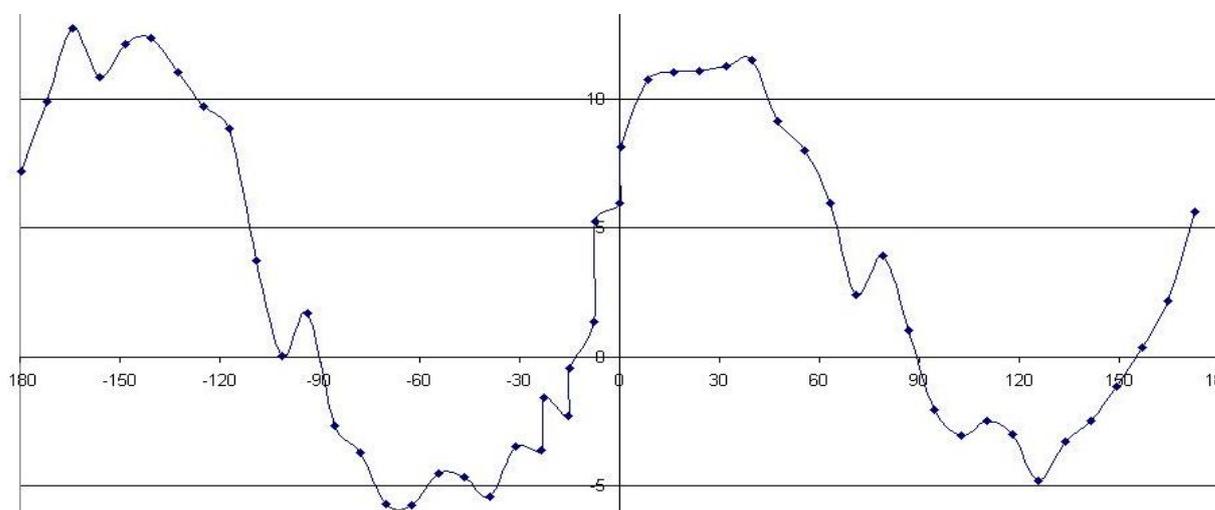


Рисунок 6.3 – Пример зависимости измеренной скорости дрейфа (угл. град / час) от угла стоячей волны (угл. град)

Представленные здесь и в последующем экспериментальные зависимости предоставлены работниками ОАО «ИЭМЗ «Купол» для отдельных технологических образцов, отобранных на промежуточных этапах производственного цикла предэксплуатационной доводки, настройки и калибровки. После же выполнения полного цикла таких технологических операций явные факторные зависимости становятся плохо заметны. Кроме этого, они часто бывают зашумлены влиянием работающих контуров внутреннего управления стоячими волнами.

Таким образом, в принятой модели волновые процессы в резонаторе ТВГ формируются суперпозицией двух независимых резонансных модальных колебаний (вдоль двух осей жесткости полусферического кварцевого резонатора, поло-

жение одной из которых характеризуется углом  $\theta_0$ ). Различие их амплитуд определяет угол  $\theta_A$  результирующей стоячей волны. Различие их фаз определяет собственное медленное движение волновой картины – систематический дрейф сигнала. Все эксплуатационные факторы, влияющие на разнофазность и на изменение амплитуд, являются его потенциальными источниками.

Первым из них считается разночастотность модальных колебаний, неизбежно вызывающая набег фаз. После ее уменьшения специальной балансировкой начинает проявляться более сложный для подавления фактор – разнородность модальных колебаний. Дрейф выходного сигнала ТВГ также зависит от характеристик системы управления внутренними волновыми процессами. Как уже было отмечено ранее, в ее состав, кроме контура начального запуска волнового процесса, входят следующие три параллельно работающие и взаимосвязанные контура: 1) подстройки частоты резонансного возбуждения, 2) стабилизации амплитуды рабочей стоячей волны, 3) подавления паразитной квадратурной волны.

Первый контур управления влияет на дрейф сигнала косвенно. Так, при угловом повороте волновой картины происходит перераспределение амплитуд возбужденных резонансных мод. Контур настройки частоты возбуждения на максимальный отклик рабочей стоячей волны реализуется в виде контура ФАПЧ по взвешенной фазовой расстройке  $(a_C\varphi_C + a_D\varphi_D)$ , где  $a_C$ ,  $a_D$  – амплитуды, а  $\varphi_C$ ,  $\varphi_D$  – фазы соответственно косинусного и синусного измерительных сигналов. В результате его работы частота возбуждения стремится подстроиться под частоту моды с большей амплитудой. Перераспределение отстроек от резонансов модальных колебаний будет влиять на соотношение возбуждаемых амплитуд колебаний. Это, в свою очередь, приведет к изменению эксплуатационных добротностей.

В итоге контур ФАПЧ будет стремиться развернуть стоячую волну в ближайшую ось жесткости, что проявится в виде ее малого систематического дрейфа. Типичное временное поведение дрейфа рабочей стоячей волны при постоянной температуре показано на рисунке 6.4а.

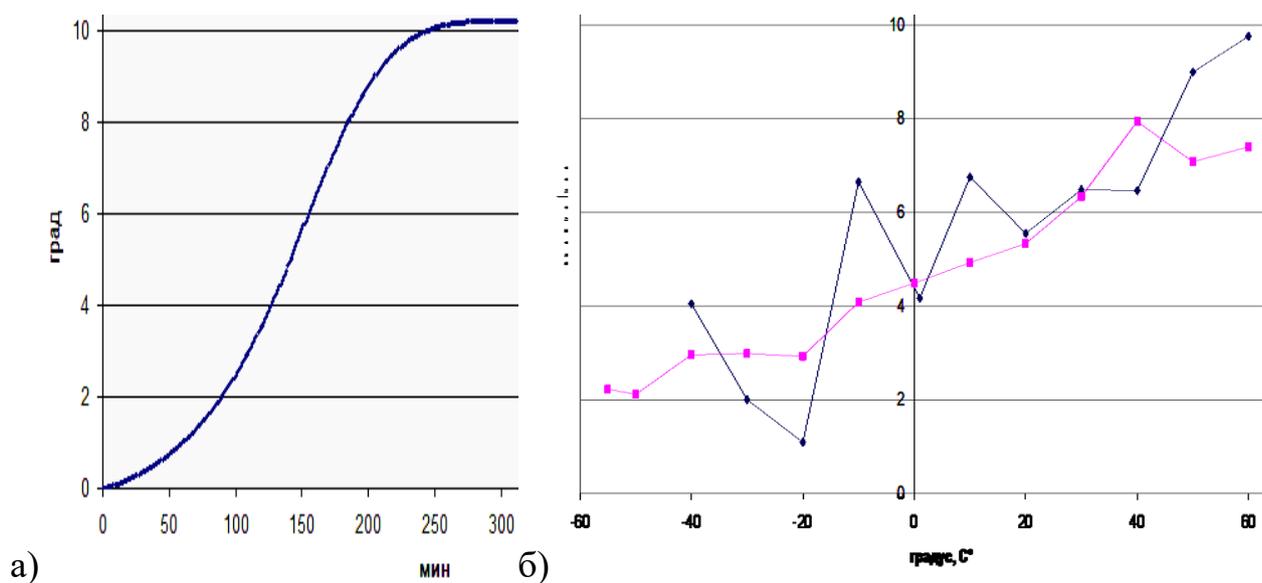


Рисунок 6.4 – Характеристики функции дрейфа ТВГ (примеры): а) временное поведение по углу при постоянной температуре; б) зависимости постоянной составляющей функции дрейфа (угл.градус/ час) от температуры ( $^{\circ}\text{C}$ )

Второй контур управления практически не влияет на дрейф сигнала. В свою очередь, третий контур целенаправленно вводится для уменьшения дрейфа и имеет свою специфику в реализациях ТВГ с одним кольцевым электродом возбуждения или с системой разделенных электродов [283].

В первом случае используется квазистатическая электронная коррекция осей жесткости. При этом привязка осей жесткости к постоянному углу  $\theta_0$  может нарушаться и в (6.7) может появиться постоянная составляющая дрейфа  $D_0(t)$ . В этом случае в (6.6) следует полагать:  $\Psi(t) \equiv 2[\theta_A(t) - \theta_0(t)]$  и

$$2\dot{\theta}_A(t) = -\Omega(t)K + D(t) + 2\dot{\theta}_0(t).$$

Два примера измеренных зависимостей постоянной составляющей дрейфа  $D_0(t)$  от температуры приведены на рисунке 6.4б.

Более подробно специфика и алгоритмы работы контуров подавления квадратурной волны рассмотрены в [283].

Таким образом, имеется множество причин, влияющих в разной мере на результирующую функцию дрейфа. Это разночастотность, разнородность, погрешности контуров управления, неравномерность рабочих емкостных зазоров,

нарушение осесимметричности резонатора и другие. Судить о их значимости отчасти можно по результатам экспериментального наблюдения за поведением дрейфа стоячей волны в разных режимах работы ТВГ. Отсюда станут понятны и механизмы уменьшения влияния этих факторов.

Для уменьшения дрейфа выходного сигнала ТВГ используют технологические, активные (с помощью контуров управления) и алгоритмические способы и методы. При этом в первую очередь стараются повысить точность технологических операций при изготовлении ТВГ, а также процедур механической балансировки резонатора. Остаточные дефекты пытаются нейтрализовать с помощью активных контуров обратной связи (например, путем введения дополнительных электрических пружин). И в последнюю очередь применяют алгоритмически получаемые калибровочные кривые «антидрейфа».

В результате обычно удается значительно уменьшить влияние разночастотности на дрейф измерительного сигнала. После этого основным фактором дрейфа становится разнородность. Оси жесткости и разнородности в механическом резонаторе ТВГ совпадают. Однако после включения корректирующей электрической пружины они могут значительно расходиться [283]. В целом, задача уменьшения разнородности решается намного сложнее и в наибольшей мере связана с повышением качества технологических процессов изготовления ТВГ и его составных частей.

## **6.2. Варианты алгоритмов формирования выходных измерительных сигналов твердотельного волнового гироскопа**

Подробный анализ работы измерительного устройства ТВГ с восемью емкостными датчиками, распределенными по кромке резонатора (Рисунки 6.1б, 6.2б) проведен в работе автора [272].

Емкость  $C_D$  каждого из датчиков зависит от зазора  $d$  между резонатором и датчиком:  $C_D = \varepsilon \cdot S_D / d = C_0 \cdot (d_0 / d)$ , где:  $\varepsilon = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м (для вакуума);  $S_D$  – площадь электрода;  $d = d_0 - W = d_0 \cdot (1 - W / d_0)$ ;  $d_0$  – значение  $d$  при  $W = 0$ ;  $C_0$

$= \varepsilon \cdot S_D / d_0$  – начальное значение емкости датчика; функция  $W$  описывает собственные колебания резонатора на частоте  $\omega$ .

Если датчики работают на постоянном токе, то изменение во времени сигналов на них зависит только от зазора:  $S_0(t) = C_D(t) - C_0 = (C_0 / d_0) \cdot W(t)$ .

При работе датчиков на переменном токе с частотой  $f$  будем иметь модулированные сигналы вида:

$$I = C_D \cdot \partial V / \partial t = C_D f V_0 \cos(ft + \varphi); \quad S_{out}(t) = I / V_0 = S_f + K W \cos(ft + \varphi);$$

где:  $V = V_0 \cdot \sin(ft + \varphi)$ ;  $S_f = K_0 \cdot \cos(ft + \varphi)$ ;  $K = K_0 / d_0$ ;  $K_0 = C_0 \cdot f$ .

Измеряемый волновой процесс  $W(\theta, t)$  на кромке резонатора наблюдается в осях измерительного устройства  $(x, y)$  (Рисунок 6.2б) через функции  $C(t)$  и  $D(t)$ . При этом по своей структуре он состоит из сильно выраженной рабочей стоячей волны с угловым направлением  $\theta_A$  и функцией колебаний  $A(t)$  и почти незаметной квадратурной стоячей волны с функцией  $B(t)$ . Из их связи:

$$W(\theta, t) = C(t) \cos 2\theta + D(t) \sin 2\theta = A(t) \cos 2(\theta - \theta_A) + B(t) \sin 2(\theta - \theta_A) \quad (6.8)$$

можно определить структуру измерительных сигналов:

$$S_C = C(t) \cos(ft + \varphi) = [A(t) \cos 2\theta_A - B(t) \sin 2\theta_A] \cos(ft + \varphi); \quad (6.9)$$

$$S_D = D(t) \cos(ft + \varphi) = [A(t) \sin 2\theta_A + B(t) \cos 2\theta_A] \cos(ft + \varphi).$$

В соответствии с (6.8) для датчиков, измеряющих локальные прогибы  $W_i = W(\theta_i, t)$ ,  $\theta_i = (i - 1) \cdot \pi / 4$ ,  $i = 1, \dots, 8$  (Рисунок 6.2б), имеем:

$$4C = (W_1 + W_5) - (W_3 + W_7), \quad 4D = (W_2 + W_6) - (W_4 + W_8) \quad .$$

В случае работы на постоянном токе выходными сигналами будут:

$$S_C = C(t) = \{(S_1 + S_5) - (S_3 + S_7)\} / (4C_0 / d_0);$$

$$S_D = D(t) = \{(S_2 + S_6) - (S_4 + S_8)\} / (4C_0 / d_0); \quad S_i = C_0 + (C_0 / d_0) \cdot W_i.$$

А для емкостных датчиков на переменном токе получаем:

$$S_C = \{(S_1 + S_5) - (S_3 + S_7)\} / 4K; \quad S_D = \{(S_2 + S_6) - (S_4 + S_8)\} / 4K. \quad (6.10)$$

Заметим, что для исключения влияния функции  $S_f$  с частотой  $f$ , сигналы  $S_i$  должны быть выровнены по фазам и амплитудам:  $S_i = S_{fi} + K_i \cdot W_i \cdot \cos(ft + \varphi_i)$ ,  $S_{fi} = K_{0i} \cdot \cos(ft + \varphi_i)$ ;  $\varphi_i = \varphi = \text{const}$ ;  $K_i = K$  ( $i = 1, \dots, 8$ ).

Так как емкость каждого из датчиков зависит от зазора  $d$  между резонатором и датчиком, поэтому она также модулирована на резонансной частоте  $\omega$  ( $W(\theta, t) \sim \cos(\omega t + \alpha)$ ). Поэтому для каждого из датчиков переменного тока с высокой частотой  $f$  полезный выходной сигнал будет следующим:

$$S(t) = A_S \cos(\omega t + \alpha) \cos(ft + \varphi) = A_S \{ \cos(f_+ t + \varphi_+) + \cos(f_- t + \varphi_-) \} / 2 = \\ = \{ AC_+ \cos(f_+ t) + AS_+ \sin(f_+ t) + AC_- \cos(f_- t) + AS_- \sin(f_- t) \} / 2,$$

где:  $f_{\pm} \equiv f \pm \omega$ ;  $\varphi_{\pm} \equiv \varphi \pm \alpha$ ;  $\alpha = (\varphi_+ - \varphi_-) / 2$ ;  $\varphi = (\varphi_+ + \varphi_-) / 2$ ;

$$AC_{\pm} \equiv A_S(t) \cdot \cos(\varphi_{\pm}); \quad AS_{\pm} \equiv -A_S(t) \cdot \sin(\varphi_{\pm}); \quad A_S^2 = AC_{\pm}^2 + AS_{\pm}^2.$$

Входящие сюда коэффициенты вычисляются с помощью применения преобразования Фурье к оцифрованному сигналу  $S(t)$ :

$$AC_{\pm} \approx (4/T) \int_0^T [S(t) \cdot \cos(f_{\pm} t)] dt; \quad AS_{\pm} \approx (4/T) \int_0^T [S(t) \cdot \sin(f_{\pm} t)] dt.$$

При вычислении амплитуды сигнала для уменьшения погрешностей обычно выбирают средневзвешенное значение:

$$A_S^2 = (AC_+^2 + AS_+^2 + AC_-^2 + AS_-^2) / 2.$$

Для исключения малых величин в знаменателях расчетных формул, нахождение фаз  $\varphi$  и  $\alpha$  удобно проводить с переключением алгоритма:

$$\text{при } AC_+ AC_- < AS_+ AS_- : \quad \text{tg } \alpha = (AC_+ - AC_-) / (AS_+ + AS_-),$$

$$\text{при } AC_+ AC_- > AS_+ AS_- : \quad \text{tg } \alpha = - (AS_+ - AS_-) / (AC_+ + AC_-);$$

$$\text{при } -AC_+ AC_- > AS_+ AS_- : \quad \text{tg } \varphi = (AC_+ - AC_-) / (AS_+ - AS_-),$$

$$\text{при } -AC_+ AC_- < AS_+ AS_- : \quad \text{tg } \varphi = - (AS_+ + AS_-) / (AC_+ + AC_-),$$

Если в измерительном устройстве активно удерживать  $\varphi \approx 0$  через обратные связи по  $\text{tg } \varphi$ , вычисления угла  $\alpha$  упростятся:  $\pm \text{tg } \alpha = -AS_{\pm} / AC_{\pm}$ .

Совершенно аналогично выполняется расчет просуммированных выходных сигналов (6.10) в осях измерительного устройства:

$$2S_C(t) = A_{SC} \cos(\omega t + \psi_C) \cos(ft + \varphi) = a_C \cdot \{ \cos(f_+ t + \varphi_{C+}) + \cos(f_- t + \varphi_{C-}) \} = \\ = AC_{C+} \cdot \cos(f_+ t) + AS_{C+} \cdot \sin(f_+ t) + AC_{C-} \cdot \cos(f_- t) + AS_{C-} \cdot \sin(f_- t);$$

$$2S_D(t) = A_{SD} \cos(\omega t + \psi_D) \cos(ft + \varphi) = a_D \cdot \{ \cos(f_+ t + \varphi_{D+}) + \cos(f_- t + \varphi_{D-}) \} = \\ = AC_{D+} \cdot \cos(f_+ t) + AS_{D+} \cdot \sin(f_+ t) + AC_{D-} \cdot \cos(f_- t) + AS_{D-} \cdot \sin(f_- t).$$

$$\text{где: } AC_{C\pm} \equiv a_C \cdot \cos(\varphi_{C\pm}), \quad AS_{C\pm} \equiv -a_C \cdot \sin(\varphi_{C\pm}), \quad \varphi_{C\pm} \equiv \varphi \pm \psi_C;$$

$$AC_{D\pm} \equiv a_D \cdot \cos(\varphi_{D\pm}); \quad AS_{D\pm} \equiv -a_D \cdot \sin(\varphi_{D\pm}); \quad \varphi_{D\pm} \equiv \varphi \pm \psi_D;$$

$\psi_C = \alpha + \delta\psi_C$ ,  $\psi_D = \alpha + \delta\psi_D$ ;  $\delta\psi_C$ ,  $\delta\psi_D$  – дополнительные возможные набег фазы, появляющиеся в трактах измерительного устройства (в усилителях, контурах обратных связей и прочих).

В измерительном устройстве сначала вычисляются:

$$AC_{C\pm} \approx 4 \langle S_C(t) \cdot \cos(f_{\pm} t) \rangle, \quad AS_{C\pm} \approx 4 \langle S_C(t) \cdot \sin(f_{\pm} t) \rangle; \quad (6.11)$$

$$AC_{D\pm} \approx 4 \langle S_D(t) \cdot \cos(f_{\pm} t) \rangle, \quad AS_{D\pm} \approx 4 \langle S_D(t) \cdot \sin(f_{\pm} t) \rangle;$$

где угловые скобки  $\langle \rangle$  обозначают временное усреднение с помощью интеграторов (или низкочастотной фильтрации).

Далее по аналогии с вычислениями для одиночных датчиков запишем:

$$a_C^2 = (AC_{C+}^2 + AS_{C+}^2 + AC_{C-}^2 + AS_{C-}^2) / 2;$$

$$a_D^2 = (AC_{D+}^2 + AS_{D+}^2 + AC_{D-}^2 + AS_{D-}^2) / 2; \quad (6.12)$$

$$\text{tg } \varphi = (AC_{C+} - AC_{C-}) / (AS_{C+} - AS_{C-}) = (AC_{D+} - AC_{D-}) / (AS_{D+} - AS_{D-});$$

$$\text{tg } \psi_C = (AC_{C+} - AC_{C-}) / (AS_{C+} + AS_{C-}); \quad \text{tg } \psi_D = (AC_{D+} - AC_{D-}) / (AS_{D+} + AS_{D-}).$$

В идеальном случае, при  $B = 0$ , из (6.9) будем иметь:

$$C = A \cos 2\theta_A, \quad D = A \sin 2\theta_A \quad \Rightarrow \quad \text{tg } 2\theta_A = D / C, \quad A^2 = C^2 + D^2.$$

Отсюда при  $a_B / a_A \rightarrow 0$  ( $a_C \approx a_A \cos 2\theta_A$ ,  $a_D \approx a_A \sin 2\theta_A$ ) получают наиболее простой и понятный алгоритм формирования выходных сигналов, наиболее часто используемый на практике:

$$\text{tg } 2\theta_A \approx a_D / a_C; \quad a_A \approx \text{sqrt}(a_C^2 + a_D^2). \quad (6.13)$$

В конструкциях ТВГ обычно требуется дополнительно измерять параметры малой квадратурной волны для организации контура обратной связи по ее подавлению. В этом случае с учетом  $A = a_A \cos \tau$ ,  $B = \tilde{a}_B \sin \tau$ , имеем:

$$C = a_C \cos (\tau + \varphi_C) = a_A \cos \tau \cos 2\theta_A - \tilde{a}_B \sin \tau \sin 2\theta_A ,$$

$$D = a_D \cos (\tau + \varphi_D) = a_A \cos \tau \sin 2\theta_A + \tilde{a}_B \sin \tau \cos 2\theta_A ,$$

где:  $\tau \equiv \omega t + \alpha$ ;  $\tilde{a}_B \equiv \pm a_B$ ;  $\varphi_A - \varphi_B = \pm \pi/2$ .

Выделяя коэффициенты при  $\cos \tau$  и  $\sin \tau$ , найдем соотношения:

$$a_D a_C \sin (\varphi_C - \varphi_D) = a_A \tilde{a}_B; \quad a_C^2 - a_D^2 = (a_A^2 - a_B^2) \cos 4\theta_A ;$$

$$2 a_D a_C \cos (\varphi_C - \varphi_D) = (a_A^2 - a_B^2) \sin 4\theta_A; \quad a_C^2 + a_D^2 = a_A^2 + a_B^2 .$$

При  $a_B \ll a_A$  получаем:  $\tilde{a}_B = [a_D a_C \sin (\varphi_C - \varphi_D)] / a_A$ . Тогда с уменьшением разнофазности сигналов  $S_C$ ,  $S_D$  квадратурная волна должна уменьшаться, а знак  $\Delta\varphi \equiv (\varphi_C - \varphi_D) = (\psi_C - \psi_D)$  будет определять знак в  $\tilde{a}_B \equiv \pm a_B$ .

После подстановки сюда  $a_C \approx a_A \cos 2\theta_A$ ,  $a_D \approx a_A \sin 2\theta_A$  находим:  $\tilde{a}_B \approx 0.5 \cdot a_A \cdot \sin 4\theta_A \cdot \sin (\varphi_C - \varphi_D)$ . То есть для обеспечения малости  $a_B$  требуется:  $\Delta\varphi \rightarrow 0$  при  $\sin 4\theta_A \neq 0$ ;  $\Delta\varphi \rightarrow \varphi_A - \varphi_B = \pm \pi/2$  при  $\sin 4\theta_A \rightarrow 0$ .

Таким образом, алгоритм будет ухудшать свою обусловленность (и терять эффективность) при измерении квадратурной волны  $a_B$  вблизи  $\sin 4\theta_A \rightarrow 0$ . Это случаи, когда рабочая стоячая волна приближается к угловому направлению какой-либо четверки датчиков (№ 1-3-5-7 или 2-4-6-8; Рисунок 6.2б). Понятно, что одновременно ортогональная ей квадратурная волна будет располагаться в угловом направлении другой четверки датчиков.

При этом фазовое рассогласование сигналов с двух четверок датчиков  $\Delta\varphi$  будет возрастать с малых значений до  $\pi/2$  при одновременном уменьшении произведения  $a_D a_C$ . Поэтому величину фазового рассогласования становится некорректно рассматривать как одинаково пропорциональную меру подавления квадратурной волны вдоль всей угловой координаты.

На практике при расчете амплитуды квадратурной волны  $a_B$  может оказаться удобнее формула (отсутствуют тригонометрические функции):

$$\tilde{a}_B = [AC_{C+} AS_{D+} - AC_C AS_{D-} - AS_{C+} AC_{D+} + AS_C AC_{D-}] / a_A. \quad (6.14)$$

Другие варианты построения алгоритмов формирования выходных сигналов измерительного устройства ТВГ для случаев переменного и постоянного тока приведены и обсуждаются в работах [272, 283].

В итоге, выходной сигнал ТВГ описывается первой формулой (6.13). Вторая формула (6.13) формирует сигнал для контура поддержания заданной амплитуды рабочей стоячей волны, а формула (6.14) – измерительный сигнал для контура обратной связи подавления паразитной квадратурной волны.

Полученные модели описания работы измерительного устройства ТВГ совместно с моделями его волновой динамики, рассмотренными в предыдущем параграфе, составляют математическую основу для создания цифровой модели двойника ТВГ как измерительного устройства комплекса многосистемного наведения при сопровождении проекта большого орбитального телескопа.

### **6.3. Анализ технологических факторов, ухудшающих точность измерительных сигналов твердотельного волнового гироскопа**

Так как ТВГ является сложным прецизионным измерительным устройством со своей внутренней системой управления стоячими волнами, поэтому на точность его измерительного сигнала в общем случае могут влиять множество различных факторов. Они могут создаваться различными обеспечивающими подсистемами и устройствами, включая: измерительное устройство, контура управления рабочей стоячей волной и паразитной квадратурной волной, системы контроля и управления температурным режимом и другими. Обобщенная систематизация погрешностей выходного сигнала ТВГ рассматривалась в статьях автора [274, 276] и приведена на рисунке 6.5, где основные погрешности выходного измерительного сигнала ТВГ традиционно разделены на систематические и случайные.



Рисунок 6.5 – Составные части погрешностей полезного измерительного устройства ТВГ и влияющие на них факторы

Случайные погрешности измерительного сигнала ТВГ проявляются в виде шумов полезного измерительного сигнала, а также к ним в общем случае могут быть добавлены несистематические составляющие функций дрейфа и масштабного коэффициента. Шумовые компоненты главным образом зависят от технических характеристик используемых радиоэлементов в аналоговой и цифровой частях измерительного устройства, а также от схемотехнических решений, поддерживающих соответствующие алгоритмы измерений. Выбор путей их уменьшения начинается с составления бюджета ошибок измерительного устройства ТВГ.

Процедурно бюджет ошибок сначала составляется укрупнено – по основным частям тракта получения информационного сигнала: [емкостные датчики] ⇒ [аналоговая часть тракта] ⇒ [цифровая часть тракта]. Далее его декомпозиция

проводится вглубь, до выявления «узких мест» – критических элементов и процессов. Составление списка последних, их ранжирование и обсуждение определяют пути уменьшения шума.

В общем случае здесь могут быть использованы три традиционных направления уменьшения шумов сигнала: 1) переход на менее шумящую элементную базу; 2) использование процедур фильтрации обрабатываемых сигналов; 3) выбор малошумящего алгоритма обработки измерительного сигналов.

При этом алгоритмические способы уменьшения шумов выходного сигнала измерительного устройства ТВГ связаны: 1) с исключением внутренних алгоритмических операций с малыми величинами (сравнимыми с шумовыми сигналами или подменяемыми ими); 2) с выбором алгоритма, реализуемого на менее шумящих элементах сигнального тракта.

При использовании ТВГ в системе сверхнизкочастотной угловой стабилизации КА с большим телескопом, временные интервалы фильтрации могут быть выбраны достаточно большими. Поэтому можно ожидать, что случайные погрешности сигнала ТВГ удастся уменьшить до необходимого уровня. При этом на первый план выйдут систематические погрешности, основными из которых считаются дрейф и неравномерность по углу масштабного коэффициента  $K$  (переводит физические измерения угла стоячей волны в угловую скорость корпуса ТВГ). Они обычно являются следствием нарушения идеальности рабочих волновых процессов в ТВГ, а также контуров измерения и управления стоячими волнами.

Появление угловой неравномерности масштабного коэффициента  $K(\theta_A)$  может быть вызвано различными разъюстировками измерительного устройства ТВГ. Так, в соответствии с (6.6) при  $\theta_0 = const$  запишем:

$$K(\theta_A) = [-2\dot{\theta}_A + D(\theta_A)]/\Omega = [-2\dot{\theta}_A + D(\theta_A)]_{изм}/\Omega + \varepsilon(\theta_A). \quad (6.15)$$

Видно, что при измерениях  $K(\theta_A)$  для почти нулевых угловых скоростей  $\dot{\theta}_A \rightarrow 0$  может наблюдаться его неравномерность, пропорциональная ошибкам идентификации функции дрейфа:  $K(\theta_A) \approx D(\theta_A)/\Omega$ . Для более высоких угловых

скоростей неравномерность  $K(\theta_A)$  может объясняться погрешностями нахождения скорости угла  $\theta_A$ :  $K(\theta_A) \approx -2\dot{\theta}_A / \Omega$ . Остановимся на этом случае подробнее.

Разложим форму деформации кромки резонатора  $W(\theta, t)$  в ряд Фурье:

$$W(\theta, t) = C_0(t) + \sum_{i=1}^N [C_i(t) \cos i\theta + D_i(t) \sin i\theta]; \quad (6.16)$$

$$C_i(t) = (1/\pi) \cdot \int_0^{2\pi} [W(\theta, t) \cos i\theta] d\theta, \quad D_i(t) = (1/\pi) \cdot \int_0^{2\pi} [W(\theta, t) \sin i\theta] d\theta.$$

В случае идеальной настройки структуры измерительного устройства, выходные сигналы косинусного и синусного каналов в соответствии с (6.10) формируются по алгоритму:

$$\begin{aligned} 4C_2^{(0)} &= W_1 + W_5 - W_3 - W_7, \quad 4D_2^{(0)} = W_2 + W_6 - W_4 - W_8; \\ C_2^{(0)} &= A \cos 2\theta_A, \quad D_2^{(0)} = A \sin 2\theta_A; \quad \operatorname{tg} 2\theta_A = D_2^{(0)} / C_2^{(0)}, \end{aligned} \quad (6.17)$$

где  $A$  – функция колебаний рабочей стоячей волны.

При различии коэффициентов усиления сигналов от различных датчиков, а также при фазовых рассогласованиях в аналоговых операциях сложения и вычитания сигналов вместо (6.17) будем иметь:

$$\begin{aligned} 4C_2^{(1)} &= (1 + \varepsilon_1) W_1 + (1 + \varepsilon_5) W_5 - (1 + \varepsilon_3) W_3 - (1 + \varepsilon_7) W_7, \\ 4D_2^{(1)} &= (1 + \varepsilon_2) W_2 + (1 + \varepsilon_6) W_6 - (1 + \varepsilon_4) W_4 - (1 + \varepsilon_8) W_8, \end{aligned} \quad (6.18)$$

где  $\varepsilon$  – малые расстройки (могут дополнительно зависеть от температуры).

При нарушении топологии расположения датчиков (точности их установки на посадочные места) выражения (6.18) еще более усложнятся:

$$C_2^{(2)} = C_2^{(0)} + \sum_{i=1}^8 \varepsilon_{Ci} W_i, \quad D_2^{(2)} = D_2^{(0)} + \sum_{i=1}^8 \varepsilon_{Di} W_i; \quad (6.19)$$

Его частным случаем является нарушение угловой ортогональности (угловой независимости) результирующих синусного и косинусного сигналов с соответствующих четверок датчиков. Это должно отразиться в появлении взаимных наводок одного сигнала на другой, что особенно опасно при малых значениях одного из сигналов (сравнимых с наводками).

Применяя алгоритм вычислений (6.17), здесь будем иметь:

$$C_2^{(2)} = C_2^{(0)} + \varepsilon_C D_2^{(0)}, \quad D_2^{(2)} = D_2^{(0)} + \varepsilon_D C_2^{(0)}. \quad (6.20)$$

$$\begin{aligned} (\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} &= D_2^{(2)} / C_2^{(2)} = (D_2^{(0)} + \varepsilon_D C_2^{(0)}) / (C_2^{(0)} + \varepsilon_C D_2^{(0)}) = \\ &= (\sin 2\theta_A + \varepsilon_D \cos 2\theta_A) / (\cos 2\theta_A + \varepsilon_C \sin 2\theta_A) \neq \operatorname{tg} 2\theta_A. \end{aligned}$$

Ошибки расчета  $\varepsilon_K(\theta_A) = (\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} - \operatorname{tg} 2\theta_A$  будут искажать зависимость  $K(\theta_A)$  (6.15). При этом с учетом (6.20) в искажениях  $K(\theta_A)$  появятся гармонические функций второго порядка. Их компенсацию можно проводить алгоритмически, путем восстановления ортогональности четверок датчиков:

$$\begin{aligned} [C_2^{(2)}]_{\text{кор}} &= C_2^{(2)} - \varepsilon_C D_2^{(2)} = C_2^{(0)} (1 - \varepsilon_C \varepsilon_D); \quad [D_2^{(2)}]_{\text{кор}} = D_2^{(2)} - \varepsilon_D C_2^{(2)} = D_2^{(0)} \cdot (1 - \\ &\varepsilon_C \varepsilon_D); \quad (\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} = [D_2^{(2)}]_{\text{кор}} / [C_2^{(2)}]_{\text{кор}} = D_2^{(0)} / C_2^{(0)} = \operatorname{tg} 2\theta_A. \end{aligned}$$

На практике наиболее выраженная зависимость  $K(\theta_A)$  часто проявляется на четвертой угловой гармонике. В соответствии с (6.6) дрейф  $D(\theta_A)$  также в наибольшей мере описывается четвертой угловой гармоникой. При этом некорректность определения  $\theta_A$  одновременно будет влиять на  $D(\theta_A)$  и  $K(\theta_A)$ .

С другой стороны, влияние четвертой угловой гармонике может быть вызвано ее присутствием в функции деформации резонатора ТВГ (6.16):

$$W(\theta, t) = C_2(t) \cos 2\theta + D_2(t) \sin 2\theta + C_4(t) \cos 4\theta + D_4(t) \sin 4\theta. \quad \text{Тогда в (6.18):}$$

$$4C_2^{(1)} = 4C_2 + \varepsilon_{CC} C_4 + \varepsilon_{CD} D_4, \quad 4D_2^{(1)} = 4D_2 + \varepsilon_{DC} C_4 + \varepsilon_{DD} D_4;$$

$$(\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} = D_2^{(1)} / C_2^{(1)} = \operatorname{tg} 2\theta_A + f(2\theta_A, 4\theta_A); \quad \text{где:}$$

$$\begin{aligned} f(2\theta_A, 4\theta_A) &\approx (\varepsilon_{DC} C_4 + \varepsilon_{DD} D_4) / 4C_2 - (\varepsilon_{CC} C_4 + \varepsilon_{CD} D_4) / 4D_2; \quad \varepsilon_{CC} C_4 + \varepsilon_{CD} D_4 = \varepsilon_1 \\ W_1 + \varepsilon_5 W_5 - \varepsilon_3 W_3 - \varepsilon_7 W_7, \quad \varepsilon_{DC} C_4 + \varepsilon_{DD} D_4 &= \varepsilon_2 W_2 + \varepsilon_6 W_6 - \varepsilon_4 W_4 - \varepsilon_8 W_8. \end{aligned}$$

Оценить погрешности  $\varepsilon_{CC}$ ,  $\varepsilon_{CD}$ ,  $\varepsilon_{DC}$ ,  $\varepsilon_{DD}$  можно в моменты прохождения рабочей стоячей волной углов расположения датчиков:

$$\theta_A = 0 \quad \Rightarrow \quad (\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} = (\varepsilon_{DC} A_4) / (4A_2 + \varepsilon_{CC} A_4);$$

$$\theta_A = \pi/4 \quad \Rightarrow \quad (\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} = (\varepsilon_{DC} A_4 - 4A_2) / (\varepsilon_{CC} A_4);$$

$$\theta_A = \pi/2 \quad \Rightarrow \quad (\operatorname{tg} 2\theta_A)_{\text{выч}} = (\varepsilon_{DC} A_4) / (-4A_2 + \varepsilon_{CC} A_4); \quad \text{и т. д.}$$

Выявленную в исследованиях конкретного образца ТВГ нелинейную зависимость  $K(\theta_A)$  стремятся максимально сгладить. Для этого используют как ком-

пенсирующие функции, так и внутреннюю подстройку алгоритмов формирования выходных измерительных сигналов.

Описание других причин появления погрешностей измерительного сигнала ТВГ требует усложнения модели его волновой динамики [283]. Заметим, что в режиме угловой стабилизации КА с большим телескопом измеряемые углы будут крайне малыми. Тем не менее, наличие дрейфа волновой картины заставляет учитывать такую угловую неравномерность масштабного коэффициента.

Варианты измеренных зависимостей  $K(\theta_A)$  показаны на рисунке 6.6.

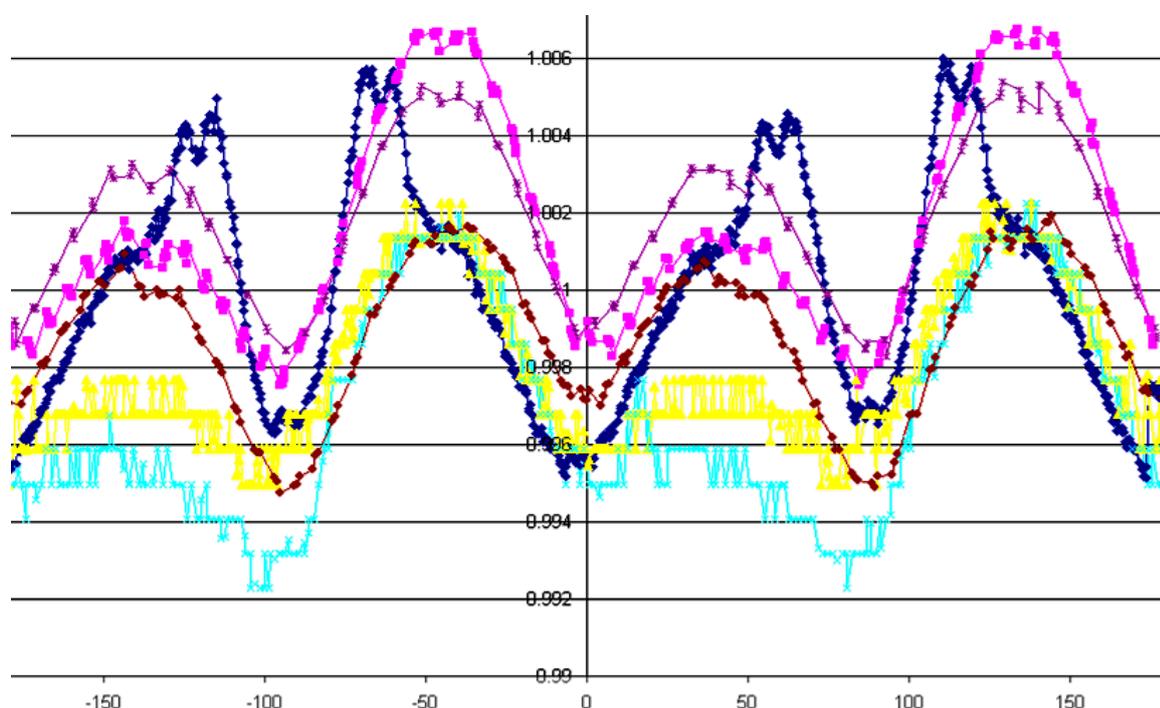


Рисунок 6.6 – Примеры зависимостей масштабного коэффициента от угла положения рабочей стоячей волны для нескольких ТВГ

На практике для уменьшения угловой неравномерности масштабного коэффициента  $K(\theta_A)$  можно использовать: 1) выравнивание коэффициентов усиления сигналов от различных датчиков; 2) выравнивание фазовых рассогласований в аналоговых операциях сложения и вычитания сигналов; 3) выполнение алгоритмической юстировки систем координат; 4) уменьшение неравномерности дрейфа сигнала, и другие.

В свою очередь, для уменьшения систематического дрейфа, как уже говорилось ранее, применяют: 1) повышение качества технологических процессов; 2) активное подавление квадратурной волны (квазистатическое или динамическое); 3) обработка результатов измерений с помощью функций антидрейфа (заранее измеряемых сглаженных аппроксимаций функций дрейфа). Различные варианты уменьшения систематического дрейфа обсуждаются в работах автора [276, 283].

При построении калибровочных функций антидрейфа для угла рабочей стоячей волны необходимо учитывать влияние на них следующих факторов: разночастотности, неоднородности, малых расстроек контуров управления, неравномерности рабочих емкостных зазоров, нарушения осесимметричности резонатора и других. При этом эффект разночастотности из-за разных отстроек от резонансных частот модальных колебаний может проявиться и в виде эксплуатационной неоднородности модальных колебаний (термин эксплуатационной добротности введен условно, для характеристики динамического отклика резонатора при его возбуждении на смещенной относительно резонанса частоте).

Следующими источниками малого систематического дрейфа могут стать контура системы управления ТВГ, влияющие либо на разнофазность, либо на эксплуатационную неоднородность. Их анализ и коррекция связаны со структурой и параметрами соответствующих каналов управления. Необходимо также учитывать наличие в ТВГ внутренних подсистем подавления дрейфа и их остаточных ошибок. Их возможности связаны с потенциалом общей системы управления волновыми процессами ТВГ. В традиционных режимах ТВГ для управления рабочей стоячей волной применяется один кольцевой электрод. Поэтому в них динамическое управление квадратурной волной не предусматривается, а его заменяет квазистатическая электрическая коррекция углового положения осей жесткости резонатора (контур квазистатической компенсации дрейфа волновой картины путем создания электрических пружин). Кроме этого, при проявлении неравномерности зазора может нарушаться абсолютное подобие пространственных угловых распределений рабочей стоячей волны (упругой деформации кромки резонатора) и возбуждающего стоячую волну управляющего усилия. Также, при наличии раз-

ночастотности может проявиться разная чувствительность стоячей волны к управляющему напряжению в отличающихся угловых направлениях.

В более поздних реализованных режимах ТВГ с пространственно разделенным динамическим управлением используется система дискретных управляющих электродов, расположенных по кольцу вокруг кромки резонатора ТВГ. Это потенциально позволяет выравнивать амплитуды возбуждения по разным осям (независимо от неравномерности зазора и отстроек от резонансов), а также создать самостоятельный контур динамического управления квадратурной волной для динамической компенсации систематического дрейфа. Однако при отладке таких режимов возникают свои причины погрешностей сигнала ТВГ.

При создании сопровождающих производство ТВГ его цифровых моделей-двойников в выписанных формулах и зависимостях можно использовать подбор параметров, соответствующих следующим эксплуатационным характеристикам:

№	Наименование	Значение
1	Добротность	7-10 минут
2	Разнодобротность	1%
3	Частота	5200 Гц
4	Разночастотность	$10^{-6}$ Гц
5	Систематический дрейф	2 - 5 °/час
6	Шум сигнала	1"
7	Несистематический дрейф	0.025 - 0.1 °/час
8	Нелинейность выходного сигнала	$2 \cdot 10^{-6}$ %

Они соответствуют типичному варианту ТВГ на переменном токе с резонатором диаметра 30 мм, не прошедшему полный цикл калибровки в производственных условиях. Или же после нарушения идеальной калибровки в условиях летной эксплуатации космического телескопа.

С увеличением размеров резонатора систематический дрейф измерительного сигнала и его шумы обычно уменьшаются, так как ослабляется влияние технологических погрешностей. Так, для отечественных ТВГ на постоянном токе с диаметром резонатора 50 мм получались добротность  $5 \cdot 10^6$ , частота  $3 \cdot 10^3$  Гц, дрейф – менее 0.4 °/час. В зарубежных высокотехнологических ТВГ дрейф в ряде случаев уменьшают до  $10^{-3} - 10^{-4}$  °/час.

Текущий контроль качества меры идеальности рабочих волновых процессов в ТВГ (особенно при его летной эксплуатации) можно отчасти проводить с использованием дополнительной информации, которую позволяет получить некоторая избыточность емкостных датчиков его измерительного устройства.

Рассмотрим возможности такого контроля разного вида погрешностей. Для варианта измерительного устройства ТВГ из восьми емкостных датчиков (Рисунок 6.2б) с учетом (6.16) и локальных измерений:  $W_i = W(\theta_i, t)$  ( $\theta_i = (i - 1) \cdot \pi/4$ ,  $i = 1, \dots, 8$ ) будут справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} W_1 &= C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4; & W_2 &= C_0 + D_2 - C_4 + (\sqrt{2}/2) \cdot \{C_1 + D_1 - C_3 + D_3\}; \\ W_3 &= C_0 + D_1 - C_2 - D_3 + C_4; & W_4 &= C_0 - D_2 - C_4 + (\sqrt{2}/2) \cdot \{D_1 - C_1 + C_3 + D_3\}; \\ W_5 &= C_0 - C_1 + C_2 - C_3 + C_4; & W_6 &= C_0 + D_2 - C_4 - (\sqrt{2}/2) \cdot \{C_1 + D_1 - C_3 + D_3\}; \\ W_7 &= C_0 - D_1 - C_2 + D_3 + C_4; & W_8 &= C_0 - D_2 - C_4 - (\sqrt{2}/2) \cdot \{D_1 - C_1 + C_3 + D_3\}. \end{aligned}$$

Из них для рабочих вторых угловых гармоник получаем (6.10), а для других побочных угловых гармоник имеем:

$$\begin{aligned} 8C_0 &= W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7 + W_8; \\ 4C_1 &= (W_1 - W_5) + (\sqrt{2}/2) \cdot \{W_2 - W_4 - W_6 + W_8\}; \\ 4D_1 &= (W_3 - W_7) + (\sqrt{2}/2) \cdot \{W_2 + W_4 - W_6 - W_8\}; \\ 4C_3 &= (W_1 - W_5) - (\sqrt{2}/2) \cdot \{W_2 - W_4 - W_6 + W_8\}; \\ 4D_3 &= -(W_3 - W_7) + (\sqrt{2}/2) \cdot \{W_2 + W_4 - W_6 - W_8\}; \\ 8C_4 &= (W_1 - W_2) + (W_3 - W_4) + (W_5 - W_6) + (W_7 - W_8). \end{aligned}$$

Заменяя здесь  $W_i$  на соответствующие сигналы емкостных датчиков, можно измерять и контролировать дополнительные функции разложения волнового процесса (6.16). Оценка  $C_0$  будет указывать на среднюю величину зазора между датчиками и резонатором. Коэффициенты  $C_1$  и  $D_1$  отражают дисбаланс – меру влияния стоячей рабочей волны на корпус ТВГ через упругую ножку (от этого зависит отток колебательной энергии резонатора и ухудшение его добротности). Коэффициенты  $C_3$ ,  $D_3$ ,  $C_4$  указывают на неидеальность формы рабочей стоячей волны (может влиять на ее дрейф и на нелинейность масштабного коэффициента).

При прогнозировании длительной летной эксплуатации ТВГ следует также учитывать возможность старения его механических и электронных компонентов. Для таких ситуаций особое значение приобретает разработка технологических процедур периодического контроля и перенастройки ТВГ, включая его измерительное устройство. Отчасти эти вопросы затронуты в монографии автора [283].

Таким образом, проведенные исследования скорости дрейфа и масштабного коэффициента в зависимости от угла стоячей волны, выполненные на промежуточных технологических образцах ТВГ в рамках производственного цикла, подтвердили достоверность полученных теоретических зависимостей. Тем самым, предложенные модели эксплуатационного поведения измерительного сигнала ТВГ могут быть эффективно использованы в цифровых моделях-двойниках комплексов многосистемного наведения проектов больших орбитальных телескопов.

#### **6.4 Выводы по главе 6**

1. Точность гироскопического датчика является важнейшим фактором, определяющим точность угловой стабилизации космического аппарата с телескопом, особенно в режимах наблюдения с длинными экспозициями. Ее повышение на практике в первую очередь связано с уменьшением дрейфа выходного сигнала.

Работа ТВГ в режиме интегрирующего гироскопа (режим датчика угла) в наибольшей мере удовлетворяет системе угловой стабилизации большого телескопа вместе с КА. Кроме этого, в нем рабочая стоячая волна является относительно свободной и не испытывает возвращающих воздействий со стороны внутренних контуров управления. При этом выходной сигнал ТВГ будет иметь уменьшенный систематический дрейф.

2. Разработанные модели описания внутренних волновых процессов с учетом контуров управления ими позволяют интеллектуально поддерживать процессы изготовления и калибровки высокоточных ТВГ. Они основаны на использовании модального анализа распределенных механических систем с дополнительным расчетом резонансных мод с помощью программ конечно-элементного моделиро-

вания в рамках САПР, сопровождающих производство твердотельных волновых гироскопов.

3. Дрейф выходного измерительного сигнала ТВГ определяется в первую очередь технологическими погрешностями, приводящими к несовершенству внутренних волновых процессов. Поэтому в производственных условиях требуется всемерно уменьшать технологические неточности конструктивных параметров, приводящие к разночастотности и разнодобротности резонатора.

Высокоточная настройка внутренних контуров управления волновыми процессами также важна для уменьшения дрейфа и повышения точности сигналов ТВГ. В первую очередь это относится к контуру подавления паразитной квадратурной волны, который в совокупности с контурами подстройки частоты резонансного возбуждения и стабилизации амплитуды рабочей стоячей волны определяет трехконтурную систему внутреннего управления волновыми процессами. При этом эффективность контура подавления малой паразитной квадратурной волны зависит от точности ее идентификации в измерительном устройстве ТВГ.

4. Неравномерность по углу масштабного коэффициента выходного сигнала ТВГ зависит от технологических погрешностей его измерительного устройства, которые отчасти могут быть алгоритмически скомпенсированы в процессе калибровки. На нее также влияет неидеальность внутренних волновых процессов. В режиме угловой стабилизации КА с большим телескопом измеряемые углы будут крайне малыми. Тем не менее, наличие дрейфа волновой картины заставляет учитывать такую угловую неравномерность масштабного коэффициента.

## **ГЛАВА 7. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МНОГОСИСТЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ НАВЕДЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ БОЛЬШИХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ**

Глава посвящена разработке методов совместного проектирования организационно-технологических распределенных комплексов для создания многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных). Для этого предложена методология проведения структурно-параметрического синтеза в качестве интеллектуальной поддержки их разработки, производства и настройки при создании больших телескопов.

