

*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)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Ижевск – 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова».

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,  
**Алексеев Владимир Александрович**,  
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный  
технический университет имени М.Т. Калашникова»

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,  
**Кудряшов Алексей Валерьевич**, ФГБУН «Институт  
динамики геосфер» РАН, заведующий лабораторией  
атмосферной адаптивной оптики;

доктор физико-математических наук, старший науч-  
ный сотрудник, **Канев Федор Юрьевич**, Институт  
оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского Отде-  
ления РАН, ведущий научный сотрудник;

доктор технических наук,  
**Калихман Дмитрий Михайлович**, Федеральное го-  
сударственное унитарное предприятие «Научно-  
производственный центр автоматизации и приборо-  
строения им. академика Н.А. Пилюгина» – «Произ-  
водственное объединение «Корпус»», начальник на-  
учно-исследовательской лаборатории.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«**Московский государственный технический  
университет им. Н.Э. Баумана**»

Защита состоится 20 июня 2019 года в 14 часов на заседании диссертаци-  
онного совета Д 212.065.06 в Ижевском государственном техническом универси-  
тете имени М.Т. Калашникова по адресу: 426033, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, 2,  
5 корпус ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в биб-  
лиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический универ-  
ситет имени М.Т. Калашникова», <http://istu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью,  
просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу:  
426069, г. Ижевск, Студенческая, д. 7, ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова

Ученый секретарь диссертационного совета,  
Кандидат технических наук, доцент

 В.Н. Сяктерев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 наземного и орбитального базирования с расширенным списком оборудования для получения новой оптической информации все более возрастает, что отражается в увеличении количества таких уникальных проектов в мире.

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 следующие 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 опти-

ческом тракте, низкочастотные системы пространственно распределенной активной компенсации aberrаций 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 обеспечивать 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 Astro-

physical 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), California 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), Ower Whelmingly 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 Балега 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., 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., Басараб М.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 систем 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 твердотельных 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 «Астрофизика» (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; механики 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. Методика задания проектных 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 для автоматизированных систем научных исследований 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» (Ашхабад, 1993), НТК «Актуальные проблемы физики твердого тела, радиофизики и теплофизики» (Ашхабад, 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 гидирования 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, к.т.н., Главному конструктору Проекта «Автономная система гидрирования» 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования и степень ее разработанности. Изложены цель диссертационной работы, объект, предмет и задачи исследования, отмечено соответствие темы диссертации требованиям паспорта специальности ВАК. Показана научная новизна работы,

перечислены методы исследований, представлены достоверность и обоснованность результатов диссертации. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Указаны практическая значимость, реализация и внедрение результатов, апробация работы на научных форумах, основные публикации и личное участие автора в проведении диссертационного исследования.

**Первая глава** является обзорной и посвящена рассмотрению объектов и проблемы исследования. В ней дается обобщенная характеристика современных оптических телескопов, имеющих многосистемные комплексы наведения, перечисляются критерии получаемой оптической информации, кратко описываются параметры входящих в них модульных систем управления для конкретных конструктивных реализаций телескопов.

Среди больших наземных и орбитальных оптических телескопов рассмотрены телескопы, перечисленные в пункте «степень разработанности темы исследования», а также другие. Показано, что уникальность и высокая стоимость таких проектов требуют всестороннего интеллектуального сопровождения их разработок и изготовления. В том числе это относится и к комплексам многосистемного наведения больших телескопов, активные системы управления которых в условиях деформируемости облегченных конструкций интегрально обеспечивают не только высокие точности сопровождения наблюдаемых космических объектов, но и высокоточную коррекцию нестационарных аберраций волнового фронта в трактах телескопов и на оптических трассах.

По результатам обзора систематизированы современные требования и достигнутые параметры систем наведения больших телескопов, а также определены следующие основные принципы синтеза комплексов наведения: 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 внутрен-



них эксплуатационных возмущений в электроприводах управления опорно-поворотными устройствами телескопов.

Глава завершается постановкой проблемы исследования и определением направлений ее решения в соответствии с поставленными выше задачами.

**Вторая глава** посвящена декомпозиции комплекса наведения больших оптических телескопов. Рассмотрен состав и дана общая характеристика комплекса, выделены модульные системы и режимы управления, выполнено их пространственно-временное частотное разделение.

Все модульные системы комплекса разделены на пять групп (Рис. 1): 1) общего слежения; 2) корректирующего слежения; 3) активной оптики; 4) адаптивной оптики; 5) обеспечивающие. К последним могут быть отнесены лазерная подсветка космических объектов в околоземном пространстве, зажигание искусственных лазерных звезд и другие.

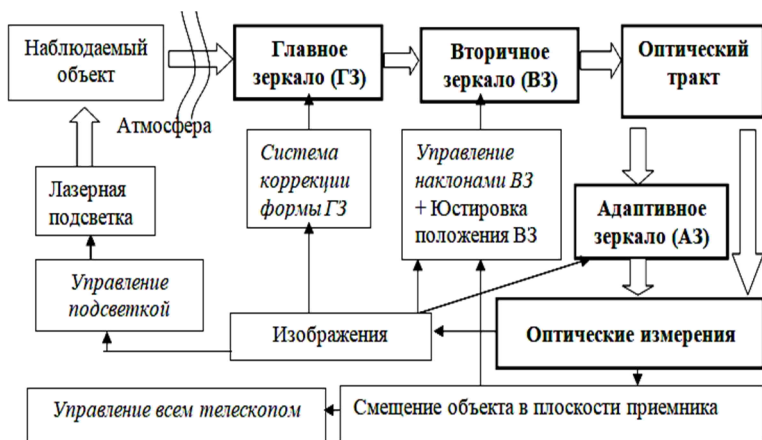


Рисунок 1 – Схема взаимной увязки модульных систем комплекса наведения

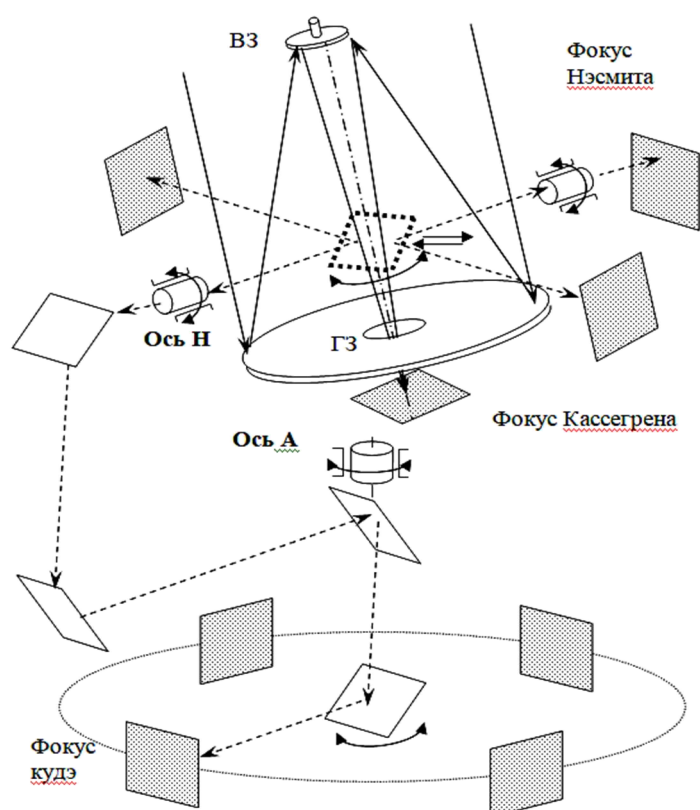


Рисунок 2 – Оптическая схема большого наземного телескопа

Для больших наземных оптических телескопов представителями первых четырех групп соответственно являются модульные системы (Рис. 2): углового слежения опорно-поворотным устройством телескопа по углам азимута (А) и высоты (Н), корректирующего слежения вторичным зеркалам (ВЗ), активной коррекции формы главного зеркала (ГЗ) и компенсации атмосферной турбулентности адаптивным зеркалом (АЗ). В группу систем корректирующего слежения при необходимости также может быть включена модульная система слежения третичным диагональным зеркалом (ТДЗ).

Для орбитального телескопа в первую очередь важны системы: угловой ориентации космического аппарата (КА), корректирующего слежения ВЗ и активной коррекции формы ГЗ.

В главе детализированы основные элементы комплекса многосистемного наведения, включая измерительные датчики, алгоритмы управления, исполнительные приводы и объекты управления.

Рассмотрено взаимовлияние модульных систем в процессах повышения интегральной эффективности комплекса наведения, включая следующий вариант причинно-следственной цепочки: [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].

