

На правах рукописи



Чихладзе Зураб Давидович

**Разработка инструментов поддержки принятия решений  
по управлению техническим обслуживанием на местах  
эксплуатации машин и оборудования**

Специальность 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.  
Организация производства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в автономной некоммерческой организации  
дополнительного профессионального образования  
«Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны  
«Алмаз – Антей» им. Академика В.П. Ефремова»

Научный руководитель: **Бром Алла Ефимовна,**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Антипов Дмитрий Вячеславович,** доктор  
технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
«Производство летательных аппаратов и  
управление качеством в машиностроении»  
ФГАОУ ВО «Самарский национальный  
исследовательский университет имени академика  
С. П. Королева»  
**Трушин Николай Николаевич,** доктор  
технических наук, доцент, профессор кафедры  
«Технология машиностроения», ФГБОУ ВО  
«Тульский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Самарский государственный  
технический университет»

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета 24.2.331.18 при Московском государственном  
университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская  
ул., д.7, ауд.414мт.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и  
на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета к.т.н.

Е.С. Постникова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Современные тенденции развития машин, оборудования и технологических систем проявляются в увеличении сложности конструкции и многофункциональности техники, что приводит к росту потенциально возможных отказов и сбоев в работе технических устройств. Благодаря развитию средств диагностики и мониторинга технического ресурса, а также технологии обработки больших данных, стал возможным переход к эксплуатации техники по ее фактическому состоянию, когда процессы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) выполняются в требуемом по факту объеме, а не в соответствии с усредненными данными плана обслуживания.

С одной стороны, этот подход обеспечил экономию ресурсов на организацию и выполнение ТОиР. С другой стороны, это позволило четко увидеть проблему качества выполнения процессов ТОиР, особенно на местах эксплуатации, где требуется ремонт силами выездных ремонтных бригад. На практике это проявляется в несоблюдении регламентов выполнения процессов ТОиР, требований к численности и квалификации технического персонала, что в результате является причиной нарушения сроков ремонта и снижении эффективности организации послепродажного обслуживания в целом.

Настоящая проблема наиболее актуальна для машин, эксплуатация которых подразумевает выполнение ТОиР непосредственно на площадке эксплуатации (технологическое оборудование для тяжёлого и среднего машиностроения, особенно задействованное в энергетическом и нефтегазовом секторе), из-за невозможности их исключения из производственного процесса и экономической нецелесообразности, обусловленной длительными простоями и снижением выпуска конечной продукции. Однако у ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации имеются свои особенности, обусловленные дефицитом средств механизации и автоматизации, отсутствием достоверных данных о фактическом состоянии машин и оборудования, что в итоге приводит к проблеме снижения достоверности прогнозирования сроков выполнения работ, так как сложно, а часто и невозможно определить количество необходимых специалистов в ремонтной бригаде, объемы требуемых для ремонта ресурсов, особенно с учетом вероятного брака запасных частей.

В результате это приводит к нестабильности работы бригад ТОиР, незаконченным ремонтам, которые могут растягиваться на длительные сроки, к повторным ремонтам ранее отремонтированных узлов, низкому качеству организации и выполнения работ ТОиР, претензиям и штрафам со стороны эксплуатантов и постоянной реорганизации процессов ТОиР в производственных компаниях. Низкий уровень анализа процессов ТОиР и отсутствие показателей

для оценки качества выполнения работ приводит к накоплению больших объемов несогласованных данных, увеличению сроков обработки информации на каждом этапе, что также непосредственно влияет на результативность и ритмичность работ. Применяемые на сервисных предприятиях инструменты анализа и планирования ТОиР не позволяют, без привлечения сторонних организаций, осуществлять оперативный прогноз влияния количества специалистов на результаты работ в динамике, что влияет на эффективность принятия решений руководством.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки совокупности инструментов поддержки принятия решений по организации ТОиР, основанных на моделировании широкого диапазона возможных сценариев процессов выполнения ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации.

#### **Степень ее разработанности:**

Исследования проблемы планирования регламентированного ТОиР машин и оборудования в промышленности освещены в работах Аксенова А.П., Грищенко В.А., Немченко Ю.М. Николенко Б.М., Гильбуха А.Я., Николенко А.М., Пинемасова А.М. Матюшина В., Пустонина Л.С., Горчукова К.А., Желдакова И.Я. Вопросами оперативно-производственного планирования занимались Скорнякова Е.А. Зубкова Н.В. Назаренко М.А.; значительный вклад в развитие проблем стратегического планирования процессов ТОиР внесли ученые: Абалкин Л.И., Виханский О.С., Клейнер Г.Б., Ковалев А.П., Рыжикова Т.Н.. Вопросы управления жизненным циклом продукции освещены в научных работах А.А. Колобова, А.Е. Бром, Г. Голдсмит (G. Goldsmith), Омельченко И.Н., Д.М. Джонстон (J.M. Johnston). Анализом и тенденциями развития систем ТОиР занимались: Эламик В.Ю., А Томас (A. Thomas), Г.А. Тродд (G.A. Trodd)

Анализ указанных работ показал, что данные работы рассматривают либо узкие области поддержки эксплуатации, либо процессы управления жизненным циклом продукции в целом. Сложилась проблемная ситуация, сущность которой заключается в том, что разработанный научно-методический аппарат не учитывает особенности процессов ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации и не позволяет оперативно прогнозировать весь диапазон возможных сценариев протекания ремонтных работ.

#### **Цель исследования:**

Обеспечить повышение качества выполнения процессов ТОиР за счет разработки комплекса инструментов поддержки принятия решений по управлению техническим обслуживанием машин и оборудования на местах эксплуатации, включающих нечеткую и имитационную модели ремонтных работ для оперативного планирования сроков выполнения работ, необходимого

количества и специализации персонала.

**Объектом исследования** является процесс ТОиР техники на местах эксплуатации. **Предметом исследования** являются методы совершенствования процессов ТОиР техники на местах эксплуатации.

**Задачи исследования:**

1. Анализ проблемы обеспечения качества работ по ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации и подходов к организации послепродажного обслуживания.

2. Исследование структуры и ключевых элементов процессов ремонта техники на местах её эксплуатации и формирование параметрической базы знаний качественного состояния работ по ТОиР.

3. Моделирование процесса ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации на основе системы оценки о качестве работ, построенной с использованием теории нечетких множеств.

