

На правах рукописи

Гавриленков Сергей Игоревич

**МЕТОДИКА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ
ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управления технологическими
процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре компьютерных систем автоматизации производства в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

Гаврюшин Сергей Сергеевич

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных систем автоматизации производства федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты:

Дмитриев Владимир Георгиевич

Доктор технических наук, профессор кафедры проектирования сложных технических систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Николаев Сергей Михайлович

Кандидат технических наук, генеральный директор
ООО «САЙБЕРФИЗИКС»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», Москва

Защита состоится «15» июня 2022 года в 14:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 на базе Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим выслать по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» 2022 г.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.т.н., доцент



А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Тензорезисторные силоизмерительные датчики (Рисунок 1) нашли широкое применение в различных отраслях науки и промышленности: в автомобильных, платформенных и бункерных весах, дозаторах, а также в устройствах для мониторинга технического состояния объектов инфраструктуры.



Рисунок 1. Тензорезисторные силоизмерительные датчики

Тензорезисторный силоизмерительный датчик измеряет приложенную к нему силу или момент через изменение сопротивления тензорезисторов, соединенных в мостовую измерительную схему (МИС). Наклеенные на упругий элемент (УЭ) датчика тензорезисторы деформируются вместе с УЭ под действием измеряемого усилия и изменяют своё сопротивление пропорционально приложенному к УЭ усилию.

В связи с внедрением концепции «Промышленность 4.0» (Industry 4.0), а также автоматизацией и роботизацией промышленности повышается спрос на индивидуализированные датчики для измерения усилий в технологических процессах автоматизированных производств, а также конструкциях промышленных роботов. Для оперативного реагирования на запросы промышленности необходимо уменьшать цикл разработки датчиков – от проектирования до технологической подготовки производства. Также следует сокращать трудоёмкость изготовления датчиков и увеличивать их технологичность.

В настоящее время разработка новых видов научноёмкой продукции становится крайне затруднительной без технологий управления жизненным циклом (PLM). Технология PLM предлагает разработчикам комплексный подход к разработке научноёмкой продукции при помощи концепции единого информационного пространства (ЕИП).

Однако, использование коммерческих систем управления жизненным циклом слишком дорого для малых и средних предприятий из-за стоимости программного обеспечения. В этом случае рационально разрабатывать специализированные методики и программы, позволяющие в рамках единого информационного пространства проводить разработку новых видов научноёмкой продукции с учётом специфики предметной области.

Степень разработанности темы исследования. В современных научных работах имеется большой задел по проектированию тензорезисторных датчиков. Научные основы этого направления заложены в работах D. M. Stefanescu, Стучебникова В.М., Гаврюшина С.С., Зеленцова Ю.А., Мокрова Е.А. Большая работа по совершенствованию характеристик тензорезисторных датчиков была проведена Robinson G.M., Yunjian G, Liang W, Zhang X, Xiong L. Кроме того, в работах Anwer N, Zhu W, Siedlak D, Овсянникова М.В., Норенкова И.П., Евгеньева Г.Б., Братухина А.Г., приведены основные теоретические положения в области автоматизации информационной поддержки жизненного цикла продукции (ЖЦП). Теоретические основы современных производственных технологий в цифровом производстве применительно к отраслям машиностроения и приборостроения были заложены в работах Григорьянца А.Г., Панфилова Ю.В., Грубого С.В., Утенкова В.М., Шашурина В.Д., Кондакова А.И., Васильева А.С.

Анализ существующих работ в области систем для информационной поддержки ЖЦП, а также работ по проектированию и оптимизации тензорезисторных силоизмерительных датчиков показал, что необходимо их дальнейшее развитие в части специализированной системы автоматизации и управления процессами разработки научноёмкой продукции применительно к специфике тензорезисторных силоизмерительных датчиков, что **обуславливает актуальность темы исследования.**

Цель и задачи исследования. Целью работы является создание комплексной методики автоматизации процесса разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков с высокой степенью интеграции между этапами проектирования и технологической подготовки производства.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие основные задачи:

– Анализ современных подходов к разработке тензорезисторных датчиков и методам автоматизации разработки научноёмкой продукции на основе концепции единого информационного пространства.

– Создание обобщённой математической модели (ОММ) типового тензорезисторного силоизмерительного датчика.

– Разработка алгоритма выбора рациональных параметров тензорезисторного силоизмерительного датчика на основе концепции единого информационного пространства.

– Разработка и тестирование прикладного программного обеспечения, пред назначенного для многокритериального проектирования тензорезисторных силоизмерительных датчиков.

– Практическое применение разработанной методики и прикладной программы для создания усовершенствованного датчика для автомобильных весов – типа МБК-20.

Объектом исследования является тензорезисторный силоизмерительный датчик.

Предметом исследования является автоматизация и управление процессами разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков с применением концепций цифрового производства, жизненного цикла продукции и едино-

го информационного пространства.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы в рамках системного подхода использовались: численные методы механики твёрдого тела, метод Монте-Карло, методы многокритериальной оптимизации, метод разведочного анализа данных, компьютерное моделирование и программирование, методы принятия решений.

Научная задача заключается в разработки единой методики автоматизации и управления разработкой тензорезисторных силоизмерительных датчиков с высокой интеграцией между различными этапами жизненного цикла датчика.

Научная новизна

1. Разработана методика автоматизации процесса проектирования и изготовления тензорезисторных силоизмерительных датчиков на основе концепции единого информационного пространства.

2. Предложены обобщённая математическая модель (ОММ) и алгоритм проектирования типовых тензорезисторных силоизмерительных датчиков.

3. На базе математической модели и алгоритма проектирования создана прикладная авторская программа «АРТСД» (Автоматизация разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков), предназначенная для разработки параметрического ряда тензометрических датчиков.

4. Получены новые теоретические и экспериментальные результаты, объясняющие взаимозависимость управляющих параметров проектирования и критерии качества тензометрических датчиков.

Практическая значимость

1. Созданная методика предназначена для разработки новых видов тензорезисторных силоизмерительных датчиков и для совершенствования функциональных характеристик существующих тензорезисторных силоизмерительных датчиков.

2. Разработанная прикладная программа внедрена в производство и использована для разработки и выбора рациональных параметров нового типа датчика МБК-20 для автомобильных весов на предприятии АО «ВИК «ТЕНЗО-М».

3. Изготовленные по найденным рациональным параметрам датчики в опытной партии превосходят по показателям качества современный технический уровень.

Соответствие паспорту научной специальности. Область исследования соответствует пунктам «Теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания АСУТП, АСУП, АСТПП и др.», «Разработка методов обеспечения совместимости и интеграции АСУ, АСУТП, АСУП, АСТПП и других систем и средств управления», «Использование методов автоматизированного проектирования для повышения эффективности разработки и модернизации АСУ» паспорта специальности 2.3.3 – «Автоматизация технологических процессов и производств».

