На правах рукописи

Абдулхамед Мохаммед Абдулкарим Номан

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ИСПЫТАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Специальность: 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации
(в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь - 2018

Работа выполнена в **ФГБОУ ВО** «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ)

Научный руководитель:
Русин Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, Тверской государственный технический университет, г. Тверь

Официальные оппоненты:

Самошкин Сергей Львович – доктор технических наук,
начальник управления «Научно-технического обеспечения и развития», ЗАО научная организация «Тверской институт вагоностроения»

Петров Сергей Владимирович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудникс лаборатории «Вагонное хозяйство», Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)

Ведущая организация:
ФГБОУ ВО- «Тамбовский государственный технический университет» (ТГТУ)

Защита состоится 14.09.2018 г. в часов минут на заседании диссертационного совета Д 212.262.06 в ФГБОУ ВО «ТвГТУ» по адресу: **170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22.**
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тверского государственного технического университета и на сайте www.tstu.tver.ru.

Автореферат разослан « » 2018г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор С.М. Дзюба

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

Большая длительность испытаний оборудования промышленных объектов на надежность и низкий уровень их обоснованности снижают эффективность системы управления качеством выпускаемой продукции (как серийной, так и опытной), что, в конечном итоге, требует больших затрат на перепроверку заделов и браковку изготовленной по данным техническим условиям продукции, значительно сдерживает темпы роста ресурсов технических изделий.

Сокращение времени получения необходимой информации по результатам стендовых ресурсных испытаний и ускорение процесса доводки изделий на заданный ресурс оказывается возможным при условии проведения ускоренных испытаний (УИ), позволяющих максимально эффективно распознавать производственные и конструктивные дефекты, которые проявляют себя в процессе наработки.

В результате успехов, достигнутых научно-исследовательскими, опытно-конструкторскими и эксплуатирующими организациями за последние десятилетия, повысился ресурс надежности оборудования промышленных объектов.

Средняя наработка до отказа современных машин и оборудования, их отдельных деталей и узлов может исчисляться годами, поэтому существующие методы испытаний опытных образцов не эффективны из-за своей продолжительности. Методы установления и продления ресурса, основанные на сборе и обработке информации о надежности оборудования промышленных объектов, в период их доводки на стенде, а также путем проведения длительных, эксплуатационных испытаний требуют значительного времени и становятся неприемлемыми за счет того, что они не обеспечивают достоверность рассчитанных показателей надежности. Большой вклад в изучение проблемы оценки надежности систем оборудовании по результатам эксплуатационных и стендовых испытаний внесли российские и зарубежные ученые: Долгунин В. Н., Аронов И.З., Бурдасов Е.И., Тихомиров С.Г., Павлов В.И., Агапов А.С., Палюх Б.В., Баталова З.Г., Шубин Р.А., Степанов А.Ю., Заренин Ю.Г., Скрипник В.М., Billman B.R., Antle C.E., Bain L.J., Harter H.L., Moore A.H., и др.

Достоверность оценок показателей надежности зависит от точности математических методов обработки информации, полученной в результате их проведения. Чем выше достоверность оценок, тем точнее будет прогноз возникновения отказов оборудования промышленных объектов и возможных аварийных ситуаций. Повышения экономической эффективности системы испытания оборудования промышленных объектов, в том числе оборудования

пассажирских вагонов, на надежность, добиваются сокращением времени испытаний или уменьшением количества испытуемых образцов. При сокращении времени испытаний возрастает степень цензурирования выборки, а при уменьшении количества образцов уменьшается объем выборки наработок оборудования. Сокращать время испытаний возможно только в том случае, если методы обработки информации обеспечивают достоверность рассчитанных показателей надежности. Для получения статистических данных об отказах необходимо проведение испытаний продолжительностью 5-10 лет (при нормальных условиях). За это время результаты будут уже не актуальны, а сами испытания потребуют больших денежных затрат. Сокращение времени испытаний оборудования промышленных объектов на надежность является актуальной задачей. Для сокращения времени получения требуемой информации по результатам эксплуатационных и стендовых ресурсных испытаний и для ускоренной доводки оборудования промышленных объектов на заданный ресурс необходимо совершенствование математических методов определения количественных значений показателей надежности.

Использование законов математической статистики, общей теории планирования эксперимента на ЭВМ с помощью комплекса программ позволяет сократить время испытаний и сохранить актуальность результатов.

Цель и задачи диссертационной работы. Сокращение времени испытания оборудования (количества испытуемых образцов), за счет совершенствования математических методов определения количественных значений его показателей надежности.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи.

1. Анализ предметной области: особенностей информационных потоков в системе, процесса возникновения отказов оборудования, методик и моделей проведения испытания оборудования на надежность. Обоснование математического аппарата.

2. Проведение моделирования на ЭВМ случайного процесса возникновения отказов оборудования пассажирских вагонов.