Для проведения синтеза выбраны следующие базовые принципы: 1) результаты работы первых каналов управления влияют на требования к последующим каналам управления; 2) выбор частот каналов и систем управления должен проводиться согласованно с резонансными частотами упругой оптико-механической конструкции большого телескопа; 3) плавность работы систем и каналов наведения должна соответствовать допускам на создаваемые ими микродеформации облегченной оптико-механической конструкции большого телескопа; 4) увеличение допусков таких микродеформаций потребует увеличения числа модульных систем активного управления большого телескопа; 5) уменьшить эксплуатационные микродеформации больших облегченных конструкций телескопов позволит согласованный синтез «плавного» управления в контурах обратных связей модульных систем наведения; 6) при синтезе многосистемного комплекса наведения важна направленность на повышение автономности производственных операций, а также настройки и калибровки входящих в его состав модульных систем управления.

В соответствии с ними в главе рассмотрено решение задач синтеза алгоритмов «плавного» управления следящим телескопом (в ОПУ или на КА) и структурно-параметрического синтеза многосистемного наведения больших наземных и орбитальных телескопов. При этом группа систем сопровождения и группа систем коррекции волнового фронта нацелены на решение отличающихся задач со своими критериями качества и поэтому слабо зависимы в процессе своего авто-

номного производства. Практически независимыми в производстве также будут низкочастотная крупногабаритная активная оптика и высокочастотная адаптивная оптика намного меньших размеров.

Наиболее сильно связанными являются модульные системы общего сопровождения всем телескопом и системы корректирующего слежения. В их состав входит система слежения низшего уровня – углового управления всем телескопом (в ОПУ или на КА) и корректирующие системы слежения более высоких уровней – с помощью управления наклонами ВЗ, ТДЗ и др. Разработка методологии их взаимосвязанного структурно-параметрический синтеза, а также его проведение с ориентацией на автономность их производства являются целью данной главы. При этом отдельно будут рассмотрены комплексы слежения больших наземных оптических телескопов и больших орбитальных оптических телескопов. Большинство рассматриваемых здесь вопросов также освещены в книге автора [283].

### **7.1. Синтез алгоритмов управления следящим телескопом**

Синтезу и анализу алгоритмов управления механическими объектами посвящена достаточно обширная литература, включая книги [1, 99, 105, 129, 130, 131, 132, 156, 157 – 160, 171, 195, 197, 199, 206, и др.]. Систематизации направлений разработки алгоритмов наведения больших оптических телескопов посвящена также работа автора [275]. При этом постановка задач синтеза управления в первой и остальных модульных системах слежения различаются. В критериях качества для синтеза оптимальных алгоритмов общего слежения всем большим телескопом требуется учитывать ошибку слежения, затрачиваемое энергопотребление и ограничение на полосу частот управления. Получаемая точность слежения всем телескопом будет задавать диапазоны работы последующих корректирующих систем слежения, а полоса частот управления – спектр инерционных возмущений на всю оптико-механическую конструкцию большого облегченного оптического телескопа. Для корректирующих же систем слежения ограничения по энергопотреблению обычно не важны. Здесь основными критериями синтеза

управления становятся эффективная системная увязка каналов наведения в единый комплекс многоканального управления большим телескопом.

С учетом сказанного, синтез управления в системе углового наведения всем большим телескопом (в ОПУ или с помощью КА) будем проводить в соответствии с известными методиками синтеза оптимальных регуляторов. Их них наибольшую физическую наглядность имеет методика, приведенная в монографии [1]. Она наиболее подходит для записи модели углового движения телескопа в ранее приведенных передаточных функциях:

$$A(p) \alpha = u + f, \quad (7.1)$$

где  $p = d/dt$ ;  $\alpha = \omega_m/p = \varepsilon_m/p^2$  – угловая координата;  $u$  – управляющий момент;  $f$  – внешние возмущения;  $A(p)$  – инерционный оператор.

При этом критерий качества управления  $J_w$  выберем квадратичным и усредненным по времени ( $\langle \rangle$  – оператор усреднения по времени):

$$J_w = m_0^2 \langle \alpha^2 \rangle + m_1^2 \langle (p\alpha)^2 \rangle + m_2^2 \langle (p^2\alpha)^2 \rangle + m_3^2 \langle (p^3\alpha)^2 \rangle + \langle u^2 \rangle. \quad (7.2)$$

Физический смысл весовых коэффициентов  $m$  определяется их влиянием:  $m_0$  – на коэффициент усиления в обратной связи;  $m_1$ ,  $m_2$  – на плавность переходных процессов соответственно по скорости и по ускорению; а увеличение  $m_3$  будет приводить к уменьшению скорости изменения ускорений, что будет уменьшать частотную полосу инерционного воздействия на упругую конструкцию телескопа.

Экстремали (7.2) находятся из уравнения Эйлера через гурвицев полином  $G(p)$  (все его корни имеют отрицательные действительные части):

$$G(-p)G(p)\alpha = A(-p)f; \quad G(-p)G(p) \equiv A(-p)A(p) + m_0^2 - m_1^2 p^2 + m_2^2 p^4 - m_3^2 p^6. \quad (7.3)$$

Далее в регуляторе оставляют только устойчивую часть  $F(p)$ :

$$G(p)\alpha = \Psi, \quad \Psi = F(p)f, \quad (F(p) \equiv A(-p)/G(-p)). \quad (7.4)$$

При этом в первом уравнении (устойчивом) рассматривается общее решение, а во втором – только выделенное частное устойчивое решение уравнения  $G(-p)\Psi = A(-p)f$  для выбранной модели описания возмущений  $f$ . В выборе  $F(p)$  имеется свобода: от всего семейства устойчивых экстремалей до отдельной вы-

бранной экстремали. Из уравнений (7.2), (7.4) определяются оптимальный регулятор по выбранному критерию качества и уравнение замкнутой системы:

$$w = [A(p) - G(p)/F(p)]\alpha, \quad G(p)\alpha = F(p)f. \quad (7.5)$$

Если возмущения  $f$  моделировать через белый шум  $\eta$ , получим:

$$\alpha = [S_\eta(p)F(p)/G(p)]\eta, \quad f = S_\eta(p)\eta; \quad (7.6)$$

и последующий расчет дисперсии  $\alpha$  проводится стандартно.

В общем случае, при соизмеримых коэффициентах  $m_i$  в (7.2) нахождение  $G(p)$  проводится численными методами на основе (7.3). Однако в ряде важных частных случаев сразу получаются простые решения.

Так, для модели (3.5) с  $A(p) = p^n$  при выборе  $m_1 = m_2 = m_3 = 0$  из уравнения  $G(-p)G(p) = m_0^2 - p^{2n}$  имеем полиномы Баттерворта  $G(p)$   $n$ -го порядка. Очевидно, что близкие к ним регуляторы будут иметь место и для объектов с сильным доминированием  $m_0^2$  в  $J_w$ . Заметим, что случаю модели (3.5) отвечает  $n = 2$ . Для него более высокие значения  $n$  получаются после дифференцирования (3.5).

Для  $A(p) = p^2 + \nu p$  (с учетом вязкого демпфирования  $\nu$ ) и  $m_3 = 0$  имеем:

$$G(p) = (1+m_2^2)^{1/2} \{p^2 + 2\xi\Omega p + \Omega^2\},$$

$$\Omega^2 \equiv m_0/(1+m_2^2)^{1/2}, \quad \xi^2 \equiv 1/2 + (\nu^2 + m_1^2)/4(1+m_2^2)\Omega^2.$$

Здесь при увеличении  $m_2^2$  или частоты  $\Omega$  (которая зависит от  $m_0$ ), а также при  $\nu = m_1 = 0$ , коэффициент  $\xi$  приближается к  $1/2^{1/2}$ , а сам полином  $G(p)$  – к полиному Баттерворта второго порядка. Для ненулевых  $m_3$  при больших  $m_0$  можно получить фильтр Баттерворта третьего порядка.

Повышение порядка астатизма контуров обратных связей связано с введением интегральных звеньев. В этом случае следует продифференцировать (7.1), например:  $A(p)p\alpha = \nu + \delta f$ , где  $\nu = pu$ ,  $\delta f = pf$  – скорость изменения возмущений. Решая задачу оптимального подавления  $\delta f$  (с функционалом типа (7.2)), для больших  $m_0$  полином  $G(p)$  также будет стремиться к соответствующему фильтру Баттерворта. При этом в управлении  $u = \nu/p$  появится интегральное звено.

Таким образом, на начальных этапах синтеза алгоритмов управления для системы общего углового слежения всем большим телескопом в качестве "желае-

мых" полиномов переходных процессов можно принимать соответствующие полиномы Баттерворта. Во-первых, они близки к оптимальным решениям. Во-вторых, их известная плавность будет минимизировать инерционные нагрузки на деформируемую облегченную конструкцию большого телескопа. Кроме этого, дополнительно будем иметь понятный синтез параметров контуров управления, зависящий только от порядка и частоты выбранного полинома Баттерворта.

В более общем случае в качестве "желаемых" функций переходных процессов могут быть также выбраны функции, хорошо зарекомендовавшей себя в инженерной практике, а также желательные решения задачи оптимального синтеза регуляторов (7.1), (7.2) для частотно заглубленных операторов  $A(p)$  при специальном выборе весовых коэффициентов  $m_i$ .

Приведем примеры таких функций. Для полиномов второго порядка:  $G(p) = p^2 + K_2 \Omega p + \Omega^2$  ( $\Omega$  – выбираемая частота) коэффициент  $K_2$  на практике часто задают одним из следующих:  $K_2 = 2^{1/2}, 1.5, 1.8, 2$ , где случай  $K_2 = 2^{1/2}$  отвечает полиному Баттерворта:  $B_2(p) = (p - p_1)(p - p_2)$ ,  $p_{1,2} = -0.707\Omega(1 \pm j)$ . При введении в следящий контур одного интегрального звена можно выбрать  $pG(p) \approx p^3 + K_{31} \Omega p^2 + K_{32} \Omega^2 p + \Omega^3$  со следующими парами коэффициентов:  $(K_{31}, K_{32}) = (1.75, 2.15) = (1.9, 2.2) = (1.75, 3.25) = (3, 3) = (2.4, 2.4) = (2.5, 2.5)$ . Вариант  $(K_{31}, K_{32}) = (2, 2)$  отвечают полиному Баттерворта  $B_3(p) = (p + \Omega)(p^2 + \Omega p + \Omega^2)$  с корнями:  $p_1 = -\Omega$ ,  $p_{2,3} = -(0.5 \pm 0.857j) \cdot \Omega$ . При введении в следящий контур двух интегральных звеньев соответственно будем иметь полиномы четвертого порядка:  $p^2 G(p) \approx p^4 + K_{41} \Omega p^3 + K_{42} \Omega^2 p^2 + K_{43} \Omega^3 p + \Omega^4$ , в которых можно выбрать следующие варианты коэффициентов:  $(K_{41}, K_{42}, K_{43}) = (2.1, 3.5, 2.8) = (2.41, 4.93, 5.14) = (4, 6, 4) = (3, 4.25, 3)$ . Для полинома же Баттерворта имеем:  $(K_{41}, K_{42}, K_{43}) = (2.613, 3.414, 2.613)$  и  $B_4(p) = (p^2 + 0.765\Omega p + \Omega^2)(p^2 + 1.848\Omega p + \Omega^2)$  с корнями:  $p_{1,2} = (-0.383 \pm 0.924j) \cdot \Omega$ ,  $p_{3,4} = (-0.924 \pm 0.383j) \cdot \Omega$ .

При настройке регулятора на «желаемую» передаточную функцию  $1/A_{жс}(p)$  переходного процесса следует заменить на нее входящую в (7.6) функцию  $[S_{\eta}(p)F(p)/G(p)]$ . Здесь имеем регулятор и уравнение замкнутой системы:

$$u = [A(p) - A_{жс}(p)S_{\eta}(p)]\alpha, \quad A_{жс}(p)\alpha = \eta. \quad (7.7)$$

Если же реальная функция  $f$  возмущений описывается другой моделью:  $f = S_{\zeta}(p)\zeta$ , то для регулятора (7.7) следует принять:  $A_{жс}(p)\alpha = [S_{\zeta}(p)/S_{\eta}(p)]\zeta$ .

В дальнейшем синтезированные регуляторы могут быть уточнены и развиты в сторону параметрической и структурной оптимизации с использованием дополнительной информации о конкретных функциях возмущений  $f$  и о частотных свойствах упругой конструкции большого телескопа. В рамках приведенного формализма параметрическую оптимизацию можно проводиться по критериям точности и устойчивости, а структурную – через задание функции  $\Psi = F(p)f$ .

В наиболее общей постановке следует рассматривать задачу одновременно частотного синтеза упругой оптико-механической конструкции большого телескопа и его системы управления. На этом пути сначала могут быть выбраны желаемые низкочастотные полиномы замкнутых контуров исходя из общих требований по сопровождению. Далее может быть скорректирован эскиз упругой конструкции телескопа, чтобы разделить ее резонансные частоты с частотами активных контуров управления. После этого проводится синтез регуляторов по выбранным полиномам, моделирование процесса многосистемного слежения, а также подстройка параметров и структуры регуляторов в обратных связях.

Здесь также необходимо корректно системно учесть внешние и внутренние эксплуатационные возмущения. Чтобы повысить точность сопровождения в таких условиях, стараются по-возможности ослабить эти возмущения другими средствами (например, установкой ветрозащитных экранов и т.п.).

Расчет потенциально достижимой точности наведения следует проводить с использованием стандартных процедур синтеза оптимальных регуляторов в среде MATLAB на уточненных моделях объектов управления в каналах наведения для разных типовых вариантов внешних возмущений. Получаемые результаты могут быть определены как специальные режимы в интеллектуальной системе многосистемного наведения большого телескопа.

Таким образом, в качестве основных гладких решений замкнутых систем управления рекомендуется выбирать полиномы Баттерворта  $G(p)$ , отвечающие

хорошим переходным процессам и имеющие достаточно простое математическое описание для любого  $n$ -го порядка. Для низких порядков характеристических полиномов они дополнены также другими вариантами гладких полиномов, хорошо зарекомендовавших себя в инженерной практике синтеза управления. Их использование позволяет повысить плавность процессов слежения, минимизировать инерционные нагрузки на деформируемую конструкцию большого телескопа, а также делает простым и наглядным синтез параметров контуров управления, зависящий только от порядка и частоты выбранного полинома.

## **7.2. Структурно-параметрический синтез многосистемного наведения больших наземных телескопов**

Его будем выполнять по критериям эффективной системной увязки каналов слежения в единый комплекс наведения (так как для корректирующих систем слежения ограничения по энергопотреблению не столь важны). Так как современные комплексы многосистемного наведения являются многорежимными с функцией интеллектуальной настройки на выполняемые задачи и условия наблюдения, поэтому взаимную увязку основных и корректирующих систем слежения проведем для разных вариантов режимов слежения – от односистемных до многосистемных. Приоритет будем отдавать построению структурных схем итерационного типа в разных вариантах исполнения, что отвечают технической политике увеличения автономности при производстве и отладке модульных систем управления.

Учтем, что для наземных больших оптических телескопов многоканальная система наведения в общем случае может включать один (общее управление ОПУ), два (ОПУ + ВЗ), три (ОПУ + ВЗ + ТЗ, или ОПУ + ВЗ + АЗ), четыре (ОПУ + ВЗ + ТЗ + АЗ) и более одновременно работающих каналов слежения.

### **7.2.1. Варианты режимов и структур взаимодействия автономно проектируемых модульных систем слежения**

В общем случае в комплексах наведения больших оптических телескопов предусматриваются следующие режимы: 1) активное слежение за наблюдаемым КО; 2) отработка заданной программы углового перемещения; 3) активное демпфирование микроколебаний; 4) компенсация внешних возмущений (например, ветровых) в контурах комбинированного управления; 5) выключенное состояние (зафиксированное или активная стабилизация в своем «нуле»). Из них рассмотрим только режимы, относящиеся к сопровождению наблюдаемых объектов.

Для их разработки в наибольшей мере будем использовать книги [144, 194]. Последующий материал также приведен в монографии автора [283]. Для краткости его изложения будем рассматривать только одно координатное направление, так как для ортогонального ему направления все выкладки будет аналогичными. Тонкие взаимодействия между координатными направлениями при необходимости могут быть учтены позднее, на этапе полномасштабного моделирования многосистемного комплекса наведения большого оптического телескопа.

Поэтому далее углы ОПУ ( $H$  и  $A\cos(H)$ ) обобщенно будем обозначать через  $\alpha$ , а углы ВЗ – через  $\varphi$ . Зависимость углов  $\alpha$  и  $\varphi$  от соответствующих управляющих воздействий  $u$  будем описывать через свои передаточные функции:

$$\alpha = W_T(p) \cdot u_\alpha, \quad \varphi = W_{B3}(p) \cdot u_\varphi, \quad p \equiv d/dt \quad (7.8)$$

Здесь для наиболее простых моделей (3.5), (3.8), будем иметь:

$$W_T \approx \frac{1}{p^2}, \quad W_{B3} \approx \frac{1}{p^2 + \mu_k p + \omega^2}, \quad u_\alpha \equiv \frac{M_\alpha}{J_\alpha}, \quad u_\varphi \equiv \frac{F_\varphi l_u}{J_\varphi},$$

где  $\omega$  – резонансная частота ВЗ;  $J_\varphi$  – момент инерции ВЗ относительно точки подвеса;  $l_u$  – расстояние от точки подвеса до силовых приводов;  $F_\varphi$  – усилия приводов;  $J_\alpha$  – момент инерции телескопа относительно соответствующей оси (с учетом ОПУ);  $M_\alpha$  – момент управления.

Более сложные варианты таких передаточных функций при необходимости могут быть выписаны в соответствии с приведенными в главе 3 более точными линейными моделями объектов управления в каналах наведения телескопа.

Ошибкой сопровождения космического объекта (КО), имеющего закон движения  $\alpha_{КО}(t)$  по углу  $\alpha$ , для двухсистемного наведения является:

$$e = \alpha_{КО} - \alpha - K_0 \varphi, \quad \alpha = W_T(p) \cdot u_\alpha, \quad \varphi = W_{B3}(p) \cdot u_\varphi, \quad (7.9)$$

а в случае же трехсистемного слежения в углах  $\alpha$  (ОПУ),  $\varphi$  (ВЗ) и  $\psi$  (ТДЗ):

$$e = \alpha_{КО} - \alpha - K_0 \varphi - \psi; \quad \alpha = W_T(p) \cdot u_\alpha, \quad \varphi = W_{B3}(p) \cdot u_\varphi, \quad \psi = W_{ТДЗ}(p) \cdot u_\psi, \quad (7.10)$$

где  $K_0$  – коэффициент оптического преобразования ВЗ; коэффициент оптического преобразования ТДЗ равен единице (т.к. штанга подвеса отсутствует); передаточную функцию  $W_{ТДЗ}(p)$  для угла наклона можно принять по аналогии с  $W_{B3}(p)$ , а для угла его поворота – по аналогии с  $W_T(p)$ .

Для организации обратных связей в двухсистемном режиме слежения (7.9) потребуется следующий минимальный состав измерительных средств: 1) оптический датчик интенсивности (ДИ, например ПЗС-камера), установленный в фокальной плоскости телескопа и накапливающий на интервале экспозиции сигнал ошибки  $S_e = e + \xi_e$  с шумовой составляющей  $\xi_e$ ; 2) высокочастотный датчик угла телескопа (ДУТ), измеряющий сигнал  $S_\alpha = \alpha + \xi_\alpha$  с погрешностью  $\xi_\alpha$  (в общем случае вместо ДУТ может выступать датчик угловой скорости ДУС или даже гироскопический датчик ГД); 3) высокочастотный датчик положения вторичного зеркала (ДПВЗ), измеряющий сигнал  $S_\varphi = \varphi + \xi_\varphi$  с шумом  $\xi_\varphi$  и характеризующий отклонения штанги подвеса ВЗ от оси модуля вторичного зеркала. Для улучшения развязки одновременно работающих двух систем слежения и для повышения запасов их устойчивости дополнительно может быть введен оптический датчик телескопа (ОДТ), измеряющий ошибку слежения  $e_\alpha = \alpha_{КО} - \alpha$  первой системы (ОПУ) и формирующий сигнал  $S_{\Delta\alpha} = e_\alpha + \xi_{\Delta\alpha}$  с шумовой составляющей  $\xi_{\Delta\alpha}$ .

В режиме трехсистемного слежения (7.10) с дополнительным управлением ТДЗ потребуется также высокочастотный датчик положения третичного зеркала (ДПТЗ – измеряет сигнал  $S_\psi = \psi + \xi_\psi$  с шумом  $\xi_\psi$ ) и еще желателен оптический датчик после ВЗ для измерения ошибки  $e_{\alpha\varphi} = \alpha_{КО} - \alpha - K_0\varphi$  после второго канала управления (ОДВЗ – формирует сигнал  $S_{\Delta\alpha\varphi} = e_{\alpha\varphi} + \xi_{\Delta\alpha\varphi}$  с шумом  $\xi_{\Delta\alpha\varphi}$ ).

Режимы многосистемного управления большими телескопами зависят от поставленных задач и условий наблюдения. В общем случае они должны интеллектуально настраиваться на текущую ситуацию. Кратко рассмотрим основные из них, в порядке роста потенциальной точности слежения.

1. К режимам *программного односистемного управления* угловым движением телескопа в ОПУ можно отнести: компенсацию собственного вращения Земли, перенаведение на другой объект наблюдения, сканирование участка космического пространства, а также программное сопровождение КО с известными параметрами орбиты. В них обратная связь обычно замыкается через собственные угловые датчики положения или скорости.

2. Основным режимом *односистемного слежения* является сопровождение КО всем телескопом в ОПУ (рассмотрены ранее, в параграфе 7.1).

3. *Односистемное слежение с двухсистемным управлением.* Здесь программное сопровождение КО системой общего наведения телескопа в ОПУ дополняется следящим управлением наклонами ВЗ (или ТДЗ) во втором канале. Программа  $\alpha_{КО}^{\Pi}(t)$  углового движения ОПУ реализуется через обратную связь по ДУТ, а управление ВЗ выполняется по оптическому сигналу ошибки. Такому режиму соответствует структурная схема на рисунке 7.1, где:  $R(p)$  – регуляторы обратных связей;  $W(p)$  – передаточные функции;  $\xi$  – шумы датчиков;  $u$  – управляющие воздействия;  $\eta$  – внешние воздействия.

В целях компактности записи последующих формул будем их приводить без учета шумов и возмущений (т.е. везде будем полагать  $\xi \approx 0$ ,  $\eta \approx 0$ ):

$$\begin{aligned} \alpha &= W_T u_\alpha, \quad u_\alpha = R_\alpha e_\alpha^\Pi, \quad e_\alpha^\Pi = \alpha_{КО}^\Pi(t) - \alpha \Rightarrow e_\alpha^\Pi = \alpha_{КО}^\Pi(t) / (1 + W_T R_\alpha); \\ \varphi &= W_{BЗ} u_\varphi, \quad u_\varphi = R_\varphi e, \quad e = (\alpha_{КО} - \alpha) - K_0 \varphi = \{ [\alpha_{КО} - \alpha_{КО}^\Pi(t)] + e_\alpha^\Pi \} - K_0 \varphi \Rightarrow \\ e &= (\alpha_{КО} - \alpha) / (1 + K_0 W_{BЗ} R_\varphi) = [\alpha_{КО} - \alpha_{КО}^\Pi(t)] / (1 + K_0 W_{BЗ} R_\varphi) + \\ &\quad + \alpha_{КО}^\Pi(t) / [(1 + K_0 W_{BЗ} R_\varphi)(1 + W_T R_\alpha)]. \end{aligned} \quad (7.11)$$

Эта модель управления отвечает структуре итерационного типа. Ее преимуществом является то, что устойчивость обратной связи первого канала (по  $\alpha$ ) не зависит от второго канала (по  $\varphi$ ) и характеризуется только полюсами полино-

ма  $(1 + W_T R_\alpha)$ . В свою очередь, устойчивость второго канала (по  $\varphi$ ) будет зависеть от устойчивости обоих контуров (от полюсов полиномов  $(1 + W_T R_\alpha)$  и  $(1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)$ ). Тогда, если каждый канал по отдельности устойчив, то и вся система управления тоже будет устойчивой.

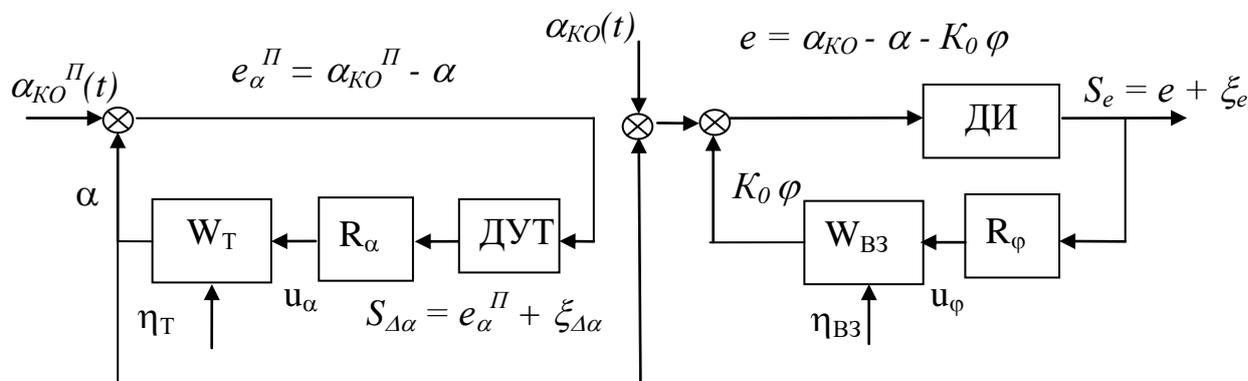


Рисунок 7.1 – Структура односистемного наведения с двухсистемным управлением

4. К режимам *двухсистемного слежения* за объектом наблюдения относится следующее сопровождение объекта наблюдения одновременно первой (с помощью ОПУ) и второй (с помощью ВЗ или ТДЗ) модульными системами. Такой режим может быть реализован в двух вариантах структурных схем (Рисунок 7.2). На них первая система наводится на КО по промежуточной ошибке  $e_\alpha = \alpha_{КО} - \alpha$ , а вторая – по оптическому сигналу полной ошибки  $e = \alpha_{КО} - \alpha - K_0 \varphi$ . При этом в схеме на рисунке 7.2а ошибка  $e_\alpha$  измеряется непосредственно оптическим датчиком ОДТ. Если же такой датчик отсутствует, то она может быть восстановлена с помощью сигнала ДПВЗ:  $e_\alpha = e + K_0 \varphi \approx S_e + K_0 S_\varphi$ . Этот вариант показан на рисунке 7.2б.

В сокращенной записи (при  $\xi \approx 0$ ,  $\eta \approx 0$ ) для схемы на рисунке 7.2а имеем:

$$\begin{aligned} \alpha &= W_T u_\alpha, \quad u_\alpha = R_\alpha e_\alpha, \quad e_\alpha = \alpha_{КО} - \alpha \Rightarrow e_\alpha = [1 / (1 + W_T R_\alpha)] \cdot \alpha_{КО}; \\ \varphi &= W_{B3} u_\varphi, \quad u_\varphi = R_\varphi e, \quad e = \alpha_{КО} - \alpha - K_0 \varphi \Rightarrow \\ e &= [1 / (1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)] \cdot e_\alpha = [1 / (1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)(1 + W_T R_\alpha)] \cdot \alpha_{КО}. \end{aligned} \quad (7.12)$$

В полученной итерационной структуре обратная связь первой системы наведения (по  $\alpha$ ) характеризуется полюсами полинома  $(1 + W_T R_\alpha)$ , а второй системы наведения (по  $\varphi$ ) – полюсами полинома  $(1 + W_T R_\alpha)(1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)$ .

Для структурной схемы на рисунке 7.2б для идеального случая будем иметь те же зависимости (7.12), но другой путь нахождения ошибки первой системы:  $e_\alpha \approx S_e + K_0 S_\varphi$ . В реальных ситуациях для нее потребуется дополнительная настройка масштабного коэффициента  $K_0$  в сигнале рассчитываемой ошибки  $e_\alpha$ . При корректирующем же слежении с помощью ТДЗ следует принимать  $K_0 = 1$ .

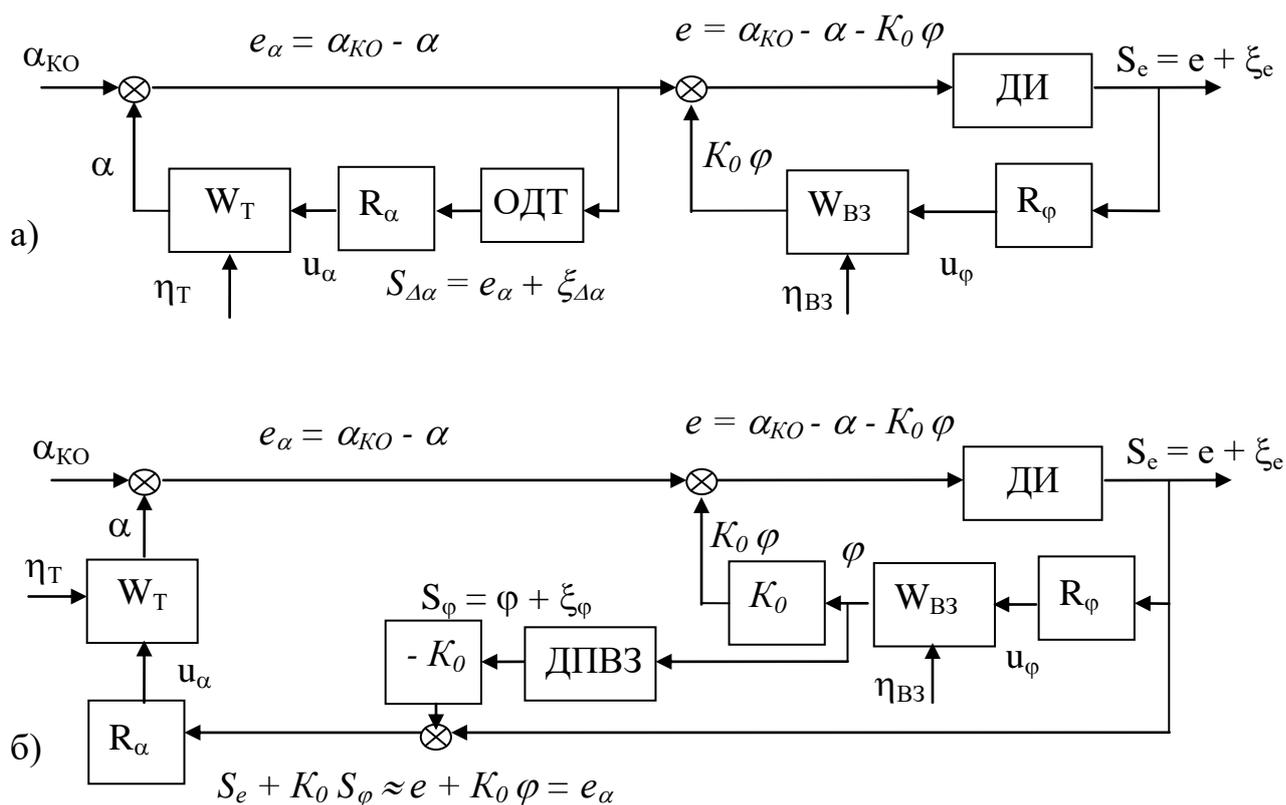


Рисунок 7.2 – Структуры двухсистемного слежения с ОДТ (а) и ДПВЗ (б)

5. Режимы двухсистемного слежения с понижением частотной полосы со-  
провождения. При наблюдении слабых астрономических объектов, требующих  
длительное накопление светового сигнала, переходят по возможности к режиму  
слежения по более ярким «гидирующим» звездам. Однако и их яркости может не  
хватить для обеспечения высокой частоты такта выдачи оптического сигнала  
ошибки (накапливаемого в ДИ). В то же время, частотные полосы каждого из ка-  
налов управления уменьшать нежелательно, так как они могут быть задействова-  
ны в других контурах компенсации внешних возмущений.

Если частоты такта выдачи оптического сигнала ошибки  $S_e$  не хватает для полноценной работы только корректирующей системы слежения, то структуру двухсистемного слежения можно оставить в прежнем варианте, как показано на рис. 7.2. Однако сигнал ошибки  $e$  во второй системе придется вычислять через экстраполяцию сигналов оптического датчика ДИ или с применением комплексирования с другими сигналами (алгоритмы будут рассмотрены в пункте 7.3.2).

При дальнейшем понижении частоты такта выдачи оптического сигнала ошибки  $e$  можно условно частотно разделить задачи сопровождения и управления. В этом случае в каждом из каналов следует ввести свои функции программного движения:  $\alpha_{\text{прогр}}(t)$  и  $\varphi_{\text{прогр}}(t)$ , которые в заниженных полосах частот должны описывать и экстраполировать траектории сопровождения по углам  $\alpha(t)$  и  $\varphi(t)$ . Далее функции  $\alpha_{\text{прогр}}(t)$  и  $\varphi_{\text{прогр}}(t)$  автономно отслеживаются в полосах частот каждой из систем по сигналам от своих датчиков (ДУТ и ДПВЗ) с учетом потенциального воздействия внешних возмущений. Этому соответствуют контура управления (см. схемы на рисунке 7.3а):

$$\begin{aligned} \alpha &= W_T u_\alpha, \quad u_\alpha = R_\alpha e_\alpha, \quad e_\alpha = \alpha_{\text{прогр}} - \alpha \Rightarrow e_\alpha = \alpha_{\text{прогр}} / (1 + W_T R_\alpha); \\ \varphi &= W_{B3} u_\varphi, \quad u_\varphi = R_\varphi e_\varphi, \quad e_\varphi = \varphi_{\text{прогр}} - \varphi \Rightarrow e_\varphi = \varphi_{\text{прогр}} / (1 + W_{B3} R_\varphi). \end{aligned} \quad (7.13)$$

Для согласованного нахождения функций  $\alpha_{\text{прогр}}(t)$  и  $\varphi_{\text{прогр}}(t)$  с учетом специфики взаимодействия систем управления можно использовать моделирование схемы, показанной на рисунке 7.3б. Она соответствует схеме на рисунке 7.2, но ограничена по полосе частот низкочастотным фильтром  $W_{HЧ}(p)$  и работает при отсутствии возмущений. Входными сигналами контуров в такой модели являются сигналы датчиков, пропущенные через низкочастотный фильтр:

$$e_\alpha = \alpha_{KO} - \alpha \Rightarrow S_{HЧ}^\alpha = W_{HЧ} e_\alpha; \quad e = \alpha_{KO} - \alpha - K_0 \varphi \Rightarrow S_{HЧ}^e = W_{HЧ} e. \quad (7.14)$$

Чтобы выразить их через функции  $\alpha_{\text{прогр}}$  и  $\varphi_{\text{прогр}}$ , представим:

$$\begin{aligned} e_\alpha &= \alpha_{KO} - \alpha = e_{\text{прогр}}^\alpha + \Delta e^\alpha, \quad e_{\text{прогр}}^\alpha = \alpha_{KO} - \alpha_{\text{прогр}}, \quad \Delta e^\alpha = \alpha_{\text{прогр}} - \alpha; \\ e &= \alpha_{KO} - \alpha - K_0 \varphi = e_{\text{прогр}} + \Delta e, \\ e_{\text{прогр}} &= (\alpha_{KO} - \alpha_{\text{прогр}}) - K_0 \varphi_{\text{прогр}}, \quad \Delta e = (\alpha_{\text{прогр}} - \alpha) + K_0 (\varphi_{\text{прогр}} - \varphi), \end{aligned} \quad (7.15)$$

Тогда с учетом  $W_{HЧ} \Delta e^\alpha \approx 0$ ,  $W_{HЧ} \Delta e \approx 0$  приближенно будем иметь:

$$S_{HЧ}^\alpha = W_{HЧ} e_\alpha \approx W_{HЧ} e_{\text{прогр}}^\alpha = W_{HЧ} \alpha_{КО} - \alpha_{\text{прогр}}, \quad (7.16)$$

$$S_{HЧ}^e = W_{HЧ} e \approx W_{HЧ} e_{\text{прогр}} = (W_{HЧ} \alpha_{КО} - \alpha_{\text{прогр}}) - K_0 \varphi_{\text{прогр}}.$$

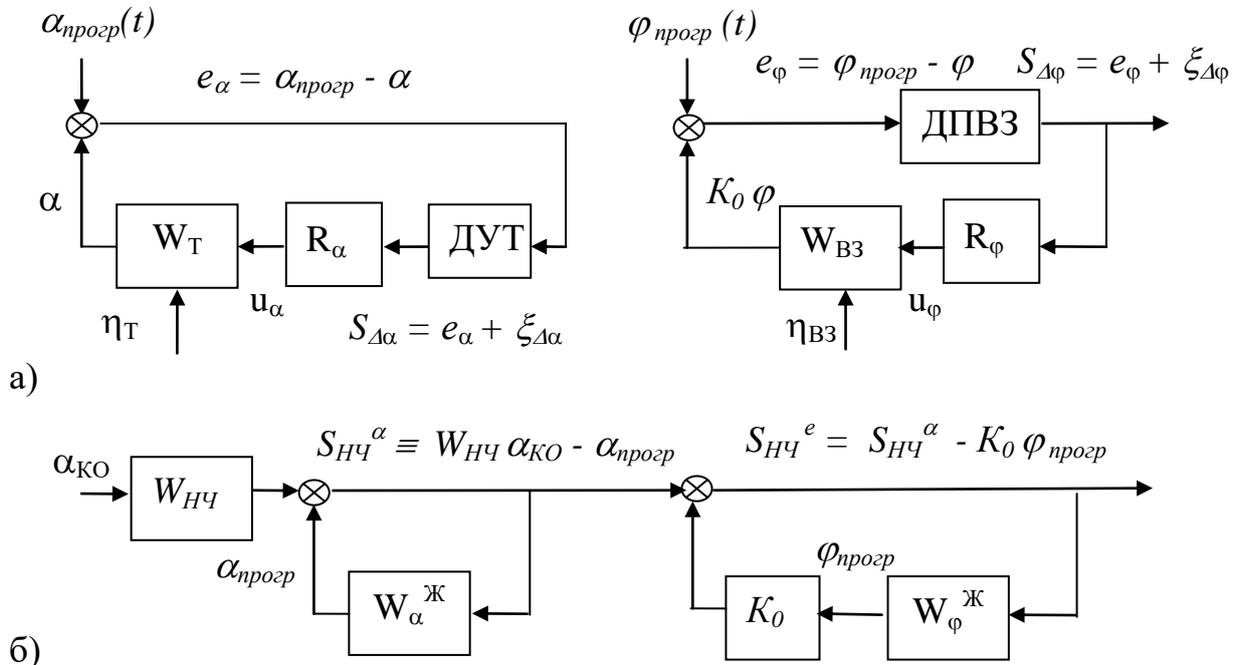


Рисунок 7.3 – Двухканальное наведение с пониженной частотой сопровождения: контура выполнения (а) и формирования (б) программных заданий

В более общем случае в этих сигналах также можно учесть высокочастотные возмущения, вносимые контурами отслеживания программных функций:

$$S_{HЧ}^\alpha = W_{HЧ} e_\alpha \approx W_{HЧ} \alpha_{КО} - \alpha_{\text{прогр}} + W_{HЧ} \Delta e^\alpha,$$

$$S_{HЧ}^e = W_{HЧ} e \approx (W_{HЧ} \alpha_{КО} - \alpha_{\text{прогр}}) - K_0 \varphi_{\text{прогр}} + W_{HЧ} \Delta e,$$

где возмущения  $W_{HЧ} \Delta e^\alpha$ ,  $W_{HЧ} \Delta e$  могут быть вычислены с использованием сигналов ДУТ и ДПВЗ, пропущенных через низкочастотный фильтр.

Регуляторы в обратных связях на схеме рисунка 7.3б настраиваются на пониженные частоты замкнутых систем с желаемыми переходными процессами:

$$\alpha_{\text{прогр}} = W_\alpha^{\text{Ж}} S_{HЧ}^\alpha \Rightarrow \alpha_{\text{прогр}} = [W_\alpha^{\text{Ж}} / (1 + W_\alpha^{\text{Ж}})] \cdot W_{HЧ} \alpha_{КО}; \quad (7.17)$$

$$\varphi_{\text{прогр}} = W_\varphi^{\text{Ж}} S_{HЧ}^e \Rightarrow \varphi_{\text{прогр}} = W_\varphi^{\text{Ж}} (W_{HЧ} \alpha_{КО} - \alpha_{\text{прогр}} - K_0 \varphi_{\text{прогр}}) \Rightarrow$$

$$\varphi_{\text{прогр}} = W_\varphi^{\text{Ж}} (W_{HЧ} \alpha_{КО} - \alpha_{\text{прогр}}) / (1 + K_0 W_\varphi^{\text{Ж}}) = \quad (7.18)$$

$$= \{ [W_{\varphi}^{\mathcal{K}} / (1 + K_0 W_{\varphi}^{\mathcal{K}})] \cdot [1 / (1 + W_{\alpha}^{\mathcal{K}})] \} \cdot W_{\text{НЧ}} \alpha_{\text{КО}} ;$$

Итерационный характер (7.18) облегчает обеспечение их устойчивости.

6. К режимам *двухсистемного слежения с трехсистемным управлением* относится режим повышения точности наведения с помощью второй (ВЗ) и третьей (ТДЗ) корректирующих систем при программном режиме работы первой системы (например, при компенсации вращения Земли с помощью ОПУ). Введение третьей, более быстрой системы ТДЗ позволит расширить полосу частот активного слежения, однако на практике она из-за своего малого углового диапазона в редких случаях сможет работать без системы управления ВЗ.

Получающиеся структуры двухсистемного слежения будут аналогичны структурам на рис. 7.2. При этом третья система управления (по углу  $\psi$ ) будет замыкать обратную связь через измеряемый итоговый сигнал  $S_e$  ошибки сопровождения:  $e = [e_{\alpha}(t) - K_0 \varphi] - \psi$ ,  $e_{\alpha}(t) \equiv \alpha_{\text{КО}}(t) - \alpha \rightarrow 0$ , а вторая система (по углу  $\varphi$ ) – через измеряемый оптическим датчиком ОДВЗ сигнал  $S_{\Delta\alpha\varphi} = e_{\alpha\varphi} + \xi_{\Delta\alpha\varphi}$  ошибки  $e_{\alpha\varphi} = e_{\alpha}(t) - K_0 \varphi$  или через вычисляемый сигнал (с использованием измерительных сигналов ДУТ, ДПВЗ и ДПТЗ):

$$e_{\alpha\varphi} = e_{\alpha}(t) - K_0 \varphi, \quad e_{\alpha}(t) = [\alpha_{\text{КО}}(t) - \alpha_{\text{нрозр}}(t)] + [\alpha_{\text{нрозр}}(t) - \alpha(t)], \quad (7.19)$$

где:  $\alpha_{\text{КО}}(t) - \alpha_{\text{нрозр}}(t) \approx W_{\text{НЧ}} \{ e + \psi + K_0 \varphi - [\alpha_{\text{нрозр}}(t) - \alpha(t)] \}$ .

Для рассмотренных структур двухсистемного слежения дополнительно важно отметить следующее. При слежении с помощью ОПУ и ВЗ требуется обязательно контролировать условие, характеризующее сохранность юстировки оптической схемы телескопа:  $\langle \varphi(t) \rangle \leq \varphi_{\text{max}}$ . Если оно будет нарушаться при малых амплитудах ошибок в системах сопровождения ( $\langle e_{\alpha} \rangle \rightarrow 0$ ,  $\langle e \rangle \rightarrow 0$ ), значит следует изменить установку «нулей» в измерительных сигналах первой системы.

При слежении с помощью ОПУ и ТДЗ аналогичное требование  $\langle \psi(t) \rangle \leq \psi_{\text{max}}$  тоже в общем случае желательно соблюдать, но оно обычно не является столь критичным. И наконец, при слежении с помощью ВЗ и ТДЗ при программном движении ОПУ желательно контролировать:  $\langle \varphi(t) \rangle \leq \varphi_{\text{max}}$  и  $\langle \psi(t) \rangle \leq \psi_{\text{max}}$ .

7. Режим *трехсистемного сопровождения* объекта наблюдения обеспечивается активной работой всех трех систем слежения – с помощью медленного ОПУ, среднечастотного ВЗ и более быстрого ТДЗ. Частотная полоса следящего сопровождения при этом потенциально расширяется и ограничивается верхней частотой управления ТДЗ. Получающиеся трехсистемные структуры управления идеологически повторяют проанализированные ранее двухсистемные структуры управления. В них третья система управления добавляется теми же способами, которыми добавлялась ранее вторая система слежения (Рисунок 7.2). Так как схемы структур получаются громоздкими, прорисовывать их здесь не будем. Также как и прежде, для упрощения формул не будем выписывать шумовые составляющие и возмущения, полагая:  $\xi \approx 0$ ,  $\eta \approx 0$ .

Базисная трехсистемная структура управления по своей идеологии повторяет двухсистемную базисную структуру на рисунке 7.2а. В ней измерительными средствами контуров обратных связей являются три оптических датчика, измеряющие сигналы: ДИ ( $e$ ):  $e = e_\alpha - K_0 \varphi - \psi$ ; ДВЗ ( $e_{\alpha\varphi}$ ):  $e_{\alpha\varphi} = e_\alpha - K_0 \varphi$ ; ОДТ ( $e_\alpha$ ):  $e_\alpha = \alpha_{KO}(t) - \alpha$ . Тогда имеем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \alpha &= W_T u_\alpha, \quad u_\alpha = R_\alpha e_\alpha, \quad e_\alpha = \alpha_{KO} - \alpha \Rightarrow e_\alpha = [1 / (1 + W_T R_\alpha)] \cdot \alpha_{KO}; \\ \varphi &= W_{B3} u_\varphi, \quad u_\varphi = R_\varphi e_{\alpha\varphi}, \quad e_{\alpha\varphi} = e_\alpha - K_0 \varphi \Rightarrow \\ e_{\alpha\varphi} &= [1 / (1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)] \cdot e_\alpha = [1 / (1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)(1 + W_T R_\alpha)] \cdot \alpha_{KO}; \\ \psi &= W_{ТДЗ} u_\psi, \quad u_\psi = R_\psi e, \quad e = e_{\alpha\varphi} - \psi \Rightarrow \\ e &= [1 / (1 + W_{ТДЗ} R_\psi)] \cdot e_{\alpha\varphi} = [1 / (1 + W_{ТДЗ} R_\psi)] \cdot [1 / (1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)] \cdot e_\alpha = \\ &= [1 / (1 + W_{ТДЗ} R_\psi)] \cdot [1 / (1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)] \cdot [1 / (1 + W_T R_\alpha)] \cdot \alpha_{KO}. \end{aligned} \quad (7.20)$$

Во второй структуре (аналогичной по своей идеологии схеме на рисунке 7.2б) основными измерительными средствами выбираются оптический ДИ (ДИ ( $e$ ):  $e = e_\alpha - K_0 \varphi - \psi$ ) и два позиционных датчика: ДПВЗ и ДПТЗ. При этом сигналы  $e_{\alpha\varphi}$  и  $e_\alpha$  будем вычислять по формулам: ДПТЗ ( $\psi$ ), ДИ ( $e$ )  $\Rightarrow e_{\alpha\varphi} = e + \psi$ ; ДПВЗ ( $\varphi$ ), ДПТЗ ( $\psi$ ), ДИ ( $e$ )  $\Rightarrow e_\alpha = e + \psi + K_0 \varphi$ .

С точки зрения других комбинаций измерительных сигналов допустимы еще три варианта «промежуточных» структур формирования сигналов ошибок для замыкания контуров обратных связей в системах сопровождения:

1) ДИ ( $e$ ):  $e = e_\alpha - K_0 \varphi - \psi$ ; ДПТЗ ( $\psi$ ), ДИ ( $e$ )  $\Rightarrow e_{\alpha\varphi} = e + \psi$ , ОДТ ( $e_\alpha$ ):  $e_\alpha = \alpha_{КО}(t) - \alpha$ ; 2) ДИ ( $e$ ):  $e = e_\alpha - K_0 \varphi - \psi$ ; ОДТ ( $e_\alpha$ ):  $e_\alpha = \alpha_{КО}(t) - \alpha$ , ДПВЗ ( $\varphi$ ), ОДТ ( $e_\alpha$ )  $\Rightarrow e_{\alpha\varphi} = e_\alpha - K_0 \varphi$ ; 3) ДИ ( $e$ ):  $e = e_\alpha - K_0 \varphi - \psi$ , ОДВЗ ( $e_{\alpha\varphi}$ ):  $e_{\alpha\varphi} = e_\alpha - K_0 \varphi$ , ДПВЗ ( $\varphi$ ), ОДВЗ ( $e_{\alpha\varphi}$ )  $\Rightarrow e_\alpha = e_{\alpha\varphi} + K_0 \varphi$ .

В общем случае возможны и другие структуры трехсистемного слежения, учитывающие различные режимы в каналах управления.

Более подробно всевозможные структуры многосистемного управления здесь рассматривать не будем. Их общие уравнения при правильной юстировке комплекса управления и корректной реализации вычислительных процедур формирования измерительных сигналов в целом будут повторять выписанные итерационные уравнения (7.20). Для измерительных сигналов пониженной частоты они будут развивать подход, описываемый уравнениями (7.13) – (7.18).

Также можно рассмотреть расширение выделенных режимов с учетом введения дополнительной высокочастотной системы адаптивной оптики для компенсации наклонов в атмосферных абберациях. Однако большое различие частот работы малоразмерного адаптивного зеркала и каналов сопровождения обычно позволяет развязать системы и рассматривать их автономно.

### **7.2.2. Согласование параметров синтезируемых регуляторов в многосистемных комплексах слежения**

Как уже отмечалось, синтез регуляторов в контурах обратных связей для описанных выше структур наведения целесообразно проводить исходя из получения наиболее гладких переходных процессов. Это позволит минимизировать инерционные нагрузки на облегченную деформируемую оптико-механическую конструкцию большого телескопа. Если полосы частот каналов управления сильно различаются, то синтез регуляторов в каждом канале может быть выполнен ав-

тономно и почти независимо. Итерационность приведенных структур многосистемного наведения больших телескопов обеспечит их устойчивость в целом. Если же полосы частот систем слежения требуется сблизить, то синтез регуляторов каждого последующего канала следует выполнять с учетом переходных процессов регулирования предыдущих каналов. Далее кратко рассмотрим некоторые варианты синтеза регуляторов для приведенных выше структур многосистемного управления, обеспечивающие желаемые гладкие переходные процессы.