Обоснованность и достоверность достигается использованием общепринятых достоверных методов, строгостью математических выкладок, основанных на фундаментальных законах механики. Достоверность обобщённой

математической модели подтверждается натурными экспериментами, обоснованность методики подтверждается её практическим применением при разработке датчиков на АО «ВИК «Тензо-М».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методические основы автоматизации процессов разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков с применением концепций цифрового производства и единого информационного пространства.
2. Обобщенная математическая модель и алгоритм проектирования типового тензорезисторного силоизмерительного датчика.
3. Прикладная программа «АРТСД» (Автоматизация разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков).
4. Новые теоретические и экспериментальные результаты, объясняющие взаимозависимость управляющих параметров проектирования и критериев качества тензометрических датчиков.

Апробация результатов исследования. Основные положения и выводы диссертации доложены и получили положительную оценку на II Всероссийской научно-технической конференции, посвященная юбилеям основателей кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана профессоров С.Д. Пономарева, В.Л. Бидермана, К.К. Лихарева, Н.Н. Малинина, В.А. Светлицкого» (Москва, 2017), на XXII-XXVI международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Кременки, 2016-2020); на международном симпозиуме «Joint IMEKO TC1-TC3-TC7-TC17 Symposium» (Санкт-Петербург, 2019); на международном симпозиуме «The International Symposium on Computer Science, Digital Economy and Intelligent Systems» (Москва, 2019); на международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики (Fundamental and applied problems of mechanics FAPM-2019)» (Москва, 2019); на VI международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении»; на IV международной конференции «AIMEE2020: The Fourth International Conference of Artificial Intelligence, Medical Engineering, Education» (Москва, 2020); на II международном симпозиуме «CSDEIS2020: The Second International Symposium on Computer Science, Digital Economy and Intelligent Systems».

Практические положения диссертации реализованы на АО «ВИК «Тензо-М», в 2020-2021 году при разработке датчика нового типа для автомобильных платформенных весов МБК-20. Кроме того, предложенная методика внедрена в процесс разработки новых силоизмерительных датчиков на АО «ВИК «Тензо-М». Апробация и реализация результатов диссертационной работы подтверждены актом внедрения.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ общим объемом 7,45 печатных листов, из них 7 работ, опубликованных в изданиях SCOPUS, WoS и Springer, 4 работы, опубликованные в рецензируемых изданиях, включенных в ВАК РФ, и 7 тезисов конференций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация изложена на **181** странице и состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений, списка литературы из **177** наименований и **одного** приложения, содержит **15** таблиц и **81** рисунок.

На Рисунке 2 показана логическая структура диссертации.

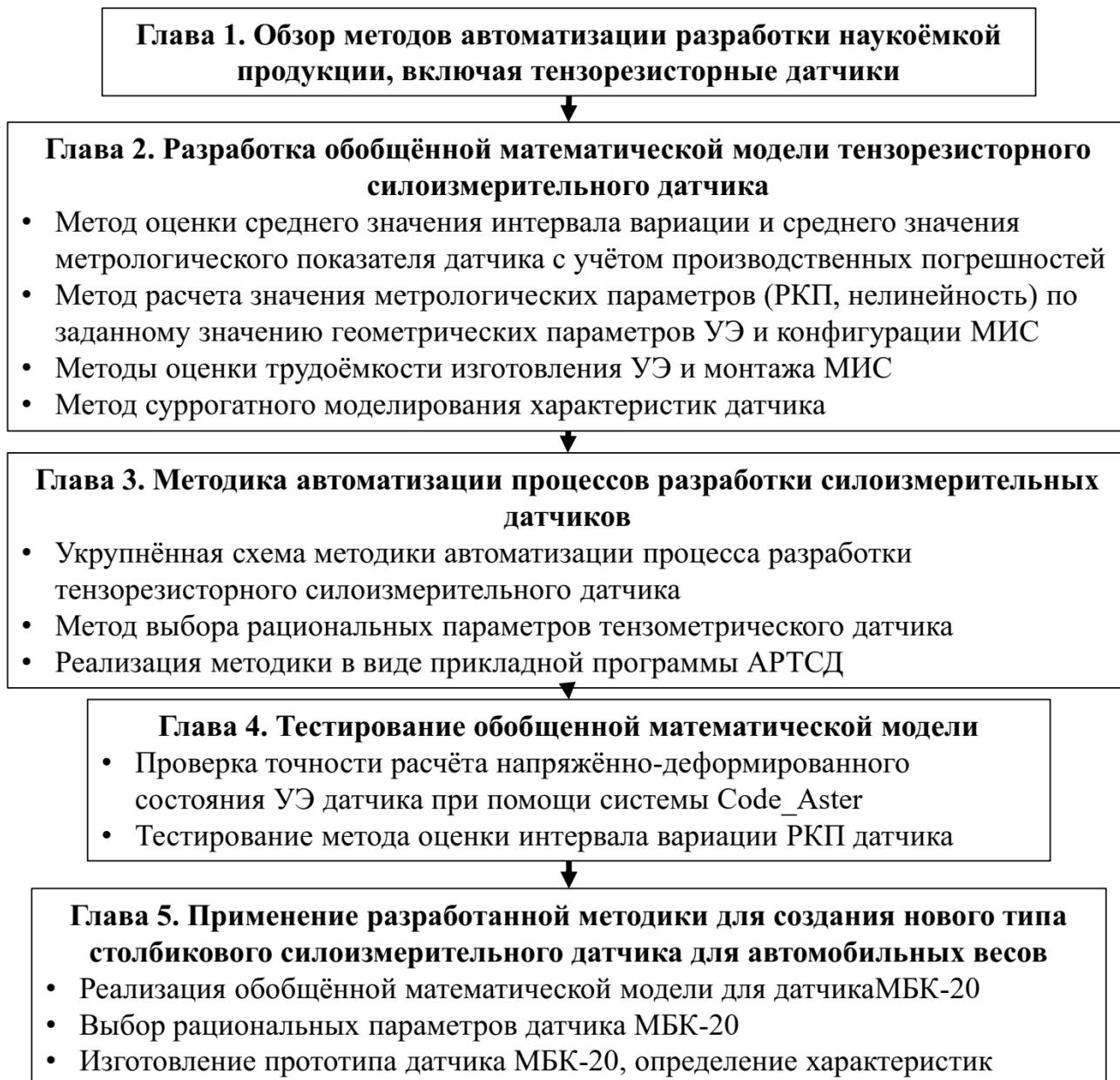


Рисунок 2. Структура диссертации

Во введении показана актуальность диссертации, сформулирована цель и задачи, изложены научная новизна, практическая значимость, приведены основные научные результаты, выносимые на защиту, а также сведения о реализации и публикациях по полученным результатам.

