

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»



На правах рукописи

**ВОРОБЬЕВ Алексей Владимирович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНСТРУКТОРСКОЙ  
ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН ПУТЕМ  
ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ АНАЛОГОВОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

**Специальность:** 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.  
Организация производства

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук,  
доцент Анцев А.В.

Тула – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН В ПРОЦЕССЕ КОНСТРУКТОРСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА .....	13
1.1 Современные подходы к обеспечению качества грузоподъемных машин .....	13
1.2 Анализ процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин .....	26
1.3 Основные подходы к повышению эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства .....	32
1.4 Методы прогнозирования долговечности элементов металлоконструкций грузоподъемных машин на стадии проектирования .....	39
1.5 Выводы .....	45
2 АНАЛОГОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН .....	48
2.1 Концепция повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин ....	48
2.2 Типизация конструкторских проектных решений грузоподъемных машин при аналоговом проектировании .....	54
2.3 Анализ надежности грузоподъемных машин на стадии конструкторской подготовки производства .....	62
2.4 Выводы .....	73
3 ПРАКТИЧЕСКАЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПРИНИМАЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ КОНСТРУКТОРСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ .....	75
3.1 Разработка базы данных грузоподъемных машин .....	75

3.2	Модель процесса аналогового проектирования грузоподъемных машин .....	78
3.3	Анализ требований потребителя к качеству грузоподъемных машин....	85
3.4	Выводы.....	96
4	ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	97
4.1	Комплекс научно-прикладных решений повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин .....	97
4.2	Информационная поддержка процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин .....	99
4.3	Практическое применение результатов работы на предприятиях.....	107
4.3.1	Практический пример анализа требований потребителя по критерию ресурсоемкости грузоподъемных машин для определения возможности выполнения заказа.....	107
4.3.2	Практический пример выбора из базы данных цифрового двойника-прототипа проектируемой грузоподъемной машины	108
4.4	Выводы.....	115
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	116
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	120
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	138
	ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	139
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	144
	ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	147

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы.* В настоящее время наблюдается устойчивое повышение спроса на грузоподъемные машины (ГПМ), выпускаемые предприятиями подъемно-транспортного машиностроения. Это обуславливает рост конкуренции, в условиях которой предприятиям необходимо постоянное повышение качества грузоподъемных машин и совершенствование методик и инструментария повышения эффективности и качества реализации всех стадий жизненного цикла ГПМ, в том числе процесса конструкторской подготовки производства.

При решении отмеченной задачи в настоящее время широко используются известные методы контроля качества и инструменты управления качеством, процессный подход и риск-менеджмент, стандартизация и унификация проектных решений, цифровизация производства, включая информационную поддержку процессов разработки продукции в виде CAD/CAE/CAM-систем, а также другие инструменты и методы. Их применение регламентируется соответствующими отечественными и международными стандартами, в том числе серий 9000 Системы менеджмента качества, 10303 Системы автоматизации производства и их интеграция, 15.000 Система разработки и постановки продукции на производство.

Однако темпы развития современных методик и инструментария повышения эффективности и качества конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин в настоящее время отстают от темпов цифровизации и интенсификации производства и не позволяют предприятиям подъемно-транспортного машиностроения оперативно реагировать на постоянно изменяющиеся требования рынка, что негативно сказывается на их конкурентоспособности. Одним из факторов, снижающих эффективность применяемых инструментов и подходов, является информационная насыщенность

систем менеджмента качества и CAD/CAE/CAM-систем. Конструктор, выбирая в процессе конструкторской подготовки производства аналог проектируемой грузоподъемной машины, затрачивает значительное время при проведении анализа большого количества имеющихся на предприятии проектных решений, представленных, в том числе, и в виде 3D-моделей и цифровых двойников. И хотя рост производительности современной вычислительной техники позволяет использовать на практике многие преимущества применения методов цифровизации производства в настоящее время ощущается недостаток производительности используемой вычислительной техники и только увеличение мощности вычислительных средств не может кардинально изменить ситуацию [65].

Отмеченные обстоятельства обуславливают необходимость дальнейшего развития современных инструментов и методов управления качеством ГПМ на всех стадиях их жизненного цикла, а также средств их информационной поддержки. Поэтому актуальной является научная задача совершенствования инструментария повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин в условиях цифровизации и интенсификации производства на основе аналогового проектирования. Решению данной задачи и посвящено выполненное диссертационное исследование.

***Степень разработанности темы.*** Решению задачи повышения эффективности и качества процесса проектирования изделий различного назначения посвятили свои исследования значительное количество отечественных и зарубежных авторов: Айдаров Д.В., Александров М.П., Амелина О.Ю., Амиров Ю.Д., Антипов Д.В., Анцев В.Ю., Баев В.Ю., Благовещенский Д.И., Бойцов Б.В., Васильев В.А., Васин С.А., Гавзов А.С., Гузненков В.Н., Гукало А.А., Захарчук И.И., Ивахненко А.Г., Кириловский В.В., Козловский В.Н., Куликов Ю.А., Куц В.В., Лагерев И.А., Лагерев А.В., Логинов А.Н., Макарова Л.В., Пантюхин О.В., Плахотникова Е.В., Репин А.Ю., Смоляный С.И., Сумцов А.В., Черепанов Н.В., Ямникова О.А., Blessing L., David M. Anderson, Yassine A. и другие. Анализ этих исследований показывает, что задача повышения

эффективности и качества процесса проектирования грузоподъемных машин на предприятиях подъемно-транспортного машиностроения не нашла окончательного решения и является актуальной до настоящего времени. Внедрение разработок, полученных при решении вышеуказанной задачи, позволит снизить себестоимость грузоподъемных машин и повысить их качество, сократить время подготовки производства, повысить эффективность и качество процесса конструкторской подготовки производства, рациональнее использовать имеющиеся ресурсную и конструкторскую базы.

**Целью исследования** является повышение эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин путем снижения его трудоемкости на основе информационной поддержки аналогового проектирования.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи исследования**:

1) на основе проведенного исследования состояния методологических принципов и инструментария в области управления качеством разработана концепция повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин;

2) выполнена практическая стандартизация принимаемых в процессе конструкторской подготовки производства проектных решений на основе базы данных цифровых двойников грузоподъемных машин и методики их квалиметрической оценки;

3) разработана методика анализа требований к грузоподъемным машинам, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости;

4) разработана методика анализа надежности грузоподъемных машин на стадии конструкторской подготовки производства;

5) разработана и внедрена на предприятии, выпускающем грузоподъемные машины, система информационной поддержки процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин.

**Объект исследования** – процесс конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин.

**Предмет исследования** – совершенствование методик и инструментария повышения эффективности процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин.

**Соответствие паспорту специальности** – содержание диссертации соответствует п. 3 «Научные основы и совершенствование методов стандартизации и менеджмента качества (контроль, управление, обеспечение, повышение, планирование качества) объектов и услуг на различных стадиях жизненного цикла продукции» паспорта научной специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

**Научная новизна** результатов исследования заключается в формализации взаимосвязей показателей качества грузоподъемной машины (ресурсоемкость, долговечность и уровень унификации) и ее основных технических характеристик на стадии конструкторской подготовки производства. Содержание научной новизны представлено следующими научными результатами:

1. Предложена концепция повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин, включающая практическую стандартизацию принимаемых в процессе конструкторской подготовки производства проектных решений на основе базы данных цифровых двойников грузоподъемных машин и управление взаимодействием между участниками процесса аналогового проектирования грузоподъемных машин на основе регрессионного анализа ресурсоемкости грузоподъемной машины.

2. Разработана методика квалитетической оценки близости (уровня унификации) цифровых двойников-аналогов проектируемой грузоподъемной машины, которая отличается от известных использованием сформулированного критерия близости цифрового двойника-аналога к проектируемой грузоподъемной машине по показателям качества ГПМ (коэффициента сходства).

3. Разработана методика анализа требований к грузоподъемным машинам, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости грузоподъемных

машин, отличающаяся от известных методик введением механизма самообучения путем учета информации о выпущенных предприятием грузоподъемных машинах и об индексах потребительских цен на товары и услуги по Российской Федерации.

4. Разработана методика анализа надежности грузоподъемных машин на стадии конструкторской подготовки производства для оценки способности грузоподъемной машины выполнить установленные требования по долговечности, которая отличается от известных учетом полученной с использованием метода конечных элементов зависимости наработки до отказа металлоконструкции грузоподъемных машин от относительной длины трещины в ее пространственных элементах при различных уровнях действующих нагрузок.

***Теоретическое значение результатов работы*** заключается в том, что разработана концепция повышения эффективности и качества конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин, которая углубляет и конкретизирует область применения управления качеством продукции, стандартизации, организации производства, как области науки и техники, в сфере решения задач создания грузоподъемных машин.

***Практическое значение результатов работы*** заключается в разработке комплекса научно-прикладных решений, обеспечивающих повышение эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин, включающего реляционную базу данных цифровых двойников грузоподъемных машин, обеспечивающую практическую стандартизацию принимаемых в процессе конструкторской подготовки производства проектных решений, и методическое и программное обеспечение системы информационной поддержки, реализующей концепцию повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин.

***Реализация работы.*** Результаты проведенных исследований внедрены в виде методики повышения эффективности конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин и реализующей ее системы информационной поддержки в ООО «Стройтехника» (г. Донской Тульской



области), ООО «ВМ Техникс» (г. Москва), ООО ИТЦ «Кран-сервис» (г. Тула) и используются при подготовке студентов по направлению «Наземные транспортно-технологические комплексы» в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

**Методология и методы диссертационного исследования.** При выполнении работы использовались научные положения всеобщего управления качеством, организации производства, надежности, методы структурно-функционального моделирования IDEF, регрессионного анализа, аналогового проектирования, механики разрушения, реляционной алгебры, а также обобщение опыта проектирования грузоподъемных машин на ряде машиностроительных предприятий Российской Федерации.

***Положения, выносимые на защиту:***

1. Концепция повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин.

2. Методика квалиметрической оценки близости цифровых двойников-аналогов проектируемой грузоподъемной машины.

3. Методика анализа требований к грузоподъемным машинам, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости грузоподъемных машин.

4. Методика анализа надежности грузоподъемных машин на стадии конструкторской подготовки производства для оценки способности грузоподъемной машины выполнить установленные требования по долговечности.

***Степень достоверности результатов.*** Достоверность полученных результатов обусловлена использованием фундаментальных теоретических положений, адекватностью разработанных математических моделей реальным процессам, совпадением авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по долговечности ГПМ, экспериментальным подтверждением точности экспресс-оценок ресурсоемкости грузоподъемных машин, а также использованием объективных исходных данных о конструкциях

грузоподъемных машин, полученных в результате заполнения базы данных цифровых двойников ГПМ сведениями о реально выпущенных предприятием подъемно-транспортного машиностроения кранах, положительными результатами практической реализации.

***Апробация результатов.*** По теме диссертации автором опубликована 21 работа (из них 5 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 статья в издании, индексируемом в информационно-аналитических системах научного цитирования Scopus и Web of Science).

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях профессорско-преподавательского состава ТулГУ в 2018-2023 гг., V Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Системы автоматизированного проектирования на транспорте» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.), XIX, XXIII Московских международных межвузовских научно-технических конференциях студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы» (г. Москва, 2015, 2019 гг.), Международных научно-технических конференциях «Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях» (г. Белгород, 2018, 2019 гг.), восемнадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством» (г. Москва, 2019 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Управление качеством в образовании и промышленности» (г. Севастополь, 2019 г.), 7-й Международной научно-технической конференции «Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем» (г. Курск, 2019 г.), I, IV Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении (г. Тула, 2019, 2023 гг.), Международной научно-технической конференции «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники» (г. Брянск, 2020 г.).

*Личный вклад соискателя* заключается в разработке концепции повышения эффективности и качества конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин; в разработке методики анализа требований к грузоподъемным машинам, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости грузоподъемных машин; в разработке методики квалиметрической оценки близости цифровых двойников-аналогов проектируемой грузоподъемной машины; в разработке методики анализа надежности грузоподъемных машин на стадии конструкторской подготовки производства; в создании базы данных цифровых двойников грузоподъемных машин; в разработке механизма повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин и реализующего его методического и программного обеспечения; апробации результатов исследования; подготовке публикаций по выполненной диссертационной работе.

Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве: [11] – разработана методика квалиметрической оценки близости цифрового двойника крана-аналога к проектируемому крану и способ определения численного значения коэффициента сходства; [10] – с использованием аппарата реляционной алгебры разработана модель процесса аналогового проектирования грузоподъемных машин; [15, 16, 18, 23, 43, 51] – разработаны регрессионные зависимости, описывающие взаимосвязи параметров качества и ресурсоемкости ГПМ; [41, 47] – разработаны механизм повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин и реализующее его методическое и программное обеспечение; [142] – разработана методика анализа надежности грузоподъемных машин на стадии конструкторской подготовки производства; [17, 20, 21] – создана база данных цифровых двойников ГПМ; [49] – разработана структурно-функциональная модель процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин на предприятиях подъемно-транспортного машиностроения.

***Структура и объем работы.*** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложения, содержит 88 страниц машинописного текста, 11 таблиц, 52 рисунка, список литературы из 150 наименований и приложения на 11 страницах. Общий объем диссертации составляет 149 страниц.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н. А.В. Анцеву за научные консультации при подготовке диссертационной работы, д.т.н. В.Ю. Анцеву за методическую помощь при подготовке диссертационной работы, сотрудникам кафедры «Транспортно-технологические машины и процессы» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» за помощь, поддержку, полезные замечания и предложения, высказанные в ходе обсуждения диссертационной работы, а также сотрудникам ООО «Стройтехника», ООО «ВМ Техникс» и ООО ИТЦ «Кран-сервис» за помощь при практической реализации результатов исследования.

# **1 МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН В ПРОЦЕССЕ КОНСТРУКТОРСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

## **1.1 Современные подходы к обеспечению качества грузоподъемных машин**

Грузоподъемные машины, относящиеся к машинам периодического действия, предназначены для перемещения грузов и людей по вертикали и передачи их из одной точки площади, обслуживаемой машиной, в другую. Ввиду большого разнообразия данных машин, их классифицируют по конструктивным признакам, назначению, характеру выполняемой ими работы [3]. Например, в работе [11] грузоподъемные краны классифицируются по следующим признакам (рисунок 1.1):

- по конструкции ходового устройства (рельсовые, железнодорожные, плавучие, шагающие, автомобильные, гусеничные, пневмоколесные, катковые, на специальном шасси);

- по возможности перемещения крана (передвижные, стационарные, самоподъемные, переставные, самоходные, прицепные);

- по конструкции (мостового типа: мостовые, козловые, полукозловые, краны-штабелеры, краны-перегрузатели; стрелового типа: башенные, стреловые, порталные, мачтовые, железнодорожные, консольные; кабельного типа: кабельные, кабельно-мостовые; краны-трубоукладчики; краны-манипуляторы);

- по типу привода (ручные, машинные: электрические, гидравлические, механические, комбинированные);

- по конструкции грузозахватного органа (крюковые, магнитные, грейферные, автоматические, мультимагнитные, мультотрейферные,

мульдозавалочные, штыревые, литейные, посадочные, ковочные, стрипперные (для разведения слитков), колодцевые, с траверсой, со специальным захватом);

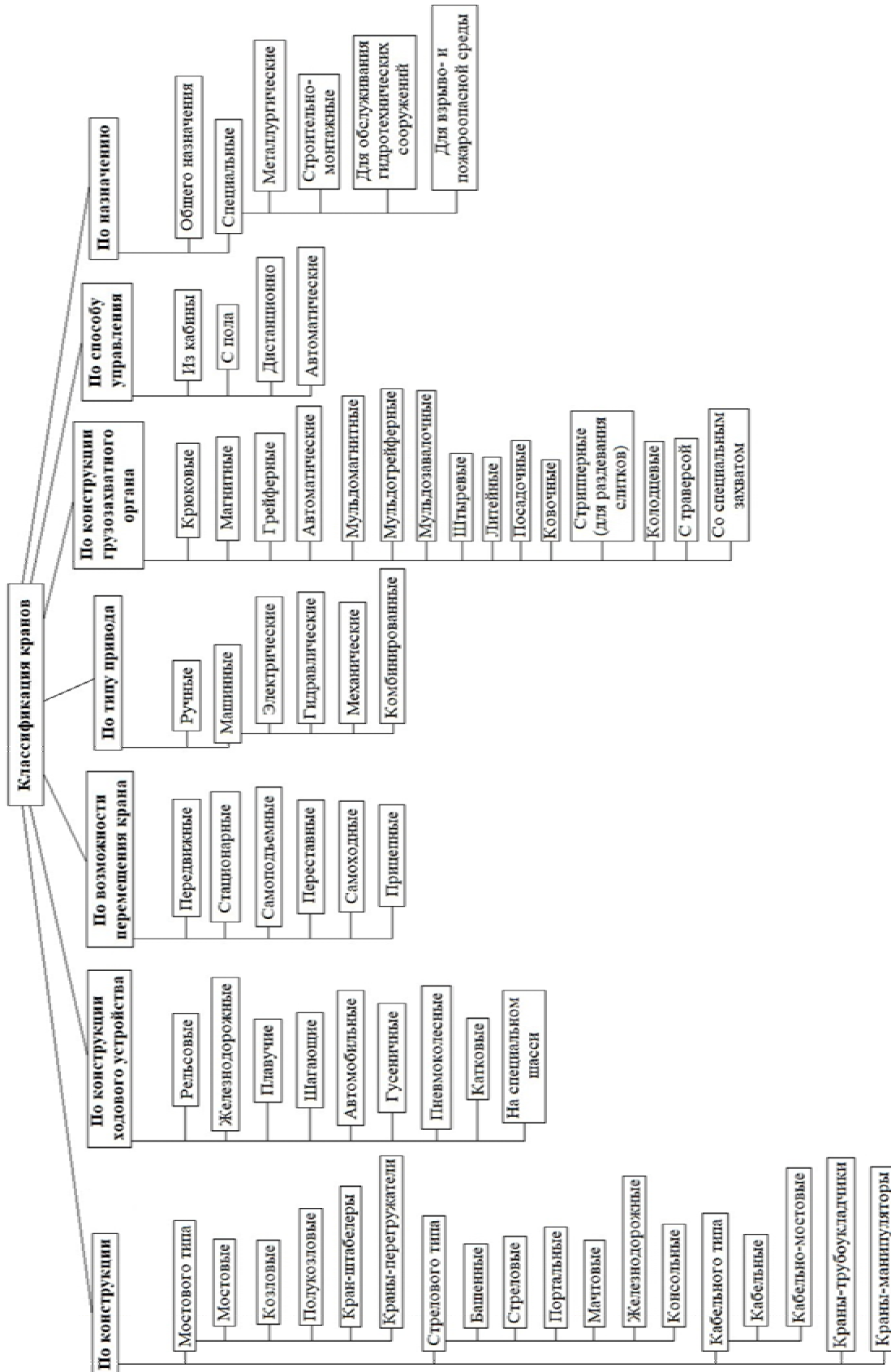


Рисунок 1.1 – Классификация грузоподъемных кранов

- по способу управления (из кабины, с пола, дистанционно, автоматические);

- по назначению (общего назначения, специальные: металлургические, строительно-монтажные, для обслуживания гидротехнических сооружений, для взрыво- и пожароопасной среды).

В данной работе основное внимание уделено кранам мостовым электрическим, которых, по данным Росстата, только в 2021-22 гг. в России было произведено 4741 шт.

Мостовой кран – это грузоподъемная машина, у которого захватное устройство расположено на передвижной тележке (либо тали), в свою очередь перемещающейся по мосту. Последний представляет собой подвижную конструкцию, выполненную из высокопрочной стали [96].

В работе [1] приведен перечень отечественных и зарубежных предприятий, выпускающих мостовые грузоподъемные краны: ООО «Сибкранэкс» (г. Москва), ОАО «Красногвардейский крановый» (Свердловская обл., п. Красногвардейский), ОАО «Магнитогорский крановый завод» (Челябинская обл., г. Магнитогорск), ОАО Бурейский крановый завод «Бурейя-кран» (Амурская обл., п. Новобурейский), ОАО ВО «Русский крановый завод» (Алтайский край, г. Барнаул), Самарский крановый завод (г. Самара), Уральский крановый завод (г. Челябинск), ОАО «Урюпинский крановый завод» (Волгоградская обл., г. Урюпинск), ОАО «Лемменс – Троицкий крановый завод» (Московская обл., п. Минзаг), ОАО «Набережночелнинский крановый завод» (Республика Татарстан, г. Набережные Челны), ООО «Ленинградский крановый завод - АСК» (г. Санкт-Петербург, п. Стрельна), ООО «Сухоложский крановый завод - Уралкран» (Свердловская обл., г. Сухой Лог), ООО «Уфимский краностроительный завод» (Республика Татарстан, г. Уфа), ООО «Уральская подъемно-транспортная компания» (Свердловская обл., Артемовский район, п. Красногвардейский), АО «НПО ВПТИ Тяжмаш» (г. Москва), Завод ПТО имени С.М. Кирова, Подъемтрансмаш (г. Санкт-Петербург), ОАО «149 механический завод» (г. Москва), «ОМЗ-КРАН» (г. Москва), ЗАО «Объединенные заводы подъемно-

транспортного оборудования» (Свердловская обл., р.п. Пышма), ОАО Гороховецкий завод ПТО "Элеватормельмаш" (Владимирская обл., г. Гороховец), «Комсомольский-на-Амуре завод подъемно-транспортного оборудования» (Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре), Акционерная компания «Балткран» (г. Калининград), АО «Сибтяжмаш» (Красноярский край, г. Красноярск), ООО «Бываловский машиностроительный завод» (Вологодская обл., г. Вологда), ООО «Стройтехника» (Тульская обл., г. Донской), ООО «Харьковский завод подъемно-транспортного оборудования» (Украина, Харьковская обл., г. Харьков), ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (Украина, Донецкая обл., г. Краматорск), Stahl CraneSystems GmbH (Германия), Demag Cranes&Components GmbH (Германия), SWF Krantechnik GmbH (Германия), Bonfanti crane (Италия), КИТО CRANES (Канада), J. Barnsley Cranes Limited (Великобритания), «Балканско ЕХО» ЕООД (Болгария), Austrian Crane Systems (Австрия), Ralf Teichmann, GmbH (Германия), Mechanik Taucha Foerdertechnik GmbH (Германия), Teichmann-Krane (Германия), Brunnhuber Krane GmbH (Германия), Konescranes (Финляндия), Verlinde (Франция) и др.

Мостовые краны можно классифицировать по многим параметрам. Количество балок в составе моста – один из основных [122]. Одну пролетную балку имеет однобалочный кран, две – двухбалочный. В зависимости от конструкции моста изменяется компоновка грузоподъемного устройства.

Еще один параметр, по которому различаются мостовые краны, – их расположение на подкрановых путях. Подобно локомотиву опорный кран перемещается по рельсам, под путями расположен подвесной кран и опирается на нижнюю полку двутаврового профиля, служащего подкрановыми путями [3, 122]. Как правило, однобалочные краны (или кран-балки) бывают подвесными. Крайне редкое явление – подвесной двухбалочный кран.

Сильно зависит от интенсивности эксплуатации в будущем конструкция мостового крана. Режимы работы кранов имеют обозначения от А0 до А11, согласно ГОСТ 34017-2016 [60]. В зависимости от этого рассчитываются



технические характеристики мостового крана, а также мощность металлоконструкции (концевых и пролетных балок).

Есть три способа, с помощью которых можно управлять мостовым краном: из кабины, радиоуправление и с помощью кабельного пульта. Часто комбинируют два способа управления на случай выхода из строя одного из них.

Для перемещения опорных кранов используются крановые пути – специальные крановые рельсы типа «КР» или железнодорожные рельсы типа «Р».

Также мостовые краны можно классифицировать по области применения и по конструкции грузозахватного органа.

В результате в [96] предложена следующая классификация мостовых кранов (рисунок 1.2).

Общее устройство мостового крана представлено на рисунке 1.3 [50, 96, 122].

Основными узлами и механизмами мостовых кранов являются [1, 3, 96, 122]:

- пролетное строение (мост), включающее пролетные и концевые балки (рисунок 1.4);

- рельсовый путь с упорами-ограничителями на концах для блокирования движения тележки (рисунок 1.3);

- грузовая тележка (рисунок 1.5);

- механизмы передвижения крана и грузовой тележки (рисунок 1.5);

- механизм подъема грузов (основной и вспомогательный) (рисунок 1.5);

- электрическая таль (тельфер) (рисунок 1.6);

- редукторы и мотор-редукторы (рисунки 1.7, 1.8);

- тормоза (механические, гидравлические или электромагнитные) (рисунок 1.9);

- ходовые колеса (рисунок 1.10);

- электродвигатели (рисунок 1.11);

- канатный барабан (рисунок 1.12);

- упругие муфты, соединяющие двигатель с редуктором (рисунок 1.13);

- крюковая подвеска (рисунки 1.3, 1.6);
- кабина (рисунок 1.14);
- захватные механизмы: ковш, магнит, грейфер, устройство для подъема контейнеров и т. д. (рисунок 1.15).

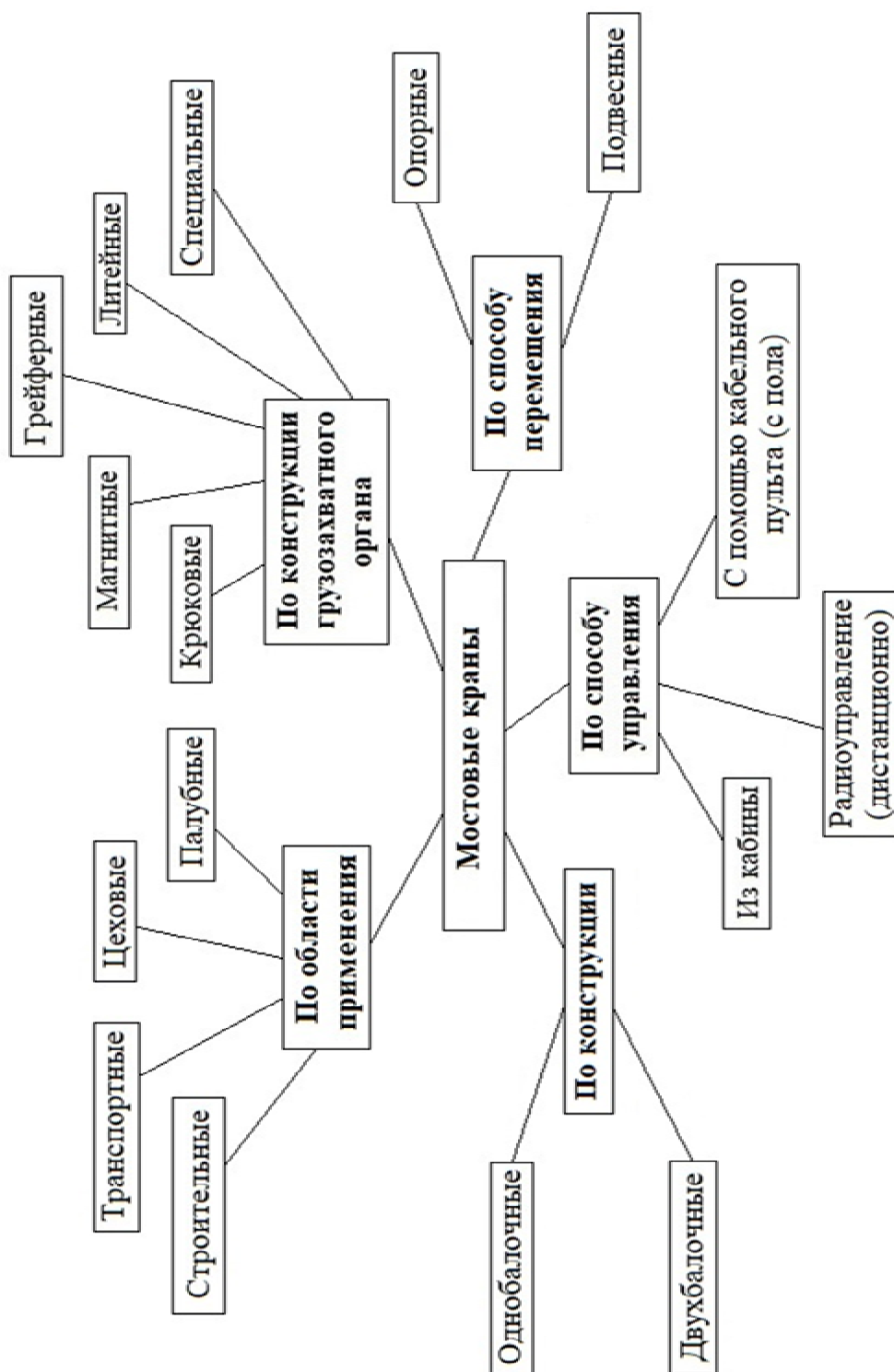


Рисунок 1.2 – Классификация мостовых кранов



Рисунок 1.3 – Общее устройство мостового крана



Рисунок 1.4 – Пролетное строение (мост) мостового крана





Рисунок 1.5 – Грузовая тележка мостового крана



Рисунок 1.6 – Электрическая таль (тельфер) мостового крана



Рисунок 1.7 – Крановый редуктор



Рисунок 1.8 – Мотор-редуктор передвижения крана



Рисунок 1.9 – Тормоз гидравлический





Рисунок 1.10 – Ходовые колеса



Рисунок 1.11 – Крановый электродвигатель



Рисунок 1.12 – Канатный барабан



Рисунок 1.13 – Упругая зубчатая муфта



Рисунок 1.14 – Кабина



Рисунок 1.15 – Многочелюстной грейфер

В процессе проектирования и производства мостовых кранов производители руководствуются техническим регламентом Таможенного Союза ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования», государственными стандартами:

1. ГОСТ 534-78 Краны мостовые опорные. Пролеты;
  2. ГОСТ 7075-80 Краны мостовые ручные опорные. Технические условия;
  3. ГОСТ ИСО 7752-5-95 Краны мостовые и козловые. Органы управления. Расположение и характеристики;
  4. ГОСТ 7890-93 Краны мостовые однобалочные подвесные. Технические условия;
  5. ГОСТ 22045-89 Краны мостовые электрические однобалочные опорные. Технические условия;
  6. ГОСТ 23121-78 Балки подкрановые стальные для мостовых электрических кранов общего назначения грузоподъемностью до 50 т. Технические условия;
  7. ГОСТ 23682-79 Колонны стальные ступенчатые для зданий с мостовыми электрическими кранами общего назначения грузоподъемностью до 50 т. Технические условия;
  8. ГОСТ 27584-88 Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия;
  9. ГОСТ 28434-90 Краны-штабелеры мостовые. Общие технические условия;
  10. ГОСТ 29321-92 Краны-штабелеры мостовые. Основы расчета;
- а также соответствующими стандартами на покраску, качество сварных соединений, характеристики металла и т. д.

Мостовой кран в соответствии с [6] можно рассматривать как техническую систему, так как он представляет собой многокомпонентное, структурно-организованное системное образование. Поэтому повышение качества мостовых кранов в соответствии с положениями системного подхода [40, 124] целесообразно достигать на основе использования блочных конструкций и



принципов унификации и стандартизации, что позволяет повысить как производственную, так и эксплуатационную технологичность кранов [1, 3].

Причем, как отмечается в [3], в настоящее время принцип унификации и стандартизации используется не только в механизмах, но и в металлоконструкциях грузоподъемных машин, что позволяет организовать серийное производство унифицированных сборочных единиц металлоконструкций с обеспечением возможности их взаимозаменяемости. При этом конструктор в процессе проектирования мостового крана выбирает соответствующие показателям качества заказа узлы и механизмы из каталогов или соответствующих баз данных и разрабатывает конструкторскую документацию только на базовый узел крана – пролетное строение. В результате краностроительное предприятие может, применяя необходимые готовые покупные узлы и механизмы, изготавливать широкую гамму мостовых кранов общепромышленного исполнения, каждый из которых в наибольшей степени соответствует требованиям конкретного потребителя [3]. При этом уменьшаются затраты на разработку оригинальных узлов мостовых кранов, сроки проектирования и ресурсоемкость выпускаемых изделий при обеспечении установленного потребителем уровня качества. Использование блочно-модульных конструкций позволяет максимально унифицировать структуру мостовых кранов с различными весовыми, энергетическими и массогабаритными характеристиками [3].

Разработке и совершенствованию методов обеспечения и управления качеством машиностроительной продукции, включая грузоподъемные машины, на различных стадиях их жизненного цикла посвящены многочисленные отечественные и зарубежные исследования [6, 33, 53, 77, 97, 125, 148 и др.], в которых представлены современные подходы и методы решения проблемы качества продукции.

Повышение уровня качества продукции и преемственности конструктивных и технологических решений на стадии проектирования достигается на основе классификации и группирования изделий по однородным конструктивно-

технологическим признакам. Это создает благоприятные условия для разработки и применения типовых групп деталей и сборочных единиц. При наличии на предприятиях готовых типовых решений в несколько раз сокращается цикл технологического проектирования, которое по основным элементам конструкции совмещается со стадиями проектирования изделий [86, 99, 125]. При производстве грузоподъемных машин выделяются типовые решения по выбору компоновочных схем, узлов и сборочных единиц, комплектующих изделий, к которым относятся электродвигатели, редукторы, тормоза и т. п. При проектировании сложного технического объекта, которым является грузоподъемная машина, приходится соизмерять сроки разработки и освоения его составных частей друг с другом и с объектом в целом. Согласованность сроков промышленного освоения составных комплектующих частей изделия и сроков постановки изделия на производство – один из важных факторов, который следует учитывать при организации конструкторской работы [6, 22, 75].

При выполнении конструкторской разработки, особенно на начальных стадиях конструкторско-технологической подготовки производства, возникает необходимость выявления и сравнительной оценки качества нескольких исполнений, сходных по выполняемым функциям. Проявление принципа предпочтительности заключается в отборе из множества возможных инженерно-технических решений тех, которые в технико-экономическом и социальном отношении представляются наиболее соответствующими требованиям к ГПМ, установленным потребителем [140].

## **1.2 Анализ процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин**

Жизненный цикл любой продукции, в том числе и грузоподъемных машин, включает в себя следующие стадии [97]:

- 1) маркетинг, поиски и изучение рынка;

- 2) проектирование и разработка технических требований, разработка продукции;
- 3) материально-техническое снабжение;
- 4) подготовка и разработка производственных процессов;
- 5) производство;
- 6) контроль, проведение испытаний и обследований;
- 7) упаковка и хранение;
- 8) реализация и распределение продукции;
- 9) монтаж и эксплуатация;
- 10) техническая помощь и обслуживание;
- 11) утилизация после использования.

Процесс изготовления современных машин и приборов осложняется постоянным ростом их номенклатуры с одновременным уменьшением объема производства, повышением требований к качеству и значительным сокращением сроков выпуска [112]. В этой связи характерной особенностью современного производства является необходимость сокращения длительности цикла выполнения заказа на создание продукции [55, 123]. При этом современные промышленные предприятия, в том числе предприятия кранового машиностроения, работающие в условиях цифровизации и интенсификации производства, постоянно растущих темпов обновления объектов производства и увеличения их номенклатуры, стараются достичь сокращения длительности цикла выполнения заказа на создание продукции за счет стадии «проектирование и разработка технических требований, разработка продукции», в ходе которой, в том числе, происходит и конструкторская подготовка производства [133].

В результате увеличивается неопределенность процесса конструкторской подготовки производства, повышающая риск снижения его эффективности и качества, и возрастает потребность в учете фактора преемственности проектных решений, как обязательного условия уменьшения их неопределенности, существенного сокращения сроков проведения и максимально возможного совмещения конструкторских работ во времени [6]. Указанные обстоятельства в

качестве цели ставят перед процессом конструкторской подготовки производства необходимость достижения в минимально допустимые сроки количественной и качественной определенности ГПМ в соответствии с потребностями всех заинтересованных сторон и с учетом ресурсных и других ограничений [6]. Поэтому предприятиям подъемно-транспортного машиностроения необходимо постоянно совершенствовать методики и инструментарий повышения эффективности и качества конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин для снижения трудоемкости проектно-конструкторских работ и повышения качества обслуживания потребителей [76, 104].

Конструкторская подготовка производства представляет собой совокупность процессов и работ, направленных на разработку конструкторской документации для серийного изготовления новых и совершенствования выпускаемых изделий, в ходе которой обеспечивается качество продукции, обусловленное проектированием [98]. Поэтому решение задачи повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин следует производить в соответствии с рекомендациями стандарта ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [62] и принципами процессного подхода [108] и риск-менеджмента. В процессе конструкторской подготовки производства ГПМ осуществляется проработка конструкции, соответствующей установленным потребителем показателям качества, и разработка комплекта конструкторской документации, соответствующей требованиям Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) [69]. Система ЕСКД представляет собой комплекс государственных стандартов, устанавливающих требования к разработке, оформлению и обращению конструкторской документации, разрабатываемой для соответствующих стадий жизненного цикла продукции.

В состав конструкторской документации входят следующие документы [27]:

- техническое задание;
- техническое предложение;
- технический и эскизный проекты;

- текстовые документы: пояснительные записки, технические описания, инструкции по эксплуатации, технические условия;
- ведомости и спецификации;
- чертежи сборочные, общих видов, габаритные и монтажные; чертежи деталей;
- карты технического уровня и качества продукции;
- схемы.

Значимость качественной реализации конструкторской подготовки производства среди других стадий жизненного цикла грузоподъемной машины обусловлена тем, что в соответствии с [27], несоответствия, внесенные в ходе конструкторской подготовки производства и других стадий подготовки производства и изготовления изделия, в разной мере ухудшают качество грузоподъемной машины. Это обусловлено тем, что чем раньше внесено несоответствие, тем труднее его выявить и тем больший ущерб оно несет, так как в соответствии с правилом десятикратных затрат цена ошибки, не выявленной на текущей стадии жизненного цикла, возрастает на следующей в 10 раз [27, 97, 140].

Особенностью конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин, как отмечается в [133], является ее реализация в тесном взаимодействии с потребителями, в ходе которого выявляются в частности, их требования к качеству продукции, в том числе специальные [9]. Для перевода требований заказчика на язык конкретных технических характеристик, определения возможности их достижения и создания именно той грузоподъемной машины, которая необходима заказчику, в работе [133] предлагается использование технологии развертывания функций качества QFD. В результате его применения автором [133] построен «домик качества» для случая проектирования и производства мостовых кранов (рисунок 1.16). На основе «домика качества» можно выстроить и систему обратной связи по качеству конструкторской документации между разработчиком и изготовителем продукции. Например, в работе [31] сформированы требования к обратной связи по качеству

конструкторской документации и описан метод построения процесса обратной связи в единой цифровой среде между разработчиком и изготовителем авиационной техники.

