



Лукьянов Андрей Евгеньевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
И РЕМОНТА ПОЛИГОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

2.5.22. Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

Научный руководитель:

Пантюхин Олег Викторович,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Пивоварова Ксения Григорьевна,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, профессор;

Новиков Валерий Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»,
г. Краснодар, профессор.

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва».

Защита состоится 17 июня 2025 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.417.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, д. 92, 9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТулГУ и на сайте:

<https://tulsu.ru/science/dissertation/diss-24-2-417-06/lukyanov-ae-24-2-417-06>

Автореферат разослан «18» апреля 2025 года

Учёный секретарь
диссертационного совета



Литвинова Ирина Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Для отработки навыков стрельбы, а также группового взаимодействия личного состава в армии РФ уже долгое время применяется полигонное оборудование. В настоящее время вопрос подготовки солдат стоит особенно остро, а своевременные поставки оборудования в войска и поддержание его работоспособности критически важно. 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. Также в процессе эксплуатации оборудование выходит из строя по причине износа или повреждений во время стрельб.

Производство полигонного оборудования, используемого в ВС РФ, носит массовый характер, и легко представить колоссальные объемы выпуска продукции ежегодно. Учитывая огромную территорию РФ и количество военных округов, расположенных от Мурманска до Камчатки, можно прийти к выводу о том, что, помимо ремонта, огромные ресурсы затрачиваются на логистику, транспортировку оборудования, командирование ремонтных бригад. Регулярно заводом-изготовителем производятся техническое обслуживание и ремонт (далее – ТОиР) как точечных неполадок, возникающих в процессе эксплуатации оборудования, так и полноценный ремонт в заводских условиях.

Из рабочей статистики предприятия можно сделать вывод, что вызовы ремонтных бригад воинскими частями не сопровождаются конкретной информацией о поломках из-за отсутствия специалистов на самих полигонах, способных грамотно диагностировать неполадки. Возникает высокая неопределенность характера поломок и предварительных причин отказа, что также заставляет избыточно комплектовать бригаду несоответствующими специалистами и оборудованием. В свою очередь, процесс ТОиР полигонного оборудования в местах базирования становится максимально хаотичным и несоответствующим качеству, необходимому потребителям.

Перечисленные проблемы приводят к отсутствию понимания временных норм, которые закладываются на работы, нарушениям ритмичности производственных циклов и срывам сроков. Кроме всего перечисленного, предприятие обременяется существенными экономическими издержками.

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 полигонного оборудования как на местах эксплуатации, так и в условиях предприятия.

Степень разработанности темы

Проблемы планирования регламентированного ТОиР машин и оборудования в промышленности освещены в работах Квагинидзе В.С., Воронкина Ю.Н., Николенко А.М., Горчукова К.А., Позднякова Н.В., Пинемасова А.М., Пустонина Л.С. Весомый вклад в развитие оперативно-производственного планирования внесли Афитов Э.А., Бабич Т.Н., Вертакова Ю.В., Иванов И.Н. Вопросами стратегического планирования процессов ТОиР занимались Абалкин Л.И., Виханский О.С., Чуднова Г.А., Кислов А.С., Рыжикова Т.Н., Джеффри Лайкер (Jeffrey Liker). Вопросы управления жизненным циклом продукции рассматривались в работах Никифорова А.Д., Бакиева А.В., Хитоси Такеды (Hitoshi Takeda), Уильяма Детмера (William Dettmer), Эли Шрагенхайм (Eli Schragenheim).

Однако в вышеперечисленных работах не анализировались особенности выполнения работ по ТОиР изделий военно-промышленного комплекса в местах базирования. Процесс ТОиР непосредственно в местах эксплуатации военных изделий имеет свои особенности и определенную специфику в части организации, планирования и принятия

решений. Исследователями Шиловским В.Н., Питухиным А.В., Костиюкевичем В.М. в научных работах рассмотрены проблемы организации процесса сервисного обслуживания военной техники с вариантами их автоматизации. Однако в них не затрагивается специфика процесса оперативного планирования ТОиР изделий военно-промышленного комплекса в местах эксплуатации, не проработаны механизмы, позволяющие улучшать ритмичность работы предприятия в таких условиях, а также нет критериев, отражающих целесообразности его проведения.

Целью исследования является повышение качества процессов технического обслуживания и ремонта за счет разработки комплекса инструментов поддержки принятия решений по управлению техническим обслуживанием полигонного оборудования на местах базирования, включающих имитационную модель ремонтных работ для оперативного планирования сроков выполнения работ, необходимого количества персонала и его специализацию.