В первой главе выполнен анализ предмета и объекта исследования, проанализированы существующие подходы к разработке тензорезисторных датчи-

ков. Показано, что при разработке датчиков используется одно- или многокритериальная параметрическая оптимизация, при этом критерии качества датчика определяются на основе аналитических или численных моделей математических моделей.

В доступных автору работах не рассматривались критерии качества датчиков, связанные с влиянием особенностей технологического процесса производства на характеристики датчиков. Не рассматривались или рассматривались крайне ограниченно вопросы технологичности и экономической эффективности датчиков. После этого были проанализированы подходы к управлению жизненным циклом наукоемких изделий на основе концепции единого информационного пространства. Показано, что лицо, принимающее решение (ЛПР), могло получить более целостное представление о процессе разработки датчика, если бы в процесс выбора рациональных параметров датчика была включена технологическая и производственная информация. Применение концепции единого информационного пространства к задаче автоматизации и управления разработкой датчиков позволит устранить вышеизложенные недостатки.

Во второй главе разработана обобщённая математическая модель тензорезисторного силоизмерительного датчика. Данная модель позволяет объединить необходимое количество разнородных критериев качества, принадлежащих различным этапам жизненного цикла.

Выходные параметры обобщённой математической модели представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Выходные параметры обобщённой математической модели

№	Параметр	Наименование параметра
1	$k_{\text{стат}}$	Статический запас прочности
2	$\mu_{\text{РКП}}^F$	Среднее значение рабочего коэффициента передачи (РКП) датчиков в партии под действием силового фактора F , мВ/В
3	$\sigma_{\text{РКП}}^F$	Среднеквадратическое отклонение (СКО) РКП датчиков в партии под действием силового фактора F , % от $\mu_{\text{РКП}}^F$
4	$\mu_{\text{НЛ}}^F$	Среднее значение нелинейности выходной характеристики датчиков в партии под действием силового фактора F , % от $\mu_{\text{РКП}}^F$
5	$\sigma_{\text{НЛ}}^F$	СКО нелинейности датчиков в партии под действием силового фактора F , % от $\mu_{\text{РКП}}^F$
6	$\gamma_{\text{гист}}$	Гистерезис выходной характеристики датчика, % от $\mu_{\text{РКП}}^F$
7	ω_0	Собственная частота колебаний датчика, Гц
8	$T_{\text{уЭ}}$	Трудоёмкость изготовления упругого элемента датчика, н.ч.
9	$T_{\text{МИС}}$	Трудоёмкость монтажа мостовой схемы датчика, н.ч.
10	C_{var}	Переменная часть себестоимости изготовления датчика, у.е.
11	$ИТ$	Общий показатель технологичности датчика

В зависимости от особенностей эксплуатации и требований к метрологическим характеристикам датчика могут быть рассмотрены различные сочетания силовых факторов, действующих на датчик (выходные параметры №1-5).

Входные параметры обобщённой математической модели включают в себя номинальные размеры упругого элемента датчика, величины допусков на размеры упругого элемента или расположение и форму поверхностей упругого элемента, а также вид топологии мостовой измерительной схемы, которая включает в себя:

1. Тип тензорезисторов мостовой измерительной схемы;
2. Места расположения тензорезисторов на упругом элементе;
3. Способ соединения тензорезисторов в мостовой измерительной схеме;

В условиях реального производства параметры датчика варьируются в некотором интервале из-за особенностей технологического процесса изготовления упругого элемента и монтажа мостовой измерительной схемы. В частности, на вариацию параметров датчика влияют погрешности формы и расположения поверхностей упругого элемента, колебания номинальных размеров упругого элемента в пределах назначенных допусков, погрешность позиционирования тензорезисторов на упругом элементе и вариация свойств элементов мостовой измерительной схемы (коэффициент тензочувствительности).

Особенностью предложенной обобщённой математической модели является учёт влияния производственных факторов на вариацию характеристик датчика. В рамках этого подхода производится оценка среднего значения и СКО (среднеквадратическое отклонение) метрологических характеристик партии датчиков (например, выходные параметры 2-5) методом Монте-Карло по заданным значениям допусков на размеры упругого элемента, допуска на значение коэффициента тензочувствительности тензорезисторов и погрешность позиционирования тензорезисторов на упругом элементе датчика. Используемый подход позволяет рационально подобрать допуска на упругом элементе с учётом характера производства, имеющегося парка оборудования и требований к датчику.

Характеристики датчика рассчитываются на основе результатов расчёта напряжённо-деформированного состояния упругого элемента методом конечных элементов в пакетах Salome-Meca и Code_Aster. Для выполнения расчётов для большого количества вариантов проектирования в приемлемое время используются суррогатные модели характеристик датчика.

В третьей главе изложен способ автоматизации разработки тензорезисторного силоизмерительного датчика. Разработка датчика включает в себя следующие этапы:

1. По выбранной топологии упругого элемента и возможным типам конфигурации мостовой измерительной схемы выбираются управляющие параметры. Диапазоны изменения управляющих параметров выбираются совместно с технологами предприятия на основе конструкторских и технологических ограничений. На основе эксплуатационных требований формулируются критерии качества датчика и способ из расчёта на основе выходных параметров обобщённой математической модели;

2. С учетом топологии датчика и выбранным критериям качества формулируется обобщённая математическая модель применительно к разрабатываемому датчику;

3. При помощи программы «АРТСД» («Автоматизация разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков»), включающей в себя сформулированную обобщённую математическую модель применительно к разрабатываемому датчику, выбираются рациональные параметры датчика согласно нижеописанному алгоритму;

4. По найденным рациональным параметрам датчика изготавливается опытная партия датчиков, и определяются их метрологические характеристики.

Рациональные значения параметров датчика определяются при помощи человека-машинного алгоритма, основанного на алгоритме исследования пространства параметров, методах многокритериальной оптимизации и методах разведочного анализа данных. Результаты исследований хранятся в единой базе данных, а ЛПР использует методы разведочного анализа данных, чтобы проанализировать информацию о Парето-оптимальных решениях и принять решение о том, как исследовать пространство параметров дальше. Блок-схема предложенного алгоритма показана на Рисунке 3. В результате работы алгоритма ЛПР получает множество неулучшаемых Парето-оптимальных вариантов, из которых выбирается наиболее предпочтительный вариант.