	Низкие временные частоты (до 0.5 Гц)	Средние временные частоты (до 5 Гц)	Высокие временные частоты ( $\geq 5$ Гц)
Низкие пространственные частоты (наклоны, сдвиги)	Сопровождение, термо- и гравитационные возмущения $\Rightarrow$ Оптический ПЗС датчик $\Rightarrow$ Угловое наведение телескопа в целом	Ошибка сопровождения, ветровые возмущения $\Rightarrow$ Оптический ПЗС датчик + датчик углов ВЗ $\Rightarrow$ Управление наклонами ВЗ	Атмосферные, упругие микроколебания конструкции $\Rightarrow$ Оптический ПЗС датчик + датчик ВФ $\Rightarrow$ 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 абберации; моды колебаний ГЗ (от ветровых и эксплуатационных возмущений); остаточная ошибка коррекции формы ГЗ $\Rightarrow$ 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 3 – Пространственно-временная частотная матрица многосистемного наведения большого оптического телескопа

Декомпозиция комплекса многосистемного наведения сначала проведена по пространственным частотам – через выделение двух слабо связанных групп: систем сопровождения объекта наблюдения и систем коррекции формы волнового фронта (ВФ). Далее внутри каждой группы выполнена временная частотная декомпозиция. При этом каналы следующих уровней в своей мере корректируют остаточные погрешности каналов предыдущих уровней в более расширенной полосе временных частот. На рисунке 3 показаны варианты преимущественной работы модульных систем наведения в зависимости от сегментов пространственно-временных частот (внутри клеток указаны: [основные возмущения]  $\Rightarrow$  [измерительные датчики]  $\Rightarrow$  [модульные системы управления]).

**Третья глава** посвящена моделям и методам математического моделирования функциональных задач и объектов управления, а также их алгоритмизации применительно к интеллектуальной поддержке сопровождения разработок и про-

изводства управляемых элементов в модульных системах слежения, интегрируемых в распределенные комплексы наведения больших телескопов (наземных и орбитальных). В ней предложены общие методики компьютерного анализа и идентификации высокочастотных моделей упругих управляемых элементов в составе механической конструкции большого телескопа для использования в составе сопровождающих производство САД/САЕ систем. Кроме этого, для начальных этапов проектирования получены дополняющие их аналитические модели: среднечастотная модель управляемого по наклонам ВЗ и низкочастотные модели следящего телескопа в альт-азимутальной монтировке и на КА. Модель ТДЗ построена с присутствием контура активного демпфирования его микроколебаний.

Для проработанных конструкций оптико-механических элементов модульных систем наведения в качестве наиболее универсального метода построения моделей предложена методика их численного получения в расширенных полосах частот с использованием САПР в виде системы передаточных функций для управляющих и возмущающих воздействий, а также для сигналов измерений:

$$W(p) = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}{a_n \cdot p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0} = \sum_j \frac{\tilde{C}_j}{p^2 + K \delta_j \omega_j p / \pi + \omega_j^2}.$$

Дополняющие их аналитически полученные модели предназначены для задач начального синтеза многосистемного комплекса наведения телескопа (при отсутствии детально проработанных конструкций). Кроме этого, они часто более явно показывают основные факторные зависимости и тонкие нелинейные взаимодействия управляемых функций активных систем.

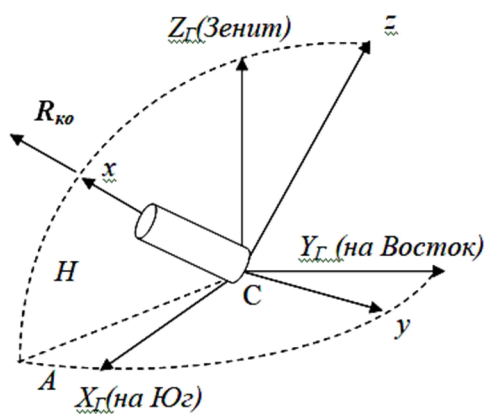


Рисунок 4 – Системы координат телескопа в ОПУ

Низкочастотная модель следящего телескопа в альт-азимутальной монтировке получена в рамках твердотельного формализма с выбором кинетических энергий телескопа ( $m$ ) и платформы ( $n$ ) в виде:  $T_m = (1/2) [I_x \omega_x^2 + I_y \omega_y^2 + I_z \omega_z^2] + I_{xy} \omega_x \omega_y + I_{xz} \omega_x \omega_z + I_{yz} \omega_y \omega_z$ ,  $T_n = (1/2) I_n \dot{A}^2$ , где  $I$  – элементы тензоров инерции,  $\omega$  – проекции угловой скорости (Рис. 4).

В итоге для углов азимута и высоты получаются связанные нелинейные уравнения:

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

где  $I_1 \equiv I_n + I_x \sin^2(H) + I_z \cos^2(H) + I_{xz} \sin(2H)$ ,  $I_2 \equiv I_{xy} \sin(H) + I_{yz} \cos(H)$ ,  $I_3 \equiv (I_x - I_z) \sin(2H) + I_{xz} \cos(2H)$ ,  $I_4 \equiv I_{xy} \cos(H) - I_{yz} \sin(H)$ .

При  $I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} = 0$  и после введения управления для нейтрализации нелинейных взаимодействий каналов управления по углам азимута и высоты:

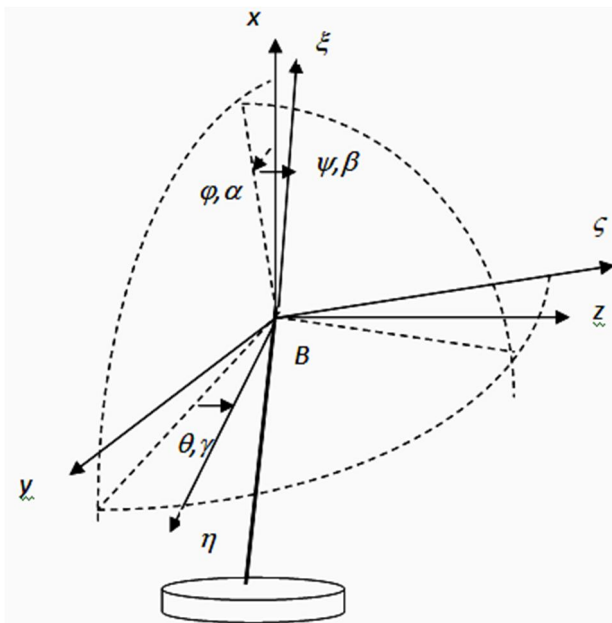
$$M_{UH}/I_y = - (I_3/I_y) \omega_A^2 + U_H(e_H), M_{UA}/I_l = (2I_3/I_l) \omega_A \omega_H + U_A(e_A),$$

модель становится линейной и удобной для формирования передаточных функций, используемых в дальнейшем при синтезе многосистемного наведения:

$$\ddot{H} = U_H + f_H, \quad \ddot{A} = U_A + f_A, \quad \text{где } f = M_f/I.$$

Модель управляемого по наклонам ВЗ в составе варианта его конструктивно проработанного упругого модуля рассчитана с помощью САПР на основе конечно-элементного анализа в виде системы передаточных функций в зависимости от: 1) управляющих усилий приводов; 2) переносного ускорения телескопа; 3) микровозмущений на посадочных местах крепления модуля ВЗ. В том числе, идентифицированы передаточные функции угла наклона ВЗ и сигнала смещения, измеряемого датчиком положения: от единичного управляющего усилия приводов по оси Y; от переносного ускорения  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ , действующего на всю конструкцию модуля вдоль оси Y; от ускорений  $1 \text{ м/с}^2$ , действующих на точки крепления модуля в направлении осей Y, Z. Показано, что при малых технологических погрешностях конструкции модуля они практически не изменяются.

Также получена аналитическая среднечастотная модель управляемого по наклонам ВЗ, позволяющая учитывать и выявлять механизмы тонкого нелинейного воздействия каналов управления ВЗ на механическую конструкцию его модуля. Она построена в углах  $(\varphi, \psi, \theta)$  для ВЗ и  $(\alpha, \beta, \gamma)$  для упругого силового корпуса



(Рис. 5). В области низких частот при хорошо центрированном ВЗ эта модель для углов  $(\varphi, \psi)$  сведена к простым передаточным функциям вида:  $\varphi = W_{B3} \cdot U$ ,  $W_{B3} = 1/(p^2 + \mu_k p + \omega^2)$ ,  $u \equiv F_{привод} I_u / J$ ,  $p = d/dt$ ,  $\mu_k = \omega \cdot \delta / \pi$ , для последующего использования в задачах синтеза многосистемного комплекса наведения большого телескопа. В случае конкретного варианта разрабатываемого модуля ее различие с численно найденными передаточными функциями в полосе частот

Рисунок 5 – Системы координат модуля ВЗ до 20 Гц было несущественным.

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. В конкретном расчетном варианте ошибка аппроксимации по амплитуде деформаций не превышала 3 %. На этой модели исследовалась эффективность контура активного демпфирования при его работе в полосе частот, захватывающей две резонансные частоты упругого зеркала. Включение обратной связи с синтезированным регулятором позволило уменьшить время успокоения резонансных колебаний почти на два порядка.