Задачи исследования:

1. Анализ процесса ТОиР полигонного оборудования в местах базирования (воинских частях) и подходов к повышению качества проведения ремонтных работ.
2. Исследование структуры и ключевых особенностей процесса оперативного планирования ТОиР в местах эксплуатации.
3. Моделирование процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования в местах эксплуатации на основе системы оценки о качестве работ.
4. Разработка метода настройки параметров модели процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования в местах эксплуатации для ее адаптации к реальному процессу проводимых работ.
5. Разработка имитационной модели процесса технического обслуживания и ремонта для определения квалификации и количества персонала, принимающего участие в процессе ремонтных работ на местах базирования, а также операционного прогнозирования результатов работ.
6. Апробация инструментов поддержки принятия решений, разработанных на основе оценки качества выполнения процесса технического обслуживания и ремонта с финансово-экономическими результатами.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.5.22 в следующих пунктах:

«Пункт 16. Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов.

Пункт 23. Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и результатами».

Объектом исследования является процесс технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования в местах базирования.

Предметом исследования являются методы совершенствования процессов технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования в местах базирования.

Методы исследования. Решение поставленных задач проведено на основе методов математического и имитационного моделирования, метода сетевого моделирования, а также исследования с целью проверки адекватности теоретических положений.

Научная новизна проведенного исследования заключается в следующих положениях.

1. Разработана модель процесса технического обслуживания и ремонта, отличающаяся применением известного метода сетевого моделирования к новому объекту.

2. Разработан метод настройки параметров модели процесса технического обслуживания и ремонта, отличающийся наличием необходимого и достаточного условия для проведения процесса технического обслуживания и ремонта на основе коэффициента поломок полигонного оборудования.

3. Разработана имитационная модель процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования на местах эксплуатации, которая позволяет оперативно планировать необходимое количество и специализацию персонала, а также сроки окончания работ и отличается находящейся в её основе модифицированной матрицей вероятностей Маркова.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость заключается в развитии средств и методов планирования и управления процессом технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования в местах эксплуатации.

Практическая значимость состоит в повышении эффективности процесса принятия управленческих решений по организации технического обслуживания и ремонта в местах эксплуатации на основе применения разработанных инструментов, позволяющих систематизировать процессы ремонтных работ за счет возможности прогнозирования сроков работ, количества требуемого персонала и его специализации, что позволит оптимизировать работу предприятия. Предложенные методы и инструменты могут быть использованы не только на оборонно-промышленных предприятиях, но и в других организациях, занимающихся ТОиР техники. Предложенный подход к принципу формирования выездных бригад дает существенным образом сэкономить средства предприятий, повысить эффективность выполнения работ и оптимизировать время самих работ.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель процесса технического обслуживания и ремонта.

2. Метод настройки параметров модели процесса технического обслуживания и ремонта с адаптацией модели под реальные ремонтные процессы.

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

Степень достоверности и апробация результатов работы

Подтверждение достоверности научных результатов обеспечивается использованием общеизвестных методов исследования, методологических принципов организации производства, а также сходимостью результатов проведённого модельного эксперимента и практического внедрения разработанных инструментов в АО «Тулаточмаш». Результаты исследований обсуждались на VI Международной научно-практической конференции молодых учёных «Роль технического регулирования и стандартизации в условиях цифровой экономики», XI Международном аэрокосмическом конгрессе, посвящённом 90-летию со дня рождения первого космонавта Земли Ю.А. Гагарина (г. Москва, 2024); Двадцать девятой Национальной научно-технической конференции с международным участием «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (г. Тула, 2024).

Публикации

Основные результаты научного исследования опубликованы в 6 статьях в рецензируемых журналах ВАК. Всего опубликованы 8 статей в различных журналах и сборниках.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 137 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка, 18 таблиц, список литературы, включающий 101 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, указаны научная новизна положений, выдвигаемых на защиту, практическая ценность и достоверность полученных результатов.

В первом разделе проведен анализ производственного процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования. По результатам анализа обозначены основные проблемы и трудности, мешающие ритмичному функционированию процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования.

Проведен комплексный анализ процесса ТОиР полигонного оборудования в местах базирования (воинских частях) и подходов к повышению качества проведения ремонтных работ. Проведенный анализ показал необходимость в индивидуальном подходе при проведении ТОиР в каждом отдельном случае.

Проведено исследование структуры и ключевых особенностей процесса оперативного планирования ТОиР в местах эксплуатации, показывающее потребность в оптимизации ресурсов на проведение ремонтных работ, а также необходимость применения системного подхода к формированию бригад и системе оценки износа изделий.

Во втором разделе проведено моделирование процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования в местах эксплуатации, основанное на применении метода сетевого моделирования к новому объекту, позволяющее прогнозировать процесс ТОиР.

Сетевая модель состоит из следующих элементов: операция, событие и путь.

При построении сетевой модели соблюдаются следующие правила:

- 1) события должны быть правильно занумерованы, т.е. для каждой операции (i, j) $i < j$;
- 2) должны отсутствовать тупиковые (кроме завершающего) события, т.е. такие, за которыми не следует хотя бы одна операция;
- 3) должны отсутствовать (за исключением исходного) события, которым не предшествует хотя бы одна операция;
- 4) должны отсутствовать циклы, т.е. замкнутые пути, соединяющие событие с ним самим;
- 5) ни одна пара операций не должна определяться одинаковыми начальным и конечным событиями. Возможность неоднозначного определения операции через события появляется в случае, когда две или большее число операций допустимо выполнять одновременно.