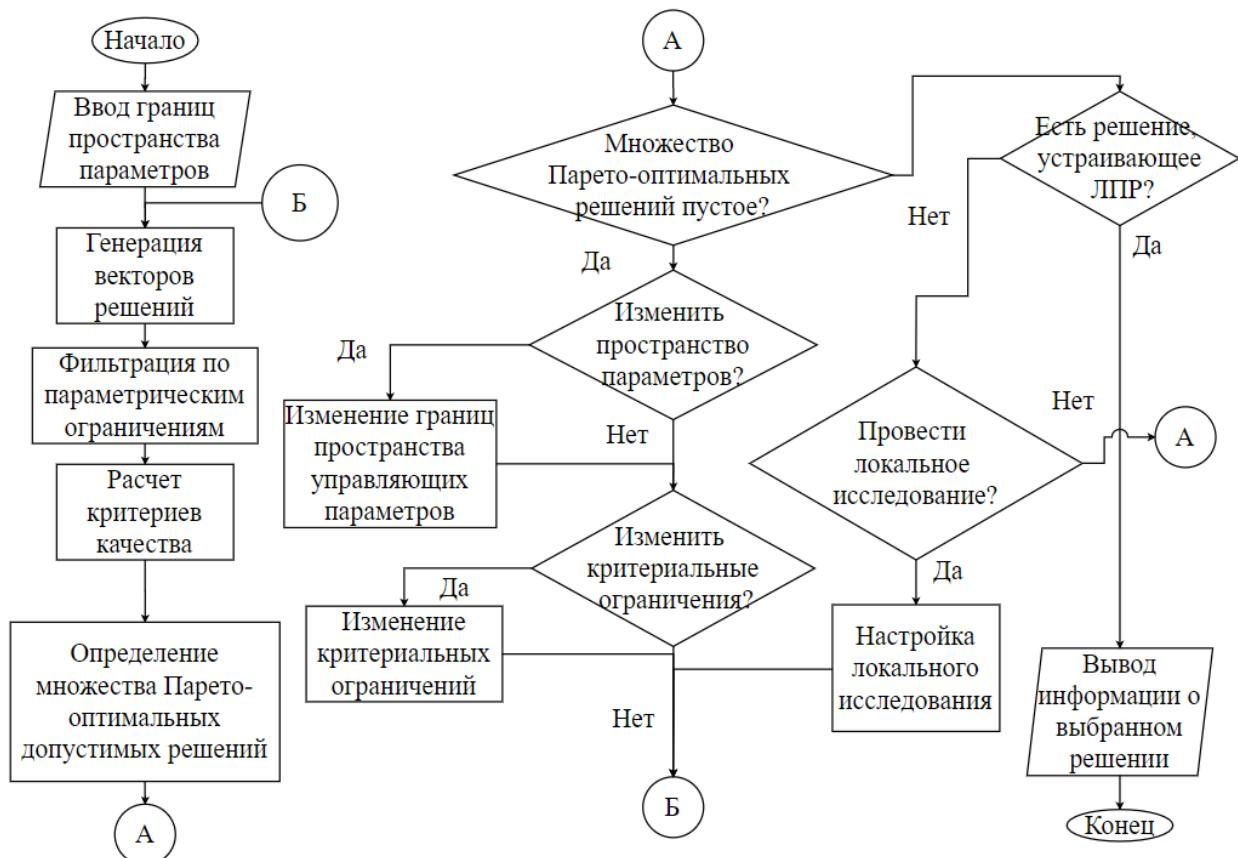


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма выбора рациональных значений

Методика выбора рациональных параметров датчика была реализована в прикладной программе «Автоматизация разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков» (АРТСД), обладающей удобным пользовательским интерфейсом и необходимым набором инструментов для разведочного анализа данных о Парето-оптимальных решениях. Снимок экрана части пользовательского интерфейса программы «АРТСД» показана на Рисунке 4. Программа «АРТСД» основана на открытых программных компонентах.

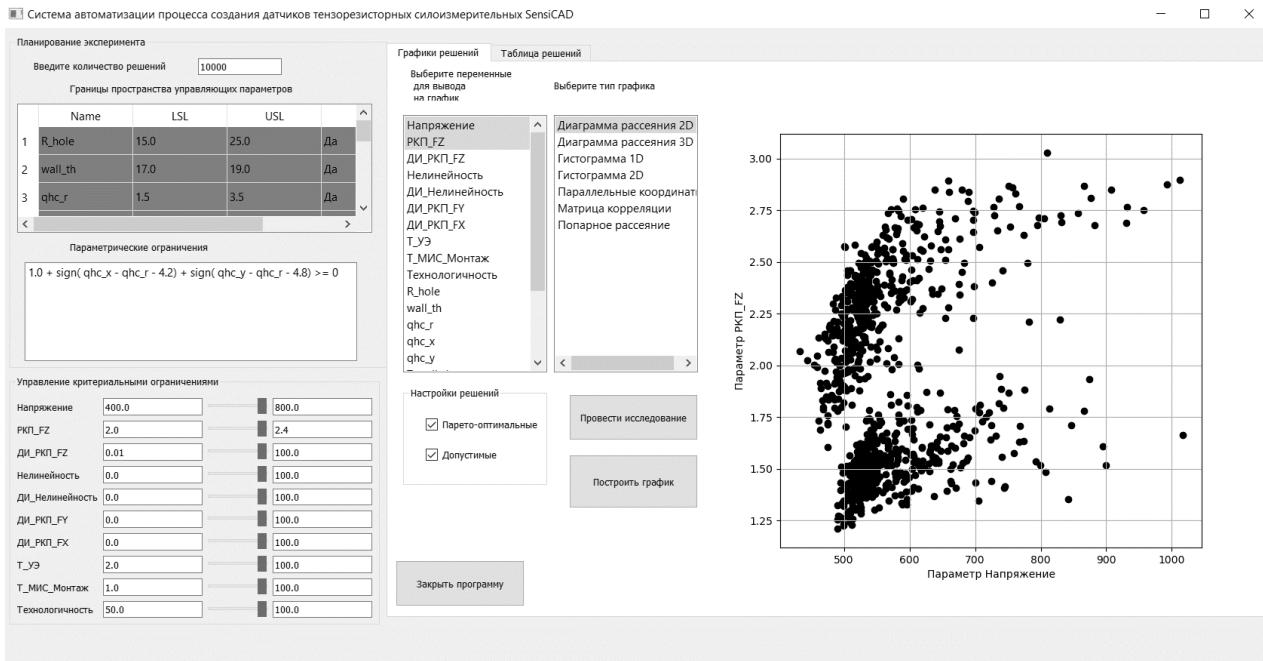


Рисунок 4. Интерфейс программы «АРТСД»

В четвёртой главе приведены результаты тестирования основных положений обобщённой математической модели.

Во-первых, была протестирована корректность метода оценки среднего значения и СКО метрологической характеристики серийно выпускаемого датчика МВ150-20. Рассчитанные значения среднего значения и СКО партии датчиков были сопоставлены с реальными значениями, полученными на основе обработки реальных данных о большом количестве произведённых датчиков.

