

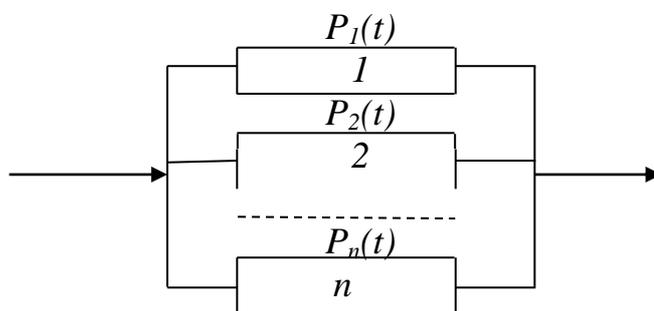
ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет»

Кафедра технологии материалов, надёжности,
ремонта машин и оборудования

Бардадын Н.А.

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие для студентов очной и заочной форм обучения,
направления подготовки 33.03.06 - Агроинженерия,
профиль - Технический сервис в АПК



Брянская область, 2015

УДК 62-192(07)

ББК 30.10

Б 24

Бардадын Н.А., **ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ:**
Учебное пособие/ Н.А. Бардадын. – Брянск: Издательство Брянский ГАУ, 2015.
- 92 с.

Основной целью освоения дисциплины является формирование совокупности теоретических знаний и практических навыков в области оценке надежности технических систем и осуществлению мероприятий по её повышению. Методическое пособие формирует способность к принятию организационно-управленческих решений и готовность нести за них ответственность, а также использованию основных законов естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применение методов математического анализа и моделирования, а также навыкам разработки и использования графической технической документации в соответствии с формируемыми компетенциями.

Основные понятия и определения теории надежности. Структура и понятие надежности и технических систем, основные свойства надежности и их параметры. Сбор и обработка опытной информации о работоспособности технических систем при эксплуатации. Основные закономерности изнашивания объектов, классификация отказов. Изучение методов статистической обработки информации при управлении качеством продукции. Математическая обработка опытной информации. Графические методы обработки информации. Конструктивные, технологические и эксплуатационные мероприятия повышения надёжности.

Рецензент: доктор технических наук, профессор Купреенко А.И.

Рекомендовано к изданию методической комиссией инженерно - технологического факультета от 22 октября 2015 г., протокол №3.

© Бардадын Н.А., 2015

© Брянский ГАУ, 2015

Физические основы надёжности машин

В связи с постоянным развитием технического прогресса всё более актуальными становятся вопросы повышения надёжности разнообразных технических устройств и систем. Надёжность является важнейшим технико-экономическим показателем качества любого технического устройства или системы. Переход на рыночную экономику обнаружил проблемы, связанные с надёжностью отечественных тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин. Ввиду неконкурентоспособности своей продукции заводы тракторного и сельскохозяйственного машиностроения попали в трудное экономическое положение, а вместе с ним и отрасль сельского хозяйства России. В повышении качества и надёжности машин заинтересованы не только заводы, но и сельское хозяйство России как потребители этих машин. Поэтому проблема повышения надёжности на сегодняшний день является одной из актуальнейших.

Совокупность свойств, обуславливающих длительность сохранения работоспособности машины и приспособленность к восстановлению работоспособности называется **НАДЁЖНОСТЬЮ**.

Как следует из определения надёжность характеризуется совокупностью свойств. Свойства надёжности: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять свою работоспособность до наступления первого отказа. Данное свойство не возобновляется после наступления будь-то эксплуатационного или ресурсного отказа. В большинстве своём служит для оценки качества новой или капитально отремонтированной техники. Данное свойство особенно важно для объектов, отказ которых опасен для жизни людей. Отказ рулевого управления или тормозной системы автомобиля может привести к тяжёлым последствиям, поэтому для таких агрегатов безотказность – наиболее важная составляющая часть надёжности.

По причине возникновения отказы делят *на конструктивные, производственные и эксплуатационные*.

Конструктивный отказ – отказ, возникший в результате несовершенства или нарушения установленных правил и (или) норм конструирования объекта (ошибочные исходные данные при проектировании, неправильный выбор конструкционных материалов, ошибки при выборе кинематики механизмов и т.д.).

Производственный отказ – отказ, возникающий в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта объекта, выполнявшегося на ремонтном предприятии (неудовлетворительное качество конструкционных материалов для изготовления деталей, несовершенство технологических методов обработки).

Эксплуатационный отказ – отказ, возникающий в результате нарушения установленных правил и (или) условий эксплуатации объекта (использование машины не по назначению, перегрузки, невыполнение правил ТО)

По характеру проявления отказы подразделяют на *внезапные, постепенные и перемежающиеся*.

Внезапный отказ – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одного или нескольких заданных параметров объекта (усталостное разрушение деталей, поломка деталей из-за внутренних дефектов или перегрузок).

Постепенный отказ – возникает в результате постепенного изменения значений одного или нескольких заданных параметров объекта (естественное старение и изнашивание, увеличение зазоров, ослабление посадок).

Перемежающийся отказ – многократно возникающий самоустраняющийся отказ объекта одного и того же характера (ухудшение работы двигателя из-за образования нагара в камере сгорания, который при высоких оборотах сгорает и отказ таким образом самоустраняется).

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность в течение всего периода эксплуатации до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Данное свойство значительно шире предыдущего, поскольку охватывает весь период эксплуатации и предусматривает перерывы на проведение технического обслужи-

вания и ремонт. Показатели безотказности и долговечности как полнокомплектной машины, так и её отдельных элементов обеспечиваются подбором материалов для изготовления деталей, упрочнением их трущихся поверхностей, выбором классов точности и системы допусков и посадок, а также подбором оптимальных сортов ГСМ и рядом других конструкционных и технологических мероприятий. Показатели долговечности оценивают ресурсом и сроком службы.

Ресурс- наработка объекта от начала его эксплуатации или её возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Срок службы- календарная продолжительность от начала эксплуатации или её возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Различают ресурсы до первого капитального ремонта (доремонтный ресурс), между капитальными ремонтами (межремонтный ресурс) и до списания (полный ресурс).

Гамма-процентный ресурс – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Гамма-процентный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигает предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах. Для тракторов и автомобилей принято нормированное значение γ , равное 0,9.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём проведению технического обслуживания и ремонта. Ремонтопригодность машины осуществляется системой конструктивных мероприятий, обеспечивающих доступность, легкосъёмность и невысокую трудоёмкость проведения разборочно-сборочных и регулировочных работ в процессе эксплуатации и ремонта машины. Применительно к сельскохозяйственной технике ремонтпригодность может характеризоваться контролепригодностью. Контролепригодность

характеризует приспособленность объекта к контролю его технического состояния. Данное свойство важно при оценке технического состояния и поиске отказавшего элемента. Данное свойство особенно важно для сложных машин, у которых более 50% времени восстановления уходит на определение места и характера отказа. Для обеспечения контролепригодности на тракторах и комбайнах устанавливают сигнализаторы: контроля технологического процесса, засорённости воздухоочистителя (с бумажными фильтрующими элементами), напряжения бортовой сети, датчик аварийного давления или температуры и т.д. Свойство ремонтпригодность неразрывно связано с доступностью – приспособленность объекта к удобному выполнению операций ТО и ремонта с минимальным объёмом балластных работ (открытие и закрытие панелей, крышек, люков, демонтажу и монтажу установленного рядом оборудования, сборочных единиц и деталей при доступе к обслуживаемым элементам объекта). Ремонтпригодность во многом определяется взаимозаменяемостью и восстанавливаемостью. Взаимозаменяемость – это свойство конструкции, агрегата, сборочной единицы, детали и других элементов машины, обеспечивающее возможность их замены при ТО и ремонте без подгоночных работ. Восстанавливаемость – приспособленность конструкции к восстановлению потерянной работоспособности с минимальными затратами труда и средств. Сложность технологического процесса разборки и сборки машины, наличие базовых поверхностей на деталях, запасов металла у деталей, обрабатываемых под ремонтный размер, влияют на восстанавливаемость.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять свою работоспособность в период хранения и транспортировки. Это одно из важнейших свойств для сельскохозяйственной техники, которая характеризуется сезонным характером эксплуатации. Проблема сохраняемости усугубляется в связи с хранением большинства сельскохозяйственных машин на открытых площадках. Поэтому консервация машин в нерабочие периоды времени приобретает особую актуальность (втулочно-роликовые цепи, штоки гидроцилиндров, клиновые ремни и т.д.)

Сохраняемость и приспособленность машин к транспортировке должна обеспечиваться применением стойких антикоррозионных покрытий, наличием различного рода запорной арматуры, обеспечивающей предохранение рабочих поверхностей от попадания влаги и пыли в период работы и хранения. Безусловно одну из существенных ролей играет лакокрасочное покрытие, а также наличие различного рода разгружающих устройств. Сохраняемость оценивается сроком сохраняемости. Срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения и (или) транспортировки объекта, в течение и после которой сохраняются значения показателей безотказности, долговечности и ремонтнопригодности в установленных пределах.

Следует отметить, что показатели ремонтнопригодности и сохраняемости большинства отечественных сельскохозяйственных машин значительно уступают зарубежным аналогам. Это связано с существованием большого количества модификаций одних и тех же марок машин, отсутствием на многих деталях центровочных и установочных баз, а также запасов металла для их обработки под ремонтный размер. Многие тракторы и с/х машины по-прежнему нуждаются в непомерно большом объёме обязательных операций технического ухода при малой их периодичности, что в свою очередь требует от потребителя больших затрат времени и труда на восстановление и поддержание работоспособности этих машин. Применительно к тракторам и с/х машинам надёжность является важнейшей технико-экономической характеристикой, определяющей стоимость и качество изготовления, ремонта и технической эксплуатации машины. Все свойства машины, в том числе и показатели её надёжности, формируются и закладываются в машину при её конструировании и изготовлении, проявляются же в процессе эксплуатации и частично возобновляются при ремонте. Итак, уровень надёжности машины зависит от трёх основных факторов:

1. Конструктивного – совершенство технических условий на изготовление или ремонт машины.
2. Технологического – качество технологического процесса изготовления

или ремонта машины.

3. Эксплуатационного – условия эксплуатации и уровень квалификации обслуживающего персонала.

Чем надёжнее машина, т.е. чем реже в процессе эксплуатации она теряет работоспособность и чем быстрее и дешевле эту работоспособность можно восстановить, тем больше эта машина выполнит определённой работы и тем дешевле будут стоить её ТО и ремонт. По мере старения надёжность машины безусловно ухудшается, а стоимость поддержания работоспособности наоборот увеличивается. Для поддержания машинно-тракторного парка в работоспособном состоянии в нашей стране применяется планово-предупредительная система ТО и ремонта. Эта система включает в себя комплекс мер, а именно ежедневные и номерные технические уходы, проведение периодических ремонтов, устранение отказов, обкатку новых и отремонтированных машин, постановку их на хранение в нерабочие периоды. Проведение всего этого комплекса работ связано со значительными затратами времени, труда и денежных средств. В связи с этим наиболее полным и общим оценочным показателем надёжности машины является **УДЕЛЬНАЯ СТОИМОСТЬ ПРИОБРЕТЕНИЯ, ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА МАШИНЫ ЗА ПОЛНЫЙ СРОК ЕЁ СЛУЖБЫ**.

Зная заранее экономические и технические показатели надёжности, потребитель имеет возможность не только оценить эксплуатационные качества машины и на этой основе определить целесообразность её приобретения, но и, что особенно важно и нужно решить целый ряд инженерных задач, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом. К ним относятся: определение и планирование сезонных и годовых наработок, определение количества и стоимости устранения эксплуатационных отказов, определение календарных сроков постановки машин в ремонт, прогнозирование полных и остаточных ресурсов машин и их деталей. Наука о надёжности, получающая в нашей стране за последние годы всё большее развитие, использует целый ряд различных методов

определения показателей надёжности машин в различных условиях эксплуатации. Основу этих методов составляет сбор первичной опытной информации о работе машин и последующая её статистическая обработка. К сожалению в отрасли сельскохозяйственного производства эти методы ещё не нашли широкого практического применения, хотя необходимость в этом существует. Хотя бы из тех соображений, рынок в настоящее время насыщен практически любой техникой, как отечественного, так и импортного производства и оценить машину с точки зрения сопоставления цены и качества для потребителя всегда актуально. Поэтому целью курса надёжности является систематизация показателей надёжности тракторов и с/х машин с той целью, чтобы на этой основе дать практические методы решения некоторых инженерных задач в области ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка. По мере эксплуатации, а также при хранении и транспортировке техническое состояние как машины в целом, так и отдельных её агрегатов и узлов неизбежно ухудшается. Рабочие поверхности деталей и соединений изнашиваются или подвергаются усталостному разрушению. Массивные базовые детали в наибольшей степени подвержены потере размерной стабильности вследствие коробления и усталости. Этот многогранный и сложный физический процесс постепенного ухудшения технического состояния машины называется процессом «старения». Безусловно интенсивность «старения» машины может быть значительно снижена посредством применения комплекса профилактических мероприятий (техническое обслуживание, обкатка и т.д.). Этот процесс неизбежен и непрерывен во времени. В результате такого «старения» отдельные детали, сопряжения и механизмы исчерпывают свой ресурс, вследствие чего возникает отказ и машина теряет работоспособность. Конструктивные особенности машины, разнообразие и непостоянство условий её эксплуатации, обуславливают значительный разброс ресурсов отдельных элементов. В связи с этим отказы тракторов и с/х машин возникают значительно сравнительно часто, а закономерности их появления подчиняются законам теории вероятностей.

При появлении отказа восстановление работоспособности машины может быть осуществлено двумя, принципиально отличными друг от друга способами. В первом случае, когда не требуется значительных разборочно-сборочных и регулировочных работ. В данном конкретном случае восстановление работоспособности производится посредством замены только одной детали. При этом восстанавливается работоспособность машины, а её остаточный ресурс остаётся прежним. Такой способ восстановления работоспособности в соответствии со своим техническим содержанием и существующей терминологией назван «устранением отказов». В свою очередь отказы, устранение которых целесообразно производить этим способом называют эксплуатационными отказами. Во втором случае, когда устранение отказа связано со значительными разборочно-сборочными, моечными и другими операциями. При этом становится экономически целесообразным ограничиться заменой неисправной детали, что приводит к восстановлению работоспособности. При этом во избежание частых разборок и сборок в подобных случаях наряду с работоспособностью необходимо восстановить и технический ресурс (т.е. провести капитальный ремонт). Преимуществом этого способа устранения отказов является восстановление технического ресурса машины и повышение уровня её надёжности.

В полном соответствии со своим техническим содержанием такой способ устранения отказов называется РЕМОНТОМ, а все отказы, устранение которых целесообразно производить этим способом, называются РЕСУРСНЫМИ ОТКАЗАМИ.

Типичными примерами отказов в соответствии с их классификацией применительно к тракторам и с/х машинам являются:

Эксплуатационные – течь сальников и уплотнений, стук клапанов.

Ресурсные – предельный износ коренных и шатунных вкладышей и шеек коленчатого вала, предельный износ гильз, поршней, цилиндров.

Деление отказов на два вида по технико-экономической целесообразности их устранения позволяют по каждой марке машины составить обоснован-

ные перечни эксплуатационных и ресурсных отказов и зная вероятную периодичность их появления, планировать объёмы и стоимость работ выполняемых в условиях организации и в специализированных предприятиях.

Устранением отказа называется технологический процесс восстановления работоспособности машины (узла, агрегата).

Ремонтом называется технологический процесс восстановления работоспособности, исправности и технического ресурса машины (узла, агрегата). В свою очередь *технический ресурс (ресурс)* – суммарная наработка объекта от начала эксплуатации или её восстановления после капитального ремонта до перехода в предельное состояние.

ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕТАЛЕЙ И СОЕДИНЕНИЙ МАШИН.

Любой объект с точки зрения надёжности может находиться в одном из следующих состояний: исправном, неисправном, работоспособном, , неработоспособном и предельном.

Исправное состояние – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно- технической и (или) конструкторской документации.

Неисправное состояние – состояние объекта, при котором он не удовлетворяет хотя бы одному из требований нормативно- технической и (или) конструкторской документации.

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно- технической и (или) конструкторской документации.

Неработоспособное состояние - состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствуют требованиям нормативно- технической и (или) конструкторской документации.

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Переход объекта из исправного состояния в неисправное или работоспособное состояние называют *повреждением*.

Переход объекта в неработоспособное состояние из исправного, неисправного или работоспособного состояния называют *отказом*.

Предельное состояние изделия определяется невозможностью его дальнейшего использования вследствие снижения эффективности, либо требованиями безопасности и оговариваются в технической документации. Как отмечалось ранее, основной причиной потери работоспособности деталей и соединений является естественный износ их трущихся рабочих поверхностей.

В машиностроении все детали делятся по характеру своей работы на две самостоятельные группы:

1. Детали, имеющие собственный выбраковочный параметр - предельную величину износа, превышение которого может вызвать аварийную поломку.
2. Подвижные соединения, предельное состояние которых т.е. предельная величина зазора между трущимися поверхностями деталей не вызывает как правило поломки деталей, а вызывает нарушение технических или экономических характеристик работы узла.

На первом рисунке представлена типовая кривая износа детали с собственным выбраковочным параметром, а на втором – кривые износа двух деталей, составляющих одно соединение

Анализ этих ресурсов говорит о том, что у соединения отсутствует зона форсированного предаварийного изнашивания. Выбраковка производится в данном случае по причине резкого ухудшения одной из характеристик узла.

По мере увеличения износа остаточный ресурс детали $T_{до}$ или соединения

T_{co} уменьшается. Когда величины износа или зазора достигают предельных значений, ресурс детали или соединения исчерпывается полностью и их дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена.

