

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных

производств»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Цифровые процессы и системы автоматизированного машиностроения

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему «Повышение точности процессов изготовления с помощью
контрольно-измерительных приспособлений»

Обучающийся

Г.А. Алексян

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

к.т.н., доцент А.В. Зотов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Содержание

Введение.....	3
1 Анализ процесса проведения измерения детали	5
1.1 Анализ назначения детали	5
1.2 Анализ конструкции калибра	9
1.3 Визуализация калибра и детали в 3D	11
1.4 Методология проведения замера	14
1.5 Анализ технических характеристик контрольно-измерительных приспособлений	15
2 Обзор современных методик измерения	22
3 Разработка технологических решений.....	29
3.1 Применение FMEA и MSA	29
3.2 Анализ контрольных точек.....	31
3.3 Внедрение FMEA.....	36
3.4 Внедрение MSA	38
3.5 Интеграции FMEA и MSA.....	42
4 Практическая реализация технологических решений.....	46
5 Безопасность и экологичность объекта.....	62
5.1 Конструктивно-технологическая характеристика объекта.....	62
5.2 Идентификация профессиональных рисков	62
5.3 Методы и технические средства снижения профессиональных рисков	63
5.4 Обеспечение пожарной безопасности технического объекта.....	64
5.5 Обеспечение экологической безопасности рассматриваемого технического объекта	66
Заключение	68
Список используемых источников.....	69

Введение

Современное машиностроение предъявляет всё более высокие требования к точности изготовления деталей, тогда как ошибки в производственных процессах приводят к снижению качества изделий, увеличению затрат на исправление дефектов и, в конечном итоге, к экономическим потерям. Для минимизации этих рисков используются контрольно-измерительные приспособления (КИП), обеспечивающие высокую точность измерений и контроль параметров в режиме реального времени.

3D-замер кожуха рулевого вала представляет собой технически непростую задачу, несмотря на кажущуюся простоту детали. Основные сложности связаны с его геометрической формой, материалом и ограниченным доступом к отдельным участкам. Кожух выполнен из пластика и имеет криволинейную, асимметричную форму с внутренними и наружными элементами – такими как защёлки, пазы, направляющие и тонкостенные области. Эти особенности могут давать дополнительную погрешность и затруднять контактный замер, особенно если важно соблюдать высокую точность по геометрии детали.

Целью исследования является изучение и решение проблемы сбоя измерения для верхнего кожуха рулевого вала. В этом исследовании анализируются причины сбоя измерения, оцениваются связанные с этим риски и предлагаются решения для практических улучшений. Особенно актуальным это становится в условиях автоматизации и цифровизации производств, где системный подход к управлению качеством становится неотъемлемой частью инженерной деятельности.

Проблемы, возникающие при измерении данной детали, могут существенно повлиять на общее качество продукта. Ошибки измерения могут привести к неправильной оценке характеристик детали, что приведет к дефектной продукции, увеличению производственных затрат и потере доверия

клиентов. Поэтому важно определить основные причины ошибок измерения и разработать эффективные стратегии для снижения этих рисков. Кроме того, высокая неопределённость, которая возникает в процессе измерений, снижает эффективность внедрения автоматизированных систем измерений и препятствует переходу к цифровому производству, где критична точность данных.

Это исследование уникальным образом объединяет анализ режимов и последствий отказов (FMEA) для определения приоритетов потенциальных сбоев измерений и анализ систем измерений (MSA) для оценки и исправления неопределенностей измерений.

Результаты исследования могут быть использованы для автоматизации контроля размеров и форм, что позволяет ускорить производственные циклы и сократить влияние человеческого фактора. Разработка новых подходов к метрологическому обеспечению также открывает перспективы для более точной и стабильной оценки параметров, а оптимизация затрат за счёт повышения эффективности измерительных систем делает такие решения экономически целесообразными для предприятий.

Ожидается, что благодаря оценке и учету рисков это исследование улучшит качество измерений и сократит количество отказов для рассматриваемой детали. Наиболее важным исследовательским вкладом этой работы является интеграция подходов FMEA и MSA в работу с измерениями отказов в машиностроительной отрасли.

Основные задачи, направленные на достижение цели диссертации:

- проанализировать процесс проведения замеров для исследуемой детали;
- рассмотреть существующие исследования систем лабораторного и промышленного контроля замеров;
- провести интеграцию подходов FMEA и MSA в работу системы контроля;
- разработать план корректирующих действий.

1 Анализ процесса проведения измерения детали

1.1 Анализ назначения детали

Объектом в данном исследовании являются автомобильные детали, а именно верхний кожух рулевого вала (рисунки 1, 2). Выбор данной детали основан на ее значимости в производственном процессе, где ошибки в измерениях могут влиять на воспринимаемое качество продукта. Эта деталь была выбрана для разбора возникающих проблем с ошибками измерения, которые могут произойти в процессе производства.



Рисунок 1 – Верхний кожух рулевого вала (вид сверху)



Рисунок 2 – Верхний кожух рулевого вала (вид снизу)

Разберем подробнее назначение и функционал выбранного автокомпонента.

«Верхний кожух рулевого вала представляет собой жесткий корпус, выполненный из пластика, который является сборочной частью панели приборов и нижним кожухом рулевого вала. Служит для защиты рулевой колонки от попадания пыли и мусора, а также придает салону автомобиля законченный и лаконичный вид. Кожух не является несущим компонентом, так как не подвергается физической нагрузке.

Для внутренней отделки современного автомобиля в среднем используется около от 20 до 25 кг полипропилена. Панель приборов, держатели, кожухи, дверные карты, детали сидений, различные переключатели – все это изготовлено из пластика, и в большей части из полипропилена.

Кожух руля изготовлен из полипропилена (PP) марки Hostacon TRC411N R, который представляет собой полипропиленовый сополимер с содержанием талька 20 %. Этот материал обладает высокой текучестью, хорошим балансом ударопрочности, жесткости и превосходной стойкостью к царапанию, а также обладает слабым запахом и низким уровнем выбросов. Особенно стоит отметить стойкость к царапанию, которая ценится не только во время эксплуатации авто, но и при производстве самой детали» [1].

«Полипропилен – производная этилена; мономер пропилена. Обладает повышенной механической прочностью, жесткостью, большой теплостойкостью и меньшей склонностью к старению. К недостаткам полипропилена относится невысокая морозостойкость.

Способы формования деталей из полипропилена – штамповка, литье под давлением, пневматическое и вакуумное прессование. Кроме этого, полипропилен легко сваривается, напыляется на металлы, ткани и картон. Хорошо обрабатывается механически на различных станках (фрезерных, токарных, сверлильных). Полипропилен применяется для антикоррозионной обработки, изготовления электроизоляционных

деталей, а также для изделий, работающих в агрессивных средах.

Недостатки полипропилена: при ударных нагрузках повышенная хрупкость, невысокая морозо- и теплостойкость, склонность к старению.

К синтетическим материалам относятся газонаполненные пластики, которые делятся на поропласты и пенопласты. Микроскопические ячейки поропластов, наполненные газом, сообщаются между собой. У пенопластов эти ячейки не сообщаются между собой.

Плотность пенопластов меньше $0,3 \text{ г/см}^3$, и она несколько ниже, чем у поропластов. Эти газонаполненные пластики выпускают на основе поливинилхлоридов, полистиролов и различных эфирных полимеров» [1].

«Именно такой набор положительных качеств полностью соответствует требованиям, которые предъявляет производитель для внутренней отделки салона и, в частности, кожаных элементов рулевого управления.

В таблице 1 указаны основные физические, механические и тепловые характеристики данного материала [29].

Таблица 1 – Свойства материала Hostacon TRC411N R

Физические		Механические		Тепловые
Расход расплава (230 °C/2,16 кг), г/мин	Плотность, г/см ³	Модуль упругости при изгибе, МПа	Ударная вязкость по Шарли – с надрезом, кДж/м ²	Температура прогиба под нагрузкой (0,45 МПа, нераскрытый), °C
19/10	1,04	1800	25	90

«Ключевую роль в интерьере салона играет дизайн, который включает в себя множество элементов. Цвет, форма, эргономика, качество используемых материалов, все это важно для конечного потребителя, а значит должно быть учтено и производителем.

Для того чтобы все детали внутренней отделки салона были согласованы друг с другом, требуется тщательный контроль и точный, выверенный план изготовления.

Так, например, зазоры между элементами панели приборов, должны быть все одной определенной величины. Это позволит обеспечить их удобный монтаж и демонтаж, а также придаст салону лаконичный внешний вид.

В свою очередь, разная толщина зазоров по всей длине на примыкающих поверхностях деталей, будет сразу бросаться в глаза, а при дальнейшей эксплуатации может привести к неприятному скрипу в салоне.

На рисунке 3 представлен пример зазоров, которые отличаются между собой. Их видно и невооруженным глазом. Поэтому важно следить за соблюдением допусков во время производства» [1].



Рисунок 3 – Разные зазоры

К показателям, обеспечивающим высокое качество детали, относят высокую износостойкость, стойкость к воздействию ультрафиолетового излучения и царапания, баланс между прочностью и жесткостью, хорошую окрашиваемость, а также низкую эмиссию запаха.

1.2 Анализ конструкции калибра

«В условиях массового производства, для повышения выработки и быстрой сверки параметров используется специальный шаблонный инструмент – калибр. С его помощью удается достаточно точно определить фактические размеры, а также убедиться в том, что не нарушены обозначенные допуски [8], [9]. Соответственно для каждой детали калибр должен изготавливаться индивидуально, строго под размеры сопрягающихся частей одного механизма.

Для того чтобы были соблюдены необходимые зазоры между сопрягаемыми деталями панели приборов используется определенный калибр. Он представляет собой точную имитацию посадочного места крепления верхнего кожуха рулевого вала [10]. В данном случае деталь устанавливается точно так же, как она устанавливалась бы в реальном автомобиле.

После того как были соблюдены допуски посадочных мест и кожух располагается должным образом, специалистом проводится замер детали. Согласно допускам, которые установил производитель, в данном случае они составляют $\pm 0,5$ мм. Измерения выполняют, используя специальные щупы. Щуп – это измерительный инструмент, изготовленный из инструментальной стали и предназначенный для контроля зазоров между плоскостями [11]. На рисунке 4 изображен пример набора щупов.

Для проверки зазоров у кожуха руля и сопрягаемой части используют щупы номиналами 2,5 мм и 3,5 мм. Ими проверяют зазор, который должен быть 3 мм, на проход/не проход. Деталь считается технологичной, если щуп на 2,5 мм проходит свободно, а щуп на 3,5 мм не проходит в зазор. Допустимая погрешность такого измерения составляет от 5 до 10 мкм.

На рисунке 5 изображен метод крепления детали на калибре» [1].



Рисунок 4 – Набор щупов разного значения



Рисунок 5 – Установленный кожух руля в калибре

«В таблице 2 приведен лист утверждения калибра, этапы прохождения контроля, их необходимость, а также источник их условий. Калибр, который успешно прошел утверждения и соответствует всем требованиям, приложенным к нему, допускается к работе» [1].

Таблица 2 – Лист утверждения калибра

Этапы		Источник тех. условий	Необходимость (Да/Нет)
Определение зоны сопряжения детали на кузове (по осям XYZ)		НСРР	Да
Определение основных допусков калибра (поверхности сопряжений детали, монтажные поверхности)		ТЗ на калибр	Да
Подробная информация о сопряжении детали		НСРР	Да
Мероприятия и отчеты по одобрению калибра	Отчет о материалах калибра	ТЗ на калибр	Да
	Отчет измерений калибра	3D замеры	Да
	Отчет о смещении и линейности	Нет	Нет
	Отчет о пригодности и функции	Нет	Нет
Детали и опорные точки установочных калибров		НСРР	Да
Подробная информация по работе с калибром		Паспорт калибра	Да

Таким образом, рассмотрен верхний кожух рулевого вала с точки зрения его служебного назначения техническим требованиям и технологичности.

1.3 Визуализация калибра и детали в 3D

Замеры детали проводятся только после закрепления на калибр, модель которого, выполненная посредством использования программного пакета 3D-моделирования, представлена на рисунках 6-7. Каждый калибр изготавливается специально для конкретной детали, с подходящей формой и

местами крепления [7]. В данном случае для удобства переноски на модели также учтены ручки.

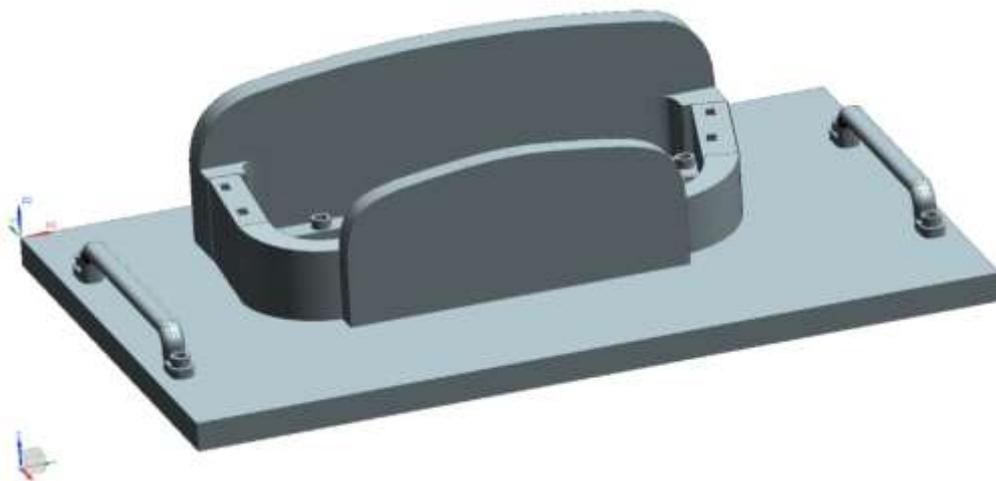


Рисунок 6 – Калибр в сборе: изометрический вид

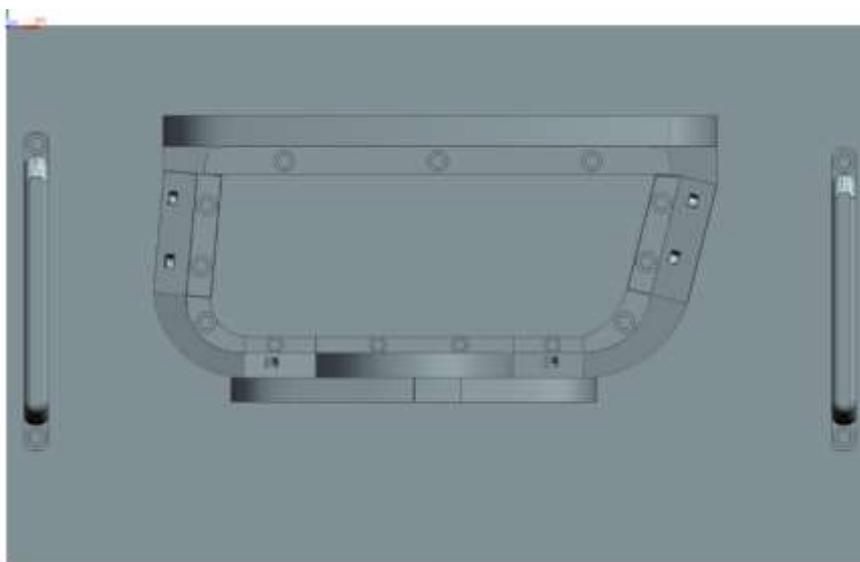


Рисунок 7 – Калибр в сборе: вид сверху

Данный калибр состоит из задней и передней стенок, двух боковых и двух передних зажимов, а также двух блоков. Все элементы закрепляются на установочной плите при помощи винтов М6×20 и М8×20.

