



Филиал ФГУП «НПЦАП им. академика Н.А.Пилюгина»

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
«КОРПУС»

(Филиал ФГУП «НПЦАП» — «ПО «Корпус»)

Осипова ул., д. 1, Саратов, 410019
Тел.: +7 (8452)64-84-85. Факс: +7(8452)64-15-02
www.korpus64.ru, e-mail: po_korpus@forpost.ru
ИНН/КПП 7728171283/645243001
ОГРН 1027739552642

20.05.2019 № 8-230/343

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук,

Калихмана Дмитрия Михайловича

на диссертацию Шишакова Константина Валентиновича

«Теоретические основы, методы, модели и алгоритмы для разработок
многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов»,

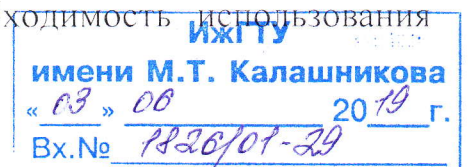
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальностям: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (в машиностроении и приборостроении),

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

(в науке и технике).

Актуальность темы исследования

Создание современных больших оптических телескопов с размерами до 10 и более метров сопровождается использованием облегченных оптико-механических конструкций с допустимыми механическими деформациями их элементов. Для нейтрализации таких деформаций в сложных процессах их сверхточного наведения используются все последние достижения точной механики, оптики, теории ориентации и навигации. Применяемая совокупность измерительных средств и активных приводов управления объединяется сначала в модульные системы управления, из которых окончательно интегрально формируются многосистемные комплексы наведения больших оптических телескопов. Такое многосистемное объединение имеет свою специфику для больших наземных телескопов и для больших космических телескопов. Высокая стоимость этих проектов, а также необходимость использования



высоких и уникальных технологий сдерживали в последнее время развитие данного направления в России, в то время, когда за рубежом построено и эффективно функционирует уже много уникальных наземных телескопов с диаметрами около 10 метров, причем в настоящее время разрабатываются уже проекты наземных сверхбольших оптических телескопов с диаметрами до 30 и более метров.

Поэтому актуальность темы исследования для отечественного крупногабаритного телескопостроения не вызывает сомнения. Из-за уникальности каждого из проектов больших оптических телескопов являются актуальными и составные направления ее раскрытия, касающиеся совершенствования многоконтурных систем управления электроприводами углового слежения всем телескопом, корректирующих каналов слежения вторичными и другими зеркалами в оптическом тракте, низкочастотных систем активной оптики, высокочастотных систем адаптивной оптики, а также других вспомогательных управляемых элементов, устройств и систем. Распределение ролей и эффективная увязка разных вариантов реализации перечисленных составных частей комплекса наведения с точки зрения оптимального раскрытия его интегрального потенциала также актуальны в современных проектах.

В результате можно утверждать, что проблема повышения качественных и эксплуатационных показателей функционирования разрабатываемых и создаваемых уникальных сверхбольших оптических телескопов (наземных и орбитальных) за счет увеличения интегрального потенциала от улучшения характеристик и взаимодействия модульных систем управления, объединяющихся в их настраиваемые многосистемные комплексы наведения, является актуальной проблемой, имеющей важное хозяйственное значение для отечественного крупногабаритного телескопостроения.

Оценка содержания диссертации

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

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. Рассмотрены вопросы научной новизны и практической значимости диссертационной работы, достоверности и обоснованности полученных в диссертационной работе результатов. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведена системная характеристика и выполнен анализ параметров современных эксплуатируемых и разрабатываемых больших

оптических телескопов (наземных и космических), имеющих многосистемные комплексы наведения. В том числе, систематизированы параметры и требования для входящих в них модульных систем управления конкретными конструктивными реализациями соответствующих проектов больших наземных и космических телескопов. Определены основные принципы синтеза таких комплексов наведения. Глава завершается постановкой проблемы исследования и определением направлений ее решения в соответствии с поставленными задачами.

Во второй главе разработаны основы методологии системного анализа и синтеза многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов на основе пространственно-временной частотной декомпозиции. Детализированы постановки задач системного анализа, синтеза, оптимизации и управления модульными системами в составе комплексов многосистемного наведения. При этом все рассматриваемые модульные системы комплекса разделены на системы общего слежения, корректирующего слежения, активной оптики, адаптивной оптики и обеспечивающие.