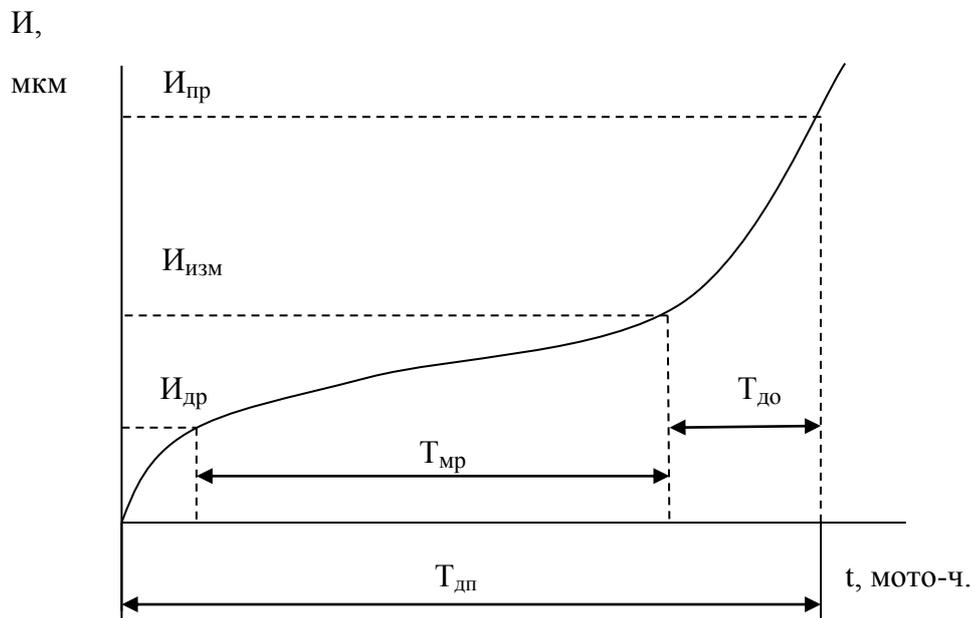


Рис.1 - Типовая кривая износа детали.

Таким образом предельным износом $I_{пр}$ или зазором $S_{пр}$ называется такой, при котором наступает предельное состояние детали или соединения и их дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена во избежание аварийной поломки или резкого ухудшения технических и экономических характеристик машины.

Суммарная наработка детали или соединения от начала эксплуатации и до предельного состояния называется ПОЛНЫМ РЕСУРСОМ детали $T_{дп}$ или соединения T_{co} .

В процессе ремонта восстанавливается не только работоспособность машины, но и её межремонтный и технический ресурс. Таким образом в процессе ремонта на машине оставляют те детали и соединения, остаточный ресурс которых равен или превышает межремонтный ресурс. Но эти детали уже работали и имеют определённый износ, так называемый «допустимый».

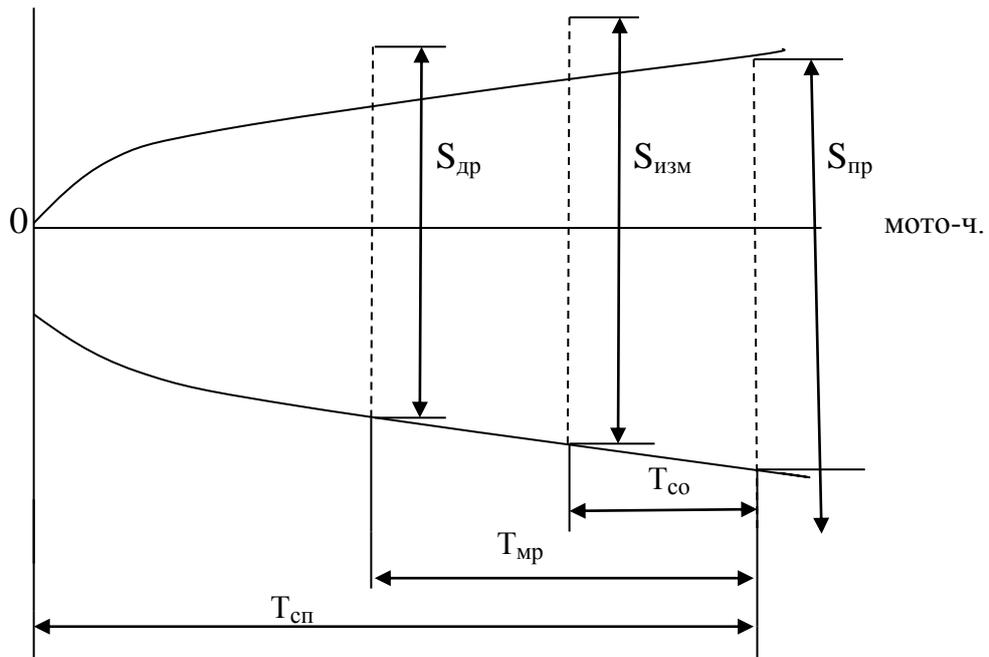


Рис. 2 – Кривые износа соединения

Допустимым износом $I_{др}$ или зазором $S_{др}$ называется такой, при котором остаточный ресурс детали или соединения равен техническому ресурсу машины в целом или её отдельного узла. Величины предельных и допустимых износов устанавливаются в результате проведения специальных исследований и последующих испытаний. Значения предельных и допустимых износов большинства марок с/х машин и тракторов приведены в альбомах ГОСНИТИ.

Математическая обработка опытной информации по показателям надёжности.

Все показатели надёжности машин на практике оцениваются числовыми характеристиками, которые затем подвергают математической обработке с той или иной целью.

Принципиальными исходными положениями, положенными в основу обработки информации по надёжности машин, являются:

а) все показатели надёжности относятся к категории случайных. В теории вероятностей случайной величиной называется такая, которая в процессе опыта или испытания машин может в определенных границах принимать любое значение, заранее неизвестно какое именно.

б) основными характеристиками каждого показателя надежности являются:

- среднее значение (математическое ожидание);
- характеристики рассеивания – абсолютная характеристика рассеивания
- среднее квадратическое отклонение σ и относительная характеристика рассеивания - коэффициент вариации ν ;
- доверительные границы рассеивания одиночного и среднего значений показателя надежности;
- наибольшие возможные абсолютная и относительная погрешности;

в) показатели надежности являются существенно положительными величинами. В связи с этим у многих показателей надежности начало зоны рассеивания может существенно смещаться вправо относительно его нулевого значения на величину смещения $t_{см}$. В дальнейшем при расчетах величину $t_{см}$ следует учитывать при определении коэффициента вариации, а также при подборе теоретического закона распределения показателя надежности.

Основными этапами обработки информации являются:

1. Составление сводной таблицы исходной информации в порядке возрастания показателя надежности.
2. Составление статистического ряда исходной информации.
3. Определение среднего значения и абсолютных характеристик рассеивания (дисперсии и среднеквадратического отклонения) показателя надежности.
4. Проверка опытной информации на выпадающие точки.
5. Графическое изображение опытного распределения показателя надёжности: построение гистограммы, полигона и кривой накопленных опытных вероятностей.
6. Определение относительной характеристики рассеивания показателя надежности – коэффициента вариации.
7. Выбор теоретического закона распределения, определение его параметров.
8. Проверка совпадения опытного и теоретического законов распреде-

ления показателя надежности по критерию согласия, графическое изображение дифференциальной и интегральной кривых.

9. Определение доверительных границ рассеивания одиночного и среднего значений показателя надежности и наибольших возможных ошибок расчета.

1. СОСТАВЛЕНИЕ СВОДНОЙ ТАБЛИЦЫ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Составление сводной таблицы исходной информации в порядке возрастания показателя надёжности. В ряде литературных источников данная операция называется ранжированием опытных данных. Суть её сводится к тому, чтобы из всего многообразия показателей надёжности, полученных в результате проведения испытаний выстроить вариационный ряд.

1560	1880	2100	2340	2560	2900	3110	3290
3340	3420	3570	3596	3810	3960	4120	4211
4360	4390	4480	4510	4590	4600	4690	4792
4840	4950	5180	5230	5390	5470	5550	5710
5880	5990	6040	6450	7790	6890	7695	8000

2. СТАТИСТИЧЕСКИЙ РЯД ИНФОРМАЦИИ

Целью составления статистического ряда является упрощение дальнейших расчетов. Вообще статистический ряд составляется в том случае, если повторность исходной (опытной) информации N не менее $20 \div 25$. Отправной точкой построения статистического ряда является то, что вся информация разбивается на n интервалов.

Рекомендуемое количество интервалов статистического ряда $n = 6 \dots 12$. Количество интервалов статистического ряда n определяют исходя из следующего уравнения

$$n = \frac{t_{max} - t_{см}}{A}$$

где t_{max} и $t_{см}$ – максимальное значение показателя надёжности и величина смещения соответственно, мото-ч.; A – величина интервала статистического ряда, мото-ч.

Величина смещения и величина интервала статистического ряда в данном случае выбирают из тех соображений, чтобы первая точка опытной информации находилась приблизительно на середине первого интервала статистического ряда. Интервалы должны быть одинаковыми по величине, плотно прилегать друг к другу, не иметь разрывов и охватывать всю имеющуюся совокупность.

Таким образом, задавшись величиной интервала A и протяженностью зоны рассеивания определяют число интервалов статистического ряда. Для нашего случая

$$n = \frac{t_k - t_{cm}}{A} = \frac{8000 - 1000}{1000} = 7$$

Статистический ряд исходной информации представляет собой таблицу, которая содержит в себе всё опытное распределение показателя надёжности: количество и величину интервалов, среднее значение каждого интервала, частоту, вероятность и суммарную или накопленную вероятность.

Определение частоты появления случаев в пределах каждого интервала статистического подсчитывается по сводной таблице, среднее значение находится как полусумма границ интервала. Определение вероятности интервала определяется как отношение числа случаев появления показателя надёжности в каждом интервале к повторности информации N . Значение опытной вероятности в i -м интервале статистического ряда $P_{опi}$ определяют по формуле

$$P_{опi} = \frac{m_{опi}}{N}$$

где $m_{опi}$ - опытная частота i -того интервала статистического ряда.

Для нашего случая в качестве примера для первого интервала:

$$P_1 = \frac{m_1}{N} = \frac{2}{40} = 0,05$$

Таким образом статистический ряд для нашего случая будет иметь следующий вид:

Таблица 1- Статистический ряд

Интервал мото-ч.	1000-2000	2000-3000	3000-4000	4000-5000	5000-6000	6000-7000	7000-8000
Середина интервала t_{ic} мото-ч.	1500	2500	3500	4500	5500	6500	7500
Опыт. частота i -того интервала $m_{оп i}$	2	4	8	12	8	4	2
Опыт. вероятность i -того интервала $P_{оп i}$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,05
Σ Вероятность i -того интервала $P_{оп i}$	0,05	0,15	0,35	0,65	0,85	0,95	1,0

Существует и другая методика для определения количества интервалов используют следующее уравнение $n = \sqrt{N} \pm 1$. Полученный таким образом результат округляют до ближайшего целого числа. Длину интервала статистического ряда A рассчитывают по формуле

$$A = (t_{max} - t_{min})/n,$$

где $t_{max} - t_{min}$ – максимальное и минимальное значение показателя надёжности соответственно, моточ.

Смещение начала рассеивания $t_{см}$ определяют по формуле

$$t_{см} = t_{1н} - 0,5A,$$

где $t_{1н}$ – начало первого интервала, моточ.

3. СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЁЖНОСТИ \bar{t} И АБСОЛЮТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАССЕЙВАНИЯ – СРЕДНЕЕ КВАДРАТИЧЕСКОЕ ОТКЛОНЕНИЕ σ .

Среднее значение является важнейшей характеристикой показателя надёжности, поскольку на практике на основании средних значений производится планирование работы машины, составление заявок на запчасти и т.д.

Если если повторность информации N невелика, менее 20...25, вследствие чего ее не удастся объединить в статистический ряд, то среднее значение пока-

зателя надёжности вычисляется как среднее арифметическое из всех имеющихся значений показателя надёжности по уравнению:

$$\bar{t} = \frac{\sum_1^N t_i}{N},$$

где N – повторность информации;

t_i - значение i -го показателя надёжности.

При наличии статистического ряда среднее значение показателя надёжности \bar{t} определяется из следующего уравнения:

$$\bar{t} = \sum_1^n t_{ic} \cdot P_{оп i}$$

где n - количество интервалов;

t_{ic} - значение середины интервала;

$P_{оп i}$ – опытная вероятность i -го интервала

В ряде случаев на практике приходится определять средние значения обратных величин \bar{Q} от основных показателей надёжности t_i (например, износостойкость вместо скорости изнашивания). В подобных случаях следует пользоваться средними гармоническими значениями, определяемыми по уравнению:

$$\bar{Q} = \frac{1}{\bar{t}} = \frac{N}{\sum_1^N t}$$

Попытки определять средние значения обратных величин по ранее приведенным уравнениям могут привести к значительным ошибкам.

3.1. АБСОЛЮТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ – ДИСПЕРСИЯ И СРЕДНЕЕ КВАДРАТИЧЕСКОЕ ОТКЛОНЕНИЕ

Рассеивание является одной из важнейших характеристик показателя надёжности, позволяющей переходить от общей совокупности к показателям надёжности отдельных машин. В инженерной практике эксплуатации машин на

основании характеристик рассеивания представляется возможным решать такие важные хозяйственные задачи, как определение сроков постановки машин на ремонт и стоимость их ремонта и т.д. В том случае если повторность исходной информации $N < 25$, то изначально вычисляется дисперсия из следующего выражения:

$$D = \frac{\sum_1^N (t_i - \bar{t})^2}{N-1}$$

Однако пользоваться значением дисперсии не всегда удобно, т.к. ее величина получается слишком большой, а размерность равна квадрату размерности показателя надёжности. Поэтому наиболее распространенной и удобной для расчетов характеристикой рассеивания является среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{D}$$

Оно значительно меньше по величине, соразмерно со значением показателя надёжности в опытной совокупности машин и размерность совпадает с размерностью показателя надёжности.

При наличии статистического ряда информации ($N > 25$) среднее квадратическое отклонение σ определяется по уравнению:

$$\sigma = \sqrt{\sum_1^n (t_{ic} - \bar{t})^2 P_i}$$

4. ПРОВЕРКА ИНФОРМАЦИИ НА ВЫПАДАЮЩИЕ ТОЧКИ

При обработке опытной информации следует иметь в виду, что любая опытная информация, как бы ни была она тщательно собрана, может иметь ошибочные точки, выпадающие из общего закона распределения.

Поэтому, прежде чем приступить к дальнейшей математической обработке, информация должна быть проверена на достоверность, т.е. на выпадающие точки.

Грубая проверка информации может быть проведена визуально или по правилу $\bar{t} \pm 3\sigma$. Такая проверка проводится следующим образом: к среднему значению показателя надёжности поочерёдно прибавляют и вычитают утроенное значение среднего квадратического отклонения. Если в границы обозначенные выражением $\bar{t} \pm 3\sigma$ входят все точки опытной совокупности, то все они достоверны, если же хотя бы одна из точек не входит, то она подлежит удалению из сводной таблицы исходной информации, а также из статистического ряда. Пересчёту подлежат как среднее значение показателя надёжности, так и среднее квадратическое отклонение.

Существует и более точная проверка как крайних, так и любых других смежных точек информации. Производится она по критерию λ (критерий Ирвина). Фактическое значение критерия λ_{on} определяется по уравнению:

$$\lambda_{on} = (t_{i+1} - t_i)/\sigma,$$

где λ_{on} - опытное значение критерия Ирвина;

t_i, t_{i+1} – смежные точки опытной информации, мото-ч.

Таким образом может быть произведена проверка как крайних, так и любых других точек информации независимо от места их расположения в сводной таблице исходной информации. Обязательным условием данной проверки является сравнение фактического (расчетного) значения критерия Ирвина с нормированным (табличным). Теоретический коэффициент Ирвина λ_{on} определяют по значениям объема выборки N и доверительной вероятности α , используя таблицу 1 приложения.

Точка информации является достоверной, если выполняется условие $\lambda_{on} \leq \lambda_m$, в противном случае точка является недостоверной, т.е. выпадающей. Поэтому как и в предыдущем случае она подлежит удалению из сводной таблицы исходной информации, а также из статистического ряда и пересчёту подлежат среднее значение показателя надёжности и среднее квадратическое отклонение.

5. ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ОПЫТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ

Статистический ряд исходной информации в первом приближении дает полную характеристику опытного распределения показателя надежности.

По данным статистического ряда могут быть построены гистограмма, полигон и кривая накопленных опытных вероятностей. Они более наглядно дают представление об опытном распределении показателя надежности и позволяют в первом приближении решать ряд инженерных задач, связанных с оценкой надежности тракторов и т.д.

При построении рекомендуется пользоваться правилом «золотого сечения»:

$$Y = \frac{5}{8}X$$

Где Y - длина наибольшей ординаты;

X - длина абсциссы, соответствующей наибольшему значению показателя надежности.

Гистограмма и полигон являются дифференциальными, а кривая накопленных опытных вероятностей, полученная путем последовательного сложения площадей под гистограммой или полигоном – интегральными статистическими законами распределения опытного показателя надёжности (рис.1).

По оси абсцисс у всех графиков откладывается в масштабе значение показателя надежности t в его размерности (мото-ч), а по оси ординат –опытная вероятность $P_{оп i}$ у гистограммы и полигона и накопленная опытная вероятность $\sum P_{он}$ у кривой накопленных опытных вероятностей. При построении гистограммы по оси абсцисс поинтервально откладывают в определённом масштабе значение показателя надёжности, а по оси ординат – опытную вероятность $P_{оп i}$ для данного i -того интервала. Соединив между собой середины интервалов статистического ряда t_{ic} , получают полигон. Таким образом точкой полигона является точка пересечения ординаты, равной опытной вероятности интервала, и абсциссы, равной середине этого интервала.