Метод крепления детали в калибре изображен на рисунке 8.

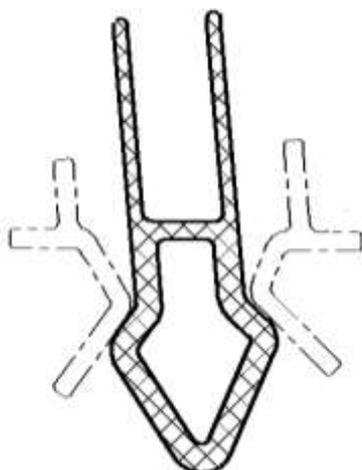


Рисунок 8 – Крепление детали в калибре

На рисунках 9-11 можно увидеть, как выглядит деталь, установленная в калибре.

Деталь закрепляется в специальных зажимах, которые имитируют ответную часть в автомобиле, таким образом, чтобы не повредить саму деталь.



Рисунок 9 – Деталь в калибре: изометрический вид



Рисунок 10 – Деталь в калибре: вид сверху

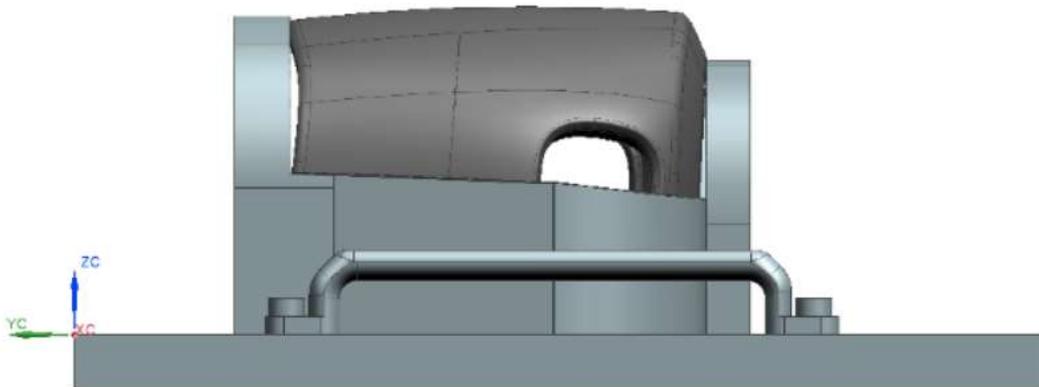


Рисунок 11 – Деталь в калибре: вид сбоку

После проведения замеров, деталь должна сохранить товарный вид, а калибр остаться пригодным для дальнейших замеров.

1.4 Методология проведения замера

Инновационные подходы включают использование цифровых двойников и интеграцию КИП в системы управления производством [12]. Например, работы на стыке метрологии и искусственного интеллекта

позволяют прогнозировать отклонения на этапе проектирования и оперативно корректировать процесс изготовления.

Таблица 2 – Критический анализ

Достоинства	Недостатки
лазерные системы и координатно-измерительные машины (СММ) предоставляют беспрецедентную точность	высокая стоимость оборудования ограничивает их распространение
интеграция искусственного интеллекта способствует автоматизации и снижению влияния человеческого фактора	зависимость от сложного программного обеспечения требует дополнительного обучения персонала
новые технологии, такие как вибрационные измерения, открывают перспективы для повышения производительности	необходимость стандартизации приводит к задержкам в внедрении технологий

Выявлен недостаток исследований, посвящённых устойчивости систем измерений в условиях вибраций, температурных изменений и других производственных факторов.

1.5 Анализ технических характеристик контрольно-измерительных приспособлений

ROMER Absolute Arm 7530 – это 7-осевой портативный координатно-измерительный прибор, предназначенный для высокоточных 3D-измерений в производственных условиях. Расшифровка обозначения указана на рисунке 12, внешний вид на рисунке 13. Он особенно популярен в автомобильной, аэрокосмической и тяжелой промышленности за счёт встроенных абсолютных энкодеров, не требующих калибровки при включении, а также легкости, гибкости в использовании и возможности интеграции с лазерными сканерами. Подробнее о комплектации в таблице 3.

RA7525SE

SE Scanner External
SI Scanner Integrated
T Arm for Tube inspection

12 1.2 m
20 2.0 m
25 2.5 m
30 3.0 m
35 3.5 m
40 4.0 m
45 4.5 m

71 series - entry level
73 series - medium level
75 series - high level
77 series - top level

RA ROMER Absolute Arm

Рисунок 12 – Расшифровка обозначения



Рисунок 13 – Внешний вид 3D-руки ROMER Absolute Arm 7530

Таблица 3 – Комплектация 3D-руки ROMER Absolute Arm 7530

Противовес	Zero G / SmartLock	ДА
Монтажное основание	NCA7-5-21497 – Основание	НЕТ
	NCA7-5-19866 – Магнитное основание	НЕТ
	NCA7-7-19225 – Круглое магнитное основание	НЕТ
	NCA7-3-53008 – Вакуумное монтажное основание	НЕТ
	H00004220 – Только монтажное кольцо	НЕТ
Щупы	TKJ – \varnothing 15 мм	ДА
	TKJ – \varnothing 6 мм	ДА
	TKJ – \varnothing 3 мм	ДА
Кабели	USB – 3 м	ДА
	Блок питания	ДА
Программное обеспечение	USB-диск для установки	ДА
	Драйвер и интерфейс RDS	ДА
	Руководства пользователя	ДА
Сканер	H0000352 – HP-L-8.9T2	НЕТ
Калибровка	NCA7-5-20653-01 Сертифицированная сфера \varnothing 25,4 мм	ДА
Поверка	Верификационный эталон	НЕТ
Доп. пакеты / Аккумулятор	NCA7-5-52303 – Установлен пакет сканирования	НЕТ
	H00000779-01 – Установлен комплект Mobility Plus	НЕТ
	H00001180 – Установлен RS Wireless Pack Plus	НЕТ

Рассмотрим основные особенности 3D-руки ROMER Absolute Arm 7530.

Баланс между диапазоном и точностью.

Модель 7530 предлагает измерительный объём в 3 м³, что является золотой серединой между мобильностью и охватом. Такой размер позволяет выполнять контроль как небольших деталей, так и среднечисленных изделий (кузовные элементы, пресс-формы, сварные конструкции), не жертвуя точностью. Поэтому он удобен в большинстве производственных сценариев без необходимости докупать дополнительные модели.

Повышенная точность.

ROMER 7530 принадлежит к серии 75xx, а это означает высокий класс точности. Погрешность измерения составляет около $\pm 0,023$ мм, что соответствует требованиям контроля на автомобилестроительных и аэрокосмических предприятиях. Так мы обеспечиваем надёжность благодаря контролю критичных геометрий, верификации CAD и проверке допусков.

Абсолютные энкодеры – минимизация времени запуска.

Встроенные абсолютные энкодеры устраняют необходимость калибровки при каждом включении. Это обеспечивает мгновенную готовность прибора к работе, что критично в условиях массового производства и при частых перемещениях, а это значит – экономия времени, меньше человеческих ошибок, повышенная стабильность результатов.

Гибкость и расширяемость.

ROMER 7530 совместим с лазерными сканерами (например, HP-L-8.9) и другими периферийными модулями (SmartLock, мобильные пакеты). Это позволяет расширять функциональность системы под задачи 3D-сканирования, обратного инжиниринга и анализа износа.

Одна платформа – множество применений без необходимости покупки новой техники.

Оптимальный вес и эргономика.

Семь осей движения, специальная балансировка (ZeroG / SmartLock), удобные рукоятки и компактный дизайн делают 7530 удобной в работе даже при длительном использовании. В итоге, снижается утомляемость оператора, повышается качество и скорость измерений.

Производственная надёжность.

Модель адаптирована для работы в цеховых условиях – устойчива к температурным колебаниям, пыли, вибрациям и легко монтируется на различные базы (вакуумная, магнитная) и поэтому подходит для реальных условий производства, а не только для лабораторий.

ROMER Absolute Arm 7530 – это универсальное и высокоточное решение для предприятий, которым требуется:

- высокая точность измерений в диапазоне до 3 м;
- мобильность и быстрая готовность к работе;
- возможность масштабирования (сканеры, софт, аксессуары);
- эргономика и надёжность в производственных условиях.

Именно сочетание точности, универсального охвата и адаптивности делает модель 7530 рациональным выбором, как для текущих задач, так и для

возможного расширения в будущем.

Отдельного упоминания достойно программное обеспечение.

SpatialAnalyzer (SA) – это мощный, отслеживаемый и простой в использовании программный пакет для метрологии и анализа, разработанный специально для портативных контрольно-измерительных машин (КИМ) семейства Hexagon Manufacturing Intelligence.

Программа SA предлагает широкий спектр преимуществ, включая:

- интуитивно понятный, современный графический интерфейс;
- интеграция со всеми портативными КИМ Hexagon;
- поддержка всех распространённых CAD-форматов и нативных форматов;
- продвинутые методы анализа и обработки данных, а также уникальные методы выравнивания;
- простая группировка нескольких измерительных станций;
- полноценная проверка требований GD&T (геометрические размеры и допуски) и контроль геометрических элементов;
- широкий выбор отчётных опций;
- расчёт неопределённости измерений;
- использование USMN (универсальной сетевой модели) для оптимизации конфигурации сети приборов;
- интегрированный современный скриптовый язык для автоматизации рабочих процессов;
- поддержка нескольких языков;
- бесплатная программа SA Viewer для удобного обмена файлами проектов SA.

Ниже рассмотрены основные конкуренты на рынке, их особенности и краткий сравнительный анализ.

Таблица 4 – Аналоги и конкуренты

Модель	Место производства	Особенности	Преимущества по сравнению с ROMER 7530	Недостатки по сравнению с ROMER 7530
FARO QuantumS Arm	FARO Technologies (США)	6- или 7-осевая ручная измерительная рука с высокой точностью. Совместим с лазерным сканером FAROBlu.	Более лёгкий корпус, быстрое сканирование, высокая мобильность	Требует периодической калибровки, зависимость от внешних датчиков
Hexagon Absolute Arm (2023)	Hexagon Metrology (Швеция)	Обновлённая линейка от того же производителя, что делает ROMER. Улучшенные датчики, беспроводные функции, термостабильность.	Поддержка Wi-Fi, улучшенное ПО, модульная конструкция	Более высокая цена, ограниченная совместимость с ПО сторонних производителей
Kreon ACE Arm	Kreon Technologies (Франция)	Совместим с высокоточными лазерными сканерами Kreon. Поддерживает автоматическую компенсацию теплового расширения.	Высокая точность лазерного сканирования, меньше вес, удобно держать	Требует настройки и прогрева, слабее интеграция с САД
Creaform HandyPROBE / MetraSCAN 3D	Creaform (Канада)	Оптическая измерительная система без механических рычагов. Применяется с фотограмметрией.	Бесконтактная работа, не требует фиксированного основания	Высокая цена, необходимость дополнительных камер и меток
Mitutoyo Arm RA-8	Mitutoyo (Япония)	Простая и точная рука для ручного измерения в лабораторных условиях.	Хорошая точность в стабильной среде, высокая надёжность	Нет поддержки лазерных сканеров, слабая мобильность, ограниченная свобода перемещения

Таблица 5 – Сравнительный анализ

Критерий	ROMER Absolute 7530	FARO QuantumS	Hexagon Absolute Arm (нов.)	Kreon ACE	Creaform HandyPROBE
Количество осей	7	7	7	6	Без осей (оптика)
Точность	~0,023 мм	~0,020 мм	~0,018 мм	~0,020 мм	~0,025 мм
Встроенные энкодеры	ДА	НЕТ	ДА	НЕТ	НЕТ
Поддержка сканера	ДА	ДА	ДА	ДА	ДА
Масса	Средняя	Легкая	Средняя	Лёгкая	Зависит от конфигурации
Простота интеграции	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя	Низкая (требует камеры)
Цена	Средняя	Ниже средней	Выше средней	Ниже средней	Выше средней

Следует учесть, что новая линейка Hexagon Absolute Arm предлагает более современные функции (модульность, беспроводная передача данных), а FARO QuantumS выигрывает в мобильности.

Выводы по разделу: проведен анализ назначения детали, в рамках которого показано, что при изготовлении верхнего кожуха рулевого вала требуется тщательный контроль формы изделия. Контроль лучше осуществлять посредством калибра, который представляет собой точную имитацию посадочного места крепления верхнего кожуха рулевого вала. Выявлены пробелы в отсутствии комплексных данных о долгосрочной надежности новых систем измерений и их влиянии на производственные цепочки; сложности с интеграцией данных, полученных от КИП, с другими системами управления производственными процессами. Показано, что в сегменте ручных КИМ, благодаря встроенным абсолютным энкодерам (что уменьшает подготовку к работе), хорошему балансу веса и точности, а также высокой надёжности одним из лучших выборов для контроля геометрии кожуха будет использование КИМ марки ROMER Absolute 7530.

2 Обзор современных методик измерения

Настоящий обзор посвящён анализу современных методов повышения точности и надёжности измерительных систем, применяемых как непосредственно на производстве, так и при проведении опытно-конструкторских работ. Особое внимание уделено КИП, системам машинного зрения, а также подходам к оценке неопределённости и воспроизводимости результатов измерений. В качестве критерия отбора источников использовалась их тематическая релевантность в области метрологии и измерительных технологий, наличие экспериментальной базы, формализованных моделей и применение результатов на практике. Анализ проводился по направлениям: тип измерительной системы, методы оценки неопределённости, использование математико-статистических инструментов, а также наличия инновационных и автоматизированных решений.

Объединяющим элементом всех рассмотренных работ является стремление к минимизации как систематических, так и случайных погрешностей, обеспечению прослеживаемости измерений и стандартизации подходов в соответствии с международными нормативами (GUM, VIM, AIAG MSA). Исследования демонстрируют применение как классических (GRR-анализ, моделирование погрешностей), так и новых методик (структурированный свет, машинное зрение, экологически чистые бесконтактные технологии). Значительное внимание уделяется разработке алгоритмов компенсации геометрических и масштабных ошибок, оптимизации траекторий в многокоординатных измерительных системах, а также анализу влияния систематических эффектов.

Практическая значимость работ заключается в возможности их применения для повышения точности измерений в производственных условиях, автоматизации контроля геометрических параметров изделий, разработки новых подходов к метрологическому обеспечению, а также оптимизации затрат.

В процессе исследования были выбраны 14 ключевых источников, которые охватывают аспекты использования контрольно-измерительных приспособлений для повышения точности производственных процессов.

В статье «Вклад оценки неопределенностей измерений в последовательность обработки данных КИМ» [18] авторы Герибби Хассина, Букеббаб Салим описывают методику оценки неопределенностей измерений на КИМ при обработке данных. Представлен алгоритм расчета неопределенностей на основании параметров поверхности, определяемых при минимизации расстояния между теоретической и измеряемой поверхностью. Основное внимание уделено моделированию данных и разработке программного обеспечения для автоматизации оценки неопределенностей, что позволяет уменьшить погрешности при проверке геометрических параметров.