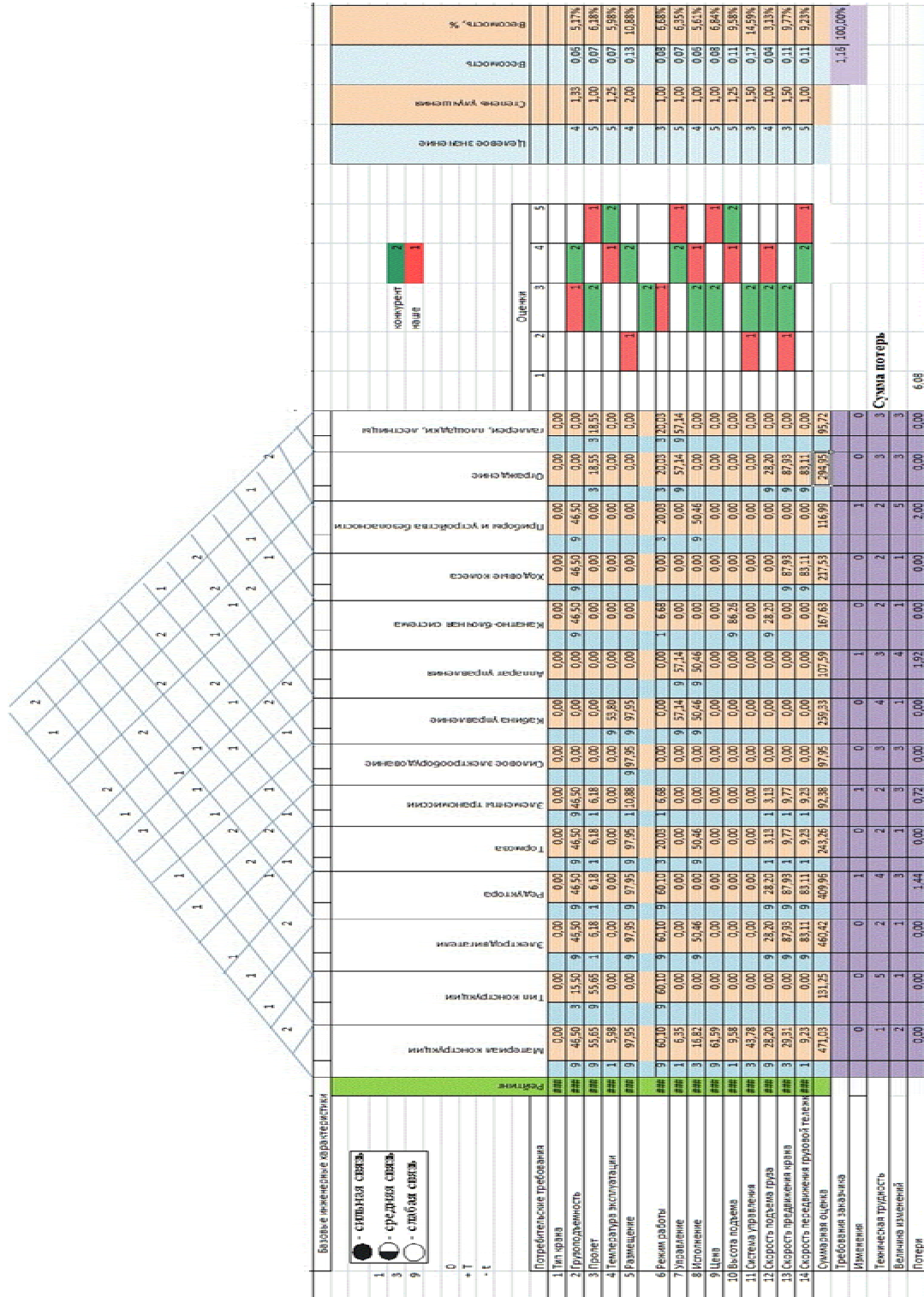


Рисунок 1.16 – «Домик качества» при проектировании и производстве мостовых кранов

В процессе подготовки производства грузоподъемных машин в соответствии с требованиями потребителя происходит соответствующее взаимодействие между потребителем и маркетинговой службой предприятия, описанное в работе [133]. При этом отмечается, что перед конструкторской службой предприятия в процессе конструкторской подготовки производства ставятся две основные задачи:

– анализ требований к ГПМ, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости в ходе взаимодействия маркетинговой и конструкторской служб предприятия;

– проектирование конструкторской службой предприятия ГПМ в соответствии с заключенным контрактом за время, позволяющее предприятию изготовить и поставить потребителю грузоподъемную машину заданного качества и в сроки, установленные контрактом.

Для решения первой задачи с целью качественного анализа и идентификации требований потребителя в настоящее время применяются технология развертывания функций качества QFD и регрессионный анализ, позволяющий получить уравнения взаимосвязи показателей качества и ресурсоемкости ГПМ, включая трудоемкость [2, 34, 67, 82, 134, 135, 139 и др.], материалоемкость [4, 38, 78, 94, 110 и др.] и себестоимость изготовления изделия [28, 70, 72, 90, 102 и др.]. Причем в работе [102] для прогноза себестоимости нового продукта (проектной себестоимости) предлагается использовать методологию теории подобия. Однако, в представленных работах не найдено окончательного решения разработки методики оперативной экспресс-оценки ресурсоемкости грузоподъемной машины, создаваемой на предприятиях, работающих в условиях позаказного производства.

При решении второй задачи применяются различные методы повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства, рассмотренные в следующем подразделе диссертации. При этом широко используются компьютерное моделирование и САПР с применением цифровых двойников ГПМ и технологии инженерии знаний, унификация и стандартизация

проектных решений, аналоговое проектирование и параллельный инжиниринг, анализ и обеспечение надежности, безопасности и качества ГПМ в процессе проектирования. Также на предприятиях создаются собственные или применяются промышленные системы автоматизированного проектирования (САПР), в том числе AutoCAD, Компас-3D, NX, SolidEdge, Catia, Creo, SolidWorks, Fusion 360, Power Shape и др. CAD/CAE/CAM-системы [98].

При этом для упорядочения проектных решений конструкторами зачастую используется практическая стандартизация, не предполагающая их закрепление в нормативно-технических документах [6], а при создании систем экспресс-оценки и автоматизированного проектирования исследователи широко используют механизмы обучения и самообучения [2]. Для первоначального обучения математических моделей, реализуемых в указанных системах, используются данные о ранее выпущенных предприятием изделиях. В дальнейшем модели уточняются в режиме самообучения по мере изготовления предприятием новых изделий.

### **1.3 Основные подходы к повышению эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства**

На стадиях подготовки производства и производства жизненного цикла грузоподъемных машин важнейшими задачами являются: повышение эффективности труда инженеров, уменьшение времени конструкторской и технологической подготовки производства, уменьшение трудоёмкости проектирования, уменьшение себестоимости конструкторской и технологической подготовки производства, увеличение качества и повышение технико-экономических показателей результатов работы конструкторского и технологического отделов [136].

Процесс конструкторской подготовки производства, в соответствии с принципами процессного подхода [33, 53, 95], является многоэтапным процессом, требующим значительных временных и трудовых затрат, а также вовлечения



большого количества участников [87, 98]. Конструкторская подготовка производства, в соответствии с СРПП – системой разработки и поставки продукции на производство, включает в себя подготовку документации, ее согласование и доработку до требуемого качества [49]. Для анализа процесса конструкторской подготовки производства, как совокупности процессов и работ, с целью выявления и управления взаимодействиями между лицами, участвующими в процессе конструкторской подготовки производства и являющихся с точки зрения концепции всеобщего управления качества внутренними поставщиками и потребителями, в рамках сети процессов предприятия целесообразно использовать широко применяемую в настоящее время методологию структурного анализа и проектирования IDEF (IcamDefinition) [61, 74, 91, 108, 131]. Например, в работе [133] представлено применение методологии IDEF к проведению структурно-функционального анализа процесса анализа контракта, позволившего выявить этапы процесса, на которых происходит взаимодействие маркетинговой, конструкторско-технологической и финансовой служб предприятия при идентификации требований потребителя, определении требуемых видов и объемов ресурсов и цены контракта. При этом автором работы [133] не было выявлено взаимодействия маркетинговой и конструкторской служб предприятия для определения реальной возможности изготовления грузоподъемных машин и предложен подход к организации данного взаимодействия.

Трудности на пути повышения эффективности и снижения трудоемкости конструкторской подготовки производства связаны со следующими основными проблемами [87]:

1. Многофункциональность процесса конструкторской подготовки производства и связанная с этим необходимость оперативного согласования принимаемых проектных решений с различными службами предприятия.

2. Недостаточный уровень цифровизации при реализации конструкторской подготовки производства и управления ее результатами.

3. Значительный объём цифровых двойников изделий, затрудняющий их выбор для использования при аналоговом проектировании.

4. Необходимость оперативного анализа требований к продукции, установленных потребителем, и оценки качества принимаемых при конструировании проектных решений.

5. Сложность управления взаимодействиями между лицами, участвующими в процессе конструкторской подготовки производства, в том числе проектными группами при параллельном инжиниринге.

6. Необходимость учета разнонаправленных требований при проектировании однотипных изделий для различных областей применения.

7. Сложности организации работы инженеров-конструкторов предприятий, работающих в условиях позаказного производства.

На решение вышеперечисленных проблем направлены усилия многочисленных исследователей.

В статье [71] рассматриваются положения Программы развития цифровой экономики Российской Федерации применительно к разработке конструкторской документации. Рассмотрены основные и наиболее ожидаемые результаты от внедрения компьютерного моделирования при разработке технической документации, рассмотрены предпринятые шаги для его внедрения.

В работе [24] рассмотрены особенности электронного представления конструкторской документации на изделия военной техники, связанные с многообразием возможных вариантов выполнения и поставки электронной конструкторской документации, ее хранением и применением. Сформулированы новые задачи выбора способов и технологий управления электронной конструкторской документацией и предложены организационно-технические меры по их решению. Причем, как отмечается в работе [101], применение цифровых двойников изделий позволяет уже на стадии проектирования оценить основные характеристики изделия и его влияние на окружающую среду.

В статье [65] рассматриваются основные проблемы, возникающие при разработке рабочих конструкторских 3D-моделей изделия. Отмечается

необходимость создания на предприятии специальных рабочих групп для выработки основных подходов при внедрении сложных систем автоматизированного проектирования (САПР).

В работе [52] рассмотрена задача повышения качества конструкторской документации за счет разработки автоматизированной системы, позволяющей сократить трудоемкие операции нормоконтролера.

Статьи [63, 64] посвящены этапам разработки конструкторской документации на изделия машиностроения, последовательности её исполнения. Рассмотрено определение структуры выполнения учебных электронных конструкторских документов на сборочную единицу, состав, особенности их оформления в системах автоматизированного проектирования.

В статье [132] рассматривается роль информационных систем в задачах повышения эффективности производства, реализация задач информатизации на машиностроительных предприятиях опытного производства и поэтапный переход с бумажной технологии разработки проектно-конструкторских документов на безбумажную. Рассматриваются информационные потоки в процессе создания конструкторской документации и средства их организации.

В работе [87] приводится анализ существующих подходов к управлению разработкой электронной конструкторской документации. Описан предлагаемый автором подход к информационной поддержке при управлении разработкой данной документации на базе интеллектуального анализа замечаний согласующих документы лиц и технологий инженерии знаний.

В [66] разработано и реализовано на программном уровне инструментальное средство для автоматизированной поддержки процесса сквозного проектирования конструкторской документации на изделие.

В статье [73] рассмотрен процесс разработки конструкторской документации и рассмотрены способы снижения времени разработки и количества ошибок при проектировании конструкторской документации на этапах разработки эскизного и технического проектов. Рассмотрены типы

параметризации в САПР и проанализировано какие из типов параметризации целесообразно применять при разработке конструкторской документации.

Соблюдение требований «Единой системы конструкторской документации» (ЕСКД) является одним из важных показателей технической культуры и профессиональной грамотности конструктора. В работе [79] с точки зрения современного состояния ЕСКД рассмотрены некоторые нетривиальные моменты, встречающиеся при разработке конструкторской документацией и связанные с простановкой размеров на сборочных чертежах.

В [136] рассматриваются процессы конструкторской и технологической подготовки производства при разработке сопроводительной документации на теплообменные аппараты для АЭС. Определены возможности улучшения управления процессами конструкторской и технологической подготовки.

Последовательность шагов по разработке системы управления конструкторской документацией машиностроительного предприятия описана и проанализирована в работе [26], а в работе [35] выявлены недостатки устаревшего метода проектирования малогабаритного транспортного средства и рассмотрено влияние этапа дизайн-визуализации на повышение качества изделий машиностроения.

В результате выполненных исследований в работе [100] был создан шаблон процесса «Выпуск электронной модели детали и электронной модели сборочной единицы» на производстве. Сформулированы цели информатизации утверждения конструкторской документации на предприятии.

В работах [119, 120] предложены подходы к разработке системы автоматизированного выпуска текстовой документации, которая позволит без реструктуризации расширять свою функциональность и совместимость для решения специфических задач. А в статье [107] рассматривается диалоговая информационная система, являющаяся частью интегрированной информационной среды производственного предприятия и предназначенная для разработки текстовой конструкторской документации на специализированное технологическое оборудование.

В статье [115] рассмотрена система конструкторско-технологической подготовки производства на крупном промышленном предприятии, включающая стадии проектирования, подготовки конструкторской документации и технологической подготовки. Система обеспечивает чёткое выполнение этих стадий организационными и техническими мерами, автоматизацией всех этапов с применением различных прикладных программных продуктов посредством бесперебойной и корректной трансляции данных между ними.

В статье [88] описан процесс и особенности проектирования, разработки и внедрения клиент-серверной информационной системы, позволяющей создавать и формировать рабочую конструкторскую документацию по общекорабельным системам, а также управлять электронной структурой изделия. Отдельно освещены вопросы проектирования логической модели базы данных, выбора программных средств, а также типичные проблемы, связанные с внедрением информационной системы в АО «СПМБМ «Малахит».

В работе [84] обоснована необходимость внесения ряда изменений в стандарты, регламентирующие правила разработки и оформления конструкторской документации программно-аппаратных средств изделий, которая будет способствовать унификации конструкторской документации программного обеспечения, встроенного в изделия, разрешению вопроса многоверсионности программного обеспечения изделия, устранению несогласованности между актуализируемыми стандартами.

В статье [54] отмечается, что при разработке сложных изделий машиностроения, и в частности, электрических машин, необходима увязка усилий множества специалистов: расчетчиков, специалистов по моделированию и конечно-элементному анализу, конструкторов, технологов, специалистов по сопровождению эксплуатации и эксплуатационной документации.

В работе [141] описана информационная система, обеспечивающая сокращение издержек по разработке конструкторской документации для унифицируемой и многоразовой тары для нестандартных крупногабаритных узлов и панелей авиационных изделий.

В статье [5] рассмотрен метод аналогового проектирования, т. е. проектирования по аналогу, прототипу. Показано, что при этом неопределенная ситуация сводится к известному решению сходных задач, при этом результат минимально трансформирует знакомые решения. Аналоговое проектирование также позволяет решить проблему технической совместимости элементов при проектировании сложных изделий [103].

Организацию эффективного управления конструкторской деятельностью в работах [89, 126] предложено осуществлять на основе управления рисками и риск-ориентированного информационного моделирования. На примере конкретной организации, разрабатывающей и выпускающей оборудование для нефтегазодобывающей, нефтегазоперерабатывающей, химической, металлургической отраслей промышленности, представлены алгоритм и пример идентификации, оценки и анализа рисков, возникающих в процессе «Конструкторская подготовка производства изделия».

В работе [112] рассмотрены проблемы и направления совершенствования процессов конструкторско-технологической подготовки машиностроительного производства. Особое внимание обращается на организацию направлений системы автоматизированного проектирования.

В статье [150] рассмотрена задача организации конструкторской подготовки на предприятии, работающем в рамках концепции Индустрии 4.0. Предлагается комплекс инструментов, обеспечивающих информационную поддержку процесса проектирования изделий приборостроения. Приведена схема взаимодействия компонентов предприятия Индустрии 4.0 и облачных сервисов для проектной деятельности.

Разработке компьютерной поддержки процесса проектирования, основанной на принципах процессного подхода, посвящена работа [143]. В ней представлены следующие стадии процесса: определение характеристик конструкции; спецификация типа поддержки; разработка набора требований и функций для системы поддержки; разработка модели и системы поддержки; оценка ядра системы.

Организации работы инженеров-конструкторов предприятий, работающих в условиях позаказного производства, посвящена работа [145]. В ней предлагается набор требований для организации процессов проектирования и производства в таких предприятиях.

В работах [144, 149] рассмотрены вопросы организации процесса конструкторской подготовки производства на принципах параллельного инжиниринга. Рассмотрены проблемы организации параллельного инжиниринга и предложен единый подход к их решению, основанный на методе матрицы структуры проектирования, который представляет собой модель обмена информацией, позволяющую конструкторам находить решения задач для лучшего планирования и управления процессом параллельного инжиниринга, в том числе и с учетом принципов бережливого производства.

Анализ представленных выше исследований показывает, что задача повышения эффективности и качества процесса проектирования грузоподъемных машин на предприятиях подъемно-транспортного машиностроения не нашла окончательного решения и является актуальной до настоящего времени. Внедрение разработок, полученных при решении вышеуказанной задачи, позволит снизить себестоимость грузоподъемных машин и повысить их качество, сократить время подготовки производства, повысить эффективность и качество процесса конструкторской подготовки производства, рациональнее использовать имеющиеся ресурсную и конструкторскую базы.

#### **1.4 Методы прогнозирования долговечности элементов металлоконструкций грузоподъемных машин на стадии проектирования**

В соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [62] производитель должен оценить способность грузоподъемной машины выполнить установленные требования по долговечности и динамике качества ГПМ на последующих стадиях жизненного цикла. Данная оценка в соответствии с ГОСТ Р ИСО/ТО 10017-2015 [56] предусматривает выполнение анализа надежности ГПМ. Поэтому в

соответствии с ГОСТ 28609-90 [113, 114] результаты расчетов, выполняемых в процессе проектирования грузоподъемных машин, должны доказывать обеспечение сохранения несущей способности машины и ее элементов, а также соответствующие значения показателей надежности при заданных эксплуатационных характеристиках в течение установленного срока службы, при условии изготовления, установки и использования грузоподъемной машины в соответствии с требованиями нормативно-технической и эксплуатационной документации. Поэтому большое внимание исследователей уделено вопросам разработки инструментов управления обеспечением надежности, безопасности и качества новой продукции в процессе проектирования [29, 36, 37], и алгоритмы проектирования металлоконструкций грузоподъемных машин, например, описанный в работе [114], одним из этапов включают проверочный расчет на сопротивление усталости основных сечений конструкции, подвергаемых интенсивному циклическому нагружению. Расчет металлоконструкций на сопротивление усталости в областях наибольших растягивающих напряжений является проверкой конструкции по условию долговечности, так как возникновение в них усталостной трещины может привести к катастрофическим последствиям и свидетельствует об исчерпании ресурса конструкции в целом [113]. Если долговечность конструкции окажется меньше требуемой, то производится корректировка конструктивно-технологического решения.

В работе [39] отмечается, что разрушение металлоконструкций происходит в местах, где наблюдается высокая концентрация напряжений, вызванная технологическими (низкое качество сварного шва и др.), конструктивными или эксплуатационными факторами. В [118] представлены узлы мостовых кранов, в которых чаще всего возникают дефекты: буксовые зоны концевых балок, узлы стыков пролетных балок крана с концевыми, узлы опирания пролетных балок на концевые, зоны примыкания кронштейнов кабины, механизмов передвижения и проходных галерей к стенкам пролетных балок, пролетные балки, металлоконструкция грузовой тележки. Причем трещины в местах потенциального разрушения могут возникать до истечения нормативного срока



службы. Для выделения мест потенциального разрушения в металлоконструкции мостового крана автором работы [39] построена конечно-элементная модель, с помощью которой выделены 22 места потенциального разрушения (рисунок 1.17): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 13, 14, 15, 16, 17, 18 – зоны соединения главных и концевых балок; 7, 8, 9, 10, 19, 20, 21, 22 – зоны крепления ходовых колес; 11, 12 – центр пролета, что хорошо согласуется с результатами различных исследований, например, [81, 113, 114]. При этом в [113] указанные места потенциального разрушения разделены на расчетные зоны двух типов РЗ-1 и РЗ-2, и расчет металлоконструкций на сопротивление усталости предлагается производить для расчетных зон типа РЗ-1, к которым относятся места потенциального разрушения 11 и 12, представленные на рисунке 1.17.

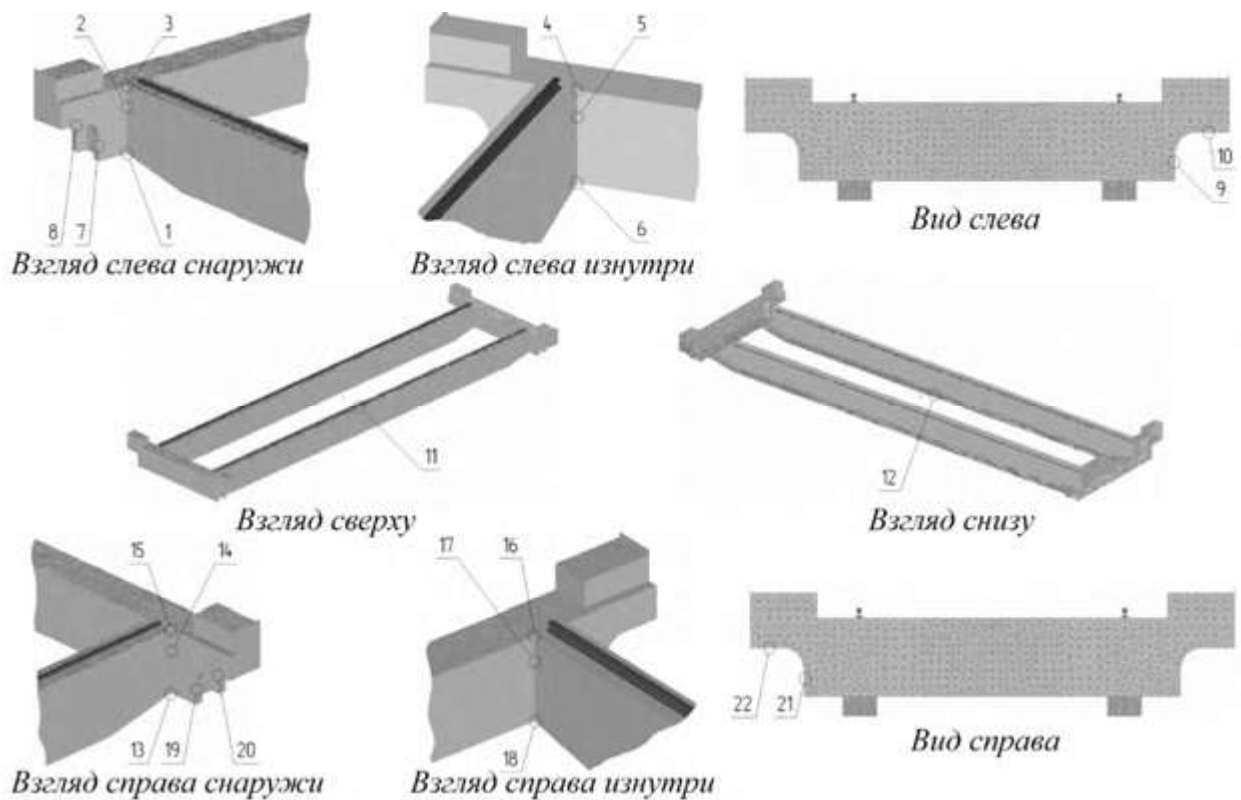


Рисунок 1.17 – Места потенциального разрушения металлоконструкции мостового крана

При прогнозировании долговечности проектируемой металлоконструкции важной задачей является определение времени роста трещины от начальной

длины до критического размера. Для определения критической длины трещины и для определения скорости роста трещины используется характеристика поврежденной нагруженной конструкции называемая коэффициентом интенсивности напряжений (КИН)  $K_I$ , МПа·м<sup>0,5</sup> [121].

Для определения КИН используется выражение [114]:

$$K_I = \xi_K \sigma \sqrt{\pi a}, \quad (1.1)$$

где  $\xi_K$  – безразмерный коэффициент, зависящий от геометрии тела и условий нагружения, называемый  $K$ -тарировкой;  $\sigma$  – номинальные напряжения в сечении с трещиной, вычисленные по сечению брутто, т.е. в предположении ее отсутствия при  $a = 0$ ;  $a$  – характерный размер трещины.

Долговечность металлоконструкции определяется как количество циклов нагружения ( $Z_a$ ), необходимое для подрастания трещины от начального размера  $a_0$  до конечного размера  $a_1$ , еще не вызывающего потерю несущей способности конструкции [114]. Соколовым С.А. предложены следующие зависимости для определения количества циклов нагружения  $Z_a$  [113, 114]:

- для стационарного процесса нагружения, т.е. при расчетном размахе напряжений за один характерный технологический цикл  $\Delta\sigma = \text{const}$ :

$$Z_a = \frac{\gamma_{dN} (\gamma_n \gamma_m \Delta K_*)^q}{\zeta_{ea} v_* (\Delta\sigma \sqrt{\pi})^q} \int_{a_0}^{a_1} \frac{da}{[\xi_K(\alpha) \sqrt{a}]^q}, \quad (1.2)$$

- для случая, когда размер  $a_1$  достаточно мал по сравнению с размерами поперечного сечения  $B$  элемента конструкции, в котором развивается эта трещина ( $a_1 \leq 0,1B$ ), и  $\xi_K(\alpha) = \text{const}$ :

$$Z_a = \frac{\gamma_{dN} (\gamma_n \gamma_m \Delta K_*)^q}{(0,5q - 1) \zeta_{ea} v_* (\xi_K \Delta\sigma \sqrt{\pi})^q} \left[ \frac{1}{a_0^{0,5q-1}} - \frac{1}{a_1^{0,5q-1}} \right], \quad (1.3)$$

где  $\gamma_{dN}$  – коэффициент надежности методики расчета;  $\gamma_n$  – коэффициенты надежности по назначению конструкции или элемента;  $\gamma_m$  – коэффициенты надежности по характеристике материала;  $v_* = 10^{-7}$  м/цикл;  $\Delta K_* = 0,05 \cdot \sigma_B - 9$

(МПа·м<sup>0,5</sup>) – параметр уравнения, равный значению размаха КИН ( $\Delta K_I$ ), при котором скорость развития трещины  $da/dz = v_*$ ;  $\zeta_{ea}$  – коэффициент циклического нагружения;  $\sigma_B$  – временное сопротивление, Мпа;  $\xi_K$  – безразмерный коэффициент, зависящий от геометрии тела и условий нагружения, называемый  $K$ -тарировкой; значение показателя степени лежит в интервале  $q = 2,5 \div 3,5$  и приближенно может быть принято равным  $q = 3$ ;  $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_0$  – размах действующих напряжений, где  $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение цикла;  $\sigma_0$  – расчетное минимальное напряжение, которое в запас надежности можно принимать равным  $\sigma_0 = \begin{cases} 0 & \text{при } \sigma_{\min} \leq 0 \\ \sigma_{\min} & \text{при } \sigma_{\min} > 0 \end{cases}$ ,  $\sigma_{\min}$  – минимальное напряжение

цикла.

В случае известной функции  $\xi_K(\alpha)$  расчет выполняется путем численного интегрирования.

Коэффициент циклического нагружения  $\zeta_{ea}$  определяется по зависимости [113]:

$$\zeta_{ea} = \sum_{j=1}^J \left\{ \mu_j \sum_{i=1}^I \left( \frac{\Delta\sigma_{ji}}{\Delta\sigma_1} \right)^q \right\},$$

где  $J$  – число характерных технологических циклов (ХТЦ) с номинальным грузом, шт.,  $\mu_j$  – частота реализации  $j$ -го ХТЦ;  $I$  – число ступеней в блоке нагружения.

Значения коэффициентов в зависимостях (1.2) и (1.3) приведены в источнике [113]. В нем указано, если развитие трещины происходит по основному металлу конструкции, то коэффициент надежности методики расчета  $\gamma_{dN} = 0,80 \div 0,95$ . Если же трещина проходит по шву или околшовной зоне, то  $\gamma_{dN} = 0,60 \div 0,75$ . Меньшие значения принимаются для упрощенного аналитического варианта расчета КИН и грубой оценки спектра нагружения, большие – при численных расчетах КИН и детальном анализе спектра нагружения. При использовании для определения  $\Delta K_*$  зависимости

$\Delta K_* = 0,05 \cdot \sigma_B - 9$  можно принимать  $\gamma_m = 1$ . Для малоисследованных сталей можно принять  $\gamma_m = 0,95$ .

При использовании зависимостей (1.2) и (1.3) предполагается, что несмотря на то, что эксплуатация грузоподъемных машин с трещинами не допускается, в реальной конструкции трудно обнаружить трещину, пока ее размер меньше 30-50 мм. Следовательно, чтобы трещину можно было своевременно заметить и отремонтировать, во-первых, она не должна развиваться слишком быстро, а во-вторых, размер трещины, которую можно уверенно обнаружить, должен быть не критичен для данной конструкции. То есть трещина такого размера не должна приводить к катастрофическому разрушению [114].

Определение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) сводится к проблеме нахождения  $K$ -тарировки  $\xi_K$ . Значение этого коэффициента для небольших трещин в элементах конструкций не сложных сечений вычисляют по приближенным аналитическим формулам, представленным в работах различных авторов, например, [93, 114, 116, 117]. Величина КИН также может быть найдена по справочным данным, например, [117]. Однако справочники по КИН практически не содержат решений для трещин в пространственных объектах коробчатого, двутаврового, швеллерного и других сечений, характерных для элементов крановых конструкций. Что касается справочных данных, то не для всех конфигураций сечений имеются аналитические решения.

$K$ -тарировку  $\xi_K$  для элементов более сложных сечений с произвольно расположенными трещинами больших размеров, как отмечается в [114], рекомендуется определять численными методами, в том числе с помощью метода конечных элементов (МКЭ). При этом при расчете КИН с помощью МКЭ используют специальные суперэлементы, которые помещаются в вершину трещины и содержат математическое описание особенности напряженно-деформированного состояния, связанной с ее вершиной (сингулярный конечный элемент) [129]. При отсутствии таких суперэлементов в программном

обеспечении достаточно надежным приемом для сквозных трещин в пластинах является прямой метод по напряжениям или по перемещениям [111].

Поэтому возникает необходимость разработки методов определения КИН в элементах металлоконструкций других сечений, чему посвящены исследования различных авторов. Например, в работе [121] представлены результаты численных экспериментов по определению КИН для типовых авиационных конструкций с трещинами, позволившие созданию базы данных факторов, влияющих на КИН, для проведения работы по определению ресурса конструкции по условиям живучести. Применение численных методов для нахождения КИН также рассматривается в работе [25, 111, 113]. Однако отсутствуют данные об исследованиях КИН для трещин нормального отрыва в элементах металлоконструкций коробчатого сечения.

## 1.5 Выводы

1. На основе обобщения производственного опыта и анализа трудов отечественных и зарубежных исследователей в области управления качеством установлено, что одними из основных факторов, оказывающих негативное влияние на качество грузоподъемных машин, являются наличие неопределенностей при принятии решения в процессе проектирования о выборе цифрового двойника-аналога проектируемой ГПМ, которые связаны с работой современных предприятий подъемно-транспортного машиностроения в условиях цифровизации и интенсификации производства, обуславливающих постоянное сокращение времени, отпускаемого на принятие различных организационно-технических решений и конструкторскую подготовку производства, а также недостаточный уровень стандартизации принимаемых в ходе конструкторской подготовки производства проектных решений.

2. Анализ типовых конструкторских решений грузоподъемных машин показал, что использование блочно-модульных конструкций позволяет

максимально унифицировать структуру мостовых кранов с различными весовыми, энергетическими и массогабаритными характеристиками.

3. Отмечено, что перед конструкторской службой в ходе реализации процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин ставятся две основные задачи:

– анализ требований к ГПМ, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости в ходе взаимодействия маркетинговой и конструкторской служб предприятия;

– проектирование конструкторской службой предприятия ГПМ в соответствии с заключенным контрактом за время, позволяющее предприятию изготовить и поставить потребителю грузоподъемную машину заданного качества и в сроки, установленные контрактом.

4. Показано, что задача повышения эффективности конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин на предприятиях подъемно-транспортного машиностроения путем совершенствования взаимодействия маркетинговой, финансовой и конструкторско-технологических служб предприятия на основе экспресс-оценки ресурсоемкости принимаемых проектных решений и принципов аналогового проектирования не нашла окончательного решения.

5. Анализ методов анализа надежности и оценки долговечности элементов металлоконструкций грузоподъемных машин при проектировании по критерию трещиностойкости показал, что в настоящее время недостаточно исследованы методы определения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) для трещин нормального отрыва в пространственных объектах коробчатого, двутаврового, швеллерного и других сечений, характерных для элементов крановых конструкций.

6. На основании вышеизложенного определена цель работы: повышение эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин путем снижения его трудоемкости на основе информационной поддержки аналогового проектирования.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- 1) провести исследование состояния методологических принципов и инструментария в области управления качеством и на его основе разработать концепцию повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин;
- 2) выполнить практическую стандартизацию принимаемых в процессе конструкторской подготовки производства проектных решений на основе базы данных цифровых двойников грузоподъемных машин и методики их квалитметрической оценки;
- 3) разработать методику анализа требований к грузоподъемным машинам, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости;
- 4) разработать методику анализа надежности грузоподъемных машин на стадии конструкторской подготовки производства;
- 5) разработать и внедрить на предприятии, выпускающем грузоподъемные машины, систему информационной поддержки процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин.

## **2 АНАЛОГОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН**

### **2.1 Концепция повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин**

С целью выявления взаимодействия между лицами, участвующими в процессе конструкторской подготовки производства и являющихся с точки зрения концепции всеобщего управления качества внутренними поставщиками и потребителями, а также взаимодействия процесса конструкторской подготовки производства, как совокупности процессов и работ, в ходе которых происходит разработка конструкторской документации на выпускаемые предприятием грузоподъемные машины, с другими процессами в рамках сети процессов предприятия выполнено его моделирование. При этом использовались унифицированный язык моделирования UML [32, 105] и методология структурного анализа и проектирования IDEF (IcamDefinition) [61, 74, 91, 108]. Задачей моделирования являлась выработка решения о том, какие функции должны быть включены в процесс конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин и как эти функции взаимосвязаны между собой с тем, чтобы разработать методику повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства.

На рисунках 2.1 и 2.2 в нотации UML представлена диаграмма последовательности взаимодействия служб предприятия при принятии и конструкторской проработке заказа на создание грузоподъемной машины в текущем и желаемом состоянии процесса. Согласно UML-модели, представленной на рисунке 2.1, маркетинговая служба предприятия после получения от заказчика заявки на создание грузоподъемной машины производит



первоначальный анализ исходных технических требований с целью оценки возможности его выполнения и согласования с заказчиком цены на готовое изделие.

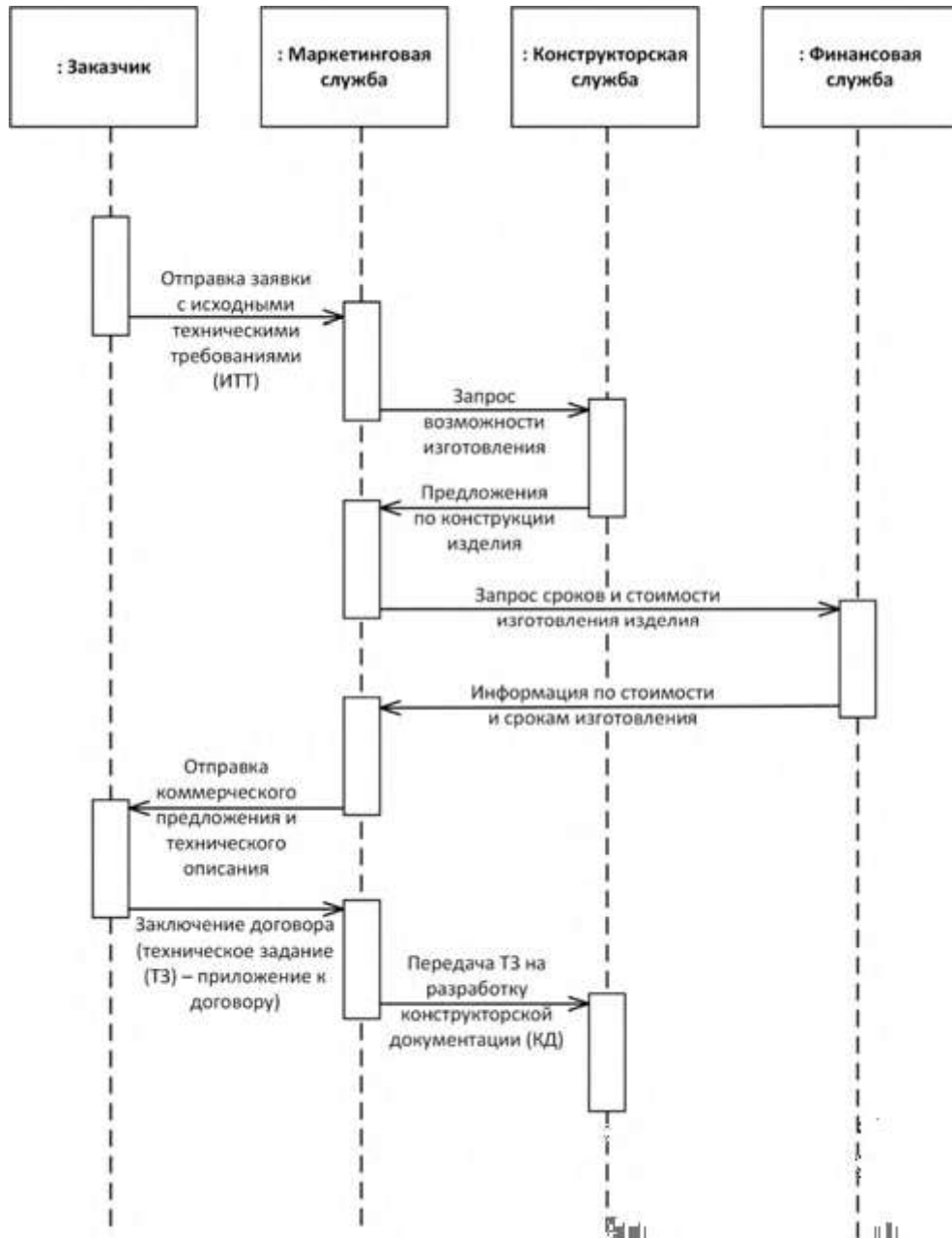


Рисунок 2.1 – Диаграмма последовательности взаимодействия служб предприятия при принятии и конструкторской проработке заказа на создание грузоподъемной машины (текущее состояние)

Для реализации данной процедуры маркетинговая служба взаимодействует с конструкторской и финансовой службами предприятия. Конструкторская

служба при этом оценивает техническую возможность изготовления грузоподъемной машины и разрабатывает предложения по ее конструкции. Финансовая служба предоставляет информацию по стоимости и срокам изготовления изделия.