Модели остаточных угловых колебаний стабилизируемого КА вместе с большим телескопом, выбраны в традиционном аналитическом виде с учетом гравитационных, диссипативных и управляющих моментов. Для облегчения синтеза комплекса многосистемного наведения последовательно выполнены их упрощение, линеаризация и сведение по углам стабилизации к простым передаточным функциям от нормированных управляющих моментов следующего вида:

$$\alpha = W_{КА}(p) \cdot u_{\alpha}, W_{КА}(p) \approx 1/(p^2 + \mu_{к}p + \Omega^2), \mu_{к} = \Omega \cdot \delta / \pi .$$

С целью уменьшения инерционных нагрузок на деформируемую оптико-механическую конструкцию большого облегченного орбитального телескопа отдельно исследованы варианты повышения плавности изменения управляющих моментов во времени. Для этого

в качестве реактивных маховиков выбраны жидкостные маховики. Формирование их силовых моментов описывалось с учетом движения жидкости в корпусе маховика. Результаты расчетов по ней показаны на рис. 6 (кривые 1, 4). Для перехода к передаточной функции была также предложена упрощенная модель:

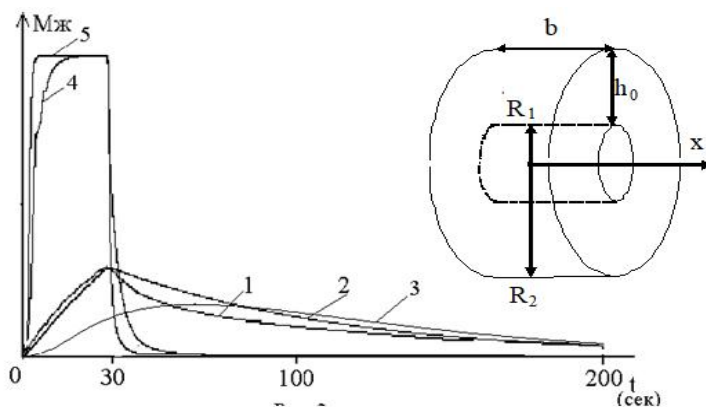


Рисунок 6 – Распределение во времени вращательных моментов жидкостного наполнения реактивного маховика: 1 - 3 – для ламинарного режима течения; 4 - 5 – для турбулентного режима течения

$$\alpha = W_{КА}(p) \cdot u_{\alpha}, u_{\alpha} = pK_{\alpha} / J_{\alpha}, K_{\alpha} = [I_T + I_{ж}k / (k + p)]\omega_T, \omega_T = \omega_{КА} + \omega_u .$$

Ей соответствуют кривые 2, 5 на рис. 6. Дальнейшего повышения плавности распределение момента управления во времени можно достичь с помощью введения дополнительной пары с трением (кривая 3). Проведенный на макете эксперимент подтвердил значительное повышение плавности (в 3 – 6 раз), удлинения во времени и потенциально большую эффективность реактивного воздействия жидкостного маховика по сравнению с твердотельным.

**Четвертая 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.

Выбор модели большого ГЗ зависит от полосы частот приводов коррекции его формы, которые могут работать в квазистатическом или динамическом режимах. 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:  $dx/dt = Ax + Bu$ ,  $y = Cx + Du$ .

Рассмотрены варианты перехода к таким моделям в зависимости от постановки решаемой задачи. Так, для контуров автономной работы отдельных или нескольких приводов могут быть использованы 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 удобнее 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 построенная конечно-разностная динамическая модель кольцевых зеркал, легко перестраиваемая при изменении состава приводов управления.

Она была использована при синтезе управления отдельным приводом по наблюдениям прогиба только в одной точке действия привода и по наблюдениям за деформацией всей поверхности зеркала. В первом случае синтезированный контур управления обеспечил уменьшение времени успокоения пассивно слабо-задемпфированных микроколебаний зеркала в 6 раз, а во втором – в восемь раз.

Модели небольших высокочастотных управляемых зеркал адаптивной оптики приведены в квазистатическом режиме управления, который на практике обычно стараются реализовать конструктивными методами через повышение ча-



стот их резонансных колебаний. Нахождение квазистатических функций отклика адаптивных зеркал на действие приводов управления является типовой операцией в современных САПР. Для мембранных же адаптивных зеркал с разной мерой учета их изгибной жесткости приведены точные аналитические решения. Их сравнение с экспериментально измеренной функцией отклика макета мембранного зеркала показало необходимость учета изгибной жесткости в его модели.

Для вспомогательных излучающих систем телескопов проанализированы варианты перспективных однопроходовых и многопроходовых оптических схем с контурами оптической обратной связи. В амплитуде их выходного поля:

$$A_{out} = (1 - R_2)^{1/2} A e^{i\varphi}, \quad A = \frac{G_0^{1/2} (1 - R_1)^{1/2} \exp(i\varphi_g)}{1 - \gamma \exp[i(\varphi + \varphi_g + \varphi_u)]} A_{in} .$$

фаза  $\varphi$  наводится на сильной оптической нелинейности:

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

где  $k_0 = \kappa(1 - R_1) I_{in}^m G_0$ ,  $\gamma^2 = G_0 R_1 R_2$ ,  $R$  – коэффициенты отражения зеркал;  $\varphi_u$  – управление волновым фронтом;  $\varphi_g$  – фазовые искажения в среде усиления,  $G_0$  – коэффициент оптического усиления.

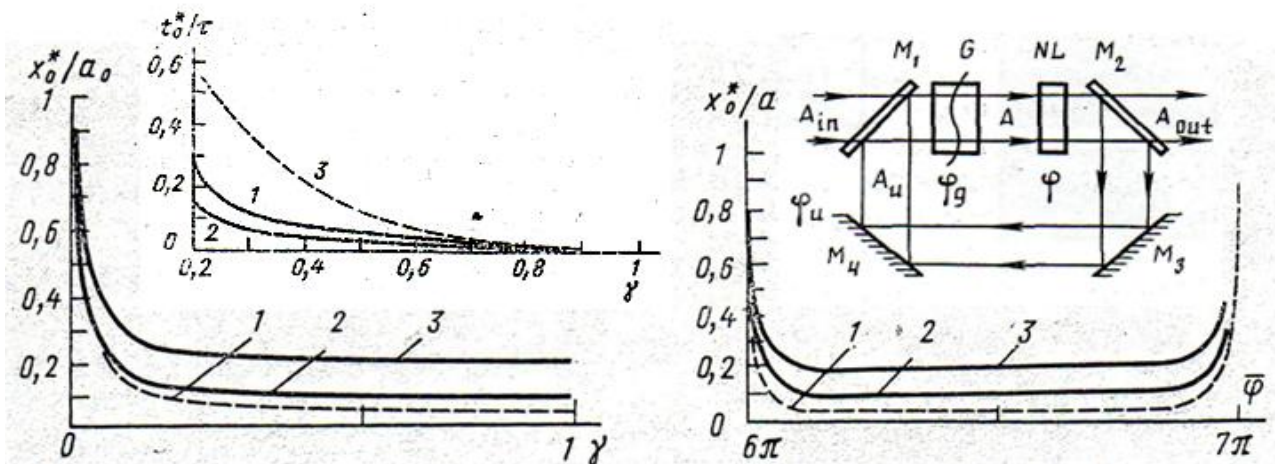


Рисунок 7 – Зависимость  $t_0^*/\tau$  от параметра  $\gamma$  при  $\bar{\varphi} = 4.5\pi$  (1),  $6.5\pi$  (2),  $6.9\pi$  (3).

Зависимости  $x_0^*$  от  $\gamma$  при  $\bar{\varphi} = 6.5\pi$  (слева) и от  $\bar{\varphi}$  при  $\gamma = 0.5$  (справа):

1 –  $d_0 = 0.01$ ,  $\beta = \infty$ ; 2 –  $d_0 = 0$ ,  $\beta = 10$ ; 3 –  $d_0 = 0$ ,  $\beta = 5$

Так как при  $k_0\gamma \gg 1$ ,  $f_{in} = 1$  стационарное решение имеет вид:

$$\hat{\varphi} \approx -\varphi_g - \varphi_u + \text{const}, \quad \varphi_{out} \approx \varphi_{in} + \varphi_g + \hat{\varphi} + \text{const} \approx \varphi_{in} + \varphi_u + \text{const} ,$$

поэтому такие системы позволяют: 1) подавить фазовые искажения в оптической среде усиления; 2) реализовать управление волновым фронтом интенсивных пучков со снижением лучевой нагрузки на гибкие зеркала; 3) выполнить обращение волнового фронта. Исследование устойчивости кольцевой схемы по отношению к временному запозданию  $t_0^*/\tau$  и к сдвиговой разъюстировке зеркал показано на рисунке 7 (в последней модели учитывалась также дифракция пучка через  $\beta$ ).

**Пятая глава** посвящена требованиям, моделям и алгоритмам для интеллектуальной поддержки разработок и производства прецизионных электроприводов слежения наземных телескопов по углам азимута и высоты. Так как их точность задает требования и влияет на работу модульных систем корректирующего слежения, 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 проектных требований к разработке электроприводов слежения в альт-азимутальной монтажке телескопа; разработка моделей прецизионных электроприводов наведения больших телескопов; синтез контуров управления ими в условиях возмущений.

Так как небесные объекты движутся предсказуемо по законам небесной механики в плоскостях своих орбит, поэтому их координатная увязка с углами азимута и высоты следящего телескопа позволяет прогнозировать движение и более эффективно управлять ОПУ телескопа. Пересчет их собственного движения в углы ОПУ выполняется последовательным перепроектированием орбитальной системы координат на оси: 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  $Sx_{уз}$  (связана с  $Mx_M Y_M Z_M$  поворотами на углы азимута  $A$  и высоты  $H$ ) систем координат.