Во-вторых, была протестирована корректность расчёта деформации и нелинейности упругого элемента серийно выпускаемого датчика М70-30 (см. Рисунок 5).



Рисунок 5. Экспериментальное определение НДС датчика М70-30

Для этого был проведен расчет напряжённо-деформированного состояния УЭ датчика в геометрически нелинейной осесимметричной постановке при помощи программы Code_Aster. Рассчитывались значения радиальной ε_r и тангенциальной ε_t деформации, а также нелинейность этих деформаций при нагрузке 15 тс (половина диапазона измерения). Также эти величины были определены экспериментально методами натурного тензометрирования.

Сопоставление расчётных и экспериментально полученных распределений нелинейности и деформации (см. Рисунок 6) позволяет сделать вывод о хорошей точности определения деформаций и удовлетворительной точности определения нелинейности.

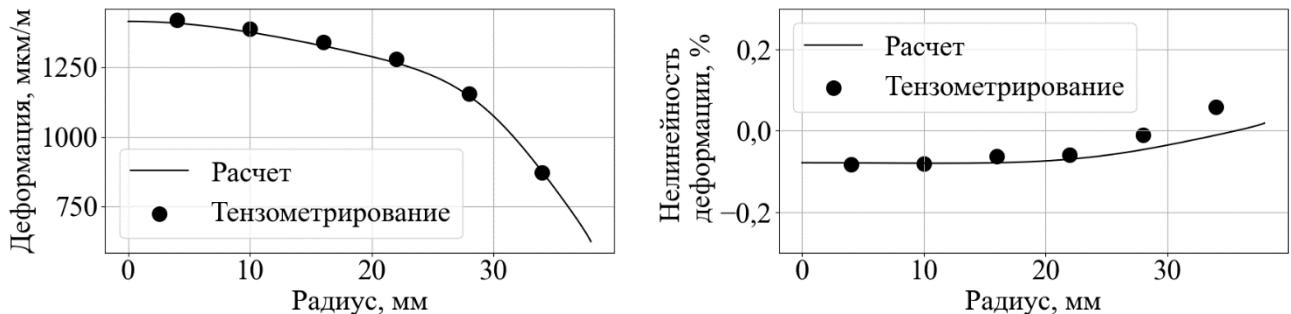


Рисунок 6. Результаты тензометрирования М70-30

В пятой главе предлагаемая методика применяется для разработки нового датчика нового типа МБК-20 (заводское название МБК150-20) для АО «ВИК «Тензо-М». Данный датчик предназначен заменить существующий датчик МВ150-20 (см. Рисунок 7). Несмотря на простоту и технологичность УЭ, датчик МВ150-20 обладает существенным недостатком: выходная характеристика датчика имеет нелинейность порядка 0,11% из-за конструкции упругого элемента и топологии мостовой измерительной схемы, из-за чего требуется проводить коррекцию нелинейности при помощи полупроводникового тензорезистора (см. врезку на Рисунке 7).

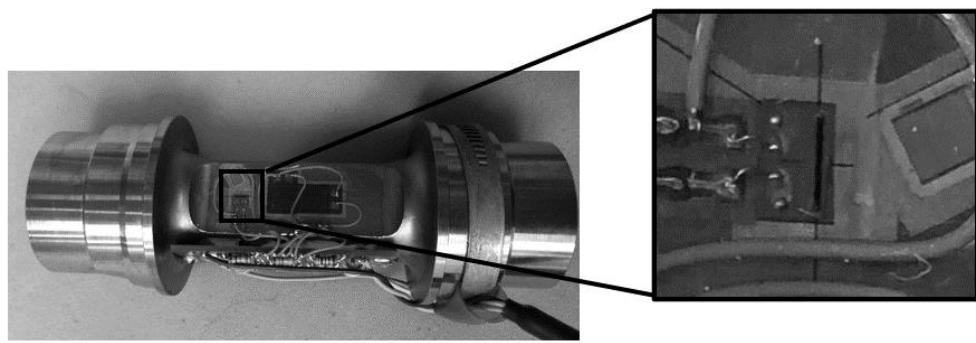


Рисунок 7. Датчик МВ150-20 и изображение кремниевого тензорезистора

Полупроводниковые тензорезисторы обладают малой надежностью и достаточно хрупки, а их отказ означает отказ самого датчика, который в пределах гарантийного срока потребуется заменить за счёт предприятия-изготовителя.

Такая замена датчиков является достаточно дорогой, учитывая стоимость изготовления нового датчика и необходимость отправки специалиста на объект для замены датчика. Предлагается устранить нелинейность датчика за счет формы упругого элемента, а также топологии мостовой схемы. Предлагаемый тип датчика МБК-20 имеет упругий элемент, показанный на Рисунке 8.

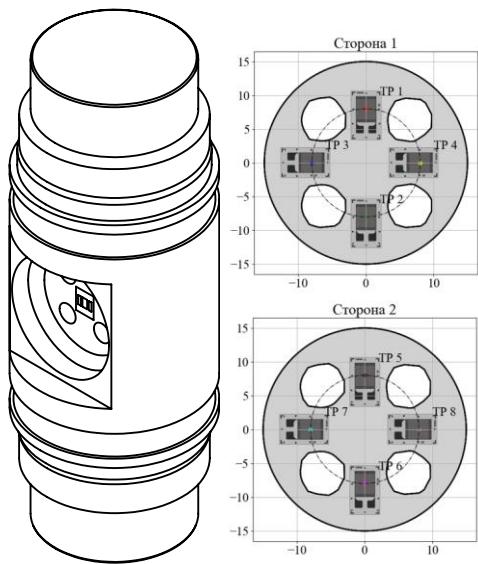


Рисунок 8. УЭ и одна из трёх топологий МИС датчика МБК-20

На основе консультаций с экспертами АО «ВИК «Тензо-М» были предложены три возможные топологии МИС.

По требованиям заказчика датчик МБК-20 должен быть взаимозаменяем с датчиком MB150-20 с точки зрения габаритных размеров, а также размеров конструктивных элементов, к которым лазерной сваркой прикрепляются элементы герметизации. Поэтому управляющие параметры ограничены номинальными размерами центральной части упругого элемента, величинами допусков на эти размеры и типом топологии мостовой измерительной схемы (одна топология из трёх возможных) – см. Таблицу 2. Управляющие параметры показаны в Таблице 2.

Таблица 2.