4. Разработка метода настройки параметров модели процесса ТОиР машин и оборудования на местах их эксплуатации для ее адаптации к реальному процессу работ.

5. Разработка имитационной модели процесса ТОиР для оперативного прогнозирования результатов работ, требуемого количества и специализации персонала, задействованных в процессе ремонтных работ.

6. Апробация и верификация разработанных инструментов поддержки принятия решений на основе оценки качества выполнения процесса ТОиР.

**Научная новизна работы:**

1. Разработана модель процесса ТОиР, построенная с использованием теории нечетких множеств и позволяющая, в отличие от существующих, четко оценивать слабоформализованные критерии времени выполнения работ.

2. Разработан метод настройки параметров модели процесса ТОиР для установления соответствия переменных модели и состояния реального ремонтного процесса, включающий коэффициент сходства и алгоритм определения близости модели и процесса, что обеспечивает адаптацию модели под реальные условия выполнения работ.

3. Построена имитационная модель процесса ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации, которая, в отличие от существующих, позволяет оперативно планировать необходимое количество и специализацию персонала, а также сроки окончания ремонта.

**Соответствие паспорту научной специальности 2.5.22:**

– №16 Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов;

– №23 Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами.

**Теоретическая значимость работы** заключается в развитии методов и средств планирования и управления процессом ТОиР техники на местах эксплуатации.

**Практическая значимость работы** заключается в повышении результативности процесса принятия управленческих решений по организации процессов ТОиР на основе применения разработанных инструментов, позволяющих сократить количество нарушений при выполнении ремонтов за счет возможности оперативного прогнозирования сроков работ и количества требуемого персонала, что позволит повысить качество работ по ТОиР.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Модель процесса ТОиР, построенная с использованием теории нечетких множеств, представляющая собой базу знаний и позволяющая использовать опыт экспертов для повышения результативности работ.

2. Метод настройки параметров модели процесса ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации для установления соответствия переменных состояния модели переменным состояниям её прообраза, который позволяет проводить оценку точности построенной модели процесса ТОиР, а следовательно, адаптировать модель под реальные ремонтные процессы.

3. Имитационная модель процесса ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации, позволяющая оперативно прогнозировать сроки окончания работ, требуемое количество и специализацию персонала.

**Теоретическую и методологическую основу исследования** составляют научные труды зарубежных и отечественных ученых в области организации производства. **Методы исследования в диссертации** базируются на основных положениях теории организации машиностроительного производства, математического и имитационного моделирования процессов.

**Степень достоверности и апробация результатов:**

Достоверность материалов диссертационной работы основывается на использовании в диссертации признанных положений отечественной и зарубежной науки, апробированных методов и средств исследования, статистических материалов, нормативных документов, результатов измерений и расчетов, разработок признанных научных коллективов и научных авторитетов, а также подтверждается результатами применения инструментов поддержки принятия решений. Был проведен расчет и анализ результатов выполненных ремонтных работ АО «Промкатализ» за два года, а проведенная оценка достоверности позволила сделать вывод об отсутствии случайного характера в повышении качества результатов работ. Применение в АО «МКБ «Факел»

инструментов, разработанных в рамках диссертационного исследования, позволило упростить расчеты в процессе разработки эксплуатационной документации. Положительные результаты применения разработанных инструментов подтверждены соответствующими актами внедрения и реализации результатов диссертации.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации опирается на представительность и достоверных данных, корректность методик исследования и проведенных экспериментов моделирования и расчетов. Что также подтверждается апробацией и результатами практической реализации результатов работы. По результатам апробации инструментов поддержки принятия решений по управлению ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации было зафиксировано повышение качества и эффективности работ.

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 5 научных работах в рецензируемых журналах ВАК РФ, а также докладывались, обсуждались и опубликованы в сборниках материалов 6 научных конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов и заключения, списка литературы из 102 наименований, приложения. Диссертация содержит 162 страницы основного текста, 94 рисунка, 7 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, проведена постановка цели исследования и задач, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, также дана оценка новизны, достоверности и практической ценности полученных результатов, также сформулированы защищаемые положения.

**Глава 1** диссертации содержит анализ причин несоответствующих результатов работ ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации, которые выражаются в низкой результативности, ритмичности и качестве работ, что проявляется в увеличении сроков работ и повторных ремонтов ранее отремонтированных узлов машин и оборудования.

Понятие качества определено в серии международных и национальных стандартах и включает в себя множество требований к организации системного и процессного подхода для обеспечения качества и своевременности работ. Однако часто существующие системы управления игнорируют большую часть экономически неявных критериев, а анализ несет формальный характер. Для достижения высокого качества работ необходим глубокий и комплексный анализ со стороны как сервисной, так и эксплуатирующей организаций, который можно реализовать через систему критериев и коэффициентов, определяющих качество

результатов ремонтных работ от поступления заявки до сдачи заказчику документов, закрывающих работы.

Проведенный в рамках Главы 1 анализ показал, что причинами низких показателей результативности, ритмичности, своевременности и качества работ являются отсутствие предварительных достоверных данных о фактическом состоянии техники, сложности расчета и прогнозирования сроков работ, количества и специализации задействованных работников сервисной организации.

Применяемые в сервисных организациях системы управления и оценки качества не позволяют оперативно прогнозировать и контролировать процесс выполнения работ. Личный опыт и опыт множества исследователей показывает, что первичные попытки формирования расчетных групп не дают желаемого эффекта, что приводит к увеличению их штата и сложности многокомпонентных расчетов, а в итоге приводит к их расформированию.

Для оценки качества выполненных работ по ТОиР в диссертации было предложено использовать коэффициент нарушения требований к работам. В общем виде этот коэффициент предоставляет собой функциональную зависимость от трех основных параметров:  $K_{нтр} = f(T, R, S)$ , где  $T$  – время выполнения операций технического обслуживания;  $R$  – количество задействованного персонала;  $S$  – специализация задействованного в процессе работ персонала. Но в таком виде аналитически получить значение этого коэффициента довольно сложно, поэтому, для получения численного значения, было предложено рассчитывать по формуле (1):

$$K_{нтрj}(t) = r_j(t)/N_j(t), \quad (1)$$

где  $K_{нтрj}(t)$  – коэффициент нарушения требований к работам на изделиях  $j$ -того типа;  $r_j(t)$  – количество претензий к работам на изделиях  $j$ -того типа за период  $t$ ;  $N_j(t)$  – количество изделий  $j$ -того типа за период  $t$ .