В работе «Экономичный метод автоматического измерения механических деталей с использованием монокулярного машинного зрения» [24] авторами Винисиусом Ногейра, Луисом Барка и Талесом Пимента рассматривается система автоматического измерения плоских параметров механических деталей с использованием машинного зрения. Прототип построен на недорогих компонентах, таких как промышленная камера и алгоритмы выборочного обнаружения краев. Эксперименты показывают, как внедрение машинного зрения снижает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором, что, в свою очередь, ведет к высокой точности измерений при использовании данного подхода, и, как следствие, делает его необходимым при автоматизации производства.

В своей публикации «Метод измерения диаметра вала, основанный на улучшении изображения с помощью световой полосы» [20] Чуньфэн Ли, Сипин Сюй, Сиюань Лю, Чжэнь Жэнь фокусируются на измерении диаметров валов с помощью технологии структурированного света. Введен метод улучшения изображений световых полос для минимизации отражений на поверхности и повышения точности извлечения центра полосы. Предложенная методика сочетает коррекцию яркости и эллиптическую

аппроксимацию что особенно важно при измерении деталей сложной формы и высокого качества.

Основная цель авторов статьи «Упрощенная модель для оценки неопределенности в СММ» представить упрощенные модели для оценки неопределенности измерений на координатно-измерительных машинах [14]. Розенда Вальдес Аренсибия, Клаудио Коста Соуза, Хенара Лилиан Коста, Антониу Пирателли-Фильо рассматривают модели для оценки девиаций формы (круглости и цилиндричности) с помощью разработки математической модели и алгоритма оценки неопределенности. Статья охватывает как анализ стандартов и систем измерения, так и проведение экспериментов для валидации модели. Таким образом, эта работа фокусируется на улучшении точности измерений через стандартизацию процессов оценки неопределенности.

Авторами исследования «Измерение точности обработки на основе моделей в процессе обработки с использованием компьютерного зрения» [21] рассматривается использование компьютерного зрения для измерения точности обработки в режиме реального времени. Чжимин Ли, Вэй Вэнь Ляо, Лонг Чжан, Юйсян Жэнь, Гуанмин Сун, Ичунь Санг особенно выделяют создание универсальной модели признаков для анализа САД-моделей и последующей идентификации измеряемых областей. И как следствие, применение методов компьютерного зрения для повышения точности измерений, таких как детекция краев и преобразование Хафа. Их эксперименты показывают высокий уровень точности измерений (до 99 %) и превосходство предложенной методики перед традиционными подходами. Таким образом, статья описывает инновационные подходы, использующие технологии компьютерного зрения для измерений в процессе обработки, что повышает точность и снижает затраты.

Статья «Измерение и компенсация геометрических погрешностей машин» [30] посвящена измерению и компенсации геометрических ошибок в координатно-измерительных машинах и станках. Основные аспекты, которые

выделяют Х. Швенке, В. Кнапп, Х. Хайтьема, А. Векенманн, Р. Шмитт, Ф. Дельбрессин – это обзор источников геометрических ошибок (кинематические, термомеханические и другие) и методы калибровки и численной компенсации ошибок, а также анализ перспектив развития этих технологий для повышения точности оборудования. Эта статья сосредоточена на методах компенсации геометрических ошибок, что позволяет обеспечить высокую точность машин и инструментов.

В статье «Анализ измерительных систем – методы повторяемости и воспроизводимости измерительных приборов» [16] основное внимание уделяется анализу измерительных систем, в частности методам повторяемости и воспроизводимости датчиков (GRR). Авторами подробно описываются два основных метода: метод средних значений и диапазонов (по данным группы действий по автомобильной промышленности MSA) и метод честного исследования GRR (подход EMP). В работе оцениваются измеренные данные, в частности толщина пластмассовых деталей, с использованием обоих методов и сравниваются их результаты с помощью численной оценки. Обсуждаются преимущества и недостатки каждого метода, подчеркивается ключевое различие в способах расчета компонентов вариации. В методе AIAG используется стандартное отклонение, которое не составляет 100 %, в то время как в честном исследовании GRR используется дисперсия, позволяющая суммарному отклонению быть равным 100 %.

В работе «Анализ измерительной системы на предмет односторонней толерантности» [31] обсуждается разработка надежного статистического метода анализа для оценки изменчивости измерительной системы, особенно в контексте односторонней толерантности. Авторы Сземик Камил и Богач Павел стремятся устранить ограничения существующего статистического анализа, который часто неприменим к сложным и необычным приложениям в производстве. В статье подчеркивается важность анализа измерительных систем для обеспечения требуемых возможностей проведения измерений для эффективного управления продукцией и технологическими процессами, а

также сохранения допустимых вероятностей оценки ошибок первого и второго типов.

Авторы статьи «Определение погрешностей масштаба и перпендикулярности на КИМ с использованием ступенчатого калибра, измеренного на основе стандарта ASME 89.4.10360.2-2008» [22] основное внимание уделяют выявлению ошибок коэффициента усиления шкалы и перпендикулярности между осями в координатно-измерительных машинах с использованием ступенчатых датчиков. Подчеркивается важность периодической проверки КИМ для обеспечения их точности и надежности в производственных процессах. Абдельхак Нафи и Рене Майер предлагают комплексный метод, в котором используются измерения, проведенные в семи конкретных местах, как указано в стандарте ASME 89.4.10360.2-2008. Этот метод не только выявляет ошибки, но и обеспечивает процесс проверки с использованием Т-образного квадрата и метода реверсирования.

В статье «Неопределенность измерений, прослеживаемость и GUM» [28] рассматриваются проблемы, связанные с точным измерением мощности в микроволновых системах, в частности из-за несоответствия импедансов, которое может привести к нежелательным отражениям сигнала. Авторами Ником Ридлером, Брайаном Ли, Джоном Мартенсом и Кеном Вонгом подчеркивается важность понимания и количественной оценки этих неопределенностей для повышения надежности измерений. Также ими делается вывод, что результаты измерений, включающие утверждения о неопределенности и доверительных интервалах, значительно более ценны. Это особенно актуально в производстве, где точные измерения имеют решающее значение для соблюдения отраслевых стандартов и нормативов.

Статья «Математические и статистические инструменты метрологических измерений» [27] посвящена применению математических и статистических инструментов в метрологических измерениях с акцентом на концепции точности, повторяемости и воспроизводимости измерительных процессов. Автором Франко Павезе подчеркивается важность этих концепций

для обеспечения надежных и точных измерений, которые имеют решающее значение для различного применения, включая производственные процессы. В статье точность определяется как близость результата измерения к истинному значению. Подчеркивается, что оно включает в себя как случайные компоненты, так и систематические ошибки. Также рассматриваются различные подходы к измерениям, включая метод ошибок, целью которого является максимально точная оценка истинного значения измерений. Этот подход необходим для повышения точности производственных процессов за счет минимизации ошибок.

В исследовании «Выбор оптимальных алгоритмов управления траекторией зондовых головок, используемых в пятиосевых измерительных системах» [17], авторы Адам Гонск, Петр Гонска, Мацей Груза и Ежи Сладек развивают тему эффективности различных алгоритмов управления траекторией для снижения ошибок измерений в пятиосевых системах координат. В работе подчеркивается важность выбора правильного алгоритма для повышения точности измерений, особенно при выполнении различных геометрических задач, таких как измерение расстояний, плоскостности и таких отклонений, как параллельность и округлость. Полученные данные свидетельствуют о том, что использование алгоритма оптимального управления траекторией позволяет значительно минимизировать ошибки измерений. При этом, при выполнении некоторых задач наблюдаются сокращения до 4 мкм. В статье также подчеркивается, что стандартные отклонения измерений обычно ниже при использовании оптимального алгоритма, что способствует повышению надежности и точности измерений.

В докладе «Об учете систематических эффектов в метрологии и тестировании» [26] Павезе Ф. рассматривает изучение систематических эффектов в метрологии с акцентом на различия в определениях и подходах между GUM (Руководство по выражению неопределенности в измерениях) и VIM (Международный словарь метрологии). В ней освещаются проблемы, связанные с точным измерением и исправлением систематических ошибок,

которые крайне важны для обеспечения надежности результатов измерений. Автор также изучает влияние этих систематических воздействий на точность измерений и концепцию метрологической прослеживаемости, которая необходима для поддержания стандартов в различных областях, включая производственные процессы. Также в статье высказывается предположение, что анализ систематических эффектов часто основывается на экспертных оценках, а это, в свою очередь, указывает на то, что для повышения точности производственных процессов могут потребоваться квалифицированные специалисты для выявления и устранения этих эффектов.

Работа «Экологически чистый метод трехмерной компьютерной верификации пластмассовых деталей» [14] представляет метод 3D-оптической проверки. Предложенный авторами Чил-Чюань Куо , Цзун-Янь Хэ и Чил-Сянь Ли подход устраняет необходимость использования антибликовых покрытий, снижая время и стоимость измерений. Эксперименты показали, что метод обеспечивает высокую точность (средняя погрешность от 3 до 4,7 мкм) и соответствует требованиям устойчивого развития. Основная идея заключается в практическом внедрении бесконтактных 3D-оптических измерений, которые обеспечивают высокую точность и экологичность, что улучшает качество пластиковых деталей и снижает затраты.

Выводы по разделу: анализ современных методов повышения точности измерительных систем показал, что ключевыми направлениями являются минимизация погрешностей (систематических и случайных), автоматизация процессов (машинное зрение, структурированный свет), стандартизация оценок неопределённости (GUM, MSA) и внедрение инновационных решений (бесконтактные технологии, алгоритмы компенсации ошибок).

3 Разработка технологических решений

3.1 Применение FMEA и MSA

При выполнении анализов FMEA и MSA тщательный отбор образцов является обязательным условием для обеспечения репрезентативности и достоверности результатов. Критерии, определяющие отбор образцов, разработаны в соответствии с известными причинами сбоя измерений в области автомобилестроения.

Выбор образцов автомобильных деталей основан на анализе характеристик, которые могут влиять на погрешность измерений. Обоснование этих конкретных критериев, основано на известных причинах ошибок измерения.

Во-первых, изменение размеров: детали с разными размерами включены в выборку, чтобы учесть возможные погрешности измерений, возникающие из-за вариаций размеров – распространенный в отрасли источник неточностей.

Во-вторых, уровень сложности: детали разной сложности включены в анализ, так как сложные конструкции создают дополнительные факторы погрешности при измерениях.

В-третьих, частота использования в производстве: детали, выбранные на основе частоты их использования в производстве, призваны улавливать изменения, которые могут возникнуть в ходе обычных производственных процессов, отражая реальные ситуации, в которых определенные компоненты могут быть более восприимчивы к ошибкам измерения.

Сбор данных включал участие трех оценщиков, проводивших каждый по три повторных измерения детали, как показано на рисунках 14 и 15.

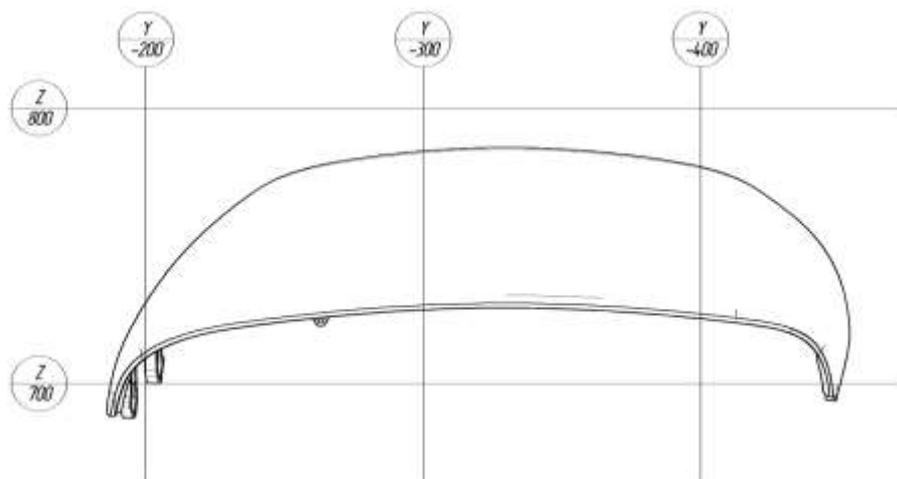


Рисунок 14 – Чертеж детали с размерной сеткой

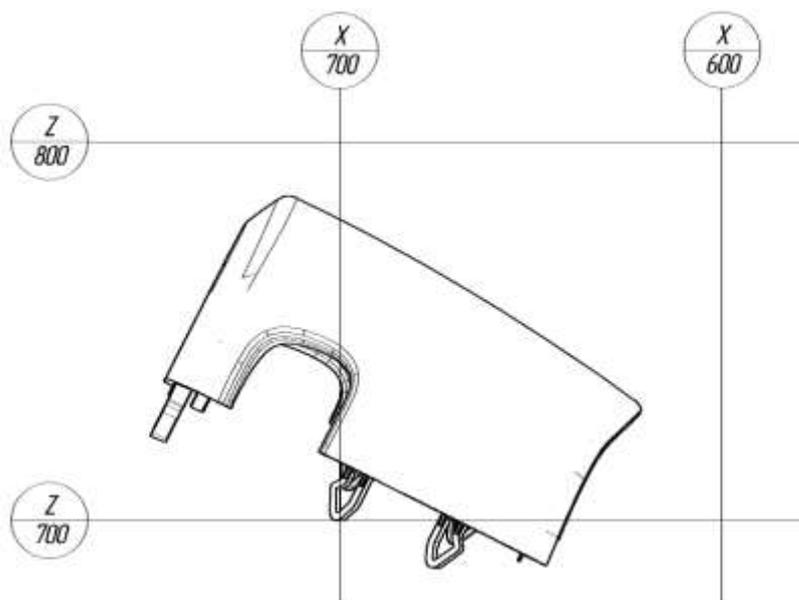


Рисунок 15 – Чертеж детали с размерной сеткой

Этот комплексный подход к выбору образцов разработан не только для соответствия установленным рекомендациям, но и для согласования с отраслевыми задачами, гарантируя применимость результатов к известным причинам сбоев измерений в контексте производства автомобильных деталей.

3.2 Анализ контрольных точек

Приемка первой годной детали проводится для подтверждения соответствия выпускаемой продукции [2]. На этом этапе контролируются внешний вид и геометрия изделия по основной технологии. Замеры в контрольных точках выполняются с помощью 3D-руки.

Для успешного прохождения этого этапа необходимо разделить контрольные точки на две категории: влияющие на форму детали и влияющие на её сопряжение с другими деталями [3]. Геометрия детали сверяется с координатами точек 3D-модели, привязанными к нулям калибра (таблица 6), чтобы обеспечить соответствие реальному положению в автомобиле.