Рисунок 2.2 – Диаграмма последовательности взаимодействия служб предприятия при принятии и конструкторской проработке заказа на создание грузоподъемной машины (желаемое состояние)

Сформированное в результате данного взаимодействия маркетинговой, конструкторской и финансовой служб предприятия коммерческое предложение и техническое описание отправляются заказчику для заключения договора. Согласованный договор на изготовление грузоподъемной машины подписывается заказчиком и руководством предприятия и принимается к исполнению. При этом

конструкторской службе предприятия направляется техническое задание на разработку необходимой для изготовления грузоподъемной машины конструкторской документации. Представленное взаимодействие различных служб предприятия при реализации процесса анализа контракта на создание грузоподъемной машины подробно раскрыто в структурно-функциональной модели, разработанной автором работы [133].

В данной работе предлагается повысить эффективность взаимодействия маркетинговой, финансовой и конструкторской служб предприятия в процессе производства грузоподъемных машин на предприятиях подъемно-транспортного машиностроения путем внедрения методики анализа требований к ГПМ, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости грузоподъемных машин на основе регрессионных зависимостей взаимосвязи основных показателей качества ГПМ и составляющих ресурсоемкости ГПМ. Образованная при этом диаграмма последовательности взаимодействия служб предприятия при принятии и конструкторской проработке заказа на создание грузоподъемной машины представлена на рисунке 2.2.

Рисунок 2.2 показывает, что при использовании методики анализа требований к ГПМ, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости грузоподъемных машин в конечном итоге отпадает необходимость запроса маркетинговой службой соответствующей информации у финансовой и конструкторской служб предприятия. Данные запросы могут сохраняться только на начальных стадиях внедрения методики и будут исключаться по мере наполнения базы данных цифровых двойников выпущенных предприятием грузоподъемных машин. При этом маркетинговая служба будет производить данные оценки потребности в ресурсах самостоятельно.

На рисунке 2.3 представлена построенная в результате проведенного с точки зрения инженера-конструктора структурно-функционального анализа процесса разработки конструкторской документации на грузоподъемные машины структурно-функциональная модель до использования принципов аналогового проектирования, а на рисунке 2.4 – модель, в которой для повышения

эффективности и качества процесса предлагается использование принципов аналогового проектирования и базы данных цифровых двойников реализованных предприятием ГПМ. При этом необходимо проведение анализа надежности грузоподъемных машин с целью оценки способности грузоподъемной машины выполнить установленные требования по долговечности и динамики качества ГПМ на последующих стадиях жизненного цикла.

Таким образом, предлагаемая концепция повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин включает:

- практическую стандартизацию принимаемых в процессе конструкторской подготовки производства ГПМ проектных решений на основе базы данных цифровых двойников грузоподъемных машин;

- анализ требований к грузоподъемным машинам, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости;

- аналоговое проектирование грузоподъемных машин с использованием базы данных цифровых двойников реализованных предприятием ГПМ;

- анализ надежности спроектированных грузоподъемных машин;

- управление взаимодействием между участниками процесса аналогового проектирования грузоподъемных машин.

Для реализации предложенной концепции повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин в последующих подразделах представлены методики:

- квалиметрической оценки близости цифровых двойников-аналогов проектируемой грузоподъемной машины;

- анализа надежности грузоподъемных машин на стадии конструкторской подготовки производства для оценки;

- анализа требований к ГПМ, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости.

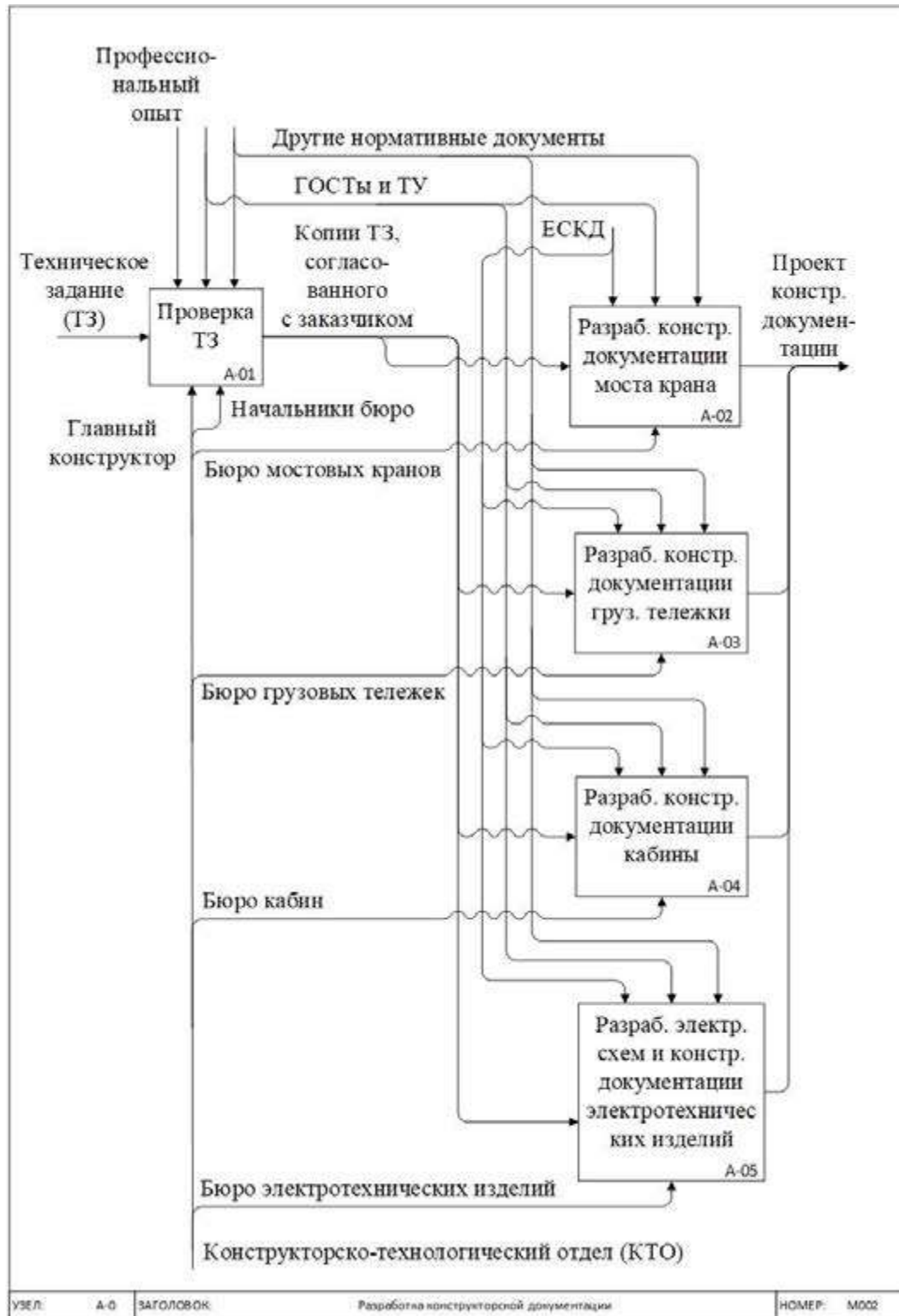


Рисунок 2.3 – Структурно-функциональная модель процесса разработки конструкторской документации (текущее состояние)



Рисунок 2.4 – Структурно-функциональная модель процесса разработки конструкторской документации (желаемое состояние)

## 2.2 Типизация конструкторских проектных решений грузоподъемных машин при аналоговом проектировании

В процессе производства грузоподъемных машин (кранов) даже на сравнительно небольших предприятиях разрабатывается большой объем конструкторской документации, что требует затрат труда большого количества квалифицированных конструкторов. Поэтому возникает необходимость сокращения времени конструкторской подготовки производства [50]. В настоящее время ни один процесс конструирования не обходится без широкого использования типовых, унифицированных и, в необходимых случаях, стандартизованных конструктивных элементов (крепежных изделий, узлов и деталей общемашиностроительного применения, различных типов стандартных соединений и др.). Поэтому для снижения трудозатрат на конструкторскую

подготовку производства грузоподъемных машин разработанная концепция повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства ГПМ предусматривает использование принципов аналогового проектирования.

Аналоговое проектирование [5, 7] – это проектирование по аналогу, прототипу. Неопределенная ситуация сводится к известному решению сходных задач, при этом результат минимально трансформирует знакомые решения.

Аналоговое проектирование возможно путем типизации конструкторских проектных решений, т. е. многократного использования однажды разработанной и утвержденной проектной документации или отдельных ее частей, что позволяет повысить качество проектной документации, ускорить и удешевить процесс проектирования. Для того чтобы подобрать цифровой двойник крана-аналога, необходимо сначала выбрать тип крана, а потом для выбранного типа крана подобрать вариант с наиболее близкими основными показателями качества (высоким уровнем унификации). При этом производится анализ значительного количества цифровых двойников спроектированных ранее грузоподъемных машин и выбор из них цифрового двойника ГПМ-аналога, наиболее подходящего для удовлетворения требований потребителей, и для поиска цифрового двойника ГПМ-аналога предлагается использование классификации грузоподъемных машин, представленной на рисунке 1.1.

Для выбранного типа крана определяются его основные показатели качества. Исследование и определение наиболее существенных причинно-следственных взаимосвязей между основными показателями качества и степенью близости цифрового двойника крана-аналога было проведено с использованием диаграммы Исикавы. Результат анализа основных показателей качества для мостового крана представлен на рисунке 2.5.

В результате проведенного анализа к основным показателям качества для мостового крана были отнесены грузоподъемность крана  $Q$ , пролет  $L$ , высота главного подъема  $H_{г.п.}$ , база крана  $A_{кр.}$ , высота крана  $H_{кр.}$ , скорость

передвижения крана  $v_{\text{пер.кр.}}$ , скорость передвижения тележки (тали)  $v_{\text{пер.т.}}$ , скорость подъема главного крюка  $v_{\text{под.}}$ , группа режима работы крана, подкрановый путь, климатическое исполнение с категорией размещения.

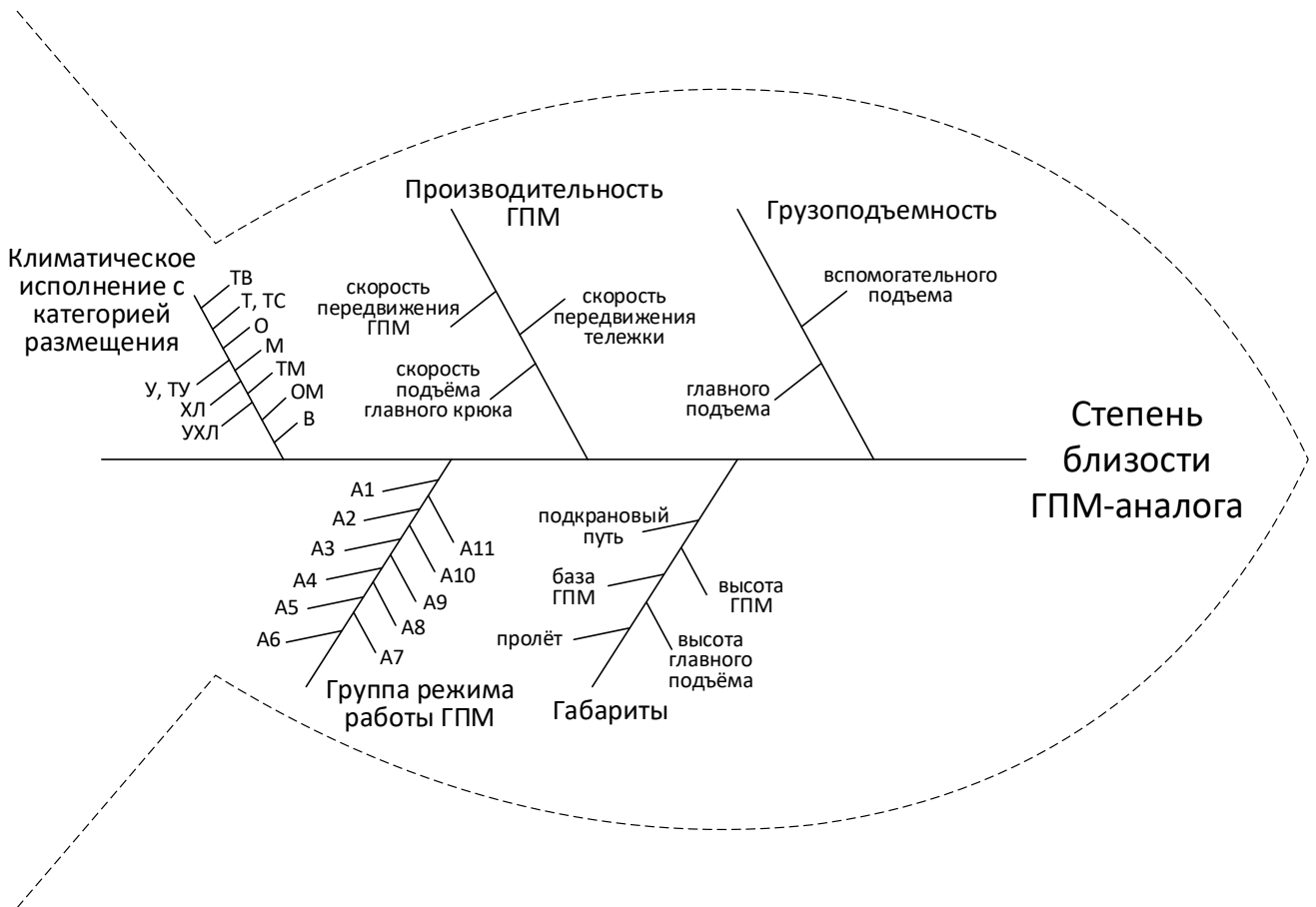


Рисунок 2.5 – Основные показатели качества ГПМ, влияющие на степень близости цифровых двойников-аналогов к проектируемой ГПМ

Для выбора ГПМ-аналога производится квалиметрическая оценка близости (уровня унификации) цифровых двойников-аналогов проектируемой грузоподъемной машины по критерию близости цифрового двойника грузоподъемной машины-аналога к проектируемой грузоподъемной машине по требованиям к грузоподъемной машине, установленным потребителем и характеризующимся показателями качества ГПМ, (коэффициенту сходства), определяемому по зависимости [11]:



$$K_C = \sum_{i=1}^N \left( W_i \cdot \left( 1 - \left| \frac{P_{ai} - P_{пкi}}{P_{ai} + P_{пкi}} \right| \right) \right), \quad (2.1)$$

где  $N$  – число анализируемых показателей качества ГПМ ( $N = 11$ );

$W_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го показателя качества ГПМ;

$P_{ai}$  – значение  $i$ -го показателя качества цифрового двойника ГПМ-аналога;

$P_{пкi}$  – значение  $i$ -го показателя качества проектируемой ГПМ.

Показатели качества  $P_{ai}$  и  $P_{пкi}$  могут быть количественными и задаваться численно в соответствии со своей характеристикой (например, грузоподъемность крана  $Q$ , пролет  $L$ , высота главного подъема  $H_{гл.п.}$ , база крана  $A_{кр.}$ , высота крана  $H_{кр.}$ , скорость передвижения крана  $v_{пер.кр.}$ , скорость передвижения тележки (тали)  $v_{пер.т.}$ , скорость подъема главного крюка  $v_{под.}$ ) и неметрическими, выражаемыми в качественной (нечисловой) форме (например, группа режима работы крана, климатическое исполнение с категорией размещения). Неметрические показатели качества ГПМ переводятся количественные в соответствии с принципами квалиметрии. Для этого значения  $P_{ai}$  и  $P_{пкi}$  для группы режима работы крана, климатического исполнения с категорией размещения проранжируем от легкого до тяжелого. Так, к примеру, для группы режима работы: А0 – 0,1, А1 – 1, А2 – 2, А3 – 3, А4 – 4, А5 – 5, А6 – 6, А7 – 7, А8 – 8, А9 – 9, А10 – 10, А11 – 11. Для климатического исполнения с категорией размещения предлагаемые значения параметров  $P_{ai}$  и  $P_{пкi}$  представлены в таблице 2.1.

Весовые коэффициенты были оценены по методу попарного сравнения (ПС) показателей качества ГПМ. Идея метода состоит в том, что попарно сравниваются каждые два показателя качества и определяется наиболее значимый из них, отсюда название – «попарное (или парное) сравнение» [109]. Матрица ПС характеристик подъемных кранов представлена в таблице 2.2.

Для удобства расчетов число баллов показателей качества ГПМ было отнормировано, весовой коэффициент  $i$ -го показателя качества ГПМ  $w_i$  определялся по формуле:

$$W_i = \frac{B_i}{\sum_{i=1}^N B_i}, \quad (2.2)$$

где  $B_i$  – число баллов  $i$ -го показателя качества ГПМ;

$\sum_{i=1}^N B_i$  – сумма баллов показателей качества ГПМ.

На основе анализа таблицы 2.2 и формулы 2.2 была составлена таблица нормированных весовых коэффициентов (таблица 2.3).

Таблица 2.1 – Ранжирование значений  $P_{ai}$  и  $P_{пкi}$  для климатического исполнения с категорией размещения

Обозначение	$P_{ai}$ и $P_{пкi}$	Обозначение	$P_{ai}$ и $P_{пкi}$	Обозначение	$P_{ai}$ и $P_{пкi}$	Обозначение	$P_{ai}$ и $P_{пкi}$
У1, ТУ1	1,00	УХЛ5	3,40	О1.1	6,01	ТМ4.1	8,31
У1.1, ТУ1.1	1,01	УХЛ5.1	3,41	О2	6,10	ТМ4.2	8,32
У2, ТУ2	1,10	ТВ1	4,00	О2.1	6,11	ТМ5	8,40
У2.1, ТУ2.1	1,11	ТВ1.1	4,01	О4	6,20	ТМ5.1	8,41
У3, ТУ3	1,20	ТВ2	4,10	О4.1	6,21	ОМ1	9,00
У3.1, ТУ3.1	1,21	ТВ2.1	4,11	О4.2	6,22	ОМ1.1	9,01
У5, ТУ5	1,30	ТВ3	4,20	О5	6,30	ОМ2	9,10
У5.1, ТУ5.1	1,31	ТВ3.1	4,21	О5.1	6,31	ОМ2.1	9,11
ХЛ1	2,00	ТВ4	4,30	М1	7,00	ОМ3	9,20
ХЛ1.1	2,01	ТВ4.1	4,31	М1.1	7,01	ОМ3.1	9,21
ХЛ2	2,10	ТВ4.2	4,32	М2	7,10	ОМ4	9,30
ХЛ2.1	2,11	ТВ5	4,40	М2.1	7,11	ОМ4.1	9,31
ХЛ3	2,20	ТВ5.1	4,41	М3	7,20	ОМ4.2	9,32
ХЛ3.1	2,21	Т1, ТС1	5,00	М3.1	7,21	ОМ5	9,40
ХЛ5	2,30	Т1.1, ТС1.1	5,01	М4	7,30	ОМ5.1	9,41
ХЛ5.1	2,31	Т2, ТС2	5,10	М4.1	7,31	В1	10,00
УХЛ1	3,00	Т2.1, ТС2.1	5,11	М4.2	7,32	В1.1	10,01
УХЛ1.1	3,01	Т3, ТС3	5,20	М5	7,40	В2	10,10
УХЛ2	3,10	Т3.1, ТС3.1	5,21	М5.1	7,41	В2.1	10,11
УХЛ2.1	3,11	Т4, ТС4	5,30	ТМ1	8,00	В3	10,20
УХЛ3	3,20	Т4.1, ТС4.1	5,31	ТМ1.1	8,01	В3.1	10,21
УХЛ3.1	3,21	Т4.2, ТС4.2	5,32	ТМ2	8,10	В4	10,30
УХЛ4	3,30	Т5, ТС5	5,40	ТМ2.1	8,11	В4.1	10,31
УХЛ4.1	3,31	Т5.1, ТС5.1	5,41	ТМ3	8,20	В4.2	10,32
УХЛ4.2	3,32	О1	6,00	ТМ4	8,30	В5	10,40
						В5.1	10,41

Таблица 2.2 – Матрица парного сравнения показателей качества ГПМ

Параметр	грузоподъемность крана $Q$	пролет $L$	высота гл. под. $H_{\text{гл.п.}}$	база крана $A_{\text{кр.}}$	высота крана $H_{\text{кр.}}$	скор. передв. крана $U_{\text{пер.кр.}}$	скор. передв. тележки (тали) $U_{\text{пер.т.}}$	скор. под. гл. крюка $U_{\text{под.}}$	группа режима работы крана	подкрановый путь	климат. исп. с кат. размещения	Сумма баллов $B$
	–	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
грузоподъемность крана $Q$	–	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
пролет $L$	0	–	1	1	1	1	1	1	0	1	1	8
высота главного подъема $H_{\text{гл.п.}}$	0	0	–	1	1	1	1	1	0	1	1	7
база крана $A_{\text{кр.}}$	0	0	0	–	1	0	0	0	0	1	0	2
высота крана $H_{\text{кр.}}$	0	0	0	0	–	0	0	0	0	1	0	1
скор. передв. крана $U_{\text{пер.кр.}}$	0	0	0	1	1	–	0	0	0	1	0	3
скор. передв. тележки (тали) $U_{\text{пер.т.}}$	0	0	0	1	1	1	–	0	0	1	0	4
скор. под. гл. крюка $U_{\text{под.}}$	0	0	0	1	1	1	1	–	0	1	0	5
группа режима работы крана	0	1	1	1	1	1	1	1	–	1	1	9
подкрановый путь	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–	0	0
климат. исп. с кат. размещения	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	–	6

Таблица 2.3 – Таблица нормированных весовых коэффициентов

Параметр	Баллы	Весовой коэффициент
грузоподъемность крана $Q$	10	0,18
пролет $L$	8	0,15
высота главного подъема $H_{\text{гл.п.}}$	7	0,13
база крана $A_{\text{кр.}}$	2	0,04
высота крана $H_{\text{кр.}}$	1	0,02
скор. передв. крана $U_{\text{пер.кр.}}$	3	0,05
скор. передв. тележки (тали) $U_{\text{пер.т.}}$	4	0,07
скор. под. гл. крюка $U_{\text{под.}}$	5	0,09
группа режима работы крана	9	0,16
подкрановый путь	0	0
климат. исполнение с кат. размещения	6	0,11
<b>Сумма</b>	<b>55</b>	<b>1</b>

Результат анализа основных показателей качества мостового крана с учетом нормированных весовых коэффициентов в виде диаграммы Исикавы приведен на рисунке 2.6. Так как весовой коэффициент для подкранового пути равен 0, то этот показатель качества в дальнейших расчетах не учитывается и для подбора цифрового двойника крана-аналога оставлено 10 показателей качества.

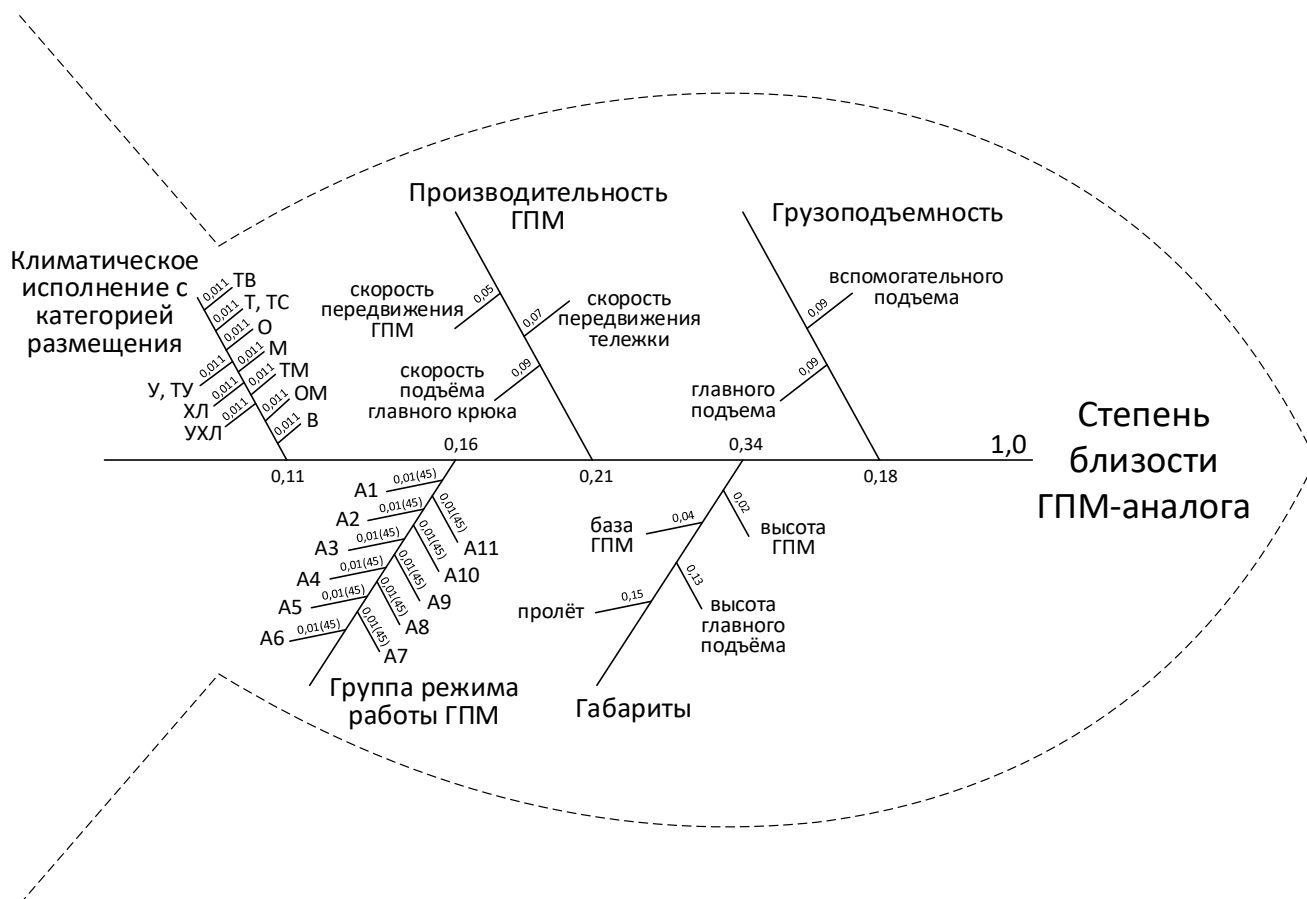


Рисунок 2.6 – Основные показатели качества мостового крана с учетом нормированных весовых коэффициентов

По формуле (2.1) был построен график зависимости коэффициента сходства  $K_C$  от значений показателей качества цифрового двойника крана-аналога  $P_{ai}$  и значений показателей качества проектируемого крана  $P_{пкi}$  для случая одного показателя качества (рисунок 2.7).

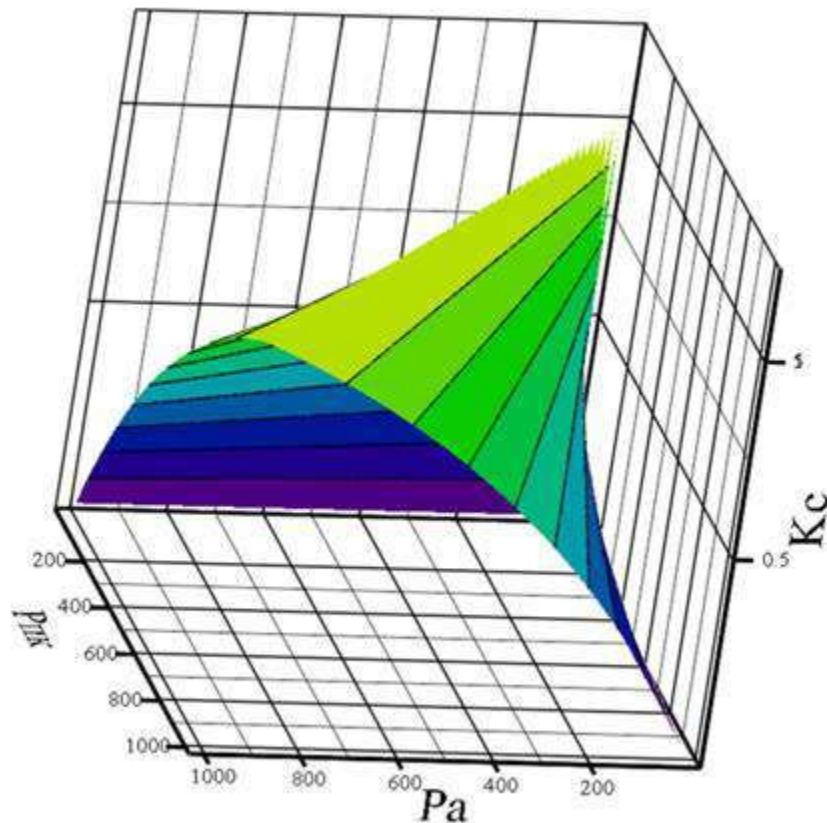


Рисунок 2.7 – Зависимость коэффициента сходства  $K_C$  от значений показателя качества цифрового двойника-аналога  $P_{ai}$  и проектируемой ГПМ  $P_{\Pi i}$

Использование предложенной методики квалиметрической оценки близости цифровых двойников-аналогов проектируемой ГПМ при конструировании обеспечивает возможность поиска и сравнительной оценки из множества цифровых двойников-аналогов проектируемой ГПМ нескольких аналогов, наиболее полно соответствующих требованиям к ГПМ, установленным потребителем, и выбора из них цифрового двойника-прототипа проектируемой ГПМ.

### **2.3 Анализ надежности грузоподъемных машин на стадии конструкторской подготовки производства**

Анализ надежности грузоподъемных машин на стадии конструкторской подготовки производства позволяет оценить способность грузоподъемной машины выполнить установленные требования по долговечности и динамику качества ГПМ на последующих стадиях жизненного цикла. Процесс анализа долговечности в соответствии с ГОСТ Р 27.013-2019 [58] включает определение влияния эксплуатационных нагрузок на ГПМ в течение ее жизненного цикла, определение величины и расположения значимых нагрузок и вероятных мест отказа (трещин) с использованием метода конечных элементов. Результатом анализа долговечности является предполагаемая наработка до отказа.

При изготовлении или в процессе эксплуатации в элементах несущих металлических конструкций грузоподъемных машин могут образовываться как технологические, так и усталостные трещины. Сопротивление металлической конструкции развитию трещин называют трещиностойкостью [114].

Известная концепция безопасного повреждения базируется на предположении, что в любой металлической конструкции, даже новой, всегда существуют дефекты, которые длительное время могут оставаться необнаруженными. Размеры выявляемых дефектов определяются разрешающей способностью применяемых средств контроля. Все дефекты, которые остаются за пределами возможностей средств контроля, остаются необнаруженными и, присутствуя в металлической конструкции, представляют потенциальную опасность для ее эксплуатации.

Для оценки живучести и остаточного ресурса металлических конструкций, а также для оценки влияния технологических и эксплуатационных дефектов на их несущую способность, необходимо иметь расчетный аппарат прогнозирования поведения металлических конструкций с трещинами при эксплуатационных нагрузках, который включает методы механики разрушения с использованием коэффициента интенсивности напряжений в качестве основной характеристики

напряженно-деформированного состояния материала вблизи вершины трещины [142].

Анализ долговечности ГПМ включает оценку напряжений в окрестностях вершины трещины элемента металлоконструкции ГПМ и коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины. Для их вычисления в САЕ-системе автоматизированного проектирования и расчета APM WinMachine были построены конечно-элементные модели металлической конструкции коробчатого сечения. В опорном сечении моделей моделировались трещиноподобные дефекты различного размера  $a$ , мм, или относительного размера  $\alpha = a/B$ .

Целью исследования является выявление влияния нагрузок различных интенсивностей на долговечность металлоконструкции коробчатого сечения с трещиной. Для вычисления напряжений вокруг вершины трещины и КИН в наиболее опасном сечении II (рисунок 1.17), соответствующем середине пролета, оставляем только одну половину балки мостового крана, со стороны середины балки в опоре создаем трещину, а остальное сечение жестко закрепляем, а на конце балки прикладываем нагрузку, создающую в середине балки максимальный изгибающий момент. В итоге получается расчетная модель для определения напряжений и КИН (рисунок 2.8), которая реализована в САЕ-системе автоматизированного проектирования и расчета APM WinMachine [42].

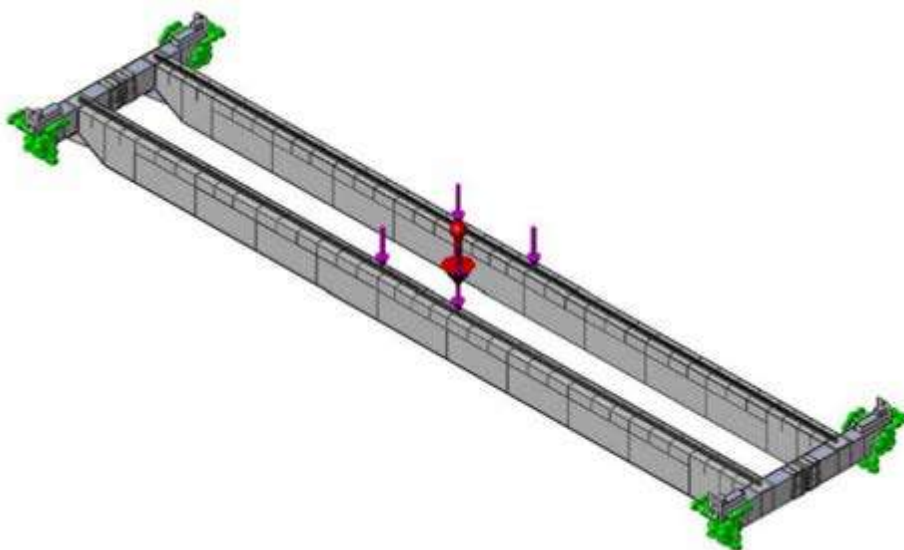


Рисунок 2.8 – 3D-модель пролетного строения мостового крана

Для расчета величины  $K_I$  с помощью МКЭ требуется, чтобы решение для напряжений и перемещений имело достаточно высокую точность в окрестности вершины трещины. При использовании обычных элементов нельзя ожидать, что точность расчета напряжений и деформаций в окрестности вершины трещины будет высокой [93, 111]. Поэтому при определении величины  $K_I$  с целью повышения точности решения у вершины трещины применялось разбиение на малые элементы (мелкая дискретизация) с шагом разбиения 0,1 мм с постепенным увеличением шага при отдалении от нее (рисунок 2.9).

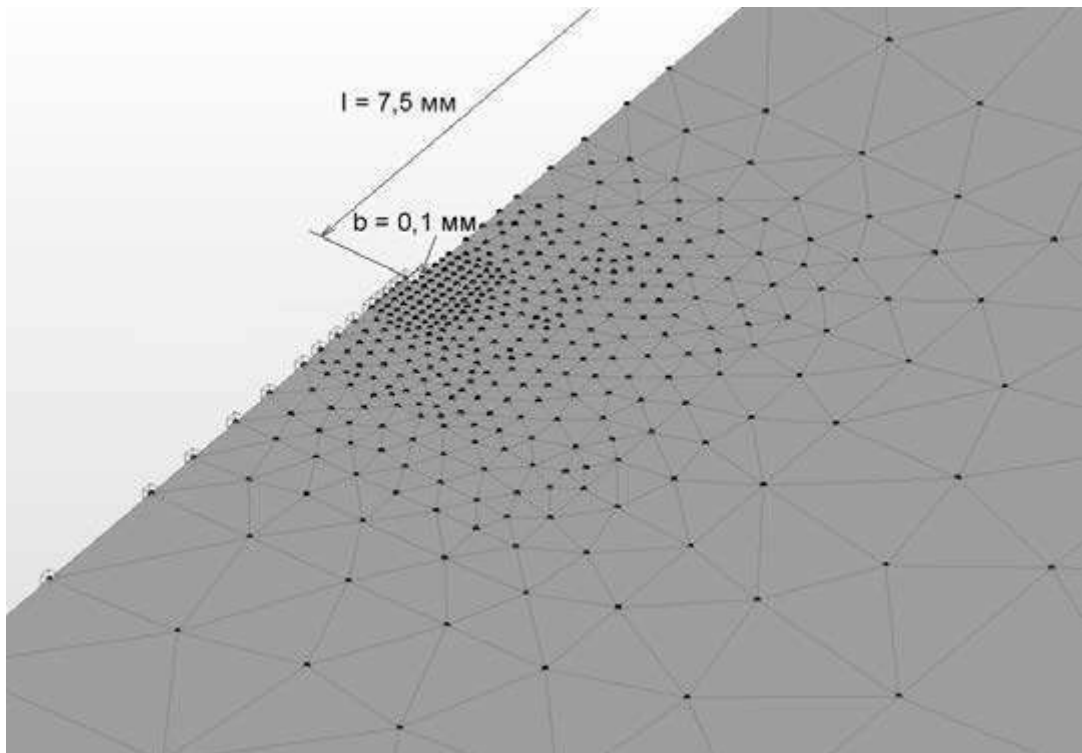


Рисунок 2.9 – Моделирование трещины в APM WinMachine

Проводился расчет КИН в вершине трещины элемента металлоконструкции с размерами поперечного сечения  $B$  и напряжения  $\sigma$  на расстоянии  $r$  от вершины трещины с целью построения функций  $K_I(\alpha)$  и  $\sigma(r)$ . Расчеты проводились в пределах зоны накопления упругопластических повреждений [147], там, где напряжения частично превышают предел текучести  $\sigma_T$ . При использовании сталей других марок соответственно изменится и размер пластической зоны, в



пределах которой будет производиться расчет зависимостей КИН  $K_I(\alpha)$  и напряжений  $\sigma(r)$ .

В результате проведенного численного эксперимента были определены значения напряжений и КИН при номинальных напряжениях в рассматриваемом сечении металлической конструкции 50, 75 и 100 МПа соответственно (рисунки 2.10 – 2.13, таблица 2.4).