Данный коэффициент позволит проводить оценку деятельности сервисной организации как для внутреннего управления качеством работ, так и для формирования единого подхода к оценке качества процесса ТОиР с заказчиком.

**Глава 2** диссертации содержит результаты формализации и моделирования процесса сервисного обслуживания предприятия на местах эксплуатации, построенного с использованием теории нечетких множеств. Также обоснован и предложен метод настройки параметров модели процесса постпродажного обслуживания на местах эксплуатации, позволяющий оценивать точность построенной модели по отношению к реальному процессу ТОиР, а следовательно, позволяющий достаточно точно адаптировать модель под реальные ремонтные процессы, без необходимости внесения всего массива влияющих факторов.



Выполнение работ ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации представляет собой сложную систему взаимодействий между внутренними подразделениями предприятия, в которой информация о фактическом состоянии техники и необходимых ресурсов для проведения работ играет большую роль. Данные о прогнозных сроках выполнения работ и необходимом количестве специалистов являются факторами неопределенности при принятии решений в рамках управления работами, требуют прогнозирования и оценки. Одно из ключевых требований к разрабатываемым инструментам поддержки принятия решений является их гибкость и адаптивность в процессе организации и управления ремонтными работами. Экспертные методы как наиболее доступные и максимально результативные в процессе построения систем управления позволяют сформировать устойчивый фундамент будущей системы управления.

В диссертации на основе экспертных методов были формализованы процессы выполнения ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации в виде технологической сети (ТС), представляющей собой ориентированный граф, узлы которого являются отдельными этапами работ (Рис. 1). Начальным узлом модели является тот, на который поступает задача по выполнению ремонтной работы, а конечным узлом – предъявленные (выполненные) работы. Все узлы имеют входы и выходы (один к одному (1,1), один ко многим (1,m), многие к одному (n,1), многие ко многим (n,m)).

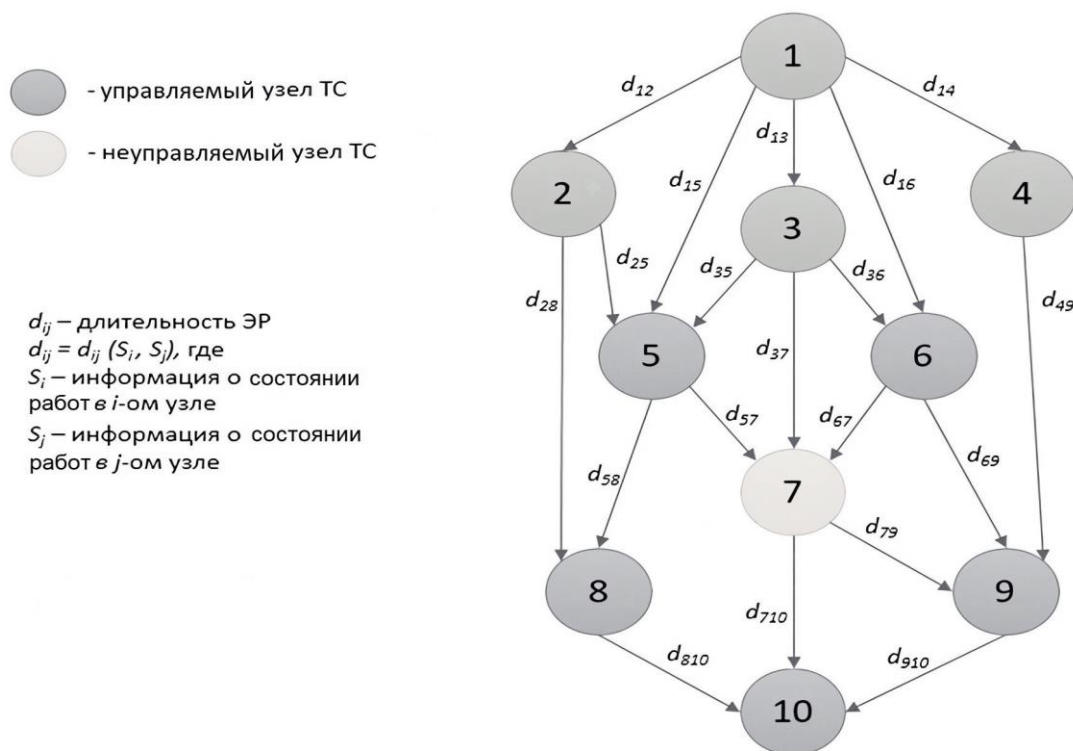


Рис. 1. Ориентированный граф ТС ТОиР

С целью наглядного представления деятельности агентов в узле ответственности разработана схема локальной агентной системы управления этапом процесса ТООР на местах эксплуатации, представленная на Рис. 2.

Каждый агент  $A_{ij}$  собирает в момент времени  $t_k$  информацию своего узла:

- режим этапа работ  $P$  (установленная трудоемкость, определяемая как отношение нормативного времени выполнения работ к его объему);
- объем текущего этапа работ  $V$ ;
- время, оставшееся на окончание этапа работ  $t_{\text{оконч}} = V * P$ ;
- соответствие режима работ состоянию его этапа  $S$ ;
- режим этапа работ, соответствующий его состоянию  $P^*$ ;
- время, оставшееся до завершения этапа работ, в режиме, соответствующем его состоянию  $t_{зр}$ ;
- потери, связанные с несоответствием режима и состояния этапа работ  $t_{\text{потери}} = t_{\text{оконч}} - t_{зр}$ ,  $P_{\text{потери}} = P * V - P^* * V$ .

За счет деятельности агентов, модель ТООР машин и оборудования на местах эксплуатации позволяет формировать событийную модель принятия решений. Для каждого узла определены данные об объеме, свойствах этапов работ и режимах управляющих воздействий в каждый момент времени.