Таблица 6 – Контрольные точки для калибра кожуха

Номер точки	Описание	Ось	Допуск	Координата		
				X	Y	Z
1	2	3	4	5	6	7
Контрольные точки						
P01	Зазор между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	VG(Z)	$\pm 0,5$	-186,100	648,821	689,584
P02	Зазор между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	VG(Z)	$\pm 0,5$	-203,427	705,664	718,379
P03	Зазор между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	VG(Z)	$\pm 0,5$	-219,228	731,826	731,385
P04	Зазор между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	VG(Z)	$\pm 0,5$	-279,807	745,958	736,77
P05	Зазор между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	VG(Z)	$\pm 0,5$	-379,176	744,444	739,79
P06	Зазор между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	VG(Z)	$\pm 0,5$	-437,085	733,365	740,411
P07	Зазор между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	VG(Z)	$\pm 0,6$	-451,992	701,926	725,815

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7
P08	Зазор между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	VG(Z)	$\pm 0,6$	– 449,499	645,421	725,815
P09	Зазор между верхним кожухом рулевого колеса и панелью приборов	VG(Y)	$\pm 0,8$	– 451,326	659,45	705,393
P10	Зазор между верхним кожухом рулевого колеса и панелью приборов	VG(Y)	$\pm 0,8$	– 187,943	665,268	699,589
Базовые точки						
A01	Точка соединения между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	–	–	– 191,992	676,061	688,744
A02	Точка соединения между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	–	–	– 200,068	701,061	701,26
A03	Точка соединения между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	–	–	– 263,094	749,055	723,302
A04	Точка соединения между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	–	–	– 499,513	746,842	727,302
A05	Точка соединения между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	–	–	– 450,755	697,949	727,641
A06	Точка соединения между нижним и верхним кожухом рулевого колеса	–	–	– 449,956	670,414	709,103

После того как, были определены контрольные точки, мы можем сопоставить теоретические значения с параметрами физического образца. По каждой точке КИП проводит 30 замеров. Графики разброса отклонений от заданных координат этих точек изображены на рисунках 16-25.

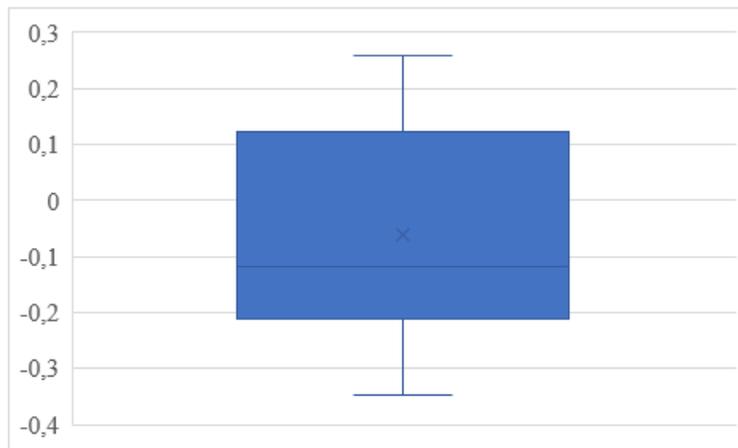


Рисунок 16 – Диапазон размаха точек PO1



Рисунок 17 – Диапазон размаха точек PO2

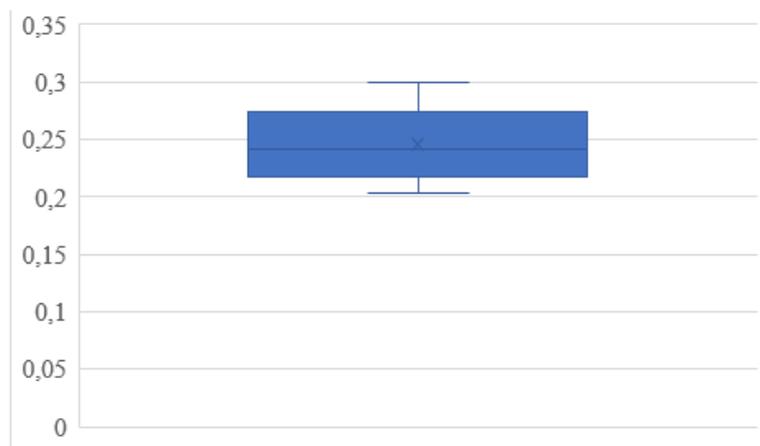


Рисунок 18 – Диапазон размаха точек PO3

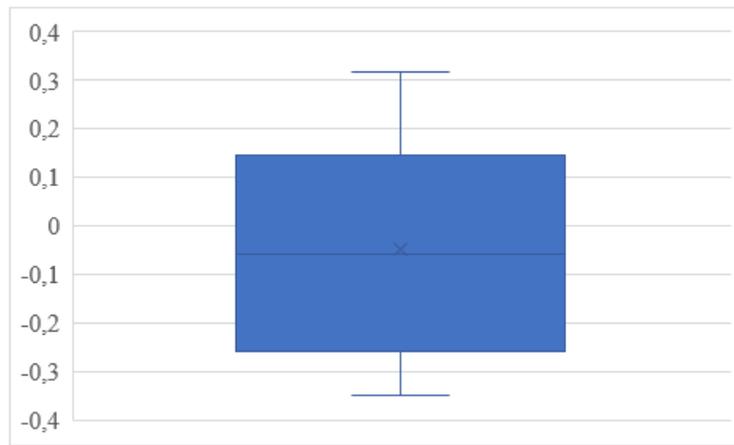


Рисунок 19 – Диапазон размаха точек PO4

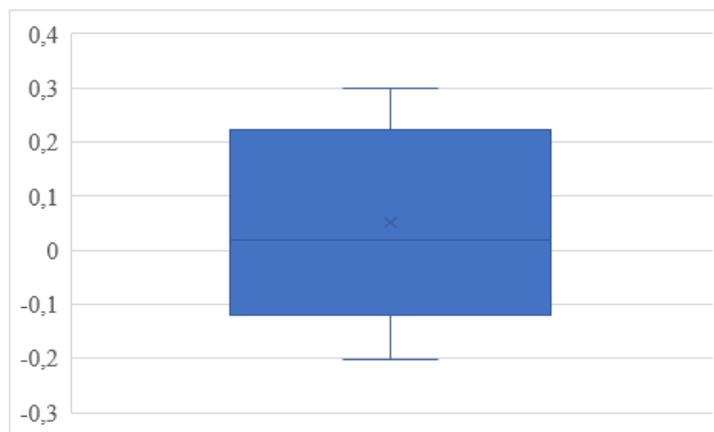


Рисунок 20 – Диапазон размаха точек PO5

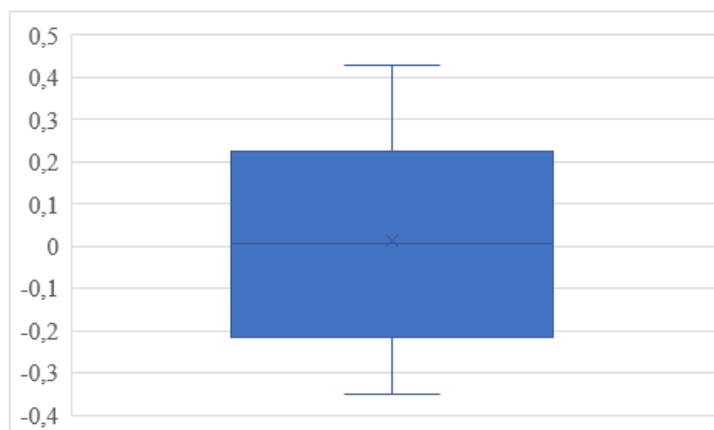


Рисунок 21 – Диапазон размаха точек PO6

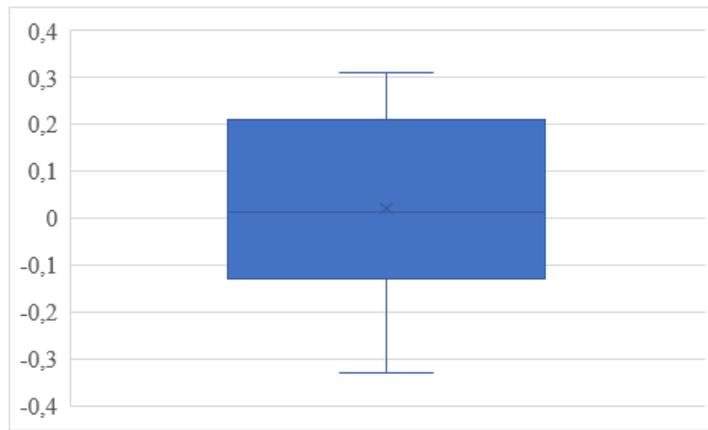


Рисунок 22 – Диапазон размаха точек PO7

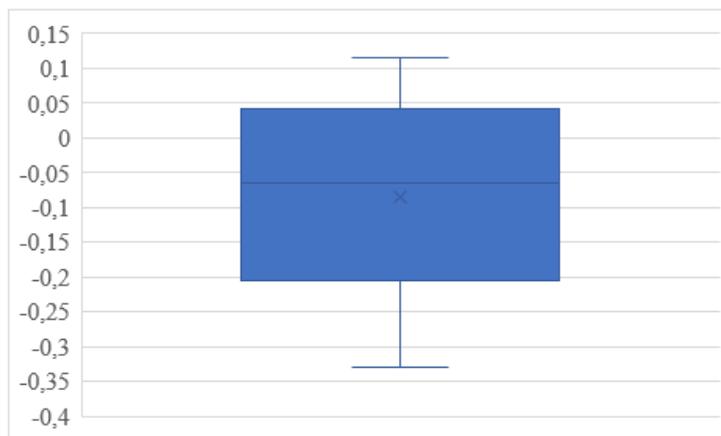


Рисунок 23 – Диапазон размаха точек PO8

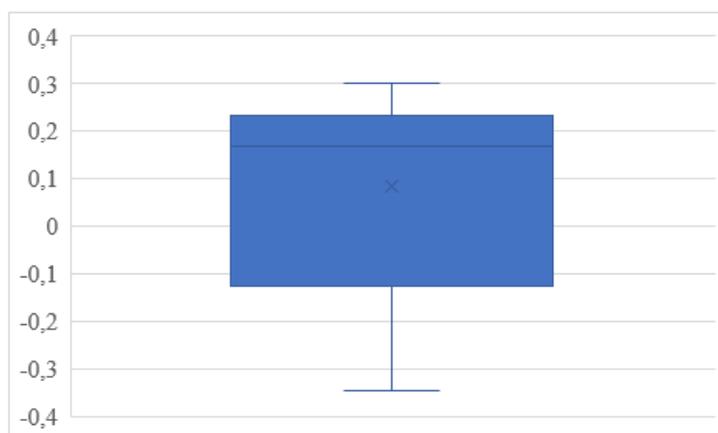


Рисунок 24 – Диапазон размаха точек PO9

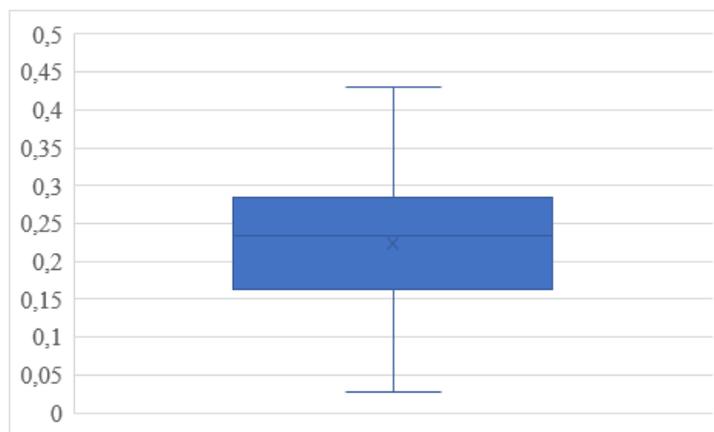


Рисунок 25 – Диапазон размаха точек P10

Данный тип диаграмм позволяет наглядно оценить результат измерения [15]. Как видно по диаграммам минимальные и максимальные значения координат, находятся в допустимом интервале. Здесь еще важно отметить, что выбросов данных тоже нет, что говорит о стабильности процесса измерения. Анализируя размах вариации и вылет «усов» можно сделать вывод, что распределение выборки относительно симметричное. При этом, если оценивать среднее значение и медиану, то в случае измерения зазора между нижним и верхним кожухом рулевого колеса в точке P01 (рисунок 16) присутствует небольшая асимметричность, тогда как при измерении зазора между верхним кожухом рулевого колеса и панелью приборов в точке P10 (рисунок 25) распределение можно назвать практически симметричным.

В целом видно, что все точки попадают в свои допуски. Далее будет подробно рассмотрен вопрос, насколько можно доверять полученным значениям.

3.3 Внедрение FMEA

Применение метода FMEA при анализе процесса измерения деталей необходимо для обеспечения высокого уровня качества, надежности и безопасности продукции. В производственных системах даже незначительные

отклонения на этапе измерений могут привести к серьезным последствиям – например, к выпуску несоответствующей продукции, дополнительным затратам на доработку или, в худшем случае, к отказам готовых изделий в эксплуатации.

Методика FMEA позволяет заранее определить потенциальные слабые места процесса, выявить, где могут возникнуть ошибки, будь то сбои оборудования, человеческий фактор или неправильно выбранные методы измерений [13]. Это особенно важно в условиях серийного или массового производства, где высокая повторяемость операций требует исключения любых источников нестабильности.

С помощью FMEA можно количественно оценить риски посредством расчета числа приоритета риска (RPN), что дает возможность расставить приоритеты и сконцентрировать усилия на наиболее критичных участках [19]. Внедрение этой методики также способствует улучшению взаимодействия между различными специалистами – технологами, инженерами, метрологами, так как работа над анализом ведется в формате многопрофильной команды. Для данного случая серьезность (таблица 7), частота возникновения (таблица 8) и трудность обнаружения эффекта (таблица 9) были определены компанией.

Таблица 7 – Шкала тяжести эффекта

Шкала	Эффект	Тяжесть эффекта
5	Катастрофический – Критический	Критическое влияние на точность измерений, приводящее к серьезным последствиям (RPN 101-200)
4	Серьезный – Значительный	Значительное влияние на точность измерений с заметными последствиями (RPN 51-100)
3	Умеренный – Важный	Умеренное влияние на точность измерений с управляемыми последствиями (RPN 26-50)
2	Незначительный – Малое влияние	Незначительное влияние на точность измерений с минимальными последствиями (RPN 11-25)
1	Пренебрежимо малый – без последствий	Пренебрежимо малое влияние на точность измерений, без последствий (RPN 1-10)

Таблица 8 – Шкала частоты возникновения

Шкала	Эффект	Частота возникновения эффекта
5	Очень высокая – Почти неизбежна	Отказ почти наверняка произойдет (O 8-10)
4	Высокая – Вероятна	Отказ, скорее всего, произойдет (O 5-7)
3	Умеренная – Случайная	Отказ может произойти время от времени (O 3-4)
2	Низкая – Редкая	Отказ случается редко (O 2)
1	Очень низкая – Почти никогда	Отказ практически никогда не случается (O 1)

Таблица 9 – Шкала обнаружения эффекта

Шкала	Эффект	Трудность обнаружения эффекта
5	Очень трудно – Почти невозможно	Очень трудно обнаружить отказ и предпринять корректирующие действия до его возникновения (D 8-10)
4	Трудно – Сложно	Сложно обнаружить отказ и предпринять корректирующие действия до его возникновения (D 5-7)
3	Умеренно – Возможно, но сложно	Умеренная возможность обнаружить отказ и предпринять корректирующие действия до его возникновения (D 3-4)
2	Легко – Вероятно	Легко обнаружить отказ и предпринять корректирующие действия до его возникновения (D 2)
1	Очень легко – Почти наверняка	Очень легко обнаружить отказ и предпринять корректирующие действия до его возникновения (D 1)

В конечном итоге, FMEA помогает снизить вероятность ошибок, сократить затраты на исправление дефектов, повысить удовлетворенность заказчиков и соответствовать международным стандартам качества, таким как ISO 9001 и IATF 16949.