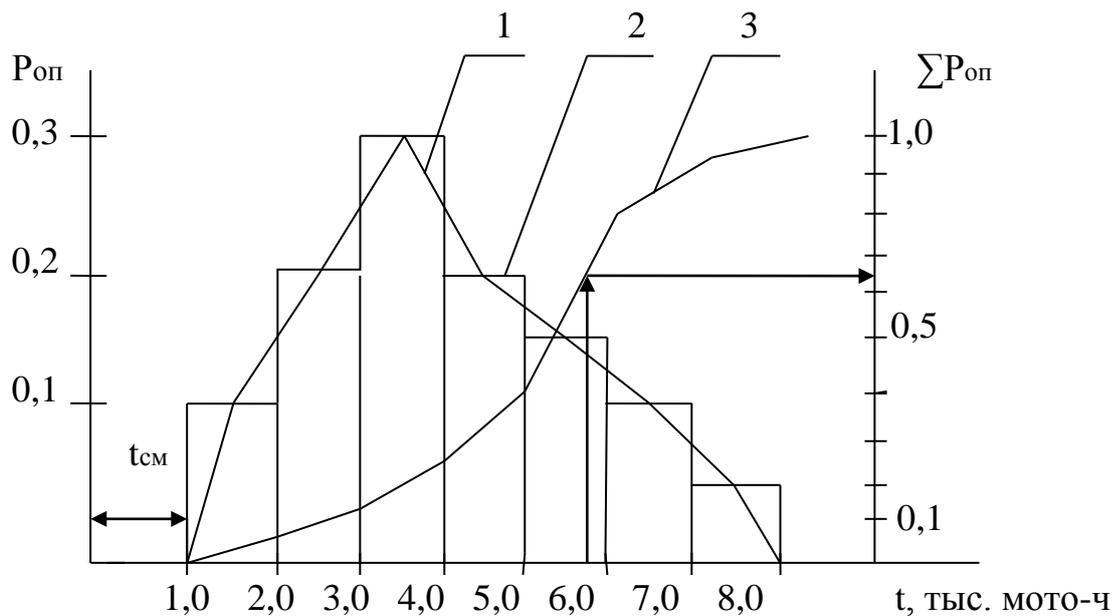


Рисунок 1 – Графическое изображение опытного распределения показателя надёжности: 1 – гистограмма; 2- полигон; 3 – кривая накопленных опытных вероятностей.

Площадь каждого прямоугольника гистограммы, площадь под полигоном в пределах интервала равны количеству объектов в долях единицы, у которых значения показателя надёжности находятся в границах этого интервала. Точку кривой накопленных опытных вероятностей в i -том интервале получают при пересечении ординаты, равной сумме вероятностей i -интервалов (см. правую ось ординат) $\sum_1^n P_i$ и абциссы конца данного i – того интервала – t_{ik} . Полученные точки соединяют прямыми линиями, первую точку соединяют с началом первого интервала.

Пользуясь графическим изображением опытного распределения показателя надёжности, можно определить количество объектов, которые потребуют ремонта в заданном интервале наработок. Причём более удобно решать задачи подобного рода с помощью интегральной кривой. Достаточно провести из любой интересующей нас точки на оси абсцисс перпендикуляр до пересечения с кривой накопленных опытных вероятностей, а затем точку пересечения спроецировать на ось ординат $\sum P_{оп}$ и мы получим искомое значение, выраженное в процентах от общего количества испытываемых объектов (см. рис.1).

6. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАССЕЙВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ – КОЭФФИЦИЕНТ ВАРИАЦИИ

Коэффициент вариации является относительной (безразмерной) характеристикой рассеивания показателя надежности, более удобной при выборе и оценке теоретического закона распределения, чем среднее квадратическое отклонение σ и вычисляется по следующей формуле

$$V = \frac{\sigma}{(\bar{t} - t_{cm})}$$

На основании полученной величины коэффициента вариации производится предварительный выбор теоретического закона распределения. При $V < 0,3$ предпочтение отдают закону нормального распределения (ЗНР), если $V > 0,5$ – закон распределения Вейбулла (ЗРВ). Если значение коэффициента вариации находится в интервале $0,3 \dots 0,5$, то выбирают тот закон, который лучше совпадает с распределением опытной информации, т.е. расчёт ведут параллельно по двум законам распределения и в конечном итоге предпочтение одному из них отдают по величине критерия согласия.

7. ВЫБОР ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

7.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Показатели надежности тракторов, с.-х. машин и их элементов определяются на основе испытания или наблюдения группы однотипных машин в условиях их нормальной эксплуатации. Полученные значения отдельных показателей надежности должны быть в дальнейшем перенесены на полную (генеральную) совокупность машин или же на отдельные частные совокупности этих машин, в результате чего оценивается надежность данной марки

машины и разрабатываются мероприятия по повышению качества их изготовления и ремонта. Безусловно, такой перенос показателей надежности от одной группы машин на другую будет правомочен только в случае достаточной массовости и достоверности первичной информации. Испытание машин связано со значительными организационными трудностями, что неизбежно ограничивает как количество испытываемых машин, так и длительность их испытания. Более того, полученные опытным путем показатели надежности зависят от целого ряда факторов: почвенных и климатических условий, качества ГСМ и т.д. Все выше перечисленное не позволяет произвести прямой непосредственный перенос результатов испытания на надежность других машин той же марки без соответствующих корректив. Смысл этих корректив заключается в том, что по данным опытной информации определяется общий теоретический закон распределения показателя надежности для любой совокупности машин, в том числе и для генеральной. Этот теоретический закон выражает общий характер изменения показателя надежности машин и исключает всякие частные отклонения, связанные с недостатками сбора первичной опытной информации. Иными словами процесс замены опытных закономерностей теоретическими называется в теории вероятностей процессом выравнивания или сглаживания статистической информации. Выбранный теоретический закон распределения позволяет вести расчет характеристик показателя надежности, применительно к полной совокупности машин данной марки, а следовательно и к любой их частной совокупности. В теории вероятности имеется большое количество различных законов распределения: нормальный (Гаусса), логарифмический-нормальный, экспоненциальный, биномиальный, Пуассона, Вейбулла, Релея и другие. Каждый из них имеет свою область применения, свои расчетные уравнения и таблицы, упрощающие расчет. При обработке информации по показателям надежности машин, эксплуатируемых в сельском хозяйстве, в подавляющем большинстве случаев используются или ЗНР или закон распределения Вейбулла.

7.2. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФУНКЦИИ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Каждый закон распределения показателей надежности характеризуется двумя функциями: ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ или функцией плотности вероятностей $f(t)$ и ИНТЕГРАЛЬНОЙ $F(t)$ или функцией распределения.

Графическое изображение этих функций представлено на рис.2.

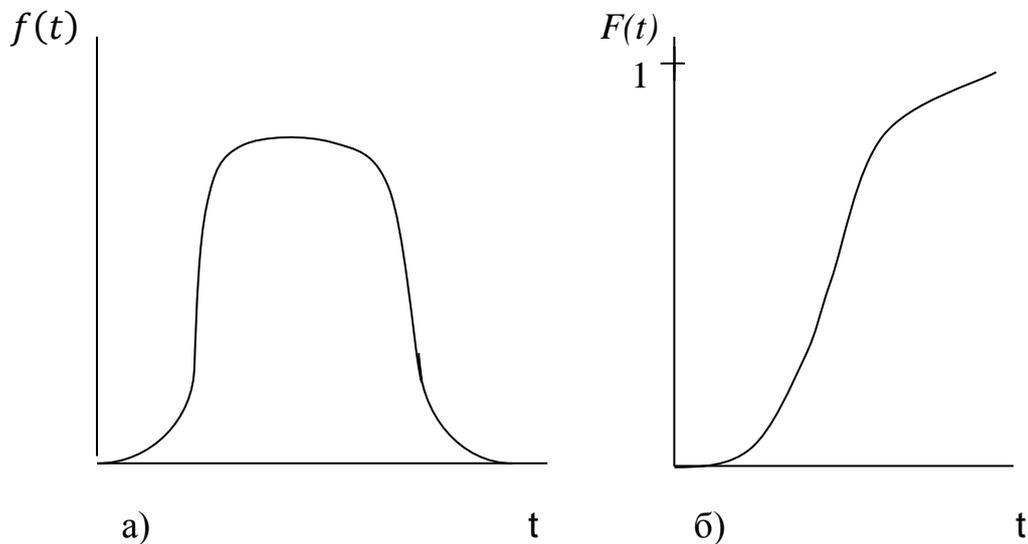


Рисунок 2 – Графическое изображение а) дифференциальной $f(t)$, б) интегральной $F(t)$ функций распределения.

Площадь под дифференциальной кривой или иными словами сумма вероятностей всех возможных значений показателя надежности равна единице.

Интегральная кривая получена последовательным суммированием площадей под дифференциальной кривой в границах возможных значений показателя надежности. По этой кривой можно определять не только количество показателей надежности в интервале от нуля до заданной величины, но и количество показателей надежности в любом произвольно выбранном интервале значений показателя надежности от t_1 до t_2 . Следует иметь в виду, что существует

две интегральные функции: функция «отказности» и функция «безотказности». Интегральная функция «отказности» $F(t)$ является мерилем уже реализованных значений показателей надёжности, а функция «безотказности» $P(t)$ является мерилем еще не реализованных значений показателей надёжности.

Эти две функции связаны между собой уравнением:

$$F(t) = 1 - P(t)$$

7.3. ЗАКОН НОРМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ И ЕГО ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Закон нормального распределения (закон Гаусса) довольно широко используется во всех отраслях науки и техники. Если говорить конкретно о показателях надёжности тракторов и сельскохозяйственных машин, то данный закон используется в следующих случаях:

- определение характеристик рассеивания полных, доремонтных и межремонтных ресурсов машин, их агрегатов и узлов;
- определение характеристик рассеивания времени и стоимости восстановления работоспособности машины и ее элементов;
- определение характеристик рассеивания наработок на один ресурсный отказ;
- определение характеристик рассеивания ошибок измерения и размеров деталей в пределах поля допуска;
- сложение нескольких одинаковых или разных законов распределения.

Вышеоговоренные случаи применения ЗНР не являются обязательными. Возможны случаи, когда рассеивание перечисленных показателей подчинено другим законам распределения. В связи с этим в каждом конкретном случае расчета необходимо производить проверку правильности выбора закона распределения.

Этот закон, как и все другие, характеризуется дифференциальной $f(t)$ и интегральной $F(t)$ функциями. Отличительной особенностью этих функций является симметричное рассеивание частных значений показателей надёжности.

Для определения дифференциальной функции через центрированную нормированную функцию используют уравнение

$$f(t_{ic}) = \frac{A}{\sigma} f_0 \left[\frac{(t_{ic} - \bar{t})}{\sigma} \right]$$

где $f_0[(t_{ic} - \bar{t})/\sigma]$ – центрированная дифференциальная функция ЗНР, определяемая по отношению $(t_{ic} - \bar{t})/\sigma$ по таблице 2 приложения.

Следует учитывать, что $f_0(-t) = f_0(+t)$.

Интегральная функция или функция распределения $F(t)$ определяется интегрированием функции плотности вероятности $f(t)$.

Для определения интегральной функции $F(t)$ ЗНР через $F_0(t)$ применяют уравнение

$$F(t_{ik}) = F_0 \left[\frac{(t_{ik} - \bar{t})}{\sigma} \right]$$

где $F_0[(t_{ik} - \bar{t})/\sigma]$ – центрированная и нормированная интегральная функция, определяемая по таблице 3 приложения.

Следует учитывать, что

$$F_0(-t) = 1 - F_0(+t)$$

Рассчитанные таким образом значения дифференциальной и интегральной функций по всем интервалам статистического ряда заносятся в статистический ряд (табл.2).

7.4. ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЙБУЛЛА И ЕГО ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Если говорить конкретно о показателях надежности машин, эксплуатируемых в сельском хозяйстве, то закон распределения Вейбулла применяется в случаях:

- определение характеристик рассеивания ресурсов и сроков службы отдельных деталей и подвижных соединений;
- определение характеристик рассеивания эксплуатационных отказов;
- определение характеристик рассеивания доремонтных и межремонтных ресурсов и сроков службы тех узлов и соединений, ресурсные отказы которых обуславливаются выходом из строя одной и той же детали или соединения.

Более того, область применения закона Вейбулла охватывает также и все те случаи, когда применяется экспоненциальный закон ($V = 1,0; v = 1,0$) и закон Релея ($V = 0,523; v = 2,0$), которые в свою очередь являются частными случаями закона Вейбулла.

Отличительной особенностью закона Вейбулла является правосторонняя асимметрия дифференциальной функции. Дифференциальную функцию или функцию плотности вероятности $f(t)$ определяют по уравнению

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}$$

где a и b – параметры распределения Вейбулла; e – основание натурального логарифма; t – показатель надёжности.

Для определения дифференциальной функции через центрированную нормированную функцию используют таблицу 5 приложения и уравнение

$$f(t) = \frac{A}{a} f\left[\frac{t_{ic} - t_{cm}}{a}\right]$$

где A – величина интервала статистического ряда; a – значение параметра распределения Вейбулла;

t_{ic} – середина i – того интервала статистического ряда, t_{cm} – величина смещения.

Интегральную функцию или функцию распределения закона Вейбулла $F(t)$ определяют по таблице 6 приложения. При этом используют уравнение

$$F(t) = F\left[\frac{t_{ik} - t_{cm}}{a}\right]$$

где t_{ik} – значение конца i - того интервала статистического ряда.

Построение дифференциальной и интегральной кривых производится по той же методике и в том же масштабе, что и опытное распределение. Совмещение

опытного и теоретического распределений в одном масштабе позволяет в первом приближении, чисто визуально судить о степени их совпадения или согласия.

Однако пользоваться данными уравнениями не представляется возможным поскольку в них присутствует неизвестный параметр Вейбулла a .

Чтобы на практике пользоваться законом распределения Вейбулла при оценке показателей надежности, необходимо определить параметры a и b на основании имеющейся опытной информации. Существует три метода определения параметров Вейбулла: метод максимального правдоподобия, графический метод и метод моментов.

Наиболее точным является метод максимального правдоподобия, при котором параметр b определяется из уравнения:

$$\frac{N}{b} + \sum_1^N l_n t_i = \frac{N \sum_1^N t_i^b l_n t_i}{\sum_1^N t_i^b}$$

Определяется параметр « b » путем последовательного подбора его различных значений в диапазоне от 1,0 до 3,5, добиваясь при этом вышеприведенного равенства.

При известной величине параметра b параметр a определяется из уравнения:

$$a = \sqrt[b]{\frac{\sum_1^N t_i^b}{N}}$$

Безусловно данный метод сочетает в себе высокую точность с высокой трудоёмкостью. Поэтому в практике инженерных расчётов используется весьма ограниченно.

Однако значительно проще в этом плане выглядит графический метод. Суть его заключается в том, что левую и правую части вышеприведенного равенства приравнивают к y_1 и y_2 . При этом допускается упрощение

$$y_1 = \frac{N}{b} + \sum_1^n l_n t_{ci} m_i$$

$$y_2 = \frac{N \sum_1^n t_{ci}^b \ln t_{ci} m_i}{\sum_1^n t_{ci}^b m_i},$$

где t_{ci} - значение середины i -го интервала статистического ряда,

m_i - опытная частота i -го интервала статистического ряда.

Далее задаемся значениями $b_1 = 2,0$; $b_2 = 2,5$; $b_3 = 3,0$; $b_4 = 3,5$. При каждом из этих значений находим соответственно y_1 и y_2 . Вычислив значения y_1 и y_2 , приступают к построению графика, по оси абсцисс которого откладывают значения b , а по оси ординат значения y_1 и y_2 . По полученным точкам строят соответственно кривые y_1 и y_2 . Проекция точки пересечения этих кривых на ось абсцисс будет являться искомым значением параметра « b » (см. рисунок 3. $b = 2,7$).

$b_1 = 2,0$	$y_1=9$	$y_2=4$
$b_2 = 2,5$	$y_1=7$	$y_2=6$
$b_3 = 3,0$	$y_1=5$	$y_2=8$
$b_4 = 3,5$	$y_1=3$	$y_2=10$

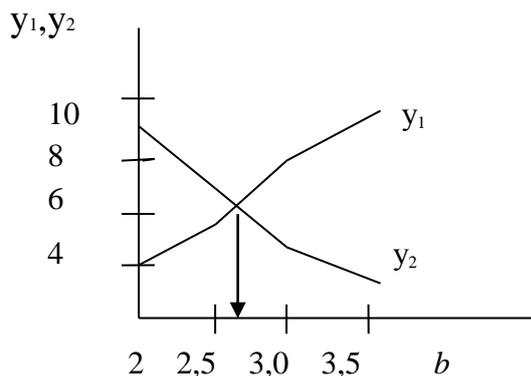


Рис. 3. Графический метод определения параметра Вейбулла « b ».

Данный метод, сочетая в себе умеренную трудоёмкость с достаточно высокой точностью довольно часто применяется в инженерных расчётах.

Наиболее простым и достаточно точным методом определения парамет-

ров Вейбулла является метод моментов.

Смысл этого метода заключается в следующем:

- по уравнениям

$$\bar{t} = \sum_1^n t_{ic} \cdot P_{опi}$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_1^n (t_{ic} - \bar{t})^2 \cdot P_{опi}}$$

в ходе первичной обработки опытной информации определяют среднее значение показателя надежности \bar{t} и среднее квадратическое отклонение σ ;

- по уравнению

$$V = \frac{\sigma}{(\bar{t} - t_{см})}$$

коэффициент вариации;

- по таблице 4 приложения по известной величине коэффициента вариации V определяется параметр b и вспомогательный коэффициент K_b ;

- параметр a определим из уравнения $\bar{t} = a K_b$, с учетом смещения

$$a = \frac{\bar{t} - t_{см}}{K_b}$$

Из опыта практических расчетов следует отметить, что оба последних метода определения параметров Вейбулла и характеристик рассеивания показателя надежности дают довольно близкие результаты. При этом величина расхождения не превышает уровня 5%. Хотя метод моментов безусловно проще и удобнее для практических расчетов.

Определив одним из трёх способов значения параметров a , b и пользуясь табулированными функциями $af(t)$ и $F(t)$, помещенными соответственно в таблицах 5 и 6 приложения, представляется возможным определить параметры теоретического закона распределения. Затем их помещают в табл. 2.

Таблица 2– Информация о теоретическом распределении показателя надёжности

Интервал, мото-ч.							
При законе нормального распределения							
$m_{опi}$							
$f(t)$							
$F(t)$							
m_{Ti}							
При законе распределения Вейбулла							
$m_{опi}$							
$f(t)$							
$F(t)$							
m_{Ti}							

8. ПРОВЕРКА СОВПАДЕНИЯ ОПЫТНОГО И ТЕОРИТИЧЕСКОГО ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ ПО КРИТЕРИЮ СОГЛАСИЯ, ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ И ИНТЕГРАЛЬНОЙ КРИВЫХ

8.1. КРИТЕРИИ СОГЛАСИЯ ОПЫТНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Исходными данными для выбора теоретического закона распределения показателей надёжности являются: область применения и величина коэффициента вариации. Однако доминирующим фактором является все-таки коэффициент вариации.