При моделировании ТОиР сетевая модель S состоит из четырех элементов $S = (P, T, Vr, L)$, где P – конечное множество событий сетевой модели $P = \{P_1, \dots, P_{22}\}$; T – конечное множество операций сетевой модели $T = \{t_1, \dots, t_{21}\}$ с временем выполнения операций $Vr = \{Vr_1, \dots, Vr_{21}\}$; L – полный путь, содержащий набор событий от первого до по-

следнего; $L_{кр}$ – критический путь с максимальной длиной по продолжительности без циклов.

Таким образом, сетевая модель математически с оптимизацией пути имеет вид

$$\begin{cases} Vr_{np}(t) = \min Vr_{np}(t), t \in B^*, \\ t = (t_1, \dots, t_j), j \in B, \\ B = \{1, \dots, 21\}, \\ P = \{P_1, \dots, P_i, P_j\}, j \in B, i < j. \end{cases}$$

В модели t – время j -й операции; B – количество операций; P – события в сетевой модели; $Vr_{np}(t)$ – путь в проекте.

На рисунке 1 представлена сетевая модель в виде направленного графа выполнения производственного процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования, состоящего из набора операций и событий без наличия циклов, которые характеризуют «узкие» места производственного процесса. Сетевая модель с построенным критическим путем $L_{кр}$ представлена на рисунке 2. Итоговая таблица с оптимальным видом для оперативно-календарного планирования процесса ТОиР полигонного оборудования имеет вид таблицы 1.

Из построенной сетевой модели ТОиР полигонного оборудования можно увидеть, что в результате наступления определенных событий, выраженных в выполнении некоторых операций, выполняется возврат к ранее осуществленным событиям или же сеть приходит к выполнению возвратного цикла, также может быть переход к конечному событию. Такое положение дел приводит к увеличению длительности производственного цикла выполнения работ и снижению ритмичности производственного процесса. В конечном итоге, это приводит к снижению качества проводимых работ, выраженных в уменьшении удовлетворенности потребителя, а также к возникновению угрозы срыва сроков выполнения контракта.

В итоге, сетевая модель ТОиР выявила следующие «узкие места» производственного процесса:

- не должно быть события Р6 (новые сроки проведения работ);
- не должно быть события Р13(заводской ремонт);
- не должно быть события Р10 (снятие изделия с ремонта);
- надо избегать события Р15 (закупка комплектующих);
- надо избегать события Р17 (закупка материалов).

События Р6, Р13, Р10 приводят к нарушению целостности сетевой модели, а события Р15, Р17 – к циклическим работам на графе. Таким образом, возникновение данных событий приводит к возврату операций назад или возникновению циклов, что на практике означает затягивание сроков выполнения работ или снижение прибыли предприятия. Поэтому для обеспечения ритмичности функционирования процесса ТОиР с минимальной длительностью производственного цикла необходимо избегать возникновения данных событий в сетевой модели процесса. В случае возникновения данных событий необходимо принимать оперативные организационно-технические решения.

Определены вероятностные характеристики сетевой модели методом PERT (Program (Project) Evaluation and Review Technique). Расчет директивного срока с заданной надежностью выполнения работ по сетевой модели приведен на рисунке 3 в графе «максимально возможный срок выполнения работ с заданной надежностью». Он составляет 92 часа для конкретного ремонта с надежностью 98 %.

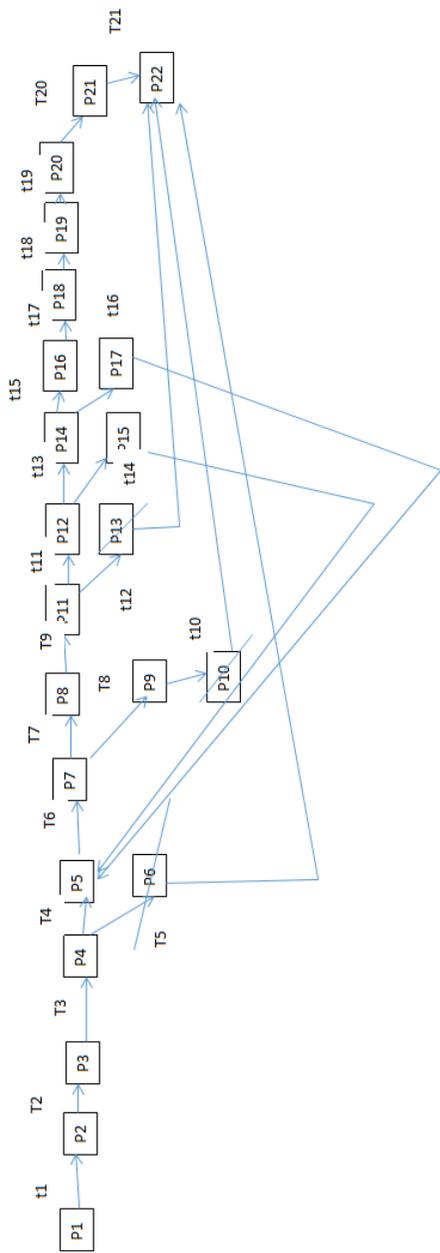


Рисунок 1 – Направленный граф сетевой модели выполнения производственного процесса Т0иР полигонного оборудования