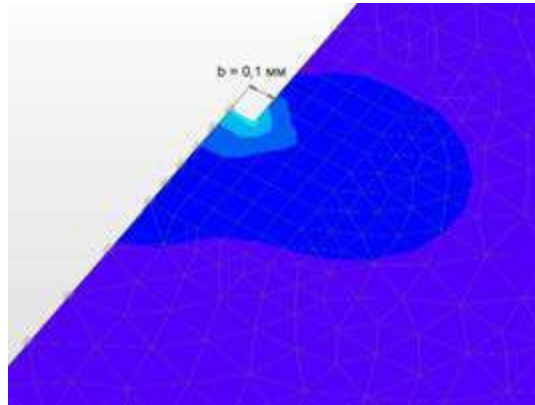


Рисунок 2.10 – Карта напряжений вокруг трещины в APM WinMachine

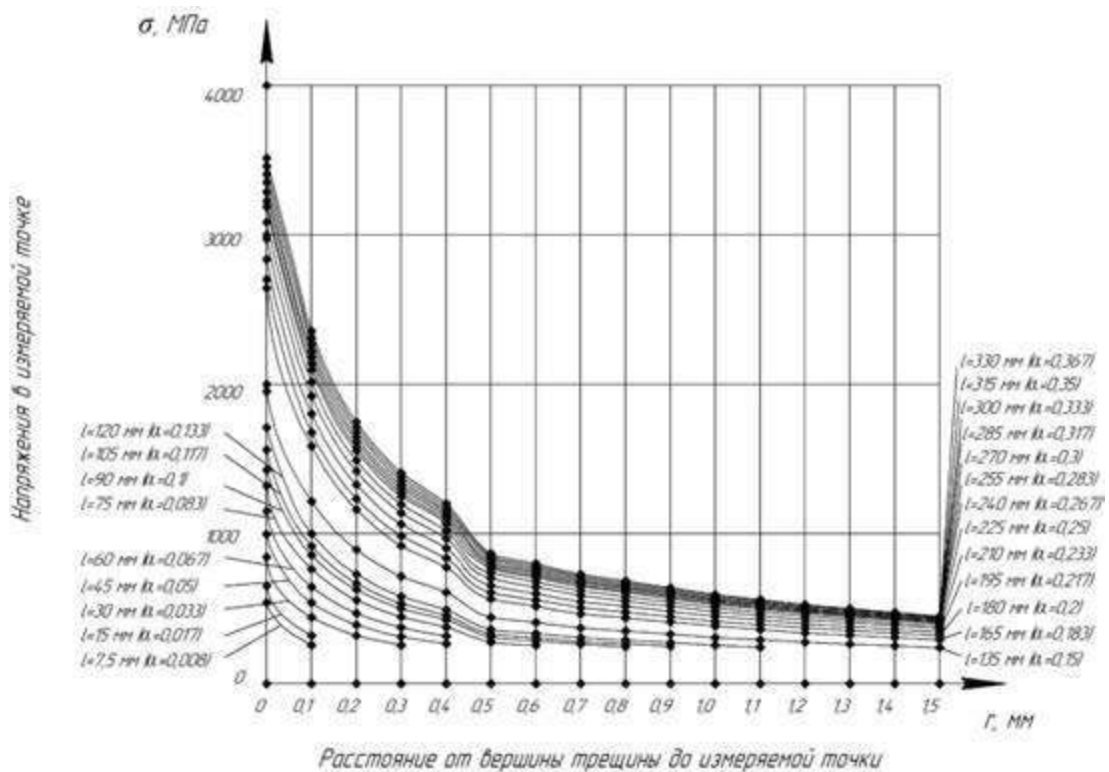


Рисунок 2.11 – Результаты исследования в APM WinMachine  
(напряжения при  $\sigma = 50$  МПа)

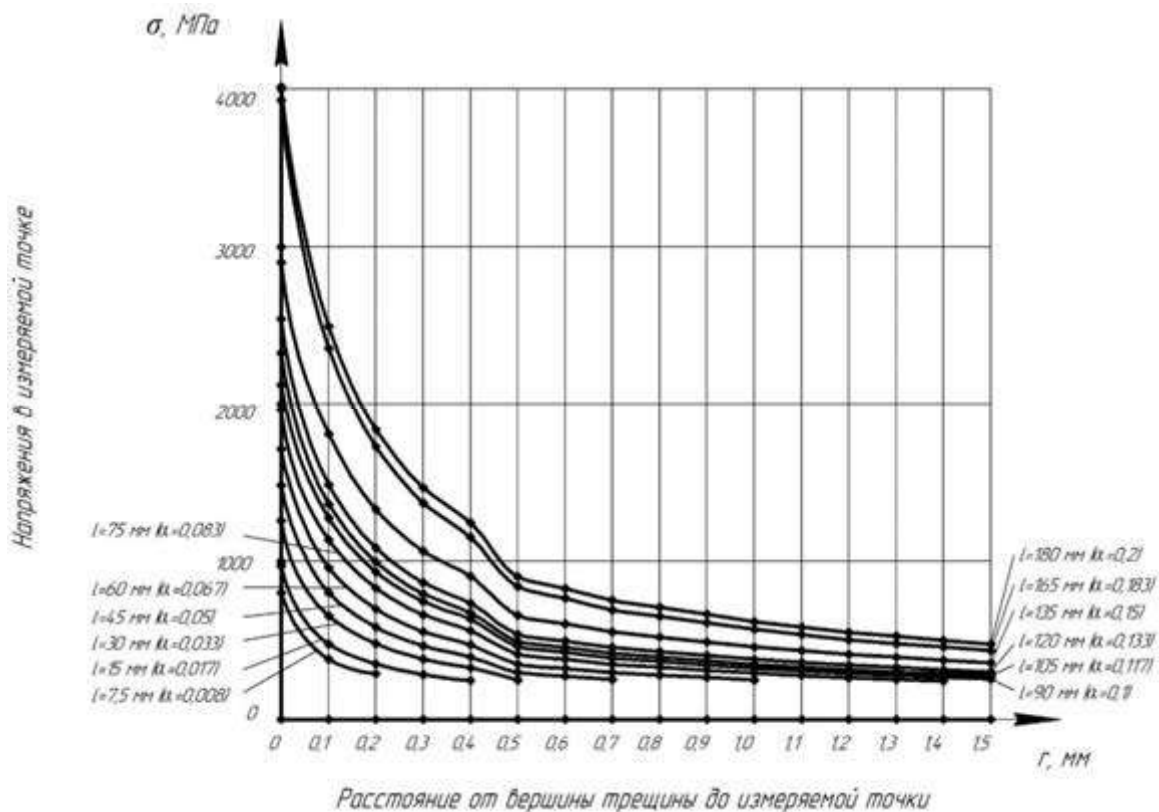


Рисунок 2.12 – Результаты исследования в APM WinMachine  
(напряжения при  $\sigma = 75$  МПа)

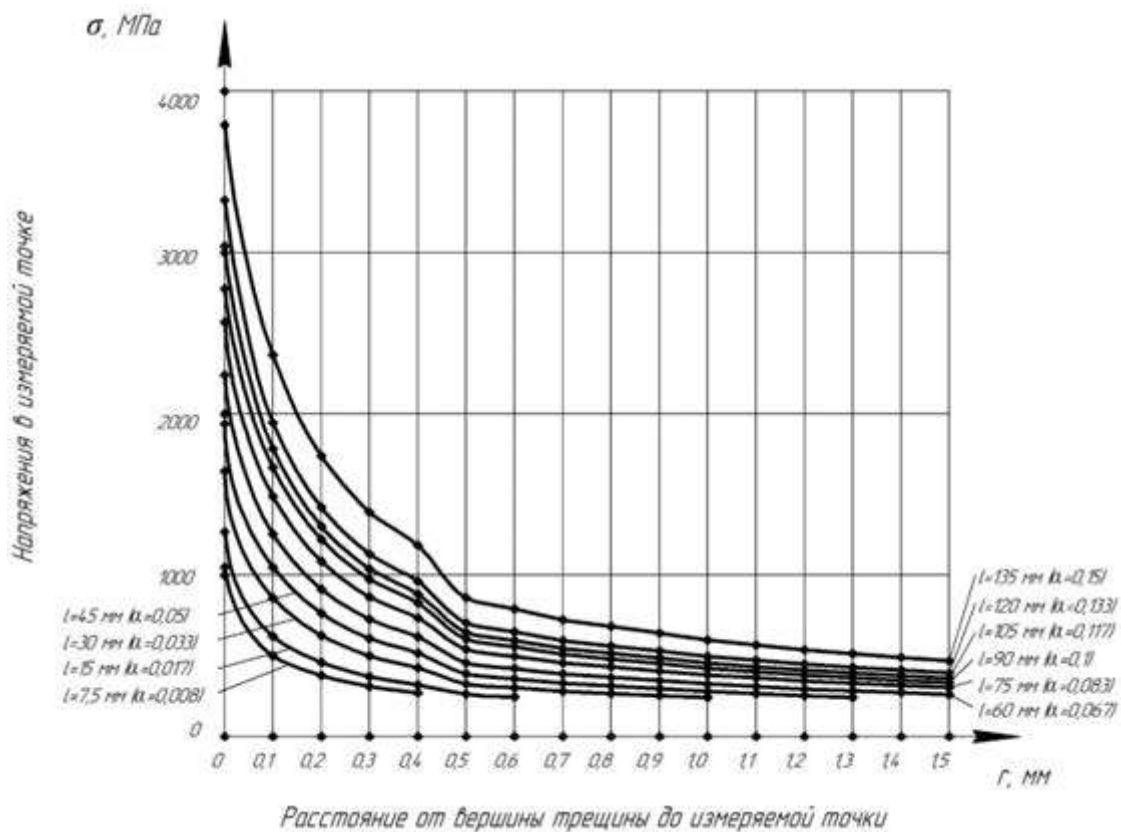


Рисунок 2.13 – Результаты исследования в APM WinMachine  
(напряжения при  $\sigma = 100$  МПа)

Таблица 2.4 – Значения КИН при  $\sigma=50, 75, 100$  МПа

$a, \text{ мм}$	7,5	15	30	45	60	75	90	105	120	135	165	180
$\alpha$	0,008	0,017	0,033	0,050	0,067	0,083	0,100	0,117	0,133	0,150	0,183	0,200
$\sigma = 50 \text{ МПа}$	6,45	8,04	11,22	13,60	16,25	18,10	19,61	20,72	22,16	26,13	32,86	35,53
$\sigma = 75 \text{ МПа}$	9,90	12,25	16,06	18,71	21,51	24,71	27,37	29,37	32,03	33,41	39,00	41,72
$\sigma = 100 \text{ МПа}$	13,24	15,63	19,91	23,36	27,26	32,12	35,80	38,41	41,88	43,48	45,45	47,20

$a, \text{ мм}$	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330
$\alpha$	0,217	0,233	0,250	0,267	0,283	0,300	0,317	0,333	0,350	0,367
$\sigma = 50 \text{ МПа}$	38,30	40,97	43,08	44,96	45,88	46,87	47,75	48,70	49,65	50,60
$\sigma = 75 \text{ МПа}$	44,34	46,70	49,11	51,40	53,47	55,56	57,54	59,31	61,09	62,75
$\sigma = 100 \text{ МПа}$	48,90	51,22	53,51	55,62	57,45	59,21	60,80	62,14	63,38	64,45

Полученные значения КИН с помощью программы MS Excel были аппроксимированы степенными функциональными зависимостями  $K_I(\alpha)$  (рисунок 2.14) [142]:

- при 50 МПа:

$$K_I(\alpha) = 90,286 \cdot \alpha^{0,63}; \quad (2.3)$$

- при 75 МПа:

$$K_I(\alpha) = 94,961 \cdot \alpha^{0,64}; \quad (2.4)$$

- при 100 МПа:

$$K_I(\alpha) = 99,642 \cdot \alpha^{0,65}, \quad (2.5)$$

где  $\alpha$  – относительный размер трещины.

Итоговые значения КИН можно получить и для других напряжений, используя полученные данные по  $\sigma=50, 75, 100$  МПа путем интерполяции их значений.

Если напряжение  $\sigma = 0 \dots 50$  МПа, то КИН определяется по формуле:

$$K_{(\sigma=0 \dots 50)} = \frac{\sigma_{(0 \dots 50)}}{50} \cdot K_{(\sigma=50)}.$$

Если напряжение  $\sigma = 50 \dots 75$  МПа, то КИН определяем по формуле:

$$K_{(\sigma=50\dots75)} = K_{(\sigma=50)} + \frac{\sigma_{(50\dots75)} - 50}{25} \cdot (K_{(\sigma=75)} - K_{(\sigma=50)}).$$

Если напряжение  $\sigma = 75\dots100$  МПа, то КИН определяем по формуле:

$$K_{(\sigma=75\dots100)} = K_{(\sigma=75)} + \frac{\sigma_{(75\dots100)} - 75}{25} \cdot (K_{(\sigma=100)} - K_{(\sigma=75)}).$$

Если напряжение  $\sigma > 100$  МПа, то КИН определяем по формуле:

$$K_{(\sigma>100)} = K_{(\sigma=100)} + \frac{\sigma_{(>100)}}{25} \cdot (K_{(\sigma=100)} - K_{(\sigma=75)}).$$

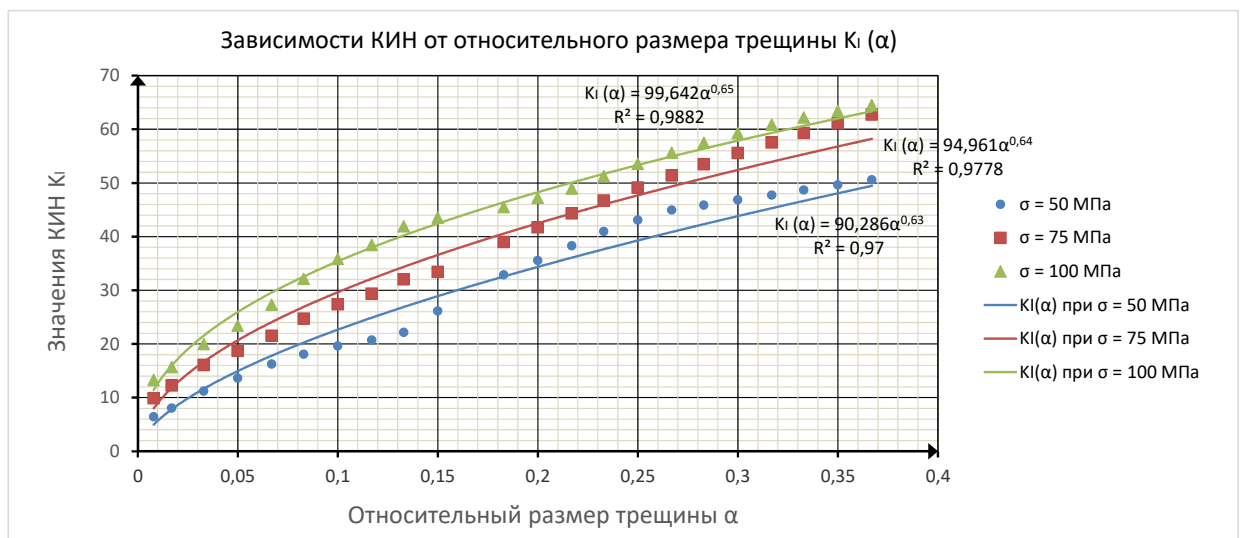


Рисунок 2.14 – Функции  $K_I(\alpha)$  при напряжениях 50, 75 и 100 МПа

На основе полученных данных можно разработать инженерную методику анализа долговечности ГПМ при циклическом нагружении, так как для расчета трещиностойкости по зависимостям (1.2) или (1.3) требуется обработка большого количества справочных данных, например, представленных в источниках [116, 117]. Тогда на основе определенных выше функций  $K_I(\alpha)$  (2.3) – (2.5) можно решить проблему нахождения  $K$ -тарировки  $\xi_K$  и определить предполагаемую наработку до отказа в виде числа циклов работы грузоподъемной машины до разрушения  $Z_a$ , при котором произойдет подрастание трещины до критического размера, по формуле [142]:

$$Z_a = \frac{\gamma d N (\gamma_n \gamma_m \Delta K^*)^q \cdot B^2}{\zeta_{ea} v^*} \int_{\alpha_0}^{\alpha_1} \frac{da}{K_I(\alpha)^q}, \quad (2.6)$$

где  $B$  – ширина пояса пролетной балки с трещиной;  $K_I(\alpha)$  – функция изменения КИН от относительной длины трещины.

Поскольку значение показателя  $q$  в формуле (2.6) мало отличается от показателя  $m$  для сварных узлов, то для элементов, нагружаемых знакопостоянными циклами растяжения ( $R \geq 0$ ), можно считать  $\zeta_{ea} \approx \zeta_e$  и пользоваться рекомендациями, приведенными в источниках [8, 25]. Такая ситуация, в частности, имеет место для главных балок мостовых кранов [113, 114].

Для проведения численного эксперимента определим расчетные нагрузки на примере данных мостового крана: грузоподъемность  $Q = 2000$  кг; пролет  $L = 22,5$  м; масса главной балки  $m_{ГБ} = 4154$  кг; масса грузовой тележки  $m_T = 6300$  кг; скорость подъема  $v = 10$  м/мин; средний режим работы; геометрические параметры коробчатого сечения главной балки:  $B = 530$  мм;  $H = 1216$  мм;  $t_c = 5$  мм;  $t_{II} = 8$  мм;  $b = 480$  мм [45].

Данные взяты с реальной конструкции мостового крана, изготовленного на заводе ООО «Стройтехника» (г. Донской Тульской области).

Значение динамического коэффициента для кранов мостового типа общего назначения определяют в зависимости от типа привода механизма подъема (для двигателя с системой плавного регулирования скорости) [59]:

$$\psi_2 = 1,05 + 0,25 \cdot v,$$

где  $v$  – скорость подъема.

$$\psi_2 = 1,05 + 0,25 \cdot 10 / 60 = 1,09.$$

Динамический коэффициент для I расчетного случая принимают равным [59]:

$$\psi_1 = 0,5(\psi_2 - 1) + 1 = 0,5 \cdot (1,09 - 1) + 1 = 1,046.$$

Значения масс грузов, поднимаемых мостовым краном среднего режима работы (рисунок 2.15 [83]):

$$m_1 = Q = 20000 \text{ кг};$$

$$m_2 = 0,75 \cdot Q = 15000 \text{ кг};$$

$$m_3 = 0,2 \cdot Q = 4000 \text{ кг};$$

$$m_4 = 0,05 \cdot Q = 1000 \text{ кг}.$$

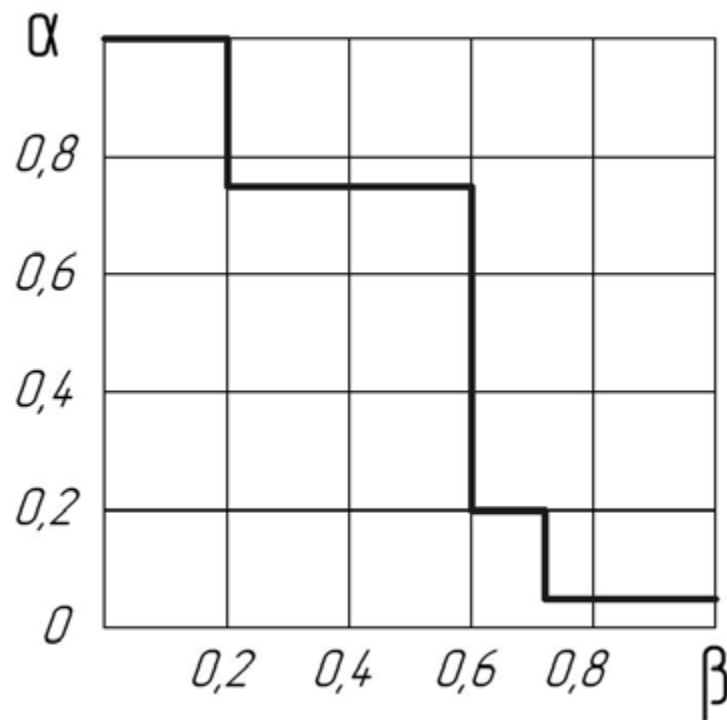


Рисунок 2.15 – Усредненный график загрузки механизма подъема мостового крюкового крана среднего режима работы

Нагрузки, действующие на металлоконструкцию по графику среднего режима работы (расчетный случай Ia) [113]:

$$P_1 = \frac{m_T \cdot 9,81}{4} + \frac{\psi_1 \cdot m_1 \cdot 9,81}{4} = 66750, \text{ Н};$$

$$P_2 = \frac{m_T \cdot 9,81}{4} + \frac{\psi_1 \cdot m_2 \cdot 9,81}{4} = 53920, \text{ Н};$$

$$P_3 = \frac{m_T \cdot 9,81}{4} + \frac{\psi_1 \cdot m_3 \cdot 9,81}{4} = 25710, \text{ Н};$$

$$P_4 = \frac{m_T \cdot 9,81}{4} + \frac{\psi_1 \cdot m_4 \cdot 9,81}{4} = 18020, \text{ Н.}$$

Минимальная нагрузка, соответствующая работе крана без груза:

$$P_0 = \frac{m_T \cdot 9,81}{4} = 15450, \text{ Н.}$$

Определяем соответствующие максимальные изгибающие моменты:

$$M_{\max 1} = \frac{9,81 \cdot m_{ГБ} \cdot L}{8} + \frac{9,81 \cdot (m_T + \psi_1 \cdot m_1) \cdot L}{8} = 8,655 \cdot 10^5, \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\max 2} = \frac{9,81 \cdot m_{ГБ} \cdot L}{8} + \frac{9,81 \cdot (m_T + \psi_1 \cdot m_2) \cdot L}{8} = 7,213 \cdot 10^5, \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\max 3} = \frac{9,81 \cdot m_{ГБ} \cdot L}{8} + \frac{9,81 \cdot (m_T + \psi_1 \cdot m_3) \cdot L}{8} = 4,039 \cdot 10^5, \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\max 4} = \frac{9,81 \cdot m_{ГБ} \cdot L}{8} + \frac{9,81 \cdot (m_T + \psi_1 \cdot m_4) \cdot L}{8} = 3,173 \cdot 10^5, \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\max 0} = \frac{9,81 \cdot m_{ГБ} \cdot L}{8} = 1,146 \cdot 10^5, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Далее определяем момент инерции сечения по формуле:

$$J_x = \frac{B \cdot H^3}{12} - \frac{b \cdot (H - 2 \cdot t_{II})^3}{12} = 0,01, \text{ м}^4.$$

Находим момент сопротивления сечения по формуле:

$$W_x = \frac{J_x}{y},$$

где  $y = H/2 = 0,608$  м. Тогда

$$W_x = \frac{0,01}{0,608} = 0,017 \text{ м}^3.$$

В итоге определяем соответствующие максимальные напряжения, действующие на металлоконструкцию:

$$\sigma_{\max 1} = \frac{M_{\max 1}}{W_x} = 51,123 \text{ МПа}; \quad \sigma_{\max 2} = \frac{M_{\max 2}}{W_x} = 42,601 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\max 3} = \frac{M_{\max 3}}{W_x} = 23,854 \text{ МПа}; \quad \sigma_{\max 4} = \frac{M_{\max 4}}{W_x} = 18,741 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\min} = \frac{M_{\max 0}}{W_x} = 6,77 \text{ МПа.}$$

Данный расчет был произведен в программе Mathcad. Эти данные далее использованы для расчета запаса циклической трещиностойкости.

Полученные данные использованы для вычисления запаса циклической трещиностойкости в среде Mathcad при  $\sigma = 50, 75, 100$  МПа.

С целью проверки адекватности зависимости (2.6) производился расчет долговечности мостового крана, представленного на рисунке 2.9, по методике [113] и зависимости (2.6). В результате при  $\sigma = 50$  МПа получены следующие значения:  $Z_a = 4,972 \cdot 10^5$  при расчете по методике [113] (приложение Б) и  $Z_a = 5,155 \cdot 10^5$  при расчете по зависимости (2.6) (приложение В). Расхождение составило 3,68 %, что свидетельствует об адекватности зависимости (2.6).

При  $\sigma = 75$  МПа получены следующие значения:  $Z_a = 4,736 \cdot 10^5$  при расчете по методике [113] (приложение Б) и  $Z_a = 4,881 \cdot 10^5$  при расчете по зависимости (2.6) (приложение В). Расхождение составило 3,06 %, что свидетельствует об адекватности зависимости (2.6).

При  $\sigma = 100$  МПа получены следующие значения:  $Z_a = 4,365 \cdot 10^5$  при расчете по методике [113] (приложение Б) и  $Z_a = 4,659 \cdot 10^5$  при расчете по зависимости (2.6) (приложение В). Расхождение составило 6,74 %, что свидетельствует об адекватности зависимости (2.6).

Условие способности грузоподъемной машины выполнить установленные требования по долговечности в период между ее полными техническими освидетельствованиями (ПТО), проводимыми раз в каждые три года в рамках нормативного срока службы, имеет вид:

$$Z_a \geq Z_d = n_{\text{ц}} n_{\text{см}} n_d N, \quad (2.7)$$

где  $Z_d$  – число циклов нагружения за срок между полными техническими освидетельствованиями;  $n_{\text{ц}}$  – число циклов в смену;  $n_{\text{см}}$  – число смен в сутках;



$n_d$  – число рабочих дней в году;  $N = 3$  года – период эксплуатации крана между полными техническими освидетельствованиями.

По результатам исследования может быть предложена следующая инженерная методика анализа долговечности ГПМ и прогнозирования ее безопасной эксплуатации на срок, до следующего полного технического освидетельствования [142]:

1. Вычисляются действующие напряжения при различных уровнях нагрузок.

2. В зависимости от уровня номинального напряжения в наиболее опасном сечении принимается та или иная зависимость  $K_I(\alpha)$ .

3. По формуле (2.6) рассчитывается значение предполагаемой наработки до отказа в виде числа циклов работы грузоподъемной машины до разрушения  $Z_a$ .

4. Предполагаемая наработка до отказа  $Z_a$  сравнивается с допускаемым числом циклов  $Z_d$  (интервал между ПТО крана). Если  $Z_a \geq Z_d$ , то условие долговечности выполняется, а это значит, что даже при невыявленной трещине при ПТО металлоконструкция мостового крана будет служить  $Z_a$  циклов. А если  $Z_a < Z_d$ , то тогда необходимо вносить конструктивные изменения в металлоконструкцию для обеспечения выполнения условия (2.7).

## 2.4 Выводы

1. С целью выявления взаимодействия процесса конструкторской подготовки производства с другими процессами в рамках сети процессов предприятия выполнено его моделирование с использованием унифицированного языка моделирования UML и методологии структурного анализа и проектирования IDEF. Разработанная структурно-функциональная модель процесса конструкторской подготовки производства позволила установить, что концепция повышения его эффективности и качества должна предусматривать

практическую стандартизацию принимаемых проектных решений на основе базы данных цифровых двойников грузоподъемных машин и управление взаимодействием между участниками процесса аналогового проектирования грузоподъемных машин на основе регрессионного анализа ресурсоемкости грузоподъемной машины.

2. Повысить качество ГПМ, ускорить и удешевить конструкторскую подготовку производства предложено на основе принципов аналогового проектирования и выбора цифрового двойника-прототипа с использованием разработанной методики квалитметрической оценки близости (уровня унификации) цифровых двойников-аналогов проектируемой грузоподъемной машины по значению коэффициента близости цифрового двойника-аналога к проектируемой ГПМ по показателям качества ГПМ (коэффициенту сходства), использование которого в процессе конструкторской подготовки их производства, обеспечивает возможность выявления и сравнительной оценки из множества возможных аналогов нескольких, наиболее унифицированных с проектируемой ГПМ по выполняемым функциям и обеспечивающих ее качество.

3. Предложена методика анализа надежности грузоподъемных машин на стадии конструкторской подготовки производства, позволяющая оценить способность грузоподъемной машины выполнить установленные требования по долговечности, определяемой предполагаемой наработкой до отказа, и динамику качества ГПМ на последующих стадиях жизненного цикла, а также учитывающая зависимость долговечности грузоподъемных машин от относительной длины трещины в металлоконструкции характерного для ГПМ коробчатого сечения при различных уровнях действующих нагрузок, полученную с использованием метода конечных элементов.

### **3 ПРАКТИЧЕСКАЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПРИНИМАЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ КОНСТРУКТОРСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ**

#### **3.1 Разработка базы данных грузоподъемных машин**

В настоящее время ни один процесс конструирования не обходится без широкого использования типовых, унифицированных и, в необходимых случаях, стандартизованных конструктивных элементов (крепежных изделий, допусков и посадок, узлов и деталей общемашиностроительного применения, различных типов стандартных соединений и др.). Это позволяет повысить эффективность работы конструктора и производственного процесса в целом, снизить материалоемкость и трудоемкость изготовления изделий при сохранении их качества, сократить сроки поставки готовых изделий заказчику [85]. При этом достигается определенность конструкции ГПМ и, как следствие, снижается риск выпуска несоответствующей продукции. Для применения данного подхода в производстве грузоподъемных машин и с целью практической стандартизации принимаемых в ходе конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин проектных решений на основе данных по мостовым кранам, выпущенным предприятием ООО «Стройтехника» (г. Донской Тульской области), была создана база данных их цифровых двойников, включая описание типовых узлов и комплектующих изделий (таблица 3.1) [17].

В представленную базу данных грузоподъемных машин были включены:

- значения показателей качества, установленных потребителем при заключении контракта на изготовление мостового крана: грузоподъемность, т; пролет, м; высота главного подъема, м; высота вспомогательного подъема, м; база крана, м; высота крана, м; скорости передвижения крана и тележки (тали), м/мин;



Продолжение таблицы 3.1

№	Тип подкранового пути	База тележки, м	Колея тележки, м	Высота перил тележки, м	Тип кабины	Тип моста	Тип тележки	механизм подъема				механизм передвижения тележки				
								двигатель	тормоз	редуктор	Ø барабана	Л барабана	двигатель	тормоз	редуктор	Ø колеса
1	Рельс Р43	1,5	1,6	1	закрытая	двухбалочный	опорная	5АМ280S6, IM 1002; 75 кВт; 990 об/мин	ДВЕ-1-450-1900-ЕВ80/60-У2	ЦЗУ-400КМ-40-11(21)ЦвхМ1	512 мм	1200 мм	5АМ112М4, IM2001; 5,5 кВт; 1440 об/мин	ТКГ-160 У2	2ЦЗвкф-160-25-37Пшл-У1	250 мм
2	Двугавр 36М	1,5	2	0,6	-	двухбалочный	опорная	ДМТКФ 132L6-У1; 75 кВт; 900 об/мин	ТКГ-200 У2	1ЦЗУ-355М-200-11КвхМ У1	530 мм	1300 мм	ДМТКФ 012-6 У1; 2,2 кВт; 895 об/мин	ТКГ-200 У2	2ЦЗвк-160-40-26Пшл-У1	320 мм

Продолжение таблицы 3.1

№	механизм передвижения крана				механизм вспомогательного подъема				Трудоемкость изготовления крана, нормо-час	Материалоемкость крана, кг	Себестоимость крана, млн руб.	Дата изготовления	
	двигатель	тормоз	редуктор	Ø колеса	двигатель	тормоз	редуктор	Ø барабана					Л барабана
1	АИР180S4, IM2001; 22 кВт; 1465 об/мин	ТКГ-160 У2	3ЦЗвкф-200-31,5-37(38)Пшл-У1	710 мм	-	-	-	-	-	5518	19636	24,68	06.08.2020
2	ДМТКФ 111-6, IM2001; 3,5 кВт; 900 об/мин	ТКГ-160 У2	3ЦЗвкф-200-63-37(38)Пшл-У1	710 мм	МТКФ 311-6-У1; 11 кВт; 910 об/мин	ТКГ-200 У2	1ЦЗУ-250-63-11М-У1	325 мм	1000 мм	4283	12788	16,43	24.03.2020

Представленная в данной работе база данных реализована в среде PostgreSQL. С ее использованием инженер-конструктор получает возможность

оперативного определения основных типовых узлов и комплектующих изделий (двигатель, тормоз, редуктор и барабан механизмов главного и вспомогательного подъема; двигатель, тормоз, редуктор и ходовые колеса механизмов передвижения крана и тележки) на основе входных параметров заказа (тип крана, грузоподъемность, размер пролета, высота подъема главного и вспомогательного крюка, скорость передвижения крана и тележки, скорость подъема главного и вспомогательного крюка, группа режима работы крана, место установки), получаемых от маркетолога. При этом использование типовых узлов грузоподъемных машин в качестве окончательных или промежуточных проектных решений позволяет получить оперативные оценки показателей ресурсоемкости грузоподъемной машины и на их основе дать возможность маркетологу обоснованно согласовать с заказчиком цену грузоподъемной машины, специалисту службы снабжения – сформировать заказ на поставку исходных материалов, инженеру-конструктору – сократить время разработки конструкторской документации [20].

### **3.2 Модель процесса аналогового проектирования грузоподъемных машин**

Как было отмечено выше, одним из способов снижения трудозатрат на разработку конструкторской документации при производстве машин, в том числе грузоподъемных машин, является аналоговое проектирование [5, 7]. Практическое использование аналогового проектирования предполагает анализ значительного количества разработанных ранее проектных решений и выбор из них аналога по максимальному значению коэффициента подобия [11].

С целью оказания информационной поддержки принятия конструкторских решений при аналоговом проектировании грузоподъемных машин необходима формализация процесса конструкторской подготовки производства. В работах [13, 14, 106] обосновано применение для этих целей средств реляционной алгебры (алгебры отношений), так как именно реляционную модель данных

поддерживают многие широко распространенные в настоящее время СУБД. Поэтому в качестве методологической основы разработки модели процесса аналогового проектирования грузоподъемных машин использован подход, представленный в работах [13, 77].

Каждое отношение в соответствии с [13, 77] имеет свое название (имя) и формально схема отношения  $R$  описывается следующим образом [13, 30, 77, 92, 137]:

$$R(\underline{A_1}, A_2, A_3, \dots, A_k),$$

где  $\underline{A_1}, A_2, A_3, \dots, A_k$  – имена атрибутов (реквизитов) кортежа,  $k$  – число атрибутов. Для обозначения ключа отношения  $K$  подчеркиваются имена атрибутов ключа, а для обозначения имени отношения используется строчная буква  $r$ .

Формализация процесса конструкторской подготовки производства предполагает наличие двух отношений: отношения  $r_C$  со схемой  $R_C$  (также записывается как  $r_C(R_C)$ ), содержащего описание грузоподъемных машин, выпущенных предприятием, и отношения  $r_O$  со схемой  $R_O$  ( $r_O(R_O)$ ), описывающего полученные предприятием заказы на создание грузоподъемных машин, среди которых могут быть заказы, не принятые к реализации в результате анализа контракта маркетинговой, финансовой и конструкторской службами предприятия по методике, представленной в [12, 19, 133].

Над отношением  $r_C(R_C)$ , описывающем выпущенные предприятием грузоподъемные машины, возможны следующие операции, соответствующие операциям, которые выполняет конструктор при аналоговом проектировании:

1. Добавление записи при появлении информации о новой грузоподъемной машине.
2. Изменение информации во всех или некоторых атрибутах записи с описанием грузоподъемной машины.
3. Удаление записи с описанием грузоподъемной машины.

Перечисленные операции с применением операторов реляционной алгебры могут быть выражены следующим образом [13, 77]:

- добавление новой записи

$$ADD(r_C(R_C); A_{C.1} = Nom_C, \forall A_{C.i} = \{.. \}, \text{ где } i = 2, k-1);$$

- изменение записи

$$CH(r_C(R_C); A_{C.1} = Nom_C; A_{C.i} = \{\text{новое значение}\}, \text{ где } i = 1, k);$$

- удаление записи

$$DEL(r_C(R_C); A_{C.1} = Nom_C).$$

Здесь  $Nom_C$  – заводской номер грузоподъемной машины;  $A_{C.1}$  – ключевой атрибут, соответствующий заводскому номеру грузоподъемной машины;  $A_{C.i}$  –  $i$ -й атрибут отношения  $r_C(R_C)$ . В фигурных скобках « $\{.. \}$ » представлена операция, производимая под управлением субъекта и заключающаяся во вводе информации в соответствующий атрибут отношения  $r_C(R_C)$ .  $\forall A_{C.i}$  следует читать как «все атрибуты», т. е. представленная операция предполагает ввод информации во все атрибуты отношения  $r_C$ .

На предприятии ООО «Стройтехника» (г. Донской Тульской области) описанное отношение  $r_C(R_C)$  было заполнено информацией о выпущенных предприятием 1185 мостовых кранах. При этом в качестве атрибутов  $A_{C.i}$ , где  $i = 2, k-1$ , были использованы представленные в подразделе 3.1 показатели качества, установленные потребителем при заключении контракта на изготовление мостового крана, и показатели качества мостового крана, изготовленного по контракту.

В атрибут  $A_{C.k}$  отношения  $r_C$  при аналоговом проектировании мостового крана заносится значение коэффициента близости крана, описанного в данном кортеже отношения  $r_C$ , к проектируемому крану по параметрам заказа с номером  $Z$  (коэффициент сходства), вычисляемого по зависимости (2.1), с учетом числа анализируемых показателей качества ГПМ, используемых для расчета коэффициента подобия,  $N = 10$ .



Отношение  $r_O$  со схемой  $R_O$ , описывающее полученные предприятием заказы на создание грузоподъемных машин, формируется аналогичным образом. Отличие состоит только в наборе атрибутов отношения. В нем ключевой атрибут  $A_{O.1}$  соответствует номеру заказа на создание грузоподъемной машины, а в качестве остальных  $l-1$  атрибутов используются показатели качества, поступающие от потребителя при заключении контракта на изготовление мостового крана, описанные выше. Соответственно число атрибутов  $l$  в отношении  $r_O(R_O)$  меньше числа атрибутов  $k$  в отношении  $r_C(R_C)$ .

Здесь следует отметить, что ряд значений показателей качества спроектированного крана, соответствующих параметрам заказа на его изготовление, в ходе проектирования по согласованию с заказчиком могут быть изменены, обычно в сторону их улучшения. Поэтому первоначальное заполнение первых атрибутов отношения  $r_C(R_C)$  со 2-го по  $l$ -й при добавлении в него новой записи можно произвести на основе соответствующего кортежа отношения  $r_O(R_O)$ , содержащего информацию о заказе  $Nom_O$ , путем выполнения следующей операции:

$$ADD(r_C(R_C); A_{C.1} = Nom_O, \forall A_{C.i} = \pi(\sigma(r_O(R_O); A_{O.1} = Nom_O); i, \text{ где } i = 2, l).$$

При расчете коэффициента сходства  $K_C$ , значение которого заносится в атрибут  $A_{C.k}$  отношения  $r_C(R_C)$ , используется вспомогательное отношение  $r_{BK}$  со схемой  $R_{BK}(A_{BK1}, A_{BK2}, A_{BK3}, \dots, A_{BKl0})$ , содержащее значения весовых коэффициентов  $W_i$  показателей качества крана, используемых для расчета коэффициента сходства [11]:

- грузоподъемность крана  $A_{C.2}, A_{O.2} : A_{BK1} = 0,18;$
- пролет  $A_{C.3}, A_{O.3} : A_{BK2} = 0,15;$
- высота главного подъема  $A_{C.4}, A_{O.4} : A_{BK3} = 0,13;$
- база крана  $A_{C.5}, A_{O.5} : A_{BK4} = 0,04;$
- высота крана  $A_{C.6}, A_{O.6} : A_{BK5} = 0,02;$

- скорость передвижения крана  $A_{C.7}, A_{O.7} : A_{BK6} = 0,05$ ;
- скорость передвижения тележки (тали)  $A_{C.8}, A_{O.8} : A_{BK7} = 0,07$ ;
- скорость подъема главного крюка  $A_{C.9}, A_{O.9} : A_{BK8} = 0,09$ ;
- группа режима работы крана  $A_{C.10}, A_{O.10} : A_{BK9} = 0,16$ ;
- климатическое исполнение с категорией размещения  $A_{C.11}, A_{O.11} : A_{BK10} = 0,11$ .