Третья глава посвящена построению моделей модульных систем слежения, выделяя в них важнейшие группы конструктивных параметров. Предложенные модели предназначены для сопровождения разработок основных систем слежения в составе комплексов наведения больших оптических телескопов. Низкочастотные аналитические модели предназначены для последующего аналитического синтеза многосистемного комплекса слежения. Среди них: низкочастотные модели следящего телескопа в альтимутальной монтировке, низко и среднечастотная модели управляемого по наклонам вторичного зеркала большого телескопа, низкочастотные модели плавной стабилизации космического аппарата вместе с орбитальным телескопом.

Высокочастотные компьютерные модели предложены в качестве сопровождающих 3D моделирование механических конструкций. Предложенная методика их получения апробирована на примере высокочастотной модели управляемого по наклонам вторичного зеркала большого телескопа.

На примере управляемого по наклонам упругого диагонального третичного зеркала рассмотрено расширение полосы частот его работы путем включения контура активного демпфирования низших резонансных колебаний.

Четвертая глава посвящена моделям с распределенными параметрами для описания управляемых деформируемых зеркал модульных систем коррекции волнового фронта в составе комплексов наведения больших оптических телескопов. Построены модели и выполнено моделирование управляемых деформаций главных зеркал телескопов для модулей активной оптики, приведены модели гибких зеркал для компенсации влияния

атмосферной турбулентности в составе модулей адаптивной оптики, предложены системы организации дополнительной оптической обратной связи для управления волновым фронтом.

Пятая глава посвящена анализу моментных электроприводов, обеспечивающих точность первой ступени углового наведения большого наземного телескопа – в его опорно-поворотном устройстве. Приведены методика оценки предварительных проектных требований к ним с учетом внешних возмущений для случаев наблюдения астрономических объектов и низкоорбитальных объектов в околоземном пространстве. Предложены уточненные модели описания таких электроприводов с учетом внутренней упругости их элементов и внутренних электромагнитных возмущений. Рассмотрены варианты синтеза трехконтурной обратной связи для повышения точности слежения.

В шестой главе выделена значимость точности твердотельного волнового гироскопа, выбранного автором диссертационной работы в роли измерителя первой ступени углового наведения космического телескопа – точности угловой ориентации космического аппарата вместе с телескопом. Такая значимость возрастает по мере удлинения временных экспозиций измерения оптического сигнала ошибки наведения по слабым звездным источникам.

В главе предложены детализированные имитационные модели для сопровождения разработок, изготовления и эксплуатации высокоточных твердотельных волновых гироскопов, а также выполнены исследования факторов и алгоритмов, ухудшающих точность их измерительных сигналов. В том числе, учтены особенности алгоритмов формирования сигналов в измерительном устройстве. С точки зрения последующего комплексирования всех измерительных средств комплекса многосистемного наведения большого космического телескопа, в главе углубленно описаны и исследованы модели временного дрейфа сигнала твердотельного волнового гироскопа с учетом влияния контуров внутреннего управления его волновыми процессами.

Седьмая глава посвящена разработке методологии обеспечения эффективного взаимодействия модульных систем слежения в рамках теории структурно-параметрического синтеза многосистемных комплексов слежения больших оптических телескопов. Она применяется сначала к наземным, а потом и к космическим большим телескопам. При этом синтез первой ступени наведения выполняется с учетом критерия уменьшения создаваемых инерционных нагрузок на деформируемую конструкцию всего телескопа. Синтез последующих ступеней слежения проведен с использованием итерационных структур управления, что позволяет повысить автономность их разработки, изготовления и настройки. Для повышения наглядности, методология структурно-параметрического синтеза изложена на упрощенных

моделях, приведенных в предыдущих главах. Это позволило предложить простую методику выбора и согласование параметров синтезируемых регуляторов в многосистемных комплексах слежения. Полученные результаты могут быть приняты в качестве начального приближения при решении уточненных задач синтеза оптимального управления для детализированных многофакторных моделей соответствующих объектов управления. Отдельно рассмотрено применение предложенной методологии структурно-параметрического синтеза к комплексам многосистемного слежения больших космических телескопов, включая синтез их структур, режимов и алгоритмов управления. Для них дополнительно исследовано влияние характеристик измерительных средств на алгоритмы их комплексирования, а также на настройку структуры комплекса двухсистемного наведения.