1. В схемах двухсистемного слежения при сильно отличающихся полосах частот ( $\Omega_\varphi \gg \Omega_\alpha$ ) допускаются автономный синтез контуров уравнения (7.12):

$$\begin{aligned} e_\alpha &= [1 / (1 + W_T R_\alpha)] \cdot \alpha_{KO} = [M_{e\alpha}(p) / D_{e\alpha}(p)] \cdot \alpha_{KO}, \\ e &= [1 / (1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)] \cdot e_\alpha = [M_{e\varphi}(p) / D_{e\varphi}(p)] \cdot e_\alpha, \end{aligned} \quad (7.21)$$

где  $D(p)$ ,  $M(p)$  – полиномы, а регуляторы  $R$  настраиваются на получение желаемых полиномов  $D(p)$  соответствующих порядков.

При этом с точки зрения минимизации создаваемых инерционных нагрузок наиболее плавным (и поэтому по возможности низкого порядка) следует выбрать полином  $D_{e\alpha}(p)$  для первого канала наведения в (7.21).

Выбор частоты второго канала влияет на его согласование с частотой такта выдачи оптического сигнала ошибки (причем, чем ниже частота, тем будет выше согласованность). Для синтеза второго канала слежения с пониженной частотой следует (7.21) рассматривать во взаимосвязи, представляя в виде:

$$\begin{aligned} e_\alpha &= [1 / (1 + W_T R_\alpha)] \cdot \alpha_{KO} = [M_{e\alpha}(p) / D_{e\alpha}(p)] \cdot \alpha_{KO}, \\ e &= [1 / (1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)(1 + W_T R_\alpha)] \cdot \alpha_{KO} = [M_e(p) / D_e(p)] \cdot \alpha_{KO}, \end{aligned} \quad (7.22)$$

где:  $M_e(p) / D_e(p) = [M_{e\alpha}(p)M_{e\varphi}(p)] / [D_{e\alpha}(p)D_{e\varphi}(p)]$ ; а также к ним при необходимости можно добавить полиномы описания функции  $\alpha_{KO}$  моделью «цветного» шума:  $\alpha_{KO} = [M_{KO}(p) / D_{KO}(p)] \cdot \xi_{KO}$ , где  $\xi_{KO}$  – белый шум.

Если в обоих каналах использовать ПИИД-регуляторы, то для итоговой ошибки сопровождения  $e$  можно сформировать переходной процесс, характеризуемый полиномом Баттерворта восьмого порядка:

$$D_e(p) \approx B_8(p) \equiv p^8 + 5.23 \Omega p^7 + 13.14 \Omega^2 p^6 + 21.85 \Omega^3 p^5 + \\ + 25.69 \Omega^4 p^4 + 21.85 \Omega^5 p^3 + 13.14 \Omega^6 p^2 + 5.23 \Omega^7 p + \Omega^8.$$

Если в одном из каналов ПИИД-регулятор заменить на ПИД-регулятор, для описания  $D_e(p)$  может подойти полином Баттерворта седьмого порядка:  $D_e(p) \approx B_7(p) \equiv p^7 + 4.5 \Omega p^6 + 10.1 \Omega^2 p^5 + 14.6 \Omega^3 p^4 + 14.6 \Omega^4 p^3 + 10.1 \Omega^5 p^2 + 4.5 \Omega^6 p + \Omega^7$ .

Чтобы одновременно иметь два желаемых полинома  $D_{e\alpha}(p)$ ,  $D_e(p)$  (соответственно для уменьшения инерционных нагрузок на телескоп и для повышения согласованности с частотой оптического датчика ошибки), полиномы во втором контуре управления можно выбирать в виде (или близким к нему):

$$M_{e\varphi}(p) / D_{e\varphi}(p) = [M_e(p) \cdot D_{e\alpha}(p)] / [M_{e\alpha}(p) \cdot D_e(p)]. \quad (7.23)$$

2. В режиме двухсистемного слежения с понижением частоты сопровождения (Рисунок 7.3) при сильно отличающихся полосах частот ( $\Omega_\varphi \gg \Omega_\alpha$ ) для синтеза программных заданий выделим в (7.17), (7.18) полиномы  $D(p)$ ,  $M(p)$ :

$$\alpha_{\text{прогр}} = [W_\alpha^{\text{Ж}} / (1 + W_\alpha^{\text{Ж}})] \cdot W_{\text{НЧ}} \alpha_{\text{КО}} = [M_\alpha(p) / D_\alpha(p)] \cdot W_{\text{НЧ}} \alpha_{\text{КО}} \\ \varphi_{\text{прогр}} = [W_\varphi^{\text{Ж}} / (1 + K_0 W_\varphi^{\text{Ж}})] \cdot (W_{\text{НЧ}} \alpha_{\text{КО}} - \alpha_{\text{прогр}}) = \\ = [M_\varphi(p) / D_\varphi(p)] \cdot (W_{\text{НЧ}} \alpha_{\text{КО}} - \alpha_{\text{прогр}}). \quad (7.24)$$

При этом наиболее гладким функциям  $D(p)$  соответствуют полиномы второго порядка:  $D(p) = p^2 + K_2 \Omega p + \Omega^2$ , где  $\Omega$  – частота соответствующего канала, а варианты эффективного выбора коэффициента  $K_2$  приведены в параграфе 7.1.

Контур отслеживания программных функций определяются (7.13):

$$\alpha = [W_T R_\alpha / (1 + W_T R_\alpha)] \alpha_{\text{прогр}}, \quad \varphi = [W_{B3} R_\varphi / (1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)] \varphi_{\text{прогр}}, \quad (7.25)$$

При  $\Omega_\varphi \gg \Omega_\alpha$  их можно изучать независимо. Поэтому для определенности рассмотрим только вторую систему (для первой системы все будет аналогично).

При  $\Omega_\varphi \gg \Omega_\varphi^{\text{прогр}}$  переходные процессы регулирования в контуре ВЗ ( $\varphi = W_{B3} R_\varphi e_\varphi$ ) для традиционного ПИД-регулятора будут характеризоваться полиномом третьего порядка:  $pD(p) \approx p^3 + K_{31} \Omega p^2 + K_{32} \Omega^2 p + \Omega^3$ , а для ПИИД-регулятора – соответственно полиномом четвертого порядка:  $p^2 D(p) \approx p^4 + K_{41} \Omega$

$p^3 + K_{42} \Omega^2 p^2 + K_{43} \Omega^3 p + \Omega^4$ . Рекомендованные на практике значения коэффициентов  $K$  для них были приведены в параграфе 7.1.

Если требуется приблизить частоту  $\Omega_\varphi$  к  $\Omega_\varphi^{nрогр}$ , подставим (7.21) в (7.22):

$$\varphi = [W_{B3} R_\varphi / (1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)] [W_\varphi^{ж} / (1 + K_0 W_\varphi^{ж})] \cdot (W_{НЧ} \alpha_{КО} - \alpha_{nрогр}).$$

При этом порядок итогового полинома будет определяться суммой порядков полиномов в (7.21) и (7.22):  $2 + 3 = 5$  или  $2 + 4 = 6$ .

В первом случае можно использовать полиномы пятого порядка

$$p^5 + K_{51} \Omega p^4 + K_{52} \Omega^2 p^3 + K_{53} \Omega^3 p^2 + K_{54} \Omega^4 p + \Omega^5$$

с вариантами выбора коэффициентов  $(K_{51}, K_{52}, K_{53}, K_{54}) = (3.23, 5.23, 5.23, 3.23) = (2.8, 5.0, 5.5, 3.4) = (2.19, 6.5, 6.3, 5.24) = (5, 10, 10, 5) = (4, 7.25, 7.25, 4)$ , где первый вариант отвечает полиному Баттерворта  $B_5(p)$ .

Во втором случае потребуются полиномы шестого порядка:

$$p^6 + K_{61} \Omega p^5 + K_{62} \Omega^2 p^4 + K_{63} \Omega^3 p^3 + K_{64} \Omega^4 p^2 + K_{65} \Omega^5 p + \Omega^6,$$

с вариантами выбора коэффициентов  $(K_{61}, K_{62}, K_{63}, K_{64}, K_{65}) = (3.86, 7.46, 9.14, 7.46, 3.86) = (3.15, 6.5, 8.7, 7.55, 4.05) = (3.25, 6.6, 8.6, 7.45, 3.95) = (4.5, 9.75, 12.375, 9.75, 4.5) = (6, 15, 20, 15, 6)$ , где первый вариант отвечает полиному Баттерворта  $B_6(p)$ .

3. В режиме трехсистемного сопровождения с ПИИД-регуляторами в каналах слежения порядок полинома переходного процесса для итоговой ошибки  $e$  может достигать двенадцатого порядка ( $4 \times 3$  канала = 12). Если коэффициенты при интеграторах выбирать очень малыми (что приближает регуляторы к ПД-регуляторам), его порядок можно приближенно оценить шестым ( $2 \times 3$  канала = 6). Можно также выбирать и другие промежуточные порядки такого полинома.

Рекомендуемые на практике гладкие полиномы невысоких порядков были выписаны ранее. Для случая же высоких четных порядков  $n$  наиболее удобны полиномы Баттерворта, которые раскладываются на произведение звеньев второго порядка с полюсами:  $p = -\Omega [ \cos(k\pi/2n) \pm \sin(k\pi/2n) j ]$ ,  $\pi/2 \leq k\pi/2n \leq 3\pi/2$ .

При этом выбираются только устойчивые полюса (в левой полуплоскости ( $\pi/2, 3\pi/2$ )) из следующего множества полюсов:  $\{ \exp(j\pi/2n), \exp(j3\pi/2n), \exp(j5\pi/2n), \dots \}$ .

$/2n), \exp(j7\pi/2n), \dots \}$ . В свою очередь, для нечетных порядков  $n$  выбор полюсов в левой полуплоскости производится из следующего множества:  $\{1, \exp(j\pi/n), \exp(j2\pi/n), \exp(j3\pi/n), \exp(j4\pi/n), \dots \}$ .

Простота задания таких полюсов позволяет существенно упростить задачи анализа и синтеза многосистемного комплекса наведения больших телескопов. Здесь сначала из системного частотного анализа и требований запасов устойчивости выбираются нужные полюса, далее по ним формируются желаемые полиномы процессов перерегулирования и в конце выполняется выбор параметров регуляторов из условия соответствия данным полиномам.

Заметим, что все приведенные структуры многосистемного наведения были рассмотрены в упрощенном виде, чтобы наиболее наглядно показать их основные свойства и особенности. Для конкретных практических приложений они будут «разрастаться» и усложняться, учитывая множество «тонких» факторов: возмущений, шумов, погрешностей, ошибок, дополнительных настроечных связей контуров, дискретности измерительных сигналов и других.

Следующим направлением их развития является введение дополнительных контуров комбинированного управления, позволяющих активно менять свойства объектов управления, а также увеличивать порядок астатизма контуров обратной связи по внешним возмущениям.

Поэтому взаимодействие каналов управления в многосистемных комплексах наведения в общем случае может определяться множеством факторов. Их важность с точки зрения взаимовлияния систем друг на друга зависит от конкретной реализации комплекса управления большим телескопом с учетом его конкретной оптико-механической конструкции со своим набором резонансов.

В конечном итоге потребуется перейти к решению задачи оптимального синтеза регуляторов многосистемного комплекса стандартными вычислительными процедурами MATLAB. При этом проведенный выше синтез регуляторов может рассматриваться в качестве основы, а также поможет в правильном задании коэффициентов в оптимизируемых критериях качества. Рассчитываемые же в MATLAB оптимальные регуляторы могут применяться как специальные режимы

высокоэффективной настройки многосистемного комплекса наведения большого оптического телескопа на условия его эксплуатации.

### **7.3. Структурно-параметрический синтез многосистемного наведения больших орбитальных телескопов**

Отметим особенности наведения больших космических телескопов: 1) для фундаментальных исследований Вселенной наиболее интересны наблюдения за слабыми астрономическими объектами; 2) в системах угловой стабилизации КА возрастает значимость точности сигналов гироскопических датчиков; 3) основные возмущения на деформируемую конструкцию орбитального большого телескопа будут создаваться работой системы стабилизации КА; 4) нет влияния атмосферы.

Структуры взаимодействия систем управления в комплексах наведения больших орбитальных телескопов идеологически похожи на структуры взаимодействия систем слежения наземных телескопов [283]. Поэтому здесь с небольшими изменениями можно использовать материал предыдущих двух параграфов. При этом основными задачами второй, а при необходимости и последующих систем слежения становятся компенсация остаточных угловых колебаний оптического изображения в условиях создаваемых КА возмущений.

#### **7.3.1. Синтез структур, режимов и алгоритмов управления модульными системами наведения**

Для качественного понимания свойств структур взаимодействия систем слежения орбитального телескопа можно использовать наиболее простую модель (3.11) угловых колебаний КА. В более общем случае в передаточную функцию  $W_{КА}(p)$  будут входить и другие компоненты, включая вклад упругих колебаний вынесенных солнечных батарей и антенн.

Основными измерительными средствами двухсистемного наведения космического телескопа примем: 1) оптический датчик гидирования (ДГ, обычно низ-

кочастотный), установленный в фокальной плоскости телескопа и накапливающий на интервале экспозиции гидирующих звезд сигнал ошибки  $S_e = e + \xi_e$  ( $e = \alpha + K_0\varphi$ ) с шумовой составляющей  $\xi_e$ ; 2) высокочастотный гироскопический датчик (ГД), измеряющий сигнал  $S_\alpha = \alpha + \xi_\alpha$  угловой стабилизации КА с погрешностью  $\xi_\alpha$  (включающей шум измерений и систематический дрейф «нуля» отсчета); 3) высокочастотный датчик положения ДПВЗ (обычно емкостного типа), измеряющий сигнал  $S_\varphi = \varphi + \xi_\varphi$  с шумом  $\xi_\varphi$  и характеризующий относительные угловые отклонения штанги подвеса. Заметим, что последний сигнал (от ДПВЗ) позволяет: а) повысить точность восстановления ошибки слежения  $e$  между редкими отсчетами оптического ДГ; б) контролировать отклонения штанги подвеса ВЗ от оптической оси телескопа с целью сохранения режима юстировки оптической схемы телескопа; в) расширить полосу частот контура обратной связи ВЗ с возложением на него дополнительной задачи активного демпфирования.

Разные варианты повышения точности восстановления ошибки  $e = \alpha + K_0\varphi$  в интервалах времени между тактами выдачи сигналов ДГ будут проанализированы в пункте 7.3.2. После такого восстановления с высокой частотой можно использовать структурные схемы пункта 7.2.1, в которых следует положить  $\alpha_{KO} = 0$ ,  $e_\alpha = \alpha_{KO} - \alpha = -\alpha$ , а также заменить датчик ОДТ на гироскопический датчик ГД. Кроме этого, оптический датчик ДИ будем называть датчиком гида ДГ.

Тогда схеме двухсистемного наведения, работающей по сигналам ДГ и ГД, будет отвечать схема на рисунке 7.2а (но в других обозначениях). А схеме, работающей по сигналам ДГ и ДПВЗ – схема на рисунке 7.2б (так как в ней не используется сигнал ГД, поэтому она удобна при автономной настройке контуров управления вторичным зеркалом).

*Режимы односистемного наведения.* Так как основные возмущения на последующие каналы наведения создаются работой системы угловой стабилизации КА, поэтому сначала кратко рассмотрим особенности ее работы (точное описание системы управления КА является самостоятельным направлением и выходит за рамки настоящей работы).

При автономном наведении КА на объект наблюдения обратная связь в его системе угловой стабилизации может быть замкнута: 1) по сигналу собственного высокочастотного ГД; 2) по сигналу ошибки ДГ (при оценочном условии:  $\omega_{ДГ} \geq 10\omega_{КА}$ ); 3) с помощью комплексирования сигналов (например, по высокочастотному ГД с коррекцией дрейфа его «нуля» по низкочастотному ДГ).

В целях предельного уменьшения создаваемых инерционных нагрузок, возмущающих упругую конструкцию КА и телескопа, желательно предельно уменьшать частоту угловой стабилизации КА. При этом канал активной стабилизации КА около нулевой ошибки может периодически выключаться.

На таких интервалах, в условиях пассивного дрейфа КА, односистемное слежение КА будет заменяться односистемным слежением ВЗ до тех пор, пока усредненное значение сигнала  $\langle S_{\varphi} \rangle$  ДПВЗ не покажет критическое расхождение осей ВЗ и телескопа (когда начнется заметное ухудшение качества оптического изображения в фокальной плоскости телескопа).

Далее должен быть включен двухсистемный режим наведения, в котором управление КА автономно скомпенсирует рассогласование осей по своему гироскопическому датчику ГД, используя значение сигнала  $\langle S_{\varphi} \rangle$ . В свою очередь, ВЗ продолжит следить по сигналам ДГ и ДП ВЗ.

*Режимы двухсистемного наведения.* Рассмотрим их на примере структурных схем, приведенных на рисунке 7.4 (аналогичны схемам на рисунке 7.2). При этом угловую стабилизацию КА будем представлять упрощенно.

Выбраны три варианта структур организации обратной связи – в зависимости от способов получения измерительных сигналов в них. На схемах обозначены:  $R(p)$  – регуляторы обратных связей;  $W(p)$  – передаточные функции;  $\xi$  – шумы датчиков;  $u$  – управляющие воздействия;  $\eta$  – внешние воздействия (например, инерционные нагрузки от перемещаемых и колеблющихся элементов).

В первой традиционной структуре итерационного типа (рис. 7.4а – аналогична рис. 7.2а) система управления КА работает по собственному высокочастотному ГД, а система управления ВЗ – по оптическому ДГ с высокой частотой выдачи сигнала (оценочно при  $\omega_{ДГ} \geq 10\omega_{ВЗ}$ ). Уравнения контуров:



Вторая структура итерационного типа (рис. 7.4б – аналогична рис. 7.2б) предназначена для случаев, когда в процессе летной эксплуатации точность гироскопического датчика по ряду причин ухудшается или появляется значительная погрешность его показаний из-за микродеформаций упругой конструкции, отделяющей место установки ГД внутри КА от оптической схемы телескопа. Тогда для высокочастотного режима работы ДГ (оценочно при  $\omega_{ДГ} \geq 10\omega_{ВЗ}$ ) обратная связь КА замыкается по сигналу, вычисленному через сигналы ДГ и ДПВЗ:

$$\begin{aligned} \alpha &= e - K_0 \varphi \Rightarrow e_\alpha = S_e - K_0 S_\varphi = \alpha + (\xi_e - K_0 \xi_\varphi); \\ \alpha &= W_{КА} u_\alpha, \quad u_\alpha = R_\alpha e_\alpha \Rightarrow \alpha = [W_T R_\alpha / (1 - W_T R_\alpha)] \cdot (\xi_e - K_0 \xi_\varphi); \\ \varphi &= W_{ВЗ} u_\varphi, \quad u_\varphi = R_\varphi S_e, \quad S_e = e + \xi_e, \quad e = \alpha + K_0 \varphi \Rightarrow \\ \varphi &= [W_{ВЗ} R_\varphi / (1 - K_0 W_{ВЗ} R_\varphi)] \cdot (\xi_e + \alpha); \\ e &= \alpha + K_0 \varphi = [K_0 W_{ВЗ} R_\varphi / (1 - K_0 W_{ВЗ} R_\varphi)] \cdot \xi_e + [1 / (1 - K_0 W_{ВЗ} R_\varphi)] \cdot \alpha. \end{aligned} \quad (7.27)$$

Третья структура (рис. 7.4в) предназначена для режима пониженной частоты оптического ДГ (что не позволяет использовать его сигнал напрямую в контурах обратных связей обеих систем управления). В этом режиме система управления КА работает по сигналу собственного ГД с низкочастотной коррекцией его дрейфа по сигналам ДГ и ДПВЗ. А система управления ВЗ отслеживает комплексированно сформированный программный сигнал  $\varphi_{прогр}(t)$  через обратную связь по сигналу с ДПВЗ.

При этом функция дрейфа нуля  $\Delta(t)$  гироскопического датчика ГД контролируется через осреднение по времени сигналов:  $\langle \Delta \rangle \approx \langle S_e \rangle - \langle S_\alpha \rangle - K_0 \langle S_\varphi \rangle$ . Так как средние значения  $\langle S_e \rangle$  и  $\langle S_\varphi \rangle$  дрейфа не имеют, поэтому дополнительные контура настройки медленно выводят их на нулевые значения:  $\langle S_e \rangle \rightarrow 0$  и  $\langle S_\varphi \rangle \rightarrow 0$ . При этом получаем  $\langle \Delta \rangle \approx - \langle S_\alpha \rangle$  и следующую зависимость для восстановления ошибки слежения между тактами выдачи сигналов ДГ:  $e(t) \approx S_\alpha(t) + K_0 S_\varphi(t) + \langle \Delta \rangle = (S_\alpha(t) - \langle S_\alpha \rangle) + K_0 S_\varphi(t)$ .

Для упрощения схемы на рисунке 7.4в считается, что дрейф нуля ГД уже скорректирован, т.е. полагается  $\langle S_\alpha \rangle \approx 0$ . Тогда с учетом  $\langle S_e \rangle \approx 0$  имеем:  $S_\alpha(t) +$

$K_0 S_\varphi(t) \approx 0$ , а программное управление для угла ВЗ получается из условия пропускания сигнала ошибки стабилизации КА через сглаживающий низкочастотный фильтр с передаточной функцией  $W_\Phi(p)$ :

$$e = \alpha + K_0 \varphi \Rightarrow 0 \approx W_\Phi e = W_\Phi \alpha + K_0 W_\Phi \varphi \Rightarrow \varphi_{\text{прогр}} = -W_\Phi \alpha / K_0 \approx -W_\Phi S_\alpha / K_0.$$

Отсюда основные уравнения контуров будут следующими:

$$\begin{aligned} \alpha &= W_{KA} u_\alpha, \quad u_\alpha = R_\alpha (\alpha + \xi_\alpha) \Rightarrow \alpha = [W_T R_\alpha / (1 - W_T R_\alpha)] \cdot \xi_\alpha; \\ \varphi &= W_{B3} u_\varphi, \quad u_\varphi = -K_0 R_\varphi (\varphi_{\text{прогр}} - S_\varphi), \quad \varphi_{\text{прогр}} = -W_\Phi S_\alpha / K_0 \Rightarrow \\ \varphi &= [W_{B3} R_\varphi / (1 - K_0 W_{B3} R_\varphi)] \cdot [K_0 \xi_\varphi + W_\Phi (\alpha + \xi_\alpha)]; \\ e &= \alpha + K_0 \varphi = [K_0 W_{B3} R_\varphi / (1 - K_0 W_{B3} R_\varphi)] \cdot (K_0 \xi_\varphi + W_\Phi \xi_\alpha) + \\ &\quad + \{ [1 + (W_\Phi - 1) K_0 W_{B3} R_\varphi] / (1 - K_0 W_{B3} R_\varphi) \} \cdot \alpha. \end{aligned} \quad (7.28)$$

Заметим, что эта схема требует достаточно жесткую механическую конструкцию телескопа и его закрепление на КА (чтобы точность сигналов ГД была достаточной для использования в оценке ошибки наведения  $e$ ). При этом сигнал ошибки наведения  $S_e$  в ДГ используется для непрерывной коррекции «нулей» ГД (а при необходимости и ДП ВЗ).

Из выписанных уравнений (7.26) – (7.28) видно, что все три структуры на рисунке 7.4 относятся к структурам итерационного типа. В них переходные процессы регулирования и запас устойчивости для первого канала управления (КА) определяются независимо от второго канала управления (ВЗ). А на переходные процессы регулирования и запас устойчивости второго канала управления (ВЗ) будут влиять соответствующие характеристики первого канала управления (КА).

В режимах наведения с еще большим понижением частоты оптического ДГ, предыдущую задачу восстановления ошибки слежения между тактами выдачи оптического сигнала ошибки следует заменить на задачу комплексированного формирования низкочастотных заданий для обеих систем управления (КА и ВЗ). Эти задания должны обрабатываться в более высоких частотах по сигналам ГД и ДПВЗ. Здесь будем иметь схемы, похожие на схемы рисунка 7.3.

*Синтез регуляторов в обратных связях.* Кратко рассмотрим начальный выбор регуляторов для приведенных структур управления, частично повторяя материал пункта 7.2.2. Для определенности рассмотрим схему на рисунке 7.4а (для других схем на рисунке 7.4 все будет аналогично).

Перепишем уравнения (7.26) в виде:

$$(1 - W_T R_\alpha) \alpha = W_T R_\alpha \cdot \xi_\alpha, \quad (1 - K_0 W_{B3} R_\varphi) \varphi = W_{B3} R_\varphi \cdot (\xi_e + \alpha); \quad (7.29)$$

$$[(1 - W_T R_\alpha) (1 - K_0 W_{B3} R_\varphi)] e = W_T R_\alpha \xi_\alpha + [K_0 W_{B3} R_\varphi (1 - W_T R_\alpha)] \cdot \xi_e.$$

На начальном этапе можно ограничиться выбором ПИИД-регуляторов., имеющих в общем случае дифференциальное ( $K_D p e$ ), пропорциональное ( $K_P e$ ) и два интегральных звеньев ( $K_{I1} e / p$ ,  $K_{I2} e / p^2$  – компенсируют остаточные статическую и скоростную ошибки). Тогда переходные процессы в контуре регулирования ВЗ будут описываться полиномами вида:

$$D_{B3}(p) = p^2 [p^2 + (\mu_k + K_D) p + (\omega^2 + K_P)] + K_{I1} / p + K_{I2} / p^2. \quad (7.30)$$

Входящие сюда коэффициенты могут быть выбраны в соответствии с рекомендациями пункта 7.2.2. Заметим, что в режимах управления ВЗ с пониженной частотой оптического сигнала ошибки (из-за увеличенного времени ее накопления при наведении по слабым звездам) пропорциональное и дифференциальное звенья может оказаться эффективнее реализовывать через контура обратных связей по высокочастотному сигналу ДПВЗ.

Если и для системы управления КА в первом уравнении (7.29) выбрать ПИИД регулятор, то с учетом модели (3.11) здесь переходные процессы также будут характеризоваться полиномами  $D_{КА}(p)$  до четвертого порядка.

Если же требуется выполнить совместный синтез двухсистемного комплекса наведения космического телескопа в наиболее гладких низкочастотных функциях (с улучшенной согласованностью с тактом выдачи сигнала ошибки оптическим датчиком), то коэффициенты в ПИИД-регуляторах в обеих системах следует выбирать таким образом, чтобы в третьем уравнении (7.29) получающийся полином переходных процессов ( $D_{B3}(p) \cdot D_{КА}(p)$ ; до восьмого порядка) имел наибольшую гладкость.

При дальнейшем повышении астатизма контуров управления ВЗ и КА путем введения интегрирующих звеньев более высокого порядка, также рекомендуется переходные процессы в контурах управления приближать к соответствующим полиномам Баттерворта еще более высокого порядка  $n$ .

Подробно эти вопросы и рекомендуемые параметры были рассмотрены ранее, в пункте 7.2.2. В результате будем иметь понятный параметрический синтез многосистемного комплекса наведения большого космического телескопа, согласованный с резонансными частотами его упругой конструкции и тактом выдачи оптического сигнала ошибки. После же создания детализированной модели упругой оптико-механической конструкции большого телескопа, можно провести дополнительную оптимальную настройку регуляторов с использованием более формализованных стандартных вычислительных процедур MATLAB.

### **7.3.2 Влияние параметров измерительных средств на настройку структуры комплекса двухсистемного наведения**

Интеллектуальная настройка структуры многосистемного наведения орбитального телескопа на наилучшие условия наблюдения для замедленного такта выдачи оптического сигнала ошибки от слабых световых источников во многом будет зависеть от характеристик используемых измерительных средств и от полос частот контуров управления (особенно по ошибке  $e$ ).

Исследуем эту задачу более подробно, принимая в качестве доступных для принятия решений следующих исходных данных: предельные амплитуда и частота ошибки угловой стабилизации КА, требуемая точность ее компенсации и частота среза для системы корректирующего слежения ВЗ, а также параметры измерительных средств: дисперсия шума измерений, интервал и время задержки выдачи информации, систематическая погрешность устройства. Она сводится к оценке точности восстановления ошибки слежения при различных вариантах ее вычисления (полученные результаты в дальнейшем могут быть уточнены по мере нако-

пления дополнительной информации о работе двухсистемного комплекса слежения). Далее рассмотрим четыре последовательно усложняемых варианта [240].

1. Вариант непосредственной полиномиальной экстраполяции сигнала ошибки слежения  $e(t)$ . В этом случае разложим ее по  $m$  полиномам  $P_i$ :

$$\tilde{e}(t) \approx \sum_{i=1}^m B_i^e P_i(t), \quad |t - T - \Delta T_s| \leq \Delta T / 2, \quad (7.31)$$

где  $\Delta T$  – интервал времени «накопления» (интегрирования по времени) слабого сигнала,  $\Delta T_s$  – время задержки сигнала (на его обработку), отсчитываемое относительно середины интервала накопления (в дальнейшем будем принимать  $\Delta T_s \approx \Delta T$ ),  $T$  – момент времени конца интервала накопления сигнала.

Коэффициенты разложения  $B_i^e$ , вычислим из задачи минимизации ошибки аппроксимации (на "последних"  $n$  интервалах измерения):

$$\varepsilon_B = \left\| \tilde{e} - \sum_{i=1}^m B_i^e P_i \right\|^2 \Rightarrow \min_B, \quad (7.32)$$

где  $\|\Phi\|^2 \equiv (\Phi, \Phi)$ ,  $(\Phi_1, \Phi_2) \equiv \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \bar{\Phi}_1^k \bar{\Phi}_2^k$ ,  $\bar{\Phi}^k \equiv \frac{1}{\Delta T} \int_{T-k\Delta T}^{T-(k-1)\Delta T} \Phi(t) dt$ ,

$\tilde{e} \equiv e + \xi$  – измерительный сигнал,  $\xi$  – случайная ошибка измерения.

Для полиномов, удовлетворяющих условию ортогональности  $(P_i, P_j) = \|P_i\|^2 \delta_{ij}$  ( $\delta_{ij}$  – символы Кронекера), будем иметь:

$$B_i^e = (\tilde{e}, P_i) / \|P_i\|^2, \quad \varepsilon_B = \|\tilde{e}\|^2 - \sum_{i=1}^m (\tilde{e}, P_i) B_i^e. \quad (7.33)$$

Оценим погрешность разложения (7.31) в момент  $t^* = T + 1,5\Delta T$  (при  $\Delta T_s = \Delta T$ ), непосредственно перед «приходом» нового значения дискретного измеряемого сигнала ошибки. Для этого подставим (7.33) в (7.31) и вычислим усредненную по ансамблю реализаций ошибку:

$$\varepsilon = \left\langle \left( e - \sum_{i=1}^m B_i^e P_i \right)^2 \right\rangle = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (7.34)$$

$$\varepsilon_1 = \left[ e - \sum_{i=1}^m (e, P_i) P_i / \|P_i\|^2 \right]^2, \quad \varepsilon_2 = \sigma_\xi^2 \sum_{i=1}^m P_i^2 / \|P_i\|^2 n,$$

где принято  $\langle \bar{\xi}^k \bar{\xi}^e \rangle = \sigma_\xi^2 \delta_{ke}$ ,  $\langle \bar{\xi}^k e \rangle = 0$ .

Выберем в качестве  $P_i$  полиномы Лежандра. Первые три из них:

$$P_1 = 1, \quad P_2 = \tau, \quad P_3 = (3\tau^2 - 1)/2, \quad \tau \equiv 2(t - T) / n\Delta T + 1 \quad (7.35)$$

(безразмерное время  $\tau$  преобразует интервал  $T - n\Delta T \leq t \leq T$  в единичный:  $-1 \leq \tau \leq 1$ ) точно удовлетворяют введенным ранее условиям ортогональности и могут быть непосредственно использованы в (7.31), (7.33). Полиномы Лежандра более высокого порядка приближенно удовлетворяют введенным условиям ортогональности и могут быть использованы при оценках целесообразности увеличения количества членов разложения (в наших приложениях оказалось достаточным рассмотрение случая  $m \leq 3$ ). Также можно отметить, что с ростом  $m$  одновременно требуется значительное увеличение параметра  $n$ , что при несущественной потере точности вычислений позволяет переходить от конечных сумм к непрерывным интегралам. В последнем случае условия ортогональности примут вид:  $(P_i, P_j) \approx \delta_{ij} / (2i - 1)$ . При этом:

$$\varepsilon_2 \approx [1 + 3\tau^2 + 2,5(3\tau^2 - 1) + 3,5(5\tau^3 - 3\tau)^2 + \dots] \sigma_\xi^2 / n. \quad (7.36)$$

Подставим  $\tau^* = 1 + 3/n$  и линеаризуем результат по  $1/n$  (при  $n \geq 6$ ):

$$\varepsilon_2 \approx \{ \delta_{m1} + [4 + 18/n] \delta_{m2} + 14[1 + 14/n] \delta_{m3} + 28[1 + 25/n] \delta_{m4} + \dots \} \sigma_\xi^2 / n. \quad (7.37)$$

Видно, что для обеспечения условия  $\varepsilon_2 < \sigma_\xi^2$  требуются значения  $n$ , превышающие 1 ( $m=1$ ), 6 ( $m=2$ ), 22 ( $m=3$ ), 43 ( $m=4$ ) и т.д.

Для получения зависимости детерминированной компоненты  $\varepsilon_l$  от параметра  $n$  представим сигнал  $e$  в виде:  $e = A_c \cos(\omega n \tau) + A_s \sin(\omega n \tau)$ ,

где  $\omega = \Omega \Delta T / 2$  - безразмерная частота,  $A$  - коэффициенты разложения.

Подставим его в (7.34), вычисляя соответствующие интегралы и выделим для  $\tau = \tau^*$  доминирующие при  $n\omega < \pi/4$  составляющие решения:

$$\varepsilon_1 \approx A^2 \left\{ (n\omega\tau)^2 \delta_{m_1} + [n^2\omega^2(1-3\tau^2)/6]^2 \delta_{m_2} + [n^3\omega^3\tau(0.1-\tau^2)/6]^2 \delta_{m_3} + \dots \right\} \quad (7.38)$$

Выписанные выражения (7.37), (7.38) позволяют минимизировать ошибку (7.34) по параметрам  $n$  и  $m$ . При этом в качестве  $A$  можно принимать требуемую точность работы следящей двухканальной системы  $A_e$ , а в качестве  $\Omega$  — ее частоту среза  $\Omega_e$  (наихудший случай).

2. Вариант повышения точности ошибки слежения  $e(t)$  с использованием полиномиальной экстраполяции выделенной низкочастотной компоненты  $\alpha(t)$ . В этом случае исключается влияние на плавную экстраполяцию более высокочастотного ДПВЗ, измеряющего с малым интервалом времени  $\Delta T_\varphi$  и погрешностью  $\eta_\varphi$  сигнал:  $\tilde{\varphi} = \varphi + \eta_\varphi$ . Здесь ошибка слежения вычисляется из зависимостей:

$$e(t) \approx k_0 \tilde{\varphi}(t) + \sum_{i=1}^m B_i^\alpha P_i, \quad B_i^\alpha = (\tilde{e} - k_0 \tilde{\varphi}, P_i) / \|P_i\|^2. \quad (7.39)$$

Здесь можно повторить все вычисления, аналогичные (7.34) - (7.38). В результате получатся выражения типа (7.37), (7.38), в которых в качестве  $A, \Omega$  следует принять:  $A_\alpha, \Omega_\alpha$  - характерные амплитуду и частоту погрешности работы первого канала (КА), а вместо  $\sigma_\xi^2$  положить:  $\sigma_\varphi^2 = k_0^2 \langle \eta_\varphi^2 \rangle$ ,  $\sigma_1^2 \equiv \sigma_\xi^2 + \sigma_\varphi^2 / n_\varphi$ , где  $n_\varphi = \Delta T / \Delta T_\varphi$  - отношение такта выдачи измерительного сигнала ошибки слежения к такту выдачи сигнала ДП.

3. Вариант использования сигналов ДПВЗ и гироскопического датчика угла ГД для повышения точности экстраполяции ошибки слежения. Здесь исключается влияние на сверхплавную экстраполяцию ошибки  $e(t)$  высокочастотного сигнала ДПВЗ и среднечастотного сигнала ГД. При этом в сигнале ГД:  $\tilde{\alpha} = \alpha - f + \eta_\varphi$  выделяется сверхнизкочастотный дрейф  $f(t)$  «нуля» ( $\eta_\varphi$  - случайная погрешность,

дискретность измерения примем равной  $\Delta T_\alpha = \Delta T_\varphi$  для согласования с ДПВЗ), который и экстраполируется. Тогда ошибку слежения вычислим из зависимостей:

$$e(t) \approx k_0 \tilde{\varphi} + \tilde{\alpha} + \sum_{i=1}^m B_i^f P_i, \quad B_i^f = (\tilde{e} - k_0 \tilde{\varphi} - \tilde{\alpha}, P_i) / \|P_i\|^2. \quad (7.40)$$

Функция  $f$  обычно медленно изменяется во времени, поэтому в большинстве случаев достаточно ограничиться оценкой ее среднего значения (при  $m = 1$ ). При этом погрешность выражения (7.40) будет оцениваться:

$$\begin{aligned} \delta_e &\equiv e - \tilde{e} = \delta_f - N + \zeta - (\zeta, 1), \\ \delta_f &= [f(t) - (f, 1)] + (\xi - N, 1), \quad N \equiv \eta_\alpha + k_0 \eta_\varphi. \end{aligned} \quad (7.41)$$

Для линейной аппроксимации:  $f(t) \approx \dot{f}t + const$ ,  $T - n\Delta T \leq t \leq t^*$  в «наихудший» момент времени  $t^*$  получим:  $\langle \delta_f^2 \rangle = [\Delta f (n+3)/2]^2 + \sigma_2^2/n$ ,

$$\sigma_2^2 \equiv \sigma_\xi^2 + (\sigma_\varphi^2 + \sigma_\alpha^2)/n_\varphi, \quad \sigma_\alpha^2 \equiv \langle \eta_\alpha^2 \rangle, \quad \Delta f \equiv \dot{f}\Delta T.$$

Минимизация данной ошибки по параметру  $n$  приводит к выражениям:

$$\langle \delta_f^2 \rangle_{\min} = 1,5\sigma_2^2(n+1)/n^2, \quad n^2(n+3) = 2(\sigma_2/\Delta f)^2. \quad (7.42)$$

Дальнейшее уменьшение погрешности (7.41) связано с применением фильтрации сигнала (7.40) с целью уменьшения шумовой составляющей  $N$ :  $e(t) \approx k_0 L_\varphi \tilde{\varphi} + L_\alpha \tilde{\alpha} + B_1^f$ , где  $L_\varphi, L_\alpha$  — линейные операторы.

На практике часто выполняется  $\sigma_\varphi^2 < \sigma_\alpha^2$  (позиционные датчики имеют меньшую погрешность по сравнению с гироскопическими). Тогда выберем:

$$L_\varphi = 1, \quad L_\alpha \tilde{\alpha} = \sum_{i=1}^m B_i^L P_i(t), \quad \varepsilon_L = \sum_{k=0}^{n_L-1} \left\{ \tilde{\alpha} - \sum_{i=1}^m B_i^L P_i \right\}_{t_\alpha - k\Delta T_\alpha}^2 \Rightarrow \min_B,$$

где  $t_\alpha$  — время прихода «последнего» сигнала гироскопического датчика,  $n_L$  — количество используемых в разложении сигналов.

По аналогии с (7.37), (7.38), полагая здесь  $\tau = 1$ , дисперсию ошибки (7.41) при  $\zeta = 0$  запишем в виде:

$$\begin{aligned} \langle \delta_e^2 \rangle \approx & \langle \delta_f^2 \rangle + \sigma_\varphi^2 + A_\alpha^2 (n_L \Delta T_\alpha \Omega_\alpha / 2)^2 [\delta_{m1} + \\ & + (n_L \Delta T_\alpha \Omega_\alpha / 2)^2 \delta_{m2} / 9 + \dots] + (\sigma_\alpha^2 / n_L) [\delta_{m1} + (4 + 18 / n_L) \delta_{m2} + \dots], \end{aligned} \quad (7.43)$$

где в качестве  $A_\alpha, \Omega_\alpha$  следует выбирать характерные амплитуду и частоту погрешности работы первого канала (колебаний КА).

Ее наименьшее значение по параметру  $n_L$  для случая  $m = 1$  составит:

$$\langle \delta_e^2 \rangle_{\min} \approx \langle \delta_f^2 \rangle + \sigma_\varphi^2 + 3\sigma_\alpha^2 / 2n_L, \quad n_L^3 = 2\sigma_\alpha^2 / (A_\alpha \Omega_\alpha \Delta T_\alpha)^2.$$

4. В системе наведения КА вместо гироскопического датчика угла используется гироскопический датчик угловой скорости (ДУС). Здесь с помощью ДПВЗ будем выделять и экстраполировать низкочастотный «опорный» угол начала отсчета приращений ДУС:  $\Delta \tilde{\alpha} = \Delta \alpha + \eta_\Delta$ ,  $\Delta \alpha(t) \equiv \alpha(t) - \alpha(t - \Delta T_\Delta)$ , где  $\eta_\Delta$  — погрешность измерения с дисперсией  $\sigma_\Delta^2$ ,  $\Delta T_\Delta = \Delta T / n_\Delta$  — интервал времени дискретизации. В этом случае ошибка слежения может быть вычислена по формуле

$$e(t) \approx k_0 \tilde{\varphi} + \alpha', \quad \alpha' \equiv \alpha_0 + \Delta_\Sigma \alpha. \quad (7.44)$$

Опорный угол  $\alpha_0 \approx \alpha(t_0)$  в момент времени  $t_0$  восстанавливается по измеренным на интервале  $[T - n\Delta T, T]$  сигналам  $\tilde{e}, \tilde{\varphi}$  одним из двух способов: через полиномиальное разложение:

$$\alpha_0 = \sum_{i=1}^m B_i^\alpha P_i(t_0), \quad B_i^\alpha = (\tilde{e} - k_0 \tilde{\varphi}, P_i) / \|P_i\|^2, \quad (7.45)$$

или из решения уравнения:

$$(\tilde{e} - k_0 \tilde{\varphi} - \alpha_0 - \sum \Delta \tilde{\alpha} \text{sign}[t - t_0], 1) = 0, \quad (7.46)$$

причем первый вариант предпочтительнее при больших  $\sigma_\Delta^2$  (так как не зависит от  $\eta_\Delta$ ), а второй — при малых  $\sigma_\Delta^2$  (так как он точнее полиномиальной аппроксимации, но зависит от  $\eta_\Delta$ ).

Суммарное приращение  $\Delta_\Sigma \alpha = \alpha(t) - \alpha_0$  вычислим с помощью измеренных локальных приращений, например, по формуле

$$\Delta_{\Sigma}\alpha = \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \tilde{\Delta}\right)(t-t_0) / \Delta T_{\Delta}, \quad M\Delta T_{\Delta} \geq t-t_0,$$

в которой выбор больших значений  $M$  целесообразен при необходимости уменьшения влияния шумов измерений  $\eta_{\Delta}$ .

В простейшем случае можно полагать:

$$M\Delta T_{\Delta} \approx t-t_0, \quad \Delta_{\Sigma}\alpha = \sum_{t>t_0} \tilde{\Delta}(1 + \delta t / M\Delta T_{\Delta}), \quad (7.47)$$

где  $\delta t$  — промежуток времени после измерения «последнего» на текущий момент дискретного приращения.

$$\text{Вычислим для него ошибку (7.34): } \delta_e \approx \delta_{\alpha} - k_0\eta_{\varphi} + \zeta, \quad \delta_{\alpha} = \delta_{\alpha 0} - \sum_{t>t_0} \eta_{\Delta}.$$

Ее дисперсия в «наихудший» момент времени  $t^*$  составит:

$$\langle \delta_e^2 \rangle = \langle \delta_{\alpha}^2 \rangle + \sigma_{\varphi}^2 + \langle \zeta^2 \rangle, \quad \langle \delta_{\alpha}^2 \rangle = \langle \delta_{\alpha 0}^2 \rangle + n_{\Delta} [n(1-\tau_0) + 3] \sigma_{\Delta}^2 / 2. \quad (7.48)$$

Погрешность вычисления угла  $\alpha_0$  зависит от способа его определения. В случае (7.45) она находится в соответствии с (7.34), (7.36), (7.38) при  $\tau = \tau_0$ . Здесь в качестве  $A_{\alpha}, \Omega_{\alpha}$  следует выбирать характерные амплитуду и частоту погрешности работы первого канала (колебаний КА). При этом рекомендуется проведение минимизации ошибки  $\langle \delta_{\alpha}^2 \rangle$  по параметрам  $\tau_0, n, m$ .

Вычисление погрешности (7.48) для случая (7.46) связано с громоздкими выкладками. В целях их упрощения удобно переходить к интегральной форме записи, формально приближенно заменяя

$$\delta_{\alpha 0} \approx \frac{1}{n\Delta T} \int_{t-n\Delta T}^t \left\{ k_0\eta_{\varphi} - \xi - \zeta + \int_{t_0}^t \eta_{\Delta}(x) dx \right\} dt, \quad \langle \eta_{\Delta}(x)\eta_{\Delta}(y) \rangle \approx \sigma_{\Delta}^2 \delta(x-y) / \Delta T_{\Delta},$$

$$\langle \xi(x)\xi(y) \rangle \approx \Delta T \sigma_{\xi}^2 \delta(x-y), \quad k_0^2 \langle \eta_{\varphi}(x)\eta_{\varphi}(y) \rangle = \Delta T_{\varphi} \sigma_{\varphi}^2 \delta(x-y),$$

где  $\delta(x-y)$  — дельта-функция Дирака.

Опуская все промежуточные вычисления, можно найти при  $\zeta = 0$ :

$$\langle \delta_{\alpha 0}^2 \rangle \approx \sigma_1^2 / n + \sigma_{\Delta}^2 n n_{\Delta} (\tau_0^3 + 3\tau_0) / 12. \quad (7.49)$$

Подставляя данное выражение в (7.48) и минимизируя результат по  $\tau_0$ , получим  $\tau_0 = 1$ , что соответствует выбору  $t_0 = T$  (т.е. в конце интервала дискретизации последнего из полученных сигналов ошибки слежения).

Минимизация (7.48), (7.49) по параметру  $n$  приведет к выражениям:

$$\langle \delta_\alpha^2 \rangle_{\min} = 2\sigma_1^2 / n + 1,5n_\Delta \sigma_\Delta^2, \quad n^2 = 3\sigma_1^2 / n_\Delta \sigma_\Delta^2. \quad (7.50)$$

Зависимости (7.48) при  $\tau_0 = 1$  и (7.50) полностью характеризуют погрешность вычисления ошибки слежения в системе с гироскопическим ДУС.

Приведем пример сравнительного анализа. В качестве исходных данных примем следующие значения параметров (имеющих порядки, характерные для орбитального телескопа и рассмотренных типов измерительных устройств):  $\Delta T = 0,2$  с,  $\Delta T_\varphi = 0,01$  с,  $\Delta T_\alpha = 0,01$  с,  $\Delta T_\Delta = 0,1$  с,  $\sigma_\varphi = 0,02$  угл.с,  $f = 0,002$  угл.с/с,  $A_e = 0,15$  угл.с,  $A_\alpha = 2,5$  угл.с,  $A_e \Omega_e = 0,1$  угл.с/с,  $A_\alpha \Omega_\alpha = 0,35$  угл.с/с.

Погрешность определения ошибки слежения при ее экстраполяции (7.31):

$\tilde{e}(t) \approx \sum_{i=1}^m B_i^e P_i(t)$ ,  $\tilde{e} \equiv e + \xi$  в зависимости от СКО случайной погрешности измерений  $\sigma_\xi$  показана на рис. 7.5 а. Ее вычисление произведено в соответствии с (7.34), (7.37), (7.38) с последующей минимизацией по параметру  $n$  (при этом оптимальные значения  $n$  увеличивались от 1 до 3 для  $m = 1$  и от 7 до 12 для  $m = 2$ ).

Погрешность определения ошибки слежения при полиномиальной экстраполяции выделенной компоненты  $\alpha$  (см. (7.39)):  $e(t) \approx k_0 \tilde{\varphi}(t) + \sum_{i=1}^m B_i^\alpha P_i$ ,

$\sigma_1^2 \equiv \sigma_\xi^2 + \sigma_\varphi^2 / n_\varphi$  в зависимости от СКО случайной погрешности  $\sigma_l$  показана на рис. 7.5 б (случай  $m = 1$  не представлен из-за получившейся низкой точности). Оптимальные значения  $n$  изменялись от 7 до 13 для  $m = 2$  и от 31 до 43 для  $m = 3$ .

Погрешность определения ошибки слежения при полиномиальной экстраполяции систематического дрейфа гироскопического датчика угла (см. (7.40)):

$e(t) \approx k_0 \tilde{\varphi} + \tilde{\alpha} + \sum_{i=1}^m B_i^f P_i$ ,  $\sigma_2^2 \equiv \sigma_\xi^2 + (\sigma_\varphi^2 + \sigma_\alpha^2) / n_\varphi$  при  $\sigma_2 = 0,1$  угл.с в зависимости от СКО случайной погрешности  $\sigma_\alpha$  показана на рисунке 7.5в. Вычисления

проводились в соответствии с (7.42), (7.43). Оптимальные значения  $n$  увеличивались от 21 до 65,  $n_L$  — от 3 до 15 для  $m = 1$  и от 57 до 166 для  $m = 2$ .