Управляющие параметры

Параметр	Ед. изм.	Описание
$t_{\text{стенка}} = [15 \dots 25]$	мм	Толщина мембраны
$R_{\text{глух.отв.}} = [17 \dots 19]$	мм	Радиус глухих отверстий, формирующих мембрану
$X_{\text{отв.стенка}} = [6 \dots 10]$	мм	X-координата центров отверстий в мембране
$Y_{\text{отв.стенка}} = [6 \dots 10]$	мм	Y-координата центров отверстий в мембране
$R_{\text{отв.стенка}} = [1,5 \dots 4]$	мм	Радиус отверстий в мембране
$T_{t_{\text{стенка}}} = \{9, 10 \dots 14\}$	-	Квалитет допуска на размер $t_{\text{стенка}}$, поле допуска hT (допуск «в минус»)
$T_{R_{\text{глух.отв.}}} = \{9, 10 \dots 14\}$	-	Квалитет допуска на размер $R_{\text{глух.отв.}}$, поле допуска HT (допуск «в плюс»)
$T_{X_{\text{отв.стенка}}} = \{9, 10 \dots 14\}$	-	Квалитет допуска на размер $X_{\text{отв.стенка}}$, поле допуска $\pm IT/2$ (допуск симметричный)
$T_{Y_{\text{отв.стенка}}} = \{9, 10 \dots 14\}$	-	Квалитет допуска на размер $Y_{\text{отв.стенка}}$, поле допуска $\pm IT/2$ (допуск симметричный)
$T_{R_{\text{отв.стенка}}} = \{9, 10 \dots 14\}$	-	Квалитет допуска на размер $R_{\text{отв.стенка}}$, поле допуска HT (допуск «в плюс»)
$TOP0 = \{1, 2, 3\}$	-	Тип топологии МИС (см. Рисунок 8)

Выходные параметры обобщённой математической модели были выбраны исходя из метрологических требований к датчику МБК-20 и особенностей его эксплуатации в составе автомобильных весов.

Критерии качества рассчитываются на основе выходных параметров ОММ. Для критериев качества $T_{u\vartheta}$, T_{MIS} , C_{var} , ИТ были взяты соответствующие значения параметров обобщённой математической модели. Критерии μ_{PKP} , σ_{PKP} , μ_{NL} , σ_{NL} рассчитывались для двух значений вертикальной нагрузки – 10 тс и 20 тс для вычисления нелинейности датчика. Чувствительность к боковым силам рассматривалась в виде комплексного параметра на основе параметров σ_{PKP}^F – СКО чувствительности к боковым силам 2 тс, действующим в двух направлениях:

$$PKP_{БОК} = \sqrt{\sigma_{PKP}^{F_x}^2 + \sigma_{PKP}^{F_y}^2}, \quad (1)$$

где $\sigma_{PKP}^{F_x}$, $\sigma_{PKP}^{F_y}$ – СКО чувствительности датчика к боковым силам $F_x = F_y = 2$ тс.

На управляющие параметры было наложено одно функциональное ограничение, соответствующее нормальному размещению элементов мостовой схемы на центральной части упругого элемента:

$$\begin{cases} X_{\text{отв.стенка}} - R_{\text{отв.стенка}} \geq 2,0 \\ Y_{\text{отв.стенка}} - R_{\text{отв.стенка}} \geq 2,0 \end{cases} \quad (2)$$

Выбор рациональных параметров датчика проводился в несколько этапов. На первом этапе была исследована зависимость критериев качества от управляющих параметров при помощи двухфакторных вычислительных экспериментов (см. пример на Рисунке 9). Полученные зависимости могут быть полезны для выявления управляющих параметров, оказывающих наибольшее влияние на критерии качества.

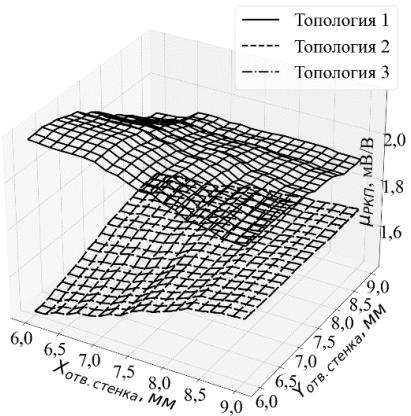


Рисунок 9. Зависимость критерия качества μ_{PKP} от параметров $X_{\text{отв.стенка}}$, $Y_{\text{отв.стенка}}$

Рациональные значения параметров были определены на основе ряда исследований пространства управляющих параметров. Так, в первом исследовании было установлено (см. Рисунок 10), что в силу особенностей распределе-

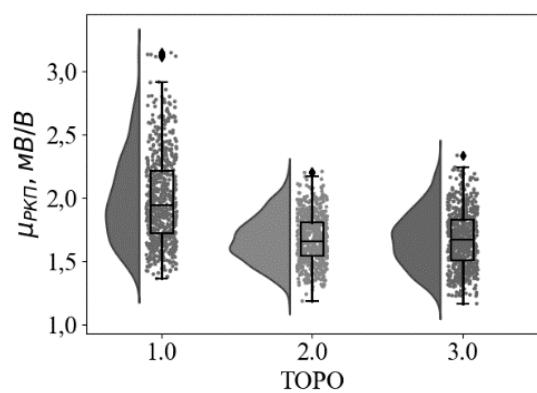


Рисунок 10. РКП датчика в зависимости от топологии МИС после первого исследования пространства параметров

ния деформаций на мемbrane топологии 2 и 3 в целом обладают более низким значением РКП, чем топология 1. Следовательно, в последующих исследованиях была использована только первая топология.

Во втором исследовании при помощи разведочного анализа данных были выявлены диапазоны изменения управляющих параметров (см. пример на Рисунке 11), где количество Парето-оптимальных решений максимальное. После этого уже в ограниченном пространстве параметров было проведено дополнительное исследование.

Далее в интерактивном режиме уже сточались критериальные ограничения до тех пор, пока в множестве Парето-оптимальных решений не осталось 6 решений, из которых ЛПР выбрал компромиссное решение. Значения номинальных размеров были округлены до десятой доли миллиметра.

Для опытной партии датчиков МБК-20 (см. Рисунок 12), изготовленной согласно полученным рациональным вариантам проектирования, были определены их метрологические характеристики. Объем опытной партии составил 100 штук.



Рисунок 12. Изготовление и испытания опытной партии датчиков МБК-20

Одним из главных преимуществ нового датчика МБК-20 над серийно изготавливаемым датчиком MB150-20 является пониженная нелинейность (см. Рисунок 13). Малая нелинейность позволяет исключить из принципиальной электрической схемы датчика полупроводниковый резистор, и тем самым, повысить надежность датчика и понизить затраты на дополнительную операцию нормирования нелинейности.