Графическое изображение в одном масштабе опытной и теоретической информации (построение кривых) позволяет лишь в первом приближении

судить о степени их совпадения или же, как принято говорить, о степени согласия. Однако существует ряд случаев, когда необходима более точная и объективная оценка совпадения опытных и теоретических данных. Такой способ существует и оценка в данном случае производится по так называемым «критериям согласия». Такая проверка является необходимой, когда величина коэффициента вариации находится в интервале от 0,3 до 0,5, вследствие чего довольно трудно отдать предпочтение тому или иному закону.

Смысл проверки «согласия» заключается в определении степени расхождения опытной и теоретической вероятностей. При этом в качестве меры совпадения или расхождения могут быть выбраны различные критерии согласия: сумма квадратов отклонения теоретических вероятностей от опытных, наибольшее или суммарное отклонение кривой накопленных опытных вероятностей от интегральной кривой теоретического закона распределения и т.д.

Критерий согласия как и любой другой показатель надежности является случайной величиной, а, следовательно, подчиняется в свою очередь определенному закону распределения. Поэтому по величине критерия согласия в каждом конкретном случае можно определить вероятность совпадения опытных и теоретических функций и на этом основании принять или же наоборот отбросить выбранный теоретический закон распределения показателя надежности.

При этом следует иметь в виду, что как бы ни велика была вероятность совпадения, она свидетельствует только о том, что выбранный закон не противоречит опытным данным, но ни в коем случае не может явиться гарантией того, что этот закон в данном случае лучше, чем какой либо другой выравнивает опытную информацию.

В связи с этим наиболее удачно используются критерии согласия в тех случаях, когда необходимо выбрать один теоретический закон распределения из двух или нескольких. В данном случае предпочтение отдается тому закону, совпадение которого с опытной информацией характеризуется наименьшей величиной расхождения.

В теории вероятностей известно несколько критериев согласия, но применительно к показателям надежности тракторов и сельскохозяйственных машин чаще используют или критерий Пирсона или критерий Колмогорова.

Критерий Пирсона χ^2 определяется как сумма квадратов отклонения опытных и теоретических частот в каждом интервале статистического ряда информации:

$$\chi^2 = \sum_1^n \frac{(m_{опi} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}}$$

где n - число интервалов в статистическом ряду;

$m_{опi}$ - опытная частота (количество случаев) в i -ом интервале статистического ряда;

m_{Ti} - теоретическая частота в i -ом интервале.

Однако на данный момент обработки опытной информации остаётся неизвестной теоретическая частота в i -том интервале статистического ряда, которая вычисляется по следующей формуле

$$m_{Ti} = N[F(t_{i+1}) - F(t_i)],$$

где N - общее количество испытываемых машин или повторность информации.

$F(t_{i+1})$ и $F(t_i)$ - интегральные функции $i+1$ и i -го интервала укрупненного статистического ряда.

С целью облегчения определения критерия согласия χ^2 строится укрупненный ряд информации, но при условии

$$m_i \geq 5 \text{ и } n \geq 4$$

Иными словами при построении этого ряда допускается объединение тех интервалов, в которых опытная частота $m_i < 5$. С целью уменьшения количества арифметических вычислений не рекомендуется увеличивать число интервалов n больше 7.

После выбора количества интервалов укрупненного статистического ряда необходимо заполнить таблицу 3.

Отдав предпочтение (предварительное) одному из них, вычисляют критерий λ^2 для каждого. Наиболее приемлемым в итоге окажется тот закон распределения, совпадение которого с опытным распределением будет характеризоваться наименьшим значением расхождения, т.е. у которого критерий Пирсона χ^2 меньше. Рассчитав таким образом значения критерия согласия Пирсона χ^2 для ЗНР и ЗРВ, по таблице 7 приложения, определяют вероятность совпадения опытных и теоретических данных P , выраженную в процентах. Для входа в таблицу необходимо определить число «степеней свободы» r по формуле

$$r = n_y - K,$$

где n_y – число интервалов в укрупнённом статистическом ряду; K – число обязательных связей. Для ЗНР и ЗРВ число обязательных связей $K=3$: две связи это два параметра распределения, а третья связь – $\sum P_i = 1,0$. Число степеней свободы указывает на номер строки таблицы 7 по которой ищут вероятность совпадения. Сама вероятность совпадения P определяется по заглавной строке.

Таблица 3 – Информация об интервалах укрупненного статистического ряда

Интервал, тыс. мото-ч.	До 2,5	2,5 ÷ 3,5	3,5 ÷ 4,5	Свыше 4,5
$m_{опi}$				
При законе нормального распределения				
$F(t)$				
m_{Ti}				
При законе распределения Вейбулла				
$F(t)$				
m_{Ti}				

Вероятность совпадения является критический при $P=10\%$, то есть если $P < 0,1$, т.е. менее 10% , то данный теоретический закон распределения следует считать недействительным. Из двух ТЗР выбирают тот, который обеспечивает большее совпадение опытных и теоретических данных.

8.2. ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ И ИНТЕГРАЛЬНОЙ КРИВЫХ

Для того закона распределения, которому отдано предпочтение, строятся графики дифференциальной и интегральной функций. При этом дифференциальная кривая заменяет собой полигон распределения, а интегральная - кривую накопленных опытных вероятностей. Построение производится в том же масштабе, что и опытное распределение показателя надёжности. При построении дифференциальной и интегральной кривых по оси абсцисс берутся значения интервалов статистического ряда, а по оси ординат - значения $f(t)$ или $F(t)$ соответственно. Точки на графике дифференциальной функции находят на пересечении абсцисс, равных серединам интервалов статистического ряда, и ординат, равных $f(t)$, а на графике интегральной функции - на пересечении абсцисс, равных концам интервалов статистического ряда, и ординат, равных $F(t)$.

8.3. КРИТЕРИИ КОЛМОГорова

Вышеописанный способ определения критерия согласия довольно трудоемок и не всегда им удобно пользоваться, хотя он обеспечивает достаточно высокую точность. Оценку совпадения гораздо проще производить по критерию Колмогорова. В этом случае в качестве меры совпадения выбрана наибольшая разность B между статистической и теоретической интегральными функциями распределения:

$$B_{max} = \sum_1^t P - F(t),$$

где $\sum_1^t P$ и $F(t)$ - соответственно сумма накопленных опытных вероятностей и интегральная функция теоретического закона распределения при таком значении показателя надежности t , при котором $B = max$.

Для учета повторности информации критерий согласия Колмогорова определяется по уравнению:

$$\lambda = B_{max} \cdot \sqrt{N},$$

где N – повторность информации

Вероятность совпадения опытных и теоретических данных определяется законом распределения критерия согласия λ , приведенном в таблице 15 приложения. Именно по величин λ находим по таблице в процентном выражении степень совпадения опытных и теоретических данных.

Необходимо иметь в виду, что критерий Колмогорова следует применять только в тех случаях, когда известен заранее не только теоретический закон распределения, но и значения его параметров. При определении показателей надежности тракторов и сельскохозяйственных машин подобный случай практически исключается, потому что параметры распределения определяются на основании опытной информации.

В связи с этим для оценки опытных и теоретических значений показателей надежности следует использовать критерий χ^2 Пирсона. Критерий Колмогорова дает ко всему еще и значительно завышенную по своей величине вероятность совпадения. Это обстоятельство в значительной мере усугубляется еще и тем, что многие инженеры-испытатели сельскохозяйственных машин, да и не только сельскохозяйственных критерием Колмогорова из-за простоты его определения, хотя этого делать не следует.

9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ГРАНИЦ РАССЕЙВАНИЯ ОДИНОЧНОГО И СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ А ТАКЖЕ НАИБОЛЬШИХ ВОЗМОЖНЫХ АБСОЛЮТНОЙ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ.

9.1. ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ГРАНИЦЫ РАССЕЙВАНИЯ ОДИНОЧНОГО И СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ

В результате обработки опытной информации определяются количественные характеристики показателей надежности (среднее значение \bar{t} , среднее квадратическое отклонение σ , коэффициент вариации V и др.).

Все это делается с той единственной целью, чтобы в дальнейшем значения этих характеристик перенести на другие совокупности машин, работающих в различных условиях эксплуатации. Безусловно, изменение количества машин в совокупности и условий их эксплуатации вызовет изменение количественных характеристик показателя надежности. И хотя эти изменения носят, безусловно, случайный характер, они происходят, безусловно, в определенных границах или же в определенном интервале. Величина данного интервала зависит от целого ряда факторов, в том числе и от количества машин в совокупности.

Так вот определение этих границ рассеивания характеристик показателей надежности, а следовательно, и определение возможной ошибки переноса этих характеристик из одних условий в другие является одной из основных задач теории надежности.

Если было бы проведено наблюдение за N машинами и на этой основе определено среднее значение показателя надежности \bar{t} , то как было сказано выше у одиночной конкретной машины показатель надежности может отличаться от \bar{t} на величину $\pm 3\sigma$ при ЗНР и на величину от $0,1a$ до $2,5a$ при законе распределения Вейбулла.

Безусловно, эти границы рассеивания одиночного значения показателя надежности не охватывают все 100% машин совокупности.

Так, например, для ЗНР площадь под дифференциальной кривой (площадь охвата), ограниченная протяженностью оси абсцисс $\pm 3\sigma$, составляет 0,997 или 99,7%. Иными словами, при таких границах рассеивания ($\pm 3\sigma$) в 997 случаях из 1000 значение одиночного показателя надежности будет находиться в интервале значений от $\bar{t} - 3\sigma$ до $\bar{t} + 3\sigma$, и только в трех случаях из 1000 (0,3%) значение одиночного показателя надежности может выйти за эти границы. Безусловно, такая высокая степень доверия расчета, охватывающего 99,7% всех возможных вариантов, является излишней и в этом просто нет необходимости тем более при определении показателя надежности тракторов и сельскохозяйственных машин. Задаваясь заранее меньшими значениями площади охвата α , мы соответственно сблизим границы рассеивания одиночного показателя надежности и тем самым уменьшим погрешность расчета, хотя и за счет снижения степени доверия.

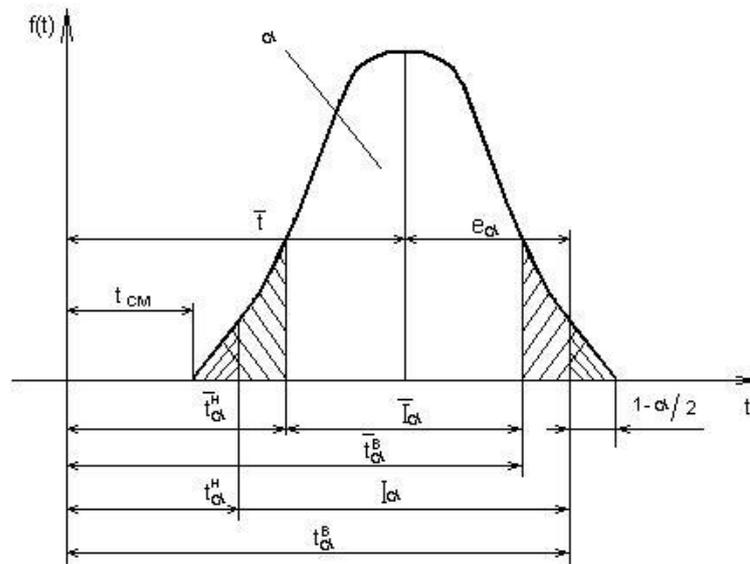


Рисунок 3 – Зависимость между величиной доверительной α , возможной максимальной ошибкой e_α , доверительными границами рассеивания одиночного (t_α^H и t_α^B), среднего значения (\bar{t}_α^H и \bar{t}_α^B) показателя надёжности и доверительного интервала I_α для ЗНР.

Между площадью α и соответствующим этой площади интервалом рассеивания существует функциональная связь, отражаемая следующим уравнением:

$$F_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Данная функция табулирована в таблице 2 приложения.

Например, если задаться $\alpha = 0,80$ или любым другим, то при нормальном (симметричном) распределении справа от среднего значения \bar{t} разместится $\frac{1}{2}$ площади или 0,40. Следовательно в таблице 3 приложения для центрированной и нормированной функции F_0 необходимо найти ее значение, равное $0,5 + 0,4 = 0,9$. Найдя это значение $F_0(t) = 0,9$, определим количество t средних квадратических отклонений ($t = 1,28$), которое необходимо отложить вправо и влево от среднего значения \bar{t} ($\pm 1,28\sigma$) для того, чтобы ограничить интервал рассеивания значений одиночного показателя надежности при заданной площади $\alpha = 0,80$.

Таким образом, площадь α равна в долях 1 или в % количеству одиночных значений показателей надежности (или количеству машин), числовые значения которых укладываются в граница соответствующего этой площади интервала.

Иными словами **ДОВЕРИТЕЛЬНАЯ ВЕРОЯТНОСТЬ** α это выбранная заранее площадь охвата (α) характеризующая степень доверия расчета и гарантирующая вероятность попадания показателя надежности в соответствующий интервал его значений. В свою очередь **ДОВЕРИТЕЛЬНЫМ ИНТЕРВАЛОМ** I_α называется интервал, в который при заданной доверительной вероятности α попадают 100α % случаев от N .

Доверительный интервал должен быть четко обозначен границами. Границы, в которых может колебаться значение одиночного показателя надежности при заданной α , называются нижней доверительной границей t_α^H и верхней t_α^B .

Следует иметь в виду, что при определении коэффициента t (количество σ) пользоваться интегральным законом распределения и соответственно данными таблицы 3 приложения можно только в случае, когда повторность информации $N > 25$, вследствие чего есть уверенность, что опытное значение σ незначительно отличается от действительного.

В том случае, если повторность информации $N < 25$ следует пользоваться законом распределения Стьюдента и коэффициентом t_α , который табулирован в таблице 8 приложения.

Данным коэффициентом можно пользоваться и при $N > 25$, и делается это в основном для повышения точности расчета. Пользуясь рисунком, можно довольно легко вывести расчетные уравнения для определения доверительного интервала I_α , доверительных границ рассеивания t_α^H и t_α^B и абсолютной ошибки e_α для одиночного значения показателя надежности:

$$e_\alpha = t_\alpha \sigma$$

где t_α – коэффициент Стьюдента, определяемый по значению доверительной вероятности α и объему выборки N из таблицы 8 приложения.

Нижнюю и верхнюю доверительные границы рассеивания при ЗНР рассчитывают соответственно по формулам

$$t_\alpha^H = \bar{t} - t_\alpha \sigma;$$

$$t_\alpha^B = \bar{t} + t_\alpha \sigma;$$

Как отмечалось выше, доверительный интервал I_α это интервал, в который при заданной доверительной вероятности α попадает 100 α % от N показателей надежности. Его определяют по формуле

$$I_\alpha = t_\alpha^B - t_\alpha^H$$

При решении практических задач чаще приходится определять доверительные границы рассеивания среднего значения показателя надежности. Расчетная схема и физический смысл доверительных границ среднего значения показателя надёжности те же, что и для одиночного (см. рис.3). Разница заключается в значении среднего квадратического отклонения. Все дело в том, что если представить, что было проведено « n » испытаний совокупностей, состоящих из N машин каждая, и в каждом конкретном случае определялись средние

значения показателей надежности \bar{t} , то безусловно, что все они будут отличаться друг от друга по величине, причем рассеиваясь вокруг истинного, но неизвестного нам, математического ожидания. Причем величина рассеивания средних значений \bar{t} , естественно, будет тем больше, чем меньше количество машин N участвовало при каждом испытании. Как показывает практика даже при самых малых значениях N среднее квадратическое отклонение этих средних значений $\sigma_{\bar{t}}$ будет меньше среднего квадратического отклонения одиночного показателя надежности σ . Связь между $\sigma_{\bar{t}}$ и σ установлена в теории вероятностей

$$\sigma_{\bar{t}} = \sigma/\sqrt{N}$$

Таким образом по аналогии с предыдущими и с учетом последней зависимости можно вывести расчётные уравнения для определения абсолютной ошибки рассеивания среднего значения показателя надежности при ЗНР и заданной доверительной вероятности α :

$$e_{\alpha} = t_{\alpha}\sigma/\sqrt{N}$$

Нижняя и верхняя доверительные границы:

$$\bar{t}_{\alpha}^H = \bar{t} - t_{\alpha}\sigma/\sqrt{N};$$

$$\bar{t}_{\alpha}^B = \bar{t} + t_{\alpha}\sigma/\sqrt{N};$$

Доверительный интервал \bar{I}_{α} :

$$\bar{I}_{\alpha} = \bar{t}_{\alpha}^B - \bar{t}_{\alpha}^H$$

В том случае, если в ходе обработки информации предпочтение отдано закону распределения Вейбулла, то расчётная схема остаётся та же (рис. 3), что и для ЗНР. Нижнюю и верхнюю доверительные границы рассеивания одиночного значения показателя надёжности определяют соответственно по уравнениям

$$t_{\alpha}^H = H_K^B \left(\frac{1-\alpha}{2} \right) a + t_{CM};$$

$$t_{\alpha}^B = H_K^B \left(\frac{1+\alpha}{2} \right) a + t_{CM}$$

где H_k^B – квантиль ЗРВ, определяемый по таблице 9 приложения по параметру b и величинам $(1 - \alpha)/2$ и $(1 + \alpha)/2$.

Нижнюю и верхнюю доверительные границы рассеивания среднего значения показателя надёжности:

$$\bar{t}_\alpha^H = (\bar{t} - t_{cm})^b \sqrt[r_3]{} + t_{cm}$$

$$\bar{t}_\alpha^B = (\bar{t} - t_{cm})^b \sqrt[r_1]{} + t_{cm}$$

где r_1 и r_3 – коэффициенты распределения Вейбулла, которые определяют по таблице 8 приложения в зависимости от заданной доверительной вероятности α и объема выборки N .

Отличительной особенностью закона распределения Вейбулла является то, что доверительные границы рассеивания, в отличие от закона нормального распределения, асимметричны среднему значению показателя надёжности.

9.2. АБСОЛЮТНАЯ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПРЕДЕЛЬНЫЕ ОШИБКИ

Довольно часто при расчетах характеристик показателя надёжности и переносе их на другие совокупности машин возникает необходимость оценить возможную наибольшую (предельную) ошибку такого переноса.