3. Исследование возможности применения метода максимального правдоподобия при оценке параметров законов распределения (экспоненциального, Вейбулла) по исследуемому плану испытаний.

4. Разработка математических моделей для оценивания параметров законов распределения: экспоненциального, Вейбулла с целью повышения точности оценок, полученных методом максимального правдоподобия при расчете показателей надежности оборудования промышленных объектов.

5. Исследование эффективности предложенной методики обработки информации для повышения точности и достоверности оценок показателей надежности оборудования промышленных объектов путем проведения вычислительного эксперимента на ЭВМ.

Объектом исследования является система испытания оборудования промышленных объектов на надежность.

Предмет исследования – математические методы обработки информации в системе испытания оборудования на надежность.

Научная новизна заключается в:

- построении алгоритма формирования выборок случайных величин по исследуемому плану испытаний на ЭВМ, отличающегося от традиционных тем, что он обеспечивает адекватность моделируемых выборок с учетом результатов наблюдения за параметрами эксплуатируемого оборудования.

- разработке алгоритма экспериментального исследования точности оценок максимального правдоподобия законов распределения (экспоненциального, Вейбулла), отличающегося возможностью расчета параметров, характеризующих структуру каждой выборки.

- разработке методики повышения точности и достоверности оценок максимального правдоподобия, полученных по малым, однократно цензурированным справа выборкам;

- разработке математических моделей для исследуемых законов распределения (экспоненциального, Вейбулла) в виде уравнений регрессии, определяющих зависимость между отклонением оценок максимального правдоподобия от истинных значений и параметрами, характеризующими структуру выборки;

- разработке алгоритма проверки эффективности и значимости разработанных математических моделей. Отличие алгоритма в том, что для проверки моделей генерируется новая совокупность выборок и при этом для каждой выборки параметры законов распределения рассчитываются на основе генератора случайных чисел.

Практическая значимость работы по мнению автора заключается в разработке алгоритмов и комплекса программ, позволяющего вводить поправки к оценкам максимального правдоподобия, полученным по малым, однократно цензурированным справа выборкам для двух законов распределения: экспоненциального, Вейбулла. Это повышает точность оценок и позволяет сократить время проведения испытаний или количество испытуемых образцов.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии математических методов определения количественных значений показателей надежности сложных систем и в разработке методики оценки параметров двух законов распределения, которая повышает точность оценок максимального правдоподобия, полученных по однократно цензурированным справа выборкам.

Методология и методы исследования. В работе используются методы системного анализа; методы регрессионного анализа; теории надежности;

статистические методы, позволяющие оценить достоверность полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

- алгоритм формирования выборок случайных величин по плану испытаний *[N, U, T]* на ЭВМ, который обеспечивает адекватность моделируемых выборок, выборкам, формирующихся в результате наблюдения за оборудованием пассажирских вагонов.

- экспериментальные исследования для анализа точности оценок параметров двух законов распределения: экспоненциального, Вейбулла, полученных методом максимального правдоподобия (МП) по сформированным выборкам случайных величин.

- методика оценки параметров законов распределения: экспоненциального, Вейбулла, заключающаяся в том, что оценки максимального правдоподобия корректируются с помощью поправок, для плана ускоренных испытаний *[N, U, T]*. Оценки рассчитываются по разработанным в работе математическим моделям.

- вычислительный эксперимент по моделированию выборок случайных величин на ЭВМ с помощью комплекса программ, который обеспечивает адекватность моделируемых выборок выборкам, формирующимся при проведении испытаний по плану *[N, U, T]*.

- регрессионные математические модели, устанавливающие зависимость относительного отклонения оценок параметров законов распределения от параметров, характеризующих структуру выборок. Они позволяют улучшить управление процессом эксплуатационных или стендовых испытаний оборудования пассажирских вагонов на надежность и добиться уменьшения затрат на их проведение путем сокращения времени испытаний или числа испытуемых образцов.

Обоснованность и достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций диссертации основана на использовании методов математической статистики; достаточным объемом экспериментальных статистических исследований, выполненных путем моделирования на ЭВМ; положительными результатами проверки эффективности предложенных математических моделей.

Область исследования. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации» по следующим областям исследований:

4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации;

13. Методы получения, анализа и обработки экспериментальной информации.

Связь с научными программами. Результаты диссертационного исследования использованы в ЗАО НО «Тверской институт вагоностроения»

при разработке методики подконтрольной эксплуатации пассажирских двухэтажных вагонов и методики проведения ускоренных стендовых испытаний по оборудованию железнодорожного подвижного состава.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались автором на конференциях: Российской научно-технической конференции “Энергосбережение в электро- и теплоэнергетических, металлургических установках”, г. Тверь, 2010 г., VII всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития вагоностроения», Брянск, 2016 и IV междунар. науч. конф. “Технические науки в России и за рубежом” (г. Москва, январь 2015 г.). — Москва, 2015.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, и 1 электронный ресурс, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

Личный вклад соискателя. Все результаты, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно, либо при непосредственном его участии. В совместно опубликованных научных работах личный вклад автора состоит в разработке алгоритмов моделирования отказов оборудования промышленных объектов на ЭВМ, обработке результатов моделирования и построении регрессионных моделей, позволяющих повысить точность метода максимального правдоподобия, проверке эффективности предложенных моделей.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 81 наименование. Диссертация изложена на 114 страницах, содержит 24 рисунка и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цель и задачи диссертации, приводятся полученные результаты, их научная новизна, отмечаются теоретическая значимость и практическая ценность работы.