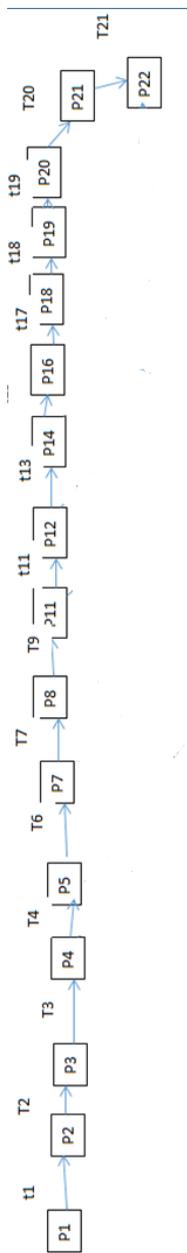


Рисунок 2 – Направленный граф оптимизированной сетевой модели Т0иР с критическим путем

Таблица 1 – Операции и события оптимизированной сетевой модели ТОиР

№	Операции и события	Содержание	Непосредственно предшествующие операции
1	P1	План-график работ, поступивший на согласование	–
2	t1	Анализ плана-графика, поступившего на согласование	–
3	P2	Протокол разногласий	
4	t2	Урегулирование разногласий, утверждение плана-графика работ	T1
5	P3	Утвержденный план-график работ	–
6	T3	Отправка запроса о готовности воинской части к проведению работ в заданные сроки	T2
7	P4	Ответ воинской части о готовности к проведению работ	–
8	T4	Осуществление подготовки производства (мат.-технической, метрологической, финансовой организации, компетенции персонала и т.д.)	T3
9	P5	Документы, необходимые для отправки выездной бригады (командировочные удостоверения, ТЗ и т.д.)	–
10	T6	Осуществление приема изделия полигонного оборудования для проведения сервисного обслуживания в воинской части	T4
11	P7	Ведомость приема в ремонт	–
12	T7	Оформление акта приема-передачи изделия ПО на сервисное обслуживание	T6
13	P8	Акт приема-передачи изделия ПО на сервисное обслуживание	–
14	T9	Проведение технического диагностирования изделия ПО	T7
15	P11	Дефектационная ведомость на диагностируемое изделие ПО	–
16	T11	Проведение ремонта изделия на полигоне (в случае возможного проведения)	T9
17	P12	Перечень неисправностей на изделие ПО	–
18	T13	Оформление акта о восстановлении изделия ПО	T11
19	P14	Утвержденный начальником полигона акт о восстановлении изделия ПО	–
20	T15	Проведение тестового технического обслуживания на исправном изделии ПО	T14
21	P16	Утвержденный начальником полигона акт о проведении сервисного обслуживания изделия ПО	–
22	T17	Утверждение акта сдачи-приемки выполненных работ, заполнение анкеты удовлетворенности потребителя	T15
23	P18	Утвержденные начальником полигона акт сдачи-приемки выполненных работ и анкета удовлетворенности потребителя	–
24	T18	Оформление дела ремонта изделия ПО и расчетно-калькуляционных материалов (РКМ)	T17
25	P19	Оформление согласно требованиям контракта для ремонта в РКМ	–
26	T19	Предъявление дела ремонта и РКМ в военное подразделение (ВП)	T18
27	P20	Утвержденное ВП МО РФ удостоверение и заключение на выполненные работы	–
28	T20	Оформление платежных документов на выполненные работы	T19
29	P21	Оформленные платежные документы на выполненные работы	–
30	T21	Сдача документов Заказчику на оплату	T20
31	P22	Принятые Заказчиком документы на выполненные работы	–

Операция	Оценка продолжительности операции				
	Оптимистическая	Наиболее вероятная	Пессимистическая	Ожидание продолжительности	Дисперсия продолжительности
t1*	3	4	6	4	0,25
t2*	4	5	7	5	0,25
t3*	7	9	12	9	0,69
t4*	6	7	10	7	0,44
t5	7	9	11	9	0,44
t6*	5	6	7	6	0,11
t7*	6	7	10	7	0,44
t8	3	4	5	4	0,11
t9*	2	4	6	4	0,44
t10	5	6	9	6	0,44
t11*	3	4	6	4	0,25
t12	3	4	6	4	0,25
t13*	4	5	7	5	0,25
t14	7	9	12	9	0,69
t15*	6	7	10	7	0,44
t16	7	9	11	9	0,44
t17*	5	6	7	6	0,11
t18*	6	7	10	7	0,44
t19*	3	4	5	4	0,11
t20*	2	4	6	4	0,44
t21*	5	6	9	6	0,44
Математическое ожидание продолжительности критического пути					88
Дисперсия продолжительности критического пути					5,14
Директивный срок выполнения проекта, дней					91
Нормированное отклонение случайной величины Z					1,54
Вероятность выполнения проекта в директивный срок					0,94
Надежность выполнения проекта $p=\Phi(Zp)$					0,98
Нормированное отклонение случайной величины Zp					2,05
Максимально возможный срок выполнения проекта с надежностью p					92,16

Рисунок 3 – Расчет вероятности выполнения проекта в установленные заказчиком сроки (режим данных)

В третьем разделе представлен метод настройки параметров модели процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования, основанный на применении коэффициента, показывающего степень поломок по конкретному изделию за определенный промежуток времени, и позволяющий определять возможность проведения процесса ТОиР на месте базирования.