Как уже говорилось ранее доверительный интервал перекрывает истинное среднее значение (математическое ожидание) показателя надёжности с доверительной вероятностью α . Из рисунка 3 следует, что наибольшая абсолютная ошибка переноса опытных характеристик показателя надёжности при заданной доверительной вероятности α будет равна значению e_α в обе стороны от среднего значения показателя надёжности \bar{t} . Поэтому наибольшая возможная ошибка переноса опытных характеристик показателя надёжности при заданной доверительной вероятности α будет ни что иное как доверительный интервал рассеивания среднего значения показателя надёжности, который определяется из следующего уравнения

$$\bar{J}_\alpha = \bar{t}_\alpha^B - \bar{t}_\alpha^H$$

Однако для большей наглядности удобнее оперировать относительной предельной ошибкой δ_0 , выраженной в процентах от среднего значения показателя надежности \bar{t} , которая независимо от выбранного закона распределения определяется из уравнения

$$\delta_0 = 100 \frac{\bar{t}_\alpha^B - \bar{t}}{\bar{t} - t_{\text{см}}}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА НАБЛЮДАЕМЫХ МАШИН ПРИ ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ

Точность определения показателя надежности и величина возможной ошибки при переносе результатов испытания из одной совокупности машин на другую зависит при прочих равных условиях от повторности исходной информации или другими словами от числа испытываемых машин. Как уже говорилось ранее с увеличением количества испытываемых машин N абсолютная ошибка e_α уменьшается, а доверительные границы сближаются.

Испытания любой сельскохозяйственной машины на надежность требуют не только длительного времени, но и значительных материальных и трудовых затрат. Более того не всегда при решении инженерных задач требуется высокая точность результатов расчета показателей надежности.

Поэтому в каждом конкретном случае прежде чем приступить к испытанию машин и определить количество одновременно испытываемой или наблюдаемой техники, необходимо уяснить, для каких конечных целей определяются показатели надежности, и уже на основании этого задаться величинами доверительной вероятности α , а следовательно и возможной относительной ошибки δ_0 .

Из опыта известно, что при испытании машин в условиях сельскохозяйственного производства на надежность в большинстве случаев в зависимости от конечной цели наблюдения значение доверительной вероятности выбирается в

интервале от $\alpha = 0,80$ до $\alpha = 0,95$, а величина относительной ошибки – в интервале от 10 до 20%.

Еще одним критерием, определяющим количество машин при испытании или повторность информации определяется в соответствии с принятым законом распределения показателя надежности.

Так, например, при законе нормального распределения абсолютная ошибка для среднего значения показателя надёжности вычисляется как

$$e_{\alpha} = t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}.$$

Если обе части этого уравнения разделить на среднее значение показателя надежности \bar{t} , то получим

$$\frac{e_{\alpha}}{\bar{t}} = t_{\alpha} \frac{\sigma}{\bar{t}\sqrt{N}} \quad \text{или} \quad \delta_0 = \frac{t_{\alpha}V}{\sqrt{N}}$$

тогда окончательно получим $\frac{\delta_0}{V} = \frac{t_{\alpha}}{\sqrt{N}}$.

Из данного уравнения, задаваясь значениями доверительной вероятности α и относительной ошибки δ_0 и определив из таблицы 8 приложения значение t_{α} , можно путем последовательного подбора определить количество машин для испытания N . Однако этот метод не всегда приемлем и отличается относительной сложностью.

Для упрощения в таблице 12 приложения помещены значения $\frac{t_{\alpha}}{\sqrt{N}}$ для различных N при трех наиболее распространенных значениях α (0,80; 0,90; 0,95). Таким образом, для определения повторности информации или числа машин N необходимо задаться величиной допускаемой относительной ошибки δ_0 и для известной величины коэффициента вариации V определить значение $\frac{t_{\alpha}}{\sqrt{N}}$. После этого по таблице 12 приложения найти искомую повторность информации N .

Аналогичным образом поступают при определении количества машин N

в случае распределения Вейбулла, пользуясь при этом уравнением:

$$(\delta_0 + 1)^b = \frac{2N}{x_{(1-\alpha; 2N)}^2}$$

После соответствующего пересчета составлена таблица 12 приложения , в которой приведены количества машин N при различных значениях коэффициента q , где

$$q = \frac{2N}{x_{(1-\alpha; 2N)}^2}$$

Поскольку правые части вышеприведенных уравнений равны, то будут равны и левые, т.е

$$q = (\delta_0 + 1)^b$$

При планировании наблюдений следует задаваться как можно большим значением коэффициента вариации, поскольку в конечном итоге это приведёт к увеличению количества испытываемых объектов. Если в ходе испытаний он окажется несколько меньше, то это приведёт только к повышению точности расчёта. Если же наоборот, то потребуются необходимость в проведении дополнительных испытаний.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПЛАНАХ ИСПЫТАНИЯ МАШИН И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

С 1973 года введены в действие во всех отраслях народного хозяйства ГОСТы по методам определения показателей надежности и планированию наблюдений. Эти ГОСТы предусматривают различные варианты или планы проведения наблюдений за машинами и применительно к каждому плану даны методы определения основных характеристик показателя надежности. На наиболее популярных мы остановимся.

Наиболее распространенным при определении показателей надежности

тракторов и сельскохозяйственных машин является план испытания или наблюдения, при котором испытание каждой машины из общей совокупности N длилось до появления одного ресурсного отказа, после чего испытание этой машины прекращалось.

Ярким примером такого типа наблюдения является определение доремонтного или межремонтного ресурса машин и их элементов, определение затрат времени, труда и денежных средств на ТО и ремонт, определение показателей ремонтпригодности.

Такой план наблюдений обозначается (N, U, N) – N машин (элементов) поставлено под наблюдение, наблюдения ведутся до возникновения отказов или предельного состояния у всех машин, причем отказавшие машины новыми или отремонтированными не заменяются (на это указывает символ U).

Помимо рассмотренного ГОСТом предусмотрены следующие планы наблюдений (испытаний):

(N, U, T) - под наблюдением находится N изделий, наблюдения ведутся в течение T наработки, U отказавшие изделия замене не подлежат.

(N, U, r) - под наблюдением находится N изделий, наблюдения ведутся до возникновения r отказов или предельных состояний, U отказавшие изделия не заменяются.

(N, R, T) - под наблюдением находится N изделий, наблюдения ведутся в течение наработки T , R отказавшие изделия заменяются новыми или ремонтируются и снова участвуют в испытании.

(N, R, r) - под наблюдением находится N изделий, наблюдения ведутся до возникновения r отказов или предельных состояний, R отказавшие изделия заменяются новыми или ремонтируются и снова участвуют в испытаниях.

Если говорить конкретно об испытаниях тракторов и сельскохозяйственных машин на надежность, то помимо плана (N, U, N) применяются планы $(N,$

R, T) и (N, U, T).

План (N, R, T) используется при определении показателей безотказности машин и их элементов.

План (N, U, T) применяется для определения доремонтных и межремонтных ресурсов тракторов и сельскохозяйственных машин в тех случаях, когда ограничивается длительность испытания T , вследствие чего за время испытаний до предельного состояния дорабатывает только часть машин. Однако он позволяет с минимальной подлинностью определить абсолютные характеристики рассеивания для полной совокупности машин, т.е. будто бы испытания не ограничивались.

Этот же план испытаний используется при определении ресурса долговечных деталей и соединений. На практике такой план испытаний получил название «усеченная выборка».

При различных планах наблюдений абсолютные и относительные характеристики рассеивания показателя надежности могут быть вычислены по специальным уравнениям, относящимся только к этому плану испытаний.

Так, например, при плане наблюдений (N, U, T) в случае, если распределение подчинено ЗНР, абсолютные характеристики рассеивания: среднее значение \bar{t} и среднее квадратическое отклонение σ показателя надежности (доремонтного ресурса или ресурса машины или ее агрегата) могут быть определены по следующим уравнениям:

$$\bar{t} = K \cdot \sigma + T;$$

$$\sigma = \frac{T - \frac{1}{N_o} \sum_1^{N_o} t_i}{\frac{N - N_o}{N_o} f(K) - K}$$

где T - установленная наработка до конца наблюдения;

t_i - наработка i -й машины до отказа или до предельного состояния;

N_o - число машин, отказавших за наработку T .

Как видно в выше приведенных формулах присутствуют два неизвестных: коэффициент K и его функция $f(K)$. Оба они определяются из уравнения:

$$\frac{\frac{1}{N_o} \sum_1^{N_o} t_i^2 - \left(\frac{1}{N_o} \sum_1^{N_o} t_i \right)^2}{\left(T - \frac{1}{N_o} \sum_1^{N_o} t_i \right)^2} = \frac{1 + \frac{N-N_o}{N_o} K f(K) - \left(\frac{N-N_o}{N_o} \right)^2 f^2(K)}{\left[\frac{N-N_o}{N_o} f(K) - K \right]^2} = 0$$

Значения коэффициента K и его функции $f(K)$ приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Значения коэффициента K и его функции $f(K)$.

K	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
$f(K)$	1,0	0,93	0,87	0,79	0,76	0,73	0,67	0,62	0,56	0,51

Задача в подобных случаях должна быть сформулирована следующим образом: Определить средний доремонтный ресурс двигателя $\bar{t}_{др}$ и среднее квадратическое отклонение σ для усеченной информации, ограничив наработку до конца наблюдений $T = 5000$ мото-ч.

Далее в подобном случае, посмотрев на статистический ряд информации по доремонтным ресурсам, который представляет собой следующее:

Таблица 5 - Статистический ряд информации по доремонтным ресурсам

Интервал, тыс. мото-ч.	1,0-2,0	2,0-3,0	3,0-4,0	4,0-5,0	5,0-6,0	6,0-7,0	7,0-8,0
Частота, m_{oni}	2	4	8	12	8	4	2
Опытная ве- роятность, P_{oni}	0,05	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,05
$\sum_1^n P_{oni}$	0,05	0,15	0,35	0,65	0,85	0,95	1,0

Будем иметь следующую усеченную информацию по доремонтным ресурсам:

Таблица 6 – Усечённая информация по доремонтным ресурсам.

Интервал, тыс. мото-ч.	1,0 – 2,0	2,0 – 3,0	3,0 – 4,0	4,0 – 5,0
Частота, m_i $N = 40$ и $N_o = 26$	2	4	8	12

Иными словами последние интервалы отбрасывается и практически никакого участия в расчетах не принимают. Следует отметить, что не существует никакого правила, которое ограничивало бы момент начала или конца наблюдений. Все дело в конечном итоге выльется в величину погрешности, на чем мы остановимся ниже. Данный план испытаний более выгодно отличается от других с экономической точки зрения, а также условий проведения (сеялка работает 1 месяц, что ее несколько лет испытывать).

Решив уравнение относительно K и $f(K)$ и пользуясь данными таблицы 4, методом последовательных подстановок определяют K и $f(K)$, затем, подставив их численные значения, получают среднее значение \bar{t} и среднее квадратическое отклонение σ .

Из практики расчетов известно, что погрешность при таком методе обработки усеченной информации, когда N_o составляет $\approx 50\%$ от N не превышает 4%.

Однако при расчетах показателей надежности по усеченной информации следует помнить, что точность такого расчета тем выше, чем ближе по своим значениям находятся N_o и N . Следует помнить, что удовлетворительные результаты такой метод определения абсолютных характеристик рассеивания показателя надежности дает в том случае, если $N_o \geq 0,5N$.

Все вышесказанное относится к тому случаю, если выбор пал на ЗНР.

В случае применения закона распределения Вейбулла при усеченном плане наблюдений (N, U, T) параметр Вейбулла « b » определятся по уравнению:

$$\left(\frac{N_o}{B} + \sum_1^{N_o} \ell_n t_i \right) \left[\sum_1^{N_o} t_i^b + (N - N_o) T^b \right] - N_o \left[\sum_1^{N_o} t_i^b \ell_n t_i + (N - N_o) T^b \ell_n T \right] = 0$$

Данное уравнение решается методом последовательных подстановок или графическим методом ($b = 2,0 \div 3,5$), так, как это делалось ранее. Недостающий параметр « a » определяется из уравнения:

$$a = \sqrt[b]{\frac{\sum_1^{N_o} t_i^b + (N - N_o)T^b}{N_o}},$$

где a, b - параметры Вейбулла;

T - наработка до конца наблюдения;

t_i - наработка i -й машины до отказа или до предельного состояния;

N_o - число отказов или отказавших машин за наработку T .

Определив параметры Вейбулла, определение абсолютных и относительных характеристик рассеивания показателя надежности производят по уравнениям:

$$\bar{t} = a K_b + t_{cm}$$

$$\sigma = a C_b,$$

используя данные таблицы 4 приложения.

СИСТЕМА СБОРА ПЕРВИЧНОЙ ОПЫТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Исходная информация о надежности машин должна обеспечивать определение ее уровня и оценку числовыми показателями. Информация о надежности машин и их элементов может быть получена на основе испытаний по специальным методикам, рассмотренным выше, в результате наблюдений за работой машин в эксплуатации и анализа их технического состояния при проведении технического обслуживания и ремонта. Наиболее ценными и доступными для практических работников сельского хозяйства являются эксплуатационные наблюдения и анализ технического состояния элементов машин при проведении обслуживания и ремонта.

Система сбора информации представляет собой совокупность организационно-технических мероприятий по получению необходимых и достоверных сведений о надежности. Документы по сбору информации стандартизированы. Предусмотрены первичные формы учета эксплуатационной информации и формы-накопители.

Первые (т.е. первичные) предназначены для записи несистематизированной информации: разовые документы об отказе – карточка отказов и карточка на ремонт для устранения последствий отказа; журнал учета наработок и отказов.

Следует иметь в виду, что под наблюдение берут тракторы с наработкой не более 200 моточасов и сельскохозяйственные машины с наработкой не более 10% от средней сезонной нормы в случае, если по ним известны все отказы с начала эксплуатации. Машины, один из агрегатов которых имел с начала эксплуатации отказ II гр. сложности, не исследуют.

Наблюдения ведут в течение срока, необходимого для достижения определенной наработки, обусловленной соответствующим планом испытаний, с постоянным или периодическим сбором сведений. Информацию по машинам, которые заняты более месяца в сезон, собирают не реже двух раз в месяц, а с сезонной продолжительностью работы меньше месяца – в начале, середине и конце каждого сезона.

При непрерывных наблюдениях ведется журнал учета наработок и отказов, в который записывают данные об отказах в порядке их возникновения.

При периодическом обследовании информацию собирают, опрашивая обслуживающий персонал (механизаторов, бригадиров, инженеров-механиков и др.) и выбирая данные из соответствующих документов хозяйств.

Документы-накопители предназначены для систематизированной по необходимому признаку информации и заполняются на основе первичных. Сведения о техническом состоянии элементов машин при выполнении технического обслуживания и ремонта собирают путем диагностирования и микрометража. Для этого выбирают машины, за которыми велись наблюдения или имеются другие достоверные источники об их наработке.

Коэффициент вариации при организации наблюдений можно выбирать исходя из вида разрушения и по типовым элементам, а также по справочным данным. Следует иметь в виду, что при организации наблюдений целесообразно выбирать большее значение коэффициента вариации. Если же в ходе испытаний он окажется несколько меньшим, то это приведет только к повышению точности оценки показателей, если же коэффициент вариации больше принятого, то появляется необходимость в дополнительных наблюдениях.

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Полученные в результате наблюдения данные о надежности определенного количества объектов представляют собой выборку из общей совокупности однотипных объектов и являются случайными величинами. Определение показателей надежности может быть выполнено двумя способами: параметрическим или непараметрическим.

Параметрическим – это значит по параметрам принятого теоретического закона распределения, которому соответствуют данные наблюдений.

Непараметрическим – при неизвестном законе распределения.

Непосредственно сразу назначить по данным наблюдений математическую модель закона распределения нельзя, существующие методы позволяют лишь подтвердить или не подтвердить соответствие данных наблюдений некоторому заранее принятому закону.

Наиболее простым, но и наименее точным является непараметрический метод. Формулы для оценки показателей надежности этим методом приведены в таблице 7.

Полные характеристики надежности наблюдаемых объектов определяют параметрическим методом. Для этого выбирают соответствующий закон распределения случайной величины, которому не противоречат данные выборки наблюдений, определяют оценки параметров закона распределения и по ним находят оценки показателей надежности.

Таблица 7 — Формулы для определения точечных оценок показателей надежности непараметрическим методом

План наблюдений	Средние значения показателей (ресурса, срока службы, наработки до отказа, времени восстановления) ^о	Гамма-процентные показатели (ресурс, срок службы, срок сохранности) ^о	Вероятность	
			безотказной работы	восстановления в заданное время
$(N; U; N)^{\circ}$	$\left(\sum_{i=1}^N t_i \right)^{\circ}$	$\max t_i$ при $[n(t_i) + 1]/N \leq 1 - r/100$	$[N - n(t)]/N^{\circ}$	$n(t)/N^{\circ}$
$(N; U; r)^{\square}$ $(N; U; T)^{\circ}$	$\left[\sum_{i=1}^r t_i + (N - r)t_r \right] / r^{\circ}$	$\max t_i$ при $[n(t_i) + 1]/N \leq 1 - r/100$	$[N - n(t)]/N^{\square}$ $t \leq t_r^{\circ}$	$n(t)/N^{\square}$ $t \leq t_r^{\circ}$

r — число отказов (предельных состояний) за время наблюдений;

$n(t)$ — число членов вариационного ряда, предшествующих значению t ;

t_r — значение показателя в вариационном ряду $t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq \dots \leq t_r$

Таблица 8—Формулы для определения точечных оценок показателей надежности параметрическим методом

Закон распределения показателя плотности	Средние показатели (ресурс, срок службы, наработка до отказа)	Гамма-процентные показатели (ресурс, срок службы, срок сохранности)	Вероятность	
			безотказной работы	восстановления в заданное время
Нормальный $f(t) = \left(\frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{\sigma}\right)^{-1} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}}$	\bar{t}	$0,5 - 0,5F_0[(t_r - \bar{t})\sigma^{-1}] = r/100$	$0,5 - 0,5F_0((t - \bar{t})\sigma^{-1})$	$0,5 + 0,5F_0[(t - \bar{t})\sigma^{-1}]$
Вейбулла $f(t) = \frac{(ba^{-1})}{[(t-c)a^{-1}]^{b-1}} x^\alpha$ $x = e^{-[(t-c)a^{-1}]^b}$	$a\Gamma(1 + b^{-1}) + c$	$a[-\ell_r(r/100)]^{1/b} + c$	$e^{-[(t-c)a^{-1}]^b}$	$1 - e^{-[(t-c)a^{-1}]^b}$

$$c = \bar{t} - a K_b$$

Формулы для определения точечных оценок показателей надежности для различных законов распределения приведены в таблице 8. Значения функции нормального распределения $f_0(x)$ и гамма-функции $\Gamma(x)$ в таблицах 2 и 11 приложения соответственно.