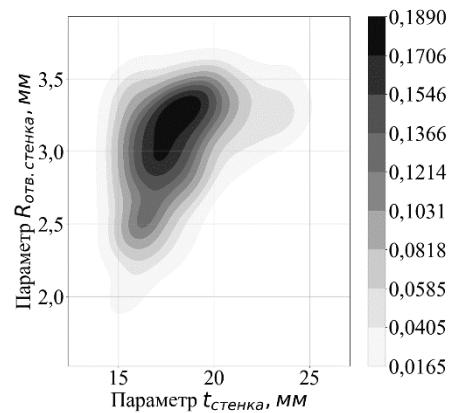


Рисунок 11. Ядерная оценка плотности распределения Парето-оптимальных решений относительно управляющих параметров $t_{\text{стенка}}$ и $R_{\text{отв.стенка}}$

Необходимо отметить, что даже с учётом вариации в пределах опытной партии, нелинейность не выходит за пределы «конверта» погрешностей, соответствующего классу точности ГОСТ 8.631-2013 (OIML R 60:2000).

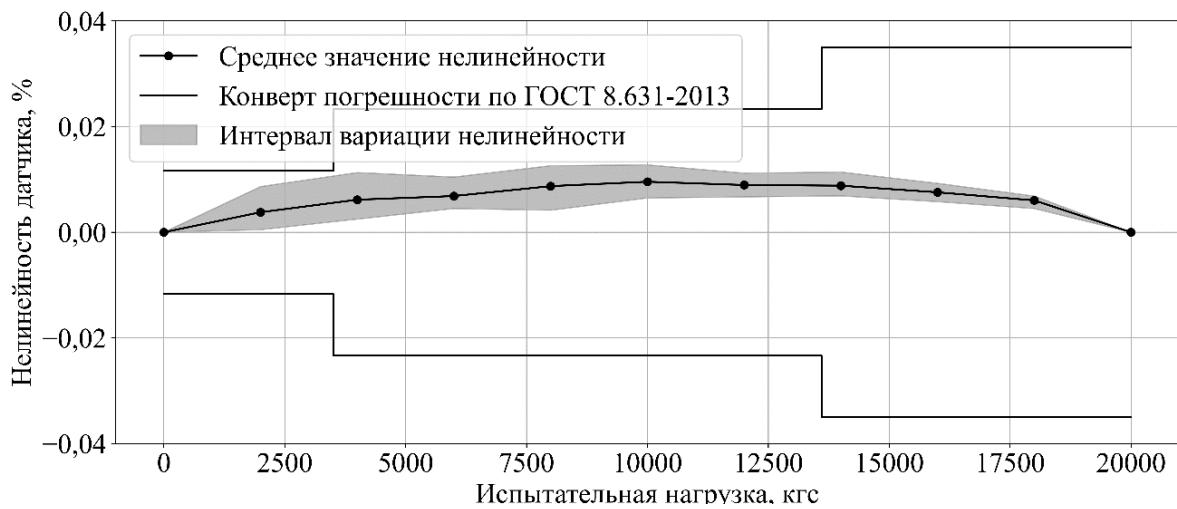


Рисунок 13. Экспериментально определенная нелинейность датчика МБК-20

В Таблице 3 приведено сравнение характеристик серийно изготавливаемого датчика МВ150-20 и датчика МБК-20 (параметр $\mu_{РКП}$ приведен уже с учётом нормирующих резисторов).

Таблица 3.
Критерии качества датчиков МБК-20 и МВ150-20

Наименование параметра	МВ150-20	МБК-20	Изменение по сравнению с базовым вариантом, %
$\mu_{РКП}$, мВ/В	2,5	2,54	4
$\sigma_{РКП}$, % от $\mu_{РКП}$	0,4	0,62	55
$РКП_{БОК}$, % от $\mu_{РКП}$	0,54	0,26	-52
$\mu_{НЛ}$, % от $\mu_{РКП}$	0,12	0,01	-92
$\sigma_{НЛ}$, % от $\mu_{РКП}$	0,01	0,006	-40
C_{var} , у.е.	2300	2550	8,7
$T_{монтаж}$, н.ч.	0,62	0,62	0
ИТ	-	60	-
$k_{стат}$	1,61	1,88	16,8
$T_{уЭ}$, н.ч.	2,32	2,58	11,2

Основными преимуществами датчика МБК-20 над датчиком МВ150-20 является низкое среднее значение нелинейности, большая устойчивость к боковым силам, больший коэффициент запаса статической прочности, меньшая вариация нелинейности.

Хотя датчик МБК-20 уступает датчику МВ150-20 по времени изготовления УЭ, данная разница компенсируется тем, что не требуется проводить операцию нормирования нелинейности при помощи полупроводникового тензорезистора.

Программа «АРТСД» была внедрена на АО «ВИК «Тензо-М» для автоматизации и управления процессами разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков. Кроме того, программа «АРТСД» планируется к использованию для совершенствования параметрических рядов серийно выпускаемых датчиков АО «ВИК «Тензо-М».

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

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.

1. Разработаны методические основы автоматизации процесса разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков, обеспечивающие высокую степень обеспечения совместимости и интеграции АСУ, АСУТП, АСУП, АСТПП.

2. На основе обобщённой математической модели тензорезисторного силоизмерительного датчика, объединяющей в едином информационном пространстве основные этапы жизненного цикла датчика создана методика разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков.

3. Методика и алгоритм разработки синтеза датчика реализованы в авторской программе «АРТСД», основанной на открытых программных компонентах.

4. Разработанная программа внедрена на производство для разработки нового типа столбикового датчика МБК-20 для автомобильных весов. Изготовлена и испытана опытная партия датчиков улучшенного типа. Разработанный датчик по большинству характеристик превосходит серийно выпускаемый образец.

5. Разработанная методика и программа «АРТСД» могут быть использованы для разработки параметрических рядов основных типов тензорезисторных силоизмерительных датчиков.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Gavrilenkov S.I., Gavriushin S.S., Godzikovsky V.A. Multicriteria approach to design of strain gauge force transducers // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1379. № 1. P. 12010. (0,53 п.л./0,48 п.л.). В статье автором представлена методика автоматизации процессов разработки тензорезисторного силоизмерительного датчика. Описана третья версия программы «Автоматизация разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков». Работа методики демонстрируется на примере разработки нового тензорезисторного датчика.

