ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора Спектора Александра Аншелевича на диссертационную работу Зуева Владислава Олеговича «Разработка адаптивных триангуляционных систем для точного контроля геометрии объектов в машиностроении и энергетике», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук

по специальности 2.2.6 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

Актуальность темы диссертационной работы

Оптико-электронные системы прецизионного контроля геометрических параметров высокотехнологичных изделий для науки и инновационных промышленных технологий актуальны и востребованы. Научная проблема триангуляционных измерений геометрических параметров объектов в процессе деформации в условиях нелинейных оптических искажений на сегодняшний день не решена в полной мере. Деформация поверхности приводит к изменению ее светорассеивающих свойств, нарушению согласованности энергетических диапазонов элементов оптической системы, непредсказуемому искажению характера нелинейности приемно-передаточной функции и даже изменению количества светорассеивающих граней, например в случае формирования наледи. Изоляция деформируемого объекта внутри экспериментального стенда влечет за собой преломление оптических сигналов на стенках стенда, что существенно усложняет процесс калибровки триангуляционной системы. Решение обозначенной проблемы и разработка триангуляционных методов, адаптивных к нелинейным оптическим искажениям и светорассеивающим свойствам деформируемой поверхности, важно для науки и актуально для развития машиностроения и энергетики. Проведение высокоинформативных опытно-конструкторских испытаний на силовых стендах и научных исследований процессов тепломассообмена и обледенения объектов энергетики на климатических и

аэродинамических стендах необходимо для перехода к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, а также экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике.

Несмотря на наличие значительного числа исследований и разработок в данной области, содержательный обзор которых представлен в диссертации, очевидны проблемы, требующие дальнейшего изучения, направленного на дальнейшее совершенствование методов контроля состояния поверхностей изделий различного назначения.

Работа В.О. Зуева нацелена на решение обозначенной научно-технической проблемы и представляет несомненный научный и практический интерес.

Структура и содержание диссертационной работы

Общий объем диссертационной работы 141 страница. Она состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 105 наименований.

Во введении дана краткая характеристика диссертационной работы. Сформулированы цель и решаемые в работе задачи, направленные на разработку и практическую реализацию адаптивных методов оптической триангуляции, перечислены основные положения, выносимые на защиту, обсуждаются научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава посвящена анализу существующих адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным искажениям оптико-электронных методов контроля геометрии объектов. Описаны ограничения существующих подходов и обоснована перспективность развития триангуляционных методов с использованием структурированного освещения.

Вторая глава посвящена разработке адаптивных методов фазовой триангуляции непрозрачных поверхностей и оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей на основе динамического светового сечения. Создан комплекс методов триангуляционного контроля трехмерных

деформаций объектов с возможностью адаптации к текстуре диагностируемой поверхности.

Третья глава посвящена практической реализации адаптивных методов оптической триангуляции для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в машиностроении и энергетике на аэродинамических, климатическом и силовом экспериментальных стендах. Представлено обоснование построения многомодульных систем оптической триангуляции трехмерной геометрии объектов с адаптивным пространственным разрешением в условиях нелинейных оптических искажений. Спроектировано и реализовано программное обеспечение разработанных адаптивных триангуляционных систем.

Четвертая глава посвящена лабораторным и производственным испытаниям разработанных адаптивных триангуляционных систем для точного контроля геометрии объектов в машиностроении и энергетике, результаты которых убедительно обосновали метрологические характеристики и работоспособность развитых в диссертации методов.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Анализ содержания диссертации говорит о том, что она направлена на решение проблемы дистанционного контроля изменения геометрических параметров деформируемых поверхностей различных объектов, зачастую изолированных в закрытом участке экспериментального стенда с оптическим доступом. В качестве технической основы решения принята концепция триангуляционной оптической диагностики на основе структурированного освещения. Несмотря на многолетнюю историю методов оптической триангуляции, решение проблем, поставленных в диссертации, потребовало развития новых, а также существенной адаптации известных технологий к новым научно-техническим задачам.

Основные усилия, определившие успешность исследований, были направлены на развитие адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и характеру нелинейности приемно-передаточной функции

методов формирования, регистрации и обработки структурированных изображений, а также калибровки многомодульных триангуляционных систем в условиях преломления оптических сигналов. Решение включало в себя традиционные этапы от постановки задачи до всесторонних испытаний разработанных измерительных систем и их программного обеспечения. Число решенных локальных задач достаточно велико. Важной особенностью является комплексный характер исследования в целом, благодаря общей ориентации работы на достижение конечного результата.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждена аналитическими исследованиями, созданием действующих прототипов адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным оптическим искажениям триангуляционных систем для прецизионного контроля трехмерной геометрии и деформаций исследуемых объектов в процессах статического нагружения, сублимации и обледенения, результатами их лабораторных и производственных испытаний. Учитывая все вышесказанное, достоверность результатов работы не вызывает сомнений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) предложен и внедрен новый метод фазовой триангуляции непрозрачных поверхностей в условиях динамичного изменения их светорассеивающих свойств на основе адаптивной компенсации нелинейности приемно-передаточной функции и оптимизации параметров пространственно-временной модуляции интенсивности;

2) разработан и апробирован новый метод оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей на основе динамического светового сечения и адаптивной декомпозиции регистрируемого сигнала от аддитивного светового потока;

3) обеспечен динамический контроль трехмерного профиля наледи с адаптивным локальным пространственным разрешением в исследованиях процессов обледенения объектов энергетики в условиях изменения

светорассеивающих свойств поверхности и нелинейных оптических искажений.