3.4 Внедрение MSA

Разберем основные этапы MSA анализа.

Этап первый – подготовка и сбор данных.

Собрать данные измерений и убедиться, что они включают существенные вариации, таких как количество измерений и операторов. Данное исследование не предполагало дальнейшего обсуждения потенциального влияния внешних переменных, которые могли бы повлиять на результаты. Например, такие факторы, как изменения температуры, влажности или другие колебания в производственной среде, способные повлиять на точность измерений, также являются ограничением этого исследования [23].

Этап второй – анализ повторяемости и воспроизводимости (GRR).

Использовать технику GRR для оценки степени, в которой измерения могут быть повторены (повторяемость), и степени, в которой результаты согласуются у разных операторов (воспроизводимость). То есть необходимо рассчитать значение GRR для оценки производительности системы измерения.

Этап третий – использование полученных данных из расчетов MSA для графической иллюстрации.

Так как реализовать анализ MSA с помощью специализированного программного обеспечения, возможности не было, все расчеты будут производиться вручную, используя формулу GRR, упомянутую в проекте, для расчета значений GRR, EV, AV, PV и TV, и основанную на зависимостях (1) – (7).

EV (Equipment Variation) – показатель повторяемости, он указывает насколько одно и то же измерительное устройство даёт стабильные результаты при многократных измерениях одного и того же объекта и рассчитывается по формуле:

$$EV = \bar{R} \cdot K_1 \quad (1)$$

где \bar{R} – средний размах выборки измерений (он показывает, насколько сильно варьируются измерения одного и того же объекта, сделанные одним и тем же измерительным устройством, при одних и тех же условиях). Если есть

несколько подгрупп измерений, то $\bar{R} = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) / n$, где, R_1, R_2, \dots, R_n – размах (макс – мин) в каждой подгруппе, n – количество подгрупп.

K_1 – это константа повторяемости, зависящая от размера подгруппы (n), то есть от количества повторных измерений одного и того же объекта.

AV (Appraiser Variation) – воспроизводимость или вклад человеческого фактора в нестабильность измерений. Данный индикатор показывает, насколько сильно результаты зависят от того, кто проводит измерения и рассчитывается по формуле:

$$AV = \sqrt{(\bar{X}_{DIFF} \cdot K_2)} - \frac{EV^2}{n \cdot r} \quad (2)$$

где n – выборка деталей,

r – количество измерений.

\bar{X}_{DIFF} – среднее значение абсолютной разности между средними измерениями разных операторов.

K_2 – эмпирическая статистическая константа, зависящая от количества оценщиков (n) и количества измерений каждым из них (r).

Повторяемость и воспроизводимость (GRR) – это общая ошибка измерительной системы, которая включает в себя два основных компонента и рассчитывается по формуле:

$$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (3)$$

PV (Part Variation) – это стандартное отклонение между измеряемыми объектами, показывающее насколько сильно различаются сами детали или образцы, вне зависимости от того, кто и чем их измерял. Рассчитывается по формуле:

$$PV = R_p \cdot K_3 \quad (4)$$

где R_p – это размах средних значений по деталям, то есть разница между самой большой и самой маленькой средней величиной, полученной по каждой детали (или объекту измерения), независимо от оператора [25].

K_3 – это статистическая константа, которая зависит от количества деталей.

TV (Total Variation) – это общая вариация измеряемого процесса, которая объединяет GRR и PV и измеряется по формуле:

$$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2} \quad (5)$$

Проценты общей вариации рассчитываются по следующим формулам:

$$\%EV = 100 \cdot \frac{EV}{TV} \quad (6)$$

$$\%AV = 100 \cdot \frac{AV}{TV} \quad (7)$$

$$\%GRR = 100 \cdot \frac{GRR}{TV} \quad (8)$$

$$\%PV = 100 \cdot \frac{PV}{TV} \quad (9)$$

NDC (Number of Distinct Categories) – метрика, показывающая, сколько различных групп деталей система измерений может надежно различить с учетом вариаций процесса (PV) и погрешности измерений (GRR). Рассчитывается по формуле:

$$NDC = 1,41 \cdot \frac{PV}{GRR} \quad (10)$$

Этап четвертый – интерпретация результатов анализа.

Необходимо оценить результаты анализа MSA, чтобы определить,

может ли система измерения обеспечить надежные результаты. Если значения процент GRR и NDC соответствуют критериям в таблице 10, то система считается приемлемой [32]. В противном случае необходимо определить причину неопределенности и внести необходимые улучшения.

Таблица 10 – Пограничные значения процента GRR и NDC [16]

Значение	Описание
$GRR < 10 \%$	Приемлемая измерительная система. Измерительная система предоставляет надежную информацию о процессе.
$10 \% < GRR < 30 \%$	Условно приемлемая измерительная система. Может быть использована для некоторых приложений.
$GRR > 30 \%$	Неприемлемая измерительная система. Измерительная система не предоставляет надежной информации о процессе.
$NDC \geq 5$	Приемлемая измерительная система. Измерительная система предоставляет надежную информацию о процессе.
$2 \leq NDC \leq 4$	Общепринятая неприемлемая система для оценки параметров процесса, так как предоставляет только грубые оценки. Требуется замена оборудования на более точное.
$NDC = 1$	Неприемлемая измерительная система. Измерительная система не предоставляет надежной информации о процессе.

Ссылаясь на результаты улучшения, если вариация уменьшается, необходимо контролировать MSA, которую нужно измерять не реже одного раза в три месяца.

3.5 Интеграции FMEA и MSA

Интеграция анализа видов и последствий отказов (FMEA) и анализа измерительной системы (MSA) оказались ключевым подходом в решении и исправлении ошибок измерения в процессе производства кожуха. Эта интеграция направлена на систематическое определение потенциальных режимом отказов, оценки их влияния на процесс измерения и реализации надежных корректирующих действий с использованием информации, полученной из MSA. Ниже излагаются основные шаги и результаты этого

комплексного подхода.

Разберем определение видов отказов и расстановки приоритетов с помощью FMEA.

В первую очередь составляем и проводим анализ диаграммы Исикавы, изображенной на рисунке 26, для классификации видов отказов.

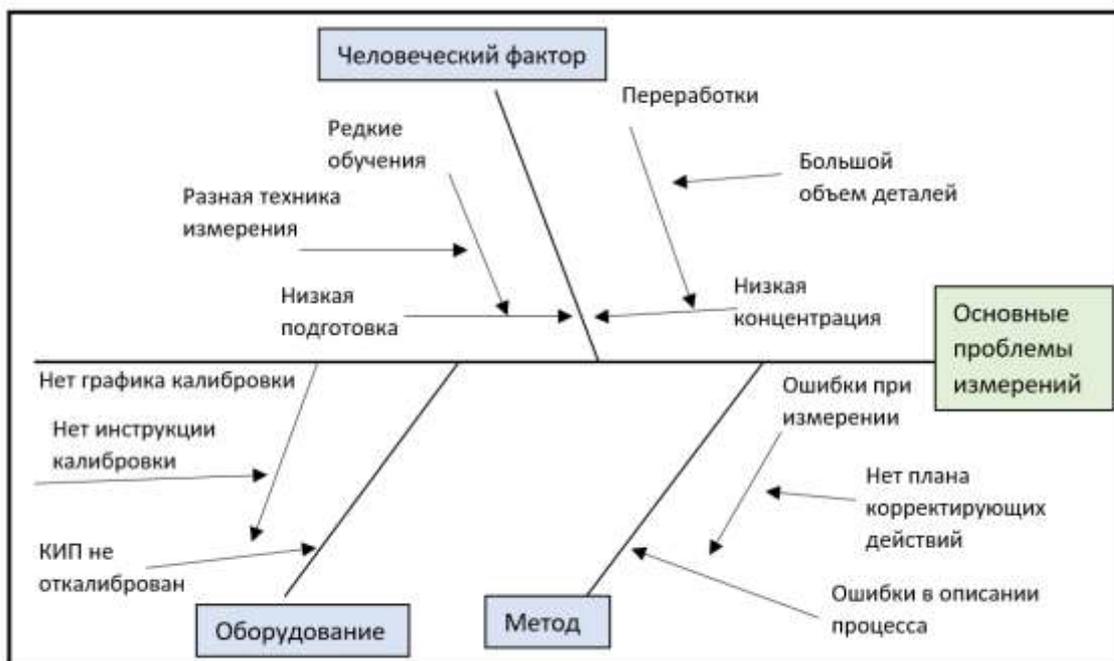


Рисунок 26 – Диаграмма Исикавы

Данная диаграмма отображает три основных фактора, влияющих на расхождения в измерениях. Как видно, это метод, оборудование и человеческий фактор.

После анализа причин отказов с использованием причинной диаграммы продолжаем определять значения серьезности, частоты возникновения и трудности обнаружения эффекта заинтересованными сторонами, такими как руководители групп, заказчики и операторы КИП.

Данные, собранные на основе наблюдений, сделанных в «полевых» условиях, мозгового штурма для определения значений серьезности, частоты возникновения и трудности обнаружения представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты оценки серьезности, частоты возникновения и обнаружения

Процесс	Тип дефекта	Проблема	S	O	D	RPN	Рекомендуемое действие	План действий
Измерение деталей	Различия в результатах измерений	Несоответствие процессу проведения замера	5	4	6	120	Провести тестирование с использованием метода MSA	Тестирование с 3 операторами, 6 точками, 3 повторения
		Измерительный инструмент не откалиброван	7	4	3	84	Назначить ответственного для обновления графика калибровки	График калибровки был записан ответственным лицом
		Операторы теряют концентрацию	3	4	3	36	Добавить операторов для проведения измерений	Добавить операторов по мере необходимости в отделе измерений

В таблице 12 представлены данные измерений до внесения корректирующих действий.

Таблица 12 – Данные измерений до улучшения

Оператор	Замер	Дельта координаты для каждой точки, мм					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	1	-0,184	-0,025	0,216	-0,166	-0,012	-0,151
	2	0,100	0,060	0,218	-0,230	0,271	0,224
	3	-0,079	0,042	0,279	-0,043	0,266	0,154
2	1	-0,211	-0,037	0,261	-0,351	-0,135	0,231
	2	-0,117	-0,035	0,250	-0,311	-0,031	0,039
	3	-0,330	-0,021	0,227	-0,286	0,141	0,312
3	1	0,056	-0,017	0,244	-0,212	0,300	-0,162
	2	-0,250	-0,028	0,230	-0,072	-0,131	-0,214
	3	-0,162	0,031	0,300	-0,340	0,123	0,238

В заключение проведём расчет числа приоритета риска (RPN): вычисляется RPN для каждого режима отказа, при этом несоответствие измерительного прибора в контрольном листе измерений выделяется как наиболее критичная проблема с RPN 120.

В данном случае RPN 120, поэтому он попадает в критическую категорию (таблица 10).

Выводы по разделу: в рамках данного раздела были определены факторы способствующие ошибкам измерения, такие как изменение размеров, уровень сложности и частота использования в производстве. Затем были выделены контрольные точки, которые влияют на форму детали, получены результаты замеров и поставлен основной вопрос данной работы: «Насколько можно доверять полученным значениям?». В заключение рассмотрели внедрение и интеграцию FMEA и MSA при проведении измерений в процессе производства верхнего кожуха рулевого вала.

4 Практическая реализация технологических решений

Для проведения оптимизации измерительной системы разобьем данные из таблицы 12 на три части, для каждого оператора КИП (таблицы 13-15). Используя эти данные, составим графики измерений для каждого оператора и сравним их усредненные значения (рисунки 27-29).

Таблица 13 – Результат замеров первого оператора

Точка	Замер 1	Замер 2	Замер 3	Размах (R)
P1	-0,184	0,100	-0,079	0,284
P2	-0,025	0,060	0,042	0,085
P3	0,216	0,218	0,279	0,063
P4	-0,166	-0,230	-0,043	0,187
P5	-0,012	0,271	0,266	0,283

Таблица 14 – Результат замеров второго оператора

Точка	Замер 1	Замер 2	Замер 3	Размах (R)
P1	-0,211	-0,117	-0,330	0,213
P2	-0,037	-0,035	-0,021	0,016
P3	0,261	0,250	0,227	0,034
P4	-0,351	-0,311	-0,286	0,065
P5	-0,135	-0,031	0,141	0,276
P6	0,231	0,039	0,312	0,273

Таблица 15 – Результат замеров третьего оператора

Точка	Замер 1	Замер 2	Замер 3	Размах (R)
P1	0,056	-0,250	-0,162	0,306
P2	-0,017	-0,028	0,031	0,059
P3	0,244	0,230	0,300	0,070
P4	-0,212	-0,072	-0,340	0,268
P5	0,300	-0,131	0,123	0,431
P6	-0,162	-0,214	0,238	0,452

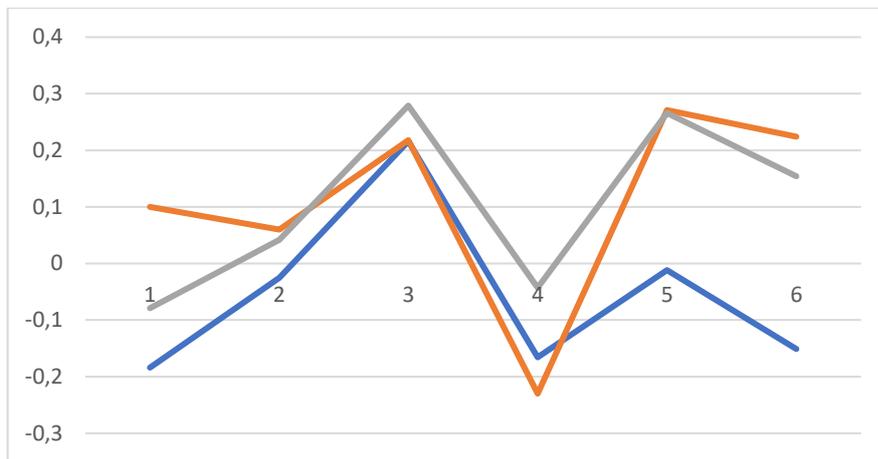


Рисунок 27 – Значения измерений первого оператора

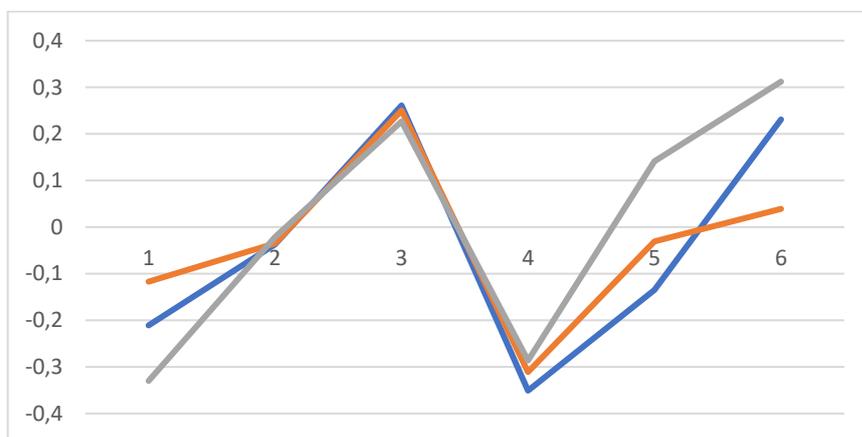


Рисунок 28 – Значения измерений второго оператора

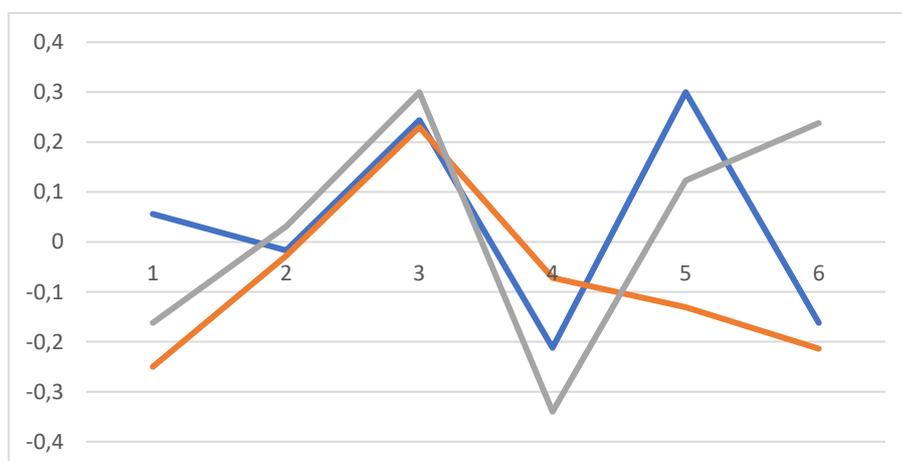


Рисунок 29 – Значения измерений третьего оператора

На рисунке 30 представлен сводный график средних значений по всем операторам.