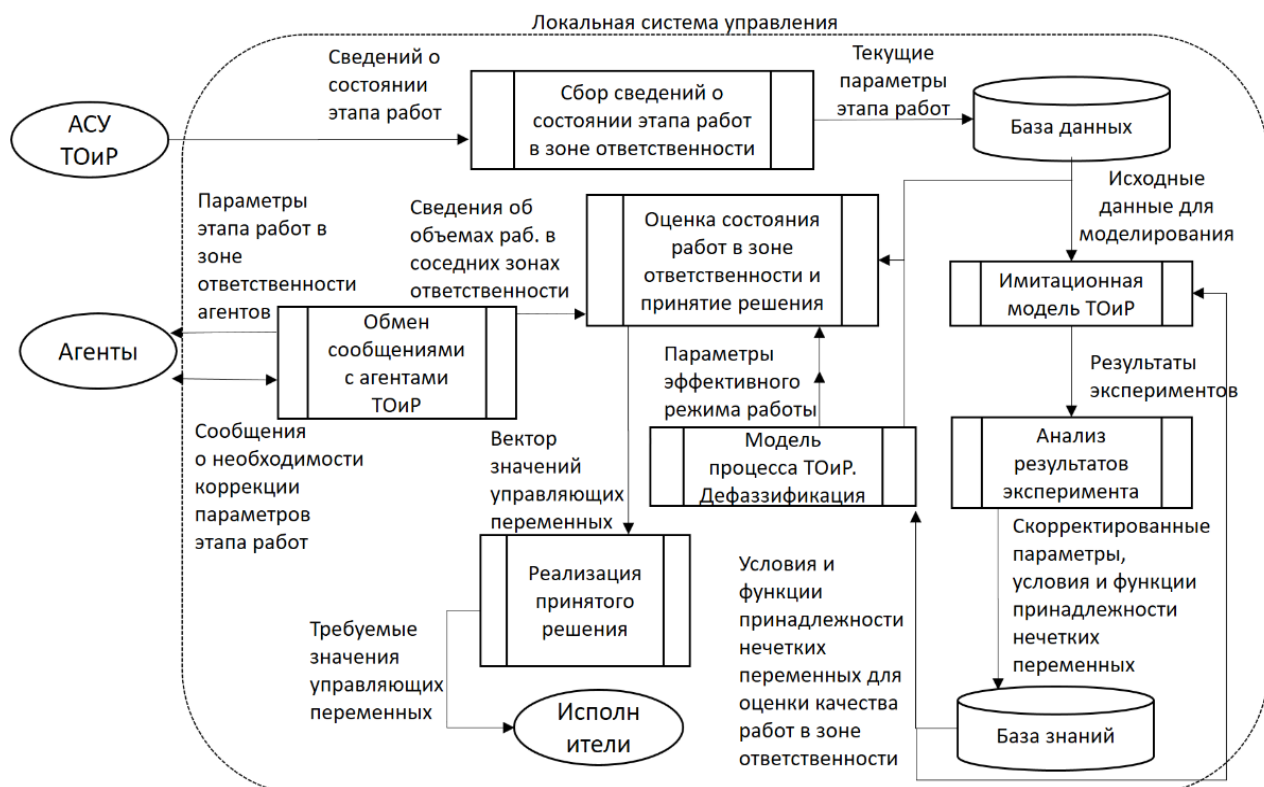


Рис. 2. Схема локальной системы управления этапом процесса

Информация о состоянии узлов агентов поступает глобальному агенту, осуществляющему:

- расчет минимального времени, через которое в узлах процесса ожидается изменение состояния этапа работ  $\tau$ ;

- расчет текущих потерь времени и результативности процесса ТОиР по всей цепи работ  $t_k$ ;
- расчет плановых потерь времени и результативности процесса ТОиР всей цепи работ  $t_{k+1}$ ;
- выбор режима работы  $P$  для каждого узла агента  $t_{k+1} = t_k + \tau$ ;
- передача рекомендуемых управляющих режимов работы для каждого узла с учетом переходных процессов в узлах агентам  $U$ .

На основании ранее указанного можно сделать следующие выводы: связи между агентами могут позволить реализовать различные стратегии взаимодействия агентов и, в частности, для принятия коллективного управленческого решения. Событийная модель агентного принятия решений ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации позволяет сформировать модель управления агентами Рис. 3. Под локальными агентами модели процесса подразумеваются этапы работ и их исполнители.



Рис. 3. Модель управления агентами

С целью определения достаточности глубины декомпозиции процессов ТОиР машин и оборудования техники на местах эксплуатации, необходимо установление соответствия переменных состояния модели процесса ТОиР и переменных ее прообраза. Таким образом, в диссертационной работе на базе метода наименьших квадратов разработан метод настройки параметров нечеткой модели процесса ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации.

Заданы:

1. Состояние процесса ТОиР -  $\bar{Y}^*(t) = (Y_1^*(t), Y_2^*(t), \dots, Y_i^*(t), \dots, Y_m^*(t))$ , при определенных условиях  $R$  для  $t \in [t_0, T]$ .
2. Область параметров ТОиР  $\bar{B} = (b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_m)$ .
3. Состояние модели процесса ТОиР  $\bar{Y}(t)$ ,  $t \in [t_0, T']$ , при определенных условиях  $R'$  для  $t \in [t_0, T]$ .

4. Область параметров модели процесса ТООР  $\bar{A} = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_r)$ .
5. Ограничения:  $R$  определяет допустимые значения параметров процесса ТООР в виде системы ограничений, а  $R'$  определяет допустимые значения параметров модели процесса ТООР в виде системы ограничений (Таблица 1)

Таблица 1.

Допустимые значения параметров процесса и модели	
$R$	$R'$
$\begin{cases} b_1^{min} \leq b_1 \leq b_1^{max} \\ \dots \\ b_i^{min} \leq b_i \leq b_i^{max} \\ \dots \\ b_m^{min} \leq b_m \leq b_m^{max} \end{cases}$	$\begin{cases} a_1^{min} \leq a_1 \leq a_1^{max} \\ \dots \\ a_i^{min} \leq a_i \leq a_i^{max} \\ \dots \\ a_m^{min} \leq a_m \leq a_m^{max} \end{cases}$