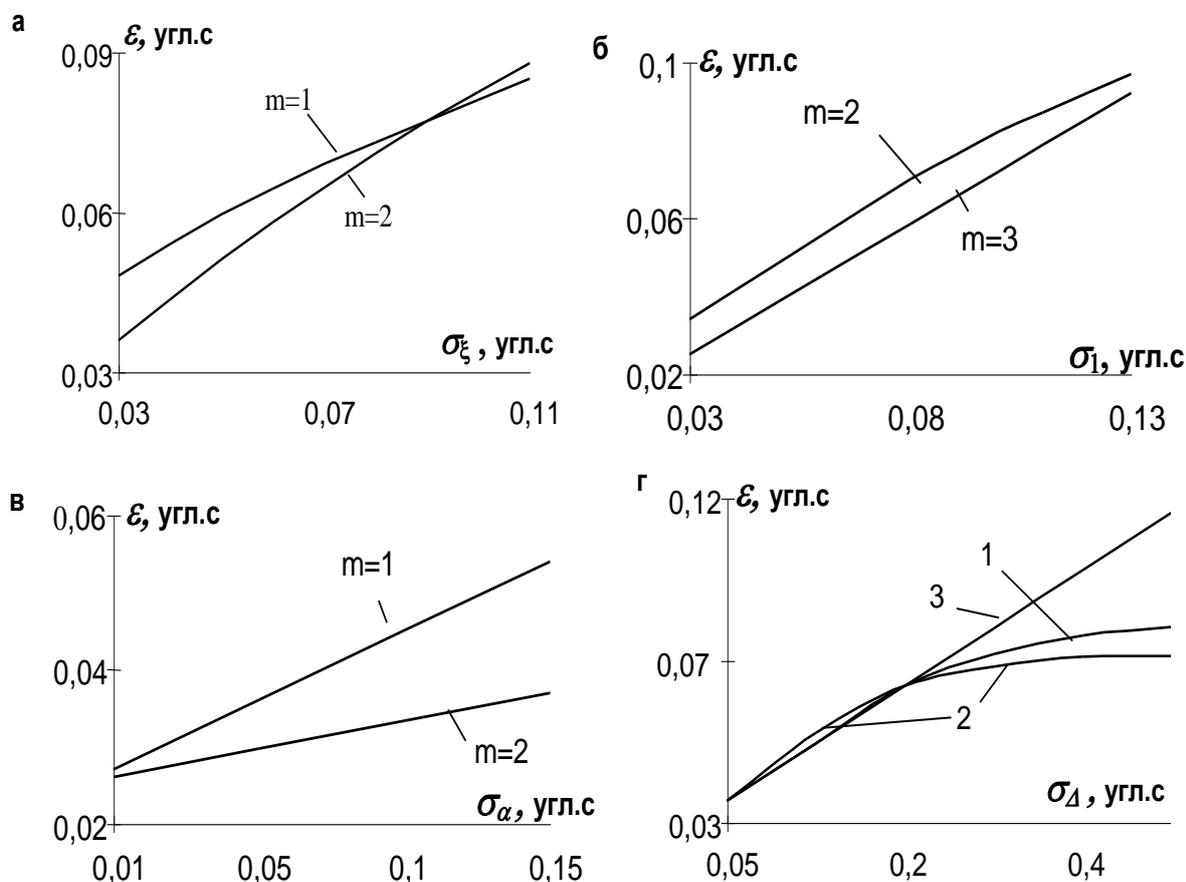


Рисунок 7.5 – Вычисление точности ошибок слежения для разных алгоритмов их нахождения: а) непосредственная экстраполяция; б) с использованием ДПВЗ; в) с использованием ГД; г) с использованием ДУС

Погрешность определения ошибки слежения при полиномиальной экстраполяции опорного угла гироскопического датчика угловой скорости при  $\sigma_l = 0,1$  угл.с в зависимости от СКО случайной погрешности  $\sigma_\Delta$ :

$$e(t) \approx k_0 \tilde{\varphi} + \alpha', \quad \alpha' \equiv \alpha_0 + \Delta_\Sigma \alpha, \quad \Delta \tilde{\alpha} = \Delta \alpha + \eta_\Delta, \quad \alpha_0 = \sum_{i=1}^m B_i^\alpha P_i(t_0)$$

рис. 7.5 г (кривые 1, 2 соответствуют вычислению «опорного» угла  $\alpha_0$  с помощью алгоритма (7.45) при  $m = 2, 3$ , кривая 3 — с помощью (7.46)).

Вычисления проводились в первом случае в соответствии с (7.48), (7.34), (7.36), (7.38) с последующей оптимизацией по  $\tau = \tau_0$  (оптимальные значения  $\tau_0$  увеличивались от 0.58 до предельной величины  $1 + 3/n$ , соответствующей режиму непосредственной экстраполяции для больших  $\sigma_\Delta$ ), во втором случае – в соответствии с (7.48), (7.50) при  $\tau_0 = 1$ . В первом случае оптимальные значения  $n$  располагались между 12 и 43 для обоих значений  $m = 2, 3$ , а во втором случае — уменьшались от 24 до 2. Получилось, что при  $\sigma_\Delta \leq 0,2$  угл.с более предпочтительнее вычислять  $\alpha_0$  в соответствии с (7.46), а при  $\sigma_\Delta \geq 0,3$  угл.сек целесообразнее переходить к более просто реализуемой непосредственной экстраполяции угла  $\alpha$ .

Из сравнения всех четырех рисунков видно, что для выбранных исходных параметров преимущества экстраполяции низкочастотной компоненты  $\alpha$  перед экстраполяцией сигнала ошибки слежения  $e$  начинает проявляться при  $\sigma_\xi \leq 0,05$  угл.с. При  $\sigma_\xi \sim 0,1$  угл.с существенного уменьшения погрешности определения ошибки слежения можно добиться с помощью введения в измерительную систему дополнительного гироскопического датчика угла ГД с высоким тактом выдачи информации. Использование для этих целей гироскопического ДУС становится целесообразным при  $\sigma_\Delta \leq 0,15$  угл.с.

В общем случае, при использовании измерительных средств с сверхмалыми уровнями шумов, погрешность восстановления ошибки слежения будет определяться точностью экстраполяторов.

Отдельно заметим, что на практике средства измерения ошибки  $e$  и угла наклона  $\varphi$  располагаются внутри телескопа, а гироскопический датчик измерения угла  $\alpha$  – часто удаленно, внутри КА. Из-за этого упругие микродеформации конструкции КА с большим телескопом могут добавляться к ошибке ГД и значительно ухудшать ее. Для описания таких эффектов требуется построение детальной модели КА с телескопом, что становится возможным обычно на последних стадиях выполнения соответствующих проектов.

Таким образом показано, что для замедленного такта выдачи оптического сигнала ошибки от слабых световых источников интеллектуальная настройка

структур многосистемного наведения орбитального телескопа на наилучшие условия наблюдения во многом будет зависеть от полос частот контуров управления (особенно по ошибке  $e$ ) и от выбора алгоритма высокочастотного восстановления ошибки наведения  $e$  в промежутках между тактами ее выдачи.

#### 7.4 Выводы по главе 7

1. Предложена методология проведения структурно-параметрического синтеза многосистемных комплексов наведения больших оптических деформируемых телескопов. В критериях качества для синтеза оптимальных алгоритмов общего слежения всем большим телескопом (первая ступень наведения) учитываются ошибка слежения, затрачиваемое энергопотребление и ограничение на полосу частот управления. При этом получаемая ошибка слежения будет задавать диапазон работы последующих систем корректирующего наведения (управления наклонами ВЗ и ТДЗ), а полоса частот управления – спектр инерционных возмущений на всю оптико-механическую деформируемую конструкцию большого облегченного оптического телескопа.

При синтезе корректирующих систем слежения ограничения по энергопотреблению обычно не важны. Здесь основными критериями синтеза управления становятся эффективная системная увязка каналов наведения в единый комплекс многосистемного управления большим телескопом.

2. Предложенная и обоснованная методика синтеза первой низкочастотной системы наведения всем большим телескопом позволяет получать простые регуляторы в контурах обратных связей, обеспечивающих реализацию гладких переходных процессов с уменьшением инерционных нагрузок на деформируемую конструкцию большого облегченного телескопа.

При этом для наземных телескопов уменьшение частоты его углового наведения в ОПУ будет ограничиваться снизу характеристиками относительного движения наблюдаемых космических объектов в поле зрения телескопа, а также частотами внешних возмущений, в особенности ветровых нагрузок.

В свою очередь, для орбитальных телескопов уменьшение частоты системы угловой стабилизации КА будет ограничиваться снизу техническими характеристиками ее элементов и элементов упругой конструкции КА.

3. При сопровождении разработки и производства многосистемных комплексов наведения больших оптических деформируемых телескопов проведение их структурно-параметрического синтеза должно основываться на следующих положениях. 1) Выбор частот каналов и систем управления должен проводиться согласованно с резонансными частотами упругой оптико-механической конструкции большого телескопа. 2) Плавность работы систем и каналов наведения должна соответствовать создаваемым ими допустимым микродеформациям облегченной оптико-механической конструкции большого телескопа. При этом увеличение проектной деформируемости облегченных конструкций обычно требует увеличения числа модульных систем наведения. 3) Уменьшить эксплуатационные микродеформации больших облегченных конструкций оптических телескопов позволяет согласованный синтез «мягкого» управления в контурах обратных связей модульных систем наведения. Так как результаты работы первых каналов управления определяют требования к последующим каналам управления, поэтому при синтезе многоканальной системы наведения большими телескопами требуется максимально сбалансированное распределение ролей всех каналов управления. 4) Синтез многосистемного комплекса наведения должен быть нацелен на обеспечение наибольшей автономности производства и калибровки входящих в него модульных систем управления. В частности, этому соответствует развязка каналов управления по устойчивости, чтобы их взаимодействие не ухудшило устойчивость многоканальной системы управления в целом.

4. Разрабатываемые комплексы многосистемного наведения больших наземных телескопов должны быть многорежимными с функцией интеллектуального выбора наилучшего режима. Предложенные структуры взаимодействия входящих в комплексы модульных систем наведения для разных режимов наведения телескопа построены на основе структур итерационного типа, что обеспечивает достаточную автономность при их производстве.

Проведенный синтез регуляторов позволяет согласованно для всех систем слежения получать наибольшую гладкость переходных процессов с целью уменьшения создаваемых ими эксплуатационных микродеформаций облегченной конструкции большого наземного телескопа.

5. Разрабатываемые комплексы двухсистемного наведения больших орбитальных телескопов должны иметь несколько режимов работы с функцией интеллектуального выбора наилучшего из них в соответствующих эксплуатационных условиях. Предложенные структуры взаимодействия каналов управления больших орбитальных телескопов построены на основе структур итерационного типа и позволяют выполнить относительно автономный синтез системы управления вторичным зеркалом телескопа при ее производстве. Проведенный синтез регуляторов для них выполнен по критериям согласованного обеспечения наибольшей гладкости переходных процессов.

6. Показано, что на выбор рабочей структуры многоканального наведения в соответствующем режиме влияют в первую очередь точностные и частотные характеристики измерительных датчиков. Особенно это относится к орбитальным телескопам с замедленным тактом выдачи оптического сигнала ошибок их наведения. Предложенные алгоритмы экстраполяции ошибки наведения между тактами ее выдачи позволяют настраивать структуры взаимодействия каналов на наилучшие условия их работы.

## **ГЛАВА 8. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМ В КОМПЛЕКСАХ СЛЕЖЕНИЯ БОЛЬШИХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ**

Глава посвящена исследованию модульных систем в составе комплексов наведения больших оптических телескопов, являющихся автоматизированными системами научных исследований. При этом приведенные в предыдущей главе структуры многосистемного наведения итерационного типа позволяют изучать эффективность модульных систем слежения по отдельности, что особенно важно для их автономного производства. Поэтому здесь проведем изолированное моделирование эффективности двух модульных систем слежения: углового сопровождения наземным телескопом в ОПУ низкоорбитального космического объекта и корректирующего слежения вторичным зеркалом орбитального телескопа при пониженной частоте такта выдачи сигнала ошибки оптическим датчиком.

К классу похожих задач для первой анализируемой системы можно отнести практические разработки Телескопа Алтайского оптико-лазерного центра с главным зеркалом диаметром 3.12 м, а для второй анализируемой системы – первую редакцию (в настоящее время от нее отказались) Автономной системы гидирования ультрафиолетового телескопа проекта «Спектр-УФ» [8].

При этом приоритетными в исследовании будут являться важнейшие технические факторы и параметры, влияющих на обеспечение требуемых точностей слежения, так как им должно уделяться первоочередное внимание при разработках и изготовлении соответствующих модульных систем наведения.

### **8.1. Исследование факторов эффективности управления следящими электродвигателями наземного телескопа в условиях возмущений**

Проведем анализ влияния различных эксплуатационных факторов на точность углового наведения наземного телескопа в ОПУ. Рассматриваемые ниже вопросы также освещены в статье автора [255].

*Выбор модели.* Для построения модели будем использовать уравнения из параграфа 5.3. При этом в уравнениях (5.16) модель телескопа, как объекта управления, выберем в наиболее простом виде (3.5):

$$A_m(p) \omega_m = M_y - M_{nm} + M_f, \quad M_y = \mu_\Sigma (\omega_\delta - \omega_m), \quad (8.1)$$

где  $A_m(p) \equiv I_m p$ ,  $\mu_\Sigma = \mu + C/p$ ,  $\omega_\delta = p\varphi_\delta$ ,  $\omega_m = p\varphi_m$ ;  $I_m$  – момент инерции телескопа;  $M_{nm}$  – момент потерь, учитывающий влияние сухого и вязкого трения на телескоп;  $M_y$  – момент в упругой передаче с коэффициентами упругости  $C$  и вязкости  $\mu$ ;  $M_f$  – момент от внешних возмущений на телескоп.

Управляющее воздействие на телескоп передается через ротор электродвигателя. Его уравнение углового движения:

$$A_\delta(p) \omega_\delta = M_{эм} - M_y - M_{n\delta}, \quad (8.2)$$

где  $A_\delta(p) \equiv I_\delta p$ ,  $I_\delta$  – момент инерции ротора электродвигателя;  $M_{n\delta}$  – момент потерь, учитывающий влияние сухого и вязкого трения на ротор.

Зададим электромагнитный момент  $M_{эм}$  электродвигателя:

$$M_{эм} = M \{1 + \varepsilon_\Delta(\varphi_\delta + \varphi_{cm})\}; \quad M = c_J J; \quad R(T_{эм}p + 1) J = \gamma u - c_e(\omega_\delta + \omega_{cm}). \quad (8.3)$$

Здесь  $J$  – ток;  $c_J$  – коэффициент пропорциональности;  $\varepsilon_\Delta$  – функция пульсаций по угловой координате;  $M$  – значение  $M_{эм}$  при  $\varepsilon_\Delta = 0$ ;  $\gamma$  – коэффициент усиления;  $R, L$  – сопротивление и индуктивность обмоток;  $T_{эм} = L/R$  – электромагнитная постоянная (сек);  $c_e$  – постоянная противоЭДС (часто принимают:  $c_e = c_J$ );  $u$  – управляющее напряжение.

Угловую скорость упруго закрепленного статора  $\omega_{cm} = p\varphi_{cm}$  (индекс «ст»; направления  $\omega_{cm}$  и  $\omega_\delta$  противоположны) определим уравнением:

$$A_{cm}(p) \omega_{cm} = M_{эм}, \quad A_{cm}(p) \equiv I_{cm} (p^2 + 2\xi_{cm}\Omega_{cm}p + \Omega_{cm}^2)/p; \quad (8.4)$$

где  $I_{cm}$  – момент инерции статора;  $\Omega_{cm}$  – низшая резонансная частота его упругих колебаний,  $\xi_{cm}$  – коэффициент демпфирования.

Настройку замкнутых контуров электродвигателя выполним с настройкой на полиномы Баттерворта второго порядка с согласованными частотами.

После включения замкнутого контура по току вместо (8.8) получим:

$$\begin{aligned} M &= c_J J; \quad K_J J = W_J(p) \{ \mu \omega - c_e (\omega_0 + \omega_{cm}) / W_{RJ} W_{II} \}; \\ W_n(p) &= K_n / (1 + \tau p); \quad W_J(p) = 1 / [2\tau^2 p^2 + 2\tau p + 1]; \\ W_{RJ}(p) &= K_{RJ} (1 + T_{эм} p) / T_{эм} p; \quad K_{RJ} K_n = RT_{эм} / 2\tau K_J; \end{aligned} \quad (8.5)$$

где  $K_J$  – коэффициент усиления в обратной связи;  $W_{RJ}(p)$  – ПИ регулятор по току;  $W_n(p)$  – передаточная функция силового преобразователя переменного тока в постоянный с коэффициентом  $K_n$  и малой временной задержкой  $\tau$ .

Резонансная частота такого контура по току  $\Omega_J = 1/(2^{1/2}\tau)$ , перерегулирование  $\approx 4.3\%$ , длительность переходного процесса  $\approx 4.7\tau$ .

После включения замкнутого контура по скорости на его выходе будет:

$$K_\omega \omega_0 = W_\omega(p) \{ \omega_3 - M_c K_J / W_J W_{R\omega} R \}; \quad W_\omega(p) = 1 / [8\tau^2 p^2 + 4\tau p + 1]; \quad (8.6)$$

где:  $W_{R\omega} = K_{R\omega} = const$  – П-регулятор;  $K_J / K_{R\omega} = 4\tau K_\omega c_J / I_\Sigma$ .

Резонансная частота такого контура по скорости  $\Omega_\omega = 1/(2^{1/2}2\tau)$ , перерегулирование  $\approx 4.3\%$ , длительность переходного процесса  $\approx 9.4\tau$ .

Контур по ошибке слежения примем наиболее простым:

$$\omega_3 = W_{Re}(p) e; \quad W_{Re}(p) = K_\omega (2^{1/2}\Omega + \Omega^2/p); \quad (8.7)$$

где  $\Omega$  – частота контура по  $e$ :  $p\varphi_0 \approx \omega_3 / K_\omega = (2^{1/2}\Omega + \Omega^2/p) e$ .

В качестве внешних возмущений выберем действующий на телескоп момент от ветровой нагрузки  $M_f = A_\epsilon \sin(\Omega_\epsilon t)$  с амплитудой  $A_\epsilon$  и доминирующей частотой  $\Omega_\epsilon$ . Момент потерь примем в виде сухого трения  $M_{nm} = S_m \text{sign}(\omega_m)$ . Малым моментом потерь для ротора пренебрегаем:  $M_{nd} / I_m \approx 0$ .

Разделим уравнения (8.1) – (8.4) на момент инерции  $I_m$ :

$$\begin{aligned} p\omega_m &= (\mu/I_m + C/I_m p) (\omega_0 - \omega_m) - (S_m/I_m) \text{sign}(\omega_m) + (A_\epsilon/I_m) \sin(\Omega_\epsilon t); \\ (I_0/I_m) p\omega_0 &= M_{эм}/I_m - (\mu/I_m + C/I_m p) (\omega_0 - \omega_m); \\ (I_{cm}/I_m) (p^2 + 2\xi_{cm} \Omega_{cm} p + \Omega_{cm}^2) \omega_{cm}/p &= M_{эм}/I_m; \end{aligned} \quad (8.8)$$

и выделим следующие наиболее важные группы параметров:

$$I_0/I_m, \quad I_{cm}/I_m, \quad \mu/I_m, \quad C/I_m, \quad S_m/I_m, \quad A_\epsilon/I_m, \quad \Omega_\epsilon/\Omega, \quad \Omega_{cm}/\Omega, \quad \xi_{cm}.$$

Входящий в (8.8) электромагнитный момент задается из (8.5) - (8.7):

$$\begin{aligned} M_{эм} / I_m &= \{1 + \varepsilon_{\Delta}(\varphi_{\delta} + \varphi_{cm})\} (c_J / I_m) J; \\ K_J J &= W_J(p) \{ K_{R\omega}(\omega_3 - K_{\omega}\omega_{\delta}) - c_e(\omega_{\delta} + \omega_{cm}) / W_{RJ}(p) W_{\Pi}(p) \}; \\ K_{\omega}\omega_{\delta} &= W_{\omega}(p) \{ \omega_3 - M_c K_J / W_J(p) K_{R\omega} R \}; \quad \omega_3 / K_{\omega} = (2^{1/2} \Omega + \Omega^2/p) e. \end{aligned} \quad (8.9)$$

В передаточных функциях  $W_J(p)$  и  $W_{\omega}(p)$  внутренних контуров электродвигателей постоянную времени выберем  $\tau = 0.01$  сек. В этом случае резонансная частота контура по току  $\Omega_J/2\pi \approx 11$  Гц ( $\Omega_J = 1/(2^{1/2}\tau)$ ), а длительность переходного процесса  $\approx 4.7\tau \approx 0.05$  сек. Соответственно для контура по скорости  $\Omega_{\omega}/2\pi \approx 5.5$  Гц ( $\Omega_{\omega} = 1/(2^{1/2}2\tau)$ ), а длительность переходного процесса  $\approx 9.4\tau \approx 0.1$  сек. Тогда в контуре по ошибке слежения с частотой  $\Omega/2\pi \leq 1$  Гц приближенно можно принимать квазистационарный режим внутренних контуров электродвигателя. В этом случае для контуров по току и по скорости в (8.9) полагаем  $p \approx 0$ :

$$\begin{aligned} J &\approx (K_{R\omega} K_{\omega} / K_J) (\omega_3 / K_{\omega} - \omega_{\delta}); \quad K_{\omega} \omega_{\delta} \rightarrow \omega_3 = K_{\omega} (2^{1/2} \Omega + \Omega^2/p) e; \quad e = \varphi_{KO} - \varphi_m; \\ M_{эм} / I_m &= \{1 + \varepsilon_{\Delta}(\varphi_{\delta} + \varphi_{cm})\} (c_J / I_m) J = \\ &= \{1 + \varepsilon_{\Delta}(\varphi_{\delta} + \varphi_{cm})\} (c_J K_{R\omega} K_{\omega} / K_J I_m) [(2^{1/2} \Omega + \Omega^2/p) e - \omega_{\delta}], \end{aligned} \quad (8.10)$$

где важнейший параметр  $c_J K_{R\omega} K_{\omega} / K_J I_m = 1 / 4\tau$  (см. (8.6)).

Складывая первые два уравнения (8.8), получим с учетом  $\omega_{\delta} \approx \omega_m$ :

$$(1 + I_{\delta} / I_m) p \omega_m = M_{эм} / I_m - (S_m / I_m) \text{sign}(\omega_m) + (A_e / I_m) \sin(\Omega_{\delta} t). \quad (8.11)$$

При анализе управляемой динамики телескопа в условиях ветровых и других внешних возмущений важно обращать внимание еще на его низкие эксплуатационные частоты упругих колебаний на валу. Во-первых, контур управления может активно удерживать ротор электродвигателя почти «неподвижным». Тогда, полагая в первом уравнении (8.8)  $\omega_{\delta} \approx 0$ , получим частоту  $\Omega_m = \text{sqrt}(C/I_m)$  колебаний телескопа на упругой передаче. Во-вторых, контур управления может активно «заземлять» ротор с со статором. Подставляя  $M_{эм} / I_m$  из третьего уравнение (8.8) в (8.11), будем иметь частоту колебаний замороженной системы из теле-

скопа, ротора и статора на элементах упругого закрепления статора:  $\Omega_{\text{мдс}} \approx \Omega_{\text{см}} \sqrt{I_{\text{см}}/I_m}$ .

*Моделирование.* Для получения числовых оценок по влиянию различных факторов на точность сопровождения было проведено моделирование в Simulink MATLAB. Рассматривался наиболее неудобный для сопровождения случай низкоорбитального КО с высотой  $h_{\text{КО}} = 200$  км, для которого угловые скорости функции  $\varphi_{\text{КО}}$  по углам азимута и высоты могут достигать  $1.2^\circ/\text{сек}$  (для сравнения, скорость вращения Земли =  $15^\circ/\text{час}$ ).

Временное изменение сопровождаемых углов азимута  $A$  и высоты  $H$  для видимого участка орбиты показано на рисунке 8.1.

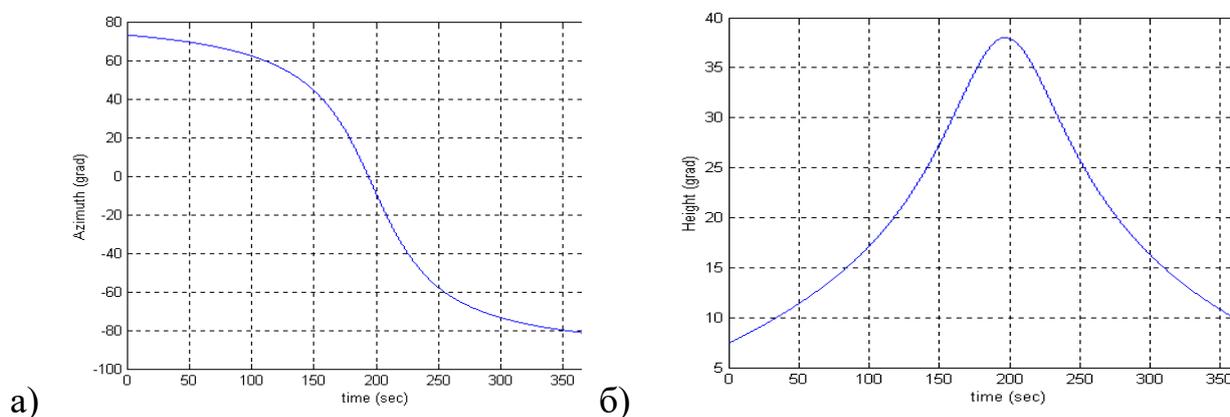


Рисунок 8.1 – Временное изменение отслеживаемых углов  $A$  (а) и  $H$  (б)

Для определенности рассмотрим результаты моделирования только канала управления по углу азимута  $A$ , требующего наиболее высоких скоростей сопровождения при пролете КО рядом с близзенитной областью.

Зададим следующие параметры телескопа (если единицы измерения не указаны, то они приведены в системе СИ):

$$I_{\text{д}}/I_m = I_{\text{см}}/I_m = 1 / 1000; \mu/I_m = 1 / 100; C/I_m = 10000; S_m/I_m = 1.5 / 100;$$

$$A_{\text{в}}/I_m = 1 / 100; \Omega_{\text{в}} = 3 \text{ рад/с}; \Omega_{\text{см}} \sim 120 \text{ рад/с}; \xi_{\text{см}} = 2; \tau = 0.01 \text{ сек};$$

$$\text{abs}(M_{\text{эм}}/I_m) \leq 8/100 \text{ – ограничение по моменту управления.}$$

Например, таким соотношениям удовлетворяют:

$$I_m = 100000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, I_{\text{д}} = 100 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, C = 10^9 \text{ н}\cdot\text{м/рад},$$

$$M_{nm} = S_m \operatorname{sign}(\omega_m), S_m = 1500 \text{ н}\cdot\text{м}; M_f = A_\varepsilon \sin(\Omega_\varepsilon t), A_\varepsilon = 1000 \text{ н}\cdot\text{м}.$$

Внутренние параметры электродвигателя примем типовыми:

$$c_J / I_m = 1 / 100; K_J = 75; K_\omega = K_{R\omega} = 450; \Omega = 6.28 \text{ рад/с};$$

$$T_{эм} = L/R = 0.002 \text{ сек}; R = 25 \text{ Ом}; L = 0.05 \text{ Гн}; C_e = 1000 \text{ В}\cdot\text{сек/рад};$$

$$K_n \cdot K_{RJ} = L / 2\tau \cdot K_J = 0.0333; K_n = K_{RJ} = 0.183;$$

$$\xi_e = 0, \xi_J = 0; \varepsilon_\Delta = 0.33 \cos \{2N[\varphi_\delta + \varphi_{cm}]\}, N = 50 - \text{число пар полюсов}.$$

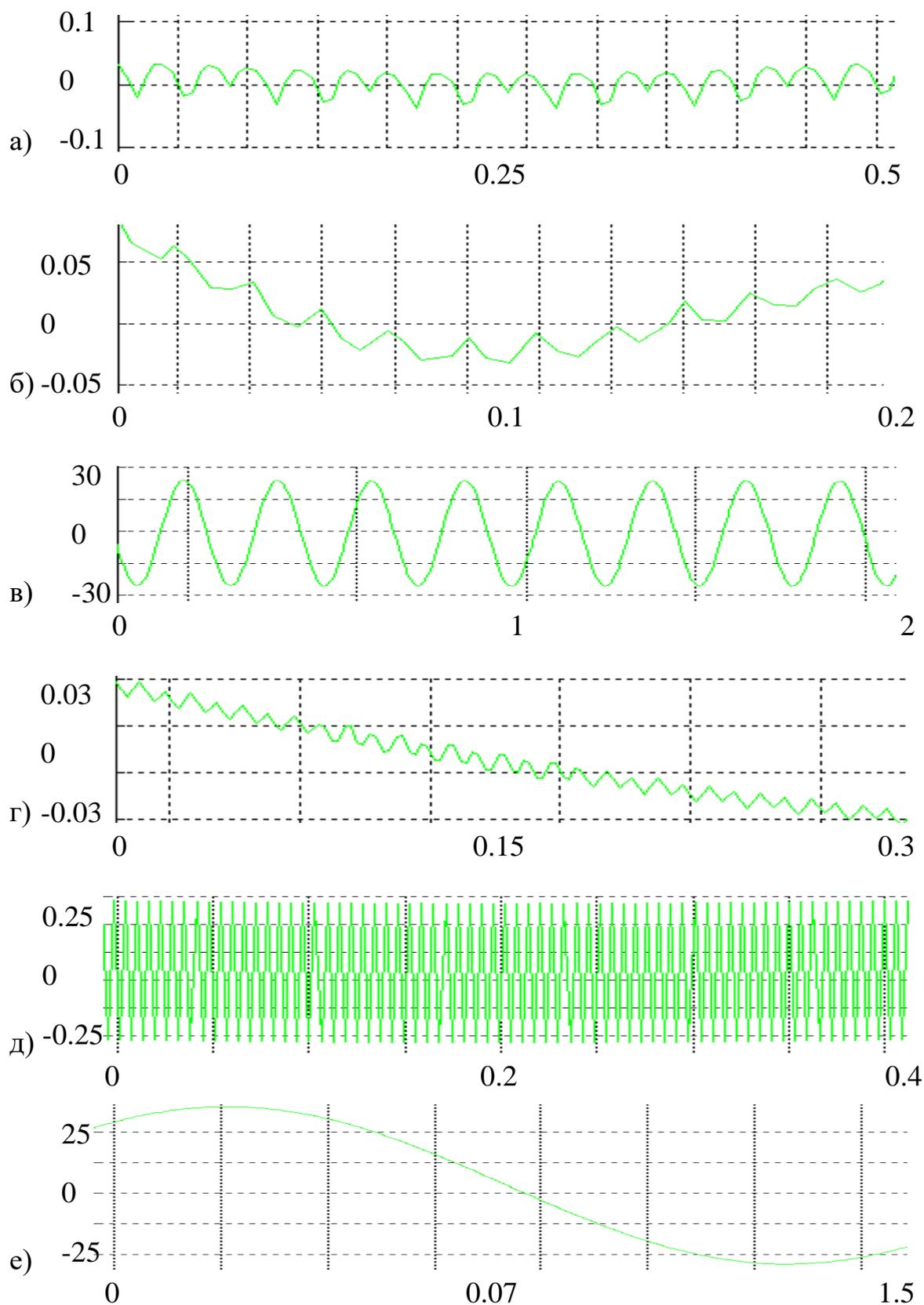
При сопровождении орбитального объекта наблюдения наземным телескопом в ОПУ используется высокочастотный оптический датчик измерения интенсивности светового поля ДИ в фокальной плоскости телескопа.

Моделирование проводилось на полной модели, построенной в Simulink MATLAB. При анализе точности ошибка слежения условно разделялась на две компоненты:  $e = e_n + e_\varepsilon$  (низкочастотную  $e_n$  и высокочастотную  $e_\varepsilon$ ), где в качестве низкочастотной компоненты можно рассматривать составляющие, не приводящие к «смазу» изображения на временном интервале его экспозиции. Чтобы выделить роль высокочастотных компонент, потенциально приводящих к «смазу» оптического изображения, результаты моделирования по влиянию наиболее важных факторов на точность углового наведения телескопа в ОПУ приведены на временных интервалах в несколько секунд (Рисунок 8.2).

Рисунок 8.2а соответствует почти идеальному случаю – при крайне малых возмущающих факторах: пульсации тока, ветровой нагрузки и от упругости передачи. Получившаяся высокочастотная компонента ошибки слежения  $e_\varepsilon$  приведена для наихудшего участка траектории – при быстром прохождении близзенитной области (слепой области наведения). Видно, что при выбранных исходных параметрах модели здесь  $e_\varepsilon$  не превышает 0.1 угл.сек.

На рисунках 8.2 б,в показано ухудшение  $e_\varepsilon$  при введении упругости статора электродвигателя в базовую модель. До значения  $\Omega_{cm} = 55 \text{ рад/с}$  ошибка  $e_\varepsilon$  не превышала 0,1 угл.сек (рис. 8.2б), а при уменьшении частоты до  $\Omega_{cm} = 50 \text{ рад/с}$  она недопустимо ухудшалась (рис. 8.2в). На рисунках 8.2 г,д показано ухудшение  $e_\varepsilon$  при введении упругости азимутального вала в модель, особенно с уменьшением упругости вала от  $C/I_m = 10^4$  (рис. 8.2г) до  $C/I_m = 10^3$  (рис. 8.2д) и ниже. На рисунке

8.2е показано ухудшение  $e_\epsilon$  при действии ветра – при  $A_\epsilon/I_m = 1/100$ ,  $\Omega_\epsilon = 3 - 6$  рад/сек (в диапазоне) и на рисунке 8.2ж – при  $A_\epsilon/I_m = 2/100$ ,  $\Omega_\epsilon = 3$  рад/с.



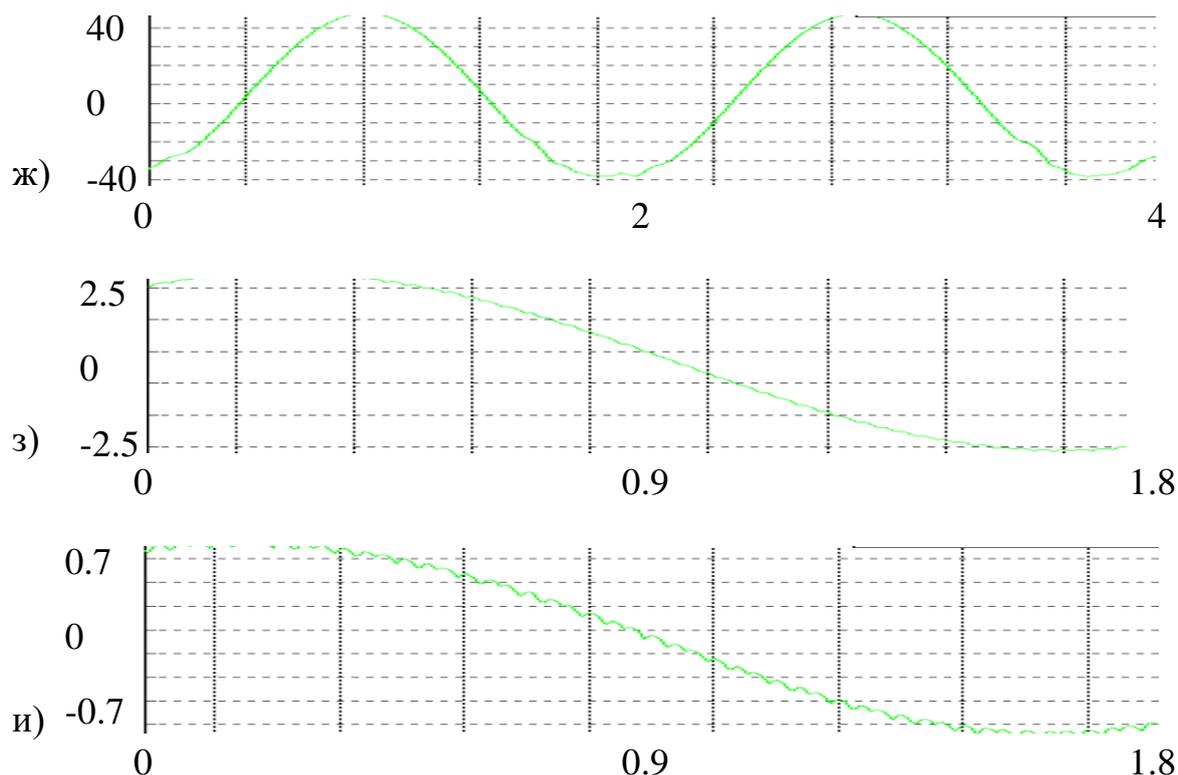


Рисунок 8.2 – Изменение высокочастотной составляющей  $e_e$  ошибки слежения (угл.сек) на интервале относительного времени  $\Delta t$  (сек).

На рисунке 8.2з показано ухудшение  $e_e$  при учете пульсаций тока  $\varepsilon_A = A_\varepsilon \cos \{2N[\varphi_\partial + \varphi_{cm}]\}$  ( $N=50$  – число пар полюсов) с  $A_\varepsilon = 0.33$  и на рис. 8.2и – при  $A_\varepsilon = 0.1$ . Таким образом, на коротких экспозициях при выборе соответствующих параметров имеется возможность достижения высоких точностей одноканального сопровождения КО:  $e_e < 0.1$  угл.сек.

Их приведенных результатов моделирования следует, что неправильно выбранные параметры электродвигателя и упругой передачи могут существенно ухудшить работу системы слежения телескопа. Поэтому при создании телескопа требуется их тщательно обоснованный выбор.

Особенно опасными могут стать ветровые возмущения. На практике для их уменьшения ставят ветрозащитные экраны, повышают астатизм обратной связи дополнительными интегральными звеньями, а также вводят дополнительный кон-

тур комбинированного управления по возмущениям (позволяет повысить астатизм управления по возмущениям без дополнительных интегральных звеньев).

Еще одним ухудшающим точность слежения фактором может стать не показанная на рисунках 8.2 низкочастотная компонента  $e_n$  ошибки слежения. В данном примере для простейшего регулятора (8.7) с первым порядком астатизма, телескоп запаздывал за низкоорбитальным КО до 4 угл. мин. на максимальных скоростях по углу азимута. Понятно, что для более высокоорбитальных КО угловые скорости сопровождения будут меньше. Примерно в такой же пропорции должна уменьшиться и ошибка углового запаздывания.

Заметим, что значимость такого низкочастотного углового запаздывание обычно невелика для случаев, когда КО не выходит за пределы поля зрения телескопа. Иначе для активного уменьшения  $e_n$  можно применить следующие два подхода: 1) добавить в следящую систему интегральные звенья более высоких порядков; 2) отслеживать не реальную траекторию КО, а ее малый прогноз вперед (который должен настраиваться отдельным контуром).

Например, в первом случае П-регулятор (8.6) в контуре по скорости следует заменить на ПИ-регулятор, а в контуре по ошибке слежения перейти от ПИ-регулятора  $W_{Re}(p)$  к ПИИ-регулятору (т.е. от полинома Баттерворта 2-го порядка к полиному 3-го порядка – в соответствии с моделями §5.3 и §7.1).

Во втором случае для повышения астатизма в электроприводах используют комбинированное управление, добавляя к сигналу  $\omega_z$  отдельно рассчитанную низкочастотную оценку  $K_{\omega p} \varphi_{КО}^*$  для скорости движения наблюдаемого объекта. Тогда для контура по ошибке будем иметь:

$$p\varphi_{\partial} - p\varphi_{КО}^* \approx -pe = (2^{1/2}\Omega + \Omega^2/p)e.$$

Заметим, что при наблюдении наземным телескопом слабых астрономических объектов скорости сопровождения будут уменьшены с 1.2°/сек до скорости вращения Земли в 15°/ час = 0.0042 °/сек, то есть в 285 раз. При этом следует ожидать ошибку  $e_n \approx 4' \cdot 60'' / 285 = 0.85$  угл. сек. Такое уменьшение  $e_n$  приведет

уже к доминированию в ошибке  $e = e_n + e_e$  высокочастотной компоненты  $e_e$ , создаваемой ветровой нагрузкой (см. рис. 8.2 е,ж).

Так как на практике внешние возмущения не всегда малы и предсказуемы, поэтому для большого наземного телескопа всегда могут встретиться ситуации, когда без включения каналов наведения более высокого уровня не удастся обеспечить приемлемое значение ошибки наведения.

## **8.2. Исследование возможностей повышения точности наведения телескопа с помощью управления вторичным зеркалом при низкочастотном накапливаемом оптическом сигнале ошибки**

Исследуем возможности двухсистемного наведения для практически важного случая замедленного такта выдачи оптического сигнала ошибки датчиком гида ДГ (в полосе  $5 \div 10$  Гц). В данном параграфе для корректирующей системы слежения ВЗ изучаются особенности построения традиционного контура обратной связи с запаздыванием, но при отсутствии внешних возмущений (особенно средние и высокочастотных). Тематике, близкой к данному параграфу, посвящены также книги [52, 84, и др.] и статьи [4,8, и др.], а при его написании учитывались статьи автора [250, 251].

В такой постановке задачи управление наклонами ВЗ осуществляется через обратную связь по сигналу ошибки наведения  $S_e = e + \xi_e$ , измеряемому оптическим датчиком гидирования (ДГ) в фокальной плоскости телескопа с замедленным тактом выдачи измерительной информации. При этом сигналы ошибки  $e$  накапливаются на интервале  $T_{ДГ}$  и выдаются с временной задержкой  $T_{обр}$ . Значимость суммарной задержки выдачи сигнала  $T_z = T_{ДГ} + T_{обр}$  по отношению к периоду  $T_{ВЗ}$  частоты пропускания контура вторичного зеркала требует рассмотрение контура слежения ВЗ с запаздыванием, а его моделирование проводить в классе непрерывно-дискретных систем. При этом величина запаздывания накапливаемой на интервалах  $T_{ДГ}$  ошибки  $\langle e \rangle$  является периодической «пилообразной» функци-

ей, линейно возрастающей от минимального значения  $T_{обр}$  до максимального  $T_3 = T_{ДГ} + T_{обр}$  и мгновенно возвращающейся в значение  $T_{обр}$ .

В целях упрощения синтеза регулятора для такой непрерывно-дискретной системы, будем использовать ее приближение – непрерывную систему со средним запаздыванием  $\tau = T_{обр} + (T_{ДГ} / 2)$  для сигнала ошибки  $e$ .

Сначала проведем качественный анализ ее свойств. Предварительно заметим, что увеличение отношения  $(\tau / T_{ВЗ})$ , во-первых, затруднит реализацию дифференциального и пропорционального звеньев в регуляторе, а во-вторых, потребует понижения частоты контура обратной связи. В итоге эффективная обратная связь может быть только «низкочастотной», с преобладанием интегрирующих звеньев. Представим ее в следующем виде:

$$U = W_u S_e + \xi_u, \quad W_U = \frac{\omega^3}{K_0} \cdot \frac{e^{-p\tau}}{p} \cdot \frac{W_1(p)}{W_2(p)}, \quad (8.12)$$

где:  $S_e = e + \xi_e$ ,  $e = \Delta\alpha_{КО} - K_0 \varphi$ ;  $\Delta\alpha_{КО}$  – остаточная ошибка первого канала наведения;  $W_1, W_2$  – некоторые передаточные функции, причем степень числителя не превосходит степени знаменателя.

Для модели (3.8) будем иметь следующее уравнение замкнутой системы (шумовые компоненты для упрощения записи опущены):

$$(p^2 + \mu_k p + \omega^2 + K_0 W_U) \cdot e = (p^2 + \mu_k p + \omega^2) \cdot \Delta\alpha_{КО}. \quad (8.13)$$

В наиболее простом случае можно выбрать регулятор из двух интегральных звеньев:  $W_1(p) / p W_2(p) = a_1 / p + a_2 \omega / p^2$ . Тогда соответствующий ему характеристический полином замкнутого контура будет следующим:

$$p^4 + \mu_k \cdot p^3 + \omega^2 p^2 + (a_1 \omega^3 p + a_2 \omega^4) \cdot e^{-p\tau} = 0. \quad (8.14)$$

Для случая  $(\tau / T_{ВЗ}) \rightarrow 0$  его можно приближенно свести к рассмотренным в главе 7 полиномам четвертого порядка с хорошими переходными процессами. Например, для полинома Баттерворта  $B_4(p) = p^4 + 2.613 \Omega p^3 + 3.414 \Omega^2 p^2 + 2.613 \Omega^3 p + \Omega^4$ , будем иметь следующие оценки по выбору параметров в (8.14):  $\mu_k \approx$

$2.613 \Omega$ ,  $\omega^2 \approx 3.414 \Omega^2$ ,  $a_1 \omega^3 \approx 2.613 \Omega^3$ ,  $a_2 \omega^4 \approx \Omega^4 \Rightarrow \Omega \approx 1.85 \omega$ ,  $\mu_k \approx 4.83 \omega$ ,  $a_1 \approx 16.54$ ,  $a_2 \approx 11.7$ . На практике, чтобы удовлетворить условию  $(\tau / T_{B3}) \rightarrow 0$ , обычно требуется понизить частоту  $\omega$ .

С ростом отношения  $(\tau / T_{B3})$  для учета запаздывания в (8.14) можно применить аппроксимации Паде низшего порядка, например:

$$\exp(-s) \approx \frac{-0.5 \cdot s^2 + s}{0.5 \cdot s^2 + s} \approx \frac{0.083 \cdot s^3 - 0.5 \cdot s^2 + s}{0.083 \cdot s^3 + 0.5 \cdot s^2 + s} \approx \frac{-0.0083 \cdot s^4 + 0.1 \cdot s^3 - 0.5 \cdot s^2 + s}{0.0083 \cdot s^4 + 0.1 \cdot s^3 + 0.5 \cdot s^2 + s}.$$

Однако при этом получить хорошие переходные процессы будет труднее. Поэтому в таких случаях рекомендуется использовать стандартные процедуры синтеза оптимального управления в пакете MATLAB. Это позволяет в модели (8.12), (8.13) функцию запаздывания описывать аппроксимацией Паде высокого порядка. В проводимом моделировании использовался восьмой порядок:

$$\exp(-s) \approx \frac{-5.781e-008 \cdot s^8 + 3.238e-006 \cdot s^7 - 8.741e-005 \cdot s^6 + 0.001457 \cdot s^5 - 0.01603 \cdot s^4 + 0.1154 \cdot s^3 - 0.5 \cdot s^2 + s}{5.781e-008 \cdot s^8 + 3.238e-006 \cdot s^7 + 8.741e-005 \cdot s^6 + 0.001457 \cdot s^5 + 0.01603 \cdot s^4 + 0.1154 \cdot s^3 + 0.5 \cdot s^2 + s}.$$

Синтез ЛК-регулятора проводился для эквивалентной задачи без запаздывания, представляемой в стандартной в матричной форме записи:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad J(u) = \int_0^{\infty} (x^T Qx + 2x^T Nu + u^T Ru) dt \quad (8.15)$$

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC - (B - LD)K)\hat{x} + Ly, \quad u = -K\hat{x}$$

где  $C$ ,  $D$  – задаваемые матрицы формирования вектора наблюдений  $y$ ; матрицы  $L$  и  $K$  – рассчитываются; весовые матрицы выбирались следующими:  $N = 0$ ,  $Q = E$ ,  $R = m^2 \cdot E$  ( $E$  – единичная матрица,  $m^2$  – положительный коэффициент).

Заметим, что по своему смыслу использованная аппроксимация Паде при решении задачи (8.15) неявно вводит в систему экстраполятор запаздывающего сигнала с фильтром низких частот. А оптимальная настройка регулятора настраивает управление согласованно с такой экстраполяцией.

В расчетном примере синтез оптимального регулятора проводился при следующих параметрах. Для ВЗ выбирались: частота  $\omega \approx 3$  Гц, декремент затухания  $\delta \approx 0,01$ ; для оптического ДГ : частота такта выдачи сигнала  $f_{ДГ} \leq 10$  Гц ( $T_{ДГ} \geq 0.1$  сек);  $T_{ОБР} = 0.02$  сек; СКО шума измерений  $\sigma_{ДГ} = 0.033$  угл. сек.

При синтезе регулятора остаточная ошибка слежения первого контура  $\Delta\alpha = (\alpha_{КО} - \alpha)$  описывалась прохождением белого шума через передаточную функцию:

$$W_{\Delta\alpha}(s) = 0.07 / (s^4 + 0.927 \cdot s^3 + 0.115 \cdot s^2 + 0.05701 \cdot s + 0.001764) .$$

В результате решения (8.15) была получена функция регулятора:

$$W_R(s) = -835.8 \cdot W_1(s) / W_2(s); \quad (8.16)$$

$$W_1(s) = (s + 82.9) \cdot (s + 0.868) \cdot (s^2 + 0.996 \cdot s + 0.358) \cdot (s^2 - 8.79 \cdot s + 473) \cdot (s^2 + 158 \cdot s + 7130) \cdot (s^2 + 136 \cdot s + 8038) \cdot (s^2 + 89.5 \cdot s + 10170);$$

$$W_2(s) = (s + 253) \cdot (s + 0.868) \cdot (s + 0.0327) \cdot (s^2 + 0.0269 \cdot s + 0.0625) \cdot (s^2 + 36.4 \cdot s + 1723) \cdot (s^2 + 54.6 \cdot s + 8181) \cdot (s^2 + 139 \cdot s + 21160) \cdot (s^2 + 464 \cdot s + 117100),$$

где сложная структура объясняется структурой аппроксимации Паде.

При этом для замкнутого контура показатель колебательности составил 1.2449, колебательная частота 0.2 Гц, частота среза (по уровню 1) 0.441 Гц. В целом полоса пропускания контура была понижена до 0.55 Гц,

По диаграммам Боде, построенным для разомкнутого контура управления, запас устойчивости по амплитуде составил 12.34 Дб, запас устойчивости по фазе 50.32 град, частота среза (по уровню 0.707) 0.3608 Гц.

Моделирование точности корректирующего слежения ВЗ с регулятором (8.16) проводилось на полной дискретно-непрерывной модели, учитывающей периодичность выдачи накапливаемого сигнала оптического датчика ДГ. Механические разъюстировки и внешние возмущения не учитывались. Ошибка слежения первого канала описывалась гармонической функцией:  $\Delta\alpha = A \cdot \sin(\Omega \cdot t)$  с амплитудой  $A = 2.5$  угл. сек (при такой амплитуде получающиеся разъюстировки оптической схемы телескопа еще не сильно ухудшают оптическое изображение).