Для того, чтобы вычислить показатели надежности по формулам, приведенным в таблице 8, необходимо определить в первую очередь параметры принятых законов распределения по результатам наблюдений.

На практике определяют оценки параметров распределений чаще всего методом моментов и максимального правдоподобия. Метод параметров несколько проще в вычислениях, но он менее точен. Оценки максимального правдоподобия целесообразны при проведении расчетов с помощью вычислительной техники и данный метод может быть использован для обработки информации, полученной при любом плане наблюдений.

Вообще, как должна быть поставлена задача при непараметрическом способе, по 7-й таблице. Определить средний доремонтный ресурс лемеха плуга по результатам наблюдений за 30 лемехами по плану (N, U, T). Время наблюдений до наработки – 25 у.э.га. За это время произошло 17 отказов при следующих наработках, которые размещены в вариационный ряд в порядке возрастания: 6, 7, 8, 10; 10, ..., 25. Закон распределения ресурса лемеха неизвестен и не выдвигается никаких предположений о его виде.

Средний ресурс определяется непараметрическим методом по таблице 7, если γ -процентный ресурс, то следующая колонка. Конкретный способ решения задач см. практикум.

По 8-й таблице. Проводятся наблюдения по плану (N, U, N) за 23 коробками передач трактора МТЗ-80. Получены следующие наработки доресурсных отказов t_i в порядке возрастания: 4,8, 4,82, ..., 7,26 тыс. мото-ч.

Определить средний и 80% -ный ресурсы, считая, что ресурс распределен по нормальному закону.

Параметры нормального распределения вычисляют по формулам:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}$$

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}{N-1} \right]^{1/2},$$

а показатели долговечности КПП по параметрам нормального распределения по формулам в таблице 8. Конкретный способ решения задач см. практикум.

ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ НАДЕЖНОСТИ

Основным недостатком аналитических методов инженерных расчетов характеристик показателя надежности является их высокая трудоемкость.

Более простыми, доступными и достаточно точными являются графические методы обработки информации. Все дело в том, что кривая накопленных опытных вероятностей или дифференциальная кривая носит криволинейный характер. По внешнему виду этой кривой невозможно определить, какому закону подчиняется рассеивание показателя надежности, и тем более невозможно определить параметры этого закона.

Так вот функциональная сетка вероятностной бумаги составляется таким образом, чтобы нанесенная на эту бумагу интегральная функция закона распределения была представлена прямой линией. Такое «выпрямление» достигается при законе нормального распределения заменой координат интегральной функции $F(t)$ координатами $\sum P_i$; у,мм, закон изменения которых подобран таким образом, чтобы выпрямить функцию заданного закона распределения (значения функции на оси ординат наносятся пропорционально разности квантилей). При законе распределения Вейбулла интегральную кривую отказности выпрямляют в интегральную прямую посредством логарифмических осей ординат.

Графическими методами можно обрабатывать все виды информации: полную, усеченную и многократно усеченную.

С целью выбора закона распределения на сетку вероятностной бумаги наносят значения накопленных опытных вероятностей, взятых по концам интервалов статистического ряда. В том случае, если точки будут располагаться по прямой линии или близко к ней, это означает, что опытная информация соответствует выбранному закону распределения, а оценки параметров этого закона могут быть определены по вероятностной бумаге на основе опытных данных.

Вероятностная бумага изготавливается для любого закона распределения из обычной миллиметровой бумаги.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ БУМАГА ДЛЯ ЗАКОНА НОРМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

По оси абсцисс откладывают в обычном миллиметровом масштабе значения показателя надежности t , а по оси ординат – значения интегральной функции «отказности» $F(t)$.

За начальную точку отсчета по оси абсцисс принимается значение показателя надежности, близкое к началу зоны рассеивания, при отсутствии смещения $t_{см}$ – его нулевое значение.

Значение интегральной функции $F_o(t) = 0,01$ является началом оси ординат. Затем точки наносят через 0,01 до 0,10 и через 0,05 от 0,10 до 0,50. Верхняя половина оси ординат является зеркальным отображением нижней половины.

Расстояния точек друг от друга или от начала оси ординат пропорциональны разности квантилей этих точек. Квантилем называется величина показателя надежности (от 0 до t_i) при заданном значении $F(t_i)$ интегральной функции «отказности». Квантили нормального распределения – табличное значение. (Таблица 10 приложения).

Квантиль начальной точки $F_o(t) = 0,01$ равен $H_k = 2,326$. Если принять, что 1 мм на оси ординат соответствует 0,02 квантиля, то вторая точка $F_o(t) = 0,02$ ($H_k = 2,054$) будет находиться на расстоянии $(2,33 - 2,05) \cdot 50 = 14$ мм от начала

оси ординат; третья точка $F_o(t) = 0,03$ ($H_k = 1,88$) – на расстоянии $(2,33 - 1,88) \cdot 50 = 8,5$ мм от точки $F_o(t) = 0,02$ и т.д.

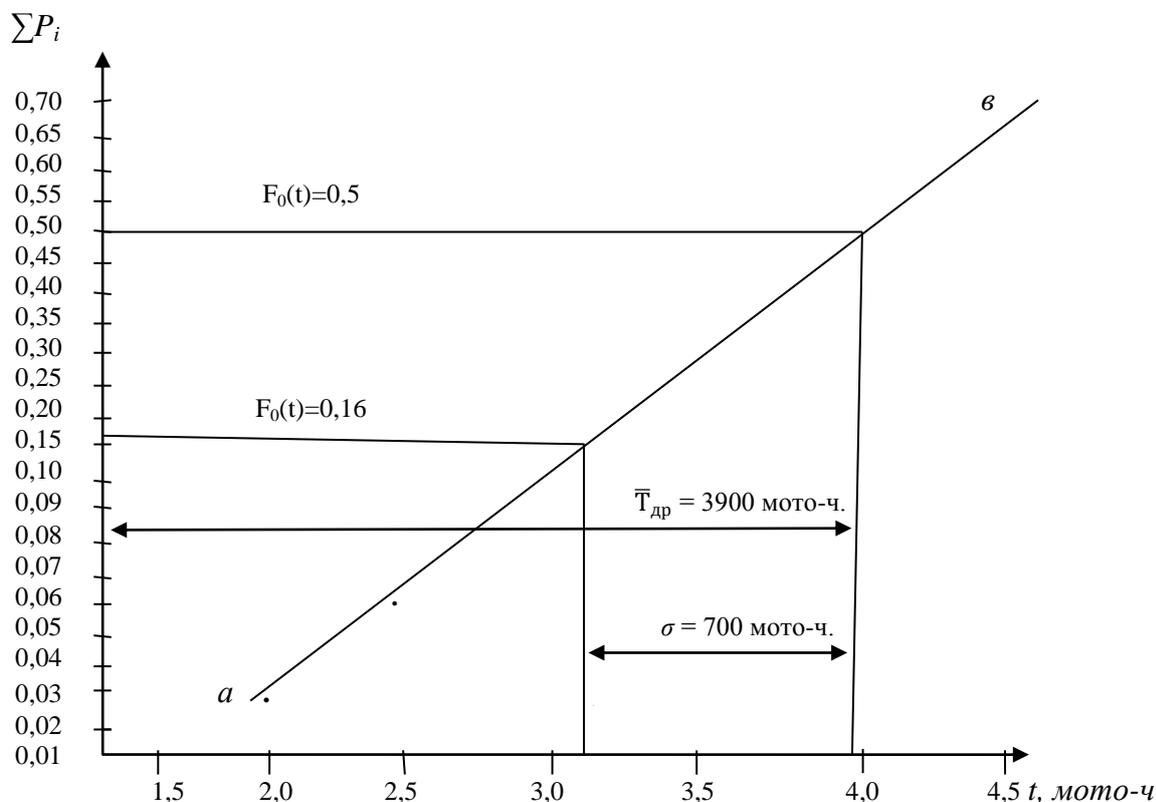


Рисунок 4. Вероятностная бумага для ЗНР.

Как отмечалось ранее, наибольшую трудоемкость представляют расчеты характеристик показателя надежности для «усеченной» информации или, другими словами, для плана наблюдений (N, U, T).

Произведем при помощи нормальной вероятностной бумаги определение характеристик рассеивания показателя надежности при условии длительности их испытания $T = 4500$ мото-ч, в течение которых ресурсные отказы были зарегистрированы у 40 двигателей ($N_o = 40$) из общего количества $N = 70$ шт.

С учетом того, что двигатель является сложным агрегатом трактора и его ресурсные отказы могут происходить вследствие различных причин, имеются все основания предполагать, что рассеивание доремонтных ресурсов двигателя подчинено закону нормального распределения.

Таблица 9 - Статистический ряд усеченной информации по доремонтным ресурсам

Интервал, тыс.мото-ч	1,5÷2,0	2,0÷2,5	2,5÷3,0	3,0÷3,5	3,5÷4,0	4,0÷4,5
Частота, m_{oni}	2	2	2	14	12	17
Опытная вероятность, p_{oni}	0,029	0,029	0,029	0,198	0,172	0,243
$\sum_1^i p_{oni}$	0,029	0,058	0,087	0,285	0,457	0,700

Для определения среднего значения доремонтного ресурса $\bar{T}_{др}$ и среднего квадратического отклонения σ наложим точки накопленной опытной вероятности на функциональную сетку вероятностной бумаги и проведем между точками прямую линию. Эта линия проводится с таким расчетом, чтобы количество точек с обеих сторон линии было примерно одинаково, а их расстояние от прямой наименьшим.

Аналогично наносится на вероятностную бумагу прямая линия и в случае полной информации (план наблюдений N, U, N).

Из опыта практического пользования вероятностной бумагой часто имеет место случай, когда первая точка накопленной вероятности отходит от прямой на довольно значительное расстояние. Это объясняется тем, что первые значения показателя надежности всегда положительны, а интегральная кривая своей левой частью уходит в ∞ . В подобных случаях при проведении прямой «ab» первую точку можно не учитывать.

Параметры распределения (\bar{t} и σ) определяются следующим образом:

1. Среднее значение показателя надежности \bar{t} является абсциссой точки пересечения прямой «ab» с горизонтальной линией, имеющей ординату $F_o(t) = 0,50$.

В нашем случае $\bar{T}_{др} = 3900$ мото-ч.

2. Среднее квадратическое отклонение σ определяется как разность абс-

цисс двух точек пересечения прямой «*ab*» с горизонтальными линиями, имеющими ординаты $F_o(t) = 0,50$ и $F_o(t) = 0,16$.

В нашем случае $\sigma = 700$ мото-ч.

Из приведенного расчета видно, насколько проще и удобнее определять характеристики показателя надежности графическим методом, особенно в случае усеченной информации. При этом точность графического метода при достаточно большом N_o нисколько не ниже, нежели точность аналитического.

Определить основные характеристики рассеивания можно и не составляя статистического ряда. Для определения положения точки t_i на оси ординат необходимо из отрезка 2,33 вычесть или прибавить [в зависимости от положения точки относительно $H_k(0,5)=0$] квантиль интегральной функции или накопленной опытной вероятности $\sum_1^i p_i$, соответствующий этой точке.

Тогда ординату точки по оси ординат, мм находят из уравнения

$$y_i = 50 [2,33 \pm H_k(\sum_1^i p_i)]$$

где 50 – масштаб построения оси ординат, мм/квантиль;

$\sum_1^i p_i$ - накопленная опытная вероятность i - того отказавшего объекта.

Пусть будет та же задача, но вместо статистического ряда будет сводная таблица исходной информации

Таблица 10 - Информация по доремонтным ресурсам двигателя $T_{др}$, мото-ч.

Номер отказавшего двигателя	$T_{др}$	Номер отказавшего двигателя	$T_{др}$	Номер отказавшего двигателя	$T_{др}$
1	1560	7	3010	...	
2	1980	8	3080	26	3660
3	2110	
4	2460	14	3290	32	3980
5	2580	
6	2930	20	3490	40	4496

1. Выбираем из сводной таблицы исходной информации шесть равномерно расположенных точек 6,14,20,26,32 и 40.

3. Определяем координату выбранных точек x_i , приняв масштаб $M_x=0,05\text{мм/мото-ч}$. Например, координата для шестого двигателя $x_6=0,05\times 2930\text{мм}=147\text{мм}$.

4. Определяем накопленные опытные вероятности выбранных двигателей по уравнению $\sum_1^i p_{опi} = \frac{N_i^o}{N+1}$

где N_i^o - порядковый номер i -той точки в таблице исходной информации;
 N - общее число точек в информации

Например, накопленная опытная вероятность шестого двигателя

$$\sum_1^6 P_6 = \frac{6}{70+1} = 0,08$$

5. Находят координату выбранных точек y_i либо табл.13 приложения , либо по уравнению

$$y_6=50(2,326-N_k(0,08)) = 50(2,326-1,405)=46,05\text{ мм.}$$

Квантиль $N_k(0,08)$ определяют по таблице 10 приложения. Выполненные расчёты сводят в таблицу 11.

Таблица 11 – Координаты опытных точек при ЗНР

Порядковый номер оказавшего двигателя N_i^o	$T_{др}$, мото-ч	x_i , мм	$\sum P_i$	y_i ,мм
6	2930	147	0,08	46,05
14	3290	164,5	0,197	74,2
20	3490	174,5	0,28	87,15
26	3660	183	0,366	99,7
32	3980	199	0,45	110
40	4496	224,8	0,56	123,9

6. Наносим опытные точки на график (рис. 5) и проводим по ним прямую линию. Проводят прямую линию через опытные точки с таким расчётом, чтобы с каждой её стороны располагалось одинаковое количество точек, а их расстояние до прямой было бы примерно одинаковым. Не рекомендуется за расчётные точки принимать первые и последние точки информации, т.к. они могут быть выпадающими. Обычно за первую расчётную точку принимают точку, накопленная опытная вероятность которой $\sum_i^1 p_i = 0,1 \dots 0,15$, за последнюю $\sum_i^1 p_i = 0,85 \dots 0,95$.

7. Рассчитываем средний доремонтный ресурс и среднее квадратическое отклонение: через точку на оси ординат $\sum P_i = 0,5$ (находится на расстоянии 116,5 мм от начала координат) проводят горизонтальную линию до пересечения с интегральной прямой. Из точки пересечения на ось абсцисс опускают перпендикуляр. Отрезок A на оси абсцисс соответствует в заданном масштабе среднему значению показателя надёжности $\bar{t} = A, \text{ мм}/M_x$. В нашем случае $\bar{t} = 198/0,05 \text{ мото-ч} = 3960 \text{ мото-ч}$.

Среднее квадратическое отклонение σ равно длине отрезка B (разность абсциссы A и абсциссы точки пересечения горизонтали $\sum P_i = 0,16$, проведенной на расстоянии 66,6 мм от начала координат). Среднее квадратическое отклонение $\sigma = B, \text{ мм}/M_x$. В нашем случае $\sigma = 36/0,05 = 720 \text{ мото-ч}$.

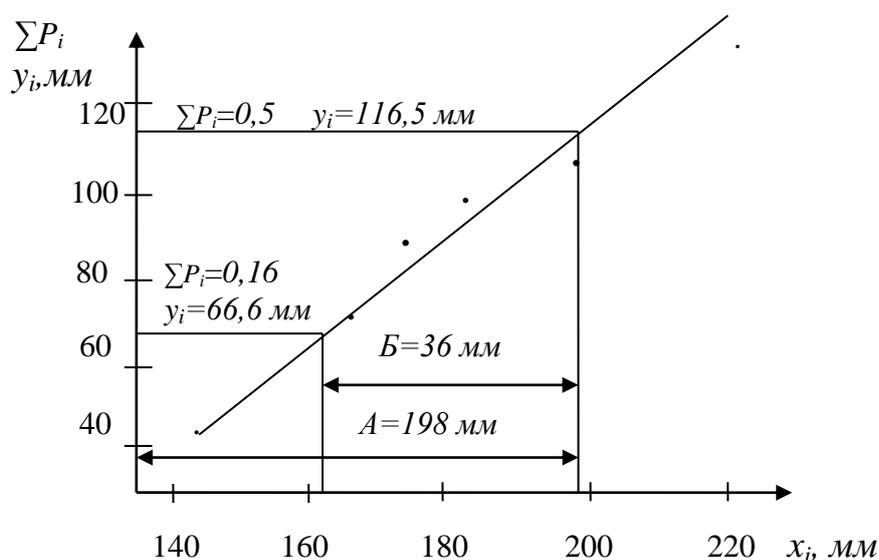


Рисунок 5 – Графическая часть обработки усечённой информации по ЗНР.

Если выбор пал на закон распределения Вейбулла, то существует две методики графической обработки опытной информации: с помощью вероятностной бумаги Вейбулла-Гнеденко, которая довольно сложна и поэтому применяется крайне редко. Вторая наиболее востребованная на которой мы остановимся. При законе распределения Вейбулла, как отмечалось ранее, интегральную кривую отказности выпрямляют в интегральную прямую посредством логарифмических осей координат. Координаты опытных точек, мм, определяют по уравнениям

$$x_i = M_x \lg(t_i - t_{см})$$

$$y_i = M_y \left[2,37 + \lg \lg \frac{1}{1 - \sum_1^i p_i} \right]$$

где M_x и M_y - масштабы построения осей абсцисс и ординат;

t_i - значение показателя надёжности;

$t_{см}$ - смещение начала рассеивания показателя надёжности;

$\sum_1^i p_{опi}$ - накопленная опытная вероятность.

Пусть будет тот же пример, но изначально предположим, что рассеивание ресурса подчиняется закону распределения Вейбулла.