В соответствии с [11] значения  $A_{C.2}, \dots, A_{C.9}$  и  $A_{O.2}, \dots, A_{O.9}$  могут быть заданы численно в соответствии со своей характеристикой (например, грузоподъемность крана  $Q$ , т; пролет  $L$ , м; высота главного подъема  $H_{ГЛ.П.}$ , м; база крана  $A_{кр.}$ , м; высота крана  $H_{кр.}$ , м; скорость передвижения крана  $v_{пер.кр.}$ , м/мин; скорость передвижения тележки (тали)  $v_{пер.т.}$ , м/мин; скорость подъема главного крюка  $v_{под.}$ , м/мин).

Для численного представления группы режима работы крана  $A_{C.10}, A_{O.10}$  и климатического исполнения с категорией размещения  $A_{C.11}, A_{O.11}$  формируются два вспомогательных отношения:  $r_{pp}$  со схемой  $R_{pp}(A_{pp1}, A_{pp2})$  и  $r_{ки}$  со схемой  $R_{ки}(A_{ки1}, A_{ки2})$ . Ключевые атрибуты  $A_{pp1}$  и  $A_{ки1}$  данных вспомогательных отношений содержат символьные обозначения группы режима работы крана и климатического исполнения с категорией размещения соответственно. Во вторые атрибуты отношений занесены численные значения атрибутов так, как это представлено в [11]. Например, группе режима работы крана АЗ по ГОСТ 34017-2016 [60] в отношении  $r_{pp}$  будет соответствовать кортеж  $\{АЗ, 3\}$ , а климатическому исполнению с категорией размещения ХЛ5.1 по ГОСТ 15150-69 [57] в отношении  $r_{ки}$  будет соответствовать кортеж  $\{ХЛ5.1, 2, 3\}$ .

Тогда процедуру определения коэффициента сходства для всех кортежей отношения  $r_C(R_C)$  грузоподъемной машине, описанной в заказе  $Nom_O$ , можно описать следующим образом:

$$CH \left( \begin{array}{l} r_C(R_C); \forall K; A_{C.k} = \\ = \sum_{i=1}^8 A_{ВКi} \cdot \left( 1 - \frac{\left| A_{C.i+1} - \pi(\sigma(r_O(R_O); A_{O.1} = Nom_O); i+1) \right|}{A_{C.i+1} + \pi(\sigma(r_O(R_O); A_{O.1} = Nom_O); i+1)} \right) + \\ + A_{ВК9} \cdot \left( 1 - \frac{\left| \pi(\sigma(r_{pp}(R_{pp}); A_{pp.1} = A_{C.10}); 2) - P_{ПК10} \right|}{\pi(\sigma(r_{pp}(R_{pp}); A_{pp.1} = A_{C.10}); 2) + P_{ПК10}} \right) + \\ + A_{ВК10} \cdot \left( 1 - \frac{\left| \pi(\sigma(r_{ки}(R_{ки}); A_{ку.1} = A_{C.11}); 2) - P_{ПК11} \right|}{\pi(\sigma(r_{ки}(R_{ки}); A_{ку.1} = A_{C.11}); 2) + P_{ПК11}} \right) \end{array} \right),$$

где  $K$  – ключ отношения и запись  $\forall K$  в соответствии с [13, 77] следует читать как «все записи с ключом  $K$ », т. е. представленная операция производит изменение значения атрибута  $A_{C.k}$  во всех кортежах отношения  $r_C(R_C)$ ;

$P_{ПК10} = \pi(\sigma(r_O(R_O); A_{O.1} = Nom_O); \pi(\sigma(r_{pp}(R_{pp}); A_{pp.1} = A_{C.10}); 2))$  – численное значение группы режима работы проектируемого крана;

$P_{ПК11} = \pi(\sigma(r_O(R_O); A_{O.1} = Nom_O); \pi(\sigma(r_{ки}(R_{ки}); A_{ку.1} = A_{C.11}); 2))$  – численное значение климатического исполнения с категорией размещения проектируемого крана.

При необходимости сохранения полученных результатов с высокими значениями коэффициента сходства для дальнейшей работы, используется отношение  $r_Z$  со схемой  $R_Z(\underline{A_{Z.1}}, \underline{A_{Z.2}}, A_{Z.3})$ , в котором в атрибуте  $A_{Z.1}$  содержится номер заказа на изготовление грузоподъемной машины  $Nom_O$ , в атрибуте  $A_{Z.2}$  – заводской номер грузоподъемной машины  $Nom_C$ , в атрибуте  $A_{Z.3}$  – коэффициент сходства грузоподъемной машины с заводским номером  $Nom_C$ , грузоподъемной машине, которую необходимо изготовить в соответствии с заказом  $Nom_O$ .

Для выполнения данной операции применяется следующая последовательность процедур, сформированная на основе представленной последовательности в [13, 77].

1. В промежуточное отношение  $r_{C.0}$  со схемой  $R_C$  заносятся все кортежи отношения  $r_C(R_C)$ , содержащие сведения об изготовленных на предприятии грузоподъемных машинах, у которых коэффициент сходства  $K_C > 0,9$ :

$$r_{C.0}(R_C) = \sigma(r_C(R_C); A_{C.k} > 0,9).$$

2. Производится логическое упорядочивание кортежей в промежуточном отношении  $r_{C.0}$  в порядке убывания коэффициента сходства  $K_{II}$ :

$$ORD(r_{C.0}; A_{C.0.k}; DESC).$$

3. В каждом кортеже отношения  $r_{C.0}$  производится изменение значения атрибута  $A_{C.0.2}$  на соответствующее ему значение ключевого атрибута  $A_{C.0.1}$ , содержащего заводской номер грузоподъемной машины  $Nom_C$ :

$$CH(r_{C.0}(R_C); \forall A_{C.0.2}; A_{C.0.2} = A_{C.0.1}).$$

4. В каждом кортеже отношения  $r_{C.0}$  производится изменение значения атрибута  $A_{C.0.1}$  на номер заказа на изготовление грузоподъемной машины  $Nom_O$ :

$$CH(r_{C.0}(R_C); \forall A_{C.0.1}; A_{C.0.1} = Nom_O).$$

5. Производится вставка кортежей из промежуточного отношения  $r_{C.0}$  элементов в отношение  $r_Z(R_Z)$ :

$$r_Z = r_Z \cup \pi(r_{C.0}; 1, 2, k)$$

В результате выполнения данной операции в отношение  $r_Z(R_Z)$  будут добавлены заводские номера грузоподъемных машин, наиболее соответствующих параметрам заказа  $Z$  на создание данной грузоподъемной машины. При этом степень соответствия определяется значением коэффициента сходства  $K_C > 0,9$ . Пороговое значение коэффициента сходства, равное в представленном примере 0,9, определяется конструкторско-технологической службой предприятия и может при необходимости изменяться.

При проведении оценке себестоимости изготовления проектируемого крана используется вспомогательное отношение  $r_{инф}$  со схемой  $R_{инф}(A_{инф1}, A_{инф2})$ , в котором в атрибуте  $A_{инф1}$  содержатся названия месяцев и лет, а в атрибуте

$A_{\text{инф}2}$  – индексы потребительских цен на товары и услуги по Российской Федерации в месяцах  $A_{\text{инф}1}$ , приведенные на официальном сайте Федеральной государственной службы государственной статистики [130].

В конечном итоге сформированная база данных цифровых двойников грузоподъемных машин, инфологическая модель которой представлена на рисунке 3.1, будет иметь следующую схему [10]:

$$R = \begin{cases} R_C(A_{C.1}, A_{C.2}, A_{C.3}, \dots, A_{C.k}), \\ R_O(A_{O.1}, A_{O.2}, A_{O.3}, \dots, A_{O.l}), \\ R_Z(A_{Z.1}, A_{Z.2}, A_{Z.3}), \\ R_{\text{ВК}}(A_{\text{ВК}1}, A_{\text{ВК}2}, A_{\text{ВК}3}, \dots, A_{\text{ВК}10}), \\ R_{\text{РР}}(A_{\text{РР}1}, A_{\text{РР}2}), \\ R_{\text{КИ}}(A_{\text{КИ}1}, A_{\text{КИ}2}), \\ R_{\text{инф}}(A_{\text{инф}1}, A_{\text{инф}2}) \end{cases}$$

Представленная база данных цифровых двойников грузоподъемных машин, используемая на ООО «Стройтехника», позволила предприятию производить оперативный оптимизационный выбор комплектующих изделий грузоподъемных машин, давать оперативный ответ заказчику о возможности выполнения его заказа на изготовление грузоподъемной машины, сократить время на разработку конструкторской документации.

### 3.3 Анализ требований потребителя к качеству грузоподъемных машин

Подготовку оперативного ответа заказчику о возможности выполнения его заказа на изготовление грузоподъемной машины, в соответствии с рисунком 2.2, маркетинговой службой предприятия в данной работе предлагается производить на основе разработанной методики анализа требований к ГПМ, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости грузоподъемных машин. Так как на предприятиях подъемно-транспортного машиностроения обычно уже имеются готовые типовые решения по проектированию грузоподъемных машин [98, 99] в

основе метода лежит классификация грузоподъемных машин, в том числе мостовых кранов, представленная в подразделе 1.1. Это позволяет на практике использовать принципы блочно-модульного и аналогового проектирования и повышать тем самым производственную технологичность выпускаемых предприятием грузоподъемных машин.

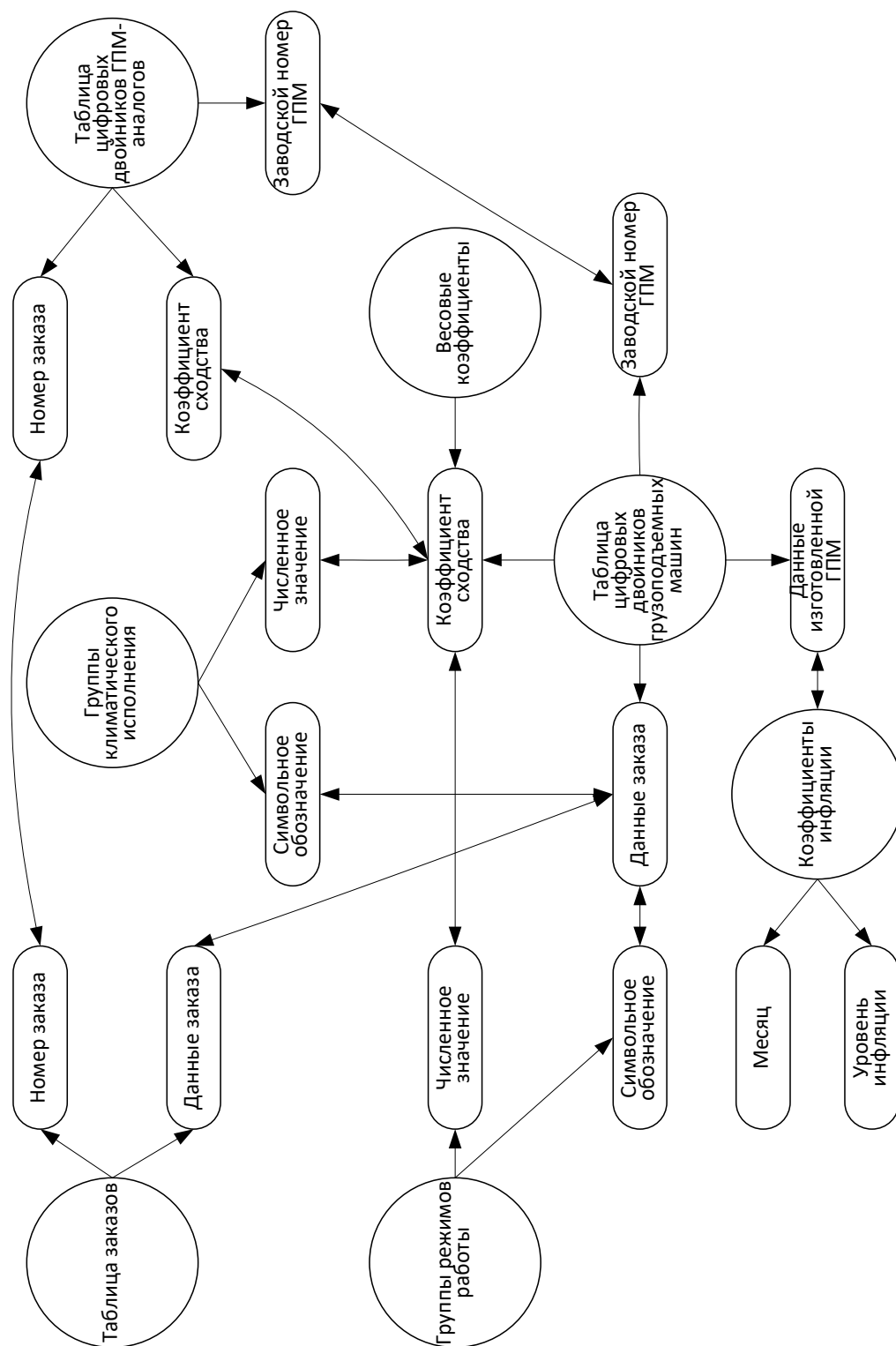


Рисунок 3.1 – Инфологическая модель базы данных цифровых двойников грузоподъемных машин

При проектировании грузоподъемных машин конструктором разрабатываются как типовые проектные решения по выбору сборочных единиц и комплектующих изделий, например, электродвигателей, редукторов, тормозов и т. п., так и оригинальные проектные решения по проектированию металлоконструкций. Поэтому при проектировании грузоподъемных машин необходимо соизмерять сроки разработки и освоения ее составных частей друг с другом и с машиной в целом. Согласованность сроков промышленного освоения составных комплектующих частей изделия и сроков постановки изделия на производство – один из важных факторов, который следует учитывать при организации конструкторско-технологической подготовки [6]. Для реализации данного подхода требуется оперативный анализ требований к ГПМ, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости грузоподъемных машин, включая различные показатели ресурсоемкости грузоподъемной машины: трудоемкости, материалоемкости и себестоимости изготовления.

Разработанная методика анализа требований к ГПМ, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости грузоподъемных машин ориентирована на то, чтобы конструктор выбрал из созданной базы данных цифровых двойников ГПМ оптимальное решение, а именно выбрал комплектующие изделия, подходящие для этого заказа с наименьшей стоимостью [15, 16, 18, 23, 51]. Предприятие в результате получает механизм для сопоставления требований заказчика грузоподъемных машин с имеющейся ресурсной базой.

На основе представленной выше базы данных цифровых двойников мостовых кранов проведен анализ и получены регрессионные зависимости взаимосвязи составляющих ресурсоемкости ГПМ – трудоемкости изготовления  $T$ , материалоемкости крана  $M$  и себестоимости изготовления  $S$  – и основных показателей качества мостового крана – грузоподъемности  $Q$ , пролета  $L$ , высоты главного подъема  $H_{\text{Гл.п.}}$ , базы  $A_{\text{кр.}}$  и высоты крана  $H_{\text{кр.}}$  – на основе использования усредненных значений по всем кранам, выпускаемым на

краностроительном предприятии, и эмпирического уравнения множественной регрессии вида [68, 127, 128]:

$$Y = b_0 + F_1(Q) + F_2(L) + F_3(H_{\text{гл.п.}}) + F_4(A_{\text{кр.}}) + F_5(H_{\text{кр.}}) + e, \quad (3.1)$$

где  $Y$  – выходная переменная,  $b_0$  – эмпирический коэффициент регрессии,  $F_1(Q)$ ,  $F_2(L)$ ,  $F_3(H_{\text{гл.п.}})$ ,  $F_4(A_{\text{кр.}})$ ,  $F_5(H_{\text{кр.}})$  – функции от основных показателей качества ГПМ,  $e$  – оценка случайной ошибки (отклонения).

Первоначально была пройдена проверка возможности получения зависимости трудоемкости, материалоемкости и себестоимости изготовления крана от основных параметров заказа с использованием Р-значения, коэффициента корреляции Пирсона и критерия Фишера.

С целью повышения точности регрессионных зависимостей перед началом расчета себестоимость изготовления ГПМ  $S$  пересчитывалась на текущий момент времени с учетом индексов потребительских цен на товары и услуги по Российской Федерации, приведенных на официальном сайте Федеральной государственной службы государственной статистики [130] по формуле

$$S_T = S_{\text{и}} \cdot \prod_{i=1}^N \left( \frac{\text{ИПЦ}_i}{100\%} \right),$$

где  $S_{\text{и}}$  – исходная себестоимость ГПМ в момент её выпуска, млн руб.,  $S_T$  – себестоимость ГПМ в текущий момент с учетом уровня инфляции, млн руб., ИПЦ – индекс потребительских цен в  $i$ -м месяце с момента выпуска ГПМ, %,  $N$  – число месяцев между моментом выпуска ГПМ и текущим моментом.

При оценке Р-значения нулевой гипотезой будет независимость трудоемкости, материалоемкости и себестоимости изготовления крана от грузоподъемности  $Q$ , пролета  $L$ , высоты главного подъема  $H_{\text{гл.п.}}$ , базы  $A_{\text{кр.}}$  и высоты крана  $H_{\text{кр.}}$  с уровнем значимости 0,05. Альтернативной гипотезой будет, соответственно, наличие соответствующей зависимости.

Результаты расчета Р-значения для исследуемых параметров заказа приведены в таблице 3.2.



Как видно из таблицы 3.2, Р-значение всех параметров заказа для всех исследуемых показателей ресурсоемкости, кроме высоты главного подъема в случае трудоемкости, меньше уровня значимости, что свидетельствует о наличии соответствующей зависимости между показателями ресурсоемкости и параметрами заказа.

Меру прямолинейной связи между показателями ресурсоемкости и параметрами заказа оценим с помощью коэффициента корреляции Пирсона, результаты расчета которого приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.2 – Результаты расчета Р-значения для исследуемых параметров заказа

Показатели ресурсоемкости Параметры крана	Трудоемкость изготовления крана $T$	Материалоемкость крана $M$	Себестоимость изготовления крана $S$
грузоподъемность $Q$	$2,29 \cdot 10^{-9}$	$1,20 \cdot 10^{-7}$	$8,95 \cdot 10^{-9}$
пролет $L$	$3,55 \cdot 10^{-8}$	$1,94 \cdot 10^{-9}$	$2,06 \cdot 10^{-8}$
высота главного подъема $H_{\text{гл.п}}$	$5,96 \cdot 10^{-2}$	$2,37 \cdot 10^{-2}$	$2,21 \cdot 10^{-2}$
база крана $A_{\text{кр.}}$	$2,25 \cdot 10^{-23}$	$1,56 \cdot 10^{-18}$	$4,86 \cdot 10^{-16}$
высота крана $H_{\text{кр.}}$	$1,05 \cdot 10^{-22}$	$5,57 \cdot 10^{-21}$	$1,16 \cdot 10^{-21}$

Результаты проведенного анализа с использованием шкалы Чеддока показали, что для всех показателей ресурсоемкости наблюдается очень высокая корреляция с базой и высотой крана, высокая корреляция с грузоподъемностью и пролетом и умеренная корреляция с высотой главного подъема.

Проведем оценку значимости независимых факторов в уравнении множественной регрессии с помощью F-теста. В данном случае нулевая гипотеза – равенство нулю коэффициентов при факторах регрессионной модели. Критическое значение при уровне значимости 0,05 для показателей

ресурсоемкости в проведенном исследовании равно 2,6335. Результаты расчета критерия Фишера для проведения F-теста приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.3 – Результаты расчета коэффициента корреляции Пирсона между показателями ресурсоемкости и параметрами заказа

Показатели ресурсоемкости Параметры крана	Трудоемкость изготовления крана $T$	Материалоемкость крана $M$	Себестоимость изготовления крана $S$
грузоподъемность $Q$	0,80	0,75	0,78
пролет $L$	0,76	0,8	0,77
высота главного подъема $H_{\text{гл.п}}$	0,31	0,37	0,38
база крана $A_{\text{кр.}}$	0,97	0,94	0,92
высота крана $H_{\text{кр.}}$	0,97	0,96	0,96

Таблица 3.4 – Результаты расчета коэффициента Фишера

Показатели ресурсоемкости Параметры крана	Трудоемкость изготовления крана $T$	Материалоемкость крана $M$	Себестоимость изготовления крана $S$
грузоподъемность $Q$	63,4115	43,7810	56,1340
пролет $L$	49,3511	64,3306	51,9691
высота главного подъема $H_{\text{гл.п}}$	3,7905	5,5948	5,7380
база крана $A_{\text{кр.}}$	580,1869	290,8777	200,0269
высота крана $H_{\text{кр.}}$	528,5152	414,2519	456,2650

Как видно из таблицы 3.4, значение критерия Фишера для всех параметров заказа для всех исследуемых показателей ресурсоемкости выше критического уровня, что свидетельствует о статистической значимости факторов регрессии.

Следующим шагом построения регрессионной зависимости является оценка линейной зависимости между факторами регрессии для обнаружения мультиколлинеарности. Результаты расчета коэффициента корреляции Пирсона между основными показателями качества мостового крана представлены на рисунке 3.2.

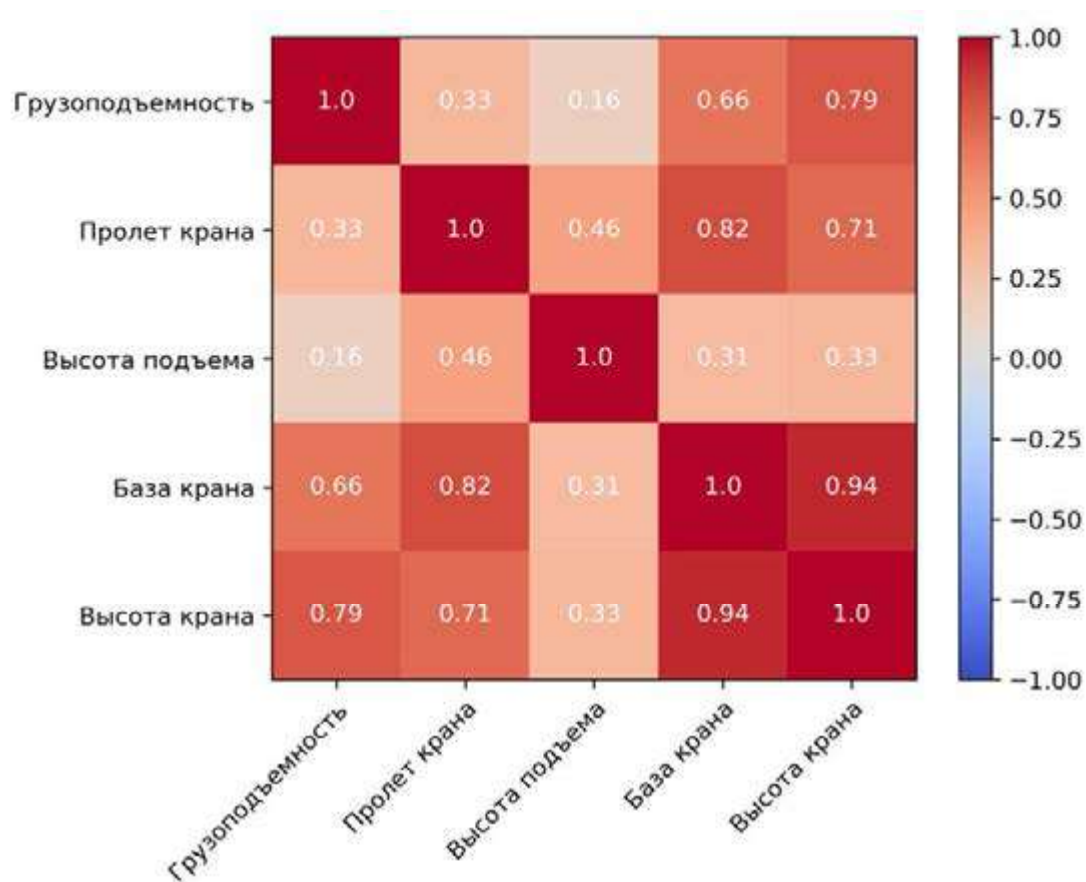


Рисунок 3.2 – Матрица корреляций для основных показателей качества мостового крана

Как видно из рисунка 3.2, наблюдается очень высокая корреляция между базой и высотой крана, высокая корреляция между грузоподъемностью и высотой крана, между пролетом и базой крана, между пролетом и высотой крана, заметная корреляция между грузоподъемностью и базой крана, умеренная корреляция между грузоподъемностью и пролетом крана, между пролетом крана и высотой

подъема, между высотой подъема и базой крана, между высотой подъема и высотой крана, слабая корреляция между грузоподъемностью и высотой подъема.

Проведенный анализ показал, что потенциально все рассмотренные показатели качества ГПМ могут быть использованы для построения эмпирического уравнения множественной регрессии. Для оценки вида функций от основных показателей качества ГПМ с использованием библиотеки для машинного обучения Scikit-learn [146] были построены одиночные регрессии основных показателей качества и составляющих ресурсоемкости ГПМ в виде полиномов первой, второй и третьей степеней. Оценка соответствия рассмотренных моделей данным производилась с использованием коэффициента детерминации  $R^2$ . Результаты расчета представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Коэффициент детерминации одиночных регрессий основных показателей качества и составляющих ресурсоемкости ГПМ

Показатель \ Степень	Трудоемкость			Материалоемкость			Себестоимость		
	x	x <sup>2</sup>	x <sup>3</sup>	x	x <sup>2</sup>	x <sup>3</sup>	x	x <sup>2</sup>	x <sup>3</sup>
Грузоподъемность	0,64	0,73	<b>0,89</b>	0,56	0,61	<b>0,79</b>	0,62	0,65	<b>0,81</b>
Пролет крана	0,59	<b>0,62</b>	0,62	0,65	<b>0,67</b>	0,67	0,6	<b>0,62</b>	0,63
Высота подъема	0,1	<b>0,35</b>	0,36	0,14	<b>0,31</b>	0,32	0,14	<b>0,29</b>	0,3
База крана	0,94	<b>0,95</b>	0,96	0,89	<b>0,92</b>	0,92	0,85	<b>0,88</b>	0,88
Высота крана	<b>0,94</b>	0,94	0,94	<b>0,92</b>	0,93	0,93	<b>0,93</b>	0,94	0,94

Анализ таблицы 3.5 показал, что для всех составляющих ресурсоемкости ГПМ функции от основных показателей качества будут иметь вид полинома третьей степени для грузоподъемности  $Q$ , полинома второй степени для пролета  $L$ , высоты главного подъема  $H_{ГЛ.П}$  и базы крана  $A_{кр.}$  и полинома первой степени для высоты крана  $H_{кр.}$ . Полученные регрессионные зависимости и исходные данные в виде диаграммы рассеяния представлены на рисунках 3.3-3.5.

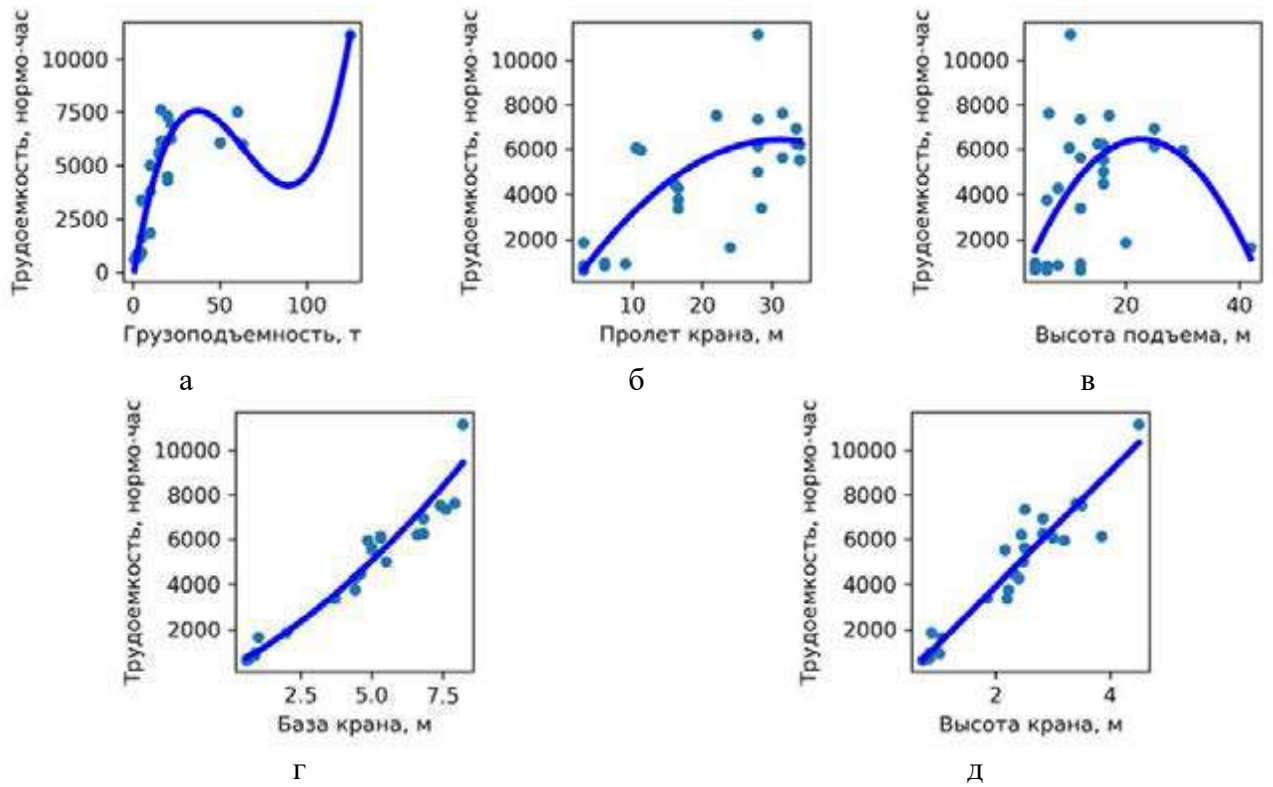


Рисунок 3.3 – Регрессионные зависимости трудоемкости изготовления ГПМ от

а) грузоподъемности, б) пролета, в) высоты главного подъема,

г) базы крана, д) высоты крана

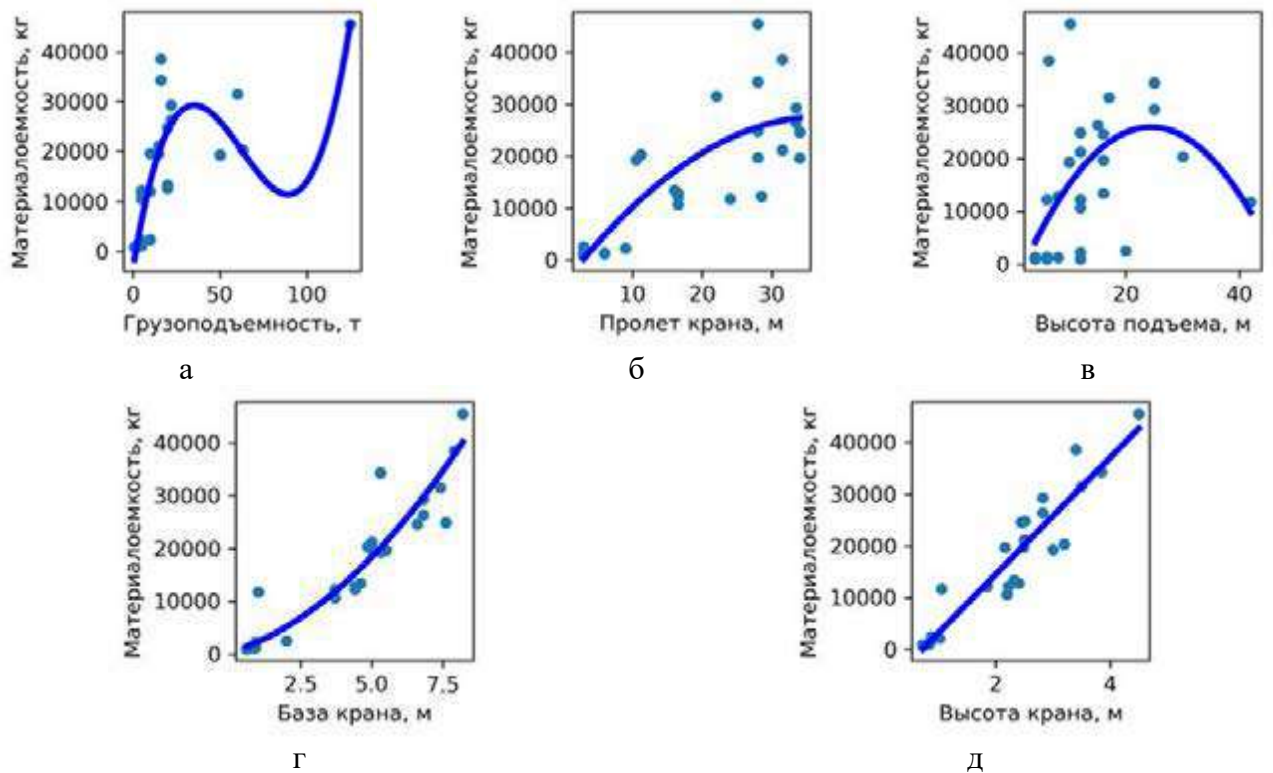


Рисунок 3.4 – Регрессионные зависимости материалоемкости от:

а) грузоподъемности, б) пролета, в) высоты главного подъема,

г) базы крана, д) высоты крана

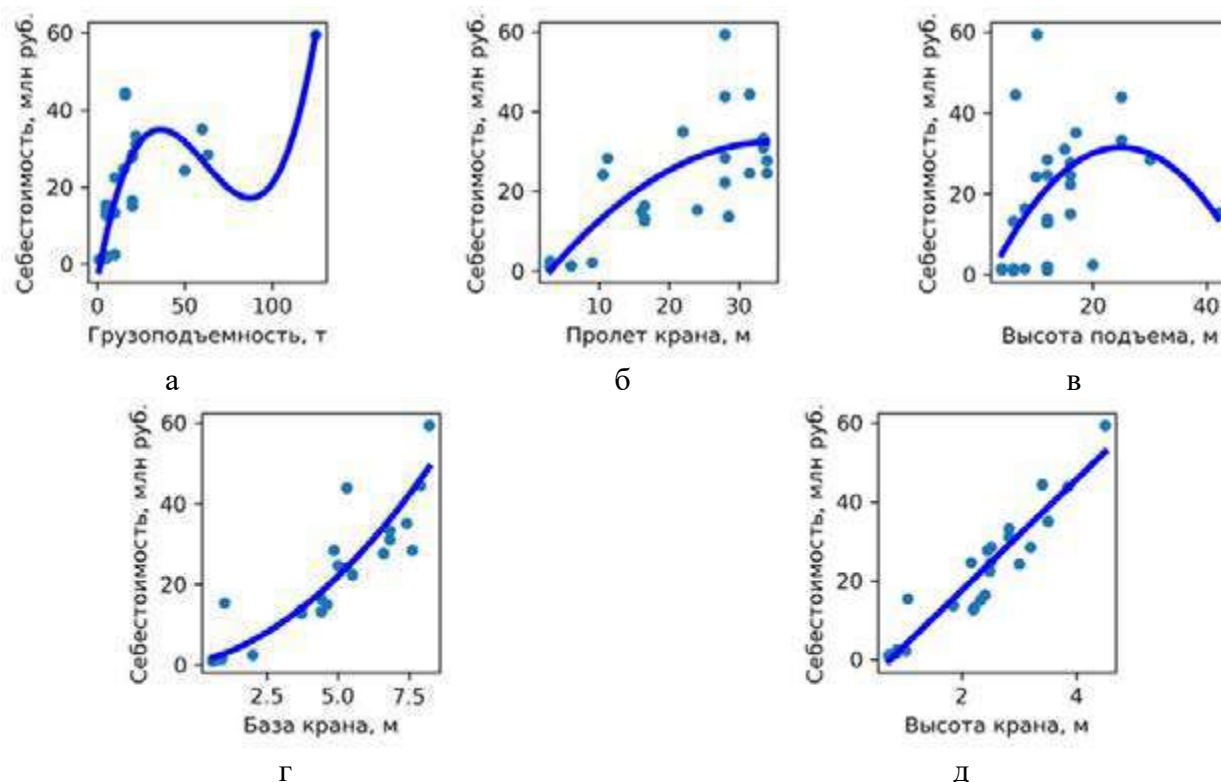


Рисунок 3.5 – Регрессионные зависимости себестоимости изготовления ГПМ от  
 а) грузоподъемности, б) пролета, в) высоты главного подъема,  
 г) базы крана, д) высоты крана

Результаты оценки параметров эмпирического уравнения множественных нелинейных регрессий основных показателей качества и составляющих ресурсоемкости и соответствующих коэффициентов детерминации  $R^2$  с использованием библиотеки для машинного обучения Scikit-learn представлены в таблице 3.6 [15,16, 18, 23, 43, 51].

По мере накопления информации о выпущенных предприятием грузоподъемных машинах уравнения взаимосвязи показателей качества и ресурсоемкости ГПМ постоянно уточняются в режиме самообучения путем пересчета эмпирического коэффициента регрессии  $b_0$  и функций от основных показателей качества ГПМ  $F_1(Q)$ ,  $F_2(L)$ ,  $F_3(H_{\text{гл.п.}})$ ,  $F_4(A_{\text{кр.}})$ ,  $F_5(H_{\text{кр.}})$ , в том числе с учетом индексов потребительских цен на товары и услуги по Российской Федерации.

Таблица 3.6 – Уравнения взаимосвязей трудоемкости, материалоемкости и себестоимости изготовления крана от совместного влияния основных показателей качества

Трудоемкость изготовления крана, нормо-час	
Эмпирическая зависимость	$R^2$
$T = -166,3881 + 0,0051Q^3 - 0,9078Q^2 + 63,4691Q +$ $+ 1,2699L^2 - 26,6397L + 0,392H_{\text{гл.п.}}^2 - 10,3519H_{\text{гл.п.}} +$ $+ 4,4464A_{\text{кр.}}^2 + 557,7673A_{\text{кр.}} + 547,4017H_{\text{кр.}}$	0,996
Материалоемкость крана, кг	
Эмпирическая зависимость	$R^2$
$M = -3824,9698 + 0,0119Q^3 - 1,8782Q^2 + 36,8905Q +$ $+ 10,8533L^2 - 191,3276L + 4,9574H_{\text{гл.п.}}^2 - 68,4380H_{\text{гл.п.}} +$ $+ 455,5101A_{\text{кр.}}^2 - 3196,8466A_{\text{кр.}} + 9658,9963H_{\text{кр.}}$	0,996
Себестоимость изготовления крана, млн руб.	
Эмпирическая зависимость	$R^2$
$S = -4,9823 + 0,000027Q^3 - 0,0041Q^2 + 0,1363Q +$ $+ 0,0184L^2 - 0,4538L + 0,0095H_{\text{гл.п.}}^2 - 0,1861H_{\text{гл.п.}} +$ $+ 0,4477A_{\text{кр.}}^2 - 3,8654A_{\text{кр.}} + 13,4067H_{\text{кр.}}$	0,997

На основе представленных в таблице 3.5 зависимостей для расчета трудоемкости, металлоемкости и себестоимости изготовления грузоподъемной машины от входных параметров заказа, сформулированных заказчиком формируется механизм обратной связи для возможной корректировки пожеланий заказчиков. В результате применения усовершенствованной методики анализа требований потребителя повышаются эффективность и качество процесса конструкторской подготовки производства ГПМ.