Частота  $\Omega$  выбиралась через задание угловой скорости:

$$\Delta \dot{\alpha} = A\Omega \cos(\Omega \cdot t) = \dot{\alpha}_m \cos(\Omega \cdot t); \quad \dot{\alpha}_m = A\Omega, \quad \ddot{\alpha}_m = \dot{\alpha}_m \Omega .$$

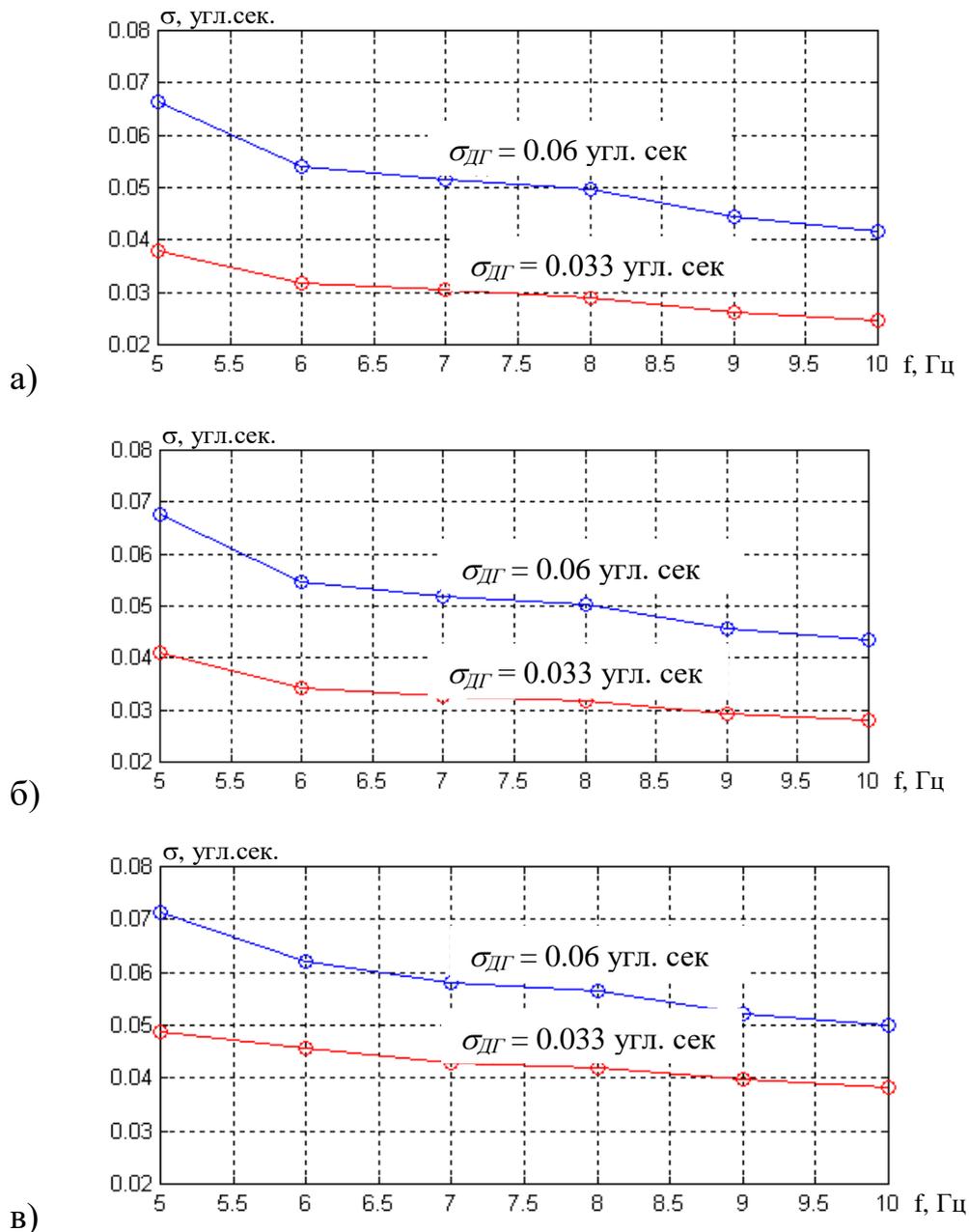


Рис. 8.3. СКО ошибки слежения при  $\sigma_{DG} = 0.033$  угл.сек и 0.06 угл.сек для скоростей  $\dot{\alpha}_m$  (угл. сек / сек): а) 0.18, б) 0.36, в) 0.72.

По результатам моделирования были построены графики для ошибки корректирующего слежения ВЗ в зависимости от частоты выдачи сигнала ДГ (Рисунки 8.3, 8.4). На них рассматривались три случая угловой скорости  $\dot{\alpha}_m$  соответственно: 0.18 (а), 0.36 (б), 0.72 угл. сек / сек (в).

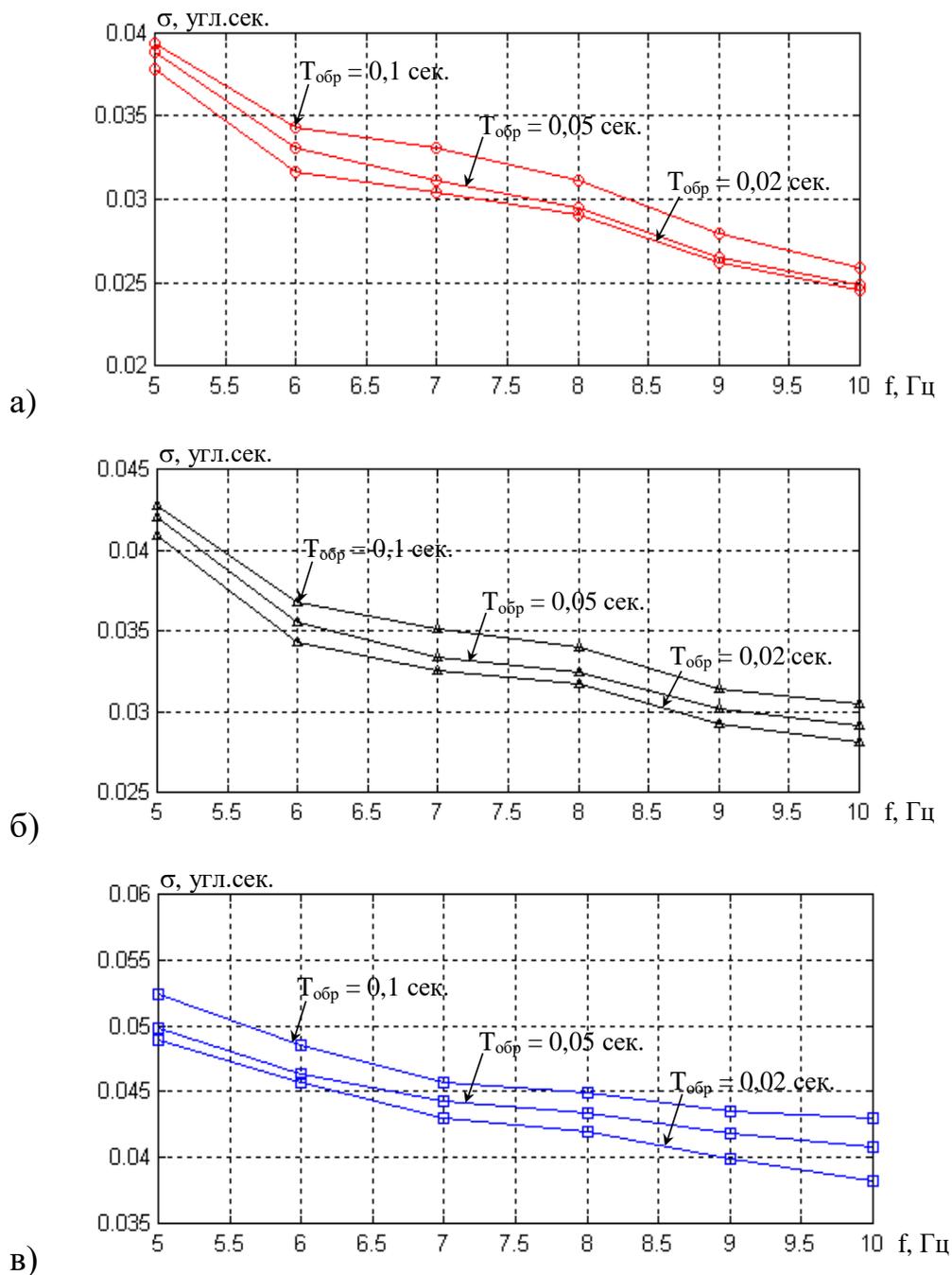


Рис. 8.4. СКО ошибки слежения при различных  $T_{обр} = 0.02$  сек, 0.05 сек, 0.1 сек для скоростей  $\dot{\alpha}_m$  (угл. сек / сек): а) 0.18, б) 0.36, в) 0.72.

На рисунке 8.3 графики построены для значений СКО шума ДГ:  $\sigma_{ДГ} = 0.033$  угл.сек и 0.06 угл.сек при суммарном времени считывания и обработки сигнала  $T_{обр} = 0.02$  сек. На рисунке 8.4 СКО шума ДГ фиксировалось:  $\sigma_{ДГ} = 0.033$  угл.сек, а время задержки сигнала в ДГ изменялось:  $T_{обр} = 0.02$  сек, 0.05 сек, 0.1 сек.

Из приведенных результатов видна достаточно высокая потенциальная эффективность оптимальных регуляторов при идеальных условиях – при отсутствии внешних и внутренних возмущений плюс оптимальная настройка регулятора на отслеживаемый сигнал. В результате исходная амплитуда остаточных колебаний первого канала сопровождения  $A = 2.5$  угл. сек была уменьшена корректирующим каналом слежения до СКО ошибки  $\sim 0.05$  угл. сек (в 50 раз) и более. Однако при этом естественно была понижена частота контура управления, что ограничит его использование в условиях широкополосных возмущений.

Очевидно, что путем надлежащего масштабирования приведенные результаты могут быть обобщены и на другие случаи исходных данных.

Заметим также, что в более простом варианте выбора и отладки гладких регуляторов можно было бы также использовать подход, отвечающий структурам управления, приведенным на рисунке 7.3.

Приведенные ниже результаты численного моделирования были получены в процессе совместной работы с К.С. Исуповым в Научно-техническом центре «Восход» (г. Ижевск) над проработкой первого варианта концепции двухсистемного наведения космического телескопа «Спектр-УФ» [8] (они в последствии также были использованы в его кандидатской диссертации при научном консультировании автора [25]).

Таким образом, при оптимальной настройке регулятора на автокорреляционные характеристики отслеживаемого сигнала может быть достигнута точность слежения ниже 0.1 угл. сек, но регулятору для этого потребуется понизить полосу пропускания контура управления (в нашем случае до 0.55 Гц).

### **8.3. Прогнозирование эффективности повышения точности наведения орбитального телескопа с помощью управления вторичным зеркалом при высокочастотном сигнале восстановленной ошибки**

В рамках постановки задачи предыдущего параграфа для обеспечения корректирующего слежения ВЗ в более широкой полосе частот контура можно при-

менить восстановление низкочастотного оптического сигнала ошибки в интервалах между тактами его выдачи.

Чтобы не понижать частоты контуров управления, система угловой стабилизации космического аппарата (с телескопом) работает по своему гироскопическому датчику ГД. При этом медленный дрейф ГД периодически корректируется по оптическому сигналу ошибки (ДГ) и углу отклонения вторичного зеркала (ДПВЗ) по алгоритму, описанному в пункте 7.3.2.

Считается, что в результате автономной работы системы угловой стабилизации КА остается некоторая ошибка  $\alpha(t)$ , компенсация которой с помощью ВЗ не приведет к существенной разбюстировке оптической схемы телескопа и ухудшению качества изображения в процессе его двухсистемного наведения.

Режим двухсистемного наведения работает по оптическому датчику гидирования ДГ в фокальной плоскости (ДФП) с накоплением сигнала ошибки слежения. При этом такт его выдачи намного медленнее такта выдачи сигналов гироскопического датчика ГД и датчика положения ДПВЗ.

В таких условиях взаимодействию первой и второй систем слежения будет соответствовать схема на рисунке 7.4в. В ней сигнал ошибки  $e = \alpha + K_o\varphi$  для второго канала наведения между моментами его выдачи восстанавливается с высокой частотой по сигналам ДПВЗ и ДГ. Для этого он представляется в виде:

$$e(t) \approx \alpha_s(t) + K_o\varphi(t), \quad \alpha_s \approx L(S_e - \tilde{K}_0 S_\varphi), \quad (8.17)$$

где:  $S_e = \bar{e} + \xi_e$ ,  $S_\varphi = \varphi + \xi_\varphi$ ,  $\bar{e} = \bar{\alpha} + K_o\bar{\varphi}$ ; черта сверху обозначает усреднение на временных интервалах  $T_{ДГ}$  накопления слабого светового сигнала оптическим датчиком гида,  $L$  – некоторый оператор, осуществляющий экстраполяцию дискретно-непрерывных сигналов.

Здесь фактически из сигнала ошибки  $e(t)$  с помощью ДПВЗ выделяется ее низкочастотная часть  $\alpha(t)$ , которая экстраполируется с последующим сглаживанием на интервалах накопления оптического сигнала в ДГ. Структурная схема, поясняющая получающийся контур обратной связи в канале управления ВЗ, приведена на рисунке 8.5 (шумы на ней не показаны).

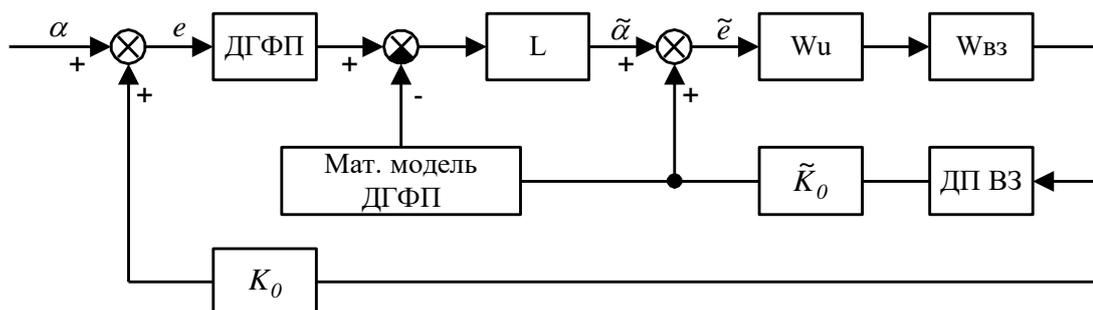


Рисунок 8.5. – Структурная схема для моделирования канала управления ВЗ

В практических расчетах хорошую эффективность в условиях шумов измерений показал вариант  $L$  в виде простого линейного экстраполятора:

$$f(t) = a_0 + a_1(t - t_k + t_{опер}) \quad , \quad a_1 = \frac{[f(t_k) - f(t_{k-n})]}{nT} = \frac{f[1 - e^{-nT}]}{nT} \quad ,$$

$$a_0 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M f(t_{k-m+1}) = f \sum_{m=1}^M \frac{(1 - e^{-(1-m)T})}{M} \quad , \quad M = 1, 2, 3, \dots,$$

где в случае относительно небольших шумов измерений обычно выбиралось  $M = 1$  (для сглаживания больших шумов измерений потребуется  $M$  увеличить);  $n$  – количество интервалов, используемых для вычисления среднего угла наклона (для плавной функции  $f$  с увеличением  $n$  вклад шумов будет уменьшаться);  $T$  – интервал дискретизации измерительного сигнала ДГ;  $t_k$  – момент времени поступления последнего измерительного сигнала; введение времени опережения  $t_{опер}$ , позволяет отчасти уменьшить влияние суммарных эффективных задержек в контуре обратной связи на точность слежения.

Так как в дискретно-непрерывной системе на выходе такого экстраполятора получался пилообразный сигнал, поэтому для сглаживания он дополнительно пропусклся через ФНЧ следующего простого вида (с параметром  $\nu \sim 1/T$ ):

$$\Phi(p) = \nu^2 / (p^2 + 2\nu p + \nu^2) \quad .$$

В итоге передаточные функции экстраполятора ( $\mathcal{E}$ , при  $n = 15$ ) и сглаживающего фильтра ( $\phi$ ) задавались в следующем виде:

$$W_{\omega}(p) = 1 + \frac{1 - e^{-npT_{ДГ}}}{npT_{ДГ}} \cdot (\delta t + t_{опер}); \quad W_{\varphi}(p) = 1 / (1 + 2pT_{ДГ} + p^2T_{ДГ}^2).$$

Моделирование эффективности корректирующего слежения ВЗ проводилось при выборе уравнений углового движения ВЗ в простом виде (3.8) с традиционным ПИД-регулятором в цепи обратной связи.

При расчетах выбирались следующие значения параметров (прежние). Для модели ВЗ:  $\omega \approx 6\pi$  рад/сек = 3 Гц;  $J = 16.12$  кг·м<sup>2</sup>;  $l_u = 0.55$  м;  $\delta \approx 0.01$ ;  $K_0 = 1 / 2.78$ ,  $\tilde{K}_0 = K_0$ . В модели ДГ: частота выдачи сигнала  $f_{ДГ} = 0.5 \div 10$  Гц; суммарное время считывания и обработки сигнала  $T_{обр}^{ДГ} = 0.02 \div 0.1$  сек; СКО шума  $\sigma_{ДГ} = 0.033 \div 0.06$  угл.сек. В модели ДП: частота выдачи сигнала  $f_{ДП} = 100$  Гц;  $T_{ДП} = 1 / f_{ДП} = 0.01$  сек; суммарное время считывания и обработки сигнала  $T_{обр}^{ДП} = 0.01$  сек; СКО шума  $\sigma_{ДП} = 0.02$  угл.сек. Остаточные угловые колебания КА описывалось сигналом  $\alpha = A \sin \omega t$ ,  $\dot{\alpha}_{\max} = A\omega$ ,  $\ddot{\alpha}_{\max} = A\omega^2$  с амплитудой  $A = 2.5$  угл.сек.

Моделирование СКО  $\sigma$  ошибки  $e$  проводилось в Simulink MATLAB в рамках дискретно-непрерывной модели. На рисунке 8.6 показаны полученные зависимости  $\sigma(f_{ДГ})$  для разных  $\sigma_{ДГ}$ , на рисунке 8.7 –  $\sigma(f_{ДГ})$  для разных  $T_{обр}^{ДГ}$ . На рисунке 8.8 показано характерное временное изменение  $\sigma(t)$  при следующих исходных данных:  $A = 2.5$  угл.сек,  $\dot{\alpha} = 0.36$  угл.сек / сек,  $\ddot{\alpha} = 0.05$  угл.сек/сек<sup>2</sup>,  $\sigma_{ДГ} = 0.033$  угл.сек,  $f_{ДП} = 100$  Гц,  $\sigma_{ДП} = 0.02$  угл.сек,  $f_{ДГ} = 10$  Гц,  $T_{обр}^{ДГ} = 0.02$  сек,  $\sigma_{ДГФП} = 0,033$  угл.сек. На рисунке 8.9 приведены зависимости  $\sigma(\dot{\alpha})$  для разных  $f_{ДГ}$ .

Приведенные графики показывают требования к исходным данным каналов управления, позволяющие уменьшить ошибку первого канала (в 2.5 угл. сек) с помощью второго канала управления до 0.1 угл. сек и ниже.

Оценка запасов устойчивости получающегося контура управления выполнялась с помощью стандартных процедур MATLAB. Для этого потребовалось заменить исходную модели на линейную непрерывную. Выбирался наихудший случай звеньев запаздывания, когда все задержки выдачи сигналов достигают макси-

мальных значений (в моменты времени прихода очередного дискретного сигнала). При этом звено  $\exp(-s)$  аппроксимировалось функцией Паде восьмого порядка (приведена в предыдущем параграфе).

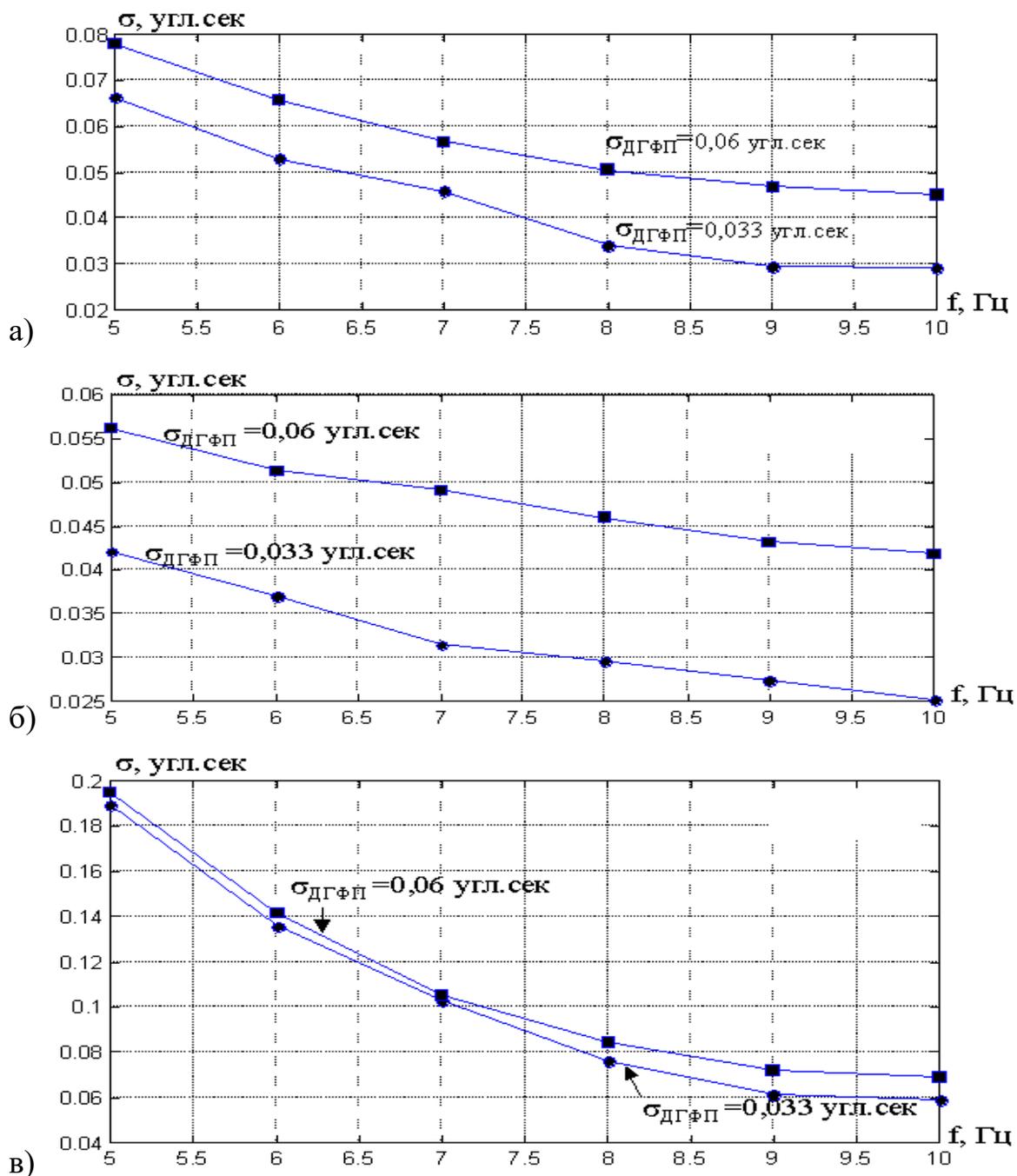


Рисунок 8.7 – Зависимости СКО ошибки ( $\sigma$ ) от  $f_{ДГ}$  при  $A = 2.5$  угл.сек,  $T_{обр}^{ДГ} = 0.02$  сек,  $f_{ДП} = 100$  Гц,  $\sigma_{ДП} = 0.02$  угл.сек: а)  $\dot{\alpha} = 0.36$  угл.сек / сек,  $\ddot{\alpha} = 0.05$  угл.сек/сек<sup>2</sup>; б)  $\dot{\alpha} = 0.18$  угл.сек / сек,  $\ddot{\alpha} = 0.0128$  угл.сек/сек<sup>2</sup> ; в)  $\dot{\alpha} = 0.72$  угл.сек / сек,  $\ddot{\alpha} = 0.21$  угл.сек/сек<sup>2</sup> .

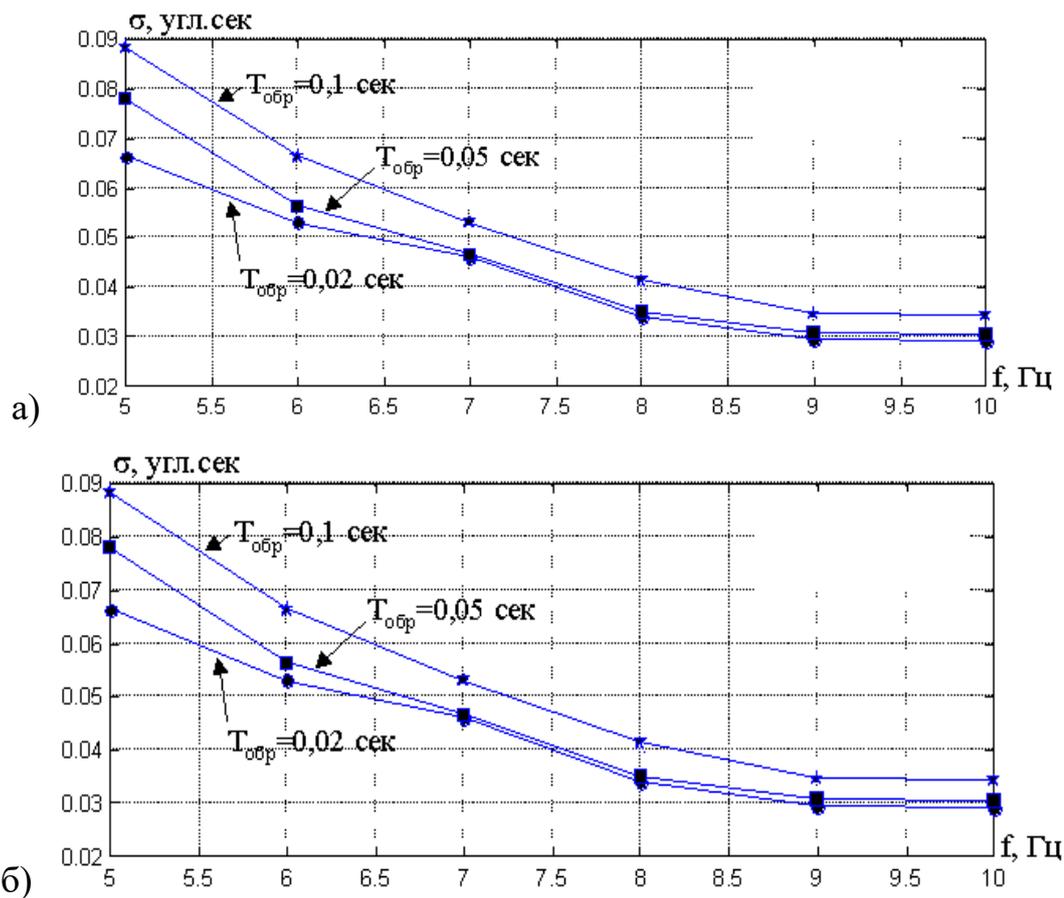


Рисунок 8.7 – Зависимости СКО ошибки  $\sigma$  от  $f_{ДГ}$  при  $A = 2.5$  угл.сек,  $\sigma_{ДГ} = 0.033$  угл.сек,  $f_{ДПЗ} = 100$  Гц,  $\sigma_{ДПЗ} = 0.02$  угл.сек: а)  $\dot{\alpha} = 0.36$  угл.сек / сек,  $\ddot{\alpha} = 0.05$  угл.сек/сек<sup>2</sup>; б)  $\dot{\alpha} = 0.18$  угл.сек / сек,  $\ddot{\alpha} = 0.0128$  угл.сек/сек<sup>2</sup>.

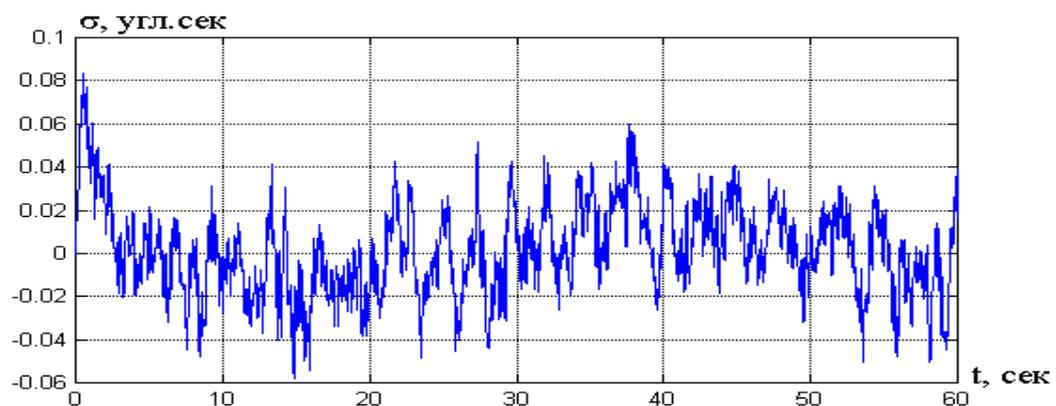


Рисунок 8.8 – Характерное временное поведение ошибки слежения

В итоге, для контура управления с ПИД-регулятором были получены: показатель колебательности 1.59; характерная колебательная частота 3.391 Гц; частота среза с учетом частоты ДПВЗ в 100 Гц была увеличена до 9.74 Гц (по уровню

1). Запас устойчивости по амплитуде составил 9.14 Дб; запас устойчивости по фазе: 41,66 град. Ошибка двухканального наведения также не превышала 0.1 угл. сек., но уже с сохранением широкой полосы работы контура управления ВЗ.

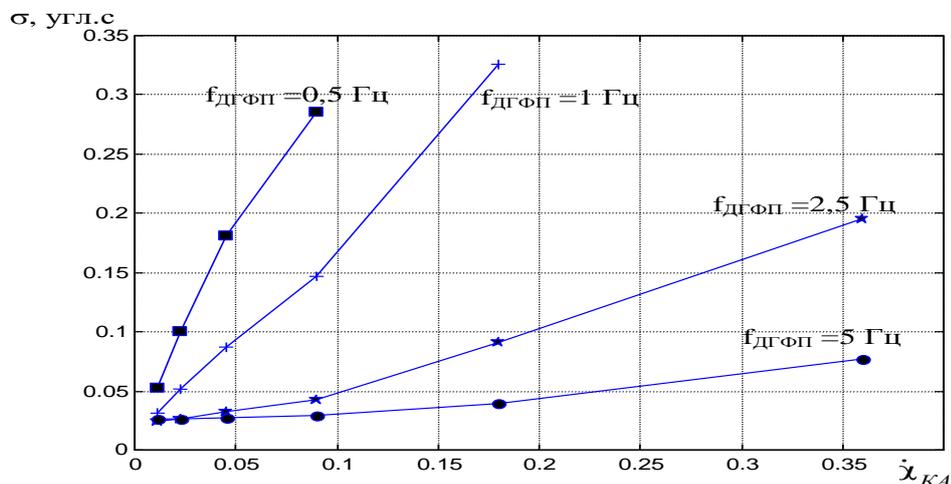


Рисунок 8.9 – Зависимости СКО ошибки  $\sigma$  от  $\dot{\alpha}$  при  $A = 2.5$  угл.сек,

$$\sigma_{ДГ} = 0.033 \text{ угл.сек}, f_{ДП} = 100 \text{ Гц}, \sigma_{ДП} = 0.02 \text{ угл.сек.}$$

Чуть худшие результаты при низких частотах ДГ по сравнению с предыдущим параграфом объясняются отсутствием оптимальной настройки экстраполятора и контура управления на отслеживаемый сигнал (здесь применялся обычный ПИД-регулятор), а также влиянием дополнительных шумов ДП.

Таким образом, использование комплекса двухсистемного слежения потенциально позволяет достичь современные требования по точности наведения телескопа в 0.1 угл. сек. Однако при этом требуется всесторонний анализ структур и соответствующих режимов многосистемного наведения с учетом влияния внешних и внутренних эксплуатационных возмущений.

## 8.4 Выводы по главе 8

1. Прогнозирование точности наведения наземного телескопа с помощью управления его угловым положением в ОПУ показало потенциальную эффективность трехконтурной системы управления электродвигателями. Выполненное мо-

делирование подтвердило необходимость исследования влияния на точность наведения следующих эксплуатационных факторов: действия ветровых нагрузок, внутренних пульсаций тока, упругости статора электродвигателей, упругости вала силовой передачи от электродвигателей на телескоп, и других. Показано, что неправильно выбранные параметры электродвигателей и упругой передачи могут существенно ухудшить работу системы слежения телескопа. Из неконтролируемых возмущений наиболее опасными были выявлены ветровые моменты.

Исследование точности сопровождения низкоорбитального объекта наблюдения позволило выбрать значения эксплуатационных параметров и внешних условий, при которых достигается ошибка наблюдения не более 0.1 угл.сек в течение малых временных экспозиций. Для худших условий требуется включение системы корректирующего слежения – с помощью вторичного зеркала.

2. Обеспечить эффективность комплекса двухсистемного наведения по гидрирующим звездам с замедленным тактом выдачи оптического сигнала ошибки в ряде случаев позволяет понижение полосы частот замкнутого контура управления наклонами вторичного зеркала. Так, для частот 5 - 10 Гц такта выдачи оптического сигнала ошибки слежения при отсутствии внешних возмущений был синтезирован традиционный контур обратной связи с запаздыванием, обеспечивающим ошибку слежения ниже 0.1 угл. сек. При этом регулятор понизил полосу пропускания контура управления до 0.55 Гц.

3. Для обеспечения эффективной компенсации остаточных угловых колебаний космического аппарата с помощью управления вторичным зеркалом телескопа в расширенной полосе частот при двухканальном наведении с замедленным тактом выдачи оптического сигнала ошибки требуется дополнительное использование датчика измерения относительного углового положения вторичного зеркала. Предложенный алгоритм высокочастотной экстраполяции сигнала ошибки слежения между тактами его выдачи оптическим датчиком с частотой ниже 10 Гц потенциально позволил достичь ошибку двухсистемного наведения ниже 0.1 угл. сек. с сохранением широкой полосы пропускания контура для соответствующих угловых скоростей колебаний КА.

## **ГЛАВА 9. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ОПТИМИЗАЦИИ МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМ КОРРЕКЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОСИСТЕМНОГО НАВЕДЕНИЯ БОЛЬШИХ ТЕЛЕСКОПОВ**

Глава посвящена исследованию направлений и разработке методов оптимизации модульных систем коррекции волнового фронта (ВФ) для повышения интегральной эффективности больших оптических телескопов. На практике их работа улучшает качество оптического изображения, а также усиливает оптические сигналы в контурах обратной связи модульных систем наведения, что позволяет уменьшить влияние шумов и расширить частотные полосы работы.

Основными модульными системами коррекции волнового фронта в комплексах наведения больших оптических телескопов являются система активной оптики – для коррекции формы главного зеркала телескопа (а при необходимости и других зеркал его оптического тракта), система адаптивной оптики – для компенсации атмосферной турбулентности, а также потенциально перспективные системы с оптической обратной связью – для повышения эффективности дополнительных излучающих систем.

Управление в таких системах является распределенным и с высокой размерностью обратных связей. Поэтому при их разработке, производстве и настройке оптимизация должна проводиться через: 1) выбор эффективной структуры многомерной обратной связи, 2) синтез контуров управления ею во времени.

В главе предложен и разработан комплекс взаимно-дополняющих методов оптимизации модульных систем коррекции ВФ, включая: 1) кластеризацию и прореживание приводов управления для оптимизации пространственной структуры распределенной обратной связи при учете их погрешностей; 2) оптимизацию градиентных алгоритмов управления при коррекции ВФ по функционалам интенсивности светового поля; 3) оптимизацию систем адаптивной атмосферной оптики с обратной связью по ВФ; 4) исследование новых возможностей систем управления волновым фронтом при введении контуров оптической обратной связи.

## 9.1. Кластеризация и прореживание приводов управления для оптимизации пространственной структуры системы коррекции волнового фронта

Похожей тематике посвящены статьи [136, 204, 287 и др.]. Рассматриваемые алгоритмы опубликованы также в статьях автора [211, 212, 216, 229].

В системах коррекции волнового фронта можно использовать непосредственную коррекцию искажений функциями отклика зеркала и с промежуточным модальным разложением. В модальных системах коррекции низших пространственных aberrаций волнового фронта  $\varphi(\mathbf{r})$  на круглой апертуре используют его предварительное разложение по характерным модам, в качестве которых часто принимают полиномы Цернике  $Z_i(\mathbf{r})$  низших порядков [315]:

$$\begin{aligned} \varphi(\mathbf{r}) &= \sum a_i Z_i(\mathbf{r}); \quad Z_1(\mathbf{r}) = 1, \quad Z_{2,3}(\mathbf{r}) = 2\rho \exp(j\theta), \quad Z_4(\mathbf{r}) = \sqrt{3} [2\rho^2 - 1], \\ Z_{5,6}(\mathbf{r}) &= \sqrt{6} \rho^2 \exp(j2\theta); \quad Z_{7,8}(\mathbf{r}) = \sqrt{8} [3\rho^3 - 2\rho] \exp(j\theta); \\ Z_{9,10}(\mathbf{r}) &= \sqrt{8} \rho^3 \exp(j3\theta); \quad Z_{11}(\mathbf{r}) = \sqrt{5} [6\rho^4 - 6\rho^2 + 1]. \end{aligned} \quad (9.1)$$

Здесь:  $a_i$  – коэффициенты;  $\rho \equiv r/R$ ;  $\mathbf{r} = (r, \theta)$  – полярные координаты;  $R$  – радиус апертуры; первые три из них описывают перемещение и наклоны волнового фронта и могут быть компенсированы без деформации поверхности зеркала, четвертый полином описывает дефокусировку, пятый и шестой – астигматизм, седьмой и восьмой – кому, девятый и десятый – трехлепестковую aberrацию, одиннадцатый – сферическую aberrацию.

В случае круглой сплошной апертуры они ортонормированы:

$(Z_i, Z_j)/S = \delta_{ij}$ ,  $a_i = (\varphi, Z_i)/(Z_i, Z_i)$ ; где круглые скобки обозначают скалярное произведение по апертуре площадью  $S = \pi R^2$ ;  $\delta_{ij} = 1$  при  $i = j$  и  $\delta_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ .

Для сохранения ортонормированности на кольцевых апертурах (с внешним радиусом  $R$  и внутренним  $\varepsilon R$ ;  $\rho = r/R \in [\varepsilon, 1]$ ) их следует преобразовать:

$$\varphi(\mathbf{r}) = \sum_i a_i \psi_i(\bar{\rho}), \quad (\psi_i \psi_j)/S = \delta_{ij}, \quad S = \pi(1 - \varepsilon^2),$$

$$\psi_{2,3} = \frac{2\rho}{\sqrt{1+\varepsilon^2}} e^{j\theta}, \quad \psi_4 = \frac{\sqrt{3}}{1-\varepsilon^2} (2\rho^2 - 1 - \varepsilon^2), \quad \psi_{5,6} = \frac{\sqrt{6}\rho^2}{\sqrt{1+\varepsilon^2+\varepsilon^4}} e^{j2\theta}, \quad (9.2)$$

$$\psi_{7,8} = \sqrt{\frac{8(1-\varepsilon^2)(1-\varepsilon^4)}{1-9\varepsilon^4+16\varepsilon^6-9\varepsilon^8+\varepsilon^{12}}} \left( 3\rho^3 - 2\frac{1-\varepsilon^6}{1-\varepsilon^4}\rho \right) e^{j\theta}, \quad \psi_{9,10} = \frac{\sqrt{8}\rho^3}{\sqrt{(1+\varepsilon^2)(1+\varepsilon^4)}} e^{j3\theta},$$

Модальное управление формой деформируемого зеркала предполагает воспроизводство каждого такого полинома в (9.1), (9.2) по отдельности. Поэтому здесь остаточная ошибка коррекции  $\Delta$  волнового фронта будет следующей:

$$\Delta = \frac{1}{S} \int_{\Omega} \left( \sum_{i=4}^m a_i (Z_i - \sum_{j=1}^n P_j^i R_j) + \sum_{i=m+1}^{\infty} a_i Z_i \right)^2 d^2r,$$

где  $R_i(\mathbf{r})$  — функции отклика зеркала на действие  $i$ -го привода с усилием  $P_j^i$ ;  $m$  — количество компенсируемых аберраций (в виде полиномов Цернике).

Расчет квазистатических усилий приводов  $P_j^i$  выполняется из минимизации ошибок аппроксимации соответствующих полиномов:

$$\Delta_i = \frac{1}{S} \int_{\Omega} \left( Z_i - \sum_{j=1}^n P_j^i R_j \right)^2 d^2r, \quad \sum_{j=1}^n P_j^i (R_j, R_k) = (Z_i, R_k). \quad (9.3)$$

Модальная система коррекции волнового фронта наиболее часто применяется в адаптивной оптике, а также при исправлении явно выраженных аберраций низшего порядка в активной оптике.

В свою очередь, непосредственная коррекция волнового фронта функциями отклика зеркала применяется при исправлении искажений более сложной и нерегулярной формы. Они могут иметь место при квазистатической разгрузке деформируемых главных зеркал больших телескопов (от действия веса в наземных условиях или от действия температурных градиентов в космических условиях), когда сложные пространственные искажения  $\varphi(\mathbf{r})$  формы отражательной поверхности плохо описываются классическими аберрациями низших порядков. В таких случаях стремятся выбирать близкую к равномерной сетку расположения приводов коррекции, расчет усилий которых выполняется сразу из решения задачи:

$$\Delta = \frac{1}{S} \int_{\Omega} \left( \varphi(\mathbf{r}) - \sum_{j=1}^n P_j R_j(\mathbf{r}) \right)^2 d^2r \Rightarrow \min, \quad \sum_{j=1}^n P_j (R_j, R_k) = (\varphi, R_k). \quad (9.4)$$

С увеличением числа таких приводов (до нескольких сотен и более) обусловленность матрицы  $\{ (R_j, R_k) \}$  в системе уравнений (9.4) будет ухудшаться, а

чувствительность ошибки  $\Delta$  к погрешностям  $\delta\varphi(\mathbf{r})$  в измерении искажений  $\varphi(\mathbf{r})$  и к погрешностям усилий  $\delta P_j$  будет возрастать. Это будет затруднять практическую настройку системы коррекции волнового фронта в производственных условиях.

Улучшить обусловленность такой задачи для конкретной функции  $\varphi(\mathbf{r})$  позволяет «прореживание» неэффективных приводов и (или) объединение в кластеры эффективно работающих групп приводов.

На этой основе могут быть построены методики юстировки систем коррекции волнового фронта на этапах производственного цикла с последовательным повышением их точности. Так, сначала для исходных больших аббераций можно применять их компенсацию с помощью модального управления, использующего полиномы Цернике низших порядков. Остаточные деформации поверхности деформируемых зеркал могут иметь сложную нерегулярную форму с отдельными областями локализации. Ее уже неэффективно аппроксимировать полиномами Цернике высоких порядков. Такие искажения удобнее пошагово понижать с помощью реализации алгоритма (9.4) для выбранных «эффективных» приводов управления. При этом следует по возможности отключать управление неэффективными приводами, рассчитанные усилия для которых оказываются сравнимы с шумами измерений и их воспроизводства.

Задача отключения неэффективных приводов для измеренной формы  $\varphi(\mathbf{r})$  искажений волнового фронта по сути эквивалентна задаче оптимизации расположения сосредоточенных приводов усилия на области зеркала. В свою очередь, задача кластеризации приводов будет эквивалентна задаче оптимизации формы кластеров распределенных приводов с установлением пропорций между усилиями приводов в кластере. На практике обе задачи могут решаться одновременно, давая результат в виде оптимизации расположения распределенных приводов оптимальной формы. При этом число настраиваемых агрегированных сигналов управления будет уменьшено, а обусловленность алгоритма (9.4) – повышена.

Поставленные задачи можно решать методом простого перебора или же более быстрыми методами целенаправленного перебора. В рамках последних методов предлагается следующий алгоритм с предельно уменьшенным объемом вы-

числений, что может быть важно для бортового компьютера, управляющего активной коррекцией большого зеркала в реальном времени.

*Алгоритм кластеризации приводов.* Выполним решение задач оптимизации «в обратном порядке». Для этого в расчетной модели (9.4) сначала используем все  $n$  приводов. Ее решение даст минимальную ошибку:

$$\Delta^* = \frac{1}{S} \|\varphi\|^2 - \sum_{i=1}^n b_i P_i ; \quad \sum_{i=1}^n a_{ij} P_i = b_j, \quad i = \overline{1, n}, \quad (9.5)$$

где  $b_i = \frac{1}{S}(\varphi, R_i)$ ,  $a_{ij} = \frac{1}{S}(R_i, R_j)$

Далее целенаправленно будем удалять или объединять из них, без которых остаточная ошибка аппроксимации фазы  $\varphi(r)$  ухудшится в наименьшей степени. Можно надеяться, что в результате удастся получить хорошее приближение к оптимальному расположению эффективного числа приводов.

Рассмотрим сначала преобразование ошибки аппроксимации  $\Delta$  и управляющих воздействий  $P_i$  после объединения  $l$  соседних приводов в один. Так как приводы можно занумеровать в произвольном порядке, будем считать, что объединяются первые  $l$  из них, что эквивалентно условиям  $P_k' = P_l'$ ,  $k = \overline{1, l-1}$ . Здесь и в дальнейшем знаком "штрих" будем обозначать все преобразованные величины, получаемые после объединения  $l$  приводов. В соответствии с правилом множителей Лагранжа  $\lambda_k$  будет иметь:

$$\Delta' = \frac{1}{S} \|\varphi\|^2 - 2 \sum_{i=1}^n b_i P_i' + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} P_i' P_j' + 2 \sum_{k=1}^{l-1} \lambda_k (P_l' - P_k') . \quad (9.6)$$

Находя наименьшее значение ошибки  $\Delta'$  в зависимости от величин усилий  $P_i'$  ( $\partial \Delta' / \partial P_i' = 0$ ), получим:

$$P_i' = \sum_{j=1}^l c_{ij} b_j' + \sum_{j=l+1}^n c_{ij} b_j ; \quad (9.7)$$

где  $b_j' = b_j + \lambda_j$ ,  $j = \overline{1, l-1}$ ;  $b_l' = b_l + \sum_{k=1}^{l-1} \lambda_k$ ;

$c_{ij}$  - элементы матрицы, обратной к матрице элементами  $a_{ij}$ .

Исключим отсюда множители Лагранжа  $\lambda_k$  ( $k = \overline{1, l-1}$ ). Для этого с учетом выражений (9.7) перепишем равенства  $P_k' = P_l'$ ,  $k = \overline{1, l-1}$  в виде:

$$\sum_{j=1}^{e-1} (c_{ij} - c_{lj}) b_j' + (c_{il} - c_{ll}) b_l' + \sum_{j=l+1}^n (c_{ij} - c_{lj}) b_j = 0, \quad i = \overline{1, l-1}.$$

Так как  $b_l' = \sum_{j=1}^l b_j' - \sum_{k=1}^{e-1} b_k'$ , поэтому отсюда:

$$b_i' = \sum_{j=1}^{l-1} h_{ij} [(c_{il} - c_{jl}) \sum_{k=1}^l b_k + \sum_{k=l+1}^n (c_{lk} - c_{jk}) b_k], \quad i = \overline{1, l-1}$$

где  $h_{ij}$  - элементы матрицы, обратной к матрице с элементами:

$$\{ C_{ij} - C_{il} - C_{lj} + C_{ll} \}, \quad i, j = \overline{1, l-1}.$$

Подставляя  $b_i'$  в (9.7), будем иметь:

$$\begin{aligned} P_i' &= \sum_{j=1}^{l-1} (c_{ij} - c_{il}) b_j' + c_{il} \sum_{j=1}^l b_j + \sum_{j=l+1}^n c_{ij} b_j = \\ &= c_{il}' \sum_{k=1}^l b_k + \sum_{j=l+1}^n c_{ij}' b_j, \quad i = \overline{l, n} \end{aligned}$$

$$C'_{ij} = C_{ij} - \sum_{k=1}^{l-1} \sum_{s=1}^{l-1} h_{ks} (C_{ik} - C_{il}) (C_{sj} - C_{lj}), \quad i, j = \overline{l, n}. \quad (9.8)$$

С учетом этих соотношений и равенств  $P_i = \sum_{j=1}^n c_{ij} b_j$  можно записать следующий закон преобразования управляющих воздействий  $P_i$  и ошибки аппроксимации  $\Delta^*$  после объединения  $l$  приводов:

$$P_i' = P_i - \sum_{k=1}^{l-1} \sum_{j=1}^{l-1} h_{kj} (C_{ik} - C_{il}) (P_j - P_l), \quad i = \overline{l, n} \quad (9.9)$$

$$\Delta^{*'} = \Delta^* + \sum_{k=1}^{l-1} \sum_{j=1}^{l-1} h_{kj} (P_k - P_l) (P_j - P_l).$$

В частном случае, при объединении двух приводов в один ( $l=2$ ) выражения (9.8), (9.9) примут следующий простой вид:

$$\begin{aligned} C'_{ij} &= C_{ij} - (C_{il} - C_{i2})(C_{1j} - C_{2j}) / \tilde{C}, \quad \tilde{C} = C_{11} - 2C_{12} + C_{22}, \\ \Delta^{*'} &= \Delta^* + (P_1 - P_2) / \tilde{C}, \quad P_i' = P_i - (C_{il} - C_{i2}) (P_1 - P_2) / \tilde{C}. \end{aligned} \quad (9.10)$$

Приведенные преобразования величин  $C_{ij}$ ,  $P_j$ ,  $\Delta^*$  исключают их непосредственное трудоёмкое вычисление по формулам типа (9.4) для пробных изменений формы приводов (при замене нескольких приводов одним). Если в такую "итерационную" схему ввести условие объединения на каждом шаге только тех приводов, для которых разность  $\Delta^{*'} - \Delta'$  принимает наименьшее значение, получим алгоритм приближенной дискретной оптимизации. В нем одновременно будет оптимизироваться форма приводов, их количество и расположение.

*Алгоритм прореживания приводов.* В задаче наилучшего удаления  $l$  приводов преобразование ошибки аппроксимации  $\Delta$  и управляющих воздействий  $P_i$  выполняется аналогичной процедурой. В этом случае вместо (9.8), (9.9) получим:

$$\begin{aligned} C'_{ij} &= C_{ij} - \sum_{k=1}^l \sum_{s=1}^l \tilde{h}_{ks} C_{ik} C_{sj}, \quad i, j = \overline{l+1, n}, \\ \Delta'^* &= \Delta^* + \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^l \tilde{h}_{kj} P_k P_j, \quad P'_i = P_i - \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^l \tilde{h}_{kj} C_{ik} P_j, \end{aligned} \quad (9.11)$$

где  $\tilde{h}_{ks}$  - элементы матрицы, обратной к матрице с элементами  $C_{ks}$ .

Если удаление приводов осуществляется по одному ( $l = 1$ ), уравнения (9.11) принимают наиболее простую запись:

$$\Delta'^* = \Delta^* + P_l^2 / C_{ll}, \quad P'_i = P_i - P_l C_{il} / C_{ll}, \quad C'_{ij} = C_{ij} - C_{il} C_{lj} / C_{ll}. \quad (9.12)$$

*Расчетные примеры.* В качестве демонстрации работоспособности процедуры оптимизации с объединением приводов были выполнены расчеты для случая мембранного адаптивного зеркала с использованием алгоритма (9.10) [216].