В начале проработок вариантов конструктивного исполнения телескопа для получения самых первых оценок обоснованных технических требований к параметрам следящих электроприводов телескопа в ОПУ предложена следующая логически связанная последовательность их задания: [диаметр ГЗ]  $\Rightarrow$  [поворачиваемая по углу масса]  $\Rightarrow$  [момент ее инерции]  $\Rightarrow$  [момент трения в подшипниках]  $\Rightarrow$  [момент «трогания» с места]  $\Rightarrow$  [варианты моментов ветровых нагрузок]  $\Rightarrow$  [случайные изменения ветровых моментов]  $\Rightarrow$  [требуемые максимальные силовые моменты управления]  $\Rightarrow$  [максимальные достижимые угловые ускорения]  $\Rightarrow$  [максимальные достижимые угловые скорости]  $\Rightarrow$  [требуемая полоса частот управления]  $\Rightarrow$  [жесткость силовой упругой передачи от электродвигателя к телескопу]  $\Rightarrow$  [моменты инерции роторов электродвигателей]  $\Rightarrow$  [частоты резонансных колебаний двухмассовой системы «ротор – упругая передача – телескоп»]  $\Rightarrow$  [их требуемое демпфирование]  $\Rightarrow$  [жесткость крепления статоров электродвигателей]  $\Rightarrow$  [частоты резонансных колебаний упруго закрепленных статоров]  $\Rightarrow$  [электромеханические параметры электродвигателей].

Для наблюдения низкоорбитальных космических объектов разработано математическое обеспечение этой цепочки – предложена пошаговая методика расчета начальных требований применительно к приводам слежения телескопа в альт-азимутальной монтажке, включая следующие шесть групп определяющих па-

раметров: 1) скоростных, 2) частотных. 3) точностных, 4) силовых, 5) жесткостных, 6) электромеханических. Выполненные по ней расчеты показали непротиворечивость с известными результатами. По мере повышения глубины проработки конструкции большого телескопа эти оценки подлежат уточнению в рамках процедур параметрической оптимизации его многосистемного управления.

При наблюдении астрономических объектов начальные проектные оценки большинства из перечисленных параметров могут быть сделаны по аналогии с реализованными проектами больших телескопов.

Для уточненного исследования влияния электрических и механических параметров электроприводов на эффективность отслеживания выбранных космических объектов разработана детализированная модель, в которой учтены 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  $\varepsilon_{\Delta}(\varphi_d + \varphi_{ст})$ ; 3) упругость передачи от ротора двигателя к телескопу и другие. Предложенная модель следящего телескопа с упругим электроприводом сведена к виду:

$$A_m(p) \omega_m = M_y - M_{nm} + M_f; \quad A_d(p) \omega_d = M_{эм} - M_y - M_{nd}, \quad A_{cm}(p) \omega_{cm} = M_{эм},$$

где:  $p = d/dt$ ;  $A_m(p)$ ,  $A_d(p) \equiv I_d p$ ,  $A_{cm}(p) \equiv I_{cm} (p^2 + 2\xi_{cm}\Omega_{cm}p + \Omega_{cm}^2)/p$  – дифференциальные операторы для телескопа («т»), ротора электродвигателя («д»), упруго закрепленного статора («ст»);  $M_y = (\mu + C/p)(\omega_d - \omega_m)$ ,  $M_{эм} = M \{1 + \varepsilon_{\Delta}(\varphi_d + \varphi_{cm})\}$ ,  $M = c_J J$  – моменты;  $J = (\gamma i - c_e \omega)/(R + L p)$  – ток;  $\omega$  – угловые скорости;  $I$  – моменты инерции;  $C, \mu$  – жесткость и вязкость;  $\Omega$  – резонансная частота;  $c_e, c_J, R, L$  – электрические параметры.

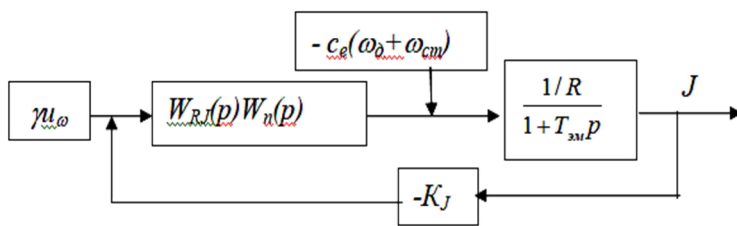


Рисунок 8 – Схема подчиненного контура по току

Для повышения точности слежения в нее введена трехконтурная подчиненная обратная связь, включающая: 1) контур по току (Рис. 8) – для подавления

возмущений, приходящие через противоЭДС; 2) контур по скорости (Рис. 9) – для демпфирования упругих микроколебаний конструкции на верхних частотах и переходных процессов в контуре слежения на нижних частотах; 3) контур по ошибке слежения (Рис. 9). На рисунках обозначены:  $W_n(p) = K_n / (1 + \tau p)$  – передаточная функция силового преобразователя (преобразует переменный ток в постоянный с коэффициентом усиления  $K_n$  и малым запаздыванием  $\tau$ );  $W_R$  – передаточные функции регуляторов;  $\varphi_u$  – функция углового движения цели (или программного углового перемещения);  $W_{oy} = 1/\{A_m(p) + A_d(p)\}$  – передаточная функция объекта управления,  $W_{mд} = 1/\{1 + A_m(p)/\mu_{\Sigma}\}$  – передаточная функция упругой передачи от  $\omega_d$  к  $\omega_m$ ;  $M_c$  – момент сопротивления. Параметры контуров и частоты выбираются

взаимно согласованно, зависят от времени запаздывания  $\tau$  в контуре по току и оцениваются несколькими Гц, что удовлетворяет требованиям к быстродействию.

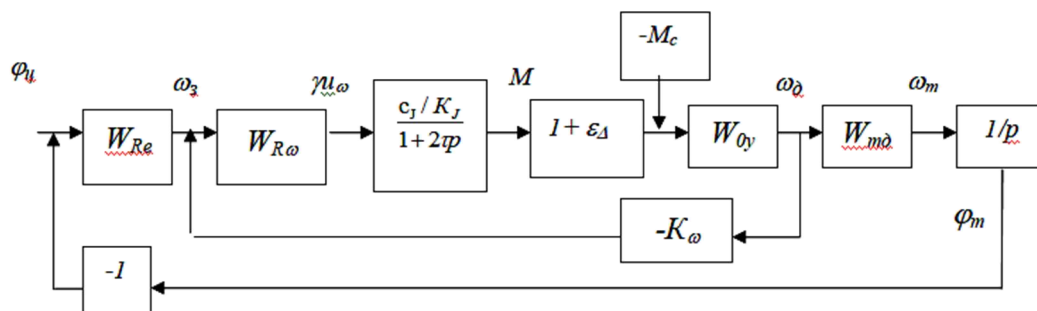


Рисунок 9 – Схема контуров по угловой скорости и по ошибке слежения

Контур по скорости выбирается согласованно с контуром по току, выходом которого является:  $[2\tau p + 1] K_J J \approx \gamma u_\omega$ . Для  $\tau \approx 0.01$  сек контур по току имеет частоту  $\approx 11$  Гц, контур по скорости в случае П-регулятора  $\Omega_\omega / 2\pi \approx 5.5$  Гц, а в случае ПИ-регулятора  $\approx 4$  Гц. При этом верхняя часть полосы частот может использоваться в системе активного демпфирования микроколебаний конструкции за пределами полосы слежения, а нижняя часть полосы частот – для стабилизации процессов слежения относительно программного движения  $\omega_3$ .

Синтез контура по ошибке слежения  $e = \varphi_u - \varphi_m \approx \varphi_u - \varphi_\omega$  выполняется с учетом получения желаемых переходных процессов, соответствующих плавному низкочастотному сопровождению, согласованному с допустимыми деформациями упругой конструкции телескопа. Представленные параметрические зависимости для электроприводов наведения входят составной частью в структурно-параметрический синтез многосистемного наведения, рассматриваемый в главе 7.

Приведенные модели будут также использованы в главе 8 при исследовании эффективности наведения большого телескопа в условиях возмущений.

**Шестая глава** посвящена детальному исследованию факторов, влияющих на точность измерительных сигналов системы угловой инерциальной навигации КА с большим оптическим телескопом. Их характеристики в комплексах многосистемного наведения телескопов также будут влиять на алгоритмы разделения каналов и контуров управления (будут рассмотрены в главе 7).

В роли таких измерительных средств выбран твердотельный волновой гироскоп (ТВГ), обладающий повышенной надежностью для длительных автоматизированных космических измерений. Достижимые точностные характеристики его сигнала будут принципиально ограничивать точность угловой стабилизации КА с телескопом и, тем самым, определять требования к системам корректирующего слежения более высоких уровней. Кроме этого, от величины систематического дрейфа сигнала ТВГ будет зависеть реализация режимов наведения по слабым световым источникам с увеличенным временем оптической экспозиции.

Для работы в системе угловой стабилизации большого телескопа вместе с КА выбран режим интегрирующего гироскопа (режим датчика угла). Для него показано, что на точность выходного сигнала ТВГ в наибольшей мере влияет несовершенство волновых процессов в резонаторе с технологическими погрешностями. Поэтому в главе исследованы факторы и модели нестабильности дрейфа стоячих волн, варианты алгоритмов формирования измерительных сигналов, а также влияние технологических факторов на ухудшение точности этих сигналов.