Первая глава является обзорной. В ней проведен анализ математических методов при обработке результатов испытаний оборудования промышленных объектов на надежность, рассматриваются принципиальные элементы системного анализа, анализа по критерию «стоимость – эффективность». Необходимо, прежде всего, осознать характер анализируемых проблем. При испытаниях объектов на надежность, каждый объект может доводиться до отказа. На практике, даже при организации специальных экспериментов с целью определения характеристики надежности партии испытываемой продукции, не удается всю партию довести до отказа, так как для этого потребовалось бы большое время проведения эксперимента.

Но, несмотря на то, что часть объектов исследования не доведены до отказа, в них содержится полезная информация, которую необходимо

использовать при обработке результатов испытаний. Данные, для которых имеется неопределенность в наблюдениях за реализацией исследуемого признака, называются цензурированными данными. Цензурирование для группы однотипных объектов может быть задано в одной точке; с другой стороны, могут наблюдаться реализации, когда цензурирования проводятся в разных точках. В нашем исследовании цензурирование возникает при проведении испытаний по плану *[N, U, T],* где *N*- объём выборки; *U*- невосстанавливаемые и незаменяемые объекты по истечении времени (наработки) *T*.

В качестве примера, ЗАО НО «Тверской институт вагоностроения» выполняет эксплуатационные исследования надежности оборудования пассажирских вагонов. Группами надежности производился сбор статистической информации о работоспособности пассажирских вагонов, выпускаемых Тверским вагоностроительным заводом. Наблюдение за новыми вагонами выборочной совокупности производилось в первые два года после начала эксплуатации вагона. Однако показатели безотказности многих комплектующих изделий вагона значительно превосходят этот срок и их подтверждение является весьма трудной задачей, так как если время наблюдений меньше средней наработки до отказа, то в результате эксплуатационных наблюдений формируются цензурированные выборки с большой степенью цензурирования. Увеличение времени наблюдения приводит к росту стоимости проводимых работ.

ЗАО НО «Тверской институт вагоностроения» выполняет также стендовые испытания оборудования пассажирских вагонов. Но и в этом случае показатели надежности рассчитываются по цензурированным выборкам, так как получение полных выборок требует большого числа испытуемых образцов и времени испытаний. В диссертационной работе поставлена задача разработки математических моделей и алгоритмов, позволяющих улучшить управление процессом эксплуатационных или стендовых испытаний оборудования пассажирских вагонов на надежность и добиться уменьшения затрат на их проведение путем сокращения времени испытаний или числа испытуемых образцов.

Во второй главе автор излагает методику оценки точности расчетных показателей надежности при проведении испытаниях оборудования пассажирских вагонов на надежность. Для расчета и исследования показателей надежности используются соответствующие законы распределения. Вид закона распределения и его параметры определяются на основе обработки статистических данных об отказах оборудования, получаемых в результате испытаний на предприятии. Как было отмечено в предыдущей главе, анализ надежности при испытаниях оборудования промышленных объектов производится в ситуации, когда определенная часть объектов или систем не отказывает за период наблюдения, а другая часть отказывает, но моменты

отказов точно неизвестны. Доступной является лишь информация об интервале времени, в котором произошёл отказ. Это связано с тем, что отказы большинства устройств фиксируются не мгновенно, а в некоторые, заранее спланированные моменты контроля исправности функционирования оборудования. В таких ситуациях возникает необходимость разработки методов статистического анализа надежности, на основе так называемых цензурированных выборок. Кроме того, что выборки являются многократно цензурированными, они относятся к классу так называемых малых выборок. Это также влияет на точность оценки параметров распределения отказов. От точности и достоверности исходной информации зависит точность и достоверность принимаемых решений. Таким образом, актуальными становятся задачи разработки и исследования методов анализа надёжности систем с учётом цензурированной информации в условиях ограниченного объёма данных (малой выборки) об отказах изделий и приборов.