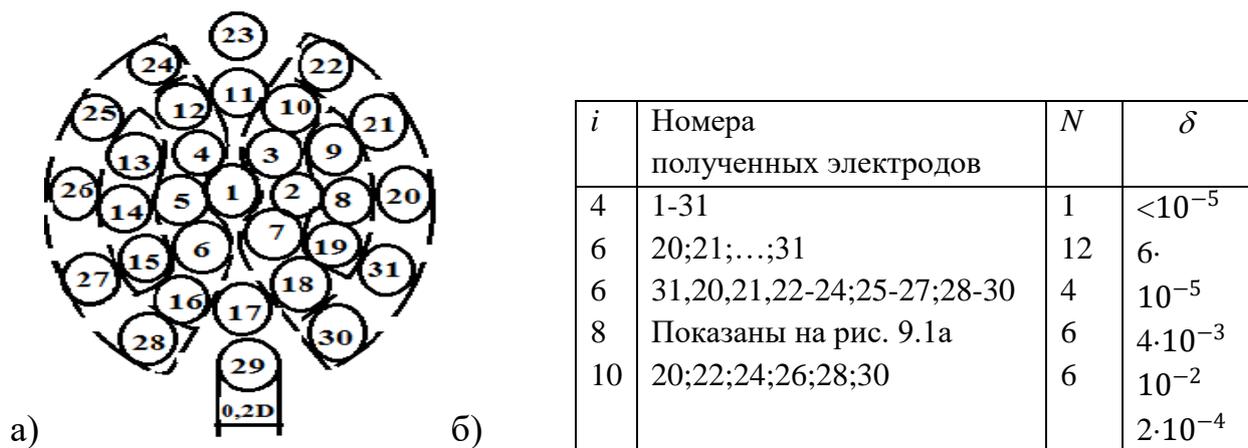


Рисунок 9.1 – Схема расположения электродов (а) и относительное увеличение  $\delta$  ошибок  $\Delta$  после объединения отмеченных электродов (б):  $i$  – номер аппроксимируемого полинома  $Z_i$ ;  $N$  – количество полученных электродов

Управление зеркалом осуществлялось из условия отдельной коррекции полиномов Цернике низших порядков  $Z_i$  ( $i = 4 \div 10$ ). Для исключения из рассмотрения средней фазы и средних наклонов волнового фронта к функциям отклика зеркала добавлялись  $Z_j(r)$ ,  $j=1,2,3$  из (9.1). Поскольку заземление мембранного зеркала в оправе не позволяет получить  $Z_i$  на всей поверхности зеркала, диаметр об-

ласти коррекции  $D$  для определенности выбирался в 1,5 раза меньшим диаметра зеркала. В качестве исходной сетки электродов принимались 31 круглый электрод с расположением, показанным на рис. 9.1а. Функции отклика  $R_i$  мембранного зеркала задавались в виде (4.12). Результаты оптимизации приведены на рис. 9.1б.

В качестве демонстрации работоспособности процедуры прореживания неэффективных приводов были проведены аналогичные численные расчеты для условного пластинчатого адаптивного зеркала в виде круглой заземленной по краю пластины с радиусом, в 1.5 раза превышающим радиус  $R_a$  области коррекции [211]. Вся заполненная сетка расположения приводов показана на рисунке 9.2а, где радиусы окружностей составляют  $0.4R_a$ ,  $0.8R_a$ ,  $1.2R_a$ . Функции отклика  $R_i(\mathbf{r})$  такого зеркала имеют аналитическое представление (4.14). В качестве корректируемых функций  $\varphi(\mathbf{r})$  выбирались полиномы Цернике низших порядков  $Z_i(\mathbf{r})$ , задаваемые на активной области  $\Omega$  с радиусом  $R_a$ . Применялся алгоритм (9.11) с одновременным удалением по одному ( $l=1$ ) и по два ( $l=2$ ) наименее значимых привода. Оба варианта приводили к схожим результатам. Ошибки аппроксимации слабо менялись до тех пор, пока не оставалось менее 15 приводов. После этого они резко увеличивались, как это видно из рисунка 9.2б.

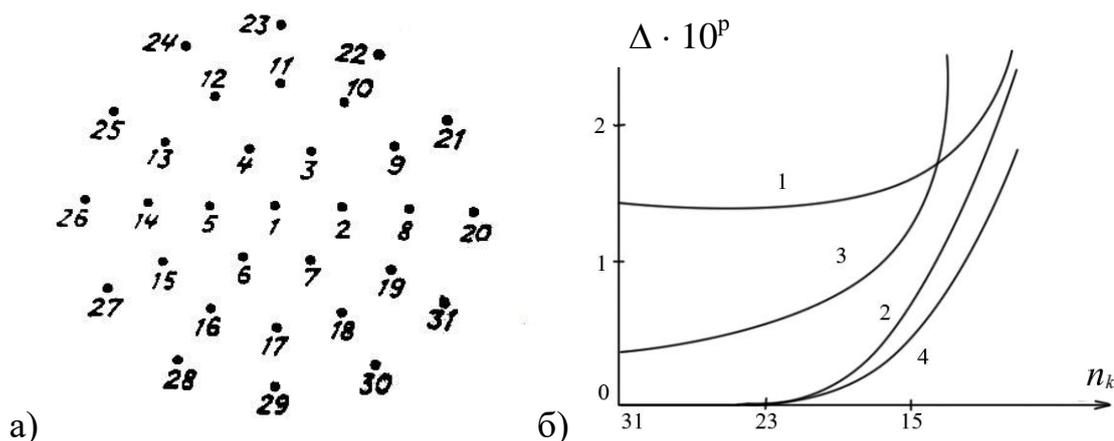


Рисунок 9.2 Схема расположения приводов (а) и ухудшение ошибок аппроксимации полиномов Цернике в зависимости от числа оставшихся после удаления приводов (б): 1 –  $Z_4$ ,  $p = 3$ ; 2 –  $Z_5$ ,  $p = 2$ ; 3 –  $Z_7$ ,  $p = 4$ ; 4 –  $Z_9$ ,  $p = 2$

В итоге, при коррекции  $Z_4(\mathbf{r})$  остались 6 приводов с номерами 8, 10, 12, 14, 16, 18, создающими погрешность аппроксимации  $\Delta_4 = 0.0026$ . При коррекции  $Z_6(\mathbf{r})$  остались 16 приводов с номерами 8, 11, 14, 17, 20 – 31, создающими погрешность аппроксимации  $\Delta_6 = 0.0012$ . При коррекции  $Z_8(\mathbf{r})$  остались 8 приводов с номерами 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, создающими  $\Delta_8 = 0.015$ . Или же можно взять список из 10 приводов с номерами 8 - 10, 12 - 16, 18, 19, обеспечивающими  $\Delta_8 = 0.0003$ . При коррекции  $Z_{10}(\mathbf{r})$  остались 6 приводов с номерами 20, 22, 24, 26, 28, 30, создающими  $\Delta_{10} = 0.014$ . Или же можно взять список из 12 приводов с номерами 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, для которых  $\Delta_{10} = 0.0035$ . При коррекции сферической aberrации  $Z_{11}(\mathbf{r})$  остались 15 приводов с номерами 2, 4, 6, 8 – 19, создающими погрешность аппроксимации  $\Delta_{11} = 0.084$ . Для сравнения, весь список из 31 привода обеспечивал погрешность аппроксимации  $\Delta_{11} = 0.057$ .

*Обобщение алгоритмов оптимизации структуры распределенной обратной связи.* Варианты использования других критериев оптимизации, а также более подробное описание рассмотренных алгоритмов приведены в [229]. Заметим, что в случае больших зеркал с сотнями и тысячами приводов для лучшей обусловленности задач оптимизации можно использовать дополнительно разные случайные начальные выборки исходного расположения приводов из разрешенного массива.

В обобщенной постановке задачи приведенные алгоритмы могут быть применены и к оптимизации всей структуры распределенной обратной связи, включая не только расположение приводов коррекции, но и расположение измерительных датчиков. Здесь будем считать, что функция  $\varphi(\bar{r})$  измеряется с помощью набора датчиков, выходные сигналы которых определяются выражениями:

$$\xi_j = \frac{1}{S_j} \int_{\Omega_j} \varphi(\bar{s}) f_j(\bar{s}) d^2 \bar{s} \quad , \quad j = \overline{1, m}, \quad (9.13)$$

где  $\Omega_j$  - субапертура  $j$ -го датчика с площадью  $S_j$ ,  $f_j(\bar{s})$  - весовая функция, зависящая от характера измерений (например, функция  $f_j(\bar{\rho}) = S_j \delta(\bar{\rho} - \bar{\rho}_j)$  соответствует измерению локальных значений  $\varphi(\bar{\rho}_j)$ , а  $f_j(\bar{\rho}) = x$  или  $f_j(\bar{\rho}) = y$  - измерению средних локальных наклонов в пределах субапертур  $\Omega_j$ ).

Найдем оптимальную связь управлений  $P_i (i=\overline{1, n})$  с результатами измерений  $\xi_j (j=\overline{1, m}, m \geq n)$ . Для этого выберем управляющие воздействия  $P_i$  линейно зависящими от сигналов  $\xi_j$  соответствующих датчиков:

$$P_i = \sum_{j=1}^m B_{ij} \xi_j \quad . \quad (9.14)$$

Входящие сюда коэффициенты  $B_{ij}$  будем определять из задачи (9.4) минимизации ошибки  $\Delta$ , решение которой приводит к системе линейных уравнений:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B_{ij} \left( \xi_j R_i, \xi_l R_k \right) = (\varphi, \xi_l R_k), \quad l=\overline{1, m}, \quad k=\overline{1, n}. \quad (9.15)$$

При этом достигается наименьшая ошибка коррекции:

$$\Delta^* = \frac{1}{S} \|\varphi\|^2 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B_{ij} (\varphi, \xi_j R_i) \quad . \quad (9.16)$$

Получили задачу, похожую на (9.5). Поэтому для нее можно использовать те же алгоритмы. Здесь сначала должно выбираться заведомо избыточное количество датчиков и приводов, расположение которых задается из физических соображений. Естественный путь проведения оптимизации пространственной структуры такой избыточной системы состоит в удалении или объединении тех датчиков или приводов, которые в наименьшей мере влияют на ошибку  $\Delta$ .

В этом случае задачу оптимизации структуры обратной связи можно переформулировать как задачу определения наименьшего количества независимых величин  $B_{ij}$  (или их линейных комбинаций), доставляющих допустимое значение ошибке  $\Delta$ . Тогда операции удаления  $j$ -го датчика,  $i$ -го привода ( $\xi_i = 0, P_i = 0$ ) или объединения  $j$ -го и  $l$ -го датчиков ( $\xi_i = \xi_l$ ),  $i$ -го и  $k$ -го приводов ( $P_i = P_k$ ) будут эквивалентны соответственно условиям:  $B_{ij} = 0 (i=\overline{1, n}), B_{ij}=0 (j=\overline{1, m}); B_{ij} = B_{il} (i=\overline{1, n}); B_{ij} = B_{kj} (j=\overline{1, m})$ .

Для случая атмосферных искажений оценить величину влияние разных вариантов расположения датчиков на точность восстановления волнового фронта помогут результаты расчетов, проведенных в работе [212]. Таким образом, предложенные алгоритмы структурной оптимизации распределенной обратной связи в каналах управления волновым фронтом подтвердили свою эффективность и поэтому могут быть использованы в настраиваемых системах коррекции волнового

фронта в условиях изменяющихся погрешностей и шумов. На их основе могут быть построены методики юстировки систем коррекции формы ГЗ большого телескопа на этапах производственного цикла с последовательным повышением точности. Также их можно использовать в процедурах адаптивной настройки пространственной структуры обратной связи при эксплуатации телескопов.

## **9.2. Оптимизация градиентных методов коррекции волнового фронта по функционалам интенсивности светового поля**

В квазистатических системах коррекции волнового фронта наиболее часто применяют системы повышения резкости изображений. При этом обычно требуется оценить потенциально достижимые точности коррекции и выбрать параметры алгоритма градиентного управления процессом оптимизации оптического критерия. Последняя задача особенно важна при производственной настройке эффективной работы таких систем управления.

### **9.2.1. Построение градиентного управления при слабом световом сигнале**

Если коррекция aberrаций ГЗ осуществляется по слабым световым источникам в процессе многосистемного наведения на них, то для усиления оптического сигнала можно попробовать выполнить кластеризацию нескольких пикселей ПЗС-матрицы оптического приемника (путем суммирования их сигналов). В этом пункте исследуем возможности такой коррекции aberrаций по функционалам оптической интенсивности для случаев превышения размера получающихся пикселей над диаметром пятна идеальной фокусировки [242].

Распределение интенсивности светового поля в плоскости регистрации при коротких экспозициях в нормированных координатах с точностью до постоянного множителя определяется выражением:

$$I \sim |A|^2, \quad A(x, y) = \int_0^{2\pi} \int_{\varepsilon}^1 \exp j[\varphi(\rho, \theta) - 2\pi\rho(x\cos\theta + y\sin\theta)] \rho d\rho d\theta,$$

где:  $\varphi = \psi - b\rho^2$ ,  $\rho = R/R_0$ ,  $b \equiv \left(\frac{\rho\pi R^2}{\lambda f}\right)\left(1 - \frac{f}{L}\right)$ ;  $d_L \equiv \lambda L/R_0$ ;

$x = X/d_L$ ,  $y = Y/d_L$ ;  $\psi(\rho, \theta)$  - остаточные аберрации (их будем описывать с помощью ортонормированных полиномов низших порядков (9.2));  $X, Y$ - декартовы координаты в плоскости приемной ПЗС-матрицы;  $d_L$  - характеризует грубую оценку размера пятна фокусировки;  $R, \theta$  - полярные координаты кольцевой апертуры с радиусами  $\varepsilon R_0$  и  $R_0$ ;  $\varepsilon < 1$ ;  $f$  - фокусное расстояние,  $L$  - расстояние от апертуры до плоскости регистрации,  $\lambda$  - длина волны.

При длинных экспозициях, в предположении нормального распределения остаточной ошибки слежения, распределение интенсивности станет:

$$I'(\bar{r}') \sim \int I(\bar{r}) \exp\left[-(\bar{r}' - \bar{r})^2 / 2\sigma^2\right] d^2\bar{r}, \quad (9.17)$$

где  $\sigma \equiv \sigma_0/dL$ ,  $\sigma_0^2$  - дисперсия ошибки слежения.

Данные интенсивности регистрируется на ПЗС-матрице с квадратными ячейками размером  $d_0$  через измерение сигналов:  $I_{kl} = (1 + \xi) \int I(\bar{r}) d^2\bar{r}$ .

Здесь интегрирование выполняется по областям ячеек:  $|x - k d_0/d_L| \leq d_0/2d_L$ ,  $|y - l d_0/d_L| \leq d_0/2d_L$ ;  $k, l$  - целые числа, определяющие место положения ячейки на ПЗС-матрице,  $\xi$ - распределенный по нормальному закону шум измерений с относительной дисперсией  $\sigma_\xi^2$ .

Коррекцию аберраций будем выполнять градиентным методом. В качестве первого функционала регистрируемой интенсивности выберем интенсивность на центральном пикселе для наблюдаемого источника (или на пикселе максимального сигнала - для гидирующей звезды);

$$I'_1 = I'_{00} \rightarrow \max_{\{a\}}. \quad \psi(\mathbf{r}) = \sum a_i Z_i(\mathbf{r}); \quad (9.18)$$

Выбор функционала в таком виде характерен для длинных экспозиций. При коротких экспозициях наблюдается дрожание изображения с амплитудой ошибки слежения. В этом случае функционал формируется через усреднение многократно измеренных максимальных интенсивностей вокруг центрального пикселя:

$$I_1 = \langle \max_{n^2+m^2 \leq (3\sigma_0/d_0)^2} I_{nm} \rangle \rightarrow \max_{\{a\}}. \quad (9.19)$$

При размерах пятна идеальной фокусировки меньше размера регистрируемого пикселя отмеченные функционалы показали слабую чувствительность к вариациям коэффициентов  $\alpha_i$ . Поэтому в таких случаях коррекцию оптических aberrаций целесообразно осуществлять в два этапа. На первом этапе по слабо расфокусированному изображению корректируются все aberrации, кроме фокусировки, на втором – производится фокусировка изображения через максимизацию сигнала с пикселя приемной ПЗС- матрицы.

Коррекцию оптических aberrаций расфокусированного изображения будем производить с помощью функционала рассогласования измеренного поля интенсивности от теоретически рассчитанного:

$$\begin{aligned} I'_2 &= 1 - \min_c \sum_{k,l} (I_{kl}^0 - c I'_{kl})^2 / \sum_{k,l} (I_{kl}^0)^2 = \\ &= (\sum_{k,l} I_{kl}^0 I'_{kl})^2 / \sum_{k,l} (I_{kl}^0)^2 \sum_{k,l} (I'_{kl})^2 \rightarrow \max_{\{a\}}, \end{aligned} \quad (9.20)$$

где  $I^0(r)$  – идеальное расфокусированное распределение интенсивности.

В случае коротких экспозиций данный функционал по аналогии с (9.19) следует заменить на следующий:

$$I_2 = \langle \max_{n,m} (\sum_{k,l} I_{kl}^0 I_{k-n,l-m})^2 / \sum_{k,l} (I_{kl}^0)^2 \sum_{k,l} I_{kl}^2 \rangle \rightarrow \max_{\{a\}}. \quad (9.21)$$

Численный анализ задачи проводился при следующих значениях безразмерных параметров:  $\varepsilon^2=0,15$ ,  $\sigma=1$  и ограничениях на приращения:  $\Delta a_i \geq 0,06 (0,01\lambda)$ ,  $\Delta I \geq 0,01\%$ . Начальные значения коэффициентов  $a_i$  выбирались распределенными по нормальному закону с дисперсией  $\delta_0^2/9$  ( $\delta_0$ -допустимая среднеквадратичная ошибка отклонения формы зеркала от идеальной). В качестве основного результата выбиралась усредненная по ансамблю реализаций среднеквадратичная ошибка аппроксимации:

$$\delta^2 = \langle (\psi, \psi) \rangle / S = \sum_{i=2}^{10} \langle a_i^2 \rangle. \quad (9.22)$$

Для коротких экспозиций при оптимизации функционала (9.19) получались зависимости  $\delta$  от шума измерений  $\sigma_\xi$ , показанные на рисунке 9.3а. На нем кривые 1,2,3 соответствуют значениям  $d_0/d_L=1,7; 3,4; 10$ . Низкая чувствительность

функционала не позволила достичь высокого качества коррекции. Для длинных экспозиций результаты получались ещё хуже.

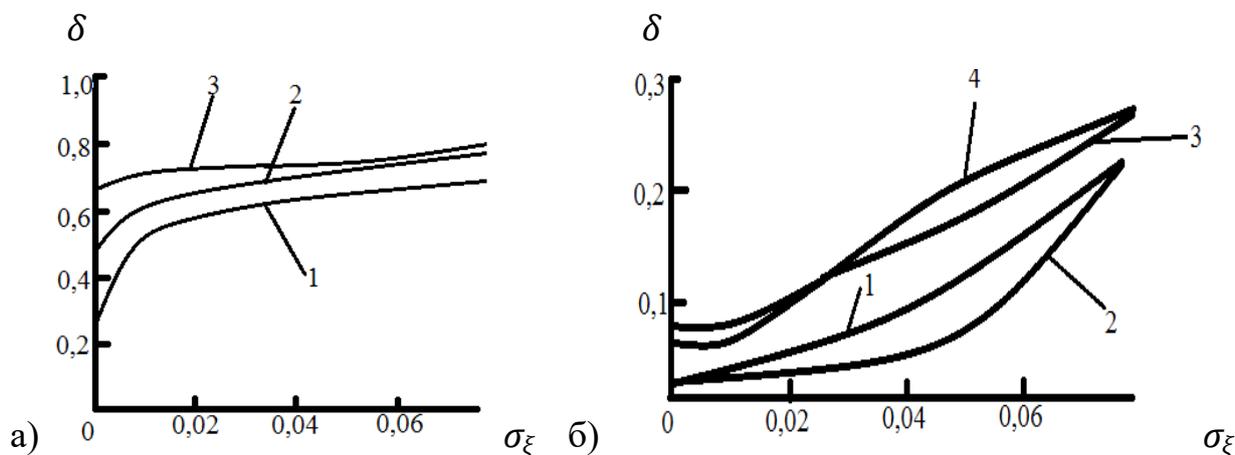


Рисунок 9.3 – Зависимость ошибки коррекции от шума измерений при максимизации: а) функционала (9.19) для коротких экспозиций; б) функционалов (9.20) для длинных (кривые 3, 4) и (9.21) для коротких (кривые 1, 2) экспозиций

Существенно улучшить точность коррекции позволил переход к слаборасфокусированному изображению. На рисунке 9.3б показаны результаты расчета, получаемые для коротких (кривые 1, 2) и длинных (кривые 3, 4) экспозиций при  $d_0/d_L=1,7$ . Расфокусировка проводилась в область диаметром в  $N$  раз большим размера пикселя  $d_0$ , суммирование в функционалах (9.20),(9.21) производилось по квадратной области со стороной  $N_\Sigma d_0$ . Кривые на рисунке соответствуют значениям параметров: 1 –  $N = 5, N_\Sigma = 7$ ; 2 –  $N = 7, N_\Sigma = 11$ ; 3 –  $N = 3 + 2\sigma, N_\Sigma = 7$ ; 4 –  $N = 5 + 2\sigma, N_\Sigma = 11$ . При выборе  $N = 3$  качество коррекции существенно ухудшалось (поэтому здесь не рассматривается).

Полученные результаты показали возможность проведения эффективной коррекции aberrаций ГЗ по слабому оптическому сигналу для случая превышения размера пикселей над диаметром пятна идеальной фокусировки примерно до двух раз и даже чуть более. Однако для этого следует сначала проводить коррекцию оптических aberrаций для слабо расфокусированного изображения, а потом уже его дополнительно фокусировать.

## 9.2.2. Ускорение градиентных алгоритмов пространственно распределенного управления формой гибких зеркал

Ускорение алгоритма градиентного управления процессом оптимизации функционала оптической интенсивности предполагает решение следующих двух задач [228]. Сначала в статическом режиме выбираются и обрабатываются ортонормированные функции отклика  $f_i(\vec{r})$  (например, полиномы Цернике (9.1) или (9.2)). Далее в квазистатическом режиме градиентным методом максимизируется функционал  $I$  от интенсивности светового поля  $I(\vec{r})$ , которая зависит от остаточной фазовой ошибки  $\psi(\vec{r})$ :

$$\psi(\vec{r}) = \sum_{j=1}^n v_j f_j(\vec{r}); \quad v_i^{k+1} = v_i^k + \beta^k \left( \frac{\delta I}{\delta v_i^k} + \eta_i^k \right), \quad i = \overline{1, n}, \quad (9.23)$$

где  $k$  – номер итерации,  $\beta^k$  – градиентный шаг,  $\eta_i^k$  – погрешность в измерении составляющей градиента в  $i$ -м канале.

Для ортонормированных функций отклика все направления градиентного спуска будут почти равноправными, а при малых ошибках еще и независимыми. При этом их формирование выполняется в соответствии с алгоритмом типа (9.3).

Можно показать, что алгоритм (9.23) при отсутствии шумов измерений приведет к следующему изменению квадратичной ошибки:

$$\sqrt{\frac{\Delta^{k+1}}{\Delta^k}} = 1 + 2\beta^k \frac{\delta I^k}{\delta \Delta} \quad (9.24)$$

Далее рассмотрим два наиболее широко используемых функционала:

$$I_1 = I(0), \quad I_2 = \int I^2(\vec{r}) d^2\vec{r} \quad (9.25)$$

Первый функционал применяется в задачах фокусировки излучения на точечный пиксель, второй - на область ПЗС-матрицы. Усреднение  $I_1$  по ансамблю реализаций для нормально распределенной остаточной ошибки  $\Psi(\vec{r})$  приведено в [9] и для него вблизи экстремума получено приближенное выражение:  $\langle I_1 \rangle = C_1 e^{-\Delta}$ , где  $C_1 = const$ . Можно также получить похожее выражение для второго функционала  $\langle I_2 \rangle = C_2 e^{-2\Delta}$ , где  $C_2 = const$ . Следует ожидать, что выражения подобного вида  $\langle I \rangle = C e^{-\alpha \Delta}$  ( $C, \alpha$  - постоянные) будут характерными для боль-

шинства функционалов адаптивных оптических систем. Так, например,  $\alpha = 0.5$  соответствует интерференционному критерию [39].

Если провести усреднение (9.24) для таких функционалов, получим, что оптимальный градиентный шаг вблизи экстремума должен быть обратно пропорционален значению функционала. При отстройке же от экстремума его рекомендуется выбирать в более сильном варианте ( $m \geq 1$ ):

$$\beta^k = \frac{1}{2\alpha} (I^k)^{-m} . \quad (9.26)$$

Для проверки эффективности (9.26) было проведено математическое моделирование системы апертурного зондирования, максимизирующей  $I_1$  при постоянной амплитуде световой волны [228]. В качестве функций  $f_j(\vec{r})$  выбирались со второго по десятый полиномы Цернике (9.1). Применялась схема (9.23) с нормально распределенными шумами измерений. Численный эксперимент показал, что для шумов с дисперсией  $\langle \eta_i^2 \rangle \leq 0.05$  параметр  $m$  эффективно выбирать в интервале  $[1, 2]$ , а для шумов с дисперсией  $\langle \eta_i^2 \rangle > 0.05$  – в интервале  $[1, 1.5]$ .

Были также проведены экспериментальные исследования с 16-тиканальной адаптивной системой, работающей по принципу последовательного введения пробных вариаций в фазу световой волны [228]. Первые функции отклика применяемого биморфного адаптивного зеркала были близки к полиномам Цернике низших порядков, поэтому экспериментально проводилась только нормировка функций отклика без их ортогонализации.

В системе фокусировки излучения на точечный объект по функционалу  $I_1$  оптимальные характеристики переходного процесса получались при  $m = 1$ . Иногда скорость сходимости возрастала в 10 раз (по сравнению с  $m = 0$ ).

Эффективность градиентного шага также анализировалась на экспериментальном стенде адаптивной фокусировки излучения на удаленный шероховатый отражатель. Этому случаю соответствует функционал  $I_2$ . Здесь эффективное значение параметра  $m$  составило 1.5. Характерный вид переходного процесса показан на рисунке 9.4. Кривые 1, 2, 3 соответствуют значениям  $m$ : 0, 1, 1.5 (при  $m = 1$  адаптивная система долгое время задерживалась на локальном экстремуме).

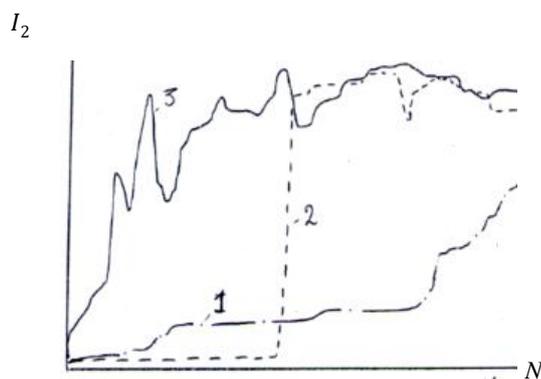


Рисунок 9.4 – Зависимость функционала  $I_2$  от количества итераций  $N$

Таким образом, для ускорения скорости квазистатической коррекции волновых aberrаций через градиентную оптимизацию функционалов резкости изображения следует сначала сформировать ортонормированные по апертуре модальные функции, а потом уже управлять их амплитудой. При этом градиентный шаг следует выбирать близким к обратнопропорциональной зависимости от оптически измеряемого оптимизируемого функционала.

### 9.3. Оптимизация систем адаптивной атмосферной оптики с обратной связью по волновому фронту

Исследованию высокочастотных систем адаптивной атмосферной оптики для наземных телескопов посвящены множество монографий и статей (были перечислены в первой главе), среди которых выделим [315, 339, 342].

В данном параграфе исследуем настройку и оптимизацию систем адаптивной атмосферной оптики, выделяя два последовательных этапа. Сначала рассмотрим эффективность пространственного распределения управления гибкими зеркалами, а после этого – эффективную настройку динамических регуляторов в обратных связях при управлении выбранными модальными формами.

#### 9.3.1. Оптимизация пространственных форм компенсации атмосферной турбулентности

Модальное описание атмосферных искажений волнового фронта. Известно, что наибольший вклад в искажения волнового фронта в турбулентной атмосфере вносят пространственные aberrации низших порядков. При этом теоретически наилучшими пространственными корректирующими функциями являются таблично задаваемые функции Карунена—Лоева  $G_i$ , имеющие некоррелированные коэффициенты разложения [36]:

$$\lambda_i^2 G_i(\vec{r}) = \frac{1}{S} \int_{\Omega} \langle \varphi(\vec{r}) \varphi(\vec{\rho}) \rangle G_i(\vec{\rho}) d^2 \vec{\rho}, \quad (9.27)$$

где  $\Omega$  — область апертуры с внешним диаметром  $D$  и внутренним  $aD$ .

В расчетах корреляционную функцию  $\langle \varphi(\vec{r}) \varphi(\vec{\rho}) \rangle$  представляют через структурную функцию  $D_{\varphi}(\vec{r} - \vec{\rho})$ :

$$2 \langle \varphi(\vec{r}) \varphi(\vec{\rho}) \rangle = - \left[ D_{\varphi}(\vec{r} - \vec{\rho}) + \frac{1}{S^2} \int_{\Omega} \int_{\Omega} D_{\varphi}(\vec{r}' - \vec{\rho}') d^2 \vec{r}' d^2 \vec{\rho}' - \frac{1}{S} \int_{\Omega} D_{\varphi}(\vec{r}' - \vec{r}) d^2 \vec{r}' - \frac{1}{S} \int_{\Omega} D_{\varphi}(\vec{\rho}' - \vec{\rho}) d^2 \vec{\rho}' \right] \quad (9.28)$$

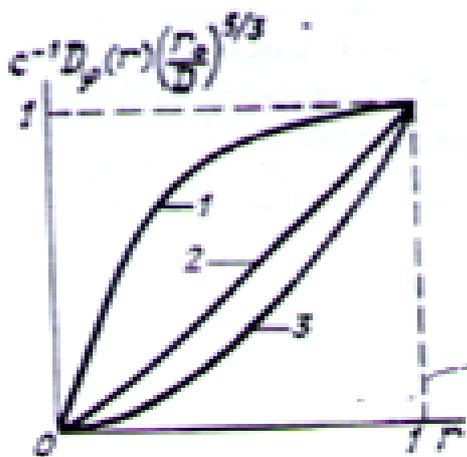


Рисунок 9.5 – Функция  $D_{\varphi}(r)$ :  
1 –  $\alpha = 6.28$ , 2 –  $\alpha = 1$ , 3 –  $\alpha = 0$

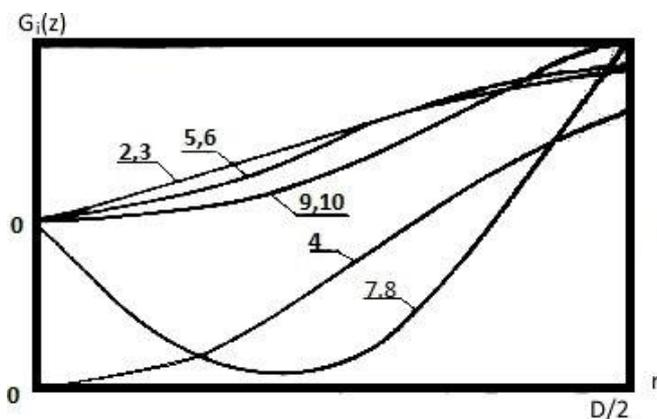


Рисунок 9.6 – Слабо коррелированные полиномы

Для атмосферной турбулентности вид  $D_{\varphi}(r)$  показан на рисунке 9.5 с учетом внешнего масштаба турбулентности  $L_0$ , а ее форма записи:

$$D_{\varphi}(r) = 6,16 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{5/3} \int_0^{\infty} (1 - J_0(x)) (x^2 + \alpha^2 r^2)^{-11/6} x dx \quad (9.29)$$

Здесь  $r_0 = 1,68(c_n^2 z k^2)^{-3/5}$  – радиус корреляции Фрида;  $c_n$  – структурная постоянная показателя преломления;  $z$  – длина трассы;  $k$  – волновое число;  $J_0$  – функция Бесселя нулевого порядка;  $D$  – диаметр апертуры;  $r = \rho/D \in (0,1)$ ;  $\alpha = 2\pi D/L_0$ .

При  $\alpha = 0$ :  $D_{\varphi_0}(r) = 6,88(D/r_0)^{5/3} r^{5/3}$ . Относительная ошибка  $\delta$  этой формы от (9.29) при  $\alpha = 0.01, 0.1, 0.5$  соответственно оценивается:  $\delta = 3.5 \cdot 10^{-4}, 4.4 \cdot 10^{-3}, 0.18$ .

Таблица 9.1.

$q$	$i$	$a$	$c_{1i}$	$c_{2i}$	$c_{3i}$	$c_{4i}$
1	2,3	0	2,255	-0,543	0,276	-0,082
		0,25	2,188	-0,524	0,267	-0,080
		0,5	2,010	-0,448	0,234	-0,074
		0,75	1,771	-0,307	0,171	-0,068
0	4	0	-2,237	7,105	-5,082	1,513
		0,25	-2,688	8,069	-5,874	1,836
		0,5	-4,453	11,642	-8,949	3,288
		0,75	-7,750	16,274	-13,649	6,971
2	5,6	0	5,024	-4,791	1,605	
		0,25	4,867	-4,642	1,556	
		0,5	4,457	-4,273	1,451	
		0,75	4,018	-3,948	1,451	
1	7,8	0	-7,439	16,105	-6,302	-0,183
		0,25	-7,424	16,044	-6,315	-0,180
		0,5	-9,310	19,692	-8,169	-0,202
		0,75	-25,521	52,554	-24,824	-0,449
3	9,10	0	5,342	-3,203		
		0,25	5,173	-3,101		
		0,5	4,660	-2,801		
		0,75	4,057	-2,511		
0	11	0	1,192	-4,913	-5,197	11,995
		0,25	1,843	-7,132	-2,788	11,017
		0,5	6,136	-20,247	8,646	7,935
		0,75	46,925	-129,729	96,088	-11,136

В качестве пространственных форм минимального состава для компенсации атмосферной турбулентности построим слабокоррелированные ортогональные круговые полиномы. Для этого применим полиномиальное разложение [210]:

$$D_{\varphi}'(r) = \left( \frac{D}{r_0} \right)^{5/3} \sum_{i=1}^M a_i r^{2i}, \quad (9.30)$$

где  $M$  – количество членов разложения;  $a_i$  – коэффициенты разложения.

Тогда все интегралы в (9.27) легко вычисляются аналитически, а интегральное уравнение сводится к матричному уравнению. Для нахождения первых десяти таких полиномов достаточно выбрать  $M = 4$ . В этом случае будем иметь:

$$D_{\varphi}(r) = \left( \frac{D}{r_0} \right)^{5/3} \left[ 10.788 \left( \frac{r}{D} \right)^2 - 10.795 \left( \frac{r}{D} \right)^4 + 11.620 \left( \frac{r}{D} \right)^6 - 4.768 \left( \frac{r}{D} \right)^8 \right]$$

$$G_1 = 1, \quad G_j = \sum_{k=0}^3 C_{kj} \left( \frac{r}{D} \right)^{q+2k} \begin{cases} \cos q\Theta \\ \sin q\Theta \end{cases}, \quad j \geq 2, \quad (9.31)$$

где коэффициенты  $C_{ki}$  при  $\alpha = 0$  в зависимости от  $a$  (отношение внутреннего радиуса приемной апертуры к внешнему) приведены в таблице 9.1.

Получающиеся при этом радиальные функции полиномов показаны на рис. 9.6. По сравнению с точными функциями Карунена-Лоева, использование таких десяти полиномов ухудшало ошибку коррекции  $\langle \Delta \rangle$  на величину, меньшую 1%.

В сравнении с полиномами Цернике низших порядков (9.1) функции (9.31) почти на порядок ослабляют коэффициенты взаимной корреляции и уменьшают усредненную ошибку аппроксимации атмосферных искажений примерно на 10%. Результаты становятся еще более показательными при учете внешнего масштаба турбулентности ( $\alpha > 0$ ). Более подробно это показано в работах [217, 223].

Так как коэффициенты разложения в (9.30) зависят от заранее неизвестного внешнего масштаба турбулентности, поэтому на практике их можно градиентно подстраивать по критерию получения наилучшего оптического изображения.

*Точность коррекции волновых aberrаций.* Так как полиномы Цернике низших порядков являются классическими aberrациями оптических систем и по форме при  $\alpha = 0$  очень близки к найденным слабо коррелированным полиномам (рис. 9.6), поэтому точность коррекции искажений волнового фронта рассмотрим с их использованием. Кроме этого, полиномы Цернике низших порядков (9.1)

удовлетворяют уравнению  $\nabla^4 Z_i = 0$ . Сравним его с общим решением уравнения изгиба свободной от нагрузки области тонкой пластины  $\nabla^4 W = 0$ :

$$W = w_k(r) \exp(jk\theta); \quad w_k(r) = A_k r^k + B_k r^{k+2} + C_k \Phi_{1k}(r) + D_k \Phi_{2k}(r).$$

где  $\Phi_{1k}(r) = 1/r^k$  ( $k \geq 1$ ),  $\Phi_{10}(r) = \ln(r)$ ;  $\Phi_{2k}(r) = r^{2-k}$  ( $k \geq 2$ ),  $\Phi_{2k}(r) = r^{2-k} \ln(r)$  ( $k = 0, 1$ ); константы  $A, B, C, D$  зависят от граничных условий.

Так как для сплошных круглых зеркал выполняется:  $C = D = 0$ , а форма изгиба принимает вид:  $W(\mathbf{r}) = (A_k r^k + B_k r^{k+2}) \cos(k\theta + \alpha)$ , поэтому входящими сюда коэффициентами ( $A, B$ ) можно эффективно управлять с помощью двух радиальных колец управляющих воздействий.

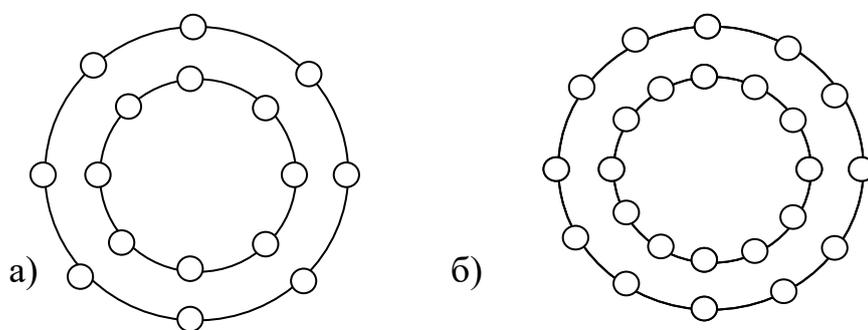


Рисунок 9.7 – Схемы расположения: а) 16 приводов – для коррекции шести полиномов Цернике; б) 24 приводов – для коррекции десяти полиномов Цернике

В реальных конструкциях с сосредоточенными приводами коррекции кольцевое управление реализуется приближенно, как показано, например, на рисунке 9.7. При этом для зеркала постоянной толщины каждый из приводов создает функции отклика, имеющие аналитическое представление (см. также параграф 4.2). В расчетах коэффициент Пуассона задавался  $\nu = 0.3$ , а все размеры свободного зеркала нормировались к радиусу области коррекции  $R_a$ , который принимался за единицу. Радиус всего зеркала выбирался равным 1.2, чтобы реализовать почти «периферийное» управление. Для исключения влияние перемещения и наклонов волнового фронта, к функциям отклика зеркала в (9.3) добавлялись константа и наклоны. В случае 16 приводов с  $r_1 = 1.1$ ,  $r_2 = 0.9$  получилось:  $\Delta_4 < 10^{-4}$ ,  $\Delta_{5,6} = 0.0001$ , а в случае 24 приводов:  $\Delta_4 < 10^{-4}$ ,  $\Delta_{5,6} < 10^{-4}$ ,  $\Delta_{7,8} = 0.0005$ ,  $\Delta_{9,10} = 0.0003$ .

В случае использования мембранного адаптивного зеркала также были рассчитаны разные схемы расположения электродов для одновременной компенсации искажений волнового фронта в виде первых одиннадцати полиномов Цернике. Сначала были выбраны пять вариантов расположения круглых приводов радиуса  $r_{II}$  в узлах декартовой и полярной сеток координат, показанные на рисунке 9.8а,б. Два из них – на рисунке 9.8а: 1 – общее число  $N = 21$ , размеры  $a_0 = 2r_{II} = 0.25D$ ; 2 –  $N = 37$ ,  $a_0 = 0.165D$ ,  $2r_{II} = 0.15D$  и три варианта – на рис. 9.8б: 3 –  $N = 7$ ,  $a_1 = 2r_{II} = 0.4D$ ; 4 –  $N = 19$ ,  $a_2 = 2a_1 = 4r_{II} = 0.5D$ ; 5 –  $N = 43$ ,  $a_3 = 1.5a_2 = 3a_1 = 0.495D$ ,  $4r_{II} = 0.08D$ . Во всех вариантах радиус зеркала выбирался  $R_3 = 0.65D$ . Функции отклика зеркала приведены в параграфе 4.2.

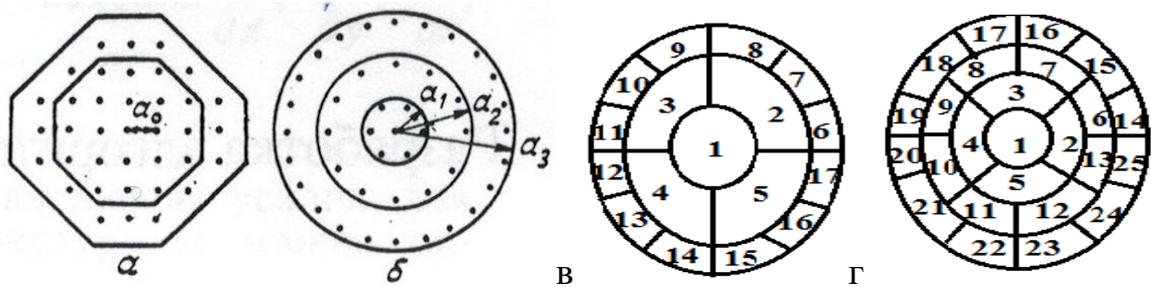


Рисунок 9.8 – Схемы расположения приводов в мембранном зеркале

Таблица 9.2

N	m	$Z_i$				
		2,3	4	5,6	7,8	9,10
1	21	0,22	0,53	0,33; 0,36		
2	37	0,08	0,18	0,13	0,36	0,19
3	7	0,027	0,56	0,39; 0,44		
4	19	0,17	0,44	0,23	0,85	0,28; 0,32
5	43	0,09	0,21	0,13	0,40	0,19

Таблица 9.3

m	$Z_i$					
	2;3	4	5;6	7;8	9;10	11
17	0,0050	$< 10^{-4}$	0,018	0,19	0,05	0,32
25	0,0043	$< 10^{-4}$	0,018	0,087	0,05	0,08

Полученные ошибки аппроксимации  $\sqrt{\Delta_i}$  полиномов Цернике  $Z_i$  приведены в таблице 9.2 ( $m$  – количество электродов). Еще две схемы расположения электродов приведены на рисунках 9.8 в, г. Здесь диаметр зеркала в 1,5 раза превышал  $D$ . Диаметры окружности разбиения области зеркала на электроды выбирались на рис. 9.8в:  $0.4 D$ ;  $D$ ;  $1.2 D$ ; на рис. 9.8г:  $0.33 D$ ;  $0.66 D$ ;  $D$ ;  $1.2 D$ . Результаты сведены в таблицу 9.3. Более подробное рассмотрение этих и других вариантов организации управления пластинчатыми и мембранными гибкими зеркалами при квазистатической компенсации aberrаций приведено в статьях автора [211, 215, 222].

*Точность коррекции турбулентной атмосферы.* Выше были приведены ошибки коррекции оптических aberrаций. При переходе к количественным значениям атмосферных aberrаций необходимо все полученные оценки типа (9.4) умножить, в соответствии с (9.30), на  $(D / r_0)^{5/3}$ , где  $r_0$  – радиус пространственной корреляции Фрида. Значение  $r_0$  с усилением турбулентности атмосферы уменьшается. В конкретных случаях его значения зависят от погодных условий и местности установки оптической системы. При выборе места установки наземных телескопов стремятся получать его наименьшие значения.

В рамках решения сопутствующей задачи по исследованию свойств атмосферной турбулентности предложена методика оценки радиуса пространственной корреляции Фрида  $r_0$  и выполнена ее проверка с помощью сканирующего лазерного теодолита, которая проводилась на приземных трассах с большими градиентами температуры [230, 232, 234]. Наиболее сильная турбулентность наблюдается в сильно нагретом приземном слое атмосферы. Теоретические основы методики исследования  $r_0$  с помощью исследования оптической рефракции, а также полученные экспериментальные результаты приведены в указанных работах автора.

Эксперименты проводилось в летнее время в условиях аридной зоны (при этом температура воздуха достигала  $40^\circ\text{C}$  и более). Исследуемые трассы пролегли в предгорной местности и имели сложный профиль достигающей поверхности. Средняя высота чуть превышала 2 м. Исследование случайной рефракции проводилось с помощью лазерного сканирующего теодолита в дневное время в сентяб-

ре на трассе длиной 2415 м. Измеренная зависимость дисперсии случайных флуктуаций вертикального угла прихода, отраженного от уголкового отражателя лазерного луча (использовался гелий-неоновый лазер  $\lambda = 0,63$  мкм), показана на рисунке 9.9а (″ – в угловых секундах). А на рисунке 9.9б приведены дневные зависимости угла вертикальной рефракции.

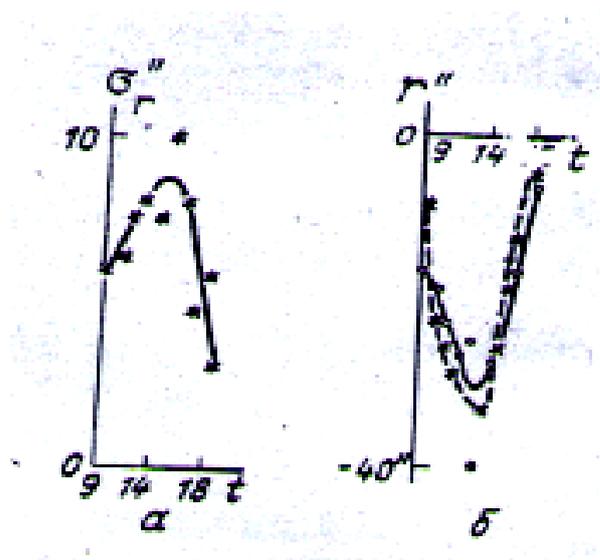


Рисунок 9.9 – Случайная (а) и регулярная (б) составляющие оптической рефракции в приземном слое атмосферы

Далее по известным значениям  $\sigma_r$  с помощью формул:

$$c_n^2 \approx \sigma_r^2 D^{\frac{1}{3}} / 2.84 l; \quad r_0 \approx 1,68 [(2\pi/\lambda)^2 c_n^2 l]^{-3/5}$$

был восстановлен дневной ход параметров:

$$c_n \approx 8.6 \cdot 10^{-9} \sigma \quad (\text{см}^{-1/3}), \quad r_0 \approx 4,75 [\sigma_r'']^{-6/5} \quad (\text{см}),$$

где  $D$  – диаметр апертуры (составлял 10 см),  $l$  – длина трассы,  $c_n$  – структурная постоянная показателя преломления,  $\lambda$  – длина волны.

На практике места установки наземных телескопов выбирают из условий высокой прозрачности атмосферы и ее наименьшей турбулентности. При этом радиус пространственной корреляции на порядки будет превышать приведенные значения. Тем не менее, выявленное влияние сильных градиентов температуры на

приземную турбулентность может оказаться полезным в отдельных случаях опосредованно, а использованная методика применена и в других условиях.

### 9.3.2. Синтез алгоритмов модального управления гибкими зеркалами с настройкой на корреляционные свойства атмосферных аберраций

Кроме рассмотренной в предыдущем пункте ошибки пространственной аппроксимации атмосферных аберраций, еще имеет место ошибка их отслеживания во времени [226]. Чтобы синтезировать эффективные регуляторы в контурах управления характерными модами искажений волнового фронта, требуется учесть автокорреляционные функции последних. Поэтому сначала проведем расчет линейного формирующего фильтра для описания временного поведения таких пространственных искажений.

Корреляционные функции коэффициентов разложения  $\xi_i(t)$  волнового фронта  $\varphi(\vec{r}, t)$  по полиномам Цернике  $Z_i(\vec{r})$  для колмогоровской модели атмосферной турбулентности равны:

$$K_i(\tau) = \langle \xi_i(t) \xi_i(t + t_0) \rangle = \quad (9.32)$$

$$= C_i \left( \frac{D}{r_0} \right)^{5/3} \int_0^\infty [I_0(v\tau) \pm (-1)^m I_{2m}(v\tau) \cos 2m\psi] I_{n+1}^2(v) v^{-14/3} dv,$$

где  $t_0$  – размерное время,  $\tau = 2Vt_0/D$  – безразмерное время,  $V$  – скорость ветра,  $D$  – диаметр апертуры,  $(v, \psi)$  – полярные координаты скорости переноса неоднородностей,  $r_0$  – радиус корреляции Фрида,  $J_k$  – функции Бесселя  $k$ -го порядка,  $C_i$  – постоянные коэффициенты нормировки,  $n$  – порядок полинома,  $m$  – его угловая частота, знак "+" отвечает четным  $i$ , знак "-" – нечетным.