Практическая значимость работы заключается в том, что на основе полученных результатов и выводов разработаны действующие прототипы адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным оптическим искажениям триангуляционных систем с возможностью прецизионного контроля трехмерной геометрии и деформаций исследуемых объектов в процессах статического нагружения, сублимации и обледенения в задачах машиностроения и энергетики. С использованием разработанной адаптивной многомодульной триангуляционной системы в машиностроении обеспечена возможность дистанционной и одновременной микро- и макромасштабной диагностики поля деформаций объектов с комплексным напряженно-деформированным состоянием при их статическом нагружении. Благодаря применению разработанных адаптивных триангуляционных систем на действующих аэродинамических и климатическом стендах закрытого типа в институте теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН обеспечены возможности бесконтактной диагностики параметров массообмена в теплофизических исследованиях, нацеленных на разработку эффективных энергетических установок, и динамического контроля трехмерного профиля наледи с адаптивным локальным пространственным разрешением в рамках поиска эффективных методов борьбы с обледенением объектов энергетики. Результаты работы активно используются в АО «УМЗ», АО «Вектор-Бест», ООО «СигмаПро», ООО «ЛИСТ», ОАО «ИОИТ», ООО «БИТ» и ряда институтов СО РАН, а сфера их применения может быть расширена на другие области науки и промышленных технологий в машиностроении и энергетике.

Положения, выносимые на защиту, четко сформулированы и обоснованы.

Общая оценка работы. Диссертационная работа Зуева В.О. выполнена на высоком научном уровне, хорошо структурирована и содержит новые результаты в области методов триангуляционного контроля геометрических

параметров объектов. Достоверность, научная новизна и практическая ценность полученных результатов не вызывают сомнений. Основные результаты диссертационной работы получены соискателем самостоятельно и опубликованы в 33 научных статьях (из которых 15 - в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК), 23 тезисах докладов в материалах научных конференций, 4 свидетельствах о государственной регистрации программы для ЭВМ и 5 патентах Российской Федерации на изобретение. Автореферат и публикации по теме диссертации полностью отражают ее содержание.

При высоком научном уровне диссертации к работе имеются **замечания.**

1. Не раскрыты границы применимости предложенных адаптивных методов фазовой триангуляции непрозрачных объектов и оптической триангуляции светопреломляющих поверхностей на основе динамического светового сечения. Способен ли, например, второй из этих методов решать задачи, решаемые первым?

2. Решенная в разделе 2 диссертации задача о прецизионном измерении рельефа поверхности на основе структурированного излучения с использованием гармонической пространственной модуляции весьма близка к задаче о демодуляции сигнала в системе связи с фазовой модуляцией. В системе связи используются эффективные алгоритмы фильтрации фазы, обеспечивающие высокую точность в условиях помех и обычно неизвестной и меняющейся амплитуды. Базовую основу при этом составляет статистические принципы оптимальной фильтрации, использующие критерии минимума среднего квадрата ошибок. Этот критерий является прямым выражением требования к желаемому качеству, в отличие от использованного в диссертации косвенного критерия минимума площади внутри замкнутой кривой в графике зависимости между значениями излучаемого и принятого сигналов. К сожалению, внимания соискателя не привлекла задача о демодуляции сигнала в системе связи с фазовой модуляцией, близкая по своему научному содержанию.

3. Отсутствует анализ масштабируемости триангуляционной системы на случай использования трех и более измерительных модулей.

4. Изложенный в формулах (2.23)-(2.25) метод оптимизации экспозиции фотоприемника не обеспечивает адаптацию параметров системы формирования-регистрации структурированных изображений к светорассеивающим свойствам каждого участка поверхности, так как метрика оптимальности является интегральной по всей поверхности. В результате если, например, поверхность будет наполовину белая, а наполовину черная, то погрешность контроля геометрии будет в 2 раза больше ее реально достижимого минимального значения.

5. В диссертации представлены три справки от различных организаций об использовании результатов исследования и разработок, но нет справки от Института теплофизики СО РАН, в котором применяются разработанные научно-технические и технологические решения для контроля поверхностей спрессованного нафталина, трехмерного профиля наледи «иней», «изморозь», «прозрачная наледь» лопасти ветрогенератора.

Заключение

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. В целом, диссертация Зуева В.О. «Разработка адаптивных триангуляционных систем для точного контроля геометрии объектов в машиностроении и энергетике» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научно-технической проблемы разработки и практической реализации методов оптической триангуляции, адаптивных к светорассеивающим свойствам поверхности и нелинейным искажениям, для прецизионного контроля трехмерной геометрии объектов в процессе деформации. Полученные результаты представляют собой новые научно-технические и технологические решения и разработки, основные из которых внедрены в действующие производства машиностроения и энергетики, что существенно повышает информативность и эффективность технологических процессов и вносит значительный вклад в развитие страны. Выводы и

рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы, обладают научной новизной и представляют практическую ценность.

Диссертационная работа Зуева В.О. полностью отвечает всем требованиям ВАК РФ, изложенным в п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», а сам соискатель заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

Д.т.н., профессор
Новосибирского государственного
технического университета А.А. Спектор

10.11.2026 г.

Подпись Спектора А.А. заверяю
Ученый секретарь совета НГТУ Марченко Андрей Иванович, к.т.н.

12.11.2026 г.



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Новосибирский государственный технический университет
Адрес: 630073, г. Новосибирск, пр. Маркса, д. 20, НГТУ, кафедра ТОР
e-mail: spectoraa@mail.ru
Тел.: +7(383)346-13-78