6. Сетка области параметров модели процесса ТООР.  
Для множества  $R'$  построим сетку  $S(\Delta_i)$ :  $\Delta_i = \frac{a_i^{min} - a_i^{max}}{n_i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $u_j$  –  $j$ -ый узел сетки ( $j = 1, 2, \dots, n_1, n_2, \dots, n_m$ ). Для узла  $u_j$  определено значение  $\bar{A}$ , т.е.  $(a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jm})$ . Для узла  $u_j$  и начального состояния  $\bar{Y}_0 \in D$  определено состояние модели процесса ТООР  $\bar{Y}(t, Y_0 \in D, (a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jm}) \in R') = \bar{Y}_j(t, \dots)$ ,  $j = 1, 2, \dots, n_1, n_2, \dots, n_m$ .
7. Шаг дискретизации времени  $t_i = t_0 + h(i-1)$ ,  $h = \frac{T}{N}$ ,  $N$  – число точек дискретизации.
8. В пространстве параметров модели процесса ТООР строим матрицу квадратичных невязок  $W_{rm}$  для всех пар состояния модели и процесса ТООР, под невязкой подразумевается величина расхождения приближённого равенства.
9. В пространстве параметров модели формируем вектор минимальных квадратичных невязок  $W_{min}^- = (W_{min1}, W_{min2}, \dots, W_{minr})$ .
10. В пространстве параметров модели формируем нуль единичную матрицу отклонений квадратичных невязок от минимальных  $W_{rm}'$ .
11. В пространстве параметров модели формируем вектор коэффициентов близости ( $\bar{\mu}$ ) и различия ( $\bar{\nu}$ ) процесса ТООР и его модели (Таблица 2).
12. В векторе коэффициентов близости определяется наилучший, для этого зададим  $\delta$ . Будем считать, что модель ТООР соответствует ТООР, если найдётся такое значение вектора  $\bar{A} = \bar{A}' \in R'$  для которого выполняется условие  $\bar{\mu} \leq \delta$ , для  $t \in [t_0, T]$ .

$$\beta \geq \delta, \text{ для } t \in [t_0, T] \quad (2)$$

Если условие не выполняется, тогда следует уменьшить размеры сетки  $S$  или уменьшить временной шаг дискретизации. Если за определённое число шагов уменьшения размера сетки или временного шага дискретизации условие не

выполняется, тогда следует, что выбранная модель ТОиР не соответствует процессу ТОиР с заданной мерой близости. Величина  $\gamma = 1 - \beta$  характеризует различие модели и процесса.

Таблица 2.

Расчет вектора коэффициента близости модели и объекта

	$Y_1^*(t), Y_1(t)$	...	$Y_m^*(t), Y_m(t)$	$\bar{v} (0 \leq \bar{v} \leq 1)$	$\bar{\mu} (0 \leq \bar{\mu} \leq 1)$
$\bar{A}_1$	$W'_{11}$	...	$W'_{1m}$	$\sum_{i=1}^m W'_{1m}/m$	$1 - \sum_{i=1}^m W'_{1m}/m$
...	...	...	...		...
$\bar{A}_r$	$W'_{r1}$	...	$W'_{rm}$	$\sum_{i=1}^m W'_{rm}/m$	$1 - \sum_{i=1}^m W'_{rm}/m$

Далее в диссертационной работе предложена модель агентного управления предприятия с применением инструментов поддержки принятия решений процесса ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации (Рис. 4).

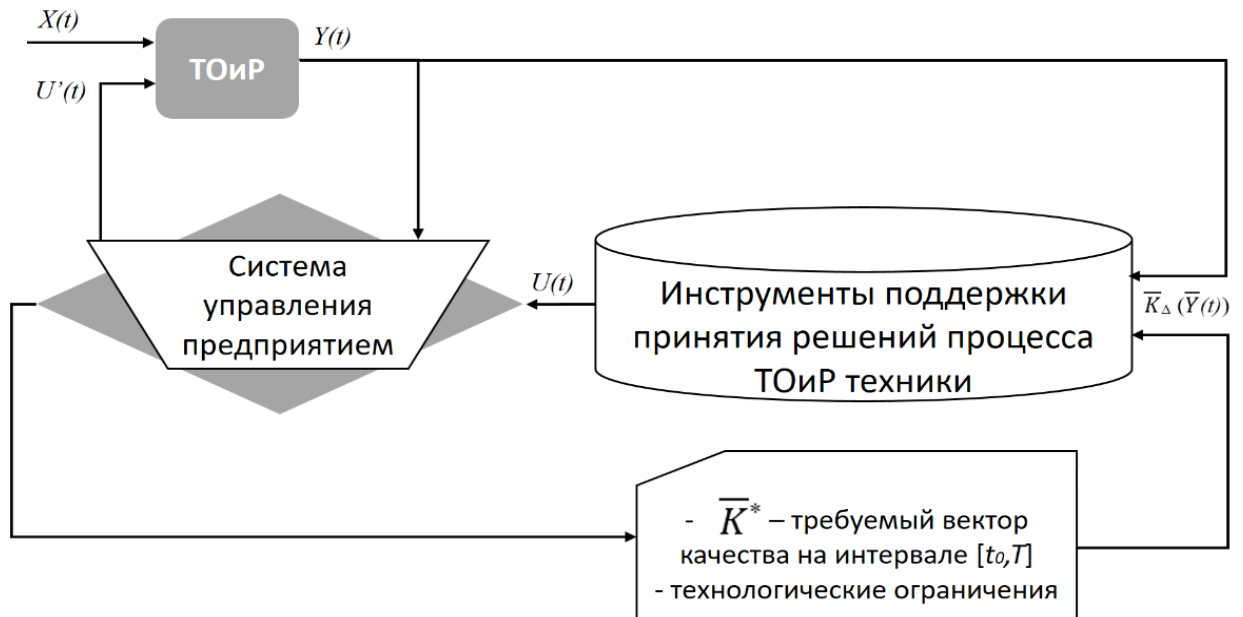


Рис. 4. Модель агентного принятия решения при управлении работами

Она отражает динамику функционирования работ по принципу вход-процесс-выход, где: задан интервал времени  $[t_0, T]$ ; определен вектор нечётких входных переменных  $\bar{X}(t)$ ,  $t \in [t_0, T]$ , нечёткий вектор текущего состояния этапа работ ТОиР  $\bar{Y}(t)$ ,  $t \in [t_0, T]$  и нечёткий вектор управления  $\bar{U}(t)$ ,  $t \in [t_0, T]$ ; определён показатель

качества работ  $\bar{K}_\Delta$ ,  $t \in [t_0, T]$ ; определена параметрическая база знаний (БЗ1), устанавливающая связь  $\bar{Y}(t) = \Omega_1(\bar{X}(t))$ ; определена параметрическая база знаний (БЗ2), устанавливающая связь  $\bar{U}(t) = \Omega_2(\bar{X}(t), \bar{Y}(t))$  вектор нечетких переменных, БЗ1, БЗ2 представлены системами продукций (набором правил, используемых как база знаний ТОиР); задана процедура определения фактического вектора показателя качества работ  $K_\Delta = K_\Delta(\bar{U}(t))$   $[0, T]$ , где  $K_\Delta$  – нечёткий вектор. Посредством процедуры дефаззификации возможно перевести нечеткие вектора  $\bar{K}_\Delta$ ,  $\bar{Y}(t)$ ,  $\bar{X}(t)$ ,  $\bar{U}(t)$  в четкие переменные.