С авторской точки зрения, в результате испытаний цензурированная выборка изделий предстает в виде набора реализованных количественных характеристик какого-либо свойства, составляющего надежность конкретных изделий выборки. Изучаемое статистическими методами случайное рассеивание имеет важное практическое значение. Только знание законов распределения и их надлежащий учет в инженерных, экономических и других расчетах может обеспечить в подобных случаях надежную работу устройств. Проведенный анализ существующих моделей и методов обработки статистической информации о надежности оборудования пассажирских вагонов, полученной при ускоренных испытаниях, позволяет сделать вывод о том, что сокращение времени испытаний ставит задачу исследовать, как метод максимального правдоподобия будет соответствовать малым, однократно цензурированным выборкам. Можно ли его использовать и какие границы его применения. Для получения в ЭВМ случайных чисел можно использовать математический способ. Приведены методы получения случайных чисел с различными законами распределения. Используются нормированные случайные величины, имеющие равномерное распределение в интервале (0,1).

В третьей главе выполнены исследования точности метода максимального правдоподобия при оценке параметров двух законов распределения отказов оборудования: экспоненциального, Вейбулла. Они широко используются в теории надежности для описания случайной величины наработки до отказа оборудования.

В диссертационной работе автором рассматривается план *[N, U, T]*. Согласно этому плану, одновременно испытываются объекты, отказавшие во время испытаний, объекты не восстанавливают и не заменяют, испытания прекращают по окончании времени или достижения наработки *T* для каждого не отказавшего объекта. В более новом стандарте, действующем в настоящее время, также существует план испытаний, подобный этому. Он называется

планом, ограниченным продолжительностью наблюдений. При проведении испытаний по плану *[N, U, T]* образуются однократно цензурированные выборки наработок на отказ. При параметрическом оценивании показателей надежности, например, средней наработки до отказа, по однократно цензурированным справа выборкам основным математическим методом является метод максимального правдоподобия. В условиях постоянного повышения надежности испытываемого оборудования промышленных объектов и желаемого сокращения времени испытаний, становится актуальным вопрос исследования достоверности оценок МП. В работе автором выполнены экспериментальные исследования точности оценок МП экспоненциального закона распределения и распределение Вейбулла по малым, однократно цензурированным справа выборкам, формирующимся по плану *[N, U, T]*. На ЭВМ моделировались однократно цензурированные справа выборки случайных величин объемом N=5, 10, 15, 20. Генерирование выборок выполнялось при следующих ограничениях

$$6 \le N < 10, \quad q \ge 0{,}5$$
$$10 \le N < 20, \quad q \ge 0{,}3$$
$$20 \le N \le 50, \quad q \ge 0{,}2\ ,$$

где q – степень цензурирования выборки. Такое ограничение параметра q значительно повышает значимость и эффективность линейных уравнений регрессии. Ограничения связаны с тем, что при большом объеме информации (большие объемы выборок N>25 и большом число полных наработок q>0,5) метод МП дает несмещенные оценки. С уменьшением объема информации смещение оценок возрастает.

Количество сформированных выборок для каждого значения N равно 3000. По каждой выборке методом максимального правдоподобия рассчитывались оценки экспоненциального распределения и оценки параметра формы и масштаба распределения Вейбулла и их относительные отклонения δ от истинных значений - значений, которые использовались при генерации выборки.

$$\delta = \frac{\theta - \theta_{МП}}{\theta},$$

где θ - истинное значение параметра исследуемого распределения, которое использовалось при моделировании выборки, $\theta_{МП}$ - оценка максимального правдоподобия параметра распределения.

По результатам моделирования построены гистограммы относительных отклонений оценок максимального правдоподобия экспоненциального распределения и распределение Вейбулла. По оси ординат отложен процент оценок от общего количества, попавших в данный интервал. Полученные результаты для экспоненциального распределения приведены на рис 1.