Чтобы использовать (9.32) в синтезе регуляторов обратных связей, аппроксимируем  $K_i(\tau)$  подходящими линейными формирующими фильтрами:

$$\tilde{K}_i(\tau) = \langle \xi_i^2 \rangle e^{-\alpha_i \tau} \left( \cos \gamma_i \tau + \frac{\alpha_i}{\gamma_i} \sin \gamma_i \tau \right). \quad (9.33)$$

$$\dot{\xi}_i + \alpha_i \xi_i = \zeta_i, \quad \gamma_i = 0, \quad i \leq 3; \quad \ddot{\xi}_i + 2\alpha_i \dot{\xi}_i + (\alpha_i^2 + \gamma_i^2) \xi_i = \zeta_i, \quad i > 3;$$

где  $\dot{\xi}_i = \frac{d}{dt} \xi_i$ ;  $\zeta_i$  - белые шумы со спектральными функциями:

$$S_i^\zeta = \langle \xi_i^2 \rangle \alpha_i / \pi, \quad i \leq 3; \quad S_i^\zeta = 2 \langle \xi_i^2 \rangle \alpha_i (\alpha_i^2 + \gamma_i^2) / \pi, \quad i > 3;$$

$$\alpha_i = -\gamma_i \operatorname{ctg}(\gamma_i T_{1i}) - \text{из условия в первом нуле } K_i(T_{1i}) = \tilde{K}(T_{1i}) = 0.$$

При этом коэффициенты  $\alpha$  или  $\gamma$  в (9.33) будем определять из задачи минимизации ошибок  $\varepsilon_i$  на некоторых временных интервалах:

$$\varepsilon_i = \int_0^{T_i} [K_i(\tau) - \tilde{K}_i(\tau)]^2 d\tau / \int_0^{T_i} K_i^2(\tau) d\tau$$

При совпадении направления скорости переноса неоднородностей с осью  $\psi = 0$  найденные характеристики фильтров приведены в таблице 9.4, где обозначено  $\sigma_i = \langle \xi_i^2 \rangle (r_0/D)^{5/3}$ .

Таблица 9.4

$i$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sigma_i$	0.449	0.449	0.023	0.023	0.023	0.006	0.006	0.006	0.006
$\alpha_i$	0.13	0.08	1.64	1.02	2.62	1.94	0.99	2.49	0.99
$\gamma_i$	-	-	1.88	2.04	0	1.80	3.79	3.24	3.28
$T_{1i}$	-	-	1.2	1.0	-	1.3	0.5	0.7	0.7
$T_i$	20	20	4	4	4	2	2	2	2
$\varepsilon_i$	0.09	0.02	0.003	0.02	0.02	0.002	0.05	0.09	0.03

Рассмотрим адаптивную систему, в которой измерительное устройство осуществляет разложение остаточной ошибки в ряд по первым десяти полиномам Цернике (9.1). Ограничимся изучением управления, деформирующего поверхность зеркала (поэтому коррекцию средних наклонов волнового фронта не учитываем). Тогда остаточная ошибка коррекции волнового фронта:

$$\varphi(\vec{r}, t) - W(\vec{r}, t) \approx \sum_{i=4}^{10} a_i(t) Z_i(\vec{r}),$$

где  $a_i$  - коэффициенты разложения,  $W \approx \sum_{j=1}^e f_j(t) V_j(\vec{r})$  - поверхность гибкого зеркала, представленная через разложение по модам колебаний  $V_j(\vec{r})$ :

$$\ddot{f}_j + 2\mu \dot{f}_j + \lambda_j^2 f_j = u(t) C_j \lambda_j^2, \quad j = \overline{1, l} \gg 1; \quad (9.34)$$

$\mu$  - коэффициент демпфирования,  $\lambda$  - модальные частоты,  $C_j$  - коэффициенты раз-

ложения распределенного управления с амплитудой  $u(t)$ .

Так как круговые полиномы  $Z_i (i=4, 10)$  являются независимыми гармоническими функциями относительно угла  $\theta$ , поэтому отвечающие им каналы коррекции можно изучать отдельно. Для каждого из них синтез регуляторов в обратных связях был выполнен по простым оптимальным алгоритмам, приведенным в параграфе 7.1. Рассматривалось пластинчатое круглое зеркало со свободным краем (его резонансные частоты  $\lambda_j^2$  и формы  $V_j$  при коэффициенте Пуассона 0.33 приведены в [49]). Рассчитанные зависимости относительной ошибки коррекции  $\langle a^2 \rangle / \langle \xi^2 \rangle$  от затрат управления  $\langle u^2 \rangle / \langle \xi^2 \rangle$  при  $\mu = 0$  показаны на рисунке 9.10.

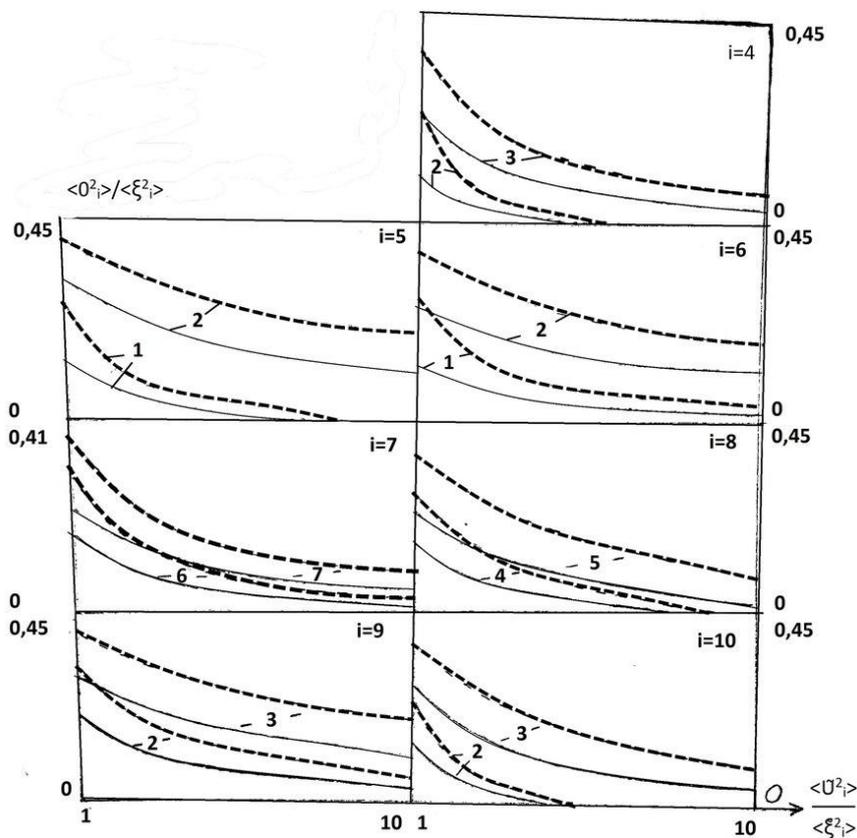


Рисунок 9.10 – Зависимости относительной ошибки коррекции  $\langle a^2 \rangle / \langle \xi^2 \rangle$  от энергетических затрат управления  $\langle u^2 \rangle / \langle \xi^2 \rangle$ :

1 –  $K = 3$ , 2 –  $K = 5$ , 3 –  $K = 7$ , 4 –  $K = 10$ , 5 –  $K = 12$ , 6 –  $K = 15$ , 7 –  $K = 18$

На нем сплошные кривые соответствуют регулятору, настроенному на цветной шум (9.33), прерывистые – регулятору без учета корреляционной функции (9.32); параметр  $K = (D/2)V(\sigma_m/G_3)^{1/2}$ ;  $D$  – диаметр,  $V$  – скорость ветра,

$G_3$  – цилиндрическая жесткость зеркала,  $\sigma_m$  – масса единицы поверхности зеркала. Детали расчетов описаны в работе автора [226].

Таким образом, учет спектральных функций корректируемых аберраций позволил примерно в 1.5 - 2 раза уменьшить ошибку их коррекции. Поэтому они должны учитываться и при настройке таких систем динамической коррекции волнового фронта в производственных условиях

#### **9.4. Анализ новых возможностей систем управления волновым фронтом при введении контуров оптической обратной связи**

Возможности и особенности каналов управления волновым фронтом в системах с оптической обратной связью были рассмотрены в параграфе 4.3. Из работ автора выделим обобщающие статьи [225, 227]. Было показано, что схема на рисунке 4.9а потенциально позволяет реализовать системы фазового сопряжения для когерентного пучка, схемы на рисунках 4.9б,в – компенсировать фазовые искажения в усилительной среде и организовать управление волновым фронтом с уменьшением лучевой нагрузки на гибкие зеркала, а схема на рисунке 4.9г предназначена для подавления фазовых искажений в оптическом усилителе.

Для количественной оценки качества управления волновым фронтом в таких схемах было выполнено их моделирование. При этом фазовые искажения  $\varphi_{иск}$  описывались с помощью случайной функции вида  $\varphi_{иск}(r) = \sum_{j=1}^N \xi_j Z_j(r)$ , где  $N=11$ ,  $Z_j$  – полиномы Цернике (9.1),  $\xi_j$  – распределенные по нормальному закону взаимно некоррелированные случайные величины с нулевыми средними значениями и одинаковыми дисперсиями. Глубина модуляции  $\varphi_{иск}$  составляла  $\sim 2\pi$ . Усреднение проводилось по 20 реализациям случайных фазовых экранов.

Для оценки качества системы использовался критерий Штреля  $St$ , равный отношению интенсивности в дальней зоне фокусировки на оси оптической системы, к соответствующему значению интенсивности при  $\varphi_{out} = 0$ . Рассматривался случай достаточно большого усиления. Распределение интенсивности входного и

опорного пучков выбиралось супергауссовым:  $f_0(r) = f_{in}(r) = \exp[-(r/a_0)^6]$ , где  $a_0$  – эффективный радиус пучка.

Для оценки качества обращения фазы  $\varphi_{in} = \varphi_{иск}$  число Штреля определялось по фазовому рассогласованию  $\varphi_{out} + \varphi_{in}$  от  $\varphi_0$ . Некоторые результаты численного моделирования приведены на рисунке 9.11а. При  $k_0\gamma \gtrsim 10$  наблюдалось эффективное обращение волнового фронта.

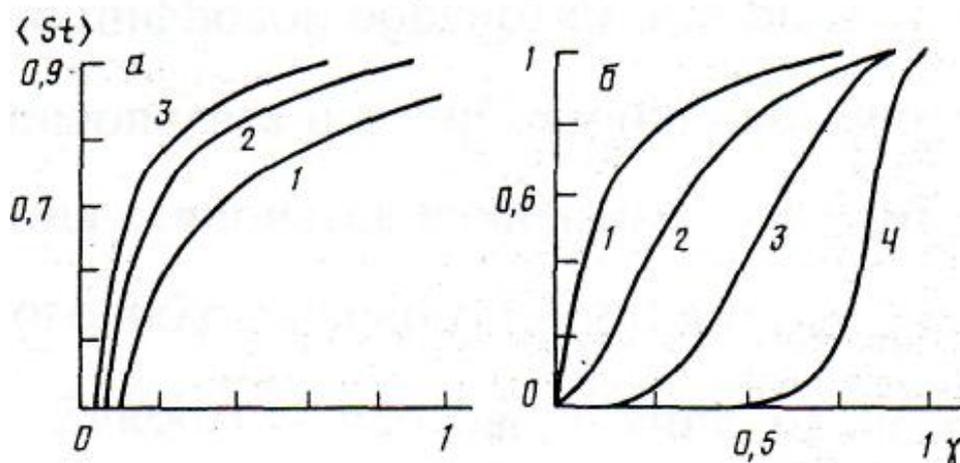


Рисунок 9.11 – Зависимость  $\langle St \rangle$  от  $\gamma$ : а) для схем на рис. 4.9а,б: 1 –  $k_0=10$ , 2 – 20, 3 – 30; б) для схем на рис. 4.9в,г: 1 –  $k_0 = 15$ , 2 – 5, 3 – 1, 4 – 0.1

В задаче компенсации фазовых искажений в усилителе, изображенном на рисунке 4.9б, число Штреля ведет себя аналогично. При  $k_0\gamma \gtrsim 10$  происходит эффективное подавление фазовых искажений в активной среде (при выключенной цепи обратной связи фактор  $\langle St \rangle$  был мал и составлял  $\sim 10^{-3}$ ).

При моделировании кольцевого регенеративного усилителя (рис.4.9в) полагалось  $\varphi_g = \varphi_{иск}$ ,  $k_0 = G_0 R_1 R_2$ . На рисунке 9.11б показаны результаты расчетов, свидетельствующие об эффективном подавлении фазовых искажений среды усиления и в этом случае.

Исследование эффективности управления фазой основного пучка с помощью сравнительно слабого светового поля в контуре обратной связи проводилось на примере схемы кольцевого резонатора на рисунке 4.9в с  $R_1, R_2 \ll 1$ . Искажения  $\varphi_{иск}$  моделировались в виде тонкого экрана, расположенного за выходным зеркалом резонатора. Технические возможности

коррекции с помощью управляемого зеркала считались согласованными с фазовыми экранами  $\varphi_{иск}$ , что позволяет в принципе добиться практически полной компенсации фазового профиля  $\varphi_{иск}$  ( $\varphi_u = \sum_{j=1}^N a_j Z_j(r)$ , где  $a_j$  – управляющие воздействия). Рассматривались два подхода к проблеме организации управления фазой: метод, основанный на идее фазового сопряжения, и алгоритм апертурного зондирования. В первом методе считалось, что известна фазовая функция  $\varphi_{иск}$ , а фаза  $\varphi_u$  выбиралась равной  $\varphi_{иск}$ .

Управление фазой по методу апертурного зондирования предполагало варьирование параметров  $a_j$  с целью максимизации интенсивности излучения на точечном отражателе (эквивалентен фактору Штреля). Результаты исследования возможностей адаптивного управления в контуре обратной связи представлены на рисунке 9.12 (считалось, что  $\varphi_{in} = \varphi_g = 0$ ).

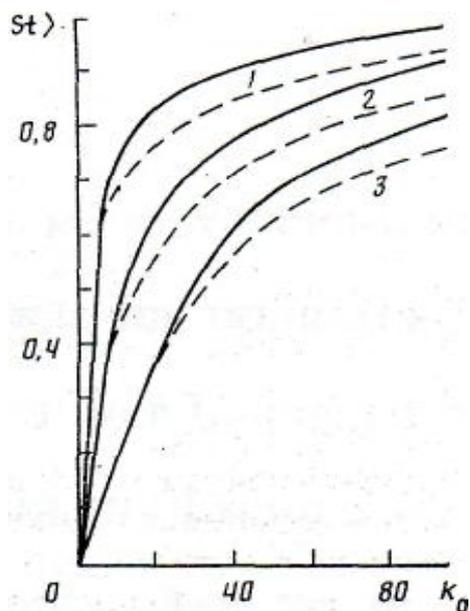


Рисунок 9.12 – Зависимость  $\langle St \rangle$  от  $k_0$  при коррекции фазовых искажений методом апертурного зондирования (сплошные кривые) и фазового сопряжения (штриховые):

$$1 - \gamma = 0.3, \quad 2 - 0.1, \quad 3 - 0.05$$

Приведенные результаты свидетельствуют о возможности эффективности управления волновым фронтом при относительно малой глубине обратной связи  $\gamma$ . При этом лучевая нагрузка на управляемом зеркале оказывается существенно меньше, чем в традиционных адаптивных системах. Некоторое преимущество метода апертурного зондирования связано с тем, что в рассматриваемой нелинейной системе, вообще говоря, не происходит идеального обращения волнового фронта и алгоритм коррекции  $\varphi_u = \varphi_{иск}$  не является оптимальным. В методе апер-

турного зондирования оптимизация критерия  $St$  реализована в явном виде. Характер приведенных результатов практически не менялся при наличии искажений  $\varphi_g$  в усилительном тракте, которые в значительной степени подавлялись.

Заметим, что организация оптической обратной связи в схеме кольцевого резонатора со слабой обратной связью (рис. 4.9в) позволяет дополнительно управлять и распределением интенсивности излучения в дальней зоне на расстоянии  $L$ . Чтобы показать это, полагалось  $\varphi_g = 0$ , а распространение световой волны в пространстве описывалось параболическим уравнением дифракции

$$2ik \frac{\partial A'}{\partial z} = \Delta_{\perp} A'$$

где  $A'(r, z)$  – комплексная амплитуда светового поля, распространяющегося в направлении  $z$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ .

Размер области фокусировки был принят равным размеру исходного пучка. Расстояние до области фокусировки охарактеризуем безразмерной дифракционной длиной  $d_0 = \lambda L / \pi a_0^2$ . Управление фазовым профилем  $\varphi_u$  осуществлялось в соответствии с методом апертурного зондирования, причем профиль  $\varphi_u$  моделировался с помощью полиномов Цернике со степенями  $r$ , не превышающими 8. Полученные моделированием результаты преобразования гауссова пучка в кольцевой и кольцевого в супергауссов показаны на рисунке 9.13. Здесь исходный профиль входной интенсивности показан пунктирными кривыми, а полученный – сплошными.

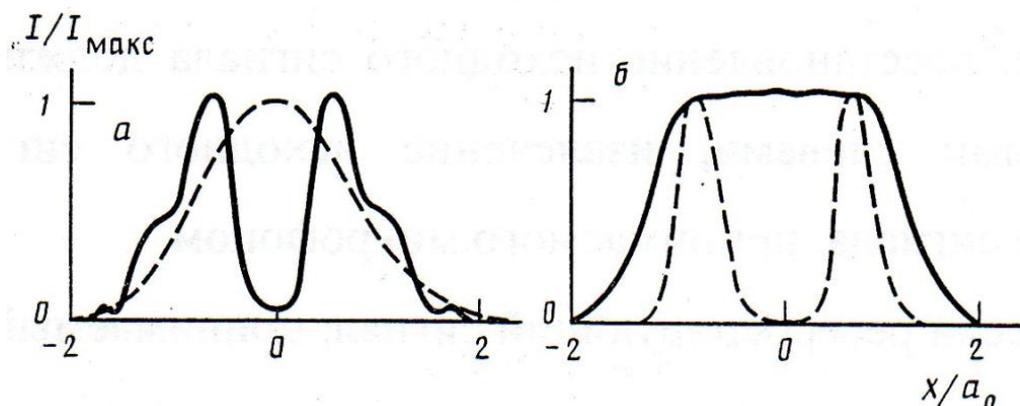


Рисунок 9.13 – Преобразование гауссова пучка в кольцевой (а) и кольцевого в супергауссов (б) при  $k_0 = 20$ ,  $\gamma = 0.1$ : а)  $d_0 = 0.5$ , б)  $d_0 = 0.2$

Более подробно эти и другие вопросы создания управляемых систем с оптической обратной связью рассмотрены в уже ранее отмеченных работах автора [214, 218 - 221, 225, 227, 231, 233 и др. ].

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о перспективности использования контуров оптической обратной связи для расширения возможностей эффективного управления волновым фронтом в модульных системах лазерной подсветки космических объектов наблюдения в околоземном пространстве. Они также могут быть использованы при зажигании искусственных лазерных звезд в системах компенсации атмосферной турбулентности в направлении наблюдаемых слабых астрономических объектов.

В результате, разработанный комплекс взаимосвязанных направлений и методов оптимизации систем коррекции ВФ подтвердил свою потенциальную эффективность и поэтому позволяет обеспечить всестороннюю интеллектуальную поддержку при тонкой настройке и оптимизации комплексов многосистемного наведения больших оптических телескопов.

## **9.5. Выводы по главе 9**

1. Основными направлениями оптимизации модульных систем коррекции волнового фронта для повышения эффективности многосистемного наведения больших оптических телескопов выбраны: 1) настройка и оптимизация пространственной структуры многомерной обратной связи при коррекции сложных оптических аберраций в процессе производства и эксплуатации таких систем; 2) настройка функционалов оптической интенсивности, оптимизация управляемых пространственных форм и градиентных шагов в системах квазистатической коррекции волнового фронта; 3) оптимизация управляемых форм и регуляторов обратных связей в системах динамической коррекции атмосферных искажений волнового фронта; 4) использование потенциально перспективных систем с оптической обратной связью.

2. Предложенные методы настройки и отладки пространственной структуры многомерной обратной связи для систем управления волновым фронтом основаны на кластеризации и прореживании больших массивов приводов управления. Их проверка на моделях показала потенциальную эффективность. На этой основе могут быть построены методики юстировки системы коррекции формы главного зеркала большого телескопа на этапах ее производственного цикла с последовательным повышением точности. Также их можно использовать в процедурах адаптивной настройки пространственной структуры обратной связи при эксплуатации больших телескопов.

3. При выполнении коррекция aberrаций ГЗ по слабым световым источникам в процессе многосистемного наведения на них, для усиления оптического сигнала можно выполнять кластеризацию нескольких пикселей ПЗС-матрицы оптического приемника путем суммирования их сигналов в условиях шумов измерений. Показано, что при этом допускается превышение размера получающихся пикселей над диаметром пятна идеальной фокусировки примерно в 1.5 – 2 раза. В таких случаях управление системой коррекции aberrаций следует сначала проводить для слаборасфокусированного изображения, с последующей фокусировкой.

4. Для ускорения скорости квазистатической коррекции волновых aberrаций через градиентную оптимизацию функционалов резкости изображения следует сначала сформировать ортонормированные по апертуре модальные функции, а потом уже управлять их амплитудой. При этом введение обратно пропорциональной зависимости от оптически измеряемого оптимизируемого функционала в градиентный шаг часто позволяет ускорить процесс сходимости градиентного алгоритма в несколько раз (иногда до 10 раз).

5. Предложенный метод выбора характерных форм искажений волнового фронта в турбулентной атмосфере позволяет обеспечивать минимальную корреляцию между каналами модального управления. В сравнении с оптимальными пространственными функциями Карунена-Лоева, использование таких десяти полиномов ухудшало ошибку коррекции  $\langle \Delta \rangle$  на величину, меньшую 1% .

6. Повышению скорости компенсации атмосферной турбулентности отвечает выбор небольшого числа слабокоррелированных или близких к ним характерных атмосферных aberrаций, корректируемых адаптивным гибким зеркалом. Дополнительный учет спектральных характеристик таких модальных атмосферных aberrаций при синтезе регуляторов управления гибким зеркалом позволил примерно в 1.5 - 2 раза уменьшить ошибку их компенсации по сравнению с использованием обычных регуляторов.

7. Исследование потенциально перспективных схем управления волновым фронтом с помощью контуров оптической обратной связи показало расширение возможностей эффективного управления волновым фронтом в модульных системах лазерной подсветки космических объектов наблюдения в околоземном пространстве. Они также могут быть использованы при зажигании искусственных лазерных звезд в системах компенсации атмосферной турбулентности в направлении наблюдаемых слабых астрономических объектов. При этом уменьшается лучевая нагрузка на управляемые зеркала, а также самокомпенсируются возникающие искажения фазы излучения при прохождении лазерных усилителей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа посвящена решению важной научно-технической проблемы – повышению качественных и эксплуатационных показателей функционирования разрабатываемых и создаваемых уникальных наземных и орбитальных больших оптических телескопов за счет увеличения интегрального потенциала от улучшения характеристик взаимодействия модульных систем управления, объединяющиеся в настраиваемые многосистемные комплексы наведения больших телескопов.

1. Разработана методологическая основа на основе временной и пространственной частотных декомпозициях для проведения системного анализа, синтеза, оптимизации и управления модульными системами в комплексах многосистемного наведения больших оптических телескопов, являющихся автоматизированными системами научных исследований.

Она позволяет обоснованно выполнять разделение ролей и решаемых задач модульными системами управления, а также выделять области их взаимодействия при разработке конкретных телескопов.

2. В рамках совместного проектирования распределенных комплексов наведения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных) разработаны и апробированы модели объектов управления для модульных систем слежения, позволяющие учесть допуски на производственные погрешности их изготовления и предназначенные для интеллектуального сопровождения производства и прогнозирования эффективности работы систем слежения.

Предложенная методика идентификации передаточных функций для управляющих и возмущающих воздействий, а также для сигналов измерений, реализуемая численно на основе сопровождающих производство CAD/CAE моделей с учетом всех конструктивных деталей изготовления объектов управления позволяет формировать уточненные передаточные функции контуров управления в рас-

ширенных полосах частот, захватывающих частоты резонансных микроколебаний упругих конструкций.

Ее применение для конкретного варианта проработанной конструкции модуля вторичного зеркала показало свою эффективность и обоснованность использования аналитически полученных передаточных функций в полосах частот контура управления. Так, в полосе частот до 20 Гц различие аналитически и численно найденных передаточных функций было несущественным.

Дополнительно выведенные аналитические модели объектов управления в полосах частот контуров управления для систем углового наведения всем телескопом (в ОПУ и на КА) и для корректирующего слежения вторичным зеркалом позволили явно выявить нелинейные связи в моделях, а также влияние основных конструктивных факторов и параметров приводов управления.

На их основе обоснованно сформированы характерные представления передаточных функций в частотных полосах управления, позволяющие упростить решение задач структурно-параметрического синтеза комплекса многосистемного наведения телескопа.

Построение модели следящего третичного деформируемого диагонального зеркала с контуром активного демпфирования его резонансных колебаний потребовало выполнение синтеза контура управления в расширенной полосе частот, захватывающей нижние частоты резонансных колебаний зеркала. Использование конечно-разностной формы записи модели позволило органично ее совместить с процедурами синтеза оптимальных регуляторов в MATLAB. После синтеза такого регулятора время успокоения резонансных колебаний зеркала было уменьшено почти на два порядка.

Для выполнения требований к всемерному понижению частоты угловой стабилизации КА с большим орбитальным телескопом исследованы режимы управления реактивными жидкостными маховиками, которые показали возможности повышения плавности момента управления в 3 – 6 раз. Дополнительно полученные передаточные функции для контура общего наведения орбитального

телескопа с таким управления позволяют упростить проведение структурно-параметрического синтеза его комплекса многосистемного наведения.

3. Разработаны и исследованы модели объектов управления с алгоритмами пространственно-распределенной обратной связи для модульных систем коррекции волнового фронта в составе распределенных комплексов наведения больших оптических телескопов, призванных повысить их интегральную эффективность.

Для систем активной оптики сформулированные варианты сведения динамических моделей главных зеркал телескопов в расширенных полосах частот к стандартному для синтеза регуляторов в MATLAB виду с использованием конечно-элементного и конечно-разностного подходов позволяют упростить решение задач синтеза управления в зависимости от широты их постановки.

При этом организация обратной связи по прогибу в точке действия привода позволило уменьшить время успокоения резонансных микроколебаний главного зеркала в 6 раз, а по информации со всей поверхности зеркала – в восемь раз.

Модели адаптивных зеркал, работающих в полосах частот ниже резонансных, приведены в рамках квазистатического анализа и предназначены для прогнозирования их потенциальной эффективности в системах коррекции атмосферных aberrаций. Исследование макета мембранного адаптивного зеркала показало лучшее соответствие результатов модели тонкой пластины с растяжением, чем модели идеальной мембраны без собственной изгибной жесткости.

Предложенные модели организации дополнительных контуров оптической обратной связи в излучающих системах телескопа показали перспективность таких контуров и их достаточную устойчивость по отношению к временному запаздыванию и к пространственному сдвигу оптического поля в обратной связи.

4. Развита модель и алгоритмы управления прецизионными электроприводами, а также разработана методика задания начальных требований к ним для интеллектуальной поддержки разработок и изготовления опорно-поворотных устройств в системах наведения больших наземных оптических телескопов.

Введение в модели детализации основных конструктивных упругих элементов и электрических параметров контуров обратных связей, а также вариантов

внутренних и внешних возмущений позволяет выявлять производственные факторы, потенциально приводящие к ухудшению прогнозируемой точности углового слежения.

5. Выполненное уточнение моделей твердотельных волновых гироскопов с алгоритмами внутреннего управления волновыми процессами позволяет идентифицировать влияние технологических погрешностей и алгоритмов управления на точностные характеристики и систематический дрейф выходных сигналов, используемых в системах угловой стабилизации КА с орбитальным телескопом.

Модели согласованы с сопровождающими производственный процесс CAD/CAE системами и предназначены для интеллектуальной поддержки производства твердотельных волновых гироскопов.

Экспериментальные результаты, полученные для технологических образцов ТВГ на промежуточных этапах производственного цикла подтвердили корректность полученных моделей.

6. Предложенные структуры и алгоритмы управления для многосистемных комплексов слежения больших наземных и орбитальных оптических телескопов, полученные методами структурно-параметрического синтеза сложных систем, ориентированы на повышение автономности производственных процессов по их созданию. В рамках системы интеллектуальной настройки структуры комплекса наведения они получены для разных режимов управления с последовательным повышением точности наведения.

Показано, что на выбор их внутренних структур, распределение ролей, согласования взаимодействия и взаимовлияния составных модульных систем комплекса, а также их регуляторов в обратных связях влияет постановка задачи наведения и ее исходные данные.

Исследованная эффективность разных вариантов восстановления оптической ошибки наведения между тактами ее замедленной выдачи позволяет выполнять интеллектуальную настройку структуры взаимодействия каналов наведения орбитального телескопа на наилучшие условия работы.

А предложенный синтез регуляторов позволяет согласованно для всех работающих систем слежения получить наибольшую гладкость переходных процессов в заданной полосе частот с целью уменьшения эксплуатационных микродеформаций конструкций больших телескопов.

7. Выполненное имитационное моделирование модульных систем слежения больших телескопов на основе полученных в предыдущих главах моделей и алгоритмов управления показало свою эффективность при выявлении влияния технических параметров, эксплуатационных факторов и условий на точность наведения.

На конкретном примере получены оценки критических значений важнейших эксплуатационных факторов (действия ветровых нагрузок, внутренних пульсаций тока, упругости статора электродвигателей, упругости вала силовой передачи от электродвигателей на телескоп и др.) из условия достижения высокочастотной ошибки слежения телескопа в ОПУ не более 0.1 угл сек.

Для оценки эффективности корректирующего управления вторичным зеркалом при наведении телескопа по слабым звездам с замедленным тактом выдачи оптического сигнала ошибки слежения (5 ÷ 10 Гц) проведено исследование и сравнение эффективности традиционного контура управления ВЗ с понижением частоты управления (до 0.55 Гц) и контура с дополнительно восстанавливаемой ошибкой слежения при сохранении полосы управления (до 3 Гц). В обоих случаях были достигнуты ошибки слежения, меньшие 0.1 угл сек, а предпочтение варианта зависит от требуемой полосы контура корректирующего управления ВЗ.

8. Предложенная цельная система взаимно-дополняющих методов настройки и оптимизации модульных систем коррекции волнового фронта позволяет в совокупности повысить интегральную эффективность больших оптических телескопов, как автоматизированных систем научных исследований.

Моделирование эффективности предложенных алгоритмов кластеризации и прореживания приводов управления показало их перспективность для использования в системах коррекции формы ГЗ большого телескопа на этапах производственного цикла и при последующей эксплуатации.

Оптимизация пространственных функций и введение обратно-пропорциональной зависимости градиентных шагов от измеряемых оптических функционалов позволило существенно ускорить процесс сходимости градиентного алгоритма управления (в некоторых случаях до 10 раз).

Для слабых оптических сигналов показана допустимость увеличения размеров пикселей ПЗС-матрицы оптического приемника (через их кластеризацию) с превышением их размера над диаметром пятна фокусировки до 1.5 – 2 раз.

Предложенный алгоритм выбора слабокоррелированных пространственных форм обратной связи низкого порядка для систем атмосферной адаптивной оптики показал высокую точность (их отличие от оптимальных функций Карунена-Лоева не превышала 1%).

Полученные линейные фильтры для временного описания атмосферных aberrаций позволили повысить эффективность во времени синтезированных контуров управления гибким зеркалом в 1.5 – 2 раза по сравнению с их отсутствием.

Введение дополнительных контуров оптической обратной связи для вспомогательных излучающих лазерных систем потенциально позволяет подавить фазовые искажения в активной среде лазерных усилителей, а также в десятки раз уменьшить лучевую нагрузку на управляемое зеркало.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- А – угол Азимута;
- АЗ – Адаптивное Зеркало;
- АЧХ – Амплитудная Частотная Характеристика;
- АФЧХ – Амплитудно-Фазовая Частотная Характеристика;
- ВЗ – Вторичное Зеркало;
- ВФ – Волновой Фронт;
- ГЗ – Главное Зеркало;
- ГД – Гироскопический Датчик;
- ДВФ – Датчик измерения формы Волнового Фронта;
- ДГ – Датчик Гидрирования;
- ДГФП – Датчик Гидрирования в Фокальной Плоскости;
- ДЗ – Диагональное Зеркало;
- ДИ – Датчик измерения Интенсивности светового поля;
- ДП – Датчик измерения углового Положения;
- ДПВЗ – Датчик Положения Вторичного Зеркала;
- ДПТЗ – Датчик Положения Третичного Зеркала;
- ДУ – Датчик Угла;
- ДУС – Датчик Угловой Скорости;
- ДУТ – Датчик Угла Телескопа;
- ИИ – регулятор из интегральных звеньев первого и второго порядков;
- КА – Космический Аппарат;
- КО – Космический Объект; МВЗ – Модуль Вторичного Зеркала;
- ЛК-регулятор – получается из решения задачи синтеза оптимального регулятора для линейной модели с квадратичным критерием качества;
- ОДВЗ – Оптический Датчик Вторичного Зеркала;
- ОПУ – Опорно-Поворотное Устройство;
- ОТД – Оптический Датчик Телескопа;

ПИД – регулятор из пропорционального, интегрального и дифференциального звеньев;

ПИИД – регулятор из пропорционального звена, интегральных звеньев первого и второго порядков, а также дифференциального звена;

РЖМ – Реактивный Жидкостной Маховик;

САПР – Система Автоматического Проектирования;

СК – Система Координат;

СКО – Средне Квадратическое Отклонение;

СУВЗ – Система Управления Вторичным Зеркалом;

СКГЗ – Система Коррекции Главного Зеркала;

Т – Телескоп;

ТДЗ – Третичное Диагональное Зеркало;

ФЧХ – Фазовая Частотная Характеристика;

Н – угол высоты.

## Список литературы

1. Абдуллаев Н.Д., Петров Ю.П. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
2. Аббас А., Капцов Л.Н., Кудряшов А.В., Чистяков И.М. Коррекция тепловой линзы твердотельного лазера с помощью гибкого биморфного зеркала. // Квант, электр., 1989. т 16. - N10. - С. 2080 - 2082.
3. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Людомирский М.Б., Каютин И.С., Ямщиков Н.Е. Автономные бесплатформенные астроинерциальные навигационные системы: принципы построения, режимы работы и опыт эксплуатации // Гироскопия и навигация. – 2013, №3 (82). – С. 91 – 109.
4. Аванесов Г.А., Белинская Е.В. и др. Использование системы датчиков гида в задачах наведения и стабилизации телескопа Т-170 М проекта «Спектр-УФ» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013, Т. 10, № 4. – С. 16 – 23.
5. Автоматическая стабилизация оптического изображения. / Д.Н.Еськов, Ю.П.Ларионов, В.А.Новиков и др. Под общ. ред. Д.Н.Еськова, В.А.Новикова. – Л.: Машиностроение. 1988. – 240 с.
6. Адаптивная оптика: Пер с англ. / Под ред. Э.А.Витриченко. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
7. Адаптация в информационных оптических системах / И.Н.Матвеев, А.Н.Сафронов, И.Н.Троицкий, Н.Д.Устинов; Под ред. Н.Д.Устинова. – М.: Радио и связь, 1984. – 344 с.
8. Айзенберг Я.Е. Концепция построения системы управления АКА серии «Спектр» // Космическая наука и технология. – 1995, №1. – С. 35 - 46.
9. Аль Б.С.Х., Бородин В.М., Гаркушенко В.И. Синтез робастного закона управления оптическим прибором на подвижном основании. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2016, Т. 72, № 3. – С. 91 – 98.
10. Андрианова Л.П., Малько С.Л. Концептуальные основы контроля и диагностики динамических систем на основе активной идентификации коэффициен-

- тов передаточных функций. // Приборы и Системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2003. № 6. – С. 46 - 49.
11. Антипов О.Л., Канев Ф.Ю., Макенова Н.А., Лукин В.П., Цыро Е.И. Адаптивная компенсация атмосферных искажений многоканального лазерного излучения// Автометрия. – 2015, Т. 51, № 6. - С. 41 - 46.
  12. Арановский С.В. Фуртат И.Б. Робастное управление безредукторным прецизионным электроприводом оси оптического телескопа с компенсацией возмущений. // Мехатроника, автоматизация. Управление. – 2011, № 9. – С. 8 – 13.
  13. Ахметов Р.Н., Аншаков Г.П., Григорьев С.К., Типухов В.А., Филатов А.В., Ивакин Д.А., Шипов М.Г. Система управления движением космического аппарата «Ресурс-П». Научно-технические задачи и их реализация. // XXI Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. – СПб., 2014. – С. 9 – 17.
  14. Бакут П.А., Гришина И.Б., Сычев В.В., Шумилов Ю.П. Исследование качества изображения составного телескопа большого диаметра. // Оптический журнал, – 2000. Т.67. № 6. – С. 95 - 98.
  15. Баничук Н.В., Карпов И.И., Климов Д.М. Механика больших космических конструкций. – М.: Факториал, 1997. – 302 с.
  16. Белецкий В.В., Яншин А.М. Влияние аэродинамических сил на вращательное движение искусственных спутников. – Киев: Наукова думка, 1984. – 188с.
  17. Белянский П.В., Сергеев Б.Г. Управление наземными антеннами и радиотелескопами. - М.: Сов. Радио, 1980. – 280 с.
  18. Басараб М.А., Лунин Б.С. Миниатюрные ВТГ для малых космических аппаратов // Вестник МГТУ им. Баумана. Приборостроение. – 2014, №4.
  19. Беляев Б.Б., Уляшин А.И., Ковалев Ф.А. Система точного гидирования. // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2014, № 5 (26). – С. 108 - 113.
  20. Беляев Б.Б., Тарасенко П.А., Тарасенко Н.В. Способ прецизионного наведения космического ультрафиолетового телескопа // Измерительная техника, – 2012 – №1.

21. Бендер С.А. Моделирование динамики управляемых пластинчатых зеркал космических приборов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.16, 01.02.04. – Ижевск, 2000. – 122 с.
22. Бокало С.Ю., Гаранин С.Г., Григорович С.В. и др. Деформируемое зеркало на основе пьезоэлектрических приводов для адаптивной системы установки «Искра-6». // Квантовая электроника.– 2007, Т.37, № 8. – С. 691–696
23. Бонштедт А.В., Кузьмин С.В., Мачехин П.К. Восьмиточечная модель твердотельного волнового гироскопа // Вестник Удмуртского университета. Математика, – 2007. №1. – С. 135 - 214.
24. Бонштедт А.В., Кузьмин С.В., Мачехин П.К., Тонков Е.Л. Оптимизация управления твердотельным волновым гироскопом // Вестник Удмуртского университета. Математика, – 2005. №1. – С. 189 - 214.
25. Бородина С.В. Состояние разработок и перспективы развития адаптивной оптики: Обзор. // Радиоэлектроника за рубежом, – 1978, № 4. – С. 3.
26. Бородина С.В. Применение адаптивной оптики для коррекции изображения наблюдаемого объекта: Обзор. // Радиоэлектроника за рубежом, –1978, № 5. – С. 20.
27. Боярчук А.А. и др. Космическая оптическая интерферометрия для астрометрии. // Космические исследования, – 1999, том 37, № 1. – С. 3 - 12.
28. Боярчук А.А., Стешенко Н.В., Терещук В.Ю. Оптическая система космического телескопа Т-170М. // Известия Крымской астрофизической обсерватории. – 2008. Т. 104, № 1. – С. 229 - 239
29. Бушнел Д. Управление поверхностью с помощью сосредоточенных нагрузок. // Ракетная техника и космонавтика, – 1979, Т.17, № 1. – С. 83.
30. Бычков И.В., Воронов В.А., Дружинин Э.И. и др. Синтез комбинированной системы прецизионной стабилизации обсерватории «Спектр-УФ». I // Космические исследования. – 2013, Т. 51, № 3. – С. 204.
31. Бычков И.В., Воронов В.А., Дружинин Э.И. и др. Синтез комбинированной системы прецизионной стабилизации обсерватории «Спектр-УФ». II // Космические исследования. – 2014, Т. 52, № 2. – С. 153.

32. Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления. 2001, № 1, С. 2 – 22; № 2, С. 5 – 24.
33. Витриченко Э.А., Лукин В.П., Пушной Л.А., Тартаковский В.А. Проблемы оптического контроля. / Новосибирск: Наука, Сиб.отд., 1990. 351 С.
34. Власенко О.В., Яскович А.Л., Макаров В.П. Оптическая схема телескопа Т-170М комплекса научной аппаратуры «Спектр-УФ» // Вестник НПО им. С.А.Лавочкина. – 2014, № 5 (26). – С. 61 – 65.
35. Власенко О.В., Яскович А.Л., Шустов Б.М. и др. Конструктивная реализация оптической системы телескопа Т-170М. // Вестник НПО им. С.А.Лавочкина. – 2014, № 5 (26). – С. 67 – 73.
36. Войцехович В.В. Временные характеристики адаптивной астрономической системы.- Препринт ИКИ АН СССР. – 1984, N 873. – 23 с.
37. Воробьев В.А., Меркурьев И.В., Подалков В.В. Погрешности ВТГ при учете нелинейных колебаний резонатора // Гироскопия и навигация.–2005, №1.
38. Воронов В.А. Дружинин Э.И. Прецизионное программное наведение нежесткого орбитального телескопа. // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2010, № 3. – С. 121 – 134.
39. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. – М.: Наука, 1985. – 335 с.
40. Воронцов М.А., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И. Управляемые оптические системы. – М.: Наука, 1988. – 272 с.
41. Воронцов М.А., Кудряшов А.В., Назаркин С.И., Шмальгаузен В.И. Гибкое зеркало для адаптивных систем формирования световых пучков. // Квантовая электроника. – 1984. Т.11. № 6. – С. 1247.
42. Воронцов М.А., Кудряшов И.А., Шмальгаузен В.И. Компенсация динамических искажений волнового фронта адаптивной системой с гибким зеркалом. - Квантовая электроника. – 1987, Т.14, № 2. – С. 231 - 232.
43. Воронцов М.А., Кудряшов И.А. Исследование адаптивной оптической системы с последовательным зондированием. - Вестник Московского университета, серия Физика – астрономия. – 1987, Т. 28, № 4. С. 2.

44. Галкин А.А. Гришин Е.А. Ишнин П.П, Шаргородский В.Д. Получение изображений космических аппаратов алтайского оптико-лазерного центра с использованием адаптивной оптики. // Космические исследования, – 2008, Т.46, № 3. – С. 201 – 205
45. Ганиев Р.Ф., Кононенко В.О. Колебания твердых тел.– М.: Наука, 1976.– 430 с.
46. Гершберг Р.Е., Зверева А.М., Петров П.П., Проник В.И., Стешенко Н.В. Проект космического эксперимента «Спектр-УФ». // Космическая наука и технология. – 1995, №1. – С. 47.
47. Гиббс Х. Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света. – М.:Мир. – 1988.
48. Глумов В.М., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Адаптивное управление ориентацией деформируемых космических аппаратов с изменяющимися параметрами. // Автоматика и телемеханика. –1999. № 4. – С. 90-102.
49. Гонткевич В.С. Собственные колебания пластинок и оболочек. – Киев: Наукова думка, 1964. – 287 с.
50. Горохов М.М. Цифровая автоматическая система управления приводом следящего оптико-электронного прибора. // Оптический журнал. – 2004, Т. 71, № 1. – С.48 - 53.
51. Гроп Д. Методы идентификации систем. – М.: Мир. 1979.
52. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием./ Пер. с польского. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
53. Гудмен Дж. Статистическая оптика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 528 с.
54. Девяткин А.В. и др. Оптический датчик угла положения автоматизированного телескопа ЗА-320М Пулковской обсерватории. // Оптический журнал. – 2008. Т. 75, № 1. – С. 73 – 79.
55. Дегтярев Г.Л., Сиразетдинов Т.К. Теоретические основы оптимального управления упругими космическими аппаратами. – М: Машиностроение, 1986. – 215 с.

56. Демин А.В., Денисов А.В., Летуновский А.В. Оптико-цифровые системы и комплексы космического назначения. // Изв. Вузов. Приборостроение. – 2010, Т.53, № 3. – С. 51 - 59.
57. Депутатова Е.А., Калихман Д.М., Полушкин А.В., Садомцев Ю.В. Цифровая стабилизация движений прецизионных управляемых оснований с инерциальными чувствительными элементами. 1. Применение поплавкового измерителя угловой скорости. // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2011. № 1. – С. 120-132.
58. Джанджгава Г.И., Бахонин К.А., Виноградов Г.М., Требухов А.В. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на базе твердотельного волнового гироскопа // Гироскопия и навигация. – 2008, №1. – С. 22 – 32.
59. Димаков С.А., Кислицын Б.В. Математическая модель тонкопленочного зеркала с изменяемой кривизной . // Оптический журнал. – 2000. Т.67. №3. – С.30 - 36.
60. Димов Н.А. и др. Адаптивные зеркала. // Изв. АН СССР. Сер. Физ. – 1982. Т. 46. № 10. – С. 1925.
61. Дорезкж В.А., Наумов А.Ф., Шмальгаузен В.И. Управление жидко кристаллическими корректорами в адаптивных оптических системах.// ЖТФ, 1989. Т. 59. - № 11. - С. 35 - 40.
62. Дулькин Л.З., Карелин А.Д., Николаев Р.П., Пекки Г.Р. Внеатмосферные оптико-электронные комплексы для изучения космического пространства: опыт разработки, основные результаты. Оптический журнал. – 2000, Т. 67. № 5. – С. 98 - 106.
63. Дьяченко А.И. В гостях у телескопа Вильяма Гершеля.// Звездочет. – 2002, № 3, – С. 10-17.
64. Дэвид А. Марка, Клемент Мак Гоуэн. Методология структурного анализа и проектирования. / Пер. с англ. – М.: 1993. – 240 с.
65. Егоров К.Д., Кандидов В.П., Чесноков С.С. Численное исследование распространения интенсивного лазерного излучения в атмосфере// Изв. Вузов сер. Физика, 1983. т.26. -N2. - С. 66 - 78.

66. Ермаков Р.В., Калихман Д.М., Львов А.А., Скрипаль Е.Н. Исследование статистических свойств оптического датчика угла. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2016. № 8 (90). – С. 155 - 158.
67. Ермолаева Е.В., Зверев В.А., Филатов А.А. Адаптивная оптика. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 297 с.
68. Ефанов В.В., Пичкадзе К.М. Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. Том 1. – М.: МАИ, 2012. – 526 с.
69. Ефанов В.В., Хартов В.В. Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. Том 2. – М.: МАИ, 2014. – 544 с.
70. Ефанов В.В., Хартов В.В. Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. Том 3. – М.: МАИ, 2014. – 464 с.
71. Жбанов Ю.К. Поверхностный дисбаланс волнового твердотельного гироскопа. // Изв. РАН. МТТ, – 2001, № 3.
72. Жбанов Ю.К. Самонастраивающийся контур подавления квадратуры в волновом твердотельном гироскопе. // Гироскопия и навигация, – 2007, № 2 (57). – С. 37 - 41.
73. Жбанов Ю.К., Журавлев В.Ф. О балансировке волнового твердотельного гироскопа. // Изв. АН. Механика твердого тела. – 1998, № 4.
74. Журавлев В.Ф., Климов Д.В. Волновой твердотельный гироскоп. – М.: Наука, 1985. – 125 с.
75. Журавлев В.Ф. О дрейфе волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) на вращающемся основании при управлении квадратурой в режимах «быстрого» и «медленного» времени. // Изв. РАН. МТТ. – 2003. № 3.
76. Журавлев, В.Ф. Волновой твердотельный гироскоп: современное состояние теории // Российско-американский журнал «Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент». – 2011. № 2(33).

77. Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В. Исследование вибрационных микроускорений на борту международной космической станции. // Космические исследования. – 2013, Т. 51, № 4. – С. 294.
78. Зельдович Б. Я, Пилипецкий Н. Ф., Шкунов В. В. Обращение волнового фронта.— М.: Наука, 1985.
79. Зорина О.А., Измайлов Е.А., Кухтевич С.Е. и др. О расширении возможностей интеграции инерциальных и спутниковых навигационных систем для авиационных приложений. // Гироскопия и навигация. – 2017, Т. 25, № 2(97). – С. 18 – 34.
80. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. – М.: Радио и связь, 1981. – 287 с.
81. Ибрагимов И.Д., Скребушевский Б.С. О некоторых методах преобразования систем координат в задачах космической баллистики. // Полет. –2003. №2. – С. 30 - 34.
82. Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов. – М.: Дрофа, 2004. – 544 с.
83. Изосимов Д.Б., Рывкин С.Е., Байда С.В. Синтез следящей системы управления электромеханическими объектами с упругими механическими передачами. // Мехатроника, автоматизация, управление.– 2004. № 3. – С. 9 - 17.
84. Исупов К.С. Программный комплекс для разработки и анализа системы прецизионного управления угловым положением вторичного зеркала двухзеркального космического телескопа: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.01, – Ижевск, 2003. – 136 с.
85. Ишлинский А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М.: Наука, 1976. – 672 с.
86. Калинин В.Н., Соколов Б.В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. – 1995. № 1. – С.56 - 61.
87. Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф. Обобщенная концепция построения цифровых систем управления стендами с инерциаль-

- ными чувствительными элементами. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. № 10. – С. 91 - 103.
88. Кандидов В.П., Кудряшов А.В., Ларионова И.В., Попов В.В., Чистяков И.М. Интерференционное исследование управляемого упругого зеркала для компенсации низших аберраций фазы. // Квантовая электр., 1990. Т. 17. - № 6. - С. 801 - 804.
89. Канев Ф.Ю., Чесноков С.С. Упругое зеркало в задаче адаптивной компенсации стационарного теплового самовоздействия. // Оптика атмосферы. – 1989. Т.2. № 3. – С. 369 - 375.
90. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. – 250 с.
91. Канев Ф.Ю., Макенова Н.А., Лукин В.П., Антипов О.Л., Веретехин И.Д.. Адаптивная компенсация тепловых искажений многоканального лазерного излучения // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т.31. №2. С. 90 - 94.
92. Капцов Л.Н., Кудряшов А.В., Самаркин В.В., Селиверстов А.В. Управление параметрами излучения твердотельного технологического ИАГ лазера методами адаптивной оптики. 2. Сферическое адаптивное зеркало. // Квант, электр., 1992. Т. 19. №6 – С. 579 - 580.
93. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Аншаков Г.П., Сторож А.Д. Космическое аппаратостроение. Научно-технические и практические разработки ГНП РКЦ «ЦСКБ–Прогресс» – Самара: Изд. Дом «Агни», 2011. – 280 с.
94. Кириченко Д.В., Клейменов В.В., Новикова Е.В. Крупногабаритные оптические космические телескопы. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017, Т. 60, № 7. – С. 589 - 602.
95. Клевцов Ю.А. Оптические системы широкоугольных телескопов для мониторинга небесных объектов. // Оптический журнал. – 2017, Т. 84, № 9. – С. 25 - 33.
96. Клейменов В.В., Новикова Е.В. Наземные и космические адаптивные телескопы // Оптический журнал. – 1988. Т. 65, № 6. – С. 3 - 15.

97. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 544 с.
98. Ковтуненко В.М., Камеко В.Ф., Яскевич Э.П. Аэродинамика орбитальных космических аппаратов. - Киев: Наукова думка, 1977. – 156 с.
99. Козьмирченко В.Ф., Лесков А.Г., Введенский В.А. Системы следящих приводов. – М.: Энергоатомиздат, 1993, – 304 с.
100. Конюхов С.Н. Научно-технические направления разработок космических аппаратов КБ «Южное» им. М.К.Янгеля. – Космическая наука и технология, 1995, №1. – С. 12 - 35.
101. Корябин А.В., Кудряшов А.В., Кузьминский А.Л., Морозов Г.В., Шмальгаузен В.И. Адаптивная коррекция аберраций волнового фронта в реальном времени. // Оптика атмосферы, 1989, - т.2, - № 3, С. 335 - 337.
102. Космическая оптика: Труды IX Международного конгресса Международной комиссии по оптике. – М.: Машиностроение, 1980.
103. Космический астрометрический эксперимент ОЗИРИС./ Под ред. Рыхловой Л.В., Куимова К.В. – Фрязино: «Век 2», 2005. – 350 с.
104. Кофтонюк Н.Ф., Соколов А.В. Дифракционное расплывание и автоволны в оптической системе с двумерной обратной связью. // Оптический журнал. – 2003. Т. 70, №3. – С.21 - 26.
105. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. – М.: Наука, 1973.
106. Кудряшов А., Лылова А., Самаркин В., Шелдакова Ю. Формирование кольцевого и супергауссова распределений интенсивности лазерного излучения в дальней зоне с использованием биморфного зеркала. // Квантовая электроника, 2018. – 48(1), С. 57 – 61.
107. Кузнецов А.Г., Измайлов Е.А. Технология создания инерциальных навигационных систем. // Труды ФГУП НПЦАП. Системы и приборы управления. – 2012, № 1. – С. 3 – 16.

108. Лаврионова Л.Н., Лукин В.П., Адаптивная коррекция тепловых и турбулентных искажений лазерного излучения деформируемым зеркалом. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2008. – 152 с.
109. Лаврионов В.В. Динамическое управление адаптивной оптической коррекцией турбулентных искажений лазерного излучения. // Оптика атмосферы и океана. – 2017, Т. 30, № 10. – С. 893 – 901.
110. Ландау Б.Е. и др. Основные результаты разработки и испытаний системы определения ориентации на электростатических гироскопах для низкоорбитальных космических аппаратов. // Гироскопия и навигация. – 2007, №2 (57). – С. 3 – 12.
111. Лазерная космическая связь / Под ред. М. Катцмана. – М: Радио и связь, 1993.
112. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере / А. С. Гурвич, А. И. Кон, В. Л. Миронов, С. С. Хмелевцов. – М.: Наука, 1976. – 278 с.
113. Лобанов В.С., Тарасенко Н.В., Шульга Д.Н., Зборошенко В.Н., Беляев Б.Б. Перспективные астоинерциальные системы управления астрофизических космических аппаратов // Гироскопия и навигация.– 2013, №3 (82).– С. 72–83.
114. Ловлин С.Ю., Арановский С.В., Смирнов Н.А., Цветкова М.А. Сравнение различных подходов к построению линейных систем управления прецизионными электроприводами. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013, № 3. – С. 31 – 38.
115. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840с.
116. Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика. – Новосибирск: Наука, 1986. – 248 с.
117. Лукин В.П., Фортес Б.В. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 212 с.
118. Лукин В.П. Миронов В.Л. Динамические характеристики адаптивных оптических систем. // Квантовая электроника. – 1985. Т.12. № 9. – С. 1959 - 1961.
119. Лукин В.П. Адаптивное формирование оптических изображений в атмосфере. // УФН, Т. 176. – 2006, № 9. – С. 1000 – 1006.

120. Лукьянов Д.П., Корниенко А.А., Рудницкий Б.Е. Оптические адаптивные системы / Под ред. Д.П. Лукьянова.– М.: Радио и связь, 1989.– 240 с.
121. Лунин Б.С. Физико-химические основы разработки полусферических резонаторов ВТГ. Учебное пособие. – М: МАИ, 2005. – 224 с.
122. Лурье А.И. Аналитическая механика. – М.: Физматгиз, 1961. – 819 с.
123. Лурье А.И. Некоторые задачи об изгибе круглой пластинки. / ПММ. – 1940, Т4, вып.1. – С. 93 - 101.
124. Любимов В.В., Малышев В.И., Семкин Н.Д. Управление ориентацией малого спутника с учетом отказов в системе разгрузки кинетических моментов маховиков // Гироскопия и навигация. – 2013, №2. – С. 31 – 41.
125. Максutow Д.Д. Астрономическая оптика. – Л.: Наука, 1979. –375 с.
126. Мальцев Г.Н. Токарев С.В. Анализ условий наблюдения за техногенными космическими объектами наземными оптико-электронными системами. // Оптический журнал. – 2001, Т. 68. №4. – С. 16 - 20.
127. Мальцев Г.Н. Выбор граничной частоты контура управления следящим зеркалом адаптивного телескопа при наблюдении за движущимися объектами. // Оптический журнал. – 2003, Т. 70, №3. – С. 45 - 49.
128. Матвеев В.А., Липатников В.И., Алехин А.В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа. – М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997.–168 с
129. Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 5 тт. Т1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления./ Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д.Егупова– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004.– 657 с.
130. Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 5 тт. Т2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления./ Под ред. К.А.Пупкова, Н.Д.Егупова.– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 640 с.
131. Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 5 тт. Т3: Синтез регуляторов систем автоматического управления./

- Под ред. К.А.Пупкова, Н.Д.Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 616 с.
132. Минович Л., Барух Х., Оз Х. Сравнение методов управления для больших упругих систем. // *Аэрокосмическая техника*. – 1984, Т2, № 5. – С. 134 - 145.
  133. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1990.–304 с.
  134. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. – М.: Наука, 1976.
  135. Монтенбрук О., Пфлегер Т. Астрономия на персональном компьютере. – СПб.: Питер, 2002. – 320 с.
  136. Мустафаев М.И. Оптимальное управление формой поверхности с помощью отдельно расположенных постоянных воздействий. // *Автоматика и телемеханика*. – 1981, N10.
  137. Никифоров В.О., Дроздов В.Н. Адаптивное управление мехатронным поворотным столом. Часть 1. Анализ свойств объекта управления. // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2002. № 4. – С. 18 - 21.
  138. Никифоров В.О., Дроздов В.Н. Адаптивное управление мехатронным поворотным столом. Часть 2. Синтез и экспериментальное исследование системы управления. // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2002, № 5.– С. 8-12
  139. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Структура турбулентности на специализированных оптических трассах в астрономических телескопах. // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2016, Т.59, № 12-2. – С. 134 – 137.
  140. Обухов П.С., Гвинджилия В.Е. Система управления опорно-поворотным устройством телескопа. // *Молодой исследователь Дона*. – 2017, № 5.– С. 88 – 92.
  141. Оптические и инфракрасные телескопы 90-х годов. / Под ред. А.Хьюит; Пер. с англ. / Под ред. П.В.Щеглова. – М.: Мир, 1983. – 294 с.
  142. Оптические телескопы будущего. / Под ред. Ф.Пачини, В.Рихтера, и Р.Вильсона; Пер. с англ. / Под ред. П.В.Щеглова.– М.: Мир, 1981.– 432 с.

143. Орбитальное гирокомпасирование / Бессекерский В.А., Иванов В.А., Самошкин Б.Б.; Под ред. Самошкина Б.Б.– СПб: Политехника, 1993.– 256 с.
144. Осмоловский П.Ф. Итерационные многоканальные системы автоматического управления. – М.: Сов. радио, 1969.
145. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 1898. – 367 с.
146. Пинигин Г.И. Телескопы наземной оптической астрономии. Учебное пособие. – Николаев: Атолл, 2000. – 104 с.
147. Полушкин А.В., Калихман Л.Я., Калихман Д.М., и др. Результаты разработки универсальной аппаратуры для компьютерного контроля широкого класса инерциальных приборов. // Гироскопия и навигация. – 2009, № 1. – С. 86-100.
148. Попов А.Н. Динамические свойства системы подчиненного управления электроприводом с пропорциональным регулятором. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. № 2. – С. 32 – 36.
149. Попов А.Н. К обоснованию передаточной функции цепи возбуждения двигателя. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. № 5. – С. 24 – 26.
150. Попов А.Н. По поводу динамической жесткости в электромеханических системах. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. № 5. – С. 30 – 33.
151. Попов А.Н. Состояние основ теории электропривода. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. № 6. – С. 25 – 27.
152. Попов Г.М. Современная астрономическая оптика. – М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 192 с.
153. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. – М.: Синтез, 2000.
154. Пузырев В.А., Данилевич А.Б. Системы автоматической коррекции волнового фронта. // Зарубежная электроника. – 1980. № 6. – С. 45.
155. Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н. Управление ориентацией космических аппаратов. – М.: Наука, 1974. – 600с.

156. Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление. – М.: Наука. 1978. – 552 с.
157. Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Большие космические конструкции: модели, методы исследования и принципы управления. Ч.1. // Автоматика и телемеханика. – 1996. № 7. – С. 52 - 65.
158. Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Большие космические конструкции: модели, методы исследования и принципы управления. Ч.2. // Автоматика и телемеханика. – 1996. № 8. – С. 55 - 66.
159. Рутковский В.Ю., Суханов В.М., Глумов В.М. Стабилизация упругих колебаний конструкции крупногабаритных спутников с переменными параметрами методами адаптации. // Автоматика и телемеханика. – 2011, № 12.
160. Рутковский В.Ю., Суханов В.М., Глумов В.М. Комбинированное релейно-адаптивное управление ориентацией деформируемого космического аппарата. // Автоматика и телемеханика. – 2012, № 12.
161. Рябова Н.В. Составные активные зеркала для телескопов. // Оптико-механическая промышленность. – 1975. № 11. – С. 58.
162. Рябова Н.В. Концепция двухступенчатой оптики для крупных телескопов // Оптический журнал. – 1995. №10. – С. 4 - 12.
163. Рябова Н.В., Еськов Д.Н., Данилкин А.П. Малые искусственные спутники с оптикоэлектронной аппаратурой в программах дистанционного зондирования Земли. // Оптический журнал. – 1996, N1. С. 4 - 20.
164. Садовников М.А., Томасов В.С., Толмачев В.А. Прецизионный электропривод для оптических комплексов контроля космического пространства. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2011, Т. 54, № 6. – С. 81 – 86.
165. Сачков М.Е., Шустов Б.М., Моишеев А.А. и др. Комплекс научной аппаратуры обсерватории «Спектр-УФ». // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2014, № 5 (26). – С. 34 – 39.
166. Сигналы и помехи в лазерной локации. / Под ред. В.Е.Зуева. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
167. Сикорук Л.Л. Телескопы для любителей астрономии. – М.: Наука, 1990.

168. Силкин Б.И. На пути к телескопам великанам. //Звездочет,2000, №7, С.19–23
169. Следящие приводы. / Под ред. Б.К.Чемоданова. Т 1: Теория и проектирование следящих приводов. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э.Баумана, 1999. - 904 с.
170. Современные телескопы/ Под ред. Дж. Бербиджа, А.Хьюит: пер. с англ. –М.: Мир, 1984. – С 149 - 215.
171. Современные системы управления / Р.Дорф, Р.Бишоп. Пер. с англ. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.
172. Сомов Е.И. Офсетное гидирование и нониусная стабилизация изображения большого космического астрономического телескопа // XX Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. – СПб.: – 2013 –С. 221 – 229.
173. Справочник по инфракрасной технике. Т.2 Проектирование оптических систем. / Ред. У.Вольф, Г.Цисис.: Пер. с англ. – М: Мир, 1988 – 347 с.
174. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике./ Абалакин В.К., Аксенов Е.П., Гребенников Е.А., ДеминВ.Г., Рябов Ю.А. / Под ред. Г.Н. Дубошина – М.: Наука, 1976. – 864 с.
175. Стешенко Н.В. Оптический телескоп диаметром 25 метров с составным главным зеркалом. // Изв. Крымской астрофиз. Обсерватории.–1981,Т.63.– С. 161.
176. Стешенко Н.В., Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении. // Итоги науки и техники. Сер. «Управление пространственной структурой оптического излучения». Т.1. – М.: ВИНТИ, 1990. – С. 107 – 167.
177. Сухомлинов Г.Л. Михайлова В.Л. Вычислительная модель для исследования фрикционных автоколебаний релаксационного типа в упругих элементах приборов и систем управления. // Авиакосмическое приборостроение. – 2003, № 11. – С. 26 - 33.
178. Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении / В.В. Сычев. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 464 с.
179. Сычев В.В., Печенов А.С. Адаптивная оптика крупногабаритных астрономических телескопов // Оптический журнал. – 2001. № 8. – С. 93 – 98.

180. Сычев В.В., Касперский В.Б., Машинина М.Л. Оптическая система адаптивного 25-метрового телескопа с составным главным зеркалом из сферических сегментов. // Оптический журнал. – 2007, Т. 74, № 2. – С.19–23.
181. Сычев В.В. Основные постулаты адаптивной коррекции искажений волнового фронта в крупногабаритных оптических системах. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014, № 3. – С. 310 - 328.
182. Сычев В.В. К вопросу об эффективности крупногабаритных оптических телескопов. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015, № 1. – С. 101 - 113.
183. Сычев В.В. Технологические аспекты создания крупногабаритных оптических телескопов. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015, № 2. – С. 269 – 285.
184. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
185. Тараненко В.Г. Теоретические и экспериментальные исследования адаптивного зеркала при случайных фазовых возмущениях. // Изв. АН СССР. Сер. Физ. – 1984. Т. 48. № 7. – С. 1419 - 1423.
186. Тараненко В.Г., Кошелев Г.П., Романюк Н.С. Локальные деформации сплошных зеркал и их частотные зависимости. // Оптико-механическая промышленность. – 1981. № 11.
187. Тараненко В.Г., Горохов Ю.Г., Романюк Н.С. Зеркала для адаптивных оптических систем. // Зарубежная электроника. – 1982. № 8. – С. 19 - 43.
188. Тараненко В.Г. Шанин О.И. Адаптивная оптика. – М.: Радио и связь, 1990. – 112 с.
189. Тараненко В.Г. Шанин О.И. Адаптивная оптика в приборах и устройствах. – М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2005. – 416 с
190. Терещих В.Ю. Современные оптические телескопы. - М.:Физматлит, 2005. – 79 с.
191. Товмасын Г.М. Ультрафиолетовые телескопы на орбите. // Космонавтика и Астрономия. – М.: Знание, – 1989, № 5.

192. Токовинин А.А. Звездные интерферометры.– М.: Физматлит,1988.– 160с
193. Токовинин А.А. Орбитальные оптические телескопы. // Космонавтика и Астрономия. – М.: Знание, – 1986, № 11.
194. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
195. Тятюшкин А.И. Многометодная технология для расчета оптимального управления. // Теория и системы управления. – 2003. № 3. – С. 45 – 51.
196. Устинов Н.Д., Матвеев И.И., Протопопов В.В. Методы обработки оптических полей в лазерной локации. – М.: Наука, 1983. – 272 с.
197. Устойчивость адаптивных систем. Пер с англ. / Андерсон Б., Битмид Р., Джонсон К. и др. – М.: Мир, 1989. – 263 с.
198. Уокер Г. Астрономические наблюдения.: Пер. с англ. – М.:Мир, 1990. - 352 с.
199. Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г. Методы теории автоматического управления. – М.: Наука. 1971. – 774 с.
200. Филиппов А.П. Колебания деформируемых систем. — М.: Машиностроение, 1970. – 736 с.
201. Формирование динамических свойств упругих космических аппаратов / Титов Б.А., Вьюжанин В.А., Дмитриев В.В.– М.: Машиностроение, 1995.– 304 с.
202. Фрид Д.Л. Гетеродинный прием оптического сигнала при атмосферных искажениях волнового фронта. // ТИИЭР. – 1967. № 1. – С. 62 – 72.
203. Харди Дж. Активная оптика: новая техника управления световым пучком. // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66, № 6. – С. 31 – 85.
204. Хафтка Р.Т. Оптимальное размещение органов управления статическими деформациями космических конструкций. // Аэрокосмическая техника. – 1985. Т3. № 6. – С. 80 - 87.
205. Цуканова Г.И., Бахолдин А.В. Оптические схемы крупногабаритных много-спектральных телескопов. // Оптический журнал. – 2013, Т. 80, № 12. – С. 37 – 41.
206. Чемоданов Б.К., Данилов В.Л., Нефидов В.Д. Астроследящие системы // Под ред. Б.К. Чемоданова.– М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.

207. Черноусько Ф.Л. Движение твердого тела с полостями, содержащими вязкую жидкость. – М.: ВЦ АН СССР, 1968.
208. Шанин О.И. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. – М.: Техносфера, 2013. – 296 с.
209. Шаров П., Павельцев П. Новости «Телескопа Вебба». Проект JWST // Новости космонавтики. – 2002, № 11; 2003, № 11; 2005, № 1; 2005, № 10.
210. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Аппроксимация структурной функции фазы волнового фронта // Оптика атмосферы. – 1989, Т 2, № 2, – С. 160-163.
211. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Оптимизация расположения приводов в пластинчатых гибких зеркалах // Оптика атмосферы. – 1989, Т 2, № 3, – С.326 - 328.
212. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Проектирование измерительного устройства для систем атмосферной адаптивной оптики // Оптика атмосферы. – 1989, Т 2, № 5, – С. 555 - 560.
213. Шишаков К.В., Исупов А.Н., Артемьева Е.М. Проектирование электростатического привода мембранного корректора волнового фронта // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 1989, № 6, – С.62-65.
214. Шишаков К.В., Воронцов М.А., Управление фазой световых пучков с помощью оптической обратной связи // Квантовая электроника. – 1989, Т 16, № 6, – С. 1101 - 1103.
215. Шишаков К.В., Исупов А.Н., Евсеев О.А. Мембранное гибкое зеркало для адаптивных оптических информационно-измерительных систем // Оптика атмосферы. – 1989, Т 2, № 8, – С. 830 - 835.
216. Шишаков К.В. Оптимизация формы электростатического привода в мембранных корректорах волнового фронта // Вестник МГУ. Сер.3. Физика, астрономия. – 1989, Т 30, № 3, – С. 95 - 98.
217. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Слабокоррелирующие полиномы для описания атмосферных аберраций // Вестник МГУ. Сер.3. Физика, астрономия. – 1989, Т 30, № 4, – С. 89 - 91.

218. Шишаков К.В., Воронцов М.А., Компенсация искажений волнового фронта в пассивных нелинейных кольцевых резонаторах // Препринт физического факультета МГУ. – 1989, № 27, – 4 с.
219. Шишаков К.В., Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Компенсация фазовых искажений в нелинейных усилителях с оптической обратной связью // Сб. "Обращение волнового фронта лазерного излучения в нелинейных средах". – Минск, 1990, – С. 361-364
220. Шишаков К.В., Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Управление волновым фронтом в системах с оптической обратной связью // Известия АН СССР. Сер. Физическая. – 1990, Т 54, № 6, – С. 1060 - 1065.
221. Шишаков К.В., Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. О компенсации искажений волнового фронта в нелинейных резонаторах Фабри-Перо // Оптика и спектроскопия. – 1990, – Т. 2. – В. 2. – С. 471 – 473.
222. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Расчет гибких пластинчатых зеркал для компенсации атмосферной турбулентности // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 1990, - Т 33, - № 11. – С. 63-67.
223. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Полиномиальное разложение атмосферных aberrаций // Оптика атмосферы. – 1990, Т 3, № 12.
224. Шишаков К.В. Об устойчивости световых полей в пассивных нелинейных кольцевых резонаторах // Вестник МГУ. Сер.3. Физика, астрономия. – 1990, Т 31, № 6. – С. 89-91
225. Шишаков К.В., Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Адаптивные системы фокусировки излучения с локальным контуром оптической обратной связи // Известия ВУЗов. Радиофизика.– 1990, Т. 33, № 11.– С. 1272-1277
226. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Анализ динамической коррекции атмосферных aberrаций гибкими зеркалами // Оптика атмосферы. – 1991, Т 4, № 2.
227. Шишаков К.В., Воронцов М.А. Фазовые эффекты в пассивных нелинейных резонаторах // Квантовая электроника. – 1991, № 1.

228. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И., Кудряшов И.А. Оптимизация градиентных методов поиска экстремума в адаптивных оптических системах // Известия ВУЗов. Приборостроение.– 1991, Т. 34, № 2.– С. 84 – 87.
229. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Метод оптимизации управления поверхностью в задачах с обратной связью. // Автоматика и телемеханика. – 1992, № 2. – С. 54 – 60.
230. Шишаков К.В., Сеидов А. Исследование оптической рефракции на приземных трассах в аридной зоне // Оптика атмосферы.– 1993, Т 6, № 1. – С. 42 - 49.
231. Шишаков К.В. Ротационная неустойчивость световых полей в нелинейных кольцевых резонаторах // Труды НПК “Дифференциальные уравнения и их приложения” Ашгабад. – 1993, Ч 3. – С. 131 - 136.
232. Шишаков К.В., Сеидов А. Исследование вертикальной зависимости оптической рефракции в приземном слое атмосферы // Известия АН Туркменистана. Сер. ФТХГ. – 1995, № 5. - С. 133 - 135.
233. Шишаков К.В. Адаптивная компенсация флуктуаций световых полей в лазерных усилителях // Труды института математики и механики АН Туркменистана. – Ашгабад, 1995. – С. 225 – 234.
234. Шишаков К.В., Сеидов А. О возможности повышения точности метрологического метода определения оптической рефракции на приземных трассах // Известия АН Туркменистана. Сер. ФТХГ. – 1996, № 6. - С. 54 - 59.
235. Шишаков К.В., Бендер С.А. Расчет динамики пластин переменной толщины со свободными участками сложного контура с помощью конечно-разностного метода. // Редакция журнала «Известия ВУЗов. Авиационная техника». - Казань. 1998. – 18 с. - Деп в ГУП «ВИМИ» № Д0 8759.
236. Шишаков К.В., Газизов С.Г. Проектирование жидкостных маховиков-демпферов для стабилизации малых КА. // Проблемы и технологии создания и использования космических систем и комплексов на базе малых КА и орбитальных станций. Тез.докл. 2 Межведомственного научно-практич. семинара 26-30 октября 1998 г. ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, Москва, 1998. С. 94.

237. Шишаков К.В., Газизов С.Г. Математическое моделирование стабилизации малых КА на низких орбитах с помощью жидкостных демпферов и аэродинамических рулей // Проблемы и технологии создания и использования космических систем и комплексов на базе малых КА и орбитальных станций. Тез.докл. 2 Межведомственного научно-практического семинара 26-30 октября 1998 г. ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, Москва, 1998. С.95.
238. Шишаков К.В., Газизов С.Г. Анализ управления малым спутником при аэродинамической, гравитационной и активной стабилизации. // Космические исследования. – 1999, № 3, – С. 296 – 305.
239. Шишаков К.В., Бендер С.А. Численное сравнение методов интегрирования конечно-разностных уравнений динамики пластин. // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 1999, № 4. – С. 78 - 80.
240. Шишаков К.В. Точность вычисления ошибки слежения в двухканальной системе пространственной ориентации по слабому сигналу. // Автоматика и телемеханика. – 2000, № 4, – С. 88 - 96.
241. Шишаков К.В., Ефремов С.М., Газизов С.Г. Решение некоторых задач оптимизации одномерных моделей упругих элементов приборов. // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 2000. № 2. – С. 60-62.
242. Шишаков К.В., Газизов С.Г. Коррекция аберраций космического телескопа по функционалам интенсивности при превышении размеров ячеек регистрации над пятном фокусировки. // Оптический журнал. – 2000, № 5, – С. 79 - 81.
243. Шишаков К.В., Исупов А.Н. Построение моделей подсистем уникальных комплексов с использованием 3D-технологий. // Газоструйные импульсные системы: Сб.ст. – Ижевск: ИжГТУ, 2000. Т.2. - С. 248 – 258.
244. Шишаков К.В., Бендер С.А. Переходные процессы в консольных пластинах при угловых перемещениях // Сб. “Газоструйные импульсные системы”: Сб.ст. – В 2 т. - Ижевск, ИжГТУ. 2000. Т.2. - С.197-206.
245. Шишаков К.В., Газизов С.Г. Расчет и оптимизация конструктивных параметров упругих элементов технических систем // Сб. “Газоструйные импульсные системы”. Ижевск, ИжГТУ. – 2000, Т 2. - С. 207-226.

246. Шишаков К.В., Бендер С.А. Расчет управления формой поверхности пластинчатых кольцевых зеркал. // Вестник ПГТУ. Аэрокосмическая техника. – Пермь: ПГТУ, 2000. № 7. – С. 21 - 27.
247. Шишаков К.В., Газизов С.Г., Молин С.М. Анализ амплитудно-фазовых частотных характеристик при виброиспытаниях составных балочных элементов переменного сечения // Техника машиностроения. – 2000. № 5. – С. 57 - 60.
248. Шишаков К.В., Исупов К.С., Ефремов С.М. Построение передаточной функции модуля прецизионного наведения космического телескопа // Техника машиностроения. – 2001, № 5, – С. 27 - 29.
249. Шишаков К.В., Газизов С.Г., Ефремов С.М. Анализ конструктивных элементов балочного типа при проектировании прецизионных космических приборов // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 2001, № 4, – С. 61 - 63.
250. Шишаков К.В., Исупов К.С. Проектирование контура управления следящей системы с дискретным измерительным сигналом // Наука производству. – 2002. № 1. - С. 30 - 32.
251. Шишаков К.В., Исупов К.С., Кузнецов П.Г. Формирование моделей сложных упругих объектов управления аэрокосмического назначения // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 2002, № 2. – С. 71 - 73.
252. Шишаков К.В., Исупов А.Н. Системный анализ проблемы наведения большого наземного информационного телескопа. // Вестник ИжГТУ. – 2005, № 1, – С. 18 – 31.
253. Шишаков К.В. Модель электропривода при наличии пульсаций выходных характеристик. // Вестник ИжГТУ. – 2006, №2. – С. 42 - 48.
254. Шишаков К.В., Исупов А.Н. Построение имитационной модели для системного проектирования элементов наведения большого телескопа. // Системный анализ в проектировании и управлении: Труды X Междун. НПК, Ч.3. – Санкт-Петербург, 2006. – С. 49 - 53
255. Шишаков К.В. Управление прецизионным электроприводом в условиях возмущений. // Вестник ИжГТУ. – 2007, № 3. – С. 81 – 83.

256. Шишаков К.В. Методика предварительной системной оценки параметров приводов наведения больших оптических систем. // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства. Труды 3 НТК (Ижевск, 14-15 апреля 2006г) – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, – 2007. – С.197 – 202.
257. Шишаков К.В. Проблемы наведения инфокоммуникационной системы с большой апертурой. // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: Труды V Всерос. НТК с участием СНГ (Ульяновск, 19-20 июня 2007). – Ульяновск: УлГТУ, – 2007. – С. 105 - 108.
258. Шишаков К.В. Моделирование оптических элементов в программе ZEMAX: практикум для учебных курсов «Прикладная оптика» и «Оптические устройства в радиотехнике» / Шишаков К.В., Загидуллин И.Р. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ. – 2008. – 64 с.
259. Шишаков К.В. Использование программных пакетов Zemax, Code V, OSLO и TracePro для проектирования и расчета оптических устройств: учебно-методическое пособие к лабораторным занятиям по учебным курсам «Прикладная оптика», «Оптические устройства в радиотехнике» и «Информационные лазерные технологии» / Под ред. Шишакова К.В. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ. – 2008. – 72 с.
260. Шишаков К.В. Структурная декомпозиция многоканального наведения информационной оптической системы с большой апертурой. // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства. Труды 4 НТК (Ижевск, май 2007 г) – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, – 2008. – С. 129 – 136.
261. Шишаков К.В. Проблемы и принципы управления оптико-механическими комплексами наведения больших наземных телескопов. // Интеллектуальные системы в производстве, Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ, – 2009, № 2. – С. 177 - 185.
262. Шишаков К.В. Системный анализ параметров сканирующих зеркал. // Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ, – 2009. № 1 – С. 188 – 199.

263. Шишаков К.В. Построение модели волновой динамики резонатора твердотельного волнового гироскопа. // Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ. – 2009, № 2. – С.66 – 75.
264. Шишаков К.В. Частотный анализ состава системы наведения большого телескопа. // Интеллектуальные системы в производстве, Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ. – 2010, № 1. – С. 249 - 257.
265. Шишаков К.В. Создание управляющих моментов с помощью жидкостных маховиков. // Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ. – 2010, № 1 – С.108 - 114.
266. Шишаков К.В., Дементьев А.Н. Разработка алгоритмов идентификации негеостационарных источников непреднамеренных помех. // Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ. – 2010. № 2. – С.121 - 131.
267. Шишаков К.В. Анализ систематического дрейфа стоячей волны в твердотельном волновом гироскопе. // Вестник ИжГТУ. – 2010, № 4. – С. 144 – 148.
268. Шишаков К.В. Модели объекта управления для системы поддержания стоячей волны в твердотельном волновом гироскопе. // Вестник ИжГТУ. – 2010, № 3. – С. 144 – 147.
269. Шишакова К.В. Компьютерное моделирование оптических элементов и систем: Учебное пособие / Под ред. Шишакова К.В. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ. – 2010. – 156 с.
270. Шишаков К.В. Управление угловым перемещением сложного прецизионного объекта. // Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ. – 2011, № 2 – С.221 - 235.
271. Шишаков К.В. Информационные оптические системы космического назначения с многоканальным управлением.– Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011.– 346с
272. Шишаков К.В. Повышение помехоустойчивости алгоритма обработки измерительных сигналов твердотельного волнового гироскопа. // Вестник ИжГТУ. – 2012, № 1. – С. 76 – 79.

273. Шишаков К.В. Системный анализ и синтез упругой конструкции большого телескопа с элементами управления // Вестник ИжГТУ – 2012, № 1.– С. 112 – 115
274. Шишаков К.В. Системный анализ погрешностей информационного сигнала ТВГ и методов их компенсации. // Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ, 2012. - №1 – С. 181 - 191.
275. Шишаков К.В. Систематизация направлений разработки алгоритмов наведения больших наземных телескопов. // Приборостроение в XXI веке – 2011. Интеграция науки, образования и производства. Труды 7 НТК (Ижевск, 15-17 ноября 2011г) – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, – 2012. – С. 445– 449.
276. Шишаков К.В., Мачехин П.К. Анализ вариантов уменьшения систематического дрейфа твердотельного волнового гироскопа. // Приборостроение в XXI веке – 2011. Интеграция науки, образования и производства. Труды 7 НТК (Ижевск, 15-17.11.2011г) – Ижевск: Изд-во ИжГТУ,– 2012.– С. 432– 435.
277. Шишаков К.В., Бояршинов М.А., Караваев П.В., Батурич А.С., Савельев А.В. Методика расчета радиолоний между двумя антеннами. // Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ, 2016. - № 3 – С.64 - 67.
278. Шишаков К.В., Бояршинов М.А., Караваев П.В., Батурич А.С., Савельев А.В. Расчет и повышение эффективности основных параметров радиолоний с укороченными вибраторными антеннами КВ и УКВ диапазонов. // Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ, 2017. - № 1 – С.47 - 51.
279. Шишаков К.В., Симонов М.В. Анализ точностных и массогабаритных характеристик отечественных бесплатформенных инерциальных навигационных систем. // Сб. «Проблемы современных интеграционных процессов и пути их решения». Сб. статей Междунар. НПК. – 2017. – С. 68 – 75.
280. Шишаков К.В., Закиров А.А. Алгоритмическое обеспечение макета бесплатформенной инерциальной навигационной системы на основе твердотельных волновых гироскопов // В сб.: Приборостроение в XXI веке - 2017. Интеграция

- науки, образования и производства. Труды XIII Междунар. НТК. – 2018. – С. 582 - 587.
281. Шишаков К.В., Верба Б.П., Мосунов Д.Г. Проектирование антенны диапазона 230-280 МГц: моделирование основных параметров, исследование ШСУ различных типов. // Вестник ИжГТУ.– 2018.- № 3 – С. 149-154
282. Шишаков К.В., Талибуллин Р.Ф., Назаров С.Б. Режимы управления волновыми процессами в твердотельном волновом гироскопе с двухканальной системой возбуждения резонансных колебаний. // Приборостроение в XXI веке – 2018. Интеграция науки, образования и производства. Труды XIV Междунар. НТК – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, – 2018.
283. Шишаков К.В. Твердотельные волновые гироскопы: волновые процессы, управление, системная интеграция. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2018. – 264 с.
284. Шустов Б.М. Большие оптические телескопы будущего // Земля и Вселенная. – 2004, № 2.
285. Шустов Б. Открытие неба. // Поиск. – 2005, № 37 (851). – С. 9.
286. Шульце К.-П., Реберг К.-Ю. Инженерный анализ адаптивных систем: Пер. с нем. – М.: Мир, 1992. – 280 с.
287. Шульц Дж., Хаймболт Дж. Выбор несовмещенного расположения приводов и датчиков и синтез системы управления с обратной связью для упругих конструкций. // Аэрокосмическая техника. – 1984. Т2. № 8. – С. 184 - 191.
288. Щеглов П.В. Проблемы оптической астрономии. – М.: Наука, 1980.
289. Эклз М., Сим Э., Триттон К. Детекторы слабого излучения в астрономии.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 200 с.
290. Эшли Х. О механизмах пассивного демпфирования больших космических конструкций.// Аэрокосмическая техника.– 1985. Т3. № 6.– С.18-28.
291. Яскович А.Л., Зверев А.В., Шустов Б.М. Оптимизация оптической системы телескоп – блок фокальных приборов в проекте «Спектр-УФ». // Оптический журнал, – 2006, Т.73. № 4, – С. 65 – 71.
292. Adaptive Optics for Industry and Medicine// Abstracts of the 1st International Workshop. June 12-15 (1997), Shatura, Russia. - 34 P.

293. Adaptive Optics for Industry and Medicine// Proceedings of the 2nd International Workshop/ Ed. G.Love. 12-16 July 1999. World Scientific. 398 P.
294. Adaptive Optics for Industry and Medicine// Proceedings of the 3rd International Workshop/ Ed. S.Restaino and S. Teare. 23-26 July 2001. Starline Printing. 254 P.
295. Adaptive Optics Engineering Handbook / Edited by Robert K. Tyson. – Marcel Dekker, Inc. New York. 2000. – 340 p.
296. Adaptive Optics for Vision Science / Edited by Porter, Queener, Lin, Thorn, and Awwal. 2006 John Wiley & Sons, Inc.
297. Bailey J., Prestage R. The portable telescope control system project. // Proc. SPIE. – 1997, 3112. – P. 124 – 136.
298. Bryant J.J., O'Byrne J.W., Minard R.A., Fekete P.W. Low order adaptive optics at the Anglo-Australian telescope.// Proc. Adaptive Optics Topical Meeting, Garching, 1995. P. 23-28.
299. Chan V.W.S. Optical Space Communications // IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, V. 6, N 6, November/December, 2000. LEOS Millenium Issue.
300. Christo Grigorov - Evaluation of Coarse- and Fine-pointing Methods for Optical Free Space Communication - Department of Space Science, Kiruna, 2008
301. Crosso R.P., Yellin M. Membrane mirror as an adaptive optical element./ JOSA, 1977, V.67, P. 396.
302. Creedon J.F. Lindgren A.G. Control of optical surface of a thin deformable mirror with application to an orbiting astronomical observatory. – Automatica, Prgamon Press, 1970, V.7, N 5.
303. Fried D.L. Statistics of a geometric of wavefgont distortion. // JOSA. 1965. V.55. № 11. P. 1427 – 1435.
304. Fried D.L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures.// JOSA. 1976. V. 66. № 3. P. 206 – 211.
305. Ikedo K. Optical turbulence: Chaos in optical bistability. – Journal de phisique, C2-1983, N 2, P C2-183.

306. Ikedo K., Miruno M. Modeling of non-linear Fabry-Perot resonator by difference-differential equations. – IEEE J-Quantum electron., 1985, 21, P. 1429.
307. Ikedo K. Daido H. Optical turbulence: Chaotic behavior of transmitted light from a ring cavity. – Phys. Rev. Letters, 1980, V. 45, N 9, P. 709.
308. Kanev F.Yu., Antipov O.L., Makenova N.A., Lukin V.P. Correction for atmospheric distortion of multichannel laser radiation with the use of phase-conjugation algorithm // Proc. SPIE. V.9680. 9680 ID (2015).
309. Kanev F.Yu., Lukin V.P., Makenova N.A., Antipov O.L., Halil Tanyer Eyyuboğlu Influence of Atmospheric Turbulence on Quality of Multichannel Laser Radiation and Correction for Distortion // Proc. SPIE. 2016
310. Kanev F. Yu., Makenova N. A., Lukin V. P., Antipov O. L., Veretekhin I.D. Thermal distortions of multichannel laser radiation // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10466 P. 104660Y-1 - 104660Y-5
311. Kudryashov A.V., Shmalhausen V.I. Semipassive bimorph flexible mirrors for atmospheric adaptive optics applications.// Opt. Eng., 1996. V. 35. - N11. - P. 3064-3073.
312. Kudryashov A.V., Gognglewski J., Browne S., Highland R. Liquid crystal phase modulator for adaptive optics. Temporal performance characterization// Opt. Comm., 1997. V. 141. - P. 247-252.
313. Love G.D. Wavefront correction and production of Zernike modes with a liquid crystal spatial light modulator.// Appl. Opt., 1997. V.36. - P. 1517-1524.
314. Lutomirski R.F., Yura H.T. Wave structure function and mutual coherence function of an optical wave in a turbulent atmosphere. – JOSA, 1971, V. 61, N 4, P. 482 – 487.
315. Noll J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence. – JOSA, 1976, V. 66, N 3, P. 207 – 211.
316. Oughstun K.E. Intracavity adaptive optic compensation of phase aberrations. I: Analysis.// J. Opt. Soc. Amer., 1981. v. 71. - P. 862-872.

317. Riesing K., Yoon H., Cahoy K. A portable optical ground station for low-earth orbit satellite communications. // Proc. of IEEE Int. Conf. on Space Optical Systems and Applications. – 2017.
318. Riesing K., Yoon H., Cahoy K. Rapid telescope pointing calibration: a quaternion-based solution using low-cost hardware. // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems 4(3), 034002 (1 – 10) (Jul-Sep 2018).
319. Roddier F. A new concept in adaptive optics: curvature sensing and compensation.// Appl. Opt., 1988. v. 27. - P. 1223-1225.
320. Roddier F. The problems of adaptive optics design// in Adaptive Optics for Astronomy, NATO ASI series Kluwer Academic, The Netherlands, 1991. P. 89 - 111.
321. Rue A.K. Calibration of precision gimballed pointing systems. // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 1970, 6(5). – P. 697 – 706.
322. Rutten H.G.J., van Venrooij M.A.M. Telescope Optics. - Richmond: Willmann-Bell, 1999.
323. Sato T., Dceda O., Ueda Y. Computer-aided deformable mirror system using differential angle control.// Appl. Opt., 1978. V. 17. - N 24. - P. 3945 - 3947.
324. Sato T., Ikeda O. at al. Adaptive PVDF piezoelectric deformable mirror system.// Appl. opt., 1980. V. 19. - N 9. - P. 1430-1434.
325. Sato T., Ueda Y., Ikeda O. Transmission-type PVDF 2-d optical phase modulator.// Appl. opt., 1981.- V. 20. - N 2. - P. 343-350.
326. Schroeder D.J. Astronomical Optics. – San Diego: Academic Press, 2000.
327. Sidi M.J. Spacecraft Dynamics and Control: A Practical Engineering Approach. // Cambridge University Press, Cambridge. – 1997.
328. Spinhirne J.M., Anafi D., Freeman R.H., Garcia H.R. Intracavity adaptive optics. 1: Astigmatism correction performance.// Appl. Opt., 1981. v. 20. - P. 976 - 983.
329. Shishakov K.V., Vorontsov M.A. Phase effects in passive nonlinear cavities // JO-SA-A: Optics, Image Science, and Vision.- USA. – 1992. - № 9. – P. 71-79
330. Straede J.O., Wallace P.T. The Anglo-Australian 3.9-meter telescope: software controlled slewing, setting, and tracking. // Publ. Astron. Soc. Pac. – 1976, 88 – P. 792 – 802.

331. Tyson R.K. Principles of adaptive optics, 3d ed. NY: CRC Press, 2010, 350 p.
332. Teare S.W., Restanio S.R. Introduction in Image Stabilization. SPIE Press Book, TT73, 14 September 2006, 112 p.
333. Tyler G.A. Turbulence induced adaptive optics performance degradation: Evaluation in the time domain. – Proc. SPIE, 1983, P. 179 - 188.
334. Vdovin G.V. Adaptive mirror micromachined in silicon./ Thesis Delft Univ. of Technology, Delft: Delft Univ. Press, The Netherlands, 1996. 136 p.
335. Vdovin G.V., Sarro P.M. Flexible mirror micromachined in silicon.// Appl. Opt., 1995. v 34. - P. 2968 - 2972.
336. Vorontsov M.A., Carhart G.W., Ricklin J.C. Adaptive phase distortion correction based on parallel gradient-descent optimization.// Opt. Lett., 1997. V. 22. - №12. - P. 907-909.
337. Wallace P. A rigorous algorithm for telescope pointing. // Proc. SPIE. – 2002, 4848. – P. 125 – 136.
338. Wallace P.T. Concise telescope pointing algorithm using IAU 2000 precepts. // Proc. SPIE. – 2008, 7019, 701908.
339. Wang J.Y., Markey J.K. Modal compensation of atmospheric turbulence phase distortion. – JOSA, 1978, V. 68, N 1, P. 78.
340. Wilson R.N. Reflecting Telescope Optics. – Springer, 1996. – V. I.
341. Wilson R.N. Reflecting Telescope Optics. – Springer, 1996. – V. II.
342. Wang J.Y., Silva D.E. Wavefront interpretation with Zernike polynomials. – Appl. Opt., 1980, V. 19, N 9, P. 1510-1518.
343. Yellin M. Using membrane mirror in adaptive optics./ Pross. SPIE, 1976, V.75, P. 97.
344. Yoon H., Lim Y., Bang H. New star pattern identification using a correlation approach for spacecraft attitude determination. // J. Spasecr. Rockets. – 2011, 48 (1). – P. 182 – 186.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Акты внедрения научных разработок, выполненных по результатам исследований в диссертации Шишакова К.В.

УТВЕРЖДАЮ  
Ректор ФГБОУ ВПО  
«ИжГТУ имени М.Т.  
Калашникова»

  
В.П. Грахов  
10 декабря 2018 г.

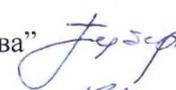


#### АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы к.ф.-м.н., доцента Шишакова К.В. «Теоретические основы, методы, модели и алгоритмы для разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов», выполненной на соискание ученой степени доктора технических наук

Настоящий акт подтверждает внедрение результатов диссертационной работы Шишакова Константина Валентиновича по теме «Теоретические основы, методы, модели и алгоритмы для разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов» в учебный процесс на кафедрах:

- «Радиотехника» для студентов направлений «Радиотехника» (11.03.01) «Радиоэлектронные системы и комплексы» (11.05.01);
- «Тепловые двигатели и установки» для студентов направлений «Технологические машины и оборудование» (15.03(04).02), «Энергетическое машиностроение» (13.03(04).02);
- «Мехатронные системы» для студентов направлений «Мехатроника и робототехника» (15.03(04).06),
- «Физика и оптотехника для студентов направления «Лазерная техника и лазерные технологии» (12.03(04).05).

Первый проректор  
ФГБОУ ВО "ИжГТУ имени М.Т. Калашникова"  А.В. Губерт

Заведующий кафедрой «Радиотехника»  А.Н. Копысов

Заведующий кафедрой «Мехатронные системы»  А.И. Абрамов

Заведующий кафедрой  
«Тепловые двигатели и установки»  А.Н. Терентьев

Заведующий кафедрой «Физика и оптотехника»  А.Г. Пономарев

УТВЕРЖДАЮ  
Врио директора ФТИ УрО РАН

С.М. Молин

» 09 2017 г.

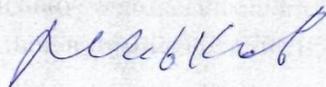


### АКТ

об использовании результатов диссертационной работы  
к.ф.-м.н., доцента Шишакова К.В.  
«Теоретические основы, методы, модели и алгоритмы для  
разработок многосистемных комплексов наведения больших  
оптических телескопов»,  
выполненной на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Результаты диссертационной работы Шишакова Константина Валентиновича «Теоретические основы, методы, модели и алгоритмы для разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов» были использованы при выполнении научно-технических проектов, реализованных Физико-техническим институтом Уральского отделения РАН (г. Ижевск) во взаимодействии с Научно-техническим центром «Восход» (г. Ижевск) по разработке и изготовлению управляемых оптико-механических элементов и систем для орбитальных и наземных оптических телескопов, включая разработку проекта автономной системы гидирования орбитального телескопа Т-170 в рамках выполнения работ для ИНАСАН РАН по проекту «Спектр-УФ» Федеральной космической программы.

Заведующий лабораторией электромагнитных явлений  
Отдела исследования и диагностики пространственных структур  
ФТИ УрО РАН,  
д.т.н., с.н.с.



С.В.Леньков

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор АО «ИЭМЗ «Купол»



Ф.Г. Зиятдинов  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

### АКТ

Об использовании результатов диссертационной работы к.ф.-м.н., доцента Шишакова К.В. «Теоретические основы, методы, модели и алгоритмы для разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов», выполненной на соискание ученой степени доктора технических наук

Результаты диссертационной работы Шишакова К.В. использованы при производстве и совершенствовании твердотельных волновых гироскопов и разработке инерциальных навигационных систем на их основе, АО «Ижевский электромеханический завод «Купол» (г. Ижевск, Удмуртская Республика), в части математического и алгоритмического обеспечения интеллектуальной поддержки процессов производства, настройки и повышения точности твердотельных волновых гироскопов в составе измерительных инерциальных систем.

Использованные методы, модели и алгоритмы предназначены для автоматизации производства и интеллектуальной поддержки настройки и калибровки отдельных твердотельных волновых гироскопов и в составе измерительных инерциальных навигационных систем в производственных процессах и на этапе эксплуатации.

Системный охват широкого круга задач, сопровождающих разработки и производство твердотельных волновых гироскопов, позволяет усовершенствовать управление и принятие решений с целью повышения эффективности их функционирования, а также точности выходных измерительных сигналов.

Главный конструктор  
гироскопических устройств и приборов \_\_\_\_\_ П.К. Мачехин

Начальник тематического отдела, к.т.н. \_\_\_\_\_ С.Г. Газизов





УТВЕРЖДАЮ

Технический директор АО «ИМЗ»

В.Ю. Угринов

17.12.2018

## АКТ

об использовании результатов диссертационной работы к.ф.-м.н., доцента Шишакова К.В. «Теоретические основы, методы, модели и алгоритмы для разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов», выполненной на соискание ученой степени доктора технических наук

Результаты диссертационной работы Шишакова Константина Валентиновича использованы при калибровке и повышении точности сигналов гироскопических измерителей углового положения пространственно-ориентируемых объектов в составе навигационных модулей для контроля пространственного положения ствола нефтегазовых и горнорудных скважин.

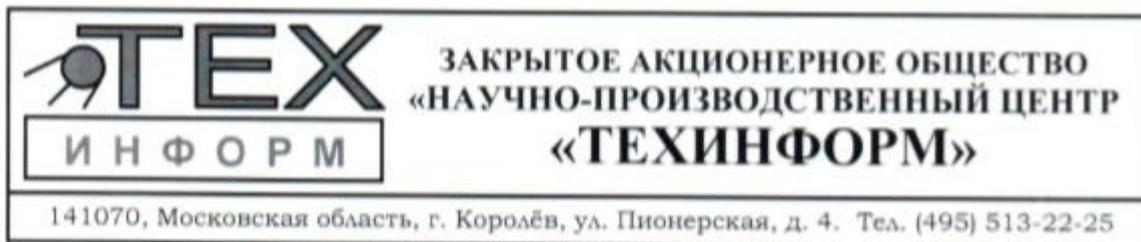
Использованные методы, модели и алгоритмы предназначены для автоматизации производства и интеллектуальной поддержки производственной и эксплуатационной комплексной настройки и калибровки выходных сигналов измерительных средств навигационных модулей.

Они позволяют ускорить используемые технологические процессы настройки и калибровки разрабатываемых и изготавливаемых навигационных приборов - гироскопических инклинометров ИГМ-42-110/60.

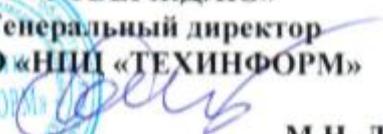
Туев Сергей Юрьевич  
Главный конструктор спецтехники и  
гражданской продукции

Бесогонов Александр Валентинович  
Начальник управления медтехники  
микроэлектроники №167





«УТВЕРЖДАЮ»  
Генеральный директор  
ЗАО «НПЦ «ТЕХИНФОРМ»

к. т. н.   
М.Н. Лебедев

«07» декабря 2018 г.

**АКТ**  
**об использовании результатов диссертационной работы**  
**к.ф.-м.н., доцента Шишакова К.В. «Теоретические основы, методы, модели**  
**и алгоритмы для разработок многосистемных комплексов наведения**  
**больших оптических телескопов», выполненной на соискание**  
**ученой степени доктора технических наук**

Результаты диссертационной работы Шишакова К.В. использованы при разработке алгоритмов параметрического синтеза многосистемных комплексов, функционирующих в условиях воздействия непреднамеренных помех, а также при выполнении работ по теме: «Разработка методов и средств построения наземных терминалов и комплексов в условиях воздействия непреднамеренных помех» в рамках договора № ИТ-126-09 от «01» ноября 2009 г. между ЗАО «НПЦ «ТЕХ-ИНФОРМ» и ФГБОУ ВО ИжГТУ им. М.Т. Калашникова.

Результаты работы также использовались при подготовке отчетных материалов, выполняемых по заказу АО «КБ Арсенал» (г. Санкт-Петербург) и АО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара):

1. «Подготовка материалов радиочастотной заявки на комплекс 14К160 с изделием 14Ф139»;
2. «Разработка материалов радиочастотной заявки на РЭС изделия 47КС для получения разрешительных документов на право использования частотных присвоений»;
3. «Разработка и согласование условий ЭМС РЭС КК 14К159 с зарубежными спутниковыми сетями, заявленными в Международном союзе электросвязи».

Представленные в диссертации результаты исследований позволяют повысить эффективность алгоритмов параметрического синтеза многосистемных комплексов, функционирующих в условиях воздействия непреднамеренных помех.

Научный консультант, к.т.н.



А.Н. Дементьев