Далее в диссертационной работе была разработана нечеткая модель ТОиР техники на местах эксплуатации, представляющая собой экспертную базу знаний и систему оценки процесса ТОиР, а следовательно, ядро имитационной модели. Для удобства описания в среде *Matlab* отдельные подэтапы работ ТОиР обозначены как номера операций. На Рис. 5 представлена функция принадлежности входных параметров «операция 1.1» от времени ее выполнения в рамках этапа выполнения и предъявления результатов работ эксплуатирующей организации.

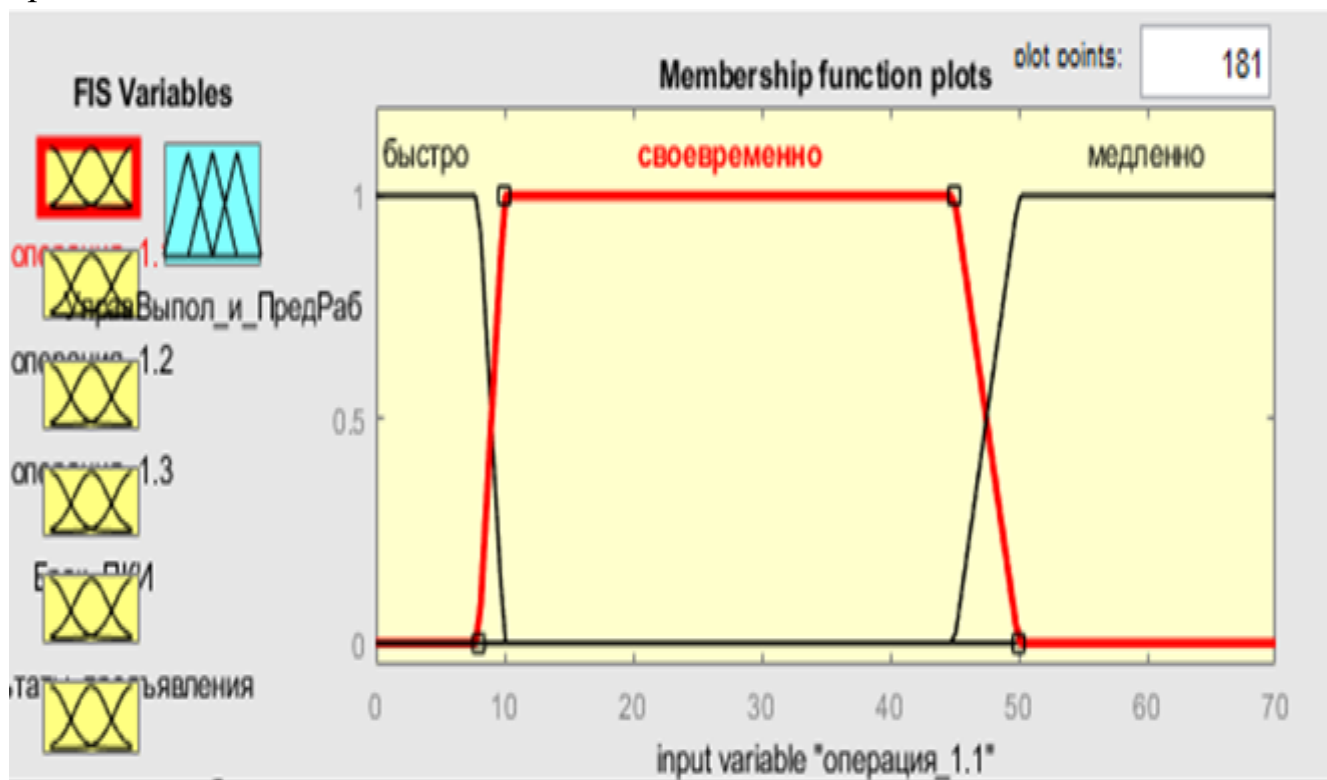


Рис. 5. Функции принадлежности, описывающие входной параметр «операция 1.1» на этапе выполнения и предъявления работ эксплуатирующей организации

Визуальное представление процесса дефаззификации нечеткого вывода этапа выполнения и предъявления результатов работ эксплуатирующей организации в среде *Matlab*, представлена на Рис. 6.