Для оценки качества процесса ТОиР полигонного оборудования в местах базирования был введен коэффициент, показывающий степень поломок по конкретному изделию за определенный промежуток времени,

$$G_n(t) = \frac{F_n(t)}{M_n(t)},$$

где $G_n(t)$ – коэффициент поломок на изделие n-го типа; $F_n(t)$ – претензии к изделию n-го типа за взятый период; $M_n(t)$ – общее количество изделий n-го типа, получаемых сервисное обслуживание за взятый период.

Задача заключается в минимизации данного коэффициента $G_n(t)$, являющегося зависимостью количества претензий $F_n(t)$ от общего количества изделий $M_n(t)$, и задач мероприятий, направленных на улучшение процесса.

Для осуществления мониторинга технического состояния полигонного оборудования проведен сбор данных о техническом состоянии девяти типов изделий с учетом коэффициента их поломок.

На рисунке 4 представлены средние коэффициенты поломок $G_n(t)$ по девяти изделиям.

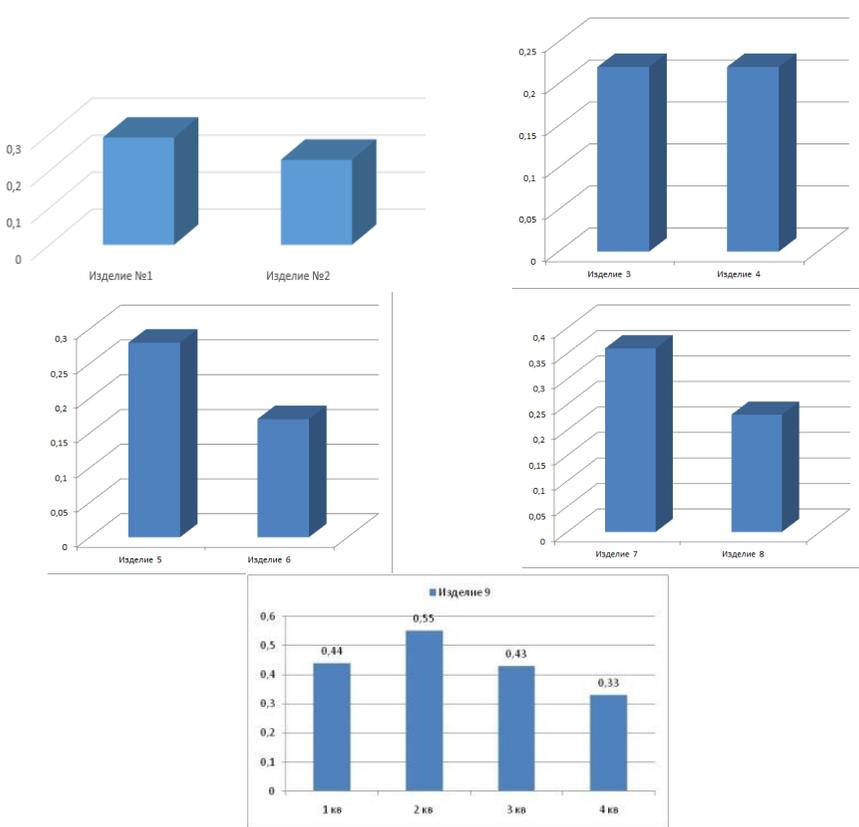


Рисунок 4 – Средние коэффициенты поломок $G_n(t)$ по девяти изделиям

Сопоставляя средние коэффициенты поломок за год, проведен анализ эффективности организации по выполнению ремонтных работ отдельно взятого изделия. Выполнен дополнительный статистический анализ коэффициента поломок по различным изделиям в специальном статистическом пакете SPSS. Частотный анализ коэффициента $G(t)$ по девяти типам изделий полигонного оборудования представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Частотный анализ коэффициента $G(t)$ по девяти типам изделий полигонного оборудования

Коэффициент поломок					
		Частота	Проценты	Валидный процент	Накопленный процент
Валидные	низкий	6	16,2	66,7	66,7
	средний	1	2,7	11,1	77,8
	высокий	2	5,4	22,2	100,0
	Всего	9	24,3	100,0	
Пропущенные	Системные	28	75,7		
Всего		37	100,0		

Из таблицы 2 видно, что низкий уровень соответствует шести рассматриваемым типам полигонного оборудования, средний уровень соответствует одному типу полигонного оборудования и два типа изделий относятся к высокому уровню поломок. Это означает, что последние два типа изделий подвергаются частому ремонту, и необходимо повышение качества комплектующих этих типов полигонного оборудования.