### 3.4 Выводы

1. Для практической стандартизации принимаемых в процессе конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин проектных решений на основе данных по 1185 мостовым кранам, выпущенным предприятием ООО «Стройтехника» (г. Донской Тульской области), в среде PostgreSQL была создана реляционная база данных их цифровых двойников.

2. С использованием аппарата реляционной алгебры разработана реляционная модель аналогового проектирования грузоподъемных машин. При этом выбора цифрового двойника-аналога предлагается производить по результатам квалиметрической оценки близости цифровых двойников-аналогов проектируемой грузоподъемной машины по значению коэффициента близости цифрового двойника-аналога к проектируемой ГПМ по показателям качества ГПМ (коэффициенту сходства).

3. На основе регрессионного анализа получены уравнения взаимосвязи показателей качества и ресурсоемкости ГПМ, включая трудоемкость, материалоемкость и себестоимость изготовления ГПМ, что позволяет предприятию производить оперативный анализ требований к грузоподъемным машинам, установленных потребителем, и сопоставлять требования потребителя грузоподъемных машин с имеющейся на предприятии ресурсной базой.



## **4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **4.1 Комплекс научно-прикладных решений повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин**

Повышение эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин предлагается достигать путем практической стандартизации принимаемых в процессе конструкторской подготовки производства проектных решений на основе базы данных цифровых двойников грузоподъемных машин и управления взаимодействием между участниками процесса аналогового проектирования грузоподъемных машин на основе регрессионного анализа ресурсоемкости грузоподъемной машины. В результате реализации мероприятий концепции повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин конструкторская подготовка производства ГПМ будет предусматривать выполнение следующих этапов [44, 47]:

1. Получение конструкторской службой от маркетинговой службы данных заказа на изготовление грузоподъемной машины для оценки возможности его выполнения на предприятии, в случае, когда маркетинговая служба не может выработать решение о принятии или отклонении заказа без взаимодействия с конструкторской и экономической службами предприятия путем экспресс-оценки ресурсоемкости заказа по базе данных цифровых двойников грузоподъемных машин.

2. Разработка конструкторской службой технического описания создаваемой грузоподъемной машины и отправка его маркетинговой службе для заключения договора с заказчиком.

3. Получение конструкторской службой предприятия технического задания в соответствии с заключенным договором на изготовление грузоподъемной машины для разработки необходимой конструкторской документации.

4. Поиск конструктором в базе данных цифровых двойников-аналогов грузоподъемных машин, имеющих максимальное значение коэффициента сходства, и извлечение из базы данных конструкторской документации выбранного цифрового двойника-прототипа.

5. Доработка конструкторской документации выбранного цифрового двойника-прототипа в соответствии с техническим заданием и анализ надежности спроектированной грузоподъемной машины.

6. Внесение в базу данных соответствующей информации по выполненному заказу на создание грузоподъемной машины для реализации механизма самообучения системы экспресс-оценки ресурсоемкости и аналогового проектирования грузоподъемных машин.

Разработанный комплекс научно-прикладных решений, обеспечивающих повышение эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин, предусматривает выбор конструктором из базы данных цифровых двойников, производимый путем квалиметрической оценки, цифрового двойника-прототипа, минимизирующего стоимость и время создания ГПМ по контракту с требуемым уровнем качества и с учетом ресурсных ограничений [48]. При этом предприятие получает механизм для анализа в процессе проектирования требований к грузоподъемным машинам, установленных потребителем, и сопоставления их с имеющейся ресурсной и конструкторской базой. Данный метод устраняет сложности управления взаимодействиями между лицами, участвующими в процессе конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин на предприятии подъемно-транспортного машиностроения [19, 133].

Использование представленного комплекса научно-прикладных решений ведет к сокращению расходов от потери контрактов, а также к сокращению маркетинговых затрат. Привлечение потенциальных покупателей к оценке качества и повышение лояльности имеющихся клиентов приводит соответственно к возрастанию вероятности как первичных, так и повторных покупок данного изделия. Также маркетинговая служба предприятия, получая заявку на контракт, может быстро оценить целесообразность принятия заказа, сравнивая технические характеристики грузоподъемной машины, требуемой заказчику, с техническими характеристиками базовой конструкции, производимой на предприятии [133, 138].

#### **4.2 Информационная поддержка процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин**

Для практической реализации концепции повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин была разработана соответствующая система информационной поддержки Кран Экспресс. Предложенная система информационной поддержки состоит из двух основных частей: реализованной в среде PostgreSQL реляционной базы данных цифровых двойников 1185 мостовых кранов, выпущенных предприятием ООО «Стройтехника» (г. Донской Тульской области) и программного обеспечения, разработанного на языке Python с использованием фреймворка для построения графического интерфейса Qt6, обеспечивающего взаимодействие пользователя системы информационной поддержки с базой данных цифровых двойников, анализ требований к грузоподъемным машинам, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости грузоподъемных машин и квалиметрическую оценку близости цифровых двойников-аналогов проектируемой грузоподъемной машине. Используемые программные средства обеспечивают возможность работы данной системы на всех популярных в настоящее время платформах – Windows, MacOS и Linux.

Система информационной поддержки Кран Экспресс состоит из четырех основных модулей [41]:

1. Модуль анализа требований потребителя к грузоподъемным машинам.
2. Модуль квалиметрической оценки близости цифровых двойников-аналогов.
3. Модуль просмотра заказов.
4. Модуль просмотра цифровых двойников.

Структура системы информационной поддержки Кран Экспресс представлена на рисунке 4.1.

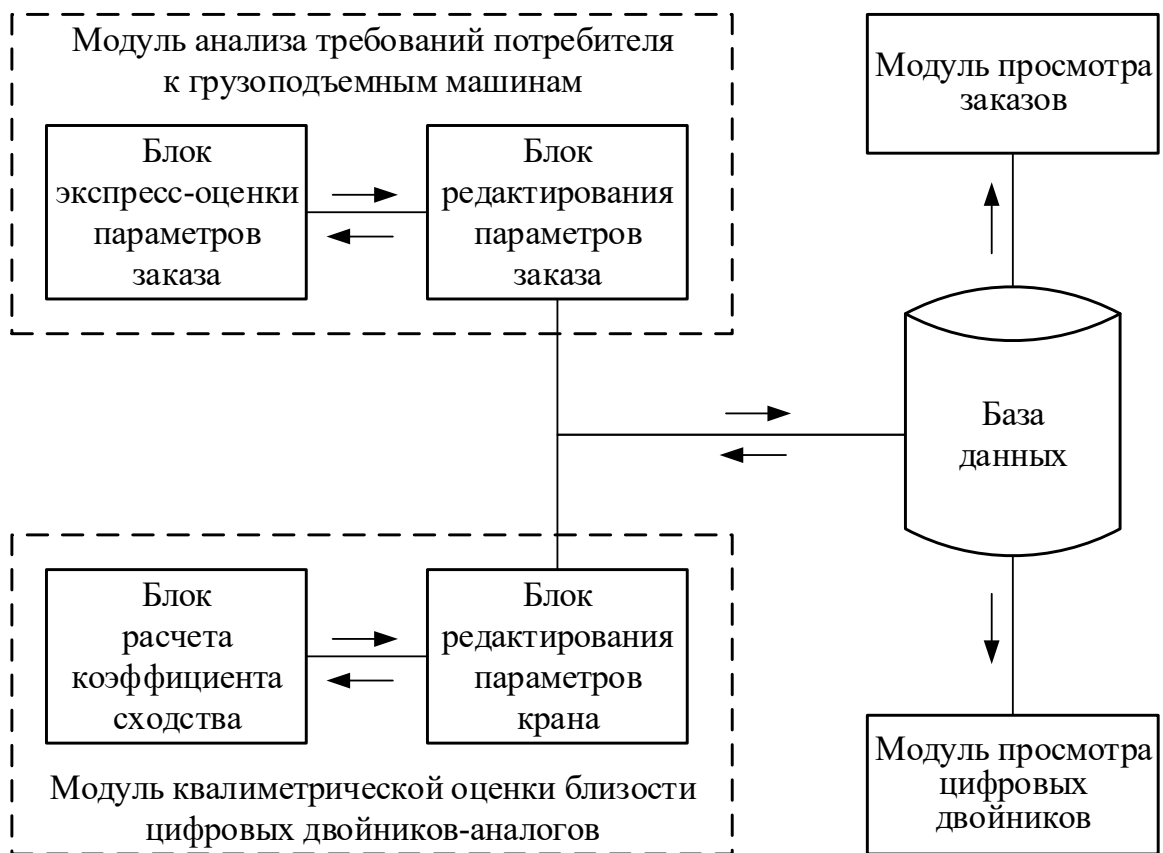


Рисунок 4.1 – Структура системы информационной поддержки Кран Экспресс

Алгоритм взаимодействия пользователей с системой информационной поддержки изображен на диаграмме прецедентов (рисунок 4.2).

После запуска системы Кран Экспресс, пользователь системы видит перед собой стартовое окно приложения, представленное на рисунке 4.3. Со стартового окна приложения пользователь может перейти к любому из основных четырех

модулей системы с помощью первых четырех пунктов меню, настроить систему или завершить с ней работу.



Рисунок 4.2 – Диаграмма прецедентов системы Кран Экспресс

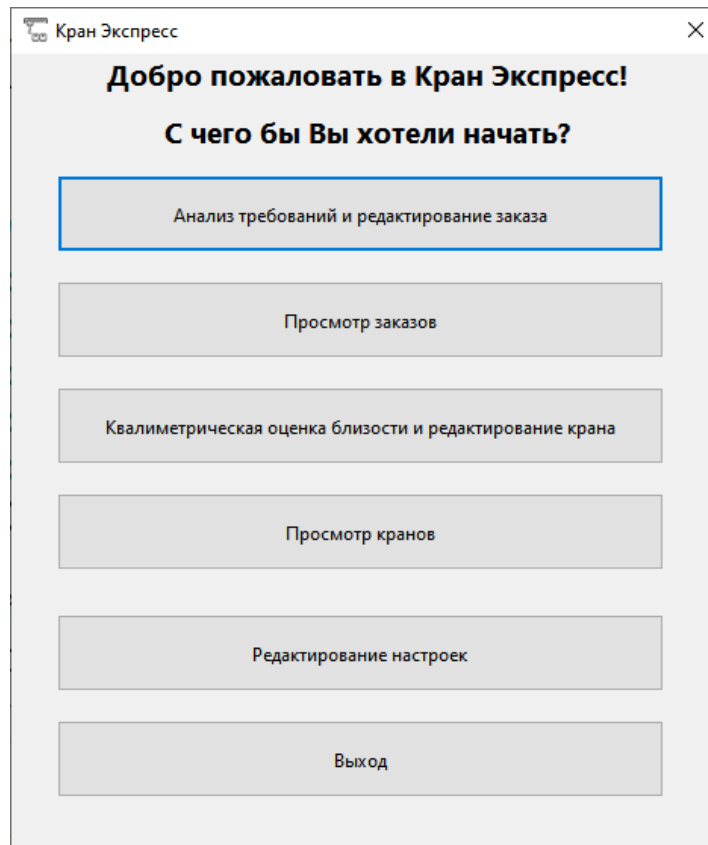


Рисунок 4.3 – Стартовое окно системы Кран Экспресс

Модуль анализа требований к грузоподъемным машинам обеспечивает ввод параметров заказа в систему с помощью блока редактирования параметров заказа (рисунок 4.4) и его экспресс-оценку. В блоке редактирования заказа указываются основные параметры заказа, полученные от потребителя при заключении контракта на изготовление мостового крана: грузоподъемность, т; пролет крана, м; высота главного подъема, м; высота вспомогательного подъема, м; база крана, м; высота крана, м; скорости передвижения крана, м/мин; скорости передвижения тележки, м/мин; скорость подъема главного и вспомогательного крюка, м/мин; группа режима работы крана; климатическое исполнение с категорией размещения; тип подкранового пути; база тележки, м; колея тележки, м; высота перил тележки, м; тип кабины; тип моста; тип тележки. Для удобства пользователя параметры заказа можно скопировать из информации о других заказах, хранящейся в базе данных, указав номер заказа и нажав кнопку «Загрузить из БД».

The screenshot shows a software window titled "Кран Экспресс" with a standard Windows interface (minimize, maximize, close buttons). The window is divided into several sections for data entry:

- Order Information:** "Номер заказа" (Order number) with a text input field.
- Buttons:** "Загрузить из БД" (Load from DB) and "Сохранить в БД" (Save to DB) buttons.
- Crane Parameters (Left Column):**
  - Высота главного подъема, м (Main lifting height, m): 0,00
  - Скорость крана, м/мин (Crane speed, m/min): 0,00
  - Режим работы крана (Crane operating mode): A0
  - Колея тележки, м (Trolley wheelbase, m): 0,00
  - Тип тележки (Trolley type):
  - Трудоемкость, нормо-час (Labor intensity, normo-hours): 0,00
- Crane Parameters (Middle Column):**
  - Высота вспом. подъема, м (Auxiliary lifting height, m): 0,00
  - Скорость тележки, м/мин (Trolley speed, m/min): 0,00
  - Климатическое исполнение (Climatic execution): У1
  - Высота перил тележки, м (Trolley railing height, m): 0,00
  - Материалоемкость, кг (Material intensity, kg): 0,00
- Crane Parameters (Right Column):**
  - Грузоподъемность, т (Lifting capacity, t): 0,00
  - Пролет крана, м (Craneway, m): 0,00
  - База крана, м (Craneway base, m): 0,00
  - Высота крана, м (Craneway height, m): 0,00
  - Скорость подъема главная, м/мин (Main lifting speed, m/min): 0,00
  - Скорость подъема вспом., м/мин (Auxiliary lifting speed, m/min): 0,00
  - Тип подкранового пути (Craneway path type):
  - Тип кабины (Cabin type):
  - Тип моста (Bridge type):
  - База тележки, м (Trolley base, m): 0,00
  - Себестоимость, млн руб. (Cost, million rubles): 0,00
- Action Buttons:** "Оценить" (Evaluate) button at the bottom right.

Рисунок 4.4 – Блок редактирования параметров заказа системы Кран Экспресс

Для проведения анализа требований к грузоподъемным машинам по критерию ресурсоемкости с использованием блока экспресс-оценки параметров заказа необходимо нажать кнопку «Оценить». Результаты оценки трудоемкости, материалоемкости и себестоимости, получаемые с использованием

самообучающихся за счет постоянного добавления в базу данных информации о новых кранах и учета индекса потребительских цен на товары и услуги в Российской Федерации множественных нелинейных регрессий, рассмотренных в разделе 3, будут проставлены в соответствующие поля ввода.

Информацию о заполненном и проанализированном заказе можно сохранить в базе данных, нажав кнопку «Сохранить в БД».

Просмотр сохраненной в базе данных информации о заказах можно осуществить с помощью модуля просмотра заказов. С его помощью можно вывести на экран компьютера как информацию обо всех имеющихся заказах, так и ограничить полученный список с помощью фильтров.

Для работы с описанием проектируемого крана после принятия заказа к исполнению предназначен модуль квалиметрической оценки близости цифровых двойников-аналогов. Он обеспечивает ввод параметров крана в систему с помощью блока редактирования параметров крана (рисунок 4.5) и проведение квалиметрической оценки близости цифровых двойников-аналогов на основе расчета коэффициента сходства.

Работа с описанием проектируемого крана в системе Кран Экспресс начинается с указания номера заказа. На основе номера заказа из базы данных загружаются основные показатели качества проектируемого крана, предоставленные потребителем и введенные в блоке редактирования заказа. При этом в ходе проектирования крана и по согласованию с заказчиком указанные показатели качества могут быть изменены.

Следующим шагом является подбор цифровых двойников-аналогов на основе расчета коэффициента сходства с использованием данных заказа с помощью блока расчета коэффициента сходства. В результате работы данного блока пользователь получает перечень из наиболее близких проектируемому крану цифровых двойников-аналогов. Указав заводской номер цифрового двойника-аналога в блоке редактирования крана и нажав кнопку «Загрузить из БД» можно автоматически заполнить поля основных показателей качества крана параметрами аналога. К параметрам изготовленного по контракту крана,

сохраняемым в базу данных, относятся: комплектующие механизмов главного и вспомогательного подъема (двигатели, тормоза, редукторы; диаметры и длины барабанов, м); комплектующие механизмов передвижения тележки и крана (двигатели, тормоза, редукторы; диаметры колес, м); трудоемкость изготовления крана, нормо-час, материалоемкость крана, кг, себестоимость крана, руб.; дата изготовления крана.

The screenshot shows a software window titled "Кран Экспресс" with a close button. It contains two main sections: "Заказ" (Order) and "Кран" (Crane). Each section has a "Загрузить из БД" (Load from DB) button. The "Заказ" section includes fields for:
 

- Номер заказа (Order number)
- Высота главного подъема, м (Main lift height, m)
- Скорость крана, м/мин (Crane speed, m/min)
- Режим работы крана (Crane mode)
- Колея тележки, м (Trolley wheel gauge, m)
- Тип тележки (Trolley type)
- Высота вспом. подъема, м (Auxiliary lift height, m)
- Скорость тележки, м/мин (Trolley speed, m/min)
- Климатическое исполнение (Climate execution)
- Высота перил тележки, м (Trolley railing height, m)
- Грузоподъемность, т (Load capacity, t)
- База крана, м (Crane base, m)
- Скорость подъема главная, м/мин (Main lift speed, m/min)
- Тип подкранового пути (Crane runway type)
- Тип кабины (Cabin type)
- Пролет крана, м (Crane span, m)
- Высота крана, м (Crane height, m)
- Скорость подъема вспом., м/мин (Auxiliary lift speed, m/min)
- База тележки, м (Trolley base, m)
- Тип моста (Bridge type)

 The "Кран" section includes:
 

- Заводской номер (Factory number)
- Двигатель гл. подъема (Main lift engine)
- Длина барабана гл. подъема, м (Main lift drum length, m)
- Диаметр колес тележки, м (Trolley wheel diameter, m)
- Диаметр колес крана, м (Crane wheel diameter, m)
- Диаметр барабана вс. подъема, м (Auxiliary lift drum diameter, m)
- Трудоемкость, нормо-час (Labor intensity, normo-hours)
- Тормоз гл. подъема (Main lift brake)
- Двигатель тележки (Trolley engine)
- Двигатель передвижения крана (Crane movement engine)
- Двигатель вспом. подъема (Auxiliary lift engine)
- Длина барабана вс. подъема, м (Auxiliary lift drum length, m)
- Материалоемкость, кг (Material consumption, kg)
- Редуктор гл. подъема (Main lift reducer)
- Тормоз тележки (Trolley brake)
- Тормоз передвижения крана (Crane movement brake)
- Тормоз вспом. подъема (Auxiliary lift brake)
- Себестоимость, млн руб. (Cost, million rubles)
- Дата изготовления (Manufacture date)
- Диаметр барабана гл. подъема, м (Main lift drum diameter, m)
- Редуктор тележки (Trolley reducer)
- Редуктор передвижения крана (Crane movement reducer)
- Редуктор вспом. подъема (Auxiliary lift reducer)
- Сохранить цифровую модель в БД (Save digital model to DB)

Рисунок 4.5 – Блок редактирования параметров крана системы Кран Экспресс

С помощью кнопки «Сохранить цифровую модель в БД» можно загрузить в базу данных архив с конструкторской документацией изготавливаемого крана.

Просмотр сохраненной в базе данных информации о кранах можно осуществить с помощью модуля просмотра цифровых двойников. С его помощью можно вывести как информацию обо всех имеющихся цифровых двойниках, так и



ограничить полученный список с помощью фильтров. С помощью данного модуля можно сохранить для дальнейшей работы архив с конструкторской документацией цифровых двойников-аналогов, хранящийся в базе данных.

Помимо основных модулей в системе Кран Экспресс есть вспомогательный модуль редактирования настроек системы (рисунок 4.6).

Настройки Кран Экспресс

Имя/адрес сервера  
127.0.0.1

Порт  
6432

База данных  
postgres

Имя пользователя  
postgres

Пароль  
●●●●●●●●

Проверить    ОК    Отмена

Рисунок 4.6 – Модуль редактирования настроек системы Кран Экспресс

С помощью модуля редактирования настроек можно указать настройки соединения с базой данных (имя/адрес сервера, порт, имя базы данных, имя пользователя и пароль) и проверить соединение с базой данных. Даталогическая модель базы данных системы Кран Экспресс, соответствующая реляционной модели, разработанной в разделе 3, приведена на рисунке 4.7.

В базе данных системы Кран Экспресс содержится 7 таблиц:

- основная таблица цифровых двойников кранов Cranes;
- таблица заказов предприятия Orders, связанная с основной таблицей цифровых двойников кранов через номер заказа;

- таблица для хранения архивов цифровых моделей кранов DesignDocumentation;
- справочная таблица обозначений режимов работы крана WorkingModes для проверки корректности вводимых данных;
- справочная таблица обозначений климатических исполнений с категорией размещения InstallationLocations для проверки корректности вводимых данных;
- справочная таблица весовых коэффициентов Weights для квалиметрической оценки близости цифровых двойников-аналогов;
- справочная таблица индексов потребительских цен в Российской Федерации для учета уровня инфляции при анализе требований к грузоподъемным машинам по грузоподъемности.

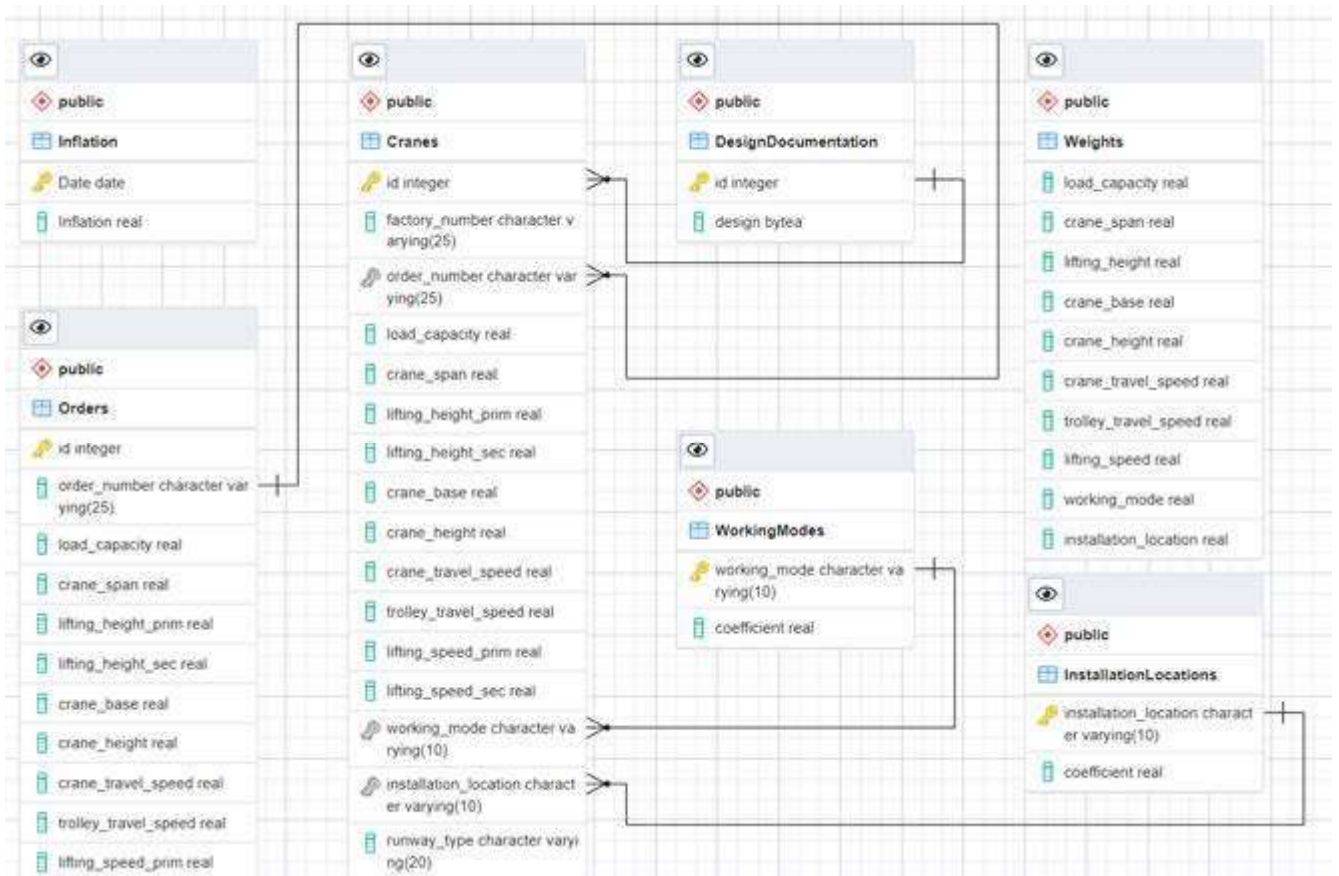


Рисунок 4.7 – Дatalogическая модель базы данных системы Кран Экспресс

### 4.3 Практическое применение результатов работы на предприятиях

4.3.1 Практический пример анализа требований потребителя по критерию ресурсоемкости грузоподъемных машин для определения возможности выполнения заказа

Приведем практический пример анализа требований потребителя по критерию ресурсоемкости грузоподъемных машин для определения возможности выполнения заказа на изготовление мостового крана на основе данных ООО «Стройтехника» (г. Донской Тульской области).

1. Маркетинговая служба, получила заявку на производство мостового крана 10-А5-22,5-12-У2 со следующими показателями качества:

- грузоподъемность крана  $Q$  – 10 т;
- группа режима работы крана – А5;
- пролет  $L$  – 22,5 м;
- высота главного подъема  $H_{\text{гл.п}}$  – 12 м;
- климатическое исполнение с категорией размещения – У2;
- скорость подъема главного крюка  $U_{\text{под}}$  7,5 м/мин;
- скорость передвижения тележки (тали)  $U_{\text{пер.т}}$  – 38 м/мин;
- скорость передвижения крана  $U_{\text{пер.кр.}}$  – 75 м/мин;
- база крана  $A_{\text{кр.}}$  – 4,4 м;
- высота крана  $H_{\text{кр.}}$  – 2,1 м.

2. Маркетолог с использованием системы информационной поддержки по представленным в подразделе 3.3 регрессионным зависимостям взаимосвязи показателей качества и ресурсоемкости проектируемого крана (таблица 3.6) выполнил экспресс-оценку показателей ресурсоемкости заказа, подставляя в них значения характеристик крана (рисунок 4.8).

Параметр	Значение
Номер заказа	927
Высота главного подъема, м	12,00
Скорость крана, м/мин	75,00
Режим работы крана	A5
Колея тележки, м	2,00
Тип тележки	опорная
Трудоемкость, нормо-час	4048,20
Высота вспом. подъема, м	0,00
Скорость тележки, м/мин	38,00
Климатическое исполнение	У2
Высота перил тележки, м	1,00
Материалоемкость, кг	12486,70
Грузоподъемность, т	10,00
База крана, м	4,40
Скорость подъема главная, м/мин	7,50
Тип подкранового пути	Рельс КР70
Тип кабины	-
Себестоимость, млн руб.	14,07
Пролет крана, м	22,50
Высота крана, м	2,10
Скорость подъема вспом., м/мин	0,00
База тележки, м	1,50
Тип моста	двухбалочный

Рисунок 4.8 – Экспресс-оценка показателей ресурсоемкости заказа в системе Кран Экспресс

Таким образом, получены следующие оценки: трудоемкость изготовления крана – 4048,2 нормо-час, материалоемкость крана – 12486,7 кг, себестоимость изготовления крана – 14,07 млн руб.

3. На основе рассчитанных показателей ресурсоемкости были сформированы коммерческое предложение и техническое описание и отправлены заказчику для заключения договора. На основе заключенного договора конструкторской службе предприятия направлено техническое задание на разработку необходимой для изготовления грузоподъемной машины конструкторской документации.

#### 4.3.2 Практический пример выбора из базы данных цифрового двойника-прототипа проектируемой грузоподъемной машины

Приведем практический пример выбора из базы данных цифрового двойника-аналога проектируемой грузоподъемной машины по значению коэффициента сходства для разработки конструкторской документации [46].

1. Конструкторская служба по результатам заключенного договора получила согласованное с заказчиком техническое задание (ТЗ) на производство мостового крана 10-А5-22,5-12-У2 со следующими характеристиками:

- грузоподъемность крана  $Q$  – 10 т;
- группа режима работы крана – А5;
- пролет  $L$  – 22,5 м;
- высота главного подъема  $H_{\text{гл.п}}$  – 12 м;
- климатическое исполнение с категорией размещения – У2;
- скорость подъема главного крюка  $U_{\text{под}}$  7,5 м/мин;
- скорость передвижения тележки (тали)  $U_{\text{пер.т}}$  – 38 м/мин;
- скорость передвижения крана  $U_{\text{пер.кр.}}$  – 75 м/мин;
- база крана  $A_{\text{кр.}}$  – 4,4 м;
- высота крана  $H_{\text{кр.}}$  – 2,1 м.

Конструктор с помощью системы Кран Экспресс приступил поиску в базе данных цифрового двойника аналога для разработки необходимой конструкторской документации (рисунок 4.9).

2. По результатам поиска в базе данных цифровых двойников грузоподъемных машин аналогов, имеющих максимальное значение коэффициента сходства, система информационной поддержки конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин представила конструктору следующие аналоги для разработки конструкторской документации (рисунок 4.10):

- 1 кран: 10-А5-20-10-У3;
- 2 кран: 10-А7-14-10-У3;
- 3 кран: 10-А5-20,8-12-У3;
- 4 кран: 5-А1-13,79-16-УХЛ4;
- 5 кран: 10-А3-28-18-У1.

Кран Экспресс

**Заказ**

Номер заказа: 927

Высота главного подъема, м: 12,00

Скорость крана, м/мин: 75,00

Режим работы крана: А5

Колея тележки, м: 2,00

Тип тележки: опорная

Грузоподъемность, т: 10,00

База крана, м: 4,40

Скорость подъема главная, м/мин: 7,50

Тип подкранового пути: Рельс КР70

Тип кабины: -

Пролет крана, м: 22,50

Высота крана, м: 2,10

Скорость подъема вспом., м/мин: 0,00

База тележки, м: 1,50

Тип моста: двухбалочный

Высота вспом. подъема, м: 0,00

Скорость тележки, м/мин: 38,00

Климатическое исполнение: У2

Высота перил тележки, м: 1,00

Загрузить из БД

**Кран**

Заводской номер: 20-01-0927

Двигатель гл. подъема:

Длина барабана гл. подъема, м: 0,00

Диаметр колес тележки, м: 0,00

Диаметр колес крана, м: 0,00

Диаметр барабана вс. подъема, м: 0,00

Трудоемкость, нормо-час: 0,00

Тормоз гл. подъема:

Двигатель тележки:

Двигатель передвижения крана:

Двигатель вспом. подъема:

Длина барабана вс. подъема, м: 0,00

Материалоемкость, кг: 0,00

Редуктор гл. подъема:

Тормоз тележки:

Тормоз передвижения крана:

Тормоз вспом. подъема:

Себестоимость, млн руб.: 0,00

Дата изготовления: 26.04.2023

Диаметр барабана гл. подъема, м: 0,00

Редуктор тележки:

Редуктор передвижения крана:

Редуктор вспом. подъема:

Найти аналоги

Сохранить цифровую модель в БД

Рисунок 4.9 – Начало процесса конструкторской подготовки крана 10-А5-22,5-12-У2 в системе Кран Экспресс

Аналоговое проектирование

ID	Грузоподъемность	Пролет крана	Высота подъема	База крана	Высота крана	Скорость крана	Скорость тележки	Скорость подъема	Режим работы	Климатическое исполнение	Коэффициент сходства
1 20-01-0912	10.0	20.8	12.0	4.4	1.55	76.0	37.0	8.4	А5	У3	0.98
2 20-01-0869	10.0	20.0	10.0	4.4	1.379	75.0	38.0	7.5	А5	У3	0.97
3 20-08-0808	10.0	28.0	18.0	4.4	1.6	75.0	38.0	7.5	А3	У1	0.91
4 20-01-0904	10.0	14.0	10.0	4.4	1.379	70.5	34.0	8.76	А7	У3	0.905
5 20-08-0795	5.0	13.79	16.0	3.8	2.1	48.0	19.2	2.4	А1	УХЛ4	0.64

Найти аналоги    Закрыть

Рисунок 4.10 – Поиск крана-аналога в системе Кран Экспресс

Параметры кранов-аналогов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры кранов-аналогов

Номер крана-аналога Параметр крана	1	2	3	4	5
Грузоподъемность крана $Q$ , т	10	10	10	5	10
Группа режима работы крана	A5	A7	A5	A1	A3
Пролет $L$ , м	20	14	20,8	13,79	28
Высота главного подъема $H_{г.п.}$ , м	10	10	12	16	18
Климатическое исполнение с категорией размещения	У3	У3	У3	УХЛ4	У1
Скорость подъема главного крюка $U_{под}$ , м/мин	7,5	8,76	8,4	2,4	7,5
Скорость передвижения тележки (тали) $U_{пер.т.}$ , м/мин	38	34	37	19,2	38
Скорость передвижения крана $U_{пер.кр.}$ , м/мин	75	70,5	76	48	75
База крана $A_{кр.}$ , м	4,4	4,4	4,4	3,8	4,4
Высота крана $H_{кр.}$ , м	1,379	1,379	1,55	2,1	1,6

3. В качестве крана-прототипа конструктором выбирается кран, для которого коэффициент сходства имеет максимальное значение.

В данном случае:

$$K_{C4} = 0,64 < K_{C2} = 0,9 < K_{C5} = 0,91 < K_{C1} = 0,97 < K_{C3} = 0,98.$$

Следовательно, в качестве крана-прототипа выбирается третий кран 10-A5-20,8-12-У3 (рисунки 4.11, 4.12).

4. Из базы данных конструкторской документации извлекается рабочая документация выбранного крана-прототипа и конструктором создается копия рабочей конструкторской документации крана-прототипа.

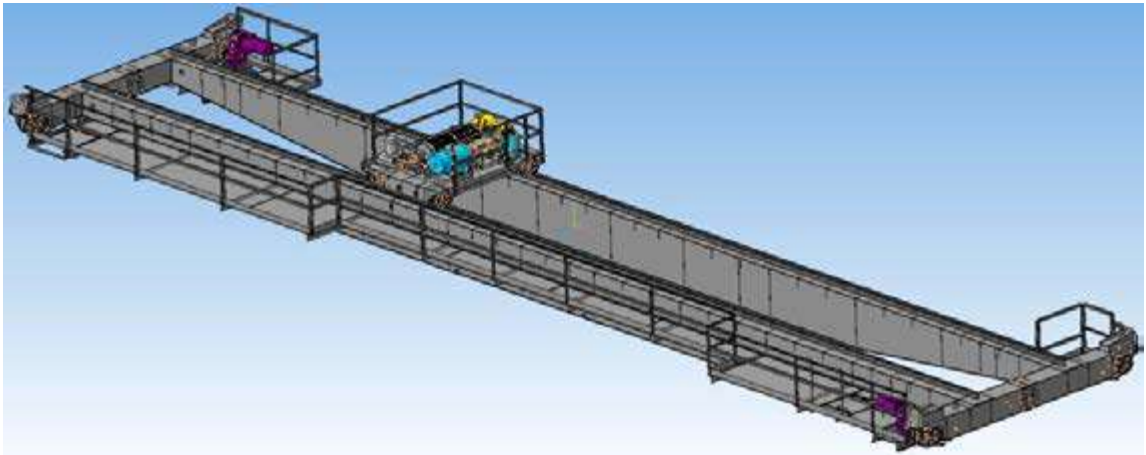


Рисунок 4.11 – 3D-модель крана-прототипа 10-A5-20,8-12-U3

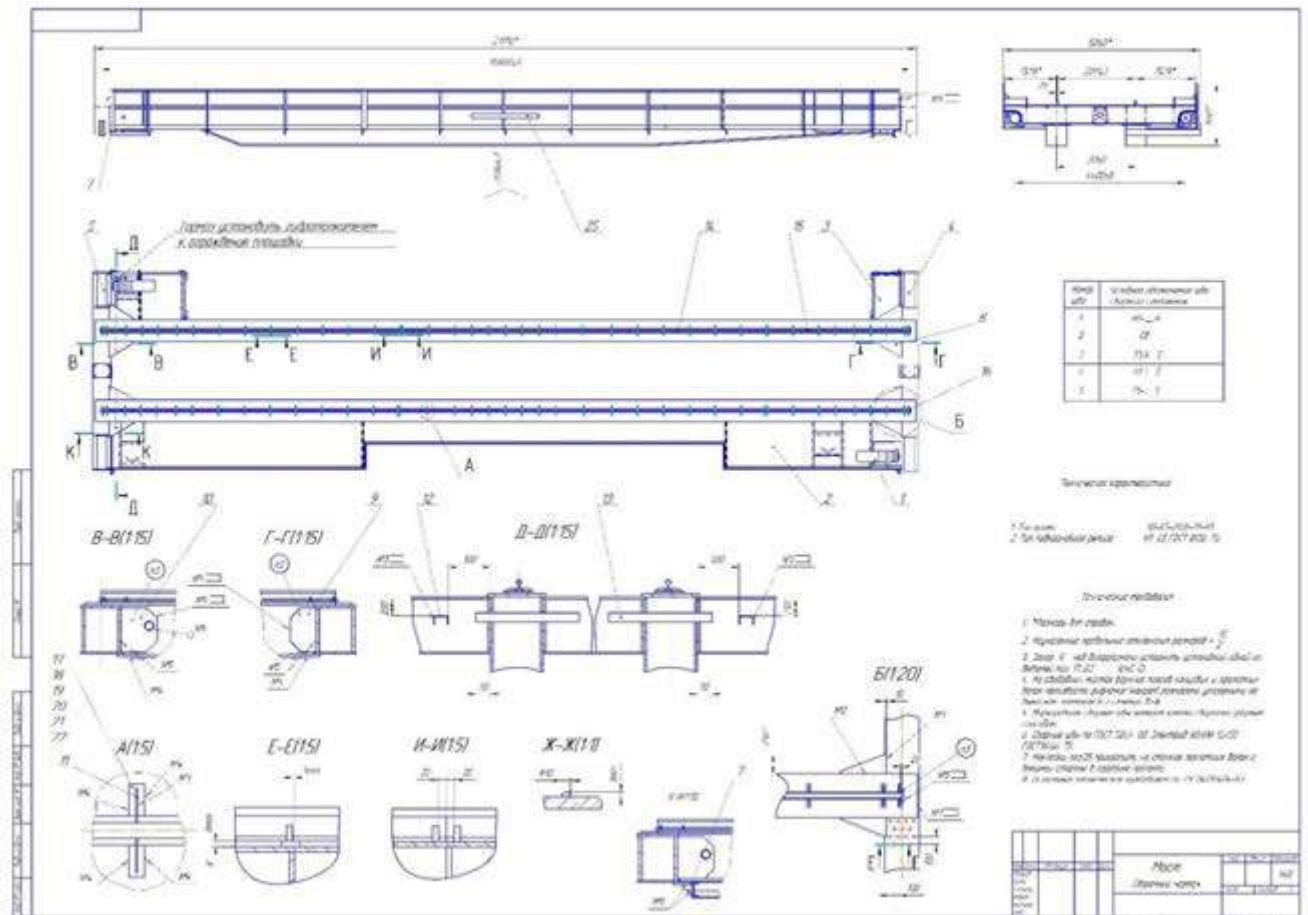


Рисунок 4.12 – Сборочный чертеж моста крана-прототипа 10-A5-20,8-12-U3

5. Производится доработка конструкторской документации выбранного крана-прототипа в соответствии с техническим заданием, в результате которой составляется рабочая конструкторская документация проектируемого конструктором крана (рисунки 4.13, 4.14).