Разработанные модели описания внутренних волновых процессов с учетом контуров управления ими позволяют интеллектуально поддерживать процессы изготовления, калибровки и последующей эксплуатации высокоточных ТВГ. Они основаны на применении модального анализа конструкции, проводимого с использованием САПР. На их основе исследовано влияние на точность выходного сигнала технологических погрешностей конструкции ТВГ, его измерительного устройства и контуров внутреннего управления. Последние выполняют селективное возбуждение колебаний резонатора на второй рабочей угловой гармонике путем: 1) подстройки частоты резонансного возбуждения, 2) стабилизации амплитуды рабочей стоячей волны, 3) подавления паразитной квадратурной волны.

В рамках предложенных моделей выделено влияние на скорость систематического дрейфа сигнала следующих технологических факторов: разночастотности, разнородности, погрешности контуров управления, неравномерности рабочих емкостных зазоров, нарушения осесимметричности резонатора и других. Для ее уменьшения рассмотрены технологические, алгоритмические и активные (с помощью контуров управления) способы и методы.

Для уменьшения шумов сигнала предложено использовать: 1) переход на менее шумящую элементную базу; 2) введение дополнительных процедур фильтрации обрабатываемых сигналов для системы сверхнизкочастотной стабилизации КА; 3) выбор малошумящего алгоритма обработки измерительных сигналов.

Дополнительно исследована угловая неравномерности масштабного коэффициента  $K(\theta_A)$ . Среди путей ее уменьшения выделены: 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.

Так как при длительной летной эксплуатации ТВГ следует учитывать старение его механических и электронных компонентов, поэтому на основе использования избыточной информации с датчиков измерительного устройства предложены алгоритмы косвенного контроля рабочих параметров ТВГ.

Проведенные исследования скорости дрейфа и масштабного коэффициента в зависимости от угла стоячей волны, выполненные на промежуточных техноло-

гических 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.

**Седьмая 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 автономного 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 критериях качества для синтеза оптимальных алгоритмов общего слежения всем большим телескопом предлагается учитывать ошибку слежения, затрачиваемое энергопотребление и ограничение на полосу частот управления. При



этом ошибка слежения будет задавать диапазон работы систем корректирующего управления, а полоса частот управления – спектр инерционных возмущений на деформируемую оптико-механическую конструкцию большого телескопа. В работе рассмотрена следующая постановка задачи синтеза управления телескопом:

$$A(p) \alpha = u + f, \quad J_w = m_0^2 \langle \alpha^2 \rangle + m_1^2 \langle (p\alpha)^2 \rangle + m_2^2 \langle (p^2 \alpha)^2 \rangle + m_3^2 \langle (p^3 \alpha)^2 \rangle + \langle u^2 \rangle .$$

После анализа разных частных случаев ее решения, в качестве основных гладких решений выбраны 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.

При синтезе корректирующих систем слежения ограничения по энергопотреблению не столь критичны и поэтому он выполняется по критериям эффективной системной увязки каналов слежения в единый комплекс наведения.

Так как современные комплексы многосистемного наведения являются многорежимными с функцией интеллектуальной настройки на выполняемые задачи и условия наблюдения, поэтому взаимная увязка основных и корректирующих систем слежения проводится для разных вариантов режимов слежения – от односистемных до многосистемных. Для основных вариантов таких режимов предложены структурные схемы итерационного типа в разных вариантах исполнения, которые отвечают технической политике увеличения автономности при производстве и отладке модульных систем управления.

На рисунке 10 показаны примеры основных элементов таких схем: контура общего наведения телескопа (а) и корректирующего слежения ВЗ при высокочастотном (б) и низкочастотном (в) оптических сигналах ошибки  $e$ . Если объединить схемы на рис. 10 (а,б), получим итерационную модель:  $e_\alpha = [1 / (1 + W_T R_\alpha)] \cdot \alpha_{КО}$ ;

$$e = [1 / (1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)] \cdot e_\alpha = [1 / (1 + K_0 W_{B3} R_\varphi)(1 + W_T R_\alpha)] \cdot \alpha_{КО} .$$

Если полосы частот каналов управления сильно различаются, то синтез регуляторов в каждом канале может быть выполнен автономно и почти независимо. Если же полосы частот систем слежения требуется сблизить, то синтез регуляторов каждого последующего канала выполняется с учетом переходных процессов регулирования предыдущих каналов.

Другие варианты реализации схем итерационного типа построены для случаев использования измененного списка измерительных средств комплекса наведения, а также для измененного состава и количества каналов наведения.

Среди них рассмотрены и схемы для режимов слежения по накапливаемому низкочастотному оптическому сигналу ошибки без уменьшения частотных полос их работы. В качестве примера на рис. 10в приведен контур управления ВЗ по датчику положения ДП, который отрабатывает низкочастотное программное управление  $\varphi_{\text{прогр}}(t)$ . Последнее формируется по специальному алгоритму прогноза оптического сигнала ошибки в интервалах между тактами его выдачи.

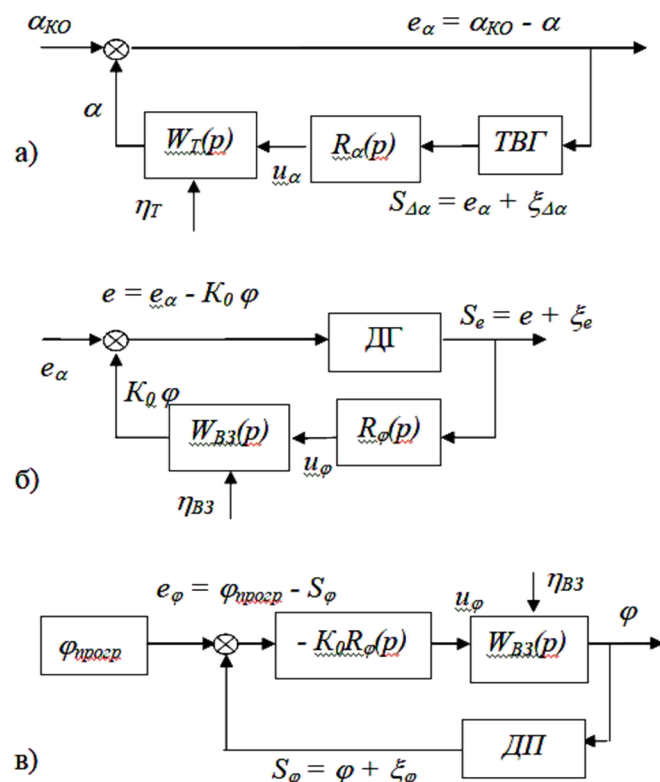


Рисунок 10 – Контур структурных схем

Отдельно учтены 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.

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. Для этого исследованы и оптимизированы алгоритмы с использованием экстраполяции: 1) непосредственно сигнала ошибки слежения  $e(t)$ ; 2) выделенной в сигнале ошибки низкочастотной компоненты  $\alpha(t)$  (с учетом информации датчика положения ВЗ); 3) выделенного сверхнизкочастотного дрейфа «нуля» сигнала гироскопического датчика угла; 4) с использованием сигналов гироскопического датчика угловой скорости. Проведено их сравнение на конкретном примере, которое показало свои сегменты преимущественной работы каждого алгоритма.

Для предложенных структур многоканального слежения наземными и орбитальными большими телескопами предложены методики согласованного синтеза регуляторов из условия эффективной системной увязки каналов наведения в единый комплекс с желаемыми плавными переходными процессами управления в разрешенных полосах частот.

**Восьмая глава** посвящена исследованию модульных систем в составе комплексов наведения больших оптических телескопов, являющихся автоматизированными системами научных исследований. Выполненное моделирование точности наведения наземного телескопа с помощью управления ОПУ подтвердило эффективность трехконтурной системы управления электродвигателями, синтезированной в главе 5. Оно проводилось на основе разработанной там же модели наведения телескопа с упругими элементами электропривода управления.

При этом ошибка слежения условно разделялась на низкочастотную ( $e_n$ ) и высокочастотную ( $e_v$ ) компоненты:  $e = e_n + e_v$ , где в качестве  $e_n$  рассматривались составляющие, находящиеся за пределами времени оптической экспозиции. Учет  $e_n$  был важен с точки зрения удержания изображения в области оптического ПЗС-приемника. При необходимости ее можно уменьшить путем повышением астатизма обратной связи, а также введением дополнительно настраиваемых контуров на хорошо прогнозируемое движение наблюдаемого космического объекта.

Приведенные в работе результаты моделирования соответствуют ошибке  $e_v$  на временных интервалах в несколько секунд, так как она в наибольшей мере влияет на «смаз» оптического изображения. Результаты показали важность исследования влияния на точность наведения следующих эксплуатационных факторов: действия ветровых нагрузок, внутренних пульсаций тока, упругости статора электродвигателей, упругости вала силовой передачи на телескоп и других. Так, при крайне малых возмущающих факторах (пульсации тока, ветровой нагрузки и от упругости передачи) для выбранных параметров моделирования амплитуда ошибки  $e_v$  не превышала 0.05 угл.сек. Однако при уменьшении упругости азимутального вала  $C/I_m$  от  $10^4$  до  $10^3$  она возросла от практически начальной до 0.25 угл.сек. При учете пульсаций тока  $\varepsilon_d = A_\varepsilon \cos \{2N[\varphi_d + \varphi_{cm}]\}$  ( $N=50$ ) для  $A_\varepsilon = 0.1$  амплитуда оценивалась в 0.7 угл.сек, а при  $A_\varepsilon = 0.33$  – уже в 2.5 угл.сек. При учете упругости статора электродвигателя  $\Omega_{cm} = 50$  рад/с на интервале экспозиции более 0.25 сек амплитуда достигала 30 угл.сек. При действии ветра с  $\Omega_g = 3 - 6$  рад/сек (в диапазоне) для  $A_g / I_m = 0.01$  амплитуда составила 25 угл.сек, а для  $A_g / I_m = 0.02$  – 40 угл.сек. Тем самым показано, что на коротких экспозициях при правильном выборе параметров имеется возможность достижения высоких точностей одноканального слежения – до  $e_v < 0.1$  угл.сек. Однако неправильно выбранные параметры электропривода и его упругих элементов могут существенно ухудшить ошибку слежения. Особенно опасными из внешних возмущений являются не-

контролируемые ветровые моменты. Дополнительный учет деформируемости конструкции большого телескопа может еще более ухудшить приведенные результаты и потребовать обязательного включения системы корректирующего слежения.