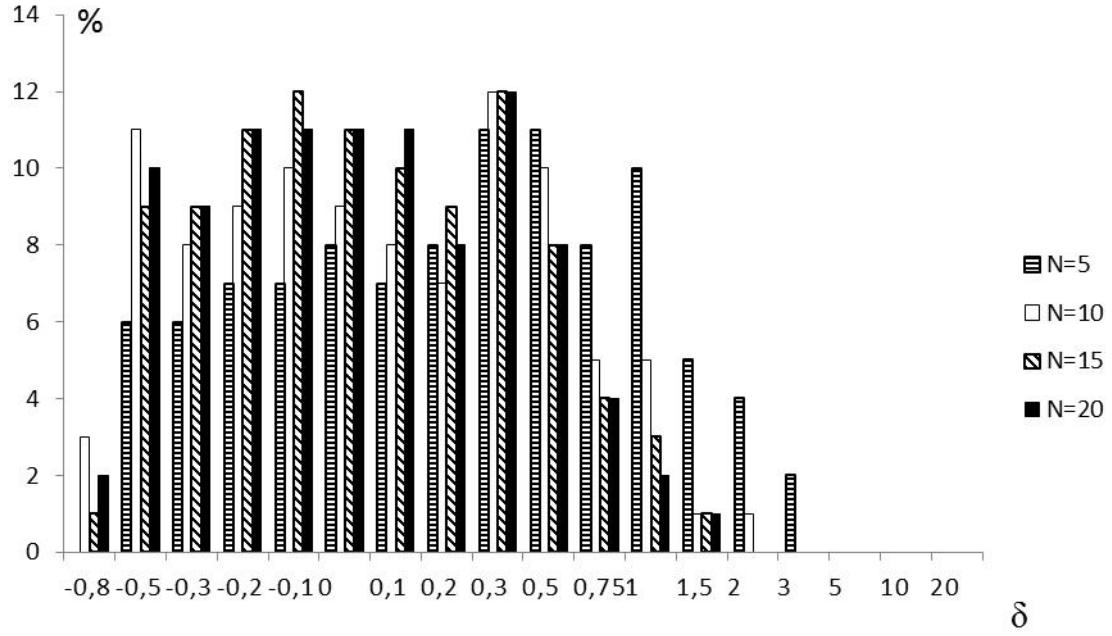

Рисунок 1. Относительные отклонения оценки максимального правдоподобия

Выполненные экспериментальные исследования точности оценок максимального правдоподобия показывают, что большинство оценок максимального правдоподобия, полученные по малым, однократно цензурированным справа выборкам, имеют значительные отклонения от истинных значений. Например, 2% оценок экспоненциального распределения при *N*=5 имеют относительные отклонения от 3 до 5; 4% - от 2 до 3; 5% - от 1,5 до 2. С увеличением объема выборки N точность оценок возрастает. При N=20 относительные отклонения оценок экспоненциального закона распределения не превышают 1,5. Несмотря на это, 4% оценок имеют относительные отклонения от 0,75 до 1; 8% - от 0,5 до 0,75; 12% - от 0,3 до 0,5. Это значит, что точность метода максимального правдоподобия при значениях N <20 низка и относительное отклонение оценок от истинных значений может достигать 5 и более, а половина всех оценок имеет отклонения больше 0,3 в зависимости от объема выборки, закона распределения, степени цензурирования.

В четвертой главе проведены исследования, позволяющие установить зависимость точности оценки параметров законов распределения, полученных методом максимального правдоподобия, в зависимости от отдельных характеристик выборки наработок на отказ оборудования промышленных объектов. Методика повышения точности оценок максимального правдоподобия использована для повышения точности оценок параметров максимального правдоподобия исследуемого закона распределения при проведении испытаний оборудования по плану *[N, U, T]*.

Цель проведенных исследований по мнению автора, можно сформулировать следующим образом - получение математических моделей, устанавливающих связь между отклонением оценок МП от истинного значения параметра экспоненциального распределения и параметрами, характеризующими структуру выборки.

Решение поставленной задачи осуществлялось в четыре этапа:

1. Моделирование на ЭВМ массива однократно цензурированных справа выборок случайных величин, распределенных по экспоненциальному закону и закону Вейбулла, характерных для плана испытаний *[N, U, T]*. В исследованиях ставилась задача получения универсальных уравнений, которые можно применять для оборудования промышленных объектов с разными значениями средних наработок до отказа. Поэтому параметры *b* и *a* исследуемого закона распределения Вейбулла рассчитывались для каждой генерируемой выборки с использованием случайного числа, равномерно распределенного на интервале [0,1] по формулам

$$a = 1.5 + \mathrm{RAND}(),\ b = 2 + \mathrm{RAND}(),$$

где RAND() – функция генерации случайного числа, равномерно распределенного на интервале [0,1].

Чтобы избежать повторения последовательностей псевдослучайных чисел, перед формированием каждой выборки генерировалось случайное число на основе системного времени. Для этого использовалась функция RAND() с отрицательным аргументом - RAND(-1). Получение достаточной разницы в системном времени, при генерации выборок, осуществлялось с помощью задержки времени до 30 миллисекунд перед каждым циклом формирования однократно цензурированной выборки.

2. Расчет параметров выборки, характеризующих ее структуру. Для описания структуры сформированной выборки случайных величин в работе использовались пять стандартных параметров выборки. Еще пять параметров представляют собой математические выражения, составленные из стандартных характеристик выборки.

Все параметры измеряются в относительных единицах и не зависят от абсолютных значений случайных величин. Это сделано для того, чтобы можно было применять полученные уравнения к оборудованию со средними наработками на отказ разной величины.

3. Расчет оценок МП параметров экспоненциального распределения и закона распределения Вейбулла.

4. Расчет зависимого параметра – отклонение оценки максимального правдоподобия от истинного значения по формуле

$$Y = \frac{\theta}{\theta_{ОМП}},$$

где θ - значение параметра закона распределения, которое использовалось при моделировании выборки, то есть истинное значение, $\theta_{ОМП}$ - оценка параметра закона распределения, полученная методом максимального правдоподобия.