2. Gavryushin S.S., Godzikovsky V.A., Gavrilov S.I. Investigation of the sensitivity of a strain gauge force sensor to bending moment // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2171. № 1. P. 170006. (0,75 п.л./0,67 п.л.). Автором предложен способ моделирования метрологических параметров датчика с учётом особенностей процесса производства, в частности, погрешностей расположения тензорезисторов на упругом элементе датчика. Работа методики продемонстрирована на примере силоизмерительного датчика.
3. Gavrilov S.I. Method of modeling the influence of manufacturing errors on characteristics of strain gauge force sensors // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2195. № 1. P. 020051. (0,62 п.л.).
4. Gavrilov S.I. Method of simulating temperature effect on sensitivity of strain gauge force sensor in non-uniform temperature field // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2171, № 1. P. 110020. (0,71 п.л.).
5. Gavrilov S.I., Gavryushin S.S. Development and Performance Evaluation of a Software System for Multi-objective Design of Strain Gauge Force Sensors // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. V. 1127. P. 228–237. (0,74 п.л./0,67 п.л.). В статье автором предложена методика автоматизированной разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков с применением концепции единого информационного пространства. Проводится тестирование методики на примере проектирования силоизмерительного датчика.
6. Gavrilov S.I. Software system for automated lifecycle management and design of strain gauge force sensors // AIP Conference Proceedings. 2021. V. 2318. № 1. P. 090004. (0,71 п.л.).
7. Gavrilov S.I., Gavriushin S.S. Multi-fidelity Multicriteria Optimization of Strain Gauge Force Sensors Using a Neural Network-Based Surrogate Model. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. V. 1315. P. 325–336. (0,92 п.л./0,74 п.л.). Автором предложена методика суррогатного моделирования характеристик датчика в рамках обобщённой математической модели. Методика была применена для разработки столбикового датчика нового типа.
8. Гавриленков С.И., Гаврюшин С.С., Годзиковский В.А. Система много-критериального проектирования тензорезисторных весоизмерительных датчиков с осесимметричными упругими элементами // Инженерный журнал наука и инновации. 2017. № 1 (61). С. 1-11. (0,69 п.л./0,62 п.л.). В статье автором впервые предложена методика автоматизированной разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков с упругими элементами в виде тела вращения. Представлена первая версия программы «Автоматизация разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков».
9. Гаврюшин С.С., Гавриленков С.И. Система многокритериального проектирования тензорезисторных датчиков силы // Подъемно-транспортное дело, 2018, № (3-4), С. 28-31. (0,4 п.л./0,3 п.л.). В статье автором предложено дальнейшее развитие методики автоматизированной разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков. Представлена вторая версия программы «Автоматизация разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков».
10. Влияние режимов движения АТС и характеристик дорожного покрытия на результаты автоматического измерения их весогабаритных параметров /

С.И. Гавриленков [и др.] // Приборы. 2020. Т. 1. № 235. С. 22–33. (0,44 п.л./0,35 п.л.). Автором проведен анализ влияния режимов движения автомобилей по автомобильным весам. Показано, что действующая на весы нагрузка может пре-восходить статическую осевую нагрузку, что необходимо учитывать при зада-нии требуемого коэффициента запаса прочности тензорезисторного датчика при его разработке.

11. Сенянский М.В., Гавриленков С.И. Метод оценки точности автомати-ческих измерений весовых параметров автотранспортных средств при макси-мальных скоростях и осевых нагрузках // Приборы. 2021. Т. 255. № 9. С. 44–54. (0,89 п.л./0,71 п.л.). Автором проведен анализ влияния динамических характе-ристик датчика на метрологические показатели автоматизированного весоиз-мерительного оборудования. Показано, что для измерения веса быстро пере-мещающихся автомобилей требуется использовать датчики с высокой соб-ственной частотой. На основе данной работы было решено включить динами-ческую модель датчика в его обобщённую математическую модель.

12. Гаврюшин С.С., Гавриленков С.И. Методика автоматизированного проектирования силоизмерительных упругих элементов. // Динамические и техноло-гические проблемы механики конструкций и сплошных сред.: Тез. докл. XXII международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Кременки, 2016. С. 75-76. (0,08 п. л./ 0,07 п. л.). Автором описана методика автоматизированного проектирования силоизмерительных упругих элементов с применением кон-цепции ЖЦП и ЕИП.

13. Гаврюшин С.С., Гавриленков С.И. Система автоматизированного про-ектирования тензодатчиков в форме тел вращения. // Динамические и техноло-гические проблемы механики конструкций и сплошных сред.: Тез. докл. XXIII международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Кременки, 2017. С. 54-55. (0,08 п. л./ 0,07 п. л.). Автором описана методика автоматизированного проек-тирования тензодатчиков в форме тел вращения с применением концепций ЖЦП и ЕИП.

14. Гавриленков С.И., Гаврюшин С.С. Система автоматизированного многокритериального проектирования тензорезисторных датчиков силы. // Труды II Всероссийской научно-технической конференции, посвященной юби-леям основателей кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана профессоров С.Д. Пономарева, В.Л. Бидермана, К.К. Лихарева, Н.Н. Малинина, В.А. Светлицкого. Москва, 2017. С. 176-179. (0,32 п. л./ 0,26 п. л.) В работе ав-тор описал дальнейшее развитие методики автоматизации и управления про-цессом разработки тензорезисторных силоизмерительных датчиков.

15. Гавриленков С.И., Гаврюшин С.С. Методика определения оптималь-ной схемы наклейки тензорезисторов на упругом элементе тензорезисторного датчика силы. // Динамические и технологические проблемы механики кон-струкций и сплошных сред.: Тез. докл. XXIV международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Кременки, 2018. С. 74-75. (0,1 п. л./ 0,05 п. л.). Автором пред-ложен способ оптимизации топологии мостовой измерительной схемы тензоре-зисторного силоизмерительного датчика. Проведена демонстрация данного спосо-ба на примере мембранныго силоизмерительного датчика.

16. Гаврюшин С.С., Гавриленков С.И. Исследование зависимости между конфигурацией мостовой измерительной схемы тензорезисторного силоизмерительного датчика и его чувствительностью к паразитным силовым факторам. // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред.: Тез. докл. XXV международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Кременки, 2019. С. 50-51. (0,08 п. л./ 0,07 п. л.). Автором предложен способ исследования зависимости между конфигурацией мостовой измерительной схемы тензорезисторного силоизмерительного датчика и его чувствительностью к паразитным силовым факторам.

17. Гавриленков С.И., Гаврюшин С.С. Автоматизация и управление процессом проектирования тензорезисторных силоизмерительных датчиков. // Научные труды VI международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». Москва, 2019. С. 108-110. (0,08 п. л./ 0,07 п. л.). Автором предложен подход к автоматизации и управления жизненным циклом тензорезисторного силоизмерительного датчика. Работа подхода продемонстрирована на примере разработки тензорезисторного силоизмерительного датчика.

Гавриленков С.И., Гаврюшин С.С. Интеграция технологических критериев в процесс управления жизненным циклом тензорезисторного силоизмерительного датчика. // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред.: Тез. докл. XXVI международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Кременки, 2020. С. 75-76. (0,08 п. л./ 0,07 п. л.). Автором предложен способ интеграции технологических критериев в процесс управления жизненным циклом тензорезисторного силоизмерительного датчика.