Потенциальные возможности двухсистемного наведения исследовались для практически важного случая замедленного такта выдачи оптического сигнала ошибки датчиком гида ДГ (в полосе  $5 \div 10$  Гц). За основу был выбран традиционный контур обратной связи (Рис. 10 б) при отсутствии среднечастотных возмущений. Он выбирался с помощью процедуры синтеза оптимального регулятора в MATLAB для эквивалентной модели без запаздывания (переход к ней был выполнен с использованием аппроксимации Паде), но его эффективность исследовалась на исходной дискретно-непрерывной модели. При оптимальной настройке регулятора на автокорреляционные характеристики отслеживаемого сигнала была достигнута точность слежения ниже 0.1 угл.сек (рис 11а), но регулятору для этого потребовалось понизить полосу пропускания контура управления до 0.55 Гц.

Для работы в более широкой полосе частот контура корректирующего слежения была применена схема на рис. 10в, в которой низкочастотное программное управление формировалось по специальному алгоритму (с восстановлением низкочастотного сигнала ошибки в интервалах между тактами его выдачи). При этом система угловой стабилизации КА, как и ранее, работала по своему гироскопическому датчику, медленный дрейф которого в комплексированном алгоритме корректируется по сигналу ошибки ДГ и сигналу ДП. В этом случае полученная ошибка двухканального наведения также не превышала 0.1 угл.сек., но уже с сохранением широкой полосы работы контура управления ВЗ (Рис. 11б).

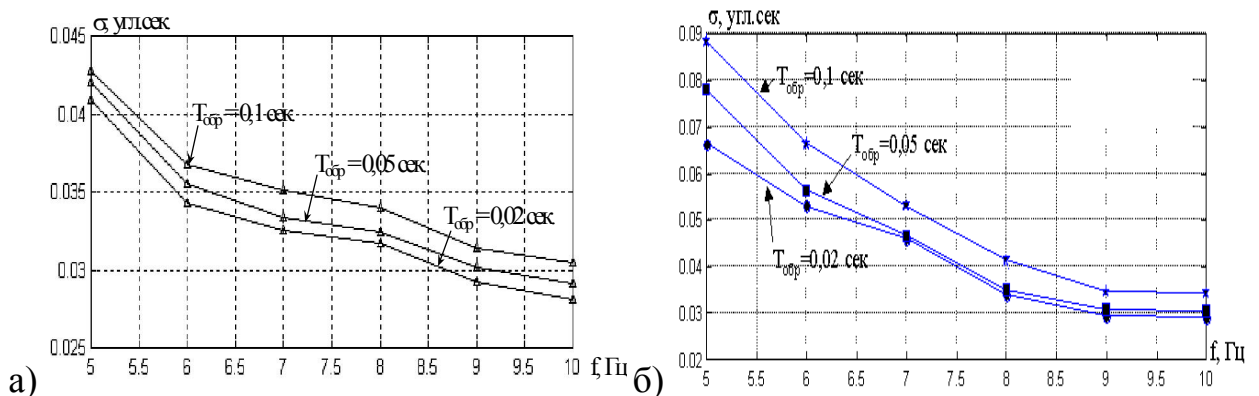


Рисунок 11 – Зависимость ошибки слежения от частоты ДГ

На рисунке 11 приведено сравнение ошибок слежения для первого (а) и второго (б) вариантов при учете дополнительных задержек на считывание и обработку сигнала ( $T_{обр} = 0.02$  сек, 0.05 сек, 0.1 сек). В расчетах принималось: СКО шума  $\sigma_{ДГ} = 0.033$  угл.сек,  $\sigma_{ДП} = 0.02$  угл.сек, частота ДП – 100 Гц, резонансная частота ВЗ – 3 Гц, гармоническая остаточная ошибка слежения КА с амплитудой

$A = 2.5$  угл.сек, частотой  $0.023$  Гц и максимальной скоростью  $\dot{\alpha}_m = 0.36$  угл.сек/сек. Несколько худшие результаты для второго рисунка при низких частотах ДГ объясняются отсутствием оптимальной настройки экстраполятора и контура управления на отслеживаемый сигнал (в отличие от первого подхода применялся обычный ПИД-регулятор), а также влиянием дополнительных шумов ДП.

**Девятая 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.

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.

Предложенные алгоритмы кластеризации и прореживания больших массивов приводов управления основываются на преобразованиях остаточной ошибки оптимальной аппроксимации искажений ВФ  $\varphi$  изменяемым зеркалом с заданным количеством приводов управления, создающим усилия  $P_i$  и функции отклика  $R_i$ :

$$\Delta^* = \frac{1}{S} \|\varphi\|^2 - \sum_{i=1}^n b_i P_i; \quad \sum_{i=1}^n a_{ij} P_i = b_i, \quad b_i = \frac{1}{S} (\varphi, R_i), \quad a_{ij} = \frac{1}{S} (R_i, R_j).$$

Сначала решается задача аппроксимации с помощью максимально допустимого числа приводов коррекции. Далее целенаправленно объединяются (алгоритм кластеризации приводов) или удаляются (алгоритм прореживания приводов) те из них, без которых остаточная ошибка ухудшится в наименьшей мере.

Для алгоритма кластеризации преобразования управляющих усилий  $P_i$  и ошибки аппроксимации  $\Delta^*$  после объединения  $l$  приводов имеют вид:

$$\begin{aligned} P'_i &= P_i - \sum_{k=1}^{l-1} \sum_{j=1}^{l-1} \square_{kj} (C_{ik} - C_{il}) (P_j - P_l), \quad i = \overline{l, n} \\ \Delta^{*'} &= \Delta^* + \sum_{k=1}^{l-1} \sum_{j=1}^{l-1} \square_{kj} (P_k - P_l) (P_j - P_l). \\ C'_{ij} &= C_{ij} - \sum_{k=1}^{l-1} \sum_{s=1}^{l-1} h_{ks} (C_{ik} - C_{il}) (C_{sj} - C_{lj}), \quad i, j = \overline{l, n}. \end{aligned}$$

где  $c_{ij}$  и  $\square_{ij}$  - элементы матриц, обратных соответственно к матрицам с элементами  $a_{ij}$  и  $\{C_{ij} - C_{il} - C_{lj} + C_{ll}\}$ ,  $i, j = \overline{(1, l-1)}$ .

При отдельной коррекции оптических aberrаций в виде полиномов Цернике низших порядков выполненная кластеризация приводов упругого мембранного адаптивного зеркала подтвердила эффективность алгоритма.

Алгоритм прореживания приводов основан на преобразованиях:

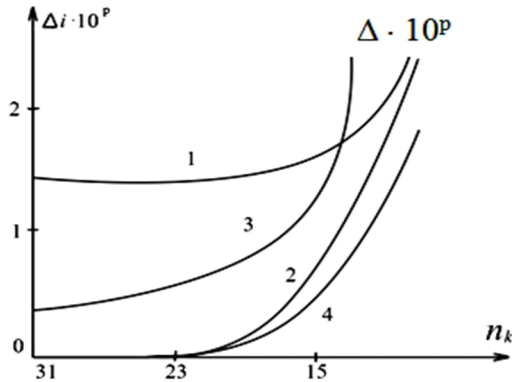


Рисунок 12 – Ухудшение ошибок аппроксимации полиномов Цернике в зависимости от числа оставшихся приводов: 1 –  $Z_4$ ,  $p = 3$ ; 2 –  $Z_5$ ,  $p = 2$ ; 3 –  $Z_7$ ,  $p = 4$ ; 4 –  $Z_9$ ,  $p = 2$

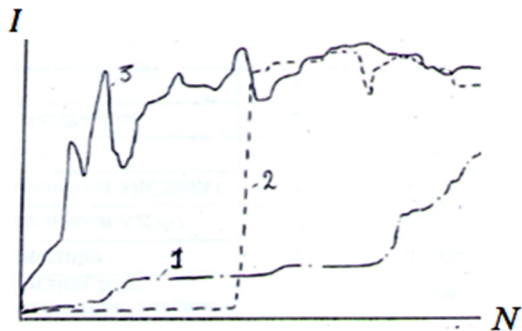


Рисунок 13 – Зависимость  $I$  от количества итераций  $N$ : графики 1, 2, 3 соответствуют значениям  $m$ : 0, 1, 1.5

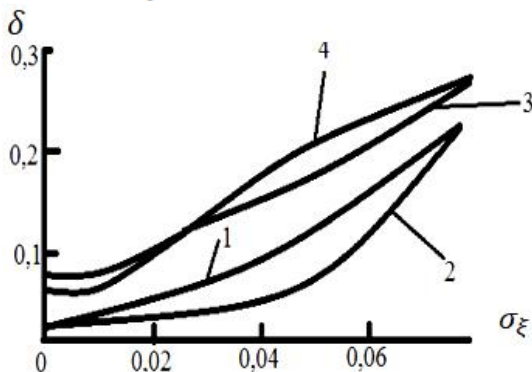


Рисунок 14 – Зависимость ошибки коррекции от шума измерений (при  $d_0/d_L = 1,7$ ) для длинных (кривые 3, 4) и для коротких (кривые 1, 2) экспозиций

$$P'_i = P_i - \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^l \tilde{h}_{kj} C_{ik} P_j,$$

$$\Delta'^* = \Delta^* + \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^l \tilde{h}_{kj} P_k P_j,$$

$$C'_{ij} = C_{ij} - \sum_{k=1}^l \sum_{s=1}^l \tilde{\square}_{ks} C_{ik} C_{sj}, \quad i, j = \overline{l+1, n},$$

где  $\tilde{\square}_{ks}$  - элементы матрицы, обратной к матрице с элементами  $C_{ks}$ .