В восьмой главе приведены результаты имитационного моделирования точности слежения для некоторых вариантов одноканального (односистемного) и двухканального (двухсистемного) слежения. Основное внимание уделено выявлению влияния наиболее значимых конструктивных факторов и параметров на прогнозирование точности такого слежения. Так, при моделировании процессов одноканального слежения наземным телескопом за космическим объектом в околоземном пространстве детально исследовано влияние эксплуатационных факторов и конструктивных параметров электродвигателей на точностные характеристики слежения.

При моделировании процессов двухканального слежения космического оптического телескопа по слабым звездным источникам с пониженной частоты получения оптического сигнала ошибки (периодически накапливаемого на интервалах экспозиции) отдельное внимание уделено возможности повышения частоты контура обратной связи при управлении активным вторичным зеркалом. Для этого сначала определены частоты замыкания обратной связи по низкочастотному оптическому сигналу ошибки. Далее для их увеличения предложен и исследован вариант с высокочастотным восстановлением сигнала ошибки двухканального слежения.

Девятая глава посвящена всеобъемлющей интегральной настройке многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов через оптимизацию модульных систем коррекции волнового фронта. Предложенные методы настройки могут быть востребованы на всех этапах жизненного цикла больших телескопов, включая этапы разработки, создания и эксплуатации (в том числе, при проведении автоматизированных научных исследований с учетом непредвиденных обстоятельств).

В диссертационном исследовании предложены и исследованы следующие методы тонкой настройки систем управления волновым фронтом: кластеризация и прореживание приводов управления для оптимизации пространственной структуры систем коррекции волнового фронта,

оптимизация градиентных методов коррекции волнового фронта по функционалам интенсивности светового поля, оптимизация систем адаптивной атмосферной оптики с обратной связью по волновому фронту, градиентного управления активными зеркалами при слабом световом сигнале. Также выполнен анализ новых возможностей систем управления волновым фронтом при введении контуров оптической обратной связи, позволяющих ослабить требования к лучевой стойкости гибких зеркал и к фазовым флуктуациям в оптических усилителях.

В заключении приведены основные научные и практические результаты диссертационной работы.

Список использованных источников включает 344 работы.

В приложениях представлены акты внедрения научных и практических результатов диссертационного исследования.

Анализ содержания позволяет сделать вывод о достижении поставленной цели и решении основных и частных задач диссертационного исследования.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность полученных в диссертационной работе результатов и выводов обеспечены использованием апробированных научных положений и методов исследования, корректном применении математического аппарата, сертифицированных программ моделирования, согласованностью новых результатов с известными. Они не противоречат теоретическим и практическим результатам, известным из научных публикаций.

Подтверждается результатами апробации, внедрения и экспериментальной проверкой отдельных теоретических положений, в том числе широким представлением в научных изданиях, на научных конференциях, а также актами 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).

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Сформулированные в диссертационном исследовании научные положения, выводы и рекомендации в совокупности образуют цельное научное направление, выделяя его в современном крупногабаритном телескопостроении. Оно включает теоретические основы, методы, модели и алгоритмы для разработок многосистемных комплексов наведения больших

оптических телескопов и интегрально увязывает множество достаточно развитых частных направлений современной точной механики, оптики, приборов ориентации и навигации. Это открывает новые возможности по сбалансированному раскрытию потенциала многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов наземного и космического базирования.

Все научные положения, выводы и рекомендации диссертационного исследования Шишакова К.В. характеризуются достаточным уровнем достоверности и новизны.

При этом можно считать выделенные автором научные результаты как новые и существенные.

1. Методология для сопровождения разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов, основывающаяся на их пространственной и временной частотной декомпозиции, которая позволяет взаимно увязать методы, модели и алгоритмы разработок составных модульных систем управления в рамках общей задачи интегрального обеспечения проектной эффективности создаваемых больших телескопов в условиях эксплуатационных микродеформаций их оптико-механических конструкций.