5. Построение регрессионных зависимостей. В результате исследований построены регрессионные математические модели, устанавливающие связь между отклонением оценки МП от истинного значения и параметрами, характеризующими структуру выборки. Для каждого объема выборки *N* построено свое уравнение регрессии. Математические модели построены в классе линейных уравнений регрессии вида

$$\bar{y}(x) = b_0 + b_1 x_1 + \cdots + b_{10} x_{10}.$$

Коэффициенты в этом выражении находят методом наименьших квадратов.

Полученные уравнения регрессии позволяют повысить точность оценки максимального правдоподобия введением поправки $\bar{y}(x)$ к оценке МП по формуле

$$\theta_{КОН} = \theta_{ОМП} . \overline{y}(x), \qquad (1)$$

где $\theta_{КОН}$ – конечная оценка параметра функции распределения, которая получена в результате применения разработанной методики; $\theta_{ОМП}$ - оценка максимального правдоподобия; $\overline{y}(x)$ - относительное отклонение оценки максимального правдоподобия от истинного значения, рассчитанное по уравнению регрессии.

В исследованиях была проведена оценка эффективности построенных уравнений регрессии

Для исследования эффективности построенных уравнений регрессии разработан алгоритм.

Для каждой вновь сгенерированной выборки были рассчитаны:

1. Оценки максимального правдоподобия $\theta_{ОМП}$.

2. Поправки к оценке МП по полученным в исследованиях уравнениям регрессии.

3. Конечная оценка параметра распределения по выражению (1).

4. Построены графики, проходящие через вершины гистограмм относительных отклонений начальных оценок максимального правдоподобия и конечных, полученных после введения поправок к оценкам.

Результаты исследований эффективности применения построенных уравнений регрессии для экспоненциального закона распределения при объеме выборки N=5 показаны на рис.2.

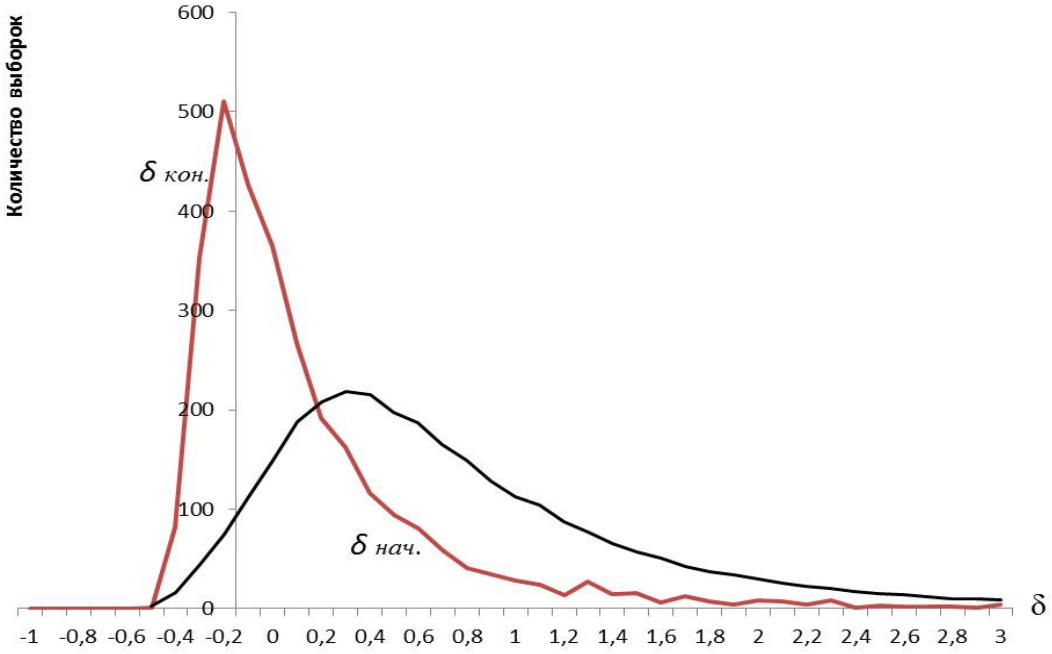

Рисунок 2. Начальные и конечные относительные отклонения оценок МП для N=5

График, приведенный на рис.2 показывает, что точность оценок МП после применения разработанных моделей и введения поправки возрастает. После введения поправки, относительные отклонения оценок от истинного значения параметров распределения, в зависимости от объема выборки *N*, не превышают 0,3-0,5, в то время как начальные отклонения могут быть больше 3. Наибольший эффект от введения поправок оценкам максимального правдоподобия экспоненциального распределения достигается при числе членов выборки *N*=5. Окончательно можно сделать вывод о том, что введение поправок позволяет повысить точность оценок максимального правдоподобия, в зависимости от объема выборки, в 1,5-1,8 раз.