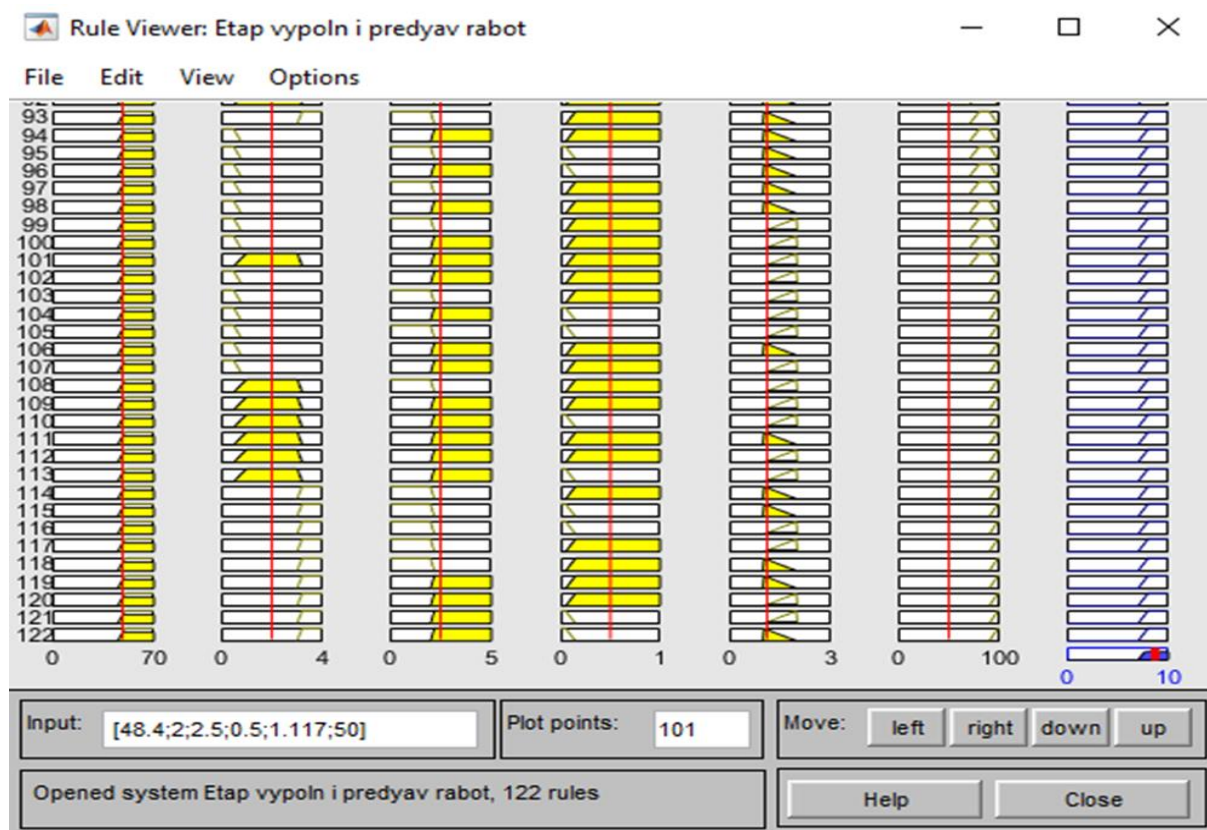


Рис. 6. Визуализация дефаззификации нечеткого вывода на этапе выполнения и предъявления работ эксплуатирующей организации

По результатам разработки и применения нечеткой модели процесса ТОиР по месту эксплуатации техники было принято решение о необходимости разработки инструмента, позволяющего осуществлять оперативное прогнозирование процессов, для чего была разработана имитационная модели выполнения ТОиР агентного типа. Применение агентного подхода в имитационном моделировании обоснованно тем, что позволяет добиться более высокой степени гибкости и масштабируемости имитационной модели без применения множества расчетов и абстракций каждого отдельного элемента модели, используемых в методах системной динамики. Что позволяет более просто и оперативно регулировать последовательности, параметры и уровень декомпозиции моделируемых процессов.

Таким образом, проведенные в рамках Главы 2 формализация, моделирование процесса ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации и проверка адекватности модели, позволили на своей основе перейти к разработке имитационной модели процесса.

**Глава 3** диссертации содержит результаты разработки и апробации агентной имитационной модели процесса ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации, реализованной в среде Anylogic с помощью библиотеки

моделирования процессов, где каждая операция – канал обслуживания, единица персонала – ресурс канала обслуживания, уведомления – поток заявок.

С целью проведения автоматизации процесса определения лучших значений количества каждого типа специалистов имитационной модели, использован встроенный инструмент Anylogic – OptQuest. Для эксперимента были определены и заданы начальные, минимальные и максимальные ограничения значений переменных, установлен шаг дискретизации и функция определения лучших значений количества и типа специалистов. По результатам эксперимента были определены лучшие значения переменных модели процесса ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации Рис. 7. Согласно проведенного эксперимента прирост показателя «общий коэффициент соответствия работ ( $K_{cp}$ )» составил 29 %.  $K_{cp}$  определяется как среднее арифметическое всех операций по показателю - Доля соответствия работ ( $D_{cp}$ ).  $D_{cp}$  определяется по формуле (3):

$$D_{cp} = (x + \frac{1}{2}y + \frac{1}{3}e) / (x + y + e + z), \quad (3)$$

где  $x$  – сумма значений «своевременно»;  $y$  – сумма значений «быстро»;  $e$  – сумма значений «медленно»;  $z$  – сумма значений «сМедленно» и «сБыстро»

	Текущее	Лучшее
Итерация:	504	262
Функционал↓	42.384	71.436
Параметры	Copy best	
кол_перс_УПОИЗ	7	7
кол_инж_ПП	21	17
кол_инж_ВРБ	76	79
кол_эконом_бугалт	24	12

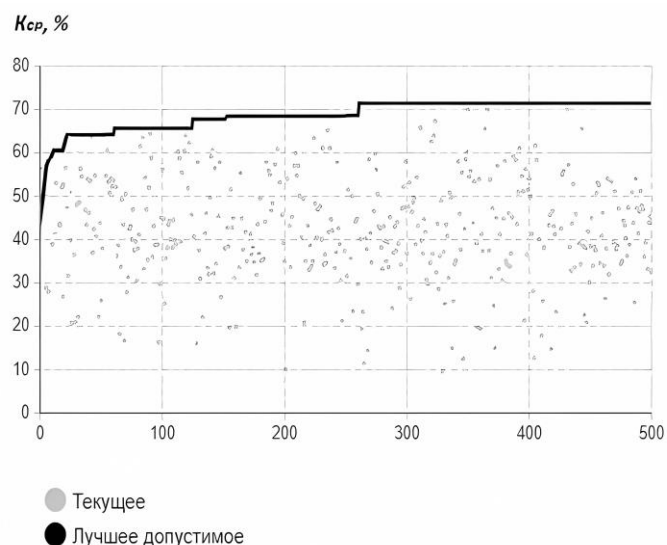


Рис. 7. Результаты оптимизационного эксперимента

Результаты апробации и проверки достоверности результатов, разработанных инструментов поддержки принятия решений, проверены гипотезой о расхождениях средних значений 2022 и 2023 года. Для чего у производственно-диспетчерского отдела были взяты фактические данные о результатах выполнения работ ТОиР машин и оборудования за 2022 и 2023 года по всей широкой географии работ в РФ (Волгоград, Саратов, Сызрань, Уфа, Орск, Пермь, Нефтекамск, Краснодар, Ухта, Омск). От экономистов АО «Промкатализ» получен анализ, согласно которому количество рекламаций сократилось на 15%, что в итоге позволило снизить издержки предприятия, обусловленные повторными работами, на 22%. Результатом применения разработанных



инструментов поддержки принятия решений является повышение качества работ в 2023 по отношению к 2022 на 42%.

Для оценки достоверности сокращения нарушений требований к работам и подтверждения отсутствия случайного характера полученных результатов, не связанными с применением инструментов поддержки принятия решений, была проведена проверка гипотезы о расхождении средних значений 2022 и 2023 года с использованием t-распределения Стьюдента. Статистика за 2022-2023 и рассчитанные средние значения приведены в Таблице 3.

Таблица 3.