Выполненное прореживание приводов пластинчатого гибкого зеркала в той же задаче коррекции ВФ подтвердило эффективность алгоритма (Рис. 12).

На основе этих алгоритмов 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.

Для задач ускорения скорости коррекции волновых aberrаций через градиентную оптимизацию функционалов резкости изображения  $I$  предложено сначала сформировать ортонормированные по апертуре модальные функции  $f_j(\vec{r})$ . Далее для управления их амплитудой обоснованы обратно пропорциональные зависимости градиентных шагов  $\beta^k$  от оптически измеряемых функционалов:

$$v_i^{k+1} = v_i^k + \beta^k \left( \frac{\delta I}{\delta v_i^k} + \eta_i^k \right), \quad \beta^k = \frac{1}{2\alpha} (I^k)^{-m}.$$

$$\psi(\vec{r}) = \sum_{j=1}^n v_j f_j(\vec{r}), \quad \text{где } k - \text{номер итерации,}$$

$$\eta_i^k - \text{погрешности в измерениях.}$$

На практике это позволяло существенно



ускорить процесс сходимости градиентного алгоритма (иногда до 10 раз: на рисунке 13 показан процесс адаптивной фокусировки на шероховатый объект).

При выполнении коррекции aberrаций ГЗ по слабым световым источникам для усиления оптического сигнала исследованы возможности кластеризации нескольких пикселей ПЗС-матрицы оптического приемника (путем суммирования их сигналов в условиях шумов измерений). Показано, что допускается превышение размера получающихся пикселей над диаметром пятна фокусировки примерно в 1.5 – 2 раза (Рис. 14). При этом управление зеркалом сначала следует проводить для слабо расфокусированного изображения, с последующей фокусировкой.

Для задач оптимизации систем адаптивной атмосферной оптики с обратной связью по ВФ предложен алгоритм построения небольшого числа слабо коррелированных пространственных форм управления. Он основывается на полиномиальной аппроксимации структурной функции искажений волнового фронта в турбулентной атмосфере:

$$D_\varphi(r) = 6,16 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{5/3} \int_0^\infty (1 - J_0(x)) (x^2 + \alpha^2 r^2)^{-11/6} x dx \Rightarrow D_\varphi(r) \approx \left( \frac{D}{r_0} \right)^{5/3} \sum_{i=1}^M a_i r^{2i},$$

где  $r_0$  – радиус корреляции Фрида;  $D$  – диаметр апертуры;  $r = \rho / D \in (0,1)$ ;  $\alpha = 2\pi D / L_0$ ,  $L_0$  – внешний масштаб турбулентности.

В сравнении с более сложным расчетом оптимальных функций Карунена-Лоева, задача сводится к нахождению собственных функций матриц порядка  $M$ .

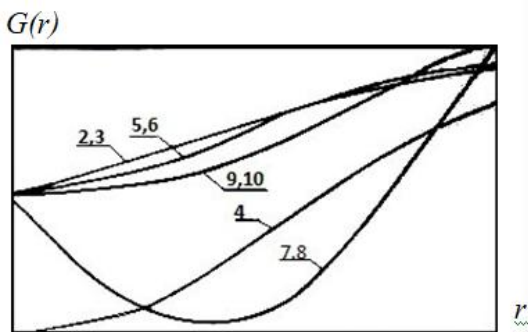


Рисунок 15 – Радиальные полиномы

При этом использование полученных десяти полиномов (Рис. 15) ухудшило ошибку коррекции  $\langle \Delta \rangle$  на величину, меньшую 1%. Удобством такого алгоритма является относительная простота его эксплуатационной настройки на учет влияния внешнего масштаба турбулентности.

Так как найденные полиномы оказались близки к полиномам Цернике низших порядков, поэтому решение следующей задачи оптимизации – коррекция атмосферных aberrаций в динамике рассматривалась на примере последних.

Для этого были получены линейные фильтры, аппроксимирующие автокорреляционные функции разложения атмосферных случайных искажений ВФ по полиномам Цернике низших порядков:

$$\dot{\xi}_i + \alpha_i \xi_i = \zeta_i, \quad i \leq 3; \quad \ddot{\xi}_i + 2\alpha_i \dot{\xi}_i + (\alpha_i^2 + \gamma_i^2) \xi_i = \zeta_i, \quad i > 3;$$

где  $\tau = 2Vt_0/D$  – безразмерное время,  $t_0$  – размерное время,  $V$  – скорость ветра,  $D$  – диаметр апертуры;  $\zeta_i$  – белые шумы.

Далее с целью повышения скорости динамической коррекции они учитывались при синтезе оптимальных регуляторов управления зеркалом. В расчетах относительные ошибки коррекции при тех же энергетических затратах управления были уменьшены примерно в 1.5 - 2 раза по сравнению с использованием регуляторов без настройки на корреляционные свойства атмосферных aberrаций.

В рамках решения сопутствующей задачи по исследованию свойств атмосферной турбулентности предложена также 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.

Для излучающих вспомогательных систем исследование схем управления ВФ с помощью контуров оптической обратной связи подтвердило их потенциальную эффективность и перспективность в расширении возможностей управления. Моделирование эффективности выполнялось при описании фазовых искажений полиномами Цернике  $Z_j$ :  $\varphi_{иск}(r) = \sum_{j=1}^N \xi_j Z_j(r)$ , где  $N = 11$ ,  $\xi_j$  – случайные величины. Глубина модуляции  $\varphi_{иск}$  составляла  $\sim 2\pi$ . Усреднение проводилось по реализациям случайных фазовых экранов.

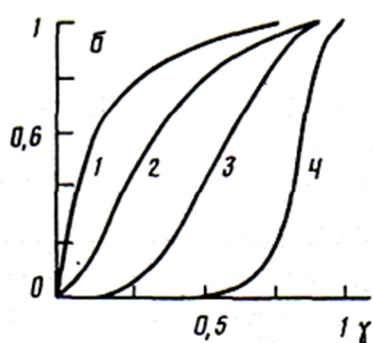


Рисунок 16 – Зависимость  $\langle St \rangle$  от  $\gamma$  для усилителей: 1 –  $k_0 = 15$ , 2 – 5, 3 – 1, 4 – 0.1

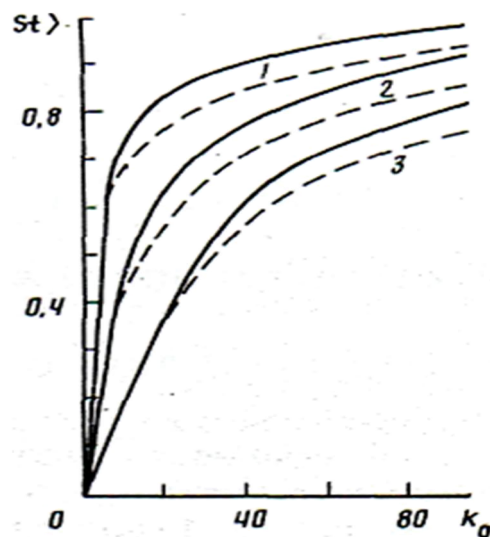


Рисунок 17 – Зависимость  $\langle St \rangle$  от  $k_0$  при коррекции фазовых искажений методом апертурного зондирования (сплошные кривые) и фазового сопряжения (штриховые) : 1 –  $\gamma = 0.3$ , 2 – 0.1, 3 – 0.05

Эффективность подавления фазовых искажений в активной среде лазерных усилителей показана на рис. 16, а возможности уменьшения лучевой нагрузки на управляемое зеркало – на рис. 17 (при выключенной же цепи оптической обратной связи фактор  $\langle St \rangle$  был мал и составлял  $\sim 10^{-3}$ ). При этом наведенная нелинейная фазовая задержка описывалась моделями, приведенными в главе 4. В итоге дополнительный контур оптической обратной связи будет эффективен при  $k_0 \gamma \gtrsim 10$ . При этом значительно уменьшится лучевая нагрузка на управляемое зеркало, а также само компенсируются возникающие искажения фазы излучения при прохождении лазерного усилителя.