1. Находим величину смещения ресурса по уравнению

$$t_{см} = T_{др1} - \frac{T_{др3} - T_{др1}}{2} = 1560 - \frac{2110 - 1560}{2} = 1285 \text{ мото-ч.}$$

2. Из сводной таблицы исходной информации выбираем шесть равномерно расположенных точек 6, 14, 20, 26, 32 и 40.

3. Определяем координаты выбранных точек x_i . Например для шестого двигателя

$$x_6 = 100 \lg(2930 - 1285) \text{ мото-ч} = 100 \lg 1645 \text{ мото-ч.}$$

Для удобства построения графика примем за единицу измерения ресурса 1000 мото-ч.

Тогда $x_6 = 100 \lg 1,645 \text{ тыс. мото-ч} = 21,6 \text{ мм.}$

4. Рассчитывают накопленные опытные вероятности по тому же уравнению, что и при ЗНР. Так например, накопленная опытная вероятность для шестого двигателя

$$\sum_1^i P_6 = \frac{6}{70+1} = 0,08$$

5. Находим координаты выбранных точек по ранее приведенному уравнению.

Например, координата шестого двигателя:

$$y_i = 50 \left[2,37 + \lg \lg \frac{1}{1-0,08} \right] = 50 [2,37 + \lg \lg 1,08] = 50 (2,37 - 1,47) = 45 \text{ мм.}$$

Координату y_i можно также определить по таблице 14 приложения. Выполненные таким образом расчеты сводятся в таблицу 12.

Таблица 12 - Координаты выбранных точек при ЗРВ

Порядковый номер оказавшего двигателя N_i^o	Доремонтный ресурс $T_{др}$, мото-ч	x_i , мм	$\sum_1^i P_i$	y_i , мм
6	2930	21,6	0,08	45
14	3290	30,2	0,19	66,2
20	3490	34,3	0,28	76,3
26	3660	37,6	0,36	82,8
32	3980	43,05	0,45	89,5
40	4496	50,6	0,56	96

6. Наносят опытные точки на график (рис. 6) и проводят по ним интегральную прямую.

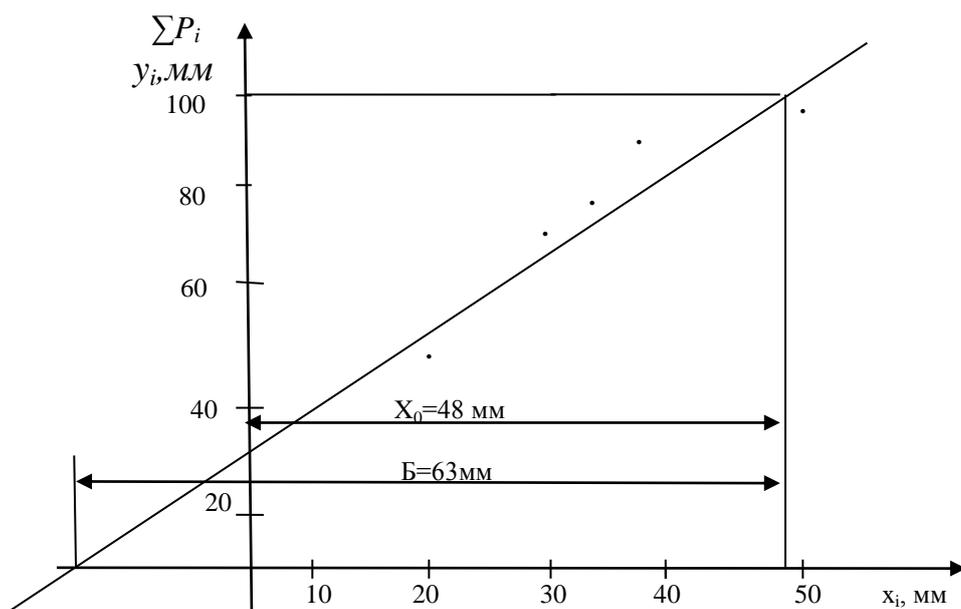


Рисунок 6 – Графическая часть обработки усеченной информации по ЗРВ

7. По длине отрезка $X_0=48$ мм и формуле определяем значение параметра Вейбулла a

$$a = \text{антиlg} \frac{X_0}{100} = \text{антиlg} \frac{48}{100} = 3020 \text{ мото-ч.}$$

8. По длине отрезка $B=63$ мм и формуле

$$\text{tg } \alpha = b = \frac{100,3 \times 2}{B} \approx \frac{200}{B} = \frac{200}{63} = 3,17$$

9. Среднее значение показателя надежности и среднее квадратическое отклонение вычисляют по уравнениям

$$\bar{t} = aK_\epsilon + t_{\text{см}}$$

$$\sigma = aC_\epsilon$$

где K_ϵ и C_ϵ – коэффициенты, определяемые по таблице 4 приложения и значению b . В нашем случае $K_\epsilon=0,90$; $C_\epsilon=0,31$. Тогда окончательно получим:

$$\bar{t} = 3020 \times 0,90 + 1285 = 4003 \text{ мото-ч.}$$

$$\sigma = 3020 \times 0,31 = 936 \text{ мото-ч.}$$

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ МАШИН

Безусловно к одному из основных направлений повышения надёжности сельскохозяйственной техники является конструктивный метод, поскольку разработка конструкторской документации, на основании которой изготавливают опытные образцы является основополагающей. Обеспечение надёжности любого сложного потенциального технического изделия начинается с момента разработки и согласования технического задания. В нём задают количественные показатели надёжности, которые должны быть подтверждены результатами испытаний к началу серийного производства изделия.

При разработке как эскизного, так и технического проектов предварительно оценивают надёжность объекта. Кроме того выбирают оптимальный вариант

конструкции, создают а затем испытывают макетный образец и отдельные элементы изделия.

В процессе разработки рабочего проекта уточняют показатели надёжности, разрабатывают конструкторскую документацию, изготавливают опытные образцы, составляют программу испытаний, испытывают экспериментальные образцы на надёжность, корректируют документацию для подготовки производства. Основные направления повышения надёжности сельскохозяйственной техники при её конструировании: оптимизация конструктивных схем машин, выбор долговечных материалов деталей и их рациональное сочетание в парах трения, обеспечение надлежащей конфигурации деталей и достаточной жёсткости, устойчивость к вибрациям базовых деталей машин, обеспечение надлежащей герметизации подвижных и неподвижных соединений деталей машин, создание оптимальных условий работы пар трения (нагрузка, скорость) при наименьших потерях на трение, обеспечение оптимальных температурных режимов работы соединений и агрегатов, а также надёжных условий смазывания трущихся поверхностей, создание эффективных устройств очистки воздуха, топлива и масел, резервирование отдельных элементов машины и др.

В процессе конструирования машин одни элементы соединяются последовательно, а другие – параллельно. Большинство элементов тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин соединено последовательно. С точки зрения надёжности, если отказ одного элемента приводит к отказу всей системы, такое соединение элементов называют последовательным. Тогда вероятность безотказной работы системы с последовательно соединёнными элементами в течении времени t

$$P_c = \prod_{i=1}^n P_i(t),$$

где n – число элементов в системе

$P_i(t)$ - вероятность безотказной работы i – того элемента в течении времени t .

Для определения вероятности безотказной работы системы необходимо

определить вероятности безотказной работы каждого элемента и их значения перемножить. В связи с тем, что вероятность безотказной работы каждого элемента меньше единицы, то при большом числе элементов вероятность безотказной работы системы значительно ниже вероятности безотказной работы каждого элемента, входящего в систему. Таким образом повысить надёжность системы можно путём снижения числа элементов или повышения вероятности их безотказной работы. Например, если система состоит из 10 элементов с вероятностью безотказной работы каждого элемента $P_i(t)=0,9$, то вероятность безотказной работы такой системы $P_c(t)=0,9^{10}=0,35$.

Если вероятность безотказной работы элементов повысить до $P_i(t)=0,95$, то $P_c(t)=0,95^{10}=0,6$, т.е. почти в два раза.

Чем проще конструктивная схема машины или механизма, тем выше её надёжность при равной вероятности безотказной работы элементов. Однако по вышеприведенному уравнению определяют вероятность безотказной работы системы с внезапными отказами. Для системы с постепенными отказами при использовании этого уравнения получаю заниженные результаты. Это можно объяснить тремя обстоятельствами. Во – первых, невозможно представить, что изделия могут быть настолько некачественными, что сразу же в начале работы деталь достигла предельного состояния или же была подвержена усталостному разрушению.

Во – вторых, нечёткость определения предельных показателей. На практике даже при достижении предельного состояния деталь часто может ещё некоторое время работать.

В – третьих, если элемент системы отказал, достигнув предельного состояния одной из деталей, то при его разборке осматривают смежные детали и при опасности возникновения отказа их заменяют или регулируют.

Из этих соображений вероятность безотказной работы системы с постепенными отказами целесообразно определять по вероятности безотказной работы худшего элемента, т.е.

$$P_c(t) = P_{imin}(t),$$

где $P_{imin}(t)$ – вероятность безотказной работы худшего элемента, входящего в систему.

На вероятность безотказной работы системы значительное влияние оказывают материалы деталей и их рациональное сочетание в соединениях. Как правило при комплектовании соединений исходят из двух требований: получения заданной долговечности и невысокой стоимости. При выборе материала каждой конкретной детали учитывают условия работы, вид изнашивания, возможность применения термической, химико-термической и других видов упрочняющей обработки, требования к точности механической обработки, шероховатости рабочей поверхности, температурный режим работы и т.п.

Одним из методов повышения надёжности сложных технических систем является резервирование, т.е. применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного элемента найдётся другой элемент, способный выполнять его функции. В таких системах создаётся структурная или функциональная избыточность. Иными словами в резервных системах входящие в них элементы соединяются параллельно.

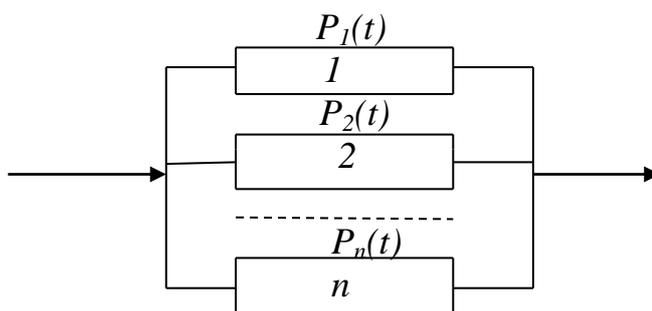


Рисунок 7 - Техническая система с параллельно соединёнными элементами:

1- основной элемент, 2...n – резервные элементы.

При этом один из элементов с вероятностью безотказной работы $P_1(t)$ называют основным. Это элемент структуры объекта, необходимый для выполнения объектом требуемых функций при отсутствии отказов его элементов.

Остальные элементы называются резервными – элементы объекта, предназначенные для выполнения функций основного элемента в случае отказа последнего. При этом резервный элемент может находиться в режиме основного элемента (нагруженный резерв), в менее нагруженном режиме, чем основной элемент (облегченный резерв), или ненагруженном режиме до начала выполнения им функций основного элемента (ненагруженный резерв).

В резервных системах создаётся структурная избыточность. Вероятность отказа такой системы снижается, поскольку отказ наступает тогда, когда откажут основной и все резервные элементы. Вероятность отказа системы из параллельно соединённых элементов в течение времени t

$$F_i(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t),$$

где n – число элементов в системе.

Вероятность безотказной работы

$$P_c(t) = 1 - F_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)]$$

Если входящие в систему элементы равнонадёжны, то

$$P_c(t) = 1 - [1 - P_i(t)]^n$$

Поскольку $P_i(t) < 1$, то при $n > 1$ всегда

$$P_c(t) > P_i(t)$$

Таким образом параллельное соединение элементов способствует повышению надёжности системы в целом. Такое соединение называют постоянным резервированием. Оно предполагает, что резервные элементы работают одновременно с основными (нагруженный резерв), поэтому их ресурс также исчерпывается во время эксплуатации.

Рассмотрим на конкретном примере вероятность безотказной работы двух систем с последовательным и параллельным соединением элементов. Пусть в одну и другую системы входят по два элемента. При этом вероятность

безотказной работы первого элемента $P_1(t) = 0,8$, второго $P_2(t) = 0,5$. Вероятность безотказной работы системы с последовательно соединенными элементами $P_c(t) = P_1(t) P_2(t) = 0,8 \times 0,5 = 0,4$.

Вероятность безотказной работы системы с параллельно соединенными элементами $P_c(t) = 1 - [(1 - 0,8)(1 - 0,5)] = 0,9$.

Как видно из приведенного примера, вероятность безотказной работы системы с последовательно соединенными элементами в итоге даже хуже вероятности безотказной работы худшего элемента. В свою очередь вероятность безотказной работы системы с параллельно соединенными элементами лучше вероятности безотказной работы лучшего элемента.

Используя оба вышеприведенные уравнения представляется возможным прогнозировать вероятность безотказной работы агрегатов и машин на стадии проектирования, например, двигателя или любого другого агрегата. С этой целью на основе данных по надёжности деталей и сборочных единиц прототипа принимают вероятность безотказной работы отдельных элементов агрегата. Затем детали и сборочные единицы с равными вероятностями безотказной работы группируют в блоки.

Таблица 13 - Вероятность безотказной работы основных деталей и сборочных единиц двигателя за время t

Номер блока	Наименование деталей и сборочных единиц	Число деталей и сборочных единиц	Вероятность безотказной работы
1	Блок цилиндров и др.	14	0,9999
2	Коленчатый вал, шатун и др.	8	0,9990
3	Поршень, поршневой палец и др.	48	0,9900

Составляют блок-схему двигателя с последовательно соединенными элементами. Рассчитывают вероятности безотказной работы блоков и всего двигателя в целом по формуле

$$P_1(t) = 0,9999^{14} = 0,9986; \quad P_2(t) = 0,9990^8 = 0,9920; \quad P_3(t) = 0,9970^{13} = 0,9617$$

$$P_{\text{дв}}(t) = P_1(t) P_2(t) P_3(t) = 0,95$$

Рассчитанную вероятность безотказной работы сопоставляют с нормативным значением $P_{\text{дв}}(t)$: $P_{\text{дв.норм}}(t) = 0,8$. При недостаточном уровне надёжности анализируют блок-схему и определяют направления её совершенствования посредством изменения конструкции, материалов, технологии изготовления деталей, введением резервных элементов.

Параллельное соединение элементов на тракторах, автомобилях и сельскохозяйственных машинах находит ограниченное применение. Можно с некоторым приближением отнести к системам с постоянным резервированием: двухконтурную систему тормозов, когда приводы на передние и задние колёса действуют независимо; многокатковые ходовые системы гусеничных движителей; установка двух клапанных пружин или двух вентиляторных ремней на двигатель.

Как показывает практика наиболее часто в сельскохозяйственной технике используют резервирование замещением. Под ним понимаю такое резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного и установки на его место резервного элемента. При таком резервировании ресурс резервного элемента не расходуется и вероятность безотказной работы системы повышается. Однако требуется определённое время на установку резервного элемента. Например вибратор системы зажигания.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ

Технологические методы повышения надёжности характеризуют стадию основного производства в условиях завода-изготовителя и включают в себя целую систему мероприятий. В эту систему входят все звенья технологической цепи начиная с оборудования, оснастки, заготовок, деталей, изделий, средств контроля, конструкторской и технологической документации и заканчивая операторами, контролерами и т.д.

Технологические методы повышения надёжности определяются прежде всего надёжностью самой технологической системы. Целью таких методов является достижение показателей и параметров, заданных конструкторами при проектировании деталей, агрегатов и машин. К основным технологическим методам относятся следующие:

1) Необходимая точность изготовления деталей. Одновременно с повышением точности изготовления деталей появляется возможность уменьшить начальные зазоры в подвижных соединениях и более жёстко регламентировать натяги в неподвижных соединениях, что в значительной степени повышает долговечность таких соединений и машины в целом.

2) Обеспечение оптимального качества рабочих поверхностей. От исходной шероховатости рабочих поверхностей зависит качество посадки как с зазором, так и с натягом. Как повышенная шероховатость рабочей поверхности, так и чрезмерно гладкая не всегда нужны, поскольку в первом случае ослабевают неподвижные посадки, нарушается гидродинамический режим смазки, во втором не удерживается на поверхности масляная плёнка и т.д. Поэтому для большинства деталей установлены оптимальные шероховатости поверхности трения.

3) Повышение износостойкости, статической и циклической прочности деталей термической, химико-термической обработками и пластическим деформированием. При закалке с нагревом ТВЧ повышается усталостная прочность деталей из стали 45 в 2 раза. В качестве операций химико-термической обработки для поверхностного упрочнения деталей получили азотирование, цементация, нитроцементация и др. Цементация используется достаточно широко при производстве зубчатых колёс, главных передач и др. При поверхностном пластическом деформировании повышается усталостная прочность деталей в 1,5...2,0 раза, увеличивается твёрдость рабочих поверхностей и сопротивляемость их изнашиванию, снижается шероховатость поверхности.

4) Нанесение на рабочие поверхности деталей износостойких покрытий. При пористом хромировании поршневых колец ресурс колец и гильз цилиндров

увеличивается более чем в 2 раза. Благодаря индукционной наплавке рабочих органов сельскохозяйственных машин (лемехов, лап культиваторов) твёрдыми сплавами, ресурс этих деталей повышается в 2...3 раза.

5) Другие методы повышения долговечности деталей – искусственное старение литых чугуновых деталей (блоков цилиндров, корпусов и т.д.), установка втулок, колец из износостойких материалов, статическая и динамическая балансировка деталей, повышение точности сборки, контроль качества.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ

Те условия эксплуатации машин, в которых они эксплуатируются будут оказывать существенное влияние на показатели их надёжности в целом и в первую очередь на показатели безотказности и долговечности. В этой связи для улучшения показателей долговечности и безотказности при эксплуатации следует обратить внимание на комплекс следующих мероприятий:

1. Качественная обкатка новых и отремонтированных машин и агрегатов в условиях реальной эксплуатации в соответствии с рекомендациями заводов-изготовителей или специализированных ремонтных предприятий. По окончании обкатки проводят техническое обслуживание с заменой смазочных материалов.