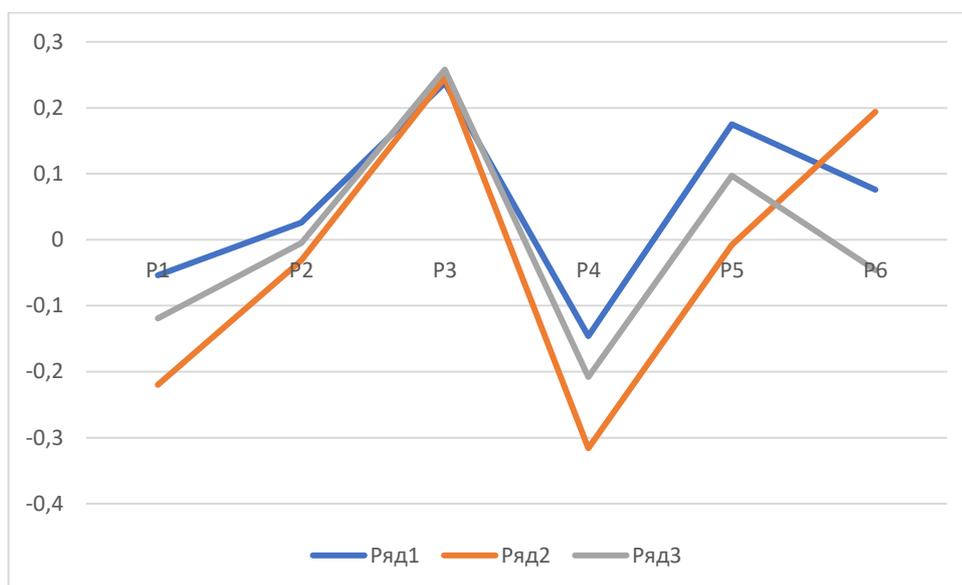


Рисунок 30 – Средние значения измерений, выполненных тремя операторами

Затем перейдем к вычислению размахов (R) для каждого оператора и каждой точки. Размах R для каждой точки – это разница между максимальным и минимальным значением дельт у одного оператора.

Константы, используемые для расчетов:

- $K_1 = 0,5908$, для $m = 3$ замеров;
- $K_2 = 3,65$, для $k = 3$ оценщиков;
- $K_3 = 1,45$, для $n = 6$ точек.

Шаг первый, вычисление средних дельт ($\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3$) для каждого оператора получается суммированием всех замеров для всех точек:

$$\bar{X}_1 = (-0,184 + 0,100 - 0,079) + (-0,025 + 0,060 + 0,042) + \dots + (-0,151 + 0,224 + 0,154)18 = 0,034$$

$$\bar{X}_2 = (-0,211 - 0,117 - 0,330) + (-0,037 - 0,035 - 0,021) + \dots + (0,231 + 0,039 + 0,312)18 = -0,015$$

$$\bar{X}_3 = (0,056 - 0,250 - 0,162) + (-0,017 - 0,028 + 0,031) + \dots + (-0,162 - 0,214 + 0,238)18 = -0,019$$

Шаг второй, вычисление среднего значения абсолютной разности между средними измерениями разных оценщиков \bar{X}_{DIFF} :

$$\bar{X}_{DIFF} = \max(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3) - \min(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3) = 0,034 - (-0,019) = 0,053$$

Вычисление среднего размаха (\bar{R}) для каждого оператора проводится по примеру из формулы (1):

Оператор 1:

$$R_1 = \max(-0,184; 0,100; -0,079) - \min(-0,184; 0,100; -0,079) = 0,100 - (-0,184) = 0,284$$

$$R_2 = \max(-0,025; 0,060; 0,042) - \min(-0,025; 0,060; 0,042) = 0,060 - (-0,025) = 0,085$$

Расчет размаха для остальных точек проводится аналогично.

Получаем средний размах:

$$\bar{R}_1 = 0,284 + 0,085 + \dots 6 = 0,420$$

Оператор 2: $\bar{R}_2 = 0,508$

Оператор 3: $\bar{R}_3 = 0,481$

Общий средний размах (\bar{R}):

$$\bar{R}_1 = 0,420 + 0,508 + 0,4813 = 0,470$$

Вычисление EV проводится по формуле (1):

$$EV = \bar{R}_1 \times K_1 = 0,470 \times 0,5908 \approx 0,278 \quad EV = R \times K1 = 0,470 \times 0,5908 \approx 0,278$$

Повторяемость (EV) показывает, насколько согласованы результаты, когда один и тот же оператор измеряет одну и ту же деталь несколько раз. Интерпретацию полученных значений представим в таблице 16.

Таблица 16 – Интерпретация значений EV

Оценка	Значение	Пояснение
хорошая повторяемость	$EV < 0,2$	малый разброс при повторных замерах
приемлемая повторяемость	$0,2 \leq EV \leq 0,3$	умеренный разброс, требует контроля
плохая повторяемость	$EV > 0,3$	высокий разброс, измерения ненадежны

В нашем случае: EV примерно равно 0,278, что близко к границе допустимого. Система измерений имеет заметный разброс при повторных замерах. В качестве возможных причин можно выделить следующие моменты:

- первое: нестабильность измерительного прибора (дрейф калибровки);
- второе: влияние внешних факторов (вибрация, температура);
- третье: субъективность оператора (если замеры ручные).

Исходя из выделенных причин, формируем рекомендации:

- проверить исправность оборудования;
- увеличить количество замеров для снижения случайной погрешности;
- автоматизировать процесс измерений (если возможно).

Воспроизводимость (AV) рассчитывается по формуле (2) и показывает, насколько согласованы результаты между разными операторами.

$$AV = \sqrt{(0,05 \cdot 3,65) - \frac{0,278^2}{3 \cdot 6}}$$

$$AV = \sqrt{0,193 - 0,0043}$$

$$AV = \sqrt{0,1887} \approx 0,434$$

Итоговый ответ: AV примерно равно 0,434. Интерпретацию полученных значений представим в таблице 17.

Таблица 17 – Интерпретация значений AV

Оценка	Значение	Пояснение
хорошая повторяемость	$AV < 0,3$	операторы получают близкие результаты
приемлемая повторяемость	$0,3 \leq EV \leq 0,5$	есть различия, но в пределах нормы
плохая повторяемость	$EV > 0,5$	близко к верхней границе допустимого

В нашем случае: $AV \approx 0,434$ (близко к верхней границе допустимого).

Операторы измеряют по-разному, что вносит дополнительную погрешность. Возможные причины:

- разная методика измерений, например, разное усилие приложено;

- нечеткие инструкции, как правильно фиксировать замер;
- влияние человеческого фактора, усталость, невнимательность.

Исходя из выделенных причин, формируем рекомендации:

- провести обучение операторов (унифицировать методику);
- ввести чек-лист или стандарт измерений;
- использовать измерительные шаблоны/фиксаторы для минимизации субъективности.

Вычисление общей изменчивости системы измерений (GRR) проводим по формуле (3):

$$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2} = \sqrt{0,2782^2 + 0,4342^2} = \sqrt{0,0773+0,1884} \approx 0,515$$

В итоге, GRR примерно равно 0,515.

Вычисление изменчивости процесса (PV) проводим по формуле (4). Для этого необходимо найти размах процесса и умножить его на константу K_3 .

Находим средние значения для каждой точки (по всем операторам и замерам):

$$\bar{X}P_1 = (-0,184+0,100-0,079-0,211-0,117-0,330+0,056-0,250-0,162) \cdot 9 \approx -0,131$$

$$\bar{X}P_2 = (-0,025+0,060+0,042-0,037-0,035-0,021-0,017-0,028+0,031) \cdot 9 \approx -0,003$$

$$\bar{X}P_3 = (0,216+0,218+0,279+0,261+0,250+0,227+0,244+0,230+0,300) \cdot 9 \approx 0,247$$

$$\bar{X}P_4 = (-0,166-0,230-0,043-0,351-0,311-0,286-0,212-0,072-0,340) \cdot 9 \approx -0,223$$

$$\bar{X}P_5 = (-0,012+0,271+0,266-0,135-0,031+0,141+0,300-0,131+0,123) \cdot 9 \approx 0,099$$

$$\bar{X}P_6 = (-0,151+0,224+0,154+0,231+0,039+0,312-0,162-0,214+0,238) \cdot 9 \approx 0,085$$

Размах значений замеров трех оценщиков представлен на рисунке 31.

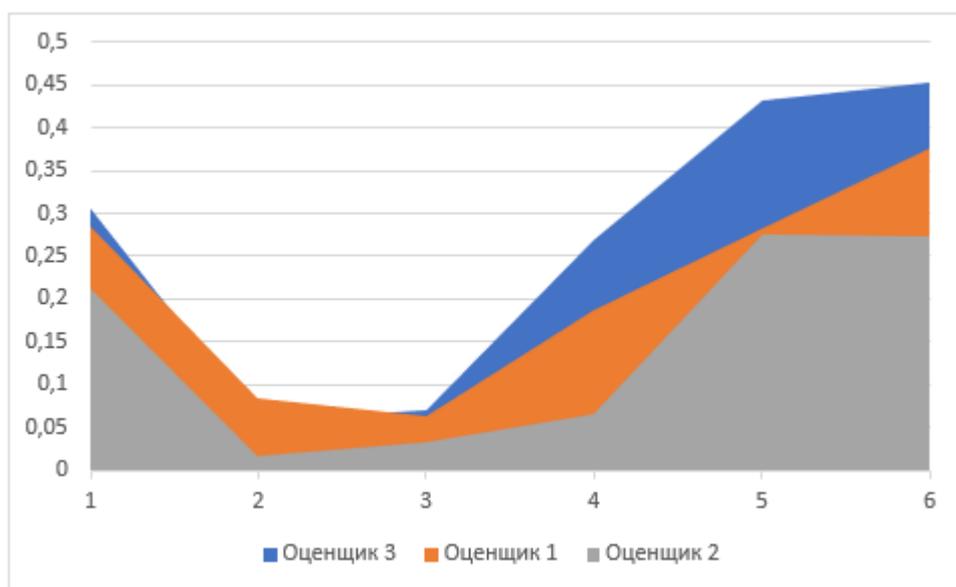


Рисунок 31 – Размах значений замеров трех оценщиков

Далее находим размах процесса (R_p):

$$R_p = \max(X^*P1, X^*P2, \dots, X^*P6) - \min(X^*P1, X^*P2, \dots, X^*P6)$$

$$R_p = \max(XP1, XP2, \dots, XP6) - \min(XP1, XP2, \dots, XP6)$$

$$R_p = 0,247 - (-0,223) = 0,470$$

Затем только вычисляем PV:

$$PV = R_p \cdot K3 = 0,470 \cdot 1,45 \approx 0,682$$

Значение TV рассчитаем по формуле (5):

$$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2} = \sqrt{0,515^2 + 0,682^2} = 0,855$$

Далее вычислим процент GRR по формуле (8):

$$\%GRR = 100 \cdot \frac{GRR}{TV} = 100 \cdot \frac{0,515}{0,855} = 60 \%$$

Для вычисления разрешающей способности системы измерений (NDC) воспользуемся формулой 10:

$$NDC = 1,41 \cdot \frac{PV}{GRR} = 1,41 \cdot \frac{0,682}{0,515} \approx 1,87$$

Однако NDC должен быть не менее 5, для приемлемой системы измерений. В данном случае $NDC = 1,87$ указывает на недостаточную разрешающую способность.

Возможные причины: высокая изменчивость измерений (GRR) или низкая изменчивость процесса (PV).

GRR (Gage R&R) – это общая изменчивость, связанная с системой измерений (включая повторяемость EV и воспроизводимость AV). Если GRR высокий, например, больше 30 % от общего разброса, это означает, что система измерений неточная, а именно имеется большой разброс при повторных замерах.

Возможные причины: плохая калибровка оборудования, нестабильность измерительного прибора, влияние человеческого фактора, например, разные оценщики по-разному интерпретируют результаты.

PV (Process Variation) – это естественный разброс процесса, если PV низкий, это означает, что процесс очень стабильный, то есть изделия почти не отличаются друг от друга.

Возможные причины: жесткий контроль качества, например, все детали изготавливаются с высокой точностью, узкие допуски.

Сочетание высокого GRR и низкого PV означает, что система измерений не способна различить естественные вариации процесса, потому что ее собственная погрешность (GRR) слишком велика по сравнению с PV. Это видно по низкому значению NDC равному 1,87.

Мы не можем быть уверены, что различия в данных вызваны реальными изменениями процесса, а не погрешностью измерений. Поэтому есть риск принятия неверных решений, например, провести корректировку процесса, когда на самом деле проблема в измерениях.

Рассмотрим пути решения.

Одним из путей может быть улучшение системы измерений: путем проверки калибровки оборудования, уменьшения влияния оператора, например, автоматизировать замеры, использовать более точные измерительные инструменты.

Одним из путей может быть пересмотр процесса: если процесс слишком «узкий» (низкий PV), возможно, стоит пересмотреть допуски, если PV

искусственно занижен, например, из-за предварительной сортировки, это может маскировать реальные проблемы.

Сведем полученные данные в таблицу 17.

Таблица 17 – Итоговая оценка

Параметр	Значение	Оценка	Рекомендации
EV	0,278	погранично	проверить оборудование, автоматизировать замеры
AV	0,434	высоковато	обучить операторов, стандартизировать методику
GRR	0,515	неприемлемо	требует срочного улучшения

Необходимо действовать в порядке приоритета: оборудование → операторы → методика.

Для приведения в соответствие необходимо следовать плану корректирующих действий, представленного на рисунке 32.



Рисунок 32 – План корректирующих действий

Таким образом, высокий GRR и низкий PV говорят о том, что система измерений непригодна для анализа данного процесса. Необходимо либо улучшить точность замеров, либо пересмотреть параметры процесса.

Проведем анализ полученных результатов.