Определены статистические характеристики гистограммы по всем типам полигонного оборудования. На рисунке 5 представлены гистограммы нормального закона распределения коэффициента поломок.

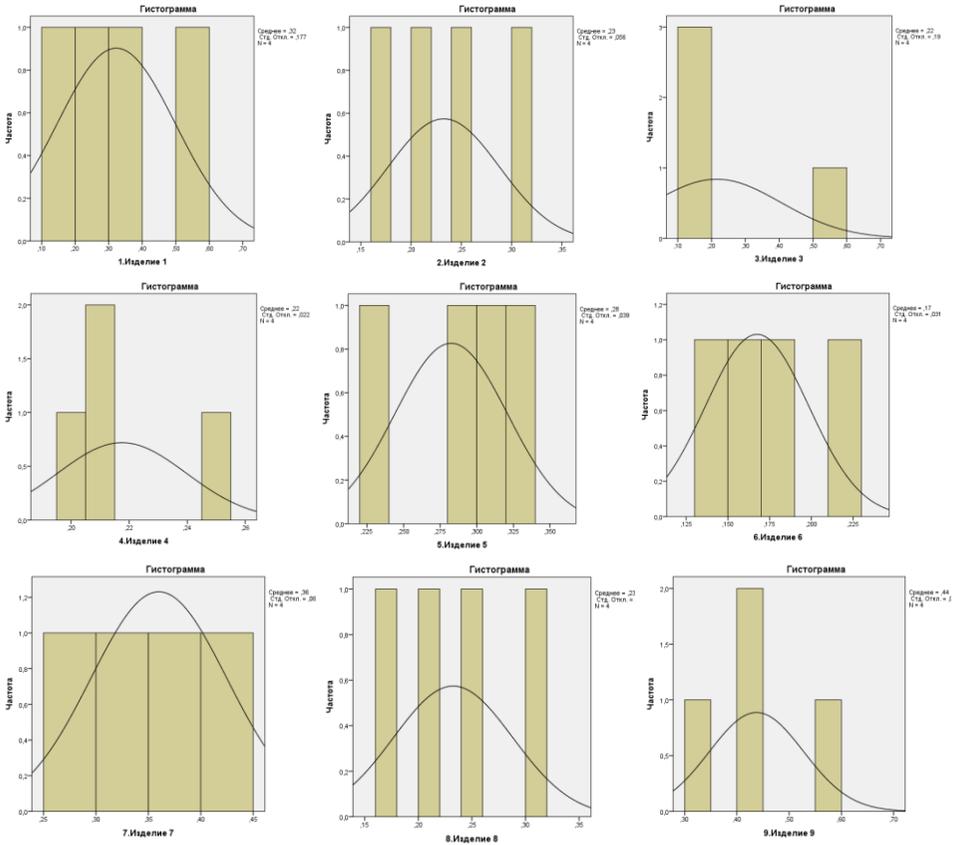


Рисунок 5 – Гистограммы нормального закона распределения коэффициента поломок $G_n(t)$ по девяти изделиям

Проведенный анализ по всем типам полигонного оборудования выявил стратегию проведения ремонта на полигонах по каждому типу изделий, а также позволил определить качество используемых изделий. Коэффициент $G_n(t)$ выявит необходимое и достаточное условие ремонта изделия полигонного оборудования.

Необходимо, чтобы количество процессов ТОиР было минимальным с учетом коэффициента поломок по всем деталям, т.е.

$$G = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J G_{ni}^j(t) \rightarrow \min,$$

где i – количество полигонного оборудования; j – количество комплектующих в i -м полигонном оборудовании.

Тогда необходимое и достаточное условие ремонта изделия на полигоне будет следующим:

$$\forall i = \{1, 2\}, j = \{1, \dots, 4\} (N_{ij} \geq 3 \rightarrow G_i^j \leq G_{cpi}^j).$$

Таким образом, при коэффициенте поломок меньше среднего коэффициента по изделиям возможно проведение сервисного обслуживания на полигоне, в остальных случаях требуется либо проведение заводского ремонта изделия, либо оформляется мотивированный отказ в принятии его на сервисное обслуживание.

Использование предлагаемого коэффициента направлено на повышение уровня систематизации процесса ТОиР полигонного оборудования в местах базирования, а также на улучшение качества в методике прогнозирования сроков работ и их длительности и на более детальное отслеживание эффективности подбора выездных бригад.

В четвертом разделе представлена имитационная модель процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования на местах эксплуатации, основанная на модели модифицированной матрицы вероятностей Маркова, позволяющая оперативно планировать необходимое количество и специализацию персонала, а также сроки окончания работ для определения количества персонала и его квалификации.