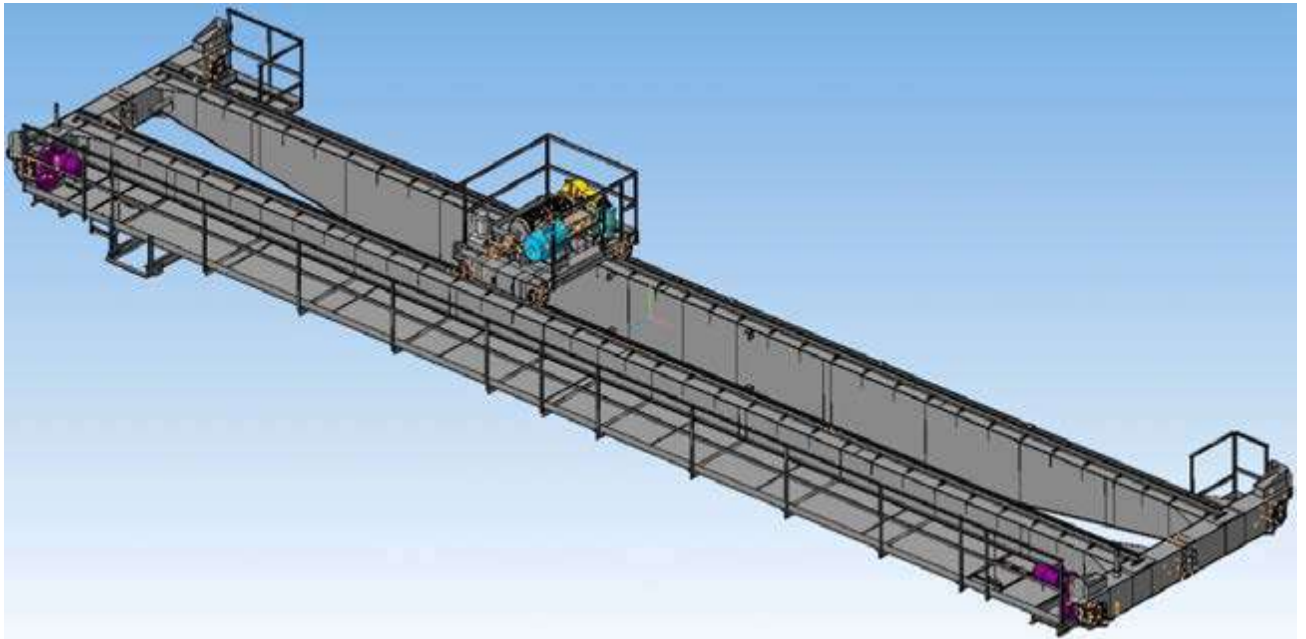


Рисунок 4.13 – 3D-модель спроектированного крана 10-A5-22,5-12-Y2

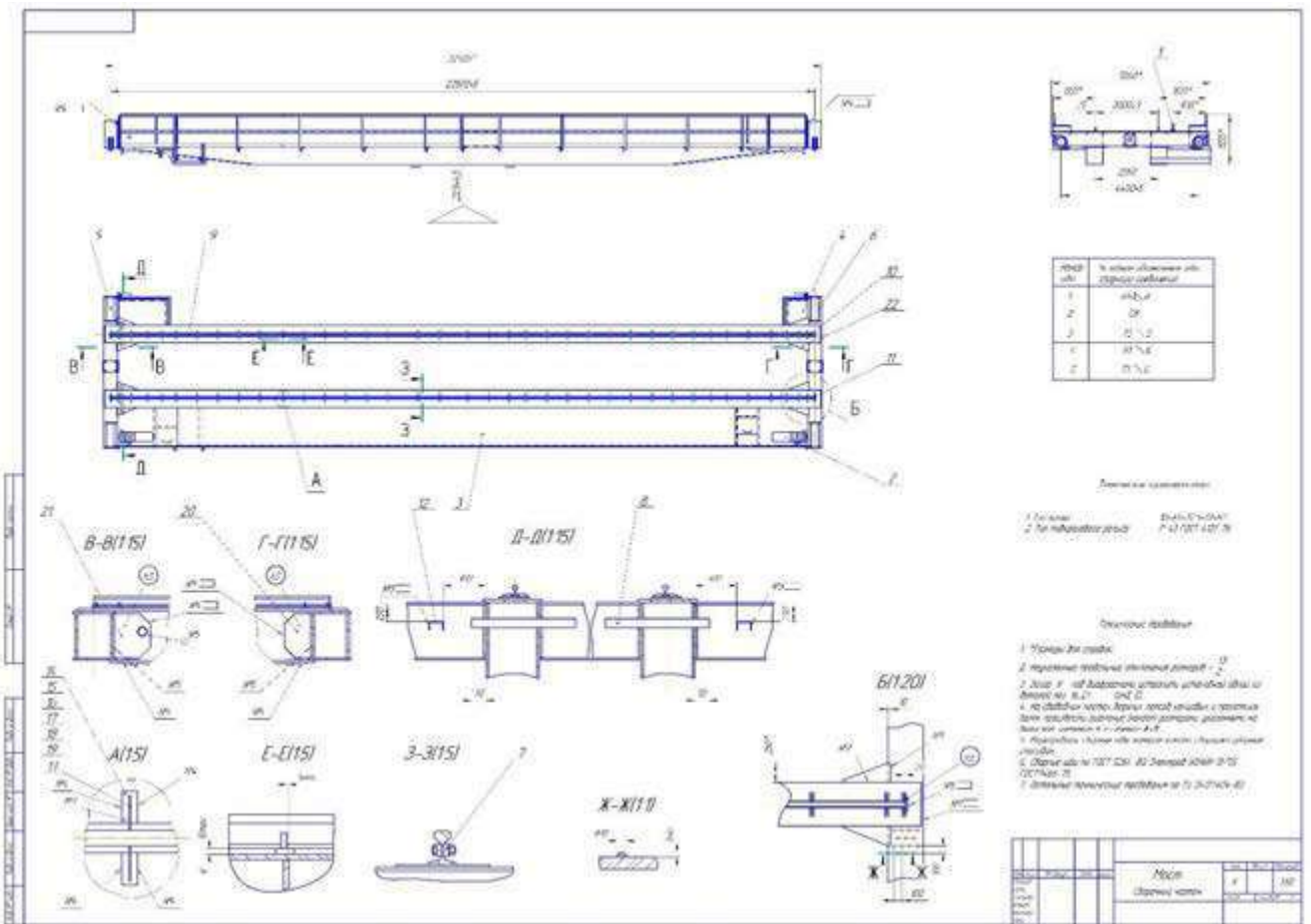


Рисунок 4.14 – Сборочный чертеж моста спроектированного крана 10-A5-22,5-12-Y2

6. В базу данных вносится соответствующая информация по выполненному заказу на создание грузоподъемной машины 10-А5-22,5-12-У2: трудоемкость изготовления крана – 3800 нормо-час, материалоемкость крана – 12200 кг, себестоимость изготовления крана – 14,08 млн руб. (рисунок 4.15). Полученные результаты показывают высокую точность произведенных оценок показателей ресурсоемкости и их сопоставимость с фактическими значениями показателей ресурсоемкости изготовленного крана.

The screenshot shows the 'Кран Экспресс' (Cran Express) software interface, divided into two main sections: 'Заказ' (Order) and 'Кран' (Cran).

**Заказ (Order) Section:**

- Номер заказа: 927
- Высота главного подъема, м: 12,00
- Скорость крана, м/мин: 75,00
- Режим работы крана: А5
- Колея тележки, м: 2,00
- Тип тележки: опорная
- Грузоподъемность, т: 10,00
- База крана, м: 4,40
- Скорость подъема главная, м/мин: 7,50
- Тип подкранового пути: Рельс КР70
- Тип кабины: -
- Пролет крана, м: 22,50
- Высота крана, м: 2,10
- Скорость подъема вспом., м/мин: 0,00
- База тележки, м: 1,50
- Тип моста: двухбалочный

**Кран (Cran) Section:**

- Заводской номер: 20-01-0927
- Двигатель гл. подъема: АМТК112МВ6ФБУЗ
- Длина барабана гл. подъема, м: 1,10
- Диаметр колес тележки, м: 1,25
- Диаметр колес крана, м: 4,00
- Диаметр барабана вс. подъема, м: 0,00
- Трудоемкость, нормо-час: 3800,00
- Тормоз гл. подъема: ТКГ-200 У2
- Двигатель тележки: АМТК112МВ6ФБУЗ
- Двигатель передвижения крана: АМТК112МВ6ФБУЗ
- Двигатель вспом. подъема: -
- Длина барабана вс. подъема, м: 0,00
- Материалоемкость, кг: 12200,00
- Себестоимость, млн руб.: 14,08
- Редуктор гл. подъема: 1ЦЗУ-355М-160-32М1-У1
- Тормоз тележки: ТКГ-160 У2
- Тормоз передвижения крана: ТКГ-160 У2
- Тормоз вспом. подъема: -
- Дата изготовления: 26.04.2023
- Диаметр барабана гл. подъема, м: 0,40
- Редуктор тележки: ЗЦЗвк-160-31,5-26-Пшп-У1
- Редуктор передвижения крана: ЗЦЗвкф-160-31,5-37(38)Пшп-У1
- Редуктор вспом. подъема: -

Buttons and actions include: 'Загрузить из БД' (Load from DB), 'Сохранить в БД' (Save to DB), 'Найти аналоги' (Find analogs), and 'Сохранить цифровую модель в БД' (Save digital model to DB).

Рисунок 4.15 – Сохранение информации по выполненному заказу на создание грузоподъемной машины

В результате практического использования представленной системы информационной поддержки процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин и формирования решения принятия заказа на изготовление грузоподъемных машин в ООО «Стройтехника» достигнуто снижение на 15-20 % времени проектирования мостовых кранов.

#### 4.4 Выводы

1. Разработан комплекс научно-прикладных решений, обеспечивающих повышение эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин, включающий реляционную базу данных цифровых двойников грузоподъемных машин, обеспечивающую практическую стандартизацию принимаемых в процессе конструкторской подготовки производства проектных решений, и методическое и программное обеспечение системы информационной поддержки, реализующей концепцию повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин.

2. Приведен практический пример использования системы информационной поддержки конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин в ООО «Стройтехника» при проектировании мостового крана 10-А5-22,5-12-У2. При этом с использованием уравнений взаимосвязи показателей качества и ресурсоемкости проектируемого крана получены следующие оценки: трудоемкость изготовления крана – 4048,2 нормо-час, материалоемкость крана – 12486,7 кг, себестоимость изготовления крана – 14,07 млн руб. В качестве аналога для разработки конструкторской документации рекомендован ранее выпущенный предприятием мостовой кран 10-А5-20,8-12-У3, имеющий коэффициент сходства  $K_C = 0,98$ . В результате выполнения контракта на создание грузоподъемной машины 10-А5-22,5-12-У2 достигнуты значения: трудоемкость изготовления крана – 3800 нормо-час, материалоемкость крана – 12200 кг, себестоимость изготовления крана – 14,08 млн руб., что показывает высокую точность полученных уравнений взаимосвязи показателей качества и ресурсоемкости ГПМ.

3. Практическая реализация результатов научных исследований в обществе с ограниченной ответственностью «Стройтехника» (г. Донской Тульской области) позволила достигнуть снижения на 15-20 % трудоемкости конструкторской подготовки производства выпускаемых предприятием мостовых кранов при обеспечении требуемого уровня качества.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная научная задача совершенствования инструментария повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин в условиях цифровизации и интенсификации производства на основе аналогового проектирования, направленная на обеспечение качества ГПМ и имеющая существенное значение для развития управления качеством продукции, стандартизации и организации производства, как отрасли знаний.

### **Итоги выполненного исследования.**

1. На основе обобщения производственного опыта и анализа трудов отечественных и зарубежных исследователей в области управления качеством установлено, что одними из основных факторов, оказывающих негативное влияние на качество грузоподъемных машин, являются наличие неопределенностей при принятии решения в процессе проектирования о выборе цифрового двойника-прототипа проектируемой ГПМ, которые связаны с работой современных предприятий подъемно-транспортного машиностроения в условиях цифровизации и интенсификации производства, обуславливающих постоянное сокращение времени, отпускаемого на принятие различных организационно-технических решений и конструкторскую подготовку производства, а также недостаточный уровень стандартизации принимаемых в ходе конструкторской подготовки производства проектных решений.

2. В результате структурно-функционального моделирования процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин установлено, что концепция повышения его эффективности и качества должна предусматривать практическую стандартизацию принимаемых проектных решений на основе базы данных цифровых двойников грузоподъемных машин и управление взаимодействием между участниками процесса аналогового

проектирования грузоподъемных машин на основе регрессионного анализа ресурсоемкости грузоподъемной машины.

3. Практическую стандартизацию принимаемых в процессе конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин проектных решений предложено производить на основе созданной в среде PostgreSQL реляционной базы данных цифровых двойников грузоподъемных машин и разработанной с использованием аппарата реляционной алгебры модели процесса аналогового проектирования грузоподъемных машин.

4. Повысить качество ГПМ, ускорить и удешевить конструкторскую подготовку производства предложено на основе принципов аналогового проектирования и выбора цифрового двойника-прототипа с использованием разработанной методики квалитметрической оценки близости (уровня унификации) цифровых двойников-аналогов проектируемой грузоподъемной машины по значению коэффициента близости цифрового двойника-аналога к проектируемой ГПМ по показателям качества ГПМ (коэффициенту сходства), использование которого в процессе конструкторской подготовки их производства, обеспечивает возможность выявления и сравнительной оценки из множества возможных аналогов нескольких, наиболее унифицированных с проектируемой ГПМ по выполняемым функциям и обеспечивающих ее качество.

5. Разработана методика анализа требований к грузоподъемным машинам, установленных потребителем, содержащая полученные на основе регрессионного анализа уравнения взаимосвязи показателей качества и ресурсоемкости ГПМ, включая трудоемкость, материалоемкость и себестоимость изготовления ГПМ, и позволяющая предприятию производить оперативный анализ требований потребителя к грузоподъемным машинам и сопоставлять требования потребителя с имеющейся на предприятии ресурсной базой.

6. Разработана методика анализа надежности грузоподъемных машин на стадии конструкторской подготовки производства, позволяющая оценить способность грузоподъемной машины выполнить установленные требования по долговечности, определяемой предполагаемой наработкой до отказа, и динамику

качества ГПМ на последующих стадиях жизненного цикла, а также учитывающая зависимость долговечности грузоподъемных машин от относительной длины трещины в металлоконструкции характерного для ГПМ коробчатого сечения при различных уровнях действующих нагрузок, полученную с использованием метода конечных элементов.

7. Разработан комплекс научно-прикладных решений, обеспечивающих повышение эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин, включающий реляционную базу данных цифровых двойников грузоподъемных машин, обеспечивающую практическую стандартизацию принимаемых в процессе конструкторской подготовки производства проектных решений, и методическое и программное обеспечение системы информационной поддержки, реализующей концепцию повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин. Приведен практический пример использования системы информационной поддержки процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин в ООО «Стройтехника» (г. Донской Тульской области) при проектировании мостового крана 10-А5-22,5-12-У2. При этом с использованием уравнений взаимосвязи показателей качества и ресурсоемкости проектируемого крана получены следующие оценки: трудоемкость изготовления крана – 4048,2 нормо-час, материалоемкость крана – 12486,7 кг, себестоимость изготовления крана – 14,07 млн руб. В качестве прототипа для разработки конструкторской документации рекомендован ранее выпущенный предприятием мостовой кран 10-А5-20,8-12-У3, имеющий коэффициент сходства  $K_C = 0,98$ . В результате выполнения контракта на создание грузоподъемной машины 10-А5-22,5-12-У2 достигнуты значения: трудоемкость изготовления крана – 3800 нормо-час, материалоемкость крана – 12200 кг, себестоимость изготовления крана – 14,08 млн руб., что показывает высокую точность полученных уравнений взаимосвязи показателей качества и ресурсоемкости ГПМ.

8. Практическая реализация результатов научных исследований в обществе с ограниченной ответственностью «Стройтехника» (г. Донской Тульской области)

позволила достигнуть снижения на 15-20 % трудоемкости конструкторской подготовки производства выпускаемых предприятием мостовых кранов при обеспечении требуемого уровня качества.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.**

Научные и практические результаты диссертационного исследования рекомендуется применять при повышении эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин, а также в учебном процессе подготовки магистров и аспирантов в областях управления качеством и наземных транспортно-технологических машин и повышении квалификации инженерно-технических работников предприятий подъемно-транспортного машиностроения.

Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации является дальнейшее совершенствование методик и инструментария повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин в направлении повышения эффективности и качества процессов конструкторской подготовки производства широкого класса машин – строительных, дорожных, сельскохозяйственных, технологического оборудования различных отраслей промышленности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдулаева, О. В. Выбор и обоснование основных параметров механизмов передвижения мостовых кранов: 05.05.04: дис. ... канд. техн. наук / О. В. Абдулаева; СибАДИ. – Омск, 2015. – 190 с.
2. Акимов, И. В. Самообучающаяся система экспресс-оценки трудоёмкости изготовления деталей машин: 05.02.08: дис. ... канд. техн. наук / И. В. Акимов. – Тула: Тул. гос. ун-т, 1999. – 209 с.
3. Александров, М. П. Грузоподъемные машины: учебник для вузов / М. П. Александров. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Высшая школа, 2000. – 552 с.
4. Алпатов, В. Ю. Оптимизация геометрической формы пространственно-стержневых конструкций / В. Ю. Алпатов, И. С. Холопов // Металлические конструкции. – 2009. – Т. 15. – № 1. – С. 47–57.
5. Амелина, О. Ю. Работа с аналогами как поиск источника вдохновения и креативности в сфере графического дизайна / О. Ю. Амелина // Образование и общество. – 2020. – № 4 (123). – С. 42–46.
6. Амиров, Ю. Д. Основы конструирования: Творчество – стандартизация – экономика: Справочное пособие / Ю. Д. Амиров. – Москва: Издательство стандартов, 1991. – 392 с.
7. Аналоговое проектирование. URL: [https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/10196/1/di\\_2009\\_050.pdf](https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/10196/1/di_2009_050.pdf) (дата обращения: 23.06.2022).
8. Андрейкин, А. Е. Пространственные задачи теории трещин / А. Е. Андрейкин. – Киев: Наукова думка, 1982. – 348 с.
9. Антипов, Д. В. Совершенствование процесса проектирования, разработки и постановки на производство автокомпонентов с учетом специальных требований потребителей / Д. В. Антипов, Д. А. Горохова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. –



№ 6. – С. 155–166.

10. Анцев, А. В. Реляционная модель процесса аналогового проектирования грузоподъемных машин / А. В. Анцев, А. В. Воробьев, В. Ю. Анцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 8. – С. 368–373. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-368-374.

11. Анцев, А. В. Типизация конструкторских проектных решений подъемных кранов при аналоговом проектировании / А. В. Анцев, А. В. Воробьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 8. – С. 313–319.

12. Анцев, В. Ю. Анализ контракта в производстве грузоподъемных машин на основе функции потерь Тагути / В. Ю. Анцев, Е. А. Чернецова, А. С. Толоконников // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – Вып. 4. – С. 73–82.

13. Анцев, В. Ю. Информационная поддержка системы управления качеством в машиностроительном производстве: дисс. ... докт. техн. наук. – Тула, 2000. – 447 с.

14. Анцев, В. Ю. Концепция компьютерной конструкторско-технологической подготовки машиностроительного производства / В. Ю. Анцев, А. Н. Иноземцев, Н. И. Пасько // Избранные труды ученых тульского государственного университета. – Тула: ТулГУ, 1997. – С. 128–139.

15. Анцев, В. Ю. Метод экспресс-оценки в процессе проектирования грузоподъемных машин / В. Ю. Анцев, А. В. Воробьев // Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники: материалы международной научной конференции (Брянск, 19–20 февраля 2020 г.) – Брянск: БГТУ, 2020. – С. 62–66.

16. Анцев, В. Ю. Методика повышения эффективности процесса проектирования грузоподъемных машин с учетом условий их применения / В. Ю. Анцев, А. В. Воробьев, Г. И. Афанасьева // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы международной научно-технической конференции (Белгород, 17–19 октября

2019 г.). – Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. – С. 8–14.

17. Анцев, В. Ю. Повышение эффективности конструкторской подготовки при производстве грузоподъемных машин / В. Ю. Анцев, А. В. Воробьев // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: сборник докладов международной научно-технической конференции (Белгород, 20-21 сентября 2018 г.). – Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. – С. 34–40.

18. Анцев, В. Ю. Повышение эффективности процесса проектирования грузоподъемных машин на основе экспресс-оценки их ресурсоемкости / В. Ю. Анцев, А. В. Воробьев, А. Н. Шафорост // Техника и технология транспорта. – 2019. – № S13. – С. 1. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N13-01TKR19.pdf>.

19. Анцев, В. Ю. Структурно-функциональная модель процесса анализа контракта на машиностроительном предприятии / В. Ю. Анцев, Е. А. Чернецова // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – Вып. 3. – С. 17–26.

20. Анцев, В. Ю. Управление качеством процесса разработки конструкторской документации при производстве грузоподъемных машин / В. Ю. Анцев, А. В. Воробьев // Избранные научные труды восемнадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством» (Москва, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» 14–15 марта 2019 года). – Москва: ПРОБЕЛ-2000, 2019. – С. 30–33.

21. Анцев, В. Ю. Управление качеством процесса разработки конструкторской документации при производстве грузоподъемных машин / В. Ю. Анцев, А. В. Воробьев // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем: сборник научных трудов 7-й Международной научно-технической конференции (Курск, 30–31 мая 2019 г.): [в 2 томах] / [ответственный редактор Е. В. Павлов]. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2019. – Т. 1. – С. 83–85.

22. Анцев, В. Ю. Управление качеством процесса разработки проектной

документации на транспортно-технологические комплексы / В. Ю. Анцев, М. Х. Казанлеев, К. Н. Ханин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2011. – №4. – С. 228–238.

23. Анцев, В. Ю. Экспресс-оценка ресурсоемкости грузоподъемных машин при их проектировании / В. Ю. Анцев, А. В. Воробьев // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции (Тула, 23–25 октября 2019 г.). – Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – С. 113–115.

24. Артеменко, В. Б. Электронная конструкторская документация на изделия военной техники. Особенности разработки и сопровождения / В. Б. Артеменко, В. Г. Долгополов // Вооружение и экономика. – 2021. – № 4 (58). – С. 92–101.

25. Багдади, Ш. З. Исследование коэффициентов интенсивности напряжений в элементах крановых конструкций / Ш. З. Багдади, Е. Ч. Ким, С. А. Соколов // Изв. Тульского гос. ун-та. Серия «Подъемно-транспортные машины и оборудование». Тула: Изд-во ТулГУ, 1999. – Вып. 2. – С. 275–280.

26. Баев, В. Ю. Разработка информационной системы управления конструкторской документацией / В. Ю. Баев // Инновационные подходы к решению технико-экономических проблем. Главный редактор И. Г. Игнатова. – Москва: МИЭТ, 2015. – С. 184–189.

27. Балашева, Ю. В. Комплексная оценка технологичности деталей типа «Вал» квалитетическими методами : 05.02.08, 05.02.23 : дис. ... канд. техн. наук / Ю. В. Балашева; Тул. гос. ун-т. – Тула, 2007. – 145 с.

28. Батьковский, М. А. Инструментарий анализ экономической эффективности продукции на основе оценки ее себестоимости / М. А. Батьковский // Новая наука: Опыт, традиции, инновации. – 2016. – № 1-1 (59). – С. 40–42.

29. Благовещенский, Д. И. Проблема обеспечения надежности новой продукции в автомобилестроении на этапе проектирования/ Д. И. Благовещенский, В. Н. Козловский, С. А. Васин // Известия Тульского

государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 5. – С. 53–59.

30. Бойко, В. В. Проектирование баз данных информационных систем. 2-е изд., перераб. и доп./ В. В. Бойко, В. М. Савинков. – Москва: Финансы и статистика, 1989. – 351 с.

31. Бойцов, Б. В. Обратная связь по качеству при проектировании авиационной техники: проблемы и пути решения / Б. В. Бойцов, Д. С. Юрин, Н. Р. Якубалиев, А. Р. Денискина // Качество и жизнь. – 2022. – № 1 (33). – С. 31–36.

32. Буч, Г. Язык UML. Руководство пользователя / Г. Буч, Д. Рамбо, И. Я. Якобсон: перевод с английского Н. Мухина. – 2-е изд. – Москва: ДМК Пресс, 2006. – 496 с.

33. Васильев, В. А. Управление качеством / В. А. Васильев. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2022. – 160 с. – ISBN 978-5-4316-0986-2. – EDN RTVFCQ.

34. Васин, С. А. Автоматизированная экспресс-оценка трудоемкости обработки деталей / С. А. Васин, В. Ю. Анцев, А. Н. Иноземцев, Н. И. Пасько. – СТИН, 2000. – № 10. – С. 9-13.

35. Васин, С. А. Влияние дизайн-визуализации на повышение качества продукции при разработке транспортного средства / С. А. Васин, А. А. Талдыкина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 10. – С. 46–48.

36. Васин, С. А. Решение вопросов безопасности при проектировании автомобиля для людей с ограниченными возможностями здоровья / С. А. Васин, А. А. Кошелева // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 2. – С. 77–88.

37. Васин, С. А. Решение вопросов качества продукции при дизайн-проектировании промышленных изделий / С. А. Васин, А. А. Кошелева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 10. – С. 41–46.

38. Веселов, В. В. Выбор оптимального способа определения норм расхода материалов для изготовления изделия на основании проектной документации / В.

В. Веселов // Молодой ученый. – 2010. – № 9 – С. 20–22.

39. Вобликова, Ю. О. Обоснование выбора метода инструментальной диагностики металлоконструкций мостовых кранов: 05.02.13 : дис. ... канд. техн. наук / Ю. О. Вобликова; Тул. гос. ун-т. – Тула, 2014. – 166 с.

40. Волкова, В. Н. Основы теории систем и системного анализа: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Системный анализ и управление» / В. Н. Волкова, А. А. Денисова. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГТУ, 1997. – 510 с.

41. Воробьев, А. В. Информационная поддержка управления процессом конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин / А. В. Воробьев, А. В. Анцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 7. – С. 257-262.

42. Воробьев, А. В. Исследование напряженно-деформированного состояния моста мостового крана / А. В. Воробьев // Системы автоматизированного проектирования на транспорте: тезисы докладов V Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, под ред. Я. С. Ватулина (Санкт-Петербург, 17-18 апреля 2014 г.). – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. – С. 34–36.

43. Воробьев, А. В. Методика анализа требований потребителя к качеству грузоподъемных машин / А. В. Воробьев, А. В. Анцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 7. – С. 253-257.

44. Воробьев, А. В. Методика повышения эффективности конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин / А. В. Воробьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 4. – С. 469–475. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-469-475.

45. Воробьев, А. В. Определение запаса трещиностойкости металлоконструкций мостовых кранов / А. В. Воробьев // Сборник материалов XIX Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и

робототехнические комплексы» (Москва, 9 апреля 2015 г.). – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – С. 36–37.

46. Воробьев, А. В. Основные направления повышения эффективности процесса разработки конструкторской документации на грузоподъемные машины / А. В. Воробьев // Молодёжный вестник Политехнического института. – Тула: ТулГУ, 2019. – С. 193–197.

47. Воробьев, А. В. Повышение качества конструкторской документации на основе аналогового проектирования / А. В. Воробьев, А. В. Анцев, В. Ю. Анцев // IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении»: сборник докладов (Тула, 18–20 апреля 2023 г.). – Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. – С. 82–85.

48. Воробьев, А. В. Повышение эффективности процесса проектирования грузоподъемных машин / А. В. Воробьев // Журнал технических исследований. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 79–83.

49. Воробьев, А. В. Разработка конструкторской документации в процессе проектирования грузоподъемных машин / А. В. Воробьев, Д. И. Рыбин // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы. Сборник докладов XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – Москва: Из-во НИУ МГСУ, 2019. – С. 55–58.

50. Воробьев, А. В. Типизация конструкторских проектных решений в процессе создания грузоподъемных машин / А. В. Воробьев // Молодёжный вестник Политехнического института. – Тула: ТулГУ, 2019. – С. 197–205.

51. Воробьев, А. В. Экспресс-оценка качества грузоподъемных машин на стадии проектирования по их ресурсоемкости / А. В. Воробьев, В. Ю. Анцев // Управление качеством в образовании и промышленности: сборник статей Всероссийской научно-технической конференции (Севастополь, 16–17 мая 2019 г.) [ответственный редактор М. Н. Белая]. – Севастополь: ФГАОУ ВО

«Севастопольский государственный университет», 2019. – С. 51–59.

52. Воронкова, П. Н. Обеспечение качества конструкторской документации за счет средств автоматизации нормоконтроля / П. Н. Воронкова, Ю. В. Французова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – Вып. 8–1. – С. 195–198.

53. Всеобщее управление качеством: учебник для вузов / под редакцией О. П. Глудкина, Н. М. Горбунова, А. И. Гурова. – Москва: Радио и связь, 1999. – 600 с.

54. Гавзов, А. С. Опыт разработки конструкторской и эксплуатационной документации на электрические машины с учётом требований российских и международных стандартов / А. С. Гавзов, Н. Е. Зайкина, В. А. Калий, К. А. Кушев, М. С. Савченко // Электротехнические комплексы и системы. Материалы международной научно-практической конференции: [в 2 томах]. – 2017. – С. 6–13.

55. Гаджинский, А. М. Логистика: Учебник для высших и средних специальных учебных заведений. – 2-е изд. / А. М. Гаджинский. – Москва: Информационно-внедренческий центр «Маркетинг», 1999. – 228 с.

56. ИСО/ТО 10017-2015. Статистические методы. Руководство по применению в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001. – Москва: Стандартиформ, 2005. – 24 с.

57. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – Москва: Стандартиформ, 2010. – 72 с.

58. ГОСТ Р 27.013-2019. Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности. – Москва: Стандартиформ, 2019. – 41 с.

59. ГОСТ 32579.1-2013. Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Часть 1. Общие положения. – Москва: Стандартиформ, 2015. – 31 с.

60. ГОСТ 34017-2016. Краны грузоподъемные. Классификация режимов работы. – Москва: Стандартиформ, 2017. – 22 с.

61. ГОСТ Р 50.1.028–2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 50 с.
62. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Москва: Стандартиформ, 2015. – 32 с.
63. Гузненков, В. Н. Выполнение учебных конструкторских документов на сборочную единицу / В. Н. Гузненков, А. С. Мех // Заметки ученого. – 2022. – № 8. – С. 182–190.
64. Гузненков, В. Н. Методика выполнения учебных электронных документов на сборочную единицу / В. Н. Гузненков, П. А. Журбенко // Международный журнал экспериментального образования. – 2021. – № 2. – С. 15–20.
65. Гукало, А. А. Оценка эффективности применения методов автоматизированного проектирования при разработке рабочей конструкторской документации в среде PRO/ENGINEER-WINDCHILL // Космонавтика и ракетостроение. – 2013. – № 2 (71). – С. 73.
66. Гурьянов, А. В. Управление инженерными данными проекта при автоматизации подготовки конструкторской документации / А. В. Гурьянов, А. В. Шукалов, И. О. Жаринов, С. А., Леоновец, Е. Ю. Диденко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 182–186.
67. Давыдова, М. В. Автоматизированная система оценки трудоемкости изготовления деталей на стадии конструкторской подготовки производства / М. В. Давыдова // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2005. – № 2. – С. 133–135.
68. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ: В 2-х книгах / Н. Дрейпер, Г. Смит: перевод с английского. – Книга 2. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Финансы и статистика, 1987. – 351 с.
69. Единая система конструкторской документации: Справочное пособие / С. С. Борущек, А. А. Волков М. М. Ефимова и др. – 2-е изд., перераб. и доп. –



Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 353 с.

70. Заречнова, В. В. Методы и факторы оценки себестоимости продукции / В. В. Заречнова // Студенческий форум. – 2020. – № 22-2 (115). – С. 46–48.

71. Захарчук, И. И. Конструкторская документация в эпоху цифровой экономики / И. И. Захарчук, Д. С. Зима // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4-4 (42). – С. 35–38.

72. Иваницкий, Д. К. Оценка себестоимости производства продукции предприятия / Д. К. Иваницкий, Е. Д. Пелипенко // Аллея науки. – 2018. – Т. 4. № 6 (22). – С. 477–481.

73. Иванов, А. Д. Применение параметризации при разработке конструкторской документации / А. Д. Иванов, О. А. Ямникова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 11-2. – С. 524–528.

74. Иванов, Д. Ю. Преобразование процессов: использование методологии IDEF для реинжиниринга системы менеджмента. / Д. Ю. Иванов // Методы менеджмента качества. – 2008, – № 10. – С. 24–28.

75. Ивахненко, А. Г. Концепция структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем с заданными параметрами точности обработки / А. Г. Ивахненко, В. В. Куц // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4-2 (288). – С. 106–113.

76. Ивахненко, А. Г. Управление процессами организации на основе данных о результативности / А. Г. Ивахненко, М. Л. Сторублев // Методы менеджмента качества. – 2009. – № 5. – С. 8–12.

77. Информационная поддержка систем управления качеством изготовления машин / С. А. Васин, В. Ю. Анцев, А. Н. Иноземцев, Н. М. Пушкин; Под общ. ред. С. А. Васиной. – Тула: Тул. гос. ун-т, 2002. – 428 с.

78. Карлик, А. Е. Совершенствование оценки материалоемкости изделий по стадиям жизненного цикла / А. Е. Карлик, Н. А. Хаустов // Повышение эффективности и интенсификации машиностроительного производства. Межвузовский сборник. Красноярский политехнический институт. – Красноярск,

1986. – С. 48–49.

79. Кириловский, В. В. Совершенствование процедуры разработки конструкторской документации / В. В. Кирилловский // Инженерный вестник. – 2015. – № 9. – С. 21.

80. Когаловский, М. Р. Энциклопедия технологий баз данных. / М. Р. Когаловский. – Москва: Финансы и статистика, 2002. – 800 с.

81. Концевой, Е. М. Ремонт крановых металлоконструкций. / Е. М. Концевой, Б. М. Розеншейн. – Москва: Машиностроение, 1979. – 206 с.

82. Кугаевский, С. С. Определение весовых коэффициентов теории сложности применительно к конструктивным элементам типа “карман” для оценки трудоемкости корпусных деталей / С. С. Кугаевский, Ю. С. Щарин // Автоматизированные технологические и механические системы в машиностроении: Сборник научных трудов. / Под ред. д.т.н. В. Ц. Зориктуева – Уфа: Изд-во УГАТУ, 1997. – Часть 2. – С. 11–13.

83. Кузьмин, А. В. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин. / А. В. Кузьмин, Ф. Л. Марон. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: Высш. шк., 1983. – 350 с.

84. Куликов, Ю. А. Унификация конструкторской документации программно-аппаратных средств изделий / Ю. А. Куликов. // Стандарты и качество. – 2019. – № 3. – С. 13–17.

85. Лагерев, А. В. Оптимальное проектирование металлоконструкций стационарных конвейеров с подвесной лентой на основе разработанной базы конструктивных схем / А. В. Лагерев, П. В. Бословяк // Вестник развития науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 63–67.

86. Лагерев, И. А. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин / И. А. Лагерев, А. В. Лагерев. – Брянск: БГТУ, 2013. – 228 с.

87. Латыпова, В. А. Подход к интеллектуальной поддержке при управлении разработкой электронной конструкторской документации на основе анализа замечаний согласующих лиц / В. А. Латыпова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. – Т. 9. № 2 (33). Доступно

по: <https://moitvivi.ru/ru/journal/pdf?id=989>. – DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.013.

88. Логинов, А. Н. Особенности разработки и внедрения информационной системы по созданию рабочей конструкторской документации по общекорабельным системам / А. Н. Логинов, Р. О. Арченков, С. А. Никифоров // Судостроение. – 2022. – № 1 (860). – С. 18–23.

89. Макарова, Л. В. Управление рисками в процессе «Конструкторская подготовка производства изделия» / Л. В. Макарова, Н. С. Баукова. // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2021. – № 1 (12). – С. 73–79.

90. Максимов, Д. А. Оценка технологичности и расчет себестоимости производства нового изделия / Д. А. Максимов, М. А. Халиков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 4–2. – С. 307.

91. Марка, Д. Методология структурного анализа и проектирования / Д. Марка, К. МакГоуэн: перевод с английского. – Москва: МетаТехнология, 1993. – 240 с.

92. Мейер, Д. Теория реляционных баз данных / Д. Мейер: перевод с английского. – Москва: Мир, 1987. – 608 с.

93. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие: [в 4 томах]. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – Киев: Наукова думка, 1988. – Т. 2–620 с.

94. Миранович, О. Л. Повышение материалоеффективности при расчетах элементов барабана машин непрерывного действия / О. Л. Миранович // Сахаровские чтения 2018 года: экологические проблемы XXI века. материалы 18-й международной научной конференции. Под общей редакцией С. А. Маскевича, С. С. Позняка. – 2018. – С. 127-128.