Результаты исследований эффективности применения построенных уравнений регрессии для параметра масштаба закона распределения Вейбулла показаны на рис. 3

Графики, показывают, что точность оценок МП параметров закона распределения Вейбулла после применения разработанных моделей и введения поправки увеличивается. После введения поправки, относительные отклонения оценок МП от истинного значения параметров распределения, в зависимости от объема выборки, не превышают 0,3-0,5, в то время как начальные отклонения могут быть больше 2. Для расчета показателей надежности оборудования промышленных объектов с применением предложенной методики разработано программное обеспечение для ЭВМ.

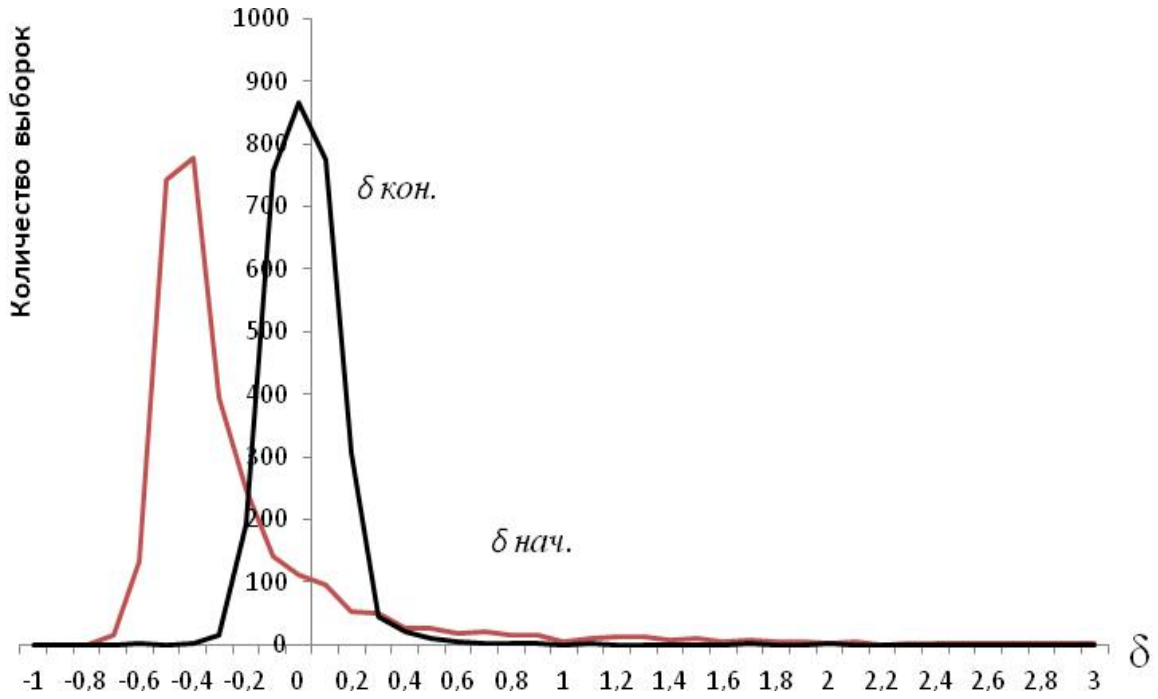

Рисунок 3. Начальные и конечные относительные отклонения оценок МП параметра масштаба для N=5

В целом можно сделать вывод о том, что введение поправок позволяет повысить точность оценок МП в зависимости от объема выборки в 1,2–2 раза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ показал, что использование существующих методов обработки информации о надежности оборудования пассажирских вагонов не позволяет сократить время наблюдений за оборудованием в процессе эксплуатации или при проведении испытаний.

2. Рассмотрены характеристики однократно цензурированных выборок справа наработок на отказ, образующихся при проведении эксплуатационных наблюдений или испытаний оборудования пассажирских вагонов с использованием плана *[N, U, T]*. Показано, что выборки являются малыми, однократно цензурированными справа.

3. Для формирования выборок случайных величин по плану испытаний *[N, U, T]* на ЭВМ, был разработан алгоритм. Алгоритм обеспечивает адекватность моделируемых выборок, на ЭВМ, выборкам, формирующихся в результате наблюдения за оборудованием пассажирских вагонов.

4. Для анализа точности оценок параметров двух законов распределения: экспоненциального, Вейбулла, полученных методом МП по сформированным выборкам случайных величин, были проведены экспериментальные исследования. По результатам эксперимента видно, что точность метода максимального правдоподобия при значениях N <20 низка. Относительное

отклонение отдельных оценок МП от истинных значений может достичь 3 и более, а половина оценок имеют отклонения 0,3 в зависимости от, степени цензурирования, объема выборки, и вида закона распределения.

5. Выполнен вычислительный эксперимент по моделированию с помощью комплекса программ на ЭВМ выборок случайных величин, адекватных по основным характеристикам выборкам наработок на отказ оборудования, формирующихся при проведении испытаний по плану *[N, U, T]*. Для каждой выборки рассчитаны параметры, характеризующие структуру выборки. По результатам эксперимента построены математические модели в виде уравнений регрессии, устанавливающие связь между относительным отклонением оценок МП параметров исследуемых законов распределения и параметрами выборки, характеризующими ее структуру.