Для начала определим и реализуем стратегии улучшения.

Ключевая инициатива по улучшению – внедрение тестирования с использованием метода MSA в качестве основного инструмента для устранения критического режима отказа. На основании данных, полученных в ходе исследования, были внесены изменения в измерительный процесс. Эти улучшения направлены на снижение показателя R&R (Repeatability & Reproducibility) датчика.

Для повышения качества и согласованности измерительной системы можно реализовать несколько ключевых инициатив по улучшению. Во-первых, критически важным шагом, который необходимо предпринять, является проведение полной калибровки измерительных приборов и установление строгого графика калибровки. Этот шаг обеспечит оптимальное состояние измерительного оборудования и высокую точность результатов.

Регулярная калибровка позволит своевременно выявлять отклонения в работе датчика, снижая риск погрешностей, связанных с заменой инструмента.

Кроме того, важным аспектом является обучение операторов.

Цель обучения – стандартизация навыков и подхода операторов для обеспечения единообразного понимания методик измерений. Повышение квалификации и выработка общего подхода позволят минимизировать погрешности измерений, вызванные субъективным фактором.

Добавление операторов для проверки качества и определения размеров также является стратегической инициативой.

Увеличивая количество операторов, можно эффективнее распределять рабочую нагрузку, предотвращая усталость, которая может повлиять на точность измерений.

Привлечение разных операторов позволяет учитывать разнообразный

опыт и подходы, что способствует формированию комплексной оценки качества и размеров.

Кроме того, усиление прозрачности и совершенствование документирования процессов калибровки и обучения позволит создать надежную базу данных. Эти улучшения не только обеспечат соответствие стандартам качества, но и создадут основу для непрерывного мониторинга и оптимизации процессов. Ожидается, что комплексная реализация данных инициатив приведет к значительному повышению точности измерительной системы, сокращению вариативности и улучшению точности измерений, в том числе, верхнего кожуха рулевого вала.

Далее была проведена валидация через тестирование. Проведено пост-улучшающее тестирование путём оптимизации измерительного процесса. Валидация через тестирование представляет собой ключевой этап комплексного подхода, объединяющего анализ видов и последствий отказов (FMEA) и анализ измерительных систем (MSA). В контексте процесса производства кожуха этот шаг включает оценку и валидацию предлагаемых улучшений путем внедрения выбранного метода MSA после определения критического режима отказа, связанного с несоответствием измерительного прибора. Данные, полученные после улучшения, снова были проанализированы с использованием MSA.

Для улучшения системы измерений до уровня когда $GRR < 10\%$ и $NDC > 5$ необходимо выполнить ряд шагов.

Уменьшить GRR (погрешность измерений) за счет повышения повторяемости (EV) – минимизации разброса при повторных замерах и повышения воспроизводимости (AV) – согласованности между операторами. Также, если допустимо, то увеличить PV (вариативность процесса). Результат оптимизации представлен в таблице 18 и на рисунках 33-36.

Таблица 18 – Данные измерений после оптимизации системы

Оператор	Замер	Дельта координаты для каждой точки, мм					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	1	-0,10	0,00	0,20	-0,15	0,05	-0,10
	2	-0,08	0,02	0,21	-0,16	0,06	-0,09
	3	-0,09	0,01	0,19	-0,14	0,04	-0,11
2	1	-0,11	0,01	0,21	-0,16	0,05	-0,09
	2	-0,10	0,00	0,20	-0,15	0,04	-0,10
	3	-0,09	0,02	0,22	-0,14	0,06	-0,08
3	1	-0,10	0,00	0,20	-0,15	0,05	-0,10
	2	-0,08	0,02	0,21	-0,16	0,06	-0,09
	3	-0,09	0,01	0,19	-0,14	0,04	-0,11

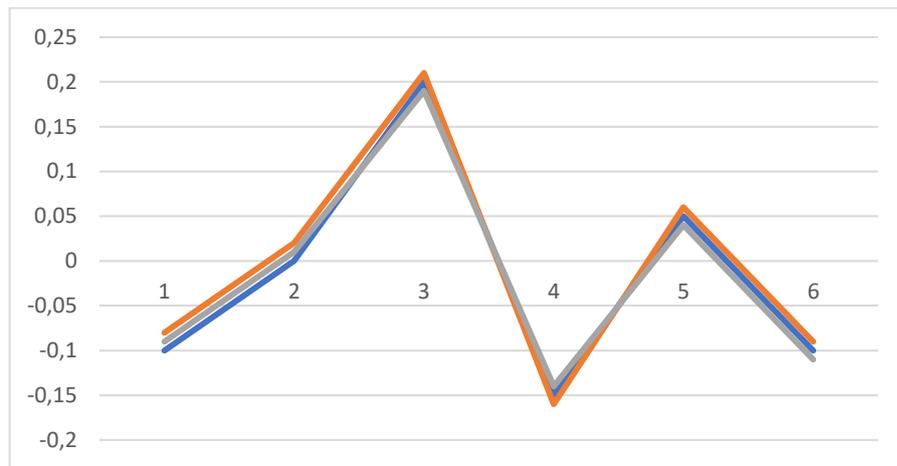


Рисунок 33 – Значения измерений первого оператора после оптимизации

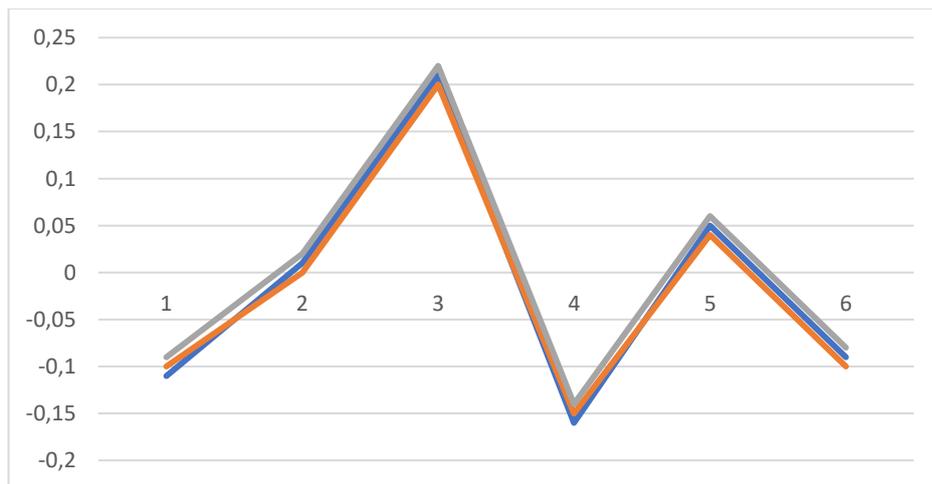


Рисунок 34 – Значения измерений второго оператора после оптимизации

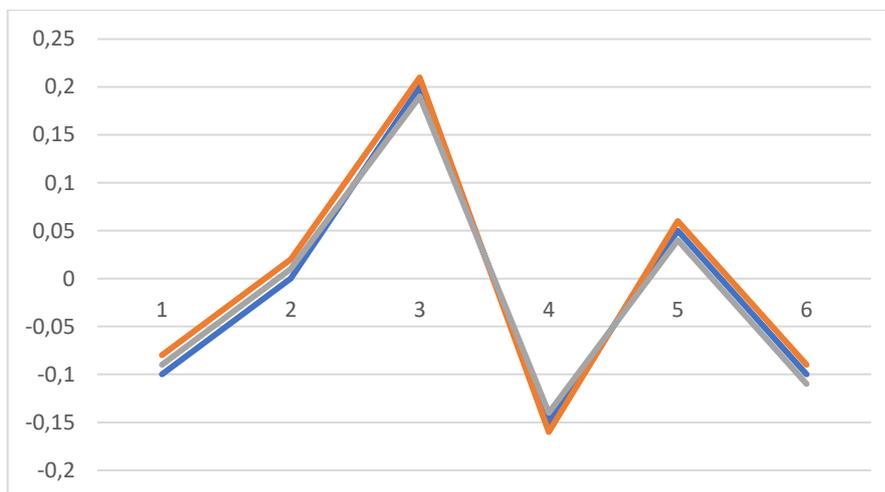


Рисунок 35 – Значения измерений третьего оператора после оптимизации

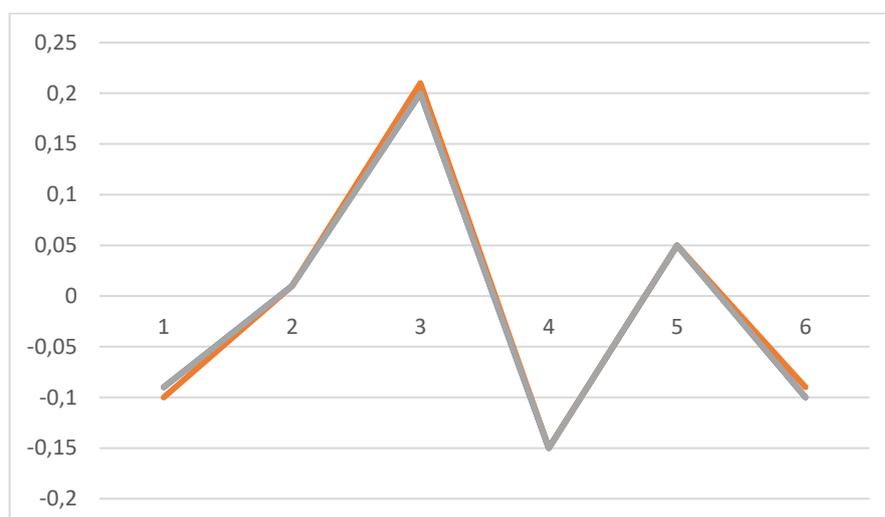


Рисунок 36 – Средние значения измерений, выполненных тремя операторами после оптимизации системы измерений

Проведем расчет новых данных.

Повторяемость (EV) рассчитаем по формуле (1):

Средний размах (\bar{R}) уменьшился (с 0,47 до 0,05).

$$EV = \bar{R} \cdot K1 = 0,05 \cdot 0,5908 \approx 0,03.$$

Воспроизводимость (AV) рассчитаем по формуле (2):

Разница усредненных значений у разных операторов стала близкой к нулю.

$AV \approx 0,01$ – пренебрежимо мала.

Повторяемость и воспроизводимость (GRR) рассчитаем по формуле (3):

$$GRR = EV^2 + AV^2 = 0,032 + 0,012 \approx 0,032$$

Вариативность процесса (PV) рассчитаем по формуле (4):

$$PV = Rp \cdot K3 = 0,3 \cdot 1,45 \approx 0,435 \text{ (при } Rp = 0,3)$$

Разрешающая способность системы измерений (NDC) рассчитаем по формуле (10):

$$NDC = 1,41 \cdot PV / GRR = 1,41 \cdot 0,435 / 0,032 \approx 19,2 > 5$$

Процент GRR рассчитаем по формуле (9):

$$GRR = 100 \cdot GRR^2 + PV^2 = 100 \cdot 0,032^2 + 0,435^2 \approx 7,3 \% < 10 \%$$

Таким образом, для достижения целевых показателей были реализованы следующие меры: снижение вариативности измерений за счёт уменьшения случайных погрешностей оборудования и стандартизация методики работы операторов.

Таблица 19 – Итоговые показатели

Параметр	Значение	Оценка	Рекомендации
NDC	19,2	Отлично (>> 5)	Система измерений имеет высокую разрешающую способность. Дополнительных действий не требуется.
GRR	7,3 %	Отлично (< 10 %)	Система измерений стабильна и пригодна для контроля процесса. Поддерживать текущие настройки.

Значение $NDC = 19,2$ существенно превышает минимальное требование ($NDC \geq 5$), что свидетельствует о высокой дискриминационной способности системы. На практике это означает, что система способна достоверно фиксировать даже незначительные изменения в технологическом процессе.

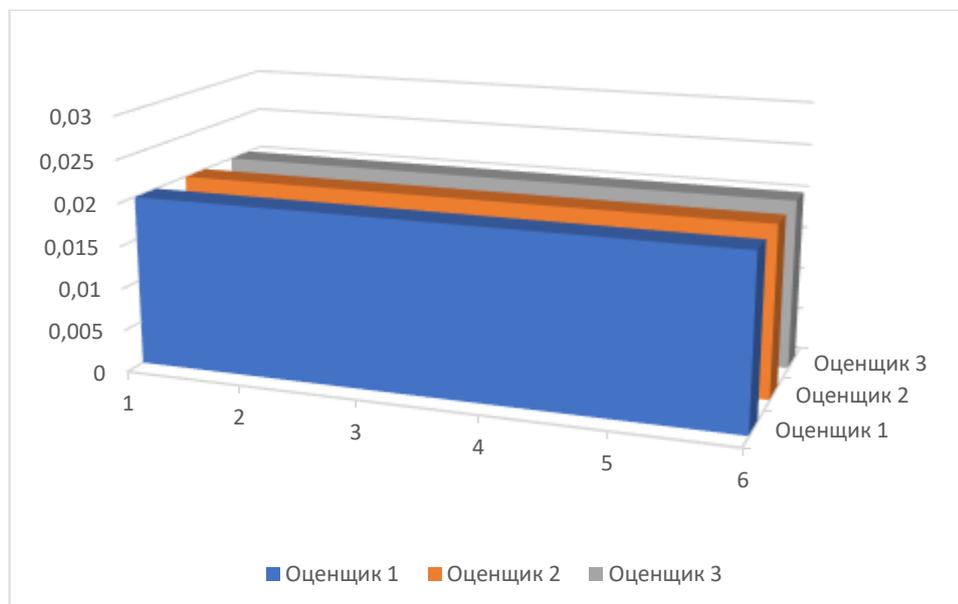


Рисунок 37 – Разброс результатов измерений трёх операторов

Процент $GRR = 7,3 \%$ также соответствует строгим критериям ($GRR < 10 \%$), а это, в свою очередь, свидетельствует о минимальной погрешности измерительной системы.

Для поддержания измерительной системы в таком состоянии необходимо:

- регулярно проводить калибровку оборудования (например, 3D-руки);
- контролировать условия измерения (температура, вибрации);
- если PV искусственно занижен (например, из-за сортировки деталей), пересмотреть методику отбора образцов.

Выводы по разделу: Анализ измерительной системы (MSA) после модернизации подтвердил повышение её рабочих характеристик. Улучшения были реализованы по трем направлениям: комплексная калибровка инструментов с автоматизированным контролем графика; программа обучения для унификации подходов операторов к измерениям; увеличение количества персонала для контроля параметров качества и геометрии кожуха с целью оптимизации рабочей нагрузки.

Одним из ключевых изменений стало внедрение системы комплексной

калибровки измерительного оборудования. Данная мера обеспечивает:

- стандартизацию точности всех измерительных приборов;
- единство результатов измерений на всех этапах контроля;
- поддержание оптимального состояния датчиков за счет строгого соблюдения регламента калибровок.

Проведенная оптимизация привела к заметному улучшению показателей повторяемости, обеспечив тем самым более высокую степень единообразия измерений.

Внедрение программы систематического обучения операторов направлено на стандартизацию измерительных методик и устранение субъективных расхождений. Анализ результатов демонстрирует:

- снижение компоненты воспроизводимости в системе R&R;
- повышение степени согласования между операторами;
- улучшение метрологических характеристик измерительного процесса.