2. 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. 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. 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. Система моделей формирования сигналов твердотельных волновых гироскопов для комплексов наведения больших орбитальных оптических телескопов, позволяющая в процессе их производства уточнить влияние на выходные сигналы технологических допусков изготовления, а также алгоритмов управления внутренними волновыми процессами.

6. Методы и алгоритмы для проведения структурно-параметрического синтеза многосистемных комплексов слежения больших оптических телескопов (наземных и орбитальных) по критериям минимизации эксплуатационных деформаций их облегченных конструкций,

ориентированные на автономность процессов по созданию и начальной настройке модульных систем при сохранении их интегрального единства и согласования для достижения требуемой эффективности наведения.

7. 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. Система взаимно дополняющих методов настройки и оптимизации модульных систем коррекции волнового фронта, призванных в совокупности повысить интегральную эффективность больших оптических телескопов.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждена опубликованием автором 68 печатных работах, среди которых:

- одна монография без соавторов объемом 264 стр.;
- одно учебное пособие без соавторов объемом 346 стр.;
- 8 статей в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus;
- 44 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ рецензируемых научных изданий, из которых 17 работ выполнены соискателем лично, остальные в соавторстве.

Практическая значимость и полезность научных и прикладных результатов, полученных в диссертации

Использование результатов диссертационного исследования целесообразно при обосновании, разработке и реализации наукоемких проектов по созданию эффективных активных модульных систем наведения больших оптических телескопов различного назначения с учетом их интеграции в многосистемные комплексы наведения.

Разработанные имитационные модели рекомендуются для повышения эффективности процессов сопровождения изготовления и эксплуатации многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов на всех этапах их жизненных циклов. Предложенные и исследованные модели, алгоритмы и методики будут полезны:

- на этапах разработки и отладки проектного функционирования многосистемных комплексов наведения больших наземных оптических телескопов;
- на этапах разработки и отладки проектного функционирования многосистемных комплексов наведения больших космических оптических телескопов;

- при компьютерном имитационном сопровождении разработок и эксплуатации многосистемных комплексов наведения в составе больших оптических телескопов (наземных и космических);
- для поиска возможностей повышения эффективности работы подсистем и активных элементов комплексов наведения, включая системы управления электроприводами, угловой пространственной ориентации, активной и адаптивной оптики;
- для обеспечения проектных требований к работе многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов через сбалансированное распределение ролей входящих в них систем управления и раскрытие интегрального потенциала эффективности.

Это позволит расширить возможности принятия решений при сопровождении разработок и территориально распределенного изготовления основных элементов многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов, а также повысить точность их системной увязки и прогнозирования эксплуатационной эффективности наземных и орбитальных больших оптических телескопов с таким многосистемным наведением.

Практическая значимость также подтверждается участием автора в больших отечественных проектах (входящих, в том числе, в Федеральные программы) и приведенными актами внедрений результатов диссертационного исследования 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), а также использованием в учебном процессе ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» (имеются акты об использовании результатов исследований и внедрения).

Замечания по диссертационной работе

1. Автором сформулировано большое число основных положений, выносимых на защиту. Их можно было бы уменьшить, используя обобщающие формулировки.
2. Автор рассматривает применение в системе ориентации и навигации в орбитальных телескопах волновых твердотельных гироскопов. В работе рассмотрен гироскоп разработки НПО «Купол», являющийся прибором класса «грубый – средней точности» с широким диапазоном измерения угловых скоростей и систематическим дрейфом $2-5$ °/ч, о чём сказано на стр. 182 работы. Между тем, известно, что в системе управления орбитальным телескопом измерение больших угловых скоростей не нужно, достаточно измерять угловые скорости до $1-2$ °/с, а вот случайная

составляющая дрейфа должна быть не выше $0,001$ °/ч, а в современных ВТГ, например, фирмы Nortrop Grumman, она составляет $0,00008$ °/ч при диапазоне измерения $0,5$ °/с. Именно ВТГ подобного класса точности используются в современных орбитальных телескопах. ВТГ, рассмотренные в работе, могут применяться в системах телеметрии в орбитальных телескопах, но в этом случае логическая связь с темой диссертации достаточно слабая. Необходимо было в работе указать технические требования к гироскопам подобного класса и их роль в рамках рассматриваемой проблемы.