6. Разработана методика оценки параметров законов распределения: экспоненциального, Вейбулла, заключающаяся в том, что оценки максимального правдоподобия корректируются с помощью поправок, для плана ускоренных испытаний *[N, U, T]*. Оценки рассчитываются по разработанным в работе математическим моделям. Математические модели, устанавливающих зависимость относительного отклонения оценок параметров законов распределения от параметров, характеризующих структуру выборок.

Введение поправок позволяет повысить точность оценок МП в зависимости от объема выборки в 1,2–2 раза.

7. Разработанные математические модели использованы ЗАО НО «Тверской институт вагоностроения» для оценки параметров законов распределения отказов оборудования пассажирских вагонов при проведении следующих работ:

- при разработке проекта новой редакции РТМ «Нормируемые показатели надежности пассажирских вагонов локомотивной тяги» в части разработки методов определения количественных значений показателей надежности;

- при разработке программы и методики подконтрольной эксплуатации вагонов пассажирских двухэтажных производства ОАО «ТВЗ» и проведении указанных работ в период 2016-2017 годов в части повышения точности математических методов обработки информации, полученной в результате сбора данных за длительный период;

- при разработке методик проведения ускоренных стендовых испытаний по отдельным узлам железнодорожного подвижного состава в части оптимизации количества испытуемых образцов и времени проведения испытаний, это подтверждено актом внедрения результатов диссертационной работы.

8. Применение разработанных в диссертационной работе математических методов позволяет улучшить управление процессом эксплуатационных или стендовых испытаний оборудования на надежность и добиться уменьшения

затрат на их проведение путем сокращения времени испытаний или числа испытуемых образцов на 20%.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК РФ

1. Абдулхамед М.А. Модели обработки информации в системах испытания оборудования на надежность / А. Ю. Русин, М. А. Абдулхамед, Г.А. Дмитриев // Вестник Воронежского государственного технического университета/ Т.14. № 1. 2018. С. 27-31.

2. Абдулхамед М.А. Исследования точности оценок параметров двух законов распределения: экспоненциального, вейбулла, полученных методом максимального правдоподобия по сформированным выборкам случайных величин / А. Ю. Русин, М. А. Абдулхамед // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, № 4. 2016. С. 56-60.

3. Абдулхамед М.А. Алгоритмы автоматизированной системы управления испытанием оборудования на надежность / А. Ю. Русин, М. А. Абдулхамед, Я.В. Барышев // Международный научно-практический журнал. Программные продукты и системы № 2 (114) - 2016. С.23- 26.

4. Абдулхамед М.А. Обработка информации в системе испытаний промышленного оборудования на надежность / А. Ю. Русин, М. А. Абдулхамед // [Электронный ресурс] / Научный Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности" (http://ipb.mos.ru/ttb), выпуск № 4 (56) - 2014.

5. Абдулхамед М.А. Управление процессом испытания оборудования на надежность / А. Ю. Русин, М. А. Абдулхамед // науч. - техн. журнал. Надежность №3(50) - 2014. С. 27-34.

Статьи в журналах, не входящих в перечень ВАК РФ

6. Абдулхамед М.А. Параметрическая оценка показателей надежности при ускоренных испытаниях оборудования / А. Ю. Русин, М. А. Абдулхамед // межвузовский сборник научных трудов №7. - Тверь, 2014. С. 207-214.

7. Абдулхамед М.А Статистические обработки результатов наблюдений при проведении ускоренных испытаний на надежность / А. Ю. Русин, М. А. Абдулхамед // Молодой ученый. 2014. №18. С. 274-279.

8. Абдулхамед М. Оптимизация ускоренных испытаний оборудование на надежность / А.Ю. Русин, М. Абдулхамед // сборник научно-практических трудов. Выпуск 2 Тверь 2014. С 37-45.

9. Абдулхамед М.А. Обработка результатов ускоренных испытаний оборудования на надежность / Русин А.Ю. Абдулхамед М. // Материалы Российской научно-техн. конф., Тверь, 2010. С. 72-78.

10. Абдулхамед М.А. Математические модели и методы обработки информации в системах испытания электрооборудования на надежность / Русин А.Ю., Абдулхамед М. // Технические науки в России и за рубежом: материалы IV междунар-науч. конф., (г. Москва, январь 2015 г.). — Москва, 2015. С. 36-42.

11. М. А. Абдулхамед Оценка показателей надежности пассажирских вагонов по малым, однократно цензурированным справа выборкам / Е.В. Сорокина, А.Ю. Русин, М. А. Абдулхамед // Проблемы и перспективы развития вагоностроения: материалы VII Всероссийской науч-практ. конф., (8 апреля 2016 г., г. Брянск) Брянск: БГТУ, 2016. С. 138-141.