5 Безопасность и экологичность объекта

5.1 Конструктивно-технологическая характеристика объекта

В таблице 20 приведены «данные по приемке первой годной партии для верхнего кожуха рулевого вала».

Таблица 20 – Краткое описание технологического процесса для определения верного статуса выпускаемой продукции

Технологический процесс	Технологическая операция, вид выполняемых работ	Наименование должности работника, выполняющего технологический процесс, операцию	Оборудование, техническое устройство, приспособление	Материалы вещества
Приемка первой годной партии	Ручной контроль/осмотр	Контролер	Контрольный образец внешнего вида, КИП	Полипропилен
Приемка первой годной партии	Автоматизированный контроль	Контролер	3D-рука	Полипропилен

В приведенной таблице указаны данные по анализируемой операции для верхнего кожуха рулевого вала» [1].

5.2 Идентификация профессиональных рисков

«В таблице 21 указаны возможные профессиональные риски, при выполнении контрольно-измерительных работ.

Указаны вид выполняемых работ и связанные с ним опасные и вредные производственные факторы, а также перечислены источники, которые могут стать причиной травмы.

Таблица 21 – Определение рисков

Производственно-технологическая операция, вид выполняемых работ	Опасный и/или вредный производственный фактор	Источник опасного и вредного производственного фактора
Ручной контроль	повышенные зрительные нагрузки, острые кромки, заусенцы на поверхности детали; динамические нагрузки, вызванные монотонностью	Кожух, шуп, калибр
Автоматизированный контроль	повышенные зрительные нагрузки; перенапряжение анализаторов	Кожух, 3D-рука, калибр

В приведенной таблице указаны возможные профессиональные риски, при выполнении контрольно-измерительных работ» [6].

5.3 Методы и технические средства снижения профессиональных рисков

«Результаты данного раздела приведены в таблице 22.

Таблица 22 – Мероприятия, направленные на снижение уровня опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ)

Вредный производственный фактор и/или опасный производственный фактор	Технические средства защиты, организационно-технические методы частичного снижения, полного устранения ОВПФ	Средства индивидуальной защиты
1	2	3
Острые кромки, заусенцы и шероховатость на поверхностях заготовок, инструментов;	Инструктажи по охране труда, удаление острых кромок и заусенцев на слесарных переходах	Перчатки с покрытием из полимера
Опасные и вредные производственные факторы, вызванные повышенной зрительной нагрузкой	Инструктажи по охране труда, соблюдение периодичности и продолжительности регламентированных перерывов	Защитные очки

Продолжение таблицы 22

1	2	3
Динамические нагрузки, вызванные монотонностью, перенапряжением анализаторов	Соблюдение периодичности и продолжительности регламентированных перерывов	–

В приведенной таблице указаны необходимые мероприятия для снижения профессиональных рисков» [5].

5.4 Обеспечение пожарной безопасности технического объекта

В таблицах 23-25 представлен комплекс мер по обеспечению пожарной безопасности технического объекта. «Пожару присваивается класс Е, так как электрический шкаф установки автоматизированного контроля под высоким напряжением, что может стать причиной возникновения пожара.

Таблица 23 – Идентификация классов и опасных факторов пожара

Производственный участок	Используемое оборудование	Номер пожара	Опасные факторы при пожаре	Сопутствующие факторы при пожаре
Участок приемки первой годной партии	калибр для закрепления, щупы и 3D-рука	Пожары класса Е	Неисправность электропроводки; пламя и искры; выделение ядовитых паров при сгорании легкоплавких веществ	Части объектов, разрушившихся при возгорании, распространение тока при повреждении проводки, вредные выбросы в атмосферу из очага пожара из-за повреждения защитных сооружений, отравление окружающей среды средствами ликвидации пожара

Таблица 24 – Выбор средства пожаротушения

Средства первичного пожаротушения	Средства мобильного пожаротушения	Установки стационарного пожаротушения и/или пожаротушение системы	Средства автоматики для пожаротушения	Оборудование для пожаротушения	СИЗ для спасения людей	Инструмент для пожаротушения (механизированный и немеханизированный)	Сигнализация, связь и оповещение при пожаре
Огнетушители, ящики с песком, пожарные краны	Пожарные лестницы	Пенная система тушения	Технические средства оповещения и управления эвакуацией	Напорные пожарные рукава и рукавные разветвления	Веревки и пожарные карабины, пожарные противоголозовые, респираторы	Лопаты, багры, ломы, топоры	Автоматические извещатели

Таблица 25 – Средства обеспечения пожарной безопасности

Название техпроцесса, применяемого оборудования, которое входит в состав технического объекта	Вид предлагаемых к реализации организационных и/или организационно-технических мероприятий	Нормативные требования по обеспечению пожарной безопасности, а также реализуемые эффекты
Приемка первой годной партии	Общее руководство и контроль за состоянием пожарной безопасности на предприятии.	Наличие пожарной сигнализации, автоматической системы пожаротушения, первичных средств пожаротушения, проведение пожарных инструктажей

В приведенных таблицах указан комплекс мер по обеспечению пожарной безопасности технического объекта» [1].

5.5 Обеспечение экологической безопасности рассматриваемого технического объекта

«Мероприятия по обеспечению экологической безопасности представлены в таблице 264.

Таблица 26 – Разработанные (дополнительные и/или альтернативные) организационные и технические мероприятия для снижения антропогенного негативного воздействия

Название технического объекта	Участок приемки первой годной партии
Предлагаемые мероприятия для снижения негативного антропогенного воздействия на атмосферу	Фильтрация в системе вентиляции
Предлагаемые мероприятия для снижения негативного антропогенного воздействия на гидросферу	Многоступенчатая очистка сточных вод
Предлагаемые мероприятия для снижения негативного антропогенного воздействия на литосферу	Разделение, сортировка мусора, утилизация отходов на полигонах

В приведенной таблице указаны результаты по анализу обеспечения экологической безопасности рассматриваемого технического объекта» [4].

«В разделе приведена характеристика рассматриваемого технического объекта: процесса приемки первой годной продукции верхнего кожуха рулевого вала. Рассматриваются ручная и автоматизированная операции. На данных операциях используются контролеры. В качестве приспособления для установки детали используется калибр.

Проведена идентификация профессиональных рисков, где на рассматриваемых контрольных операциях выявлены опасные и вредные факторы. В качестве источников выявлены контролируемый объект, а также средства контроля (ручного и автоматизированного).

Для устранения или снижения негативного воздействия опасных и вредных факторов предлагаются соответствующие методы и средства. Такие, как инструктажи по охране труда, а также соблюдение периодичности и продолжительности регламентированных перерывов (таблица 22).

Проведена идентификация классов и опасных факторов пожара для участка, где проводится входной контроль (таблица 23). Произведен выбор средств пожаротушения (таблица 24) и предложены организационные мероприятия по обеспечению пожарной безопасности технического объекта процесса приемки (таблица 25).

Предложены организационно-технические мероприятия по снижению негативного антропогенного воздействия заданного технического объекта на окружающую среду: атмосферу – оснащение системы вентиляции фильтрами, гидросферу – применение многоступенчатой системы очистки сточных вод и литосферу – разделение и сортировка отходов, а также утилизация отходов на специальных полигонах (таблица 26)» [1].

Выводы по разделу: выполнение данного раздела позволило выявить наиболее значимые опасные и вредные факторы, возникающие в процессе работы с контрольно-измерительными приспособлениями, разработать мероприятия по их устранению и снижению их влияния на работника. Рассмотрев опасные вредные производственные факторы производственного объекта, воздействие этого объекта на окружающую среду, можно сделать вывод о том, что проектируемый технический объект удовлетворяет необходимым нормам и не наносит сильного вреда человеку и окружающей среде.

Заключение

В работе проведена оптимизация контроля качества, где интеграция методов FMEA и MSA положительно повлияла на решение ключевой проблемы несоответствия приборов при RPN, равном 120. Анализ первопричин с использованием диаграммы Исикавы выявил три основных фактора: человеческий фактор, неисправности оборудования и методические недочеты. Первоначальный MSA-анализ показал, что значение повторяемости и воспроизводимости (GRR) датчика составило 85,5 %, что существенно превышало допустимый уровень. Целевые улучшения, включавшие калибровку датчиков, регулярное обслуживание, обучение операторов и увеличение штата контролёров, позволили снизить GRR до 7,3 %, обеспечив надежные измерения при приемлемом значении NDC, равном 17.

FMEA выявляет потенциальные сбои, оценивая их тяжесть, частоту возникновения и вероятность обнаружения, тогда как MSA анализирует и улучшает точность и воспроизводимость измерительных систем. В сочетании эти методы формируют надежную основу для устранения критических погрешностей измерений и повышения стабильности производства. Исследование подтверждает, что комплекс мер – включая полную калибровку оборудования, строгий контроль графика обслуживания и расширенное обучение персонала – позволяет трансформировать ненадежную измерительную систему в точную и стабильную, существенно улучшая качество и согласованность производства.

Таким образом, в рамках выполнения магистерской диссертации продемонстрировано:

- снижение компоненты воспроизводимости в системе R&R;
- повышение степени согласования между операторами;
- улучшение метрологических характеристик измерительного процесса.

Список используемых источников

1. Алексанян Г. А. Технологический процесс изготовления кожуха руля автомобиля LADA [Электронный ресурс]. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, Институт машиностроения, кафедра Оборудование и технологии машиностроительного производства, 2023. 51 с. Бакалаврская работа. Режим доступа: <http://hdl.handle.net/123456789/27774> (дата обращения: 22.06.2025).
2. Азаров В. Н. Интегрированные информационные системы управления качеством : учеб. для вузов. М. : Европ. центр по качеству, 2002. 63 с.
3. Всеобщее управление качеством = Total Quality Management (TQM) : учеб. для вузов. М. : Горячая линия-Телеком, 2001. 600 с.
4. Вумек Дж. Бережливое производство = Lean Thinking : Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании ; пер. с англ. [С. Турко]. 4-е изд. Москва : Альпина Бизнес Букс, 2008. 471 с.
5. Гарин В.М. Экология для технических вузов / Под общ. ред. В.М. Гарина. 2-е изд, доп. и перераб. Ростов на Дону: Феникс, 2003. 377 с.
6. Горина Л. Н. Обеспечение безопасных условий труда на производстве : учеб. пособие. Тольятти : ТГУ, 2016. 68 с.
7. Допуски и посадки : справочник. В 2 ч. Ч. 1 / В. Д. Мягков [и др.]. 6-е изд., перераб. и доп. Л. : Машиностроение, Ленингр. отделение, 1982. 543 с.
8. Расторгуев Д.А. Неметаллические материалы в машиностроении : практикум. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2019. 1 электронный оптический диск.
9. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т. 1. / Под ред. И.Н. Жестковой. 8-е изд., перераб. и доп. Москва.: Машиностроение, 2001. 920 с.: ил.
10. Стивенсон В. Дж. Управление производством = Production/operation management : учеб. пособие. Пер. с англ. под общ. ред. Ю. В. Шленова. Москва : БИНОМ : Лаб. Базовых Знаний, 2002. 927 с.
11. Строителев В. Н. Методы и средства измерений, испытаний и

контроля : учеб. для вузов. М. : Европ. центр по качеству, 2002. 150 с. : ил. (Управление качеством). Библиогр.: с. 150. Прил.: с. 115-149. ISBN 5 94768-023-8 : 180-00.

12. Технология машиностроения : специальная часть : учеб. для вузов. М. : Машиностроение, 1986. 480 с.

13. Akimoto Y. and Ollivier Y. Objective improvement in information-geometric optimization / in F. Neumann and K. DeJong, editors // Foundations of Genetic Algorithms XII (FOGA 2013) Australia: Adelaide. Pp. 124–133.

14. Arencibia R. V., Souza C. C., Costa H. L., Piratelli-Filho, A. Simplified model to estimate uncertainty in CMM. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2015. DOI: 10.1007/s40430-014-0157-8.

15. Braga I. C., Nedelcu A., & Udriou R. (2017). Risk Reduction in Dimension Inspection of Plastic Injection-Molded Parts Using Optical 3D Measuring Techniques. MATEC Web of Conferences, 94, 04001. DOI: 10.1051/mateconf/20179404001.

16. Cepova L., Kovacikova A., Cep, R., Klaput P., & Mizera O. Measurement System Analyses – Gauge Repeatability and Reproducibility Methods. Measurement Science Review, 18(1), 20–27. DOI: 10.1515/msr-2018-0004.

17. Gaška, A., Gaška, P., Gruza, M., & Sładek, J. (2018). Selection of Optimal Path Control Algorithms for Probe Heads Used on Five-Axis Measuring Systems. Applied Sciences, 8(12), 2455. DOI: 10.3390/app8122455.

18. Hassina G., & Salim B. (2018). Contribution to the Evaluation of Uncertainties of Measurement to the Data Processing Sequence of a CMM. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-66697-6-29.

19. Kuo C.-C., He T.-Y., & Lee C.-H. (2022). An Environmentally-Friendly Three-Dimensional Computer-Aided Verification Technique for Plastic Parts. Polymers, 14(2996). DOI: 10.3390/polym14152996.

20. Li C., Xu X., Liu S., & Ren Z. (2024). A Method for Measuring Shaft Diameter Based on Light Stripe Image Enhancement. Sensors, 24(303). DOI: 10.3390/s24010303.

21. Li Z., Liao W., Zhang L., Ren Y., Sun G., Sang Y. Feature-Model-Based In-Process Measurement of Machining Precision Using Computer Vision. *Applied Sciences*, 2024. DOI: 10.3390/app14146094.
22. Nafi A., & Mayer R. (2010). Identification of Scale and Squareness Errors on a CMM Using a Step Gauge Measured Based on the ASME 89.4.10360.2-2008 Standard. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, 38, 325–332.
23. Nee A. Y. *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology A*. Y. C. Nee. London : Springer Reference, 2015.
24. Nogueira V. V. E., Barca L. F., & Pimenta T. C. (2023). A Cost-Effective Method for Automatically Measuring Mechanical Parts Using Monocular Machine Vision. *Sensors*, 23(5994). DOI: 10.3390/s23135994.
25. Pahl G. Design for Minimum Cost. In: *Engineering Design*. Springer : London. 2007. p. 156.
26. Pavese F. (2008). About the Treatment of Systematic Effects in Metrology and Testing. IMEKO TC8 Conference Paper. DOI: www.researchgate.net/publication/273314086.
27. Pavese, F. (2013). Mathematical and Statistical Tools in Metrological Measurements. *EOLSS*, 6, 35–78. Retrieved from ResearchGate.
28. Ridler N., Lee B., Martens J., & Wong K. (2007). Measurement Uncertainty, Traceability, and the GUM. *IEEE Microwave Magazine*, 8(4), 44–57. DOI: 10.1109/MMM.2007.900114.
29. Technical Data Sheet Hostacom TRC 411N (Date: 26.02.2023) [Electronic resource]. URL: <https://clck.ru/3Mj7LS> (Дата обращения: 01.06.2023)
30. Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitt R., Delbressine F. Geometric error measurement and compensation of machines – An update. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.008.
31. Szemik K., & Bogacz P. (2017). Measurement System Analysis for One-Sided Tolerance. *ITM Web of Conferences*, 15, 05011. DOI:

10.1051/itmconf/20171505011.

32. Yu. V., Petrakov Visnik / Mechanical process control methods Žitomirskogo Deržavnogo Tehnologičnogo Unīversitetu: Tehnični Nauki. 2017; 2 (80 t. 2): 124–134.