Определено, что матрица возможных распределений в оперативно-календарном планировании ТОиР полигонного оборудования представляет матрицу Маркова порядка $Q+1$ и имеет вид, показанный на рисунке 6.

$$R_0 = \begin{pmatrix} P_{II}(Q-1)Z_{II}^* + P_I QR_I & P_{III}(Q-1)Z_{III}^* & \dots & P_{IJ}(Q-1)Z_{IJ}^* & P_{IQ}(Q-1)Z_{IQ}^* & P_{I\text{вых}} Z_{I\text{вых}}^* \\ P_{III}(Q-1)Z_{III}^* & P_{III}(Q-1)Z_{III}^* + P_{II} QR_{II} & \dots & P_{III}(Q-1)Z_{III}^* & P_{IIQ}(Q-1)Z_{IIQ}^* & P_{II\text{вых}} Z_{II\text{вых}}^* \\ P_{II}(Q-1)Z_{II}^* & P_{III}(Q-1)Z_{III}^* & \dots & P_{IJ}(Q-1)Z_{IJ}^* + P_I QR_I & P_{IQ}(Q-1)Z_{IQ}^* & P_{I\text{вых}} Z_{I\text{вых}}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{QI}(Q-1)Z_{QI}^* & P_{QII}(Q-1)Z_{QII}^* & \dots & P_{QI}(Q-1)Z_{QI}^* & P_{QIQ}(Q-1)Z_{QIQ}^* + P_Q QR_Q & P_{Q\text{вых}} Z_{Q\text{вых}}^* \\ P_{\text{exI}} Z_{\text{exI}}^* & P_{\text{exII}} Z_{\text{exII}}^* & \dots & P_{\text{exI}} Z_{\text{exI}}^* & P_{\text{exIQ}} Z_{\text{exIQ}}^* & \dots \end{pmatrix}$$

Рисунок 6 – Матрица переходов в общем виде по Маркову

Рассмотрено моделирование организационно-технической системы процесса ТОиР полигонного оборудования на основе матрицы переходов Маркова в случае назначения четырех работ ремонтной бригаде из четырех рабочих.

Функция эффекта от назначения имеет вид

$$F_s = P_m(Q-1)Z_{lm}^* + P_l QR_m, l \in [I, II, \dots, I, \dots, Q, \text{ex}], m \in [I, II, \dots, J, \dots, Q, \text{вых}],$$

где P_m – равная вероятность наступления события; $(Q-1)$ – количество переходов; Z_{lm}^* – подматрица соединений; P_l – конкретная вероятность наступления события; Q – переход; R_m – случайное соединение.

Функция исхода опытов представлена на рисунке 7.

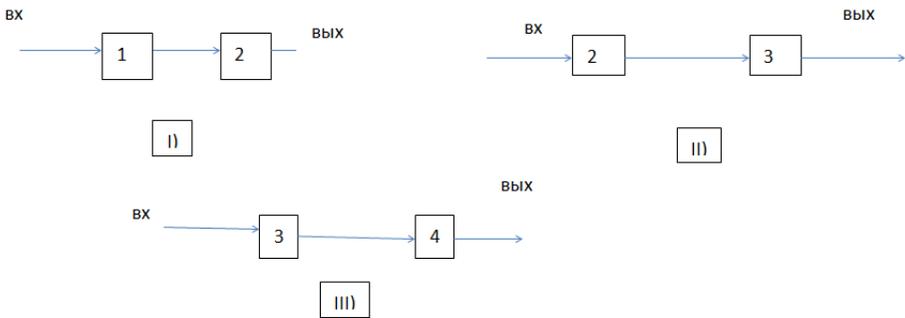


Рисунок 7 – Функции исхода опытов: I – первая ситуация по работам;
 II – вторая ситуация по работам; III – третья ситуация по работам

Для разработки имитационных моделей процесса ТОиР полигонного оборудования за счет структурного синтеза ОТС использовали элементы оперативно-календарного планирования. Если на полигоне придется повторять ремонтные работы, то возникает ситуация переходов и повторений, тогда при формировании имитационной модели существует $L = 3^3 = 27$ соединений и структур.

Также для всех вариантов оперативно-календарного планирования и их работ подобрано оптимальное назначение рабочих с учетом их опыта и квалификации. Для назначения рабочих во всех соединениях использована матрица переходов Маркова (см. рисунок 6).

Сформирована матрица переходов для четырех рабочих из ТОиР. В качестве функции эффекта в матрице принята следующая функция:

$$F_3 = K \cdot P \cdot TP,$$

где $K = [K_i]$ – массив квалификаций i -го рабочего; $P = [P_{ij}]$ – матрица вероятностей выполнения i рабочим j -й работы; $TP = [TP_{ij}]$ – матрица трудоемкости при выполнении i рабочим j -й работы; $i \in [1, \dots, 4]$ – количество работ; $j \in [I, \dots, IV]$ – количество рабочих.

В итоге при максимизации функции эффекта получено наилучшее распределение работ:

- 1-ю работу выполняет I рабочий,
- 2-ю работу выполняет IV рабочий,
- 3-ю работу выполняет III рабочий,
- 4-ю работу выполняет II рабочий.