Распределение числа нарушений сроков ТОиР техники

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\bar{X}$
$K_{нтр2022}$	3	4	5	8	6	4	9	4	7	5	6	3	<u>5,333333333</u>
$K_{нтр2023}$	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3	2	<u>2,25</u>

$$S_1 = \sqrt{\frac{40,66667}{12-1}} = 1,922751; S_2 = \sqrt{\frac{2,583335}{12-1}} = 0,484612; t = \frac{5,333333-2,25}{\sqrt{1,242508+0,606693}} = 2,76$$

Для вероятности 0,05 таблицы распределения статистики t, при n=22  $t^T=2,07$ ,  $t = 2,76 > t^T=2,07$

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что значения степени нарушений требований к работам 2022 и 2023 года принадлежат различным совокупностям, а следовательно, результатом их сокращения является применение разработанных инструментов поддержки принятия решений процесса ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации.

Разработанные инструменты поддержки принятия решений возможно применить в смежных областях, связанных с разобщенной сетью работ, удаленных от центрального органа управления. С помощью разработанных инструментов поддержки принятия решений ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации можно прогнозировать качество и сроки работ, а также определять количество необходимого количества и специализации персонала, что повышает экономическую эффективность и ритмичность работ предприятия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Для достижения цели исследования, заключающейся в повышении качества ремонтных работ и эффективности процесса принятия управленческих решений на предприятиях, осуществляющих ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации с неполной информации о качественном состоянии машин и оборудования, были поставлены и решены следующие задачи:

1. На основании проведенного анализа актуальных проблем по обеспечению качества работ по ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации, определены основные требования к обеспечению качества работ и предложен

коэффициент нарушения требований к работам для оценки качества выполненных работ по ТОиР

2. Проведены исследования структуры и особенностей процессов ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации, на основании которых сформирована параметрическая база знаний качественного состояния работ по ТОиР техники.

3. Построена модель процесса ТОиР техники на местах эксплуатации, включающая в себя систему оценки информации о качестве работ, разработанную с применением теории нечетких множеств.

4. Разработан метод настройки параметров нечеткой модели процесса ТОиР машин и оборудования на местах эксплуатации для установления соответствия переменных состояния модели и реального ремонтного процесса, что обеспечивает адаптацию модели процесса ТОиР под реальные условия выполнения работ.

5. Разработана имитационная модель процесса ТОиР, позволяющая оперативно планировать как сроки выполнения работ, так и требуемое количество и специализацию персонала для проведения выездного ремонта на площадке эксплуатации техники, что дает возможность построения и оценки широкого диапазона сценариев выполнения ремонтов.

6. Результаты апробации инструментов поддержки принятия решений технического обслуживания и ремонта машин и оборудования на местах эксплуатации показали, что их применение позволило в 2023 году по отношению к 2022 году снизить показатель количества нарушений требований к работам на 42%, количество рекламаций на 15%, а издержки предприятия, обусловленные выполнением повторных ремонтных работ, на 22%; следовательно, разработанные инструменты поддержки принятия решений позволяют обеспечить решение задачи повышения качества и экономической эффективности работ ТОиР. Применение в АО «МКБ «Факел» инструментов, разработанных в рамках диссертационного исследования, позволило упростить расчеты в процессе разработки эксплуатационной документации.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научные статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ**

1. Чихладзе, З. Д., Бром А. Е. Система поддержки принятия решений при управлении процессом обслуживания и ремонта машин и оборудования в местах ее эксплуатации // Автоматизация в промышленности. 2023. № 6. С. 29-32. (0,7 п.л. / 0,6 п.л.).

2. Чихладзе, З. Д., Бром А. Е. Имитационное моделирование процесса обслуживания и ремонта машин и оборудования в местах ее эксплуатации // Автоматизация в промышленности. 2023. № 5. С. 49-53. (0,8 п.л. / 0,7 п.л.).

3. Предиктивный анализ состояния технологического оборудования / З.Д. Чихладзе [и др.] // Наука и бизнес: пути развития. 2021. №6. С. 48-52. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.).

4. Чихладзе З.Д., Поляков А.А., Шевченко В.Ф. Мониторинг процесса проведения технического обслуживания и ремонта оборудования с использованием технологии дополненной реальности // НАУКА И БИЗНЕС: ПУТИ РАЗВИТИЯ. 2020. №2. С. 45-50. (0,7 п.л. / 0,3 п.л.).

5. Чихладзе З.Д., Поляков А.А., Шевченко Р.В. Оценка эффективности визуализации производственной информации на основе комплексного подхода к ее основным компонентам // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2020. №1. С. 54-58. (0,5 п.л. / 0,3 п.л.).

#### **Тезисы докладов**

6. Чихладзе З.Д. Проблема оперативного прогнозирования и распределения ресурсов процесса сервисного обслуживания в местах эксплуатации // Эффективность организации и управления промышленными предприятиями: Сб. научных статей по итогам шестой международной научной-практической конференции, В., 2023. С. 186-189. (0,5 п.л.).

7. Чихладзе З.Д., Поляков А.А. Анализ видов и методов организации ремонта в эксплуатирующих организациях // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: Сб. научных статей по итогам VI Международной конференции. К., 2021. С. 111-113. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.).

8. Чихладзе З.Д., Поляков А.А., Умнов П.И. Предиктивный анализ при проведении ТОиР // Актуальные вопросы современной науки и образования: Сб. научных статей по итогам X Международной научно-практической конференции. П. 2021, Ч. 1. С. 40-43. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.).

9. Чихладзе З.Д., Шевченко Р.В. Анализ научных данных методом расширенной визуализации // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: Сб. научных статей по итогам десятой международной научной конференции, К., 30 ноября 2019. Ч. 2. С. 181-186. (0,6 п.л. / 0,5 п.л.).

10. Чихладзе З.Д., Шевченко Р.В. Сильные и слабые стороны различных методов представления и визуализации информации // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: Сб. научных статей седьмой международной научной конференции. К., 2019. С. 128-135. (0,8 п.л. / 0,7 п.л.).

11. Проблемы, связанные со сбором и визуализацией оперативной информации для контроля сроков исполнения и управления качеством работ в рамках сервисного обслуживания военной машин и оборудования / З.Д. Чихладзе [и др.] // Технические науки: проблемы и решения: Сб. статей по материалам XXI Международной научно-практической конференции. М., 2019. №3 (19). С.18-27. (1,0 п.л./ 0,3 п.л.).