95. Модернизация процессной модели системы менеджмента качества автосборочного предприятия / Д. И. Благовещенский, В. Н. Козловский, Д. И. Панюков, Д. В. Айдаров // Известия Тульского государственного университета. – Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 520–525.

96. Мостовые краны. Виды, характеристики, узлы, оборудование,

производство [Электронный ресурс]. – URL: <https://mostovoi-kran.ru/> (дата обращения: 31.01.2023).

97. Окрепилов, В. В. Управление качеством: учебник для вузов / В. В. Окрепилов. – 2-е изд. – Москва: ОАО «Изд-во «Экономика», 1998. – 639 с.

98. Организация производства и управление предприятием: учебник / О. Г. Туровец, М. И. Бухалков, В. Б. Родинов [и др.]; под ред. О.Г. Туровца. – 3-е изд. – Москва: ИНФРА-М, 2011. – 506 с.

99. Организация производства на предприятии (фирме): учебное пособие / под ред. О. И. Волкова, О. В. Девяткина. – Москва: ИНФРА-М, 2011. – 448 с.

100. Орехова, Ю. Б. Информатизация процесса согласования и утверждения конструкторской документации на предприятии / Ю. Б. Орехова, А. О. Харитонов // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т. 32. № 8 (204). – С. 48–50.

101. Пантюхин, О. В. Цифровой двойник изделий специального назначения / О. В. Пантюхин, С. А. Васин // Качество. Инновации. Образование. – 2021. – № 1 (171). – С. 37–40.

102. Пивкин, С. А. Себестоимость инновационного продукта: калькулирование и прогноз / С. А. Пивкин // Международный бухгалтерский учет. – 2016. – № 10 (400). – С. 21–34.

103. Плахотникова, Е. В. Техническая совместимость элементов - гарантия качества сложных технических систем / Е. В. Плахотникова, С. А. Васин, А. А. Маликов // Ежемесячный научно-технический журнал СТИН – 2018. – № 5 – С. 2–6.

104. Пузанов, В. Е. Исследование свойств математических моделей динамики качества машиностроительной продукции / В. Е. Пузанов, А. Г. Ивахненко // Известия Юго-Западного государственного университета. – Техника и технологии. – 2012. – № 2–1. – С. 128–131.

105. Путилин, А. Б. Компонентное моделирование и программирование на языке UML. Практическое руководство по проектированию информационно-измерительных систем / А. Б. Путилин, Е. А. Юрагов. – Москва: НТ Пресс, 2005. – 664 с.

106. Реляционное представление операций проектирования

технологического процесса / С. А. Васин, В. А. Мельников, В. Ю. Анцев, А. Н. Крушин // Известия Тульского государственного университета. – Серия Машиностроение. – 1998. – Вып. 2. – С. 233–242.

107. Репин, А. Ю. Диалоговая информационная система разработки текстовой конструкторской документации / А. Ю. Репин, Л. Р. Фионова, И. Г. Епишин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 24–34.

108. Репин, В. В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В. В. Репин, В. Г. Елиферов. – 4-е изд. – Москва: Стандарты и качество, 2006. – 408 с.

109. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати: перевод с английского. – Москва: Радио и связь, 1993. – 320 с.

110. Синельников, А. Ф. Методика оценки материалоемкости кузовов современных автомобилей / А. Ф. Синельников // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2015. – № 4 (6). – 13 с.

111. Сиратори, М. Вычислительная механика разрушения / М. Сиратори, Т. Миеси, Х. Мацусита ; перевод с японского. – Москва: Мир, 1986. – 334 с.

112. Смоляный, С. И. Основные проблемы и направления совершенствования конструкторско-технологической подготовки машиностроительного производства на предприятиях РКП / С. И. Смоляный, Ю. В. Елдулов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 3. № 13. – С. 134–135.

113. Соколов, С. А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. / С. А. Соколов. – Санкт-Петербург: Политехника, 2005. – 423 с.

114. Соколов, С. А. Строительная механика и металлические конструкции машин: учебник / С. А. Соколов. – Санкт-Петербург: Политехника, 2011. – 450 с.

115. Соседко, В. В. Системы конструкторско-технологической подготовки производства на крупном промышленном предприятии / В. В. Соседко // Автоматизация и современные технологии. – 2009. – № 7. – С. 36–40.

116. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2 томах:

перевод с английского / Под ред. Ю. Мураками. – Москва: Мир, 1990. – Т. 1 – 448 с.

117. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2 томах: перевод с английского / Под ред. Ю. Мураками. – Москва: Мир, 1990. – Т. 2 – 1016 с.

118. Степин, Д. Характерные дефекты металлоконструкций мостовых кранов / Д. Степин, М. Соколов, А. Коломоец // ТехНадзор. – 2015. – № 11(108). – С. 72–73.

119. Сумцов, А. В. Подходы к разработке системы автоматизированного выпуска текстовой конструкторской документации / А. В. Сумцов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 4 (80). – С. 111–115.

120. Сумцов, А. В. Автоматизация процесса разработки комплектов конструкторской документации / А. В. Сумцов, Д. А. Черкас // Материалы докладов XII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – Санкт-Петербург: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – 408 с.

121. Сысоева, В. В. Расчеты коэффициентов интенсивности напряжений для типовых авиационных конструкций с трещинами / В. В. Сысоева. // Электронный журнал «Труды МАИ». – Выпуск № 45. – [www.mai.ru/science/trudy/](http://www.mai.ru/science/trudy/).

122. Тузов, А. Мостовой кран: конструкция, технические характеристики, назначение и применение / А. Тузов. [Электронный ресурс]. – 2018.– URL:<http://fb.ru/article/423291/mostovoy-kran-konstruktsiya-tehnicheskie-harakteristiki-naznachenie-i-primenenie> (дата обращения: 14.04.2022).

123. Туровец, О. Г. Логистика / О. Г. Туровец, В. Н. Родионова. – Воронеж: Воронежский гос. техн. ун-т., 1994. – 90 с.

124. Уемов, А. И. Системный подход и общая теория систем. / А. И. Уемов. – Москва: Мысль, 1978. – 272 с.

125. Управление качеством в системах и процессах машиностроения / О. В. Анисеева, Н. П. Золотухина, А. Г. Ивахненко [и др.]. – Курск: ЗАО

«Университетская книга», 2014. – 208 с.

126. Управление качеством проектирования и эксплуатации с использованием риск-ориентированного информационного моделирования / Б. В. Бойцов, В. Л. Балановский, М. Ю. Куприков, А. В. Рипецкий, Н. В. Николаева // Качество и жизнь. – 2022. – № 3 (35). – С. 86 – 89.

127. Уравнение множественной регрессии. – URL: <https://math.semestr.ru/regress/corel.php> (дата обращения: 31.03.2023).

128. Фёрстер, Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Фёрстер, Б. Рёнц. – Москва: Финансы и статистика, 1983. – 304 с.

129. Хечумов, Р. А. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций: учебное пособие для вузов / Р. А. Хечумов, Х. Кепплер, В. И. Прокопьев; под общей редакцией Р. А. Хечумова. – Москва: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 1994. – 353 с.

130. Цены, инфляция // Росстат [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/price> (дата обращения: 28.04.2023).

131. Черемных, С. В. Моделирование и анализ систем. / С. В. Черемных, И. О. Семенов, В. С Ручкин. // IDEF–технологии: практикум. – 2002. – 192 с.

132. Черепанов, Н. В. Реализация задач управления жизненным циклом прохождения конструкторской документации на машиностроительном предприятии в процессе информатизации производства / Н. В. Черепанов // Научное обозрение. – 2014. – № 8-1. – С. 489 – 492.

133. Чернецова, Е. А. Управление процессом анализа контракта на создание грузоподъемных машин : 05.02.23 : дис. ... канд. техн. наук / Е. А. Чернецова; Тул. гос. ун-т. – Тула, 2014. – 156 с.

134. Шарин, Ю. С. Укрупненные методы определения трудоемкости / Ю. С. Шарин, С. В. Журавлева // Машиностроитель. – 1992. – №9. – С. 9 – 10.

135. Ширялкин, А. Ф. Методика расчёта укрупненной трудоёмкости обработки заготовки на основе элементно-технологического классификатора деталей машин / А. Ф. Ширялкин, В. В. Елифанов, В. В. Ефремов // Вестник машиностроения. – 1996. – №9. – С. 39 – 41.

136. Шкуриндин, А. Н. Анализ конструкторской и технологической подготовки производства при изготовлении теплообменного оборудования для АЭС / А. Н. Шкуриндин, И. Н. Шкуриндин. // Новый университет. Серия: Технические науки. – 2016. – № 2 (48). – С. 17 – 22.

137. Шумаков, В. П. Delphi 3 и разработка приложений баз данных. / В. П. Шумаков. – Москва: НОЛИДЖ, 1998. – 704 с.

138. Щурин, К. Роль потребителя в управлении качеством продукции научного приборостроения. / К. Щурин, Я. Прима // Стандарты и качество. – 2008. – № 1. – С. 68 – 71.

139. Якимович, Б. А. Определение прогнозной трудоемкости изготовления корпусных деталей в условиях автоматизированного производства / Б. А. Якимович, А. И. Коршунов // Вестник машиностроения. – 1996. – №8. – С. 41 – 45.

140. Якимович, Е. Н. Управление качеством процесса проектирования технологической оснастки на основе практической стандартизации проектных решений : 05.02.23 : дис. ... канд. техн. наук / Е. Н. Якимович; Тул. гос. ун-т. – Тула, 2010. – 126 с.

141. Ястребов, Д. В. Информационная система, оптимизирующая процесс проектирования тары для перевозок узлов и панелей авиационных изделий / Д. В. Ястребов, Н. Згуральская, Д. В. Егорычев. // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2021. – № 1. – С. 151 – 154.

142. Antsev, V. Yu. Methods of determining the margin of cyclic crack resistance of metal structures for hoisting machinery / V. Yu. Antsev, A. S. Tolokonnikov, A. V. Vorobev, V. I. Sakalo // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 10th International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2016, MEACS 2016; Tomsk; Russian Federation; 27 October 2016 to 29 October 2016. – Volume 177. – Issue 1. – 1 March 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012096.

143. Blessing, L. A process-based approach to computer-supported engineering design. University of Twente, Enschede. – 1994. – 369 p.



144. David, M. Anderson. Design for Manufacturability. How to Use Concurrent Engineering to Rapidly Develop Low-Cost, High-Quality Products for Lean Production. New York. Productivity Press, 2020. – 590 p.

145. Rahman Abdul Rahim, A. and Shariff Nabi Baksh, M. (2003), «The need for a new product development framework for engineer-to-order products», European Journal of Innovation Management. – Vol. 6 No. 3. – pp. 182 – 196. <https://doi.org/10.1108/14601060310486253>.

146. Scikit-learn 1.2.2 documentation // Scikit-learn machine learning in Python [Электронный ресурс]. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/> (дата обращения: 31.03.2023).

147. Seliverstov, G. V. Damage of metal structures in zones of stress concentration during elastoplastic deformation / G. V. Seliverstov, P. A. Sorokin, A. S. Tolokonnikov // Russian Journal of Heavy Machinery. – 2004. – No. 1. – P. 14 – 15.

148. Taguchi, G., S. Chowdhury and Y. Wu, 2004. Taguchi's Quality Engineering Handbook. Wiley-Interscience, pp: 1696.

149. Yassine, A. Complex Concurrent Engineering and the Design Structure Matrix Method / A. Yassine, D. Braha. Concurrent Engineering. – 2003. – 11(3). – P. 165 – 176. Doi:10.1177/106329303034503.

150. Zakoldaev, D. A. Computer-aided design of technical documentation on the digital product models of Industry 4.0 / D. A. Zakoldaev, A. V. Shukalov, I. O. Zharinov, O. O. Zharinov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 483 (2019) 012069 doi:10.1088/1757-899X/483/1/012069.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



Российская Федерация

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
«СТРОЙТЕХНИКА»**

ИНН 7114005816, КПП 711401001, ОГРН 1027101374871  
301767, Россия, Тульская область, г. Донской, мкр. Центральный, ул. Октябрьская, д. 105  
тел/факс: (48746) 5-04-72, e-mail: info@donkran.ru, www.donkran.ru

**АКТ****использования результатов диссертационного исследования**

Воробьева Алексея Владимировича

Настоящим актом удостоверяется, что в ООО «Стройтехника» при производстве мостовых кранов использованы следующие результаты научных исследований, проведенных А.В. Воробьевым:

- концепция повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин;
- методика квалиметрической оценки близости цифровых двойников-аналогов проектируемой грузоподъемной машины;
- методика анализа требований к грузоподъемным машинам, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости грузоподъемных машин.

В результате практической реализации в ООО «Стройтехника» результатов диссертационного исследования А.В. Воробьева в виде концепции повышения эффективности и качества процесса конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин и реализующей ее системы информационной поддержки с применением методики анализа требований к грузоподъемным машинам, установленных потребителем, по критерию ресурсоемкости и аналогового проектирования достигнуто снижение на 15-20 % трудоемкости конструкторской подготовки производства выпускаемых предприятием мостовых кранов при обеспечении требуемого уровня качества.

Главный инженер проекта



Г.В. Абрамов

08.06.2023



Общество с ограниченной ответственностью  
«ВМ Техникс»  
ИНН/КПП 7736549427/773601001  
Юр. адрес: 119296, г. Москва, проспект Вернадского, д. 29, этаж 16 П1 К5  
e-mail: info@vmtchnix.ru сайт: http://www.vmtchnix.ru

исх. №349 от «19» 06 2023 года

## АКТ

### использования результатов диссертационного исследования

Воробьева Алексея Владимировича

Настоящим актом удостоверяется, что в ООО «ВМ Техникс» в процессе конструкторской подготовки производства мостовых кранов использованы следующие результаты научных исследований А.В. Воробьева:

– практическая стандартизация принимаемых в процессе конструкторской подготовки производства проектных решений на основе базы данных цифровых двойников грузоподъемных машин;

– управление взаимодействием между участниками процесса аналогового проектирования грузоподъемных машин на основе регрессионного анализа ресурсоемкости грузоподъемной машины;

– методика квалиметрической оценки близости цифровых двойников-аналогов проектируемой грузоподъемной машины.

Полученные результаты диссертационного исследования А.В. Воробьева являются надежным инструментом снижения времени, затрачиваемого конструктором на разработку рабочей конструкторской документации грузоподъемных машин.

И.О. главного конструктора



Т.В. Слащева



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
 ООО ИТЦ «Кран-Сервис»,  
 к.т.н., А.С. Толоконников

«15» июня 2023 г.

АКТ

**научно-технической комиссии об использовании научных положений  
 диссертационного исследования Воробьева Алексея Владимировича**

Научно-техническая комиссия в составе заместителя генерального директора, к.т.н., доцента В.И. Ануфриева, инженера-эксперта, к.т.н., доцента В.П. Бухонова составили настоящий акт о том, что научные положения диссертационной работы:

– методика анализа надежности грузоподъемных машин на стадии конструкторской подготовки производства для оценки способности грузоподъемной машины выполнить установленные требования по долговечности;

– методика анализа ресурсоемкости ремонта грузоподъемных машин, включая трудоемкость, материалоемкость и себестоимость, использованы предприятием в процессах экспертиз промышленной безопасности, диагностирования, технического освидетельствования, ремонта, монтажа и пуско-наладки грузоподъемных машин.

Можно констатировать, что результаты диссертационного исследования Воробьева Алексея Владимировича являются актуальными, своевременными и могут служить теоретической базой при решении конкретных прикладных задач.

Заместитель генерального директора,  
 к.т.н., доцент

В.И. Ануфриев

Инженер-эксперт  
 к.т.н., доцент

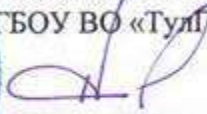
В.П. Бухонов





**УТВЕРЖДАЮ**

Директор по учебной работе  
ФГБОУ ВО «ТулГУ»

  
В.В. Котов  
«31» 05 2023 г.

**АКТ**

об использовании в учебном процессе  
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»  
научных положений и результатов диссертационной работы  
Воробьева Алексея Владимировича

Комиссия в составе и.о. заведующего кафедрой «Транспортно-технологические машины и процессы» д-ра техн. наук, проф. В.Ю. Анцева, начальника учебно-методического управления канд. техн. наук, доц. А.В. Моржова составила настоящий акт о том, что научные положения и результаты диссертационной работы Воробьева А.В. внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Материалы диссертационного исследования используются в образовательном процессе подготовки студентов по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» (специализация «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование») для чтения лекций и проведения практических занятий по следующим дисциплинам: «Надежность механических систем», «Статистические методы в транспортном машиностроении».

Материалы диссертационного исследования используются в образовательном процессе подготовки студентов по направлению 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» (профиль «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины») для чтения лекций и проведения практических занятий по следующим дисциплинам: «Квалиметрические методы в транспортном машиностроении», «Конструирование и расчет технологических машин и оборудования», «Конструкционная прочность», «Оптимальное проектирование».

технологических машин и оборудования», «Теория надежности наземных технологических машин и оборудования».

Обучающиеся используют полученные Воробьевым А.В. в ходе диссертационных исследований результаты в рамках проведения научно-исследовательской работы, выполнении выпускных квалификационных работ.

Рассмотренные в диссертационной работе вопросы особенностей развития научных основ конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин позволяют сформировать у студентов понимание специфики данного направления, определить перспективы его развития в современных условиях. Разработанные модели являются примером использования методов теорий надежности, управления качеством и математической статистики в машиностроении, что демонстрирует студентам межпредметную связь при изучении общеобразовательных и специальных дисциплин. Приведенные в диссертационной работе примеры использования разработанных математических моделей для конструкторской подготовки производства грузоподъемных машин демонстрируют студентам связь теории и практики, а также возможности использования результатов теоретических исследований для решения конкретных практических задач.

Внедрение результатов диссертационной работы Воробьева А.В. в учебный процесс позволяет расширить и углубить знания студентов в области подъемно-транспортного машиностроения.

И.о. заведующего кафедрой  
«Транспортно-технологические  
машины и процессы»,  
д-р техн. наук, проф.



В.Ю. Анцев

Начальник учебно-методического  
управления, канд. техн. наук, доц.



А.В. Морзов

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Вычисление долговечности в среде Mathcad при  $\sigma = 50, 75, 100$  МПа по методике Соколова

## АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ УЗЛА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

## 1. Параметры нагружения

ORIGEN = 1

## 1.1. Параметры циклического блочного нагружения (I расчетный случай)

Действующие напряжения, МПа

$$\sigma_{\max} = \begin{pmatrix} 51.123 \\ 42.601 \\ 23.854 \\ 18.741 \end{pmatrix} \quad \sigma_{\min} = \begin{pmatrix} 6.77 \\ 6.77 \\ 6.77 \\ 6.77 \end{pmatrix}$$

Относительные частоты

$$\mu = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.4 \\ 0.1 \\ 0.3 \end{pmatrix} \quad r = \text{rows}(\mu) \quad i = 1..r \\ M = \sum_i \mu_i \quad M = 1$$

$$\sigma_{\max_i} = \text{if}(\sigma_{\max_i} < 0, 0, \sigma_{\max_i}) \quad \sigma_{\min_i} = \text{if}(\sigma_{\min_i} < 0, 0, \sigma_{\min_i})$$

$$\Delta\sigma_i = \sigma_{\max_i} - \sigma_{\min_i} \quad \Delta\sigma = \begin{pmatrix} 44.353 \\ 35.831 \\ 17.084 \\ 11.971 \end{pmatrix}$$

## 1.2. Максимальное напряжение для расчета на прочность (II расчетный случай)

 $\sigma_{II} = 50$  МПа

## 2. Параметры узла с трещиной

Ширина пояса пролетной балки  $B = 0.53$  мВременное сопротивление стали  $\sigma_B = 420$  МПаПараметры уравнения Париса  $\Delta K = 0.05 \cdot \sigma_B - 9$  МПа $\sqrt{м}$ 

$$\Delta K = 12 \text{ МПа}\sqrt{м} \quad q = 3 \quad V_0 = 10^{-7} \text{ м}$$

Критическое значение КИН  $K_{Ic} = 50$  МПа $\sqrt{м}$ Коэффициенты надежности  $\gamma_n = 0.9$   $\gamma_{dN} = 0.7$   $\gamma_m = 1$ Начальный размер трещины  $a_0 = 0.0075$  м

## 3. Характеристики процесса развития трещины

Относительный размер трещины  $\alpha = 0.0005 \dots 0.367$ К-тарировка для краевой трещины в пластине при растяжении  $\xi(\alpha) = 1.12 - 0.231\alpha + 10.55\alpha^2 - 21.72\alpha^3 + 30.39\alpha^4$ Определение критического размера трещины  $\alpha = 0.008$   $\alpha_c = \text{root}(\xi(\alpha) \cdot \sigma_{II} \sqrt{\pi \alpha B} - K_{Ic}, \alpha)$ 

$$\alpha_c = 0.258 \quad a_c = \alpha_c \cdot B \quad a_c = 0.137 \text{ м}$$

Относительные размеры трещины  $\alpha_0 = \frac{a_0}{B}$   $\alpha_0 = 0.014$ 4. Расчет числа циклов, в течение которых длина трещины увеличится от  $a_0$  до  $a_c$ Определение коэффициента циклического нагружения  $C_{ea} = \sum_i \left[ \mu_i \left( \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_1} \right)^q \right]$   $C_{ea} = (0.423)$ 

Расчет долговечности

$$Z_2 = \frac{\gamma_{dN} (\gamma_n \gamma_m \Delta K)^q B}{V_0 C_{ea} (\Delta\sigma_1 \sqrt{\pi B})^q} \int_{\alpha_0}^{\alpha_c} \frac{1}{\xi(\alpha)^q \alpha^{\frac{q}{2}}} d\alpha$$

$$Z_2 = (4.972 \times 10^3)$$



АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ УЗЛА ПРИ  
НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

1. Параметры нагружения

ORIGIN = 1

1.1. Параметры циклического блочного нагружения (в расчетный случай)

Действующие напряжения, МПа

$$\sigma_{\max} := \begin{pmatrix} 51.123 \\ 42.601 \\ 23.854 \\ 18.741 \end{pmatrix} \quad \sigma_{\min} := \begin{pmatrix} 6.77 \\ 6.77 \\ 6.77 \\ 6.77 \end{pmatrix}$$

Относительные частоты

$$\mu := \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.4 \\ 0.1 \\ 0.3 \end{pmatrix} \quad r := \text{rows}(\mu) \quad i := 1..r$$

$$M := \sum_i \mu_i \quad M = 1$$

$$\sigma_{\max_i} := \text{if}(\sigma_{\max_i} < 0, 0, \sigma_{\max_i}) \quad \sigma_{\min_i} := \text{if}(\sigma_{\min_i} < 0, 0, \sigma_{\min_i})$$

$$\Delta\sigma_i := \sigma_{\max_i} - \sigma_{\min_i} \quad \Delta\sigma = \begin{pmatrix} 44.353 \\ 35.831 \\ 17.084 \\ 11.971 \end{pmatrix}$$

1.2. Максимальное напряжение для расчета на прочность (в расчетный случай)

$\sigma_{II} = 75$  МПа

2. Параметры узла с трещиной

Ширина пояса пролетной балки  $B = 0.53$  м

Временное сопротивление стали  $\sigma_B = 420$  МПа

Параметры уравнения Париса  $\Delta K = 0.05 \cdot \sigma_B = 9$  МПа $\cdot\sqrt{м}$

$$\Delta K = 12 \text{ МПа}\cdot\sqrt{м} \quad q = 3 \quad V_0 = 10^{-7} \text{ м}$$

Критическое значение КИН  $K_{IC} = 50$  МПа $\cdot\sqrt{м}$

Коэффициенты надежности  $\gamma_n = 0.9$   $\gamma_{dN} = 0.7$   $\gamma_m = 1$

Начальный размер трещины  $a_0 = 0.0075$  м

3. Характеристики процесса развития трещины

Относительный размер трещины  $\alpha = 0.008..0.367$

К-тарировка для краевой трещины в пластине при растяжении  $\xi(\alpha) = 1.12 - 0.231\alpha + 10.55\alpha^2 - 21.72\alpha^3 + 30.39\alpha^4$

Определение критического размера трещины  $\alpha_c = 0.008$   $\alpha_c := \text{root}(\xi(\alpha) \cdot \sigma_{II} \sqrt{\pi \alpha B} - K_{IC}, \alpha)$

$$\alpha_c = 0.161 \quad a_c = \alpha_c \cdot B \quad a_c = 0.085 \text{ м}$$

Относительные размеры трещины  $\alpha_0 = \frac{a_0}{B}$   $\alpha_0 = 0.014$

4. Расчет числа циклов, в течение которых длина трещины увеличится от  $a_0$  до  $a_c$

Определение коэффициента циклического нагружения  $C_{ea} = \sum_i \left[ \mu_i \left( \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_1} \right)^q \right]$   $C_{ea} = (0.423)$

Расчет долговечности

$$Z_a := \frac{\gamma_{dN} (\gamma_n \gamma_m \Delta K)^q B}{V_0 C_{ea} (\Delta\sigma_1 \sqrt{\pi B})^q} \int_{\alpha_0}^{\alpha_c} \frac{1}{\xi(\alpha)^q \alpha^{\frac{q}{2}}} d\alpha$$

$$Z_a = (4.736 \times 10^5)$$

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ УЗЛА ПРИ  
НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

## 1. Параметры нагружения

ORIGIN := 1

## 1.1. Параметры циклического блочного нагружения (I расчетный случай)

Действующие напряжения, МПа

$$\sigma_{\max} := \begin{pmatrix} 51.123 \\ 42.601 \\ 23.854 \\ 18.741 \end{pmatrix} \quad \sigma_{\min} := \begin{pmatrix} 6.77 \\ 6.77 \\ 6.77 \\ 6.77 \end{pmatrix}$$

Относительные частоты

$$\mu := \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.4 \\ 0.1 \\ 0.3 \end{pmatrix} \quad r := \text{rows}(\mu) \quad i := 1..r$$

$$M := \sum_i \mu_i \quad M = 1$$

$$\sigma_{\max_i} := \text{if}(\sigma_{\max_i} < 0, 0, \sigma_{\max_i}) \quad \sigma_{\min_i} := \text{if}(\sigma_{\min_i} < 0, 0, \sigma_{\min_i})$$

$$\Delta\sigma_i := \sigma_{\max_i} - \sigma_{\min_i} \quad \Delta\sigma = \begin{pmatrix} 44.353 \\ 35.831 \\ 17.084 \\ 11.971 \end{pmatrix}$$

## 1.2. Максимальное напряжение для расчета на прочность (II расчетный случай)

 $\sigma_{II} := 100$  МПа

## 2. Параметры узла с трещиной

Ширина пояса пролетной балки  $B := 0.53$  мВременное сопротивление стали  $\sigma_B := 420$  МПаПараметры уравнения Париса  $\Delta K = 0.05 \cdot \sigma_B - 9$  МПа $\cdot\sqrt{м}$ 

$$\Delta K = 12 \text{ МПа}\cdot\sqrt{м} \quad q := 3 \quad V_0 := 10^{-7} \text{ м}$$

Критическое значение КИН  $K_{IC} := 50$  МПа $\sqrt{м}$ Коэффициенты надежности  $\gamma_n := 0.9$   $\gamma_{dN} := 0.7$   $\gamma_m := 1$ Начальный размер трещины  $a_0 := 0.0075$  м

## 3. Характеристики процесса развития трещины

Относительный размер трещины  $\alpha := 0, 0.008, 0.367$ К-тарировка для краевой трещины в пластине при растяжении  $\xi(\alpha) := 1.12 - 0.231 \cdot \alpha + 10.55 \cdot \alpha^2 - 21.72 \cdot \alpha^3 + 30.39 \cdot \alpha^4$ Определение критического размера трещины  $\alpha_c := 0.008$   $\alpha_c := \text{root}(\xi(\alpha) \cdot \sigma_{II} \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot B} - K_{IC}, \alpha)$ 

$$\alpha_c = 0.106 \quad a_c := \alpha_c \cdot B \quad a_c = 0.056 \text{ м}$$

Относительные размеры трещины  $\alpha_0 := \frac{a_0}{B}$   $\alpha_0 = 0.014$ 4. Расчет числа циклов, в течение которых длина трещины увеличится от  $a_0$  до  $a_c$ Определение коэффициента циклического нагружения  $\zeta_{ea} := \sum_i \left[ \mu_i \left( \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_1} \right)^q \right]$   $\zeta_{ea} = (0.423)$ 

Расчет долговечности

$$Z_a := \frac{\gamma_{dN} (\gamma_n \gamma_m \Delta K)^q \cdot B}{V_0 \zeta_{ea} (\Delta\sigma_1 \sqrt{\pi \cdot B})^q} \int_{\alpha_0}^{\alpha_c} \frac{1}{\xi(\alpha)^q \cdot \alpha^{\frac{q}{2}}} d\alpha$$

$$Z_a = (4.365 \times 10^5)$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Вычисление долговечности в среде Mathcad при  $\sigma = 50, 75, 100$  МПа при расчете по зависимости (2.6)

## АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ УЗЛА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

## 1. Параметры нагружения

ORIGIN := 1

## 1.1. Параметры циклического блочного нагружения (I расчетный случай)

Действующие напряжения, МПа

$$\sigma_{\max} := \begin{pmatrix} 51.123 \\ 42.601 \\ 23.854 \\ 18.741 \end{pmatrix} \quad \sigma_{\min} := \begin{pmatrix} 6.77 \\ 6.77 \\ 6.77 \\ 6.77 \end{pmatrix}$$

Относительные частоты

$$\mu := \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.4 \\ 0.1 \\ 0.3 \end{pmatrix} \quad r := \text{rows}(\mu) \quad i := 1..r$$

$$M := \sum_i \mu_i \quad M = 1$$

$$\sigma_{\max_i} := \text{if}(\sigma_{\max_i} < 0, 0, \sigma_{\max_i}) \quad \sigma_{\min_i} := \text{if}(\sigma_{\min_i} < 0, 0, \sigma_{\min_i})$$

$$\Delta\sigma_i := \sigma_{\max_i} - \sigma_{\min_i} \quad \Delta\sigma := \begin{pmatrix} 44.353 \\ 35.831 \\ 17.084 \\ 11.971 \end{pmatrix}$$

## 1.2. Максимальное напряжение для расчета на прочность (II расчетный случай)

 $\sigma_{II} = 50$  МПа

## 2. Параметры узла с трещиной

Ширина пояса пролетной балки  $B = 0.53$  мВременное сопротивление стали  $\sigma_B = 420$  МПаПараметры уравнения Париса  $\Delta K = 0.05 \sigma_B = 9$  МПа $\sqrt{м}$ 

$$\Delta K = 12 \text{ МПа}\sqrt{м} \quad q = 3 \quad V_0 = 10^{-7} \text{ м}$$

Критическое значение КИН  $K_{Ic} = 50$  МПа $\sqrt{м}$ Коэффициенты надежности  $\gamma_n = 0.9$   $\gamma_{\Delta K} = 0.7$   $\gamma_m = 1$ Начальный размер трещины  $a_0 = 0.0075$  м

## 3. Характеристики процесса развития трещины

Относительный размер трещины  $\alpha = 0.008 \dots 0.367$ Зависимость КИН от относительного размера трещины  $K_I(\alpha) = 90.285 \alpha^{0.63}$ Определение критического размера трещины  $\alpha_c = 0.008$   $\alpha_c := \text{root}(K_I(\alpha) - K_{Ic}, \alpha)$ 

$$\alpha_c = 0.391 \quad a_c = \alpha_c B \quad a_c = 0.207 \text{ м}$$

Относительные размеры трещины  $\alpha_0 = \frac{a_0}{B}$   $\alpha_0 = 0.014$ 4. Расчет числа циклов, в течение которых длина трещины увеличится от  $a_0$  до  $a_c$ Определение коэффициента циклического нагружения  $\zeta_{ea} := \sum_i \left[ \mu_i \left( \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_1} \right)^q \right]$   $\zeta_{ea} = (0.423)$ 

Расчет долговечности

$$Z_a = \frac{\gamma_{\Delta K} (\gamma_n \gamma_m \Delta K)^q B^{\frac{q}{2}}}{V_0 \zeta_{ea}} \int_{\alpha_0}^{\alpha_c} \frac{1}{K_I(\alpha)^q} d\alpha$$

$$Z_a = (5.155 \times 10^5)$$

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ УЗЛА ПРИ  
НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

1. Параметры нагружения

ORIGIN = 1

1.1. Параметры циклического блочного нагружения (II расчетный случай)

Действующие напряжения, МПа

$$\sigma_{\max} = \begin{pmatrix} 51.123 \\ 42.601 \\ 23.854 \\ 18.741 \end{pmatrix} \quad \sigma_{\min} = \begin{pmatrix} 6.77 \\ 6.77 \\ 6.77 \\ 6.77 \end{pmatrix}$$

Относительные частоты

$$\mu = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.4 \\ 0.1 \\ 0.3 \end{pmatrix} \quad r = \text{rows}(\mu) \quad i = 1..r$$

$$M = \sum_i \mu_i \quad M = 1$$

$$\sigma_{\max_i} = \text{if}(\sigma_{\max_i} < 0.0, \sigma_{\max_i}) \quad \sigma_{\min_i} = \text{if}(\sigma_{\min_i} < 0.0, \sigma_{\min_i})$$

$$\Delta\sigma_i = \sigma_{\max_i} - \sigma_{\min_i} \quad \Delta\sigma = \begin{pmatrix} 44.353 \\ 35.831 \\ 17.084 \\ 11.971 \end{pmatrix}$$

1.2. Максимальное напряжение для расчета на прочность (II расчетный случай)

$\sigma_{II} = 75$  МПа

2. Параметры узла с трещиной

Ширина пояса пролетной балки  $B = 0.53$  м

Временное сопротивление стали  $\sigma_B = 420$  МПа

Параметры уравнения Париса  $\Delta K = 0.05 \cdot \sigma_B - 9$  МПа $\sqrt{м}$

$$\Delta K = 12 \text{ МПа}\sqrt{м} \quad q = 3 \quad V_0 = 10^{-7} \text{ м}$$

Критическое значение КИН  $K_{IC} = 50$  МПа $\sqrt{м}$

Коэффициенты надежности  $\gamma_n = 0.9$   $\gamma_{dN} = 0.7$   $\gamma_m = 1$

Начальный размер трещины  $a_0 = 0.0075$  м

3. Характеристики процесса развития трещины

Относительный размер трещины  $\alpha = 0.008 \dots 0.367$

Зависимость КИН от относительного размера трещины  $K_I(\alpha) = 94.961 \cdot \alpha^{0.64}$

Определение критического размера трещины  $\alpha = 0.008$   $\alpha_c = \text{root}(K_I(\alpha) - K_{IC}, \alpha)$

$$\alpha_c = 0.367 \quad a_c = \alpha_c \cdot B \quad a_c = 0.195 \text{ м}$$

Относительные размеры трещины  $\alpha_0 = \frac{a_0}{B}$   $\alpha_0 = 0.014$

4. Расчет числа циклов, в течение которых длина трещины увеличится от  $a_0$  до  $a_c$

Определение коэффициента циклического нагружения  $\zeta_{ea} = \sum_i \left[ \mu_i \left( \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_1} \right)^q \right] \quad \zeta_{ea} = (0.423)$

Расчет долговечности

$$Z_a = \frac{\gamma_{dN} (\gamma_n \gamma_m \Delta K)^q B^{\frac{q}{2}}}{V_0 \zeta_{ea}} \int_{\alpha_0}^{\alpha_c} \frac{1}{K_I(\alpha)^q} d\alpha$$

$$Z_a = (4.881 \times 10^5)$$

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ УЗЛА ПРИ  
НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

1. Параметры нагружения

ORIGIN := 1

1.1. Параметры циклического блочного нагружения (I расчетный случай)

Действующие напряжения, МПа

$$\sigma_{\max} := \begin{pmatrix} 51.123 \\ 42.601 \\ 23.854 \\ 18.741 \end{pmatrix} \quad \sigma_{\min} := \begin{pmatrix} 6.77 \\ 6.77 \\ 6.77 \\ 6.77 \end{pmatrix}$$

Относительные частоты

$$\mu := \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.4 \\ 0.1 \\ 0.3 \end{pmatrix} \quad r := \text{rows}(\mu) \quad i := 1..r$$

$$M := \sum_i \mu_i \quad M = 1$$

$$\sigma_{\max_i} := \text{if}(\sigma_{\max_i} < 0, 0, \sigma_{\max_i}) \quad \sigma_{\min_i} := \text{if}(\sigma_{\min_i} < 0, 0, \sigma_{\min_i})$$

$$\Delta\sigma_i := \sigma_{\max_i} - \sigma_{\min_i} \quad \Delta\sigma = \begin{pmatrix} 44.353 \\ 35.831 \\ 17.084 \\ 11.971 \end{pmatrix}$$

1.2. Максимальное напряжение для расчета на прочность (II расчетный случай)

$\sigma_{II} := 100$  МПа

2. Параметры узла с трещиной

Ширина пояса пролетной балки  $B := 0.53$  м

Временное сопротивление стали  $\sigma_B := 420$  МПа

Параметры уравнения Париса  $\Delta K = 0.05 \sigma_B - 9$  МПа $\sqrt{м}$

$$\Delta K = 12 \text{ МПа}\sqrt{м} \quad q := 3 \quad V_0 := 10^{-7} \text{ м}$$

Критическое значение КИН  $K_{Ic} := 50$  МПа $\sqrt{м}$

Коэффициенты надежности  $\gamma_n := 0.9 \quad \gamma_{dN} := 0.7 \quad \gamma_m := 1$

Начальный размер трещины  $a_0 := 0.0075$  м

3. Характеристики процесса развития трещины

Относительный размер трещины  $\alpha := 0.008..0.367$

Зависимость КИН от относительного размера трещины  $K_I(\alpha) := 99.642 \alpha^{0.65}$

Определение критического размера трещины  $\alpha_c := 0.008 \quad \alpha_c := \text{root}(K_I(\alpha) - K_{Ic}, \alpha)$

$$\alpha_c = 0.346 \quad a_c := \alpha_c B \quad a_c = 0.183 \text{ м}$$

Относительные размеры трещины  $\alpha_0 := \frac{a_0}{B} \quad \alpha_0 = 0.014$

4. Расчет числа циклов, в течение которых длина трещины увеличится от  $a_0$  до  $a_c$

Определение коэффициента циклического нагружения  $C_{ea} := \sum_i \left[ \mu_i \left( \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_1} \right)^q \right] \quad C_{ea} = (0.423)$

Расчет долговечности

$$Z_a := \frac{\gamma_{dN} (\gamma_n \gamma_m \Delta K)^q B^{\frac{q}{2}}}{V_0 C_{ea}} \int_{\alpha_0}^{\alpha_c} \frac{1}{K_I(\alpha)^q} d\alpha$$

$$Z_a = (4.659 \times 10^3)$$