Использование имитационной модели при повторных комбинациях позволит значительно сократить время выполнения работ и выполнить их с максимальным качеством, так как каждая работа будет выполняться рабочим с лучшей квалификацией.

Предложенная имитационная модель позволяет значительно сократить время выполнения работ и повысить качество их исполнения, при этом трудоемкость работ уменьшается на 9 %, а комплексная эффективность выполнения работ составляет 33 %. Расчет по матрице трудоемкости показывает следующий результат: $TP_{нов} = 0,91; TP_{см} = 1$.

В заключении изложены основные результаты и выводы исследования, подтверждающие положения, выносимые на защиту, определены перспективы дальнейшего изучения проблемы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведённого исследования решена важная научная задача и достигнута цель диссертационного исследования в области повышения качества процессов технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования:

1. Проведен комплексный анализ процесса ТОиР полигонного оборудования в местах базирования (воинских частях) и подходов к повышению качества проведения ремонтных работ. Проведенный анализ показал необходимость в индивидуальном подходе при проведении ТОиР в каждом отдельном случае.

2. Проведено исследование структуры и ключевых особенностей процесса оперативного планирования ТОиР в местах эксплуатации, показывающее потребность в оптимизации ресурсов на проведение ремонтных работ, а также необходимость применения системного подхода к формированию бригад и системе оценки износа изделий.

3. Проведено моделирование процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования в местах эксплуатации, основанное на применении метода сетевого моделирования к новому объекту, позволяющее прогнозировать процесс ТОиР. Директивный срок с заданной надежностью выполнения работ по представленной модели составляет 92 часа для конкретного ремонта с надежностью 98 %.

4. Разработан метод настройки параметров модели процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования, основанный на применении коэффициента, показывающего степень поломок по конкретному изделию за определенный промежуток времени, и позволяющий определять возможность проведения процесса ТОиР на месте базирования. При коэффициенте поломок меньше среднего коэффициента по изделиям возможно проведение сервисного обслуживания на полигоне, в остальных случаях требуется либо проведение заводского ремонта изделия, либо оформляется мотивированный отказ в принятии его на сервисное обслуживание.

5. Разработана имитационная модель процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования на местах эксплуатации, основанная на модели модифицированной матрицы вероятностей Маркова, позволяющая оперативно планировать необходимое количество и специализацию персонала, а также сроки окончания работ для определения количества персонала и его квалификации. Предложенная имитационная модель позволяет значительно сократить время выполнения работ и повысить качество их исполнения, при этом трудоемкость работ уменьшается на 9 %, а комплексная эффективность выполнения работ составляет 33 %.

6. Проведена комплексная апробация инструментов поддержки принятия решений, разработанных на основе оценки качества выполнения процесса технического обслуживания и ремонта. Предложенный инструментарий поддержки принятия решений по управлению техническим обслуживанием полигонного оборудования на местах базирования внедрен в АО «Тулатоцмаш». Экономическая эффективность составляет 1,5 млн руб. в год.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК России

1. Лукьянов, А.Е. Методика контроля и прогнозирования выполнения ремонтных работ полигонного оборудования в местах базирования / А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 9. С. 93-95.

2. Лукьянов, А.Е. Методика комплектования выездных бригад специалистами разного профиля для проведения технического обслуживания и ремонта в местах базирования на примере полигонного оборудования / А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. Вып. 1. С. 297-299.

3. Лукьянов, А.Е. Создание сетевой модели процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования / А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. Вып. 2. С. 138-143.

4. Анализ характеристик процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования и выбора коэффициента для дальнейшего мониторинга / А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин, С.А. Васин, Д.А. Пронин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. Вып. 2. С. 158-162

5. Составление матрицы смежности обобщенного графа для дальнейшей настройки реальных ремонтных процессов технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования / А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин, С.А. Васин, Д.А. Пронин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. Вып. 3. С. 12-15.

6. Лукьянов, А.Е. Оптимальное распределение работ по уровню квалификации при выполнении технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования / А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. Вып. 3. С. 15-18.

Публикации в других изданиях и материалы конференций:

7. Лукьянов, А.Е. Проблема комплексного подхода к прогнозированию процесса технического обслуживания и ремонта полигонного оборудования в местах базирования / А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин // XI Международный аэрокосмический конгресс, посвященный 90-летию со дня рождения первого космонавта Земли Ю.А. Гагарина: тезисы докладов. М.: Изд-во «Перо», 2024. С. 103–104.

8. Лукьянов, А.Е. Подготовка универсальных специалистов по техническому обслуживанию и ремонту полигонного оборудования в местах базирования / А.Е. Лукьянов, О.В. Пантюхин // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сборник трудов Международной конференции «АПИР–29–2024». Тула: Изд-во ТулГУ, 2024. С. 185–188.

Авторское редактирование

Подписано в печать 11.04.2025

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ 040к
Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95