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.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**В Приложении** представлены акты внедрения и использования результатов диссертационной работы в ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», в ФТИ УрО РАН (г.Ижевск), на АО «ИЭМЗ «Купол» (г. Ижевск), на АО «ИМЗ» (г. Ижевск), в ЗАО «НПЦ «Техинформ» (г. Королев).

## **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 САД/САЕ моделей с учетом всех конструктивных деталей изготовления объектов управления позволяет формировать уточненные передаточные функции контуров управления в расширенных 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 проектных 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 сопровождающим 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 состав-

ных 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 слабо коррелированных 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях и в изданиях, приравниваемых к ним, из перечня ВАК**

1. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Аппроксимация структурной функции фазы волнового фронта // Оптика атмосферы. – 1989, Т 2, № 2, – С. 160-163.
2. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Оптимизация расположения приводов в пластинчатых гибких зеркалах // Оптика атмосферы. – 1989, Т 2, № 3, – С.326 - 328.
3. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Проектирование измерительного устройства для систем атмосферной адаптивной оптики // Оптика атмосферы. – 1989, Т 2, № 5, – С. 555 - 560.
4. Шишаков К.В., Исупов А.Н., Артемьева Е.М. Проектирование электростатического привода мембранного корректора волнового фронта // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 1989, № 6, – С.62-65.
5. Шишаков К.В., Воронцов М.А., Управление фазой световых пучков с помощью оптической обратной связи // Квантовая электроника. – 1989, Т 16, № 6, – С. 1101 - 1103.
6. 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.
7. 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.
8. 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.



9. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Расчет гибких пластинчатых зеркал для компенсации атмосферной турбулентности // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 1990, - Т 33, - № 11. – С. 63-67.
10. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Полиномиальное разложение атмосферных aberrаций // Оптика атмосферы. – 1990, Т 3, № 12.
11. 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
12. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Анализ динамической коррекции атмосферных aberrаций гибкими зеркалами // Оптика атмосферы. – 1991, Т 4, № 2.
13. Шишаков К.В., Воронцов М.А. Фазовые эффекты в пассивных нелинейных резонаторах // Квантовая электроника. – 1991, № 1.
14. 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
15. Шишаков К.В., Сеидов А. Исследование оптической рефракции на приземных трассах в аридной зоне // Оптика атмосферы. – 1993, Т 6, № 1. – С. 42 - 49.
16. Шишаков К.В., Бендер С.А. Численное сравнение методов интегрирования конечно-разностных уравнений динамики пластин. // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 1999, № 4. – С. 78 - 80.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Шишаков К.В., Исупов А.Н. Системный анализ проблемы наведения большого наземного информационного телескопа. // Вестник ИжГТУ. – 2005, № 1, – С. 18 – 31.
21. Шишаков К.В. Модель электропривода при наличии пульсаций выходных характеристик. // Вестник ИжГТУ. – 2006, №2. – С. 42 - 48.
22. Шишаков К.В. Управление прецизионным электроприводом в условиях возмущений. // Вестник ИжГТУ. – 2007, № 3. – С. 81 – 83.
23. 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.
24. Шишаков К.В. Системный анализ параметров сканирующих зеркал. // Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практический журнал.– Ижевск: ИжГТУ, – 2009. № 1 – С.188 – 199.
  25. 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.
  26. Шишаков К.В. Частотный анализ состава системы наведения большого телескопа. // Интеллектуальные системы в производстве, Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ. – 2010, № 1. – С. 249 - 257.
  27. Шишаков К.В. Создание управляющих моментов с помощью жидкостных маховиков. // Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ. – 2010, № 1 – С.108 - 114.
  28. 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.
  29. Шишаков К.В. Анализ систематического дрейфа стоячей волны в твердотельном волновом гироскопе. // Вестник ИжГТУ. – 2010, № 4. – С. 144 – 148.
  30. Шишаков К.В. Модели объекта управления для системы поддержания стоячей волны в твердотельном волновом гироскопе. // Вестник ИжГТУ. – 2010, № 3. – С. 144 – 147.
  31. Шишаков К.В. Управление угловым перемещением сложного прецизионного объекта. // Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ. – 2011, № 2 – С.221 - 235.
  32. Шишаков К.В. Повышение помехоустойчивости алгоритма обработки измерительных сигналов твердотельного волнового гироскопа. // Вестник ИжГТУ. – 2012, № 1. – С. 76 – 79.
  33. Шишаков К.В. Системный анализ и синтез упругой конструкции большого телескопа с элементами управления // Вестник ИжГТУ– 2012, № 1.– С. 112 – 115
  34. 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.
  35. Шишаков К.В., Бояршинов М.А., Караваев П.В., Батулин А.С., Савельев А.В. Методика расчета радиолиний между двумя антеннами. // Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ, 2016. - № 3 – С.64 - 67.

36. Шишаков К.В., Бояршинов М.А., Караваев П.В., Батулин А.С., Савельев А.В. Расчет и повышение эффективности основных параметров радиолиний с укороченными вибраторными антеннами КВ и УКВ диапазонов. // Интеллектуальные системы в производстве. Научно-практич. журнал. – Ижевск: ИжГТУ, 2017. - № 1 – С.47 - 51.
37. 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.

**Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus**

38. Shishakov K.V., Vorontsov M.A. Phase effects in passive nonlinear cavities // JOSA-A: Optics, Image Science, and Vision. - USA. – 1992. - № 9. – P. 71-79
39. 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.
40. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Слабокоррелирующие полиномы для описания атмосферных aberrаций // Вестник МГУ. Сер.3. Физика, астрономия. – 1989, Т 30, № 4, – С. 89 - 91.
41. 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
42. Шишаков К.В., Шмальгаузен В.И. Метод оптимизации управления поверхностью в задачах с обратной связью. // Автоматика и телемеханика. – 1992, № 2. – С. 54 – 60.
43. Шишаков К.В., Газизов С.Г. Анализ управления малым спутником при аэродинамической, гравитационной и активной стабилизации. // Космические исследования. – 1999, № 3, – С. 296 – 305.
44. Шишаков К.В. Точность вычисления ошибки слежения в двухканальной системе пространственной ориентации по слабому сигналу. // Автоматика и телемеханика. – 2000, № 4, – С. 88-96.
45. Шишаков К.В., Газизов С.Г. Коррекция aberrаций космического телескопа по функционалам интенсивности при превышении размеров ячеек регистрации над пятном фокусировки. // Оптический журнал. – 2000, № 5, – С. 79 - 81.

**Научные и учебные издания по теме диссертации**

46. Шишаков К.В. Информационные оптические системы космического назначения с многоканальным управлением. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011. – 346 с.
47. Шишаков К.В. Твердотельные волновые гироскопы: волновые процессы, управление, системная интеграция. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2018. – 264 с.

### Публикации в прочих изданиях, в том числе материалы конференций

48. Шишаков К.В., Воронцов М.А., Компенсация искажений волнового фронта в пассивных нелинейных кольцевых резонаторах // Препринт физического факультета МГУ. – 1989, № 27, – 4 с.
49. 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
50. Шишаков К.В. Адаптивная компенсация флуктуаций световых полей в лазерных усилителях. // Труды института математики и механики АН Туркменистана, Ашхабад. – 1995 – С. 225-234.
51. Шишаков К.В., Сеидов А. Исследование вертикальной зависимости оптической рефракции в приземном слое атмосферы // Известия АН Туркменистана. Сер. ФТХГ. – 1995, № 5. - С. 133-135.
52. 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.
53. 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.
54. Шишаков К.В., Исупов А.Н. Построение моделей подсистем уникальных комплексов с использованием 3D-технологий. // Газоструйные импульсные системы: Сб. ст. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2000. Т.2. - С. 248 – 258.
55. 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.
56. 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.
57. Шишаков К.В., Бендер С.А. Расчет управления формой поверхности пластинчатых кольцевых зеркал. // Вестник ПГТУ. Аэрокосмическая техника. – Пермь: ПГТУ, 2000. № 7. – С. 21 - 27.
58. 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.
59. Шишаков К.В., Исупов К.С., Ефремов С.М. Построение передаточной функции модуля прецизионного наведения космического телескопа // Техника машиностроения. – 2001, № 5, – С. 27 - 29.

60. Шишаков К.В., Исупов К.С. Проектирование контура управления следящей системы с дискретным измерительным сигналом // Наука производству. – 2002. № 1. - С. 30 - 32.
61. 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
62. Шишаков К.В. Методика предварительной системной оценки параметров приводов наведения больших оптических систем. // Приборостроение в XXI веке-2006. Труды III НТК – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, – 2007. – С.197– 202.
63. Шишаков К.В. Структурная декомпозиция многоканального наведения информационной оптической системы с большой апертурой. // Приборостроение в XXI веке – 2007. Труды 4 НТК– Ижевск: Изд-во ИжГТУ, – 2008.– С. 129–136.
64. 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.
65. Шишаков К.В., Мачехин П.К. Анализ вариантов уменьшения систематического дрейфа твердотельного волнового гироскопа. // Приборостроение в XXI веке – 2011. Труды VII НТК – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, – 2012. – С. 432– 435.
66. 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.
67. 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. Труды XIII Междунар. НТК. – 2018. – С. 582-587.
68. 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. Труды XIV Всерос. НТК– Ижевск: Изд-во ИжГТУ, – 2018. – С. 318 – 324.