3. На стр. 182 для ВТГ среднего класса точности приведён параметр «Нелинейность выходного сигнала» - $2 \cdot 10^{-6}$ %. Не совсем ясно, что имеется в виду: нелинейность масштабного коэффициента? В таком случае это абсолютно нереальная величина. Если имеется в виду величина $2 \cdot 10^{-6}$ ppm, то данный параметр вполне реален для прецизионных ВТГ, например разработки фирм Nortrop Grumman и Safran Electronics & Defense (бывшая Sagem), но данная цифра впадает в противоречие с классом ВТГ разработки НПО «Купол», приведёнными в таблице на стр. 182, а также с графиками, приведёнными на стр. 180 диссертационной работы, где величина масштабного коэффициента колеблется от величины $+1,006$ до $0,995$, т.е. в абсолютных величинах составляет $0,005$ ppm или $0,5$ %. Данная величина вполне соотносится с классом приборов телеметрического диапазона и с данными из таблицы на стр. 182. Необходимо было диссертанту обеспечить соответствие параметров ВТГ, разбить их на классы и более чётко определить задачи каждого класса приборов в системе управления орбитальными телескопами.
4. В таблице на стр. 182 указан параметр «Несистематический дрейф». Такого параметра в гироскопии не существует. Есть случайная составляющая дрейфа в запуске и между запусками. Для системы ориентации в БИНС космического применения, тем более в долгоживущих объектах, наиболее важным параметром ВТГ является случайная составляющая дрейфа между запусками, т.к. ВТГ откалибровать в составе БИНС в режиме полёта невозможно. Это – базовый параметр, определяющий временную стабильность нулевого сигнала, а, соответственно, – и класс прибора. Систематический дрейф не столь важен, т.к. его можно компенсировать. Необходимо было корректно указать базовые параметры рассмотренного ВТГ.
5. При описании системы управления не ясно, какая она – аналоговая или цифровая? По описанию передаточных функций – аналоговая, но в современных системах управления космическими объектами, такими как космические обсерватории, используются, и уже давно, цифровые

системы управления. Из работы не совсем ясно, как осуществляется дискретизация передаточных функций системы управления, являющейся многомерной? Какие из известных методов расчёта многомерных систем управления применялись?

6. В уравнениях в главе 7 и структурных схемах, например, 7.1 – 7.4, передаточные функции $W_{\text{НЧ}}$, $W_{\text{ВЗ}}$ и т.д. написаны в абстрактной форме без конкретного указания $W_{\text{НЧ}}(p)$ или $W_{\text{НЧ}}(z)$ без их расшифровки и числовых значений. Такая запись некорректна с точки зрения теории автоматического управления и, тем более, не ясно, рабочие приведены схемы или абстрактные. Какие критерии качества необходимы для обеспечения работы системы управления?

Необходимо отметить, что указанные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Шишакова Константина Валентиновича «Теоретические основы, методы, модели и алгоритмы для разработок многосистемных комплексов наведения больших оптических телескопов» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Анализ содержания диссертации позволяет сделать вывод о достижении автором поставленной цели и решении основных и частных задач диссертационного исследования. Диссертация написана в форме, позволяющей получить достаточно ясное представление о целях, задачах, методах и результатах проведенных автором исследований.

Сформулированные автором выводы и заключения обоснованы, а их достоверность и новизна не вызывают сомнения.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации, в нем с достаточной полнотой изложены основные идеи и выводы диссертационной работы, степень новизны и практическая значимость результатов исследований.

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней (утверждено Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 с изменениями, утвержденными Постановлением Правительства РФ № 335 от 21.04.2016 г.), которые предъявляются к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Шишаков Константин Валентинович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальностям: 05.13.06 – Автоматизация и управление

технологическими процессами и производствами (в машиностроении и приборостроении), 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике).

Официальный оппонент,
начальник НИЛ № 230 КБ филиала
ФГУП «НПЦАП» – «ПО «Корпус», д.т.н.
Адрес (рабочий): 410019, г. Саратов,
ул. Осипова 1.
Телефон (мобильный): 8-917-216-61-35
E-mail: lidkalihman@yandex.ru.

Д.М. Калихман

Подпись Д.М. Калихмана заверяю.
Начальник УК № 125 филиала ФГУП
«НПЦАП» – «ПО «Корпус»



С.Ю. Моисеева