2. Организация технического обслуживания и создание для его проведения необходимой материальной базы с применением всей гаммы ресурсосберегающих технологий. Применение диагностического и регулировочного оборудования в комплексе с высококвалифицированными специалистами и мастерами-наладчиками.

3. Проведение периодических технических осмотров машин совместно с представителями Ростехнадзора и ГИБДД один-два раза в год, способствующих улучшению деятельности инженерно-технических служб в плане хранения машин и повышения уровня эксплуатации.

4. Соблюдение режимов работы машин. На работу любой сборочной единицы отрицательно влияют как пониженные температуры, так и перегрев. В обоих случаях в 1,5-2 раза увеличивается износ деталей вследствие плохих условий смазывания или высоких удельных нагрузок соответственно.

5. Соблюдение рекомендаций заводов-изготовителей в плане применения топлива, масла и смазочных материалов. Используемое топливо влияет на процесс сгорания, условия смазывания поверхностей трения, интенсивность нагарообразования и изнашивания. Значительное влияние на износ деталей и долговечность машин оказывают смазочные материалы. Так например, использование в гидросистеме трактора моторного масла ведёт изначально к повышенному давлению в системе и как следствие-перегреву, что отрицательно сказывается на работе всех агрегатов.

6. Контроль и обеспечение достаточной герметизации агрегатов и механизмов машин. Практически все машины в условиях сельскохозяйственного производства работают в условиях повышенной запылённости. В этой связи необходимо постоянно контролировать состояние систем вентиляции, запорной арматуры и особенно систем очистки воздуха и топлива. При подсосе 1% нефилтрованного воздуха интенсивность изнашивания верхних поршневых колец увеличивается в 4 раза.

7. Соблюдение установленных правил хранения машин. Поскольку большинство сельскохозяйственных машин имеет сезонный характер эксплуатации, то постановке техники на хранение должно быть уделено особое внимание. В настоящее время в ряде крупных холдингов оборудуют специальные участки, оснащённые специальным оборудованием для очистки и консервации машин в нерабочие периоды времени. Этот момент отражает общую культуру производства на данном предприятии и позволяет в значительной степени экономить денежные средства за счёт снижения затрат на приобретение запасных частей. В первую очередь применение консервационных материалов для исключения коррозии, а также использование различных подставок и разгружающих устройств. Снятие и хранение в специальных помещениях приборов электрооборудования, особенно аккумуляторов. Высокие показатели сохранности обеспечиваются при наличии специальных помещений или площадок с твёрдым покрытием.

8. Повышение уровня квалификации механизаторов и всех звеньев инженерной службы. Повышение культуры проведения механизированных работ и эксплуатации техники.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ РЕМОНТЕ

В настоящее время многие сельскохозяйственные предприятия оснащены современной высокопроизводительной техникой, зачастую импортного производства. С ростом балансовой стоимости техники растут соответственно и затраты на её эксплуатацию. Безусловно первой и последующими потерями работоспособности эксплуатация машины не ограничивается, поэтому повышение надёжности машин при ремонте является задачей актуальной. В этой связи к основным направлениям повышения надёжности отремонтированных машин относятся следующие:

1. Проведение предремонтного диагностирования в мастерских общего назначения по месту эксплуатации машин с целью определения необходимых ремонтных воздействий и разборки соответствующих агрегатов. Так например, с помощью автоматизированной диагностической системы КИ-13940 для энергонасыщенных тракторов можно измерить 85 параметров технического состояния.

2. Обеспечение сохраняемости ремонтного фонда, поступающего на специализированные ремонтные предприятия достигается организацией складов и площадок, использование специальных подставок и т.д. При неудовлетворительном хранении ремфонд может превратиться в металлолом.

3. Выполнение разборочных работ без повреждения деталей и разуконплектовки деталей, полученных совместной обработкой (блоки цилиндров и крышки подшипников коленчатого вала, шатуны и их крышки, пары зубчатых колёс конечных и других передач). Для исключения повреждений при разборке следует использовать съёмники, прессы, стенды и др.

4. Качественная очистка агрегатов машин и деталей от различных загрязнений. Удаление накипи, нагара, продуктов разложения топливосмазочных материалов отличается определёнными трудностями и требует использования современного оборудования и моющих средств. Только при высококачественной наружной очистке и промывке масляных каналов в блоке и коленчатом вале можно увеличить ресурс двигателя на 30%.

5. Контроль и дефектация деталей. Наряду с универсальными измерительными инструментами (микрометрами, индикаторами) на ремонтных предприятиях следует использовать инструменты и средства пневматического контроля, обеспечивающие повышение точности измерений до 0,01...0,001 мм.

Наиболее ответственные детали, такие как коленчатые валы, оси, поворотные цапфы, блоки, гильзы цилиндров и другие детали проверяют на отсутствие скрытых дефектов методами магнитной, люминесцентной, ультразвуковой дефектоскопии и гидравлической опрессовки.

Блоки цилиндров, корпуса коробок передач и трансмиссий требуют сплошного контроля не только размеров, но и геометрии их рабочих поверхностей и точности их взаимного расположения. Во время эксплуатации у этих деталей в результате старения материала, процесса изнашивания, воздействия различных нагрузок и перераспределения внутренних напряжений изменяются размеры, геометрическая форма и взаимное расположение рабочих поверхностей. Своевременное устранение этих отклонений обеспечивает высокий ресурс не только самой базовой детали, но и всего агрегата.

6. Внедрение на ремонтных предприятиях входного контроля запасных частей, так как имеют место случаи несоответствия их размеров, геометрической формы, твёрдости, микротвёрдости и других параметров чертежам и техническим требованиям.

7. Подбор деталей цилиндропоршневой группы (поршней, шатунов, поршневых пальцев) по размерным группам и массе.

8. Динамическая балансировка коленчатых и карданных валов, сцепления, колёс и других деталей.

9. Обеспечение регламентированных зазоров и натягов в подвижных и неподвижных соединениях, усилий затяжки резьбовых соединений и других требований при сборке.

10. Обеспечение хорошей герметизации агрегатов и сборочных единиц. Для этого замене подлежат прокладки и сальниковые уплотнения, устраняют коробление плоскостей разъёма деталей, используют новые прокладочные материалы и т.д.

11. Внедрение стендовой обкатки и испытаний агрегатов и машин. Применение заводских режимов и технологий обкатки. Обкатывают под нагрузкой не только двигатели, но и агрегаты трансмиссии, применяют обкаточные масла и различные присадки.

12. Повышение качества окраски ремонтируемых машин за счёт применения эффективных грунтов и эмалей. Внедрение прогрессивных методов окраски гидродинамическим распылением в электростатическом поле и др.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 4 - Параметры и коэффициенты распределения Вейбулла

<i>V</i>	<i>b</i>	<i>K_b</i>	<i>C_b</i>	<i>V</i>	<i>b</i>	<i>K_b</i>	<i>C_b</i>	<i>V</i>	<i>b</i>	<i>K_b</i>	<i>C_b</i>
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1,26	0,80	1,13	1,43	0,55	1,90	0,89	0,49	0,36	3,00	0,89	0,33
1,11	0,90	1,07	1,20	0,52	2,00	0,89	0,46	0,35	3,10	0,89	0,32
1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	2,10	0,89	0,44	0,34	3,20	0,90	0,31
0,91	1,10	0,97	0,88	0,48	2,20	0,89	0,43	0,33	3,30	0,90	0,30
0,84	1,20	0,94	0,79	0,46	2,30	0,89	0,41	0,33	3,40	0,90	0,29
0,78	1,30	0,92	0,72	0,44	2,40	0,89	0,39	0,32	3,50	0,90	0,29
0,72	1,40	0,91	0,66	0,43	2,50	0,89	0,38	0,31	3,60	0,90	0,28
0,68	1,50	0,90	0,61	0,41	2,60	0,89	0,37	0,30	3,70	0,90	0,27
0,64	1,60	0,90	0,57	0,40	2,70	0,89	0,35	0,29	3,80	0,90	0,27
0,61	1,70	0,89	0,54	0,39	2,80	0,89	0,34	0,29	3,90	0,91	0,26
0,58	1,80	0,89	0,51	0,38	2,90	0,89	0,34	0,28	4,00	0,91	0,25

$$\bar{t} = a K_b + t_{\text{см}}; \quad \sigma = a C_b$$

Таблица 5 – Дифференциальная функция (функция плотности вероятности) $af_0(t)$ закона распределения Вейбулла

$\frac{t_{ic} - t_{cm}}{a}$	Параметр b						
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0
0,1	0,905	0,711	0,536	0,392	0,281	0,198	0,030
0,2	0,819	0,752	0,662	0,565	0,470	0,384	0,119
0,3	0,741	0,745	0,719	0,672	0,613	0,548	0,263
0,4	0,670	0,716	0,735	0,733	0,714	0,682	0,450
0,5	0,607	0,676	0,726	0,759	0,776	0,779	0,662
0,6	0,549	0,630	0,700	0,757	0,803	0,837	0,870
0,7	0,497	0,582	0,662	0,734	0,800	0,858	1,043
0,8	0,449	0,534	0,516	0,695	0,771	0,844	1,151
0,9	0,407	0,487	0,566	0,645	0,728	0,801	1,172
1,0	0,368	0,442	0,515	0,589	0,662	0,736	1,104
1,1	0,333	0,399	0,464	0,520	0,593	0,656	0,959
1,2	0,301	0,359	0,414	0,468	0,520	0,569	0,767
1,3	0,273	0,321	0,367	0,409	0,447	0,480	0,564
1,4	0,247	0,287	0,323	0,353	0,377	0,394	0,378
1,5	0,223	0,256	0,282	0,304	0,313	0,316	0,231
1,6	0,202	0,227	0,245	0,254	0,255	0,247	0,128
1,7	0,183	0,202	0,212	0,213	0,205	0,189	0,064
1,8	0,165	0,178	0,182	0,176	0,162	0,141	0,029
1,9	0,150	0,157	0,155	0,144	0,126	0,103	0,011
2,0	0,135	0,139	0,132	0,117	0,096	0,073	0,004
2,1	0,123	0,122	0,112	0,094	0,073	0,051	0,001
2,2	0,111	0,107	0,094	0,075	0,054	0,035	-
2,3	0,100	0,094	0,079	0,060	0,040	0,023	-
2,4	0,091	0,082	0,066	0,047	0,029	0,015	-
2,5	0,082	0,072	0,055	0,036	0,021	0,010	-

Таблица 7 - Критерий согласия Пирсона χ^2

r	Вероятность P, %							
	95	90	80	70	50	30	20	10
1	0,00	0,02	0,06	0,15	0,45	1,07	1,64	2,71
2	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60
3	0,35	0,58	1,00	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25
4	0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78
5	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24
6	1,64	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,6
7	2,17	2,83	3,82	4,67	6,34	8,38	9,80	12,6
8	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,0	13,4
9	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,7	12,2	14,7
10	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,8	13,4	16,0

Таблица 8 – Коэффициенты t_α , r_1 и r_3 для двухсторонних доверительных границ

a	0,80			0,90			0,95			0,99		
	t_α	r_1	r_3									
3	1,89	1,95	0,70	2,92	2,73	0,57	4,30	3,66	0,48	9,92	6,88	0,36
4	0,64	1,74	0,73	2,35	2,29	0,60	3,18	2,93	0,52	5,84	4,85	0,40
5	1,53	1,62	0,75	2,13	2,05	0,62	2,78	2,54	0,55	4,60	3,91	0,43
6	1,48	1,54	0,76	2,02	1,90	0,65	2,57	2,29	0,57	4,03	3,36	0,46
7	1,44	1,48	0,77	1,94	1,80	0,67	2,45	2,13	0,59	3,71	3,00	0,48
8	1,42	1,43	0,78	1,90	1,72	0,68	2,36	2,01	0,61	3,50	2,75	0,50
9	1,40	1,40	0,79	1,86	1,66	0,69	2,31	1,91	0,63	3,36	2,56	0,52
10	1,38	1,37	0,80	1,83	1,61	0,70	2,26	1,83	0,64	3,25	2,42	0,553
11	1,37	1,35	0,80	1,81	1,57	0,70	2,23	1,78	0,64	3,17	2,31	0,54
12	1,36	1,33	0,81	1,80	1,53	0,71	2,20	1,73	0,65	3,11	2,21	0,56
13	1,36	1,31	0,81	1,78	1,50	0,73	2,18	1,69	0,66	3,06	2,13	0,57
14	1,35	1,29	0,83	1,77	1,48	0,74	2,16	1,65	0,67	3,01	2,06	0,58
15	1,34	1,28	0,83	1,76	1,46	0,74	2,15	1,62	0,68	2,98	2,01	0,59
20	1,33	1,54	0,85	1,73	1,37	0,77	2,09	1,51	0,72	2,85	1,81	0,63
25	1,32	1,21	0,86	1,71	1,33	0,79	2,06	1,44	0,74	2,80	1,68	0,66
30	1,31	1,18	0,87	1,70	1,29	0,80	2,04	1,39	0,76	2,75	1,60	0,68
40	1,30	1,16	0,88	1,68	1,24	0,83	2,02	1,32	0,78	2,7	1,50	0,71
50	1,30	1,14	0,89	1,68	1,21	0,84	2,01	1,28	0,80	2,68	1,43	0,74
60	1,30	1,12	0,90	1,67	1,19	0,86	2,00	1,25	0,82	2,66	1,38	0,76
80	1,29	1,10	0,91	1,66	1,16	0,87	1,99	1,21	0,84	2,64	1,32	0,78
100	1,29	1,09	0,92	1,66	1,14	0,88	1,98	1,19	0,86	2,63	1,28	0,80

Таблица 9 – Квантили закона распределения Вейбулла (ЗРВ) H_K^B

$(1\pm\alpha)/2$	Параметр b															
	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,16	0,22	0,27	0,32
0,03	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,11	0,11	0,13	0,14	0,16	0,18	0,25	0,34	0,37	0,42
0,05	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,17	0,19	0,21	0,23	0,31	0,37	0,43	0,48
0,07	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,35	0,42	0,47	0,52
0,10	0,08	0,11	0,13	0,15	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,41	0,47	0,53	0,57
0,15	0,14	0,17	0,19	0,23	0,25	0,29	0,30	0,33	0,35	0,38	0,40	0,42	0,50	0,56	0,60	0,63
0,20	0,19	0,22	0,26	0,29	0,32	0,34	0,37	0,39	0,41	0,44	0,45	0,47	0,55	0,61	0,65	0,69
0,25	0,25	0,29	0,33	0,36	0,39	0,41	0,44	0,45	0,48	0,50	0,52	0,54	0,61	0,66	0,70	0,73
0,30	0,32	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,50	0,53	0,55	0,56	0,58	0,60	0,66	0,71	0,75	0,77
0,35	0,40	0,44	0,47	0,50	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,62	0,64	0,66	0,71	0,75	0,79	0,81
0,40	0,47	0,51	0,54	0,57	0,60	0,62	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70	0,72	0,76	0,80	0,83	0,85
0,45	0,57	0,60	0,63	0,66	0,68	0,69	0,71	0,73	0,74	0,75	0,76	0,76	0,81	0,84	0,86	0,88
0,50	0,67	0,69	0,72	0,74	0,75	0,77	0,78	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,86	0,89	0,90	0,91
0,55	0,79	0,81	0,82	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,91	0,93	0,94	0,95
0,60	0,91	0,92	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98
0,65	1,07	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02
0,70	1,23	1,20	1,18	1,17	1,15	1,14	1,13	1,12	1,12	1,11	1,10	0,10	1,08	1,06	1,05	1,05
0,75	1,45	1,40	1,36	1,33	1,30	1,27	1,25	1,23	1,22	1,21	1,20	0,18	1,14	1,11	1,10	1,09
0,80	1,70	1,61	1,54	1,49	1,44	1,41	1,37	1,35	1,32	1,30	1,29	1,27	1,21	1,17	1,15	1,13
0,85	2,11	1,96	1,84	1,74	1,67	1,61	1,55	1,51	1,47	1,45	1,32	1,39	1,31	1,25	1,21	1,18
0,90	2,53	2,30	2,13	2,00	1,90	1,81	1,74	1,68	1,63	1,59	1,55	1,52	1,40	1,32	1,27	1,23
0,93	2,96	2,66	2,43	2,25	2,12	2,01	1,92	1,84	1,78	1,72	1,67	1,63	1,48	1,39	1,32	1,28
0,95	3,38	3,00	2,71	2,49	2,33	2,19	2,08	1,99	1,91	1,84	1,78	1,73	1,55	1,44	1,37	1,32
0,97	4,03	3,51	3,13	2,84	2,63	2,45	2,31	2,19	2,09	2,01	1,94	1,87	1,65	1,52	1,43	1,37
0,99	5,46	4,60	4,01	3,57	3,24	2,98	2,77	2,60	2,46	2,34	2,23	2,15	1,84	1,66	1,55	1,46

Таблица 10 - Квантили нормального распределения

P	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	0,000	0,025	0,050	0,075	0,100	0,126	0,151	0,176	0,202	0,227
0,6	0,253	0,279	0,305	0,332	0,358	0,385	0,412	0,440	0,468	0,496
0,7	0,524	0,553	0,583	0,613	0,643	0,675	0,706	0,739	0,772	0,806
0,8	0,842	0,878	0,915	0,954	0,994	1,036	1,080	1,126	1,175	1,227
0,9	1,282	1,341	1,405	1,476	1,555	1,645	1,751	1,881	2,054	2,326

Таблица 11 - Значение гамма-функции $\Gamma(x)$

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,00	1,00	1,26	0,904	1,52	0,887	1,78	0,926
1,02	0,989	1,28	0,901	1,54	0,888	1,80	0,931
1,04	0,978	1,30	0,897	1,56	0,890	1,82	0,937
1,06	0,969	1,32	0,895	1,58	0,891	1,84	0,943
1,08	0,960	1,34	0,892	1,60	0,894	1,86	0,949
1,10	0,951	1,36	0,890	1,62	0,896	1,880	0,955
1,12	0,944	1,38	0,889	1,64	0,899	1,90	0,962
1,14	0,936	1,40	0,887	1,66	0,902	1,92	0,969
1,16	0,930	1,42	0,886	1,68	0,905	1,94	0,976
1,18	0,924	1,44	0,886	1,70	0,909	1,96	0,948
1,20	0,918	1,46	0,886	1,72	0,913	1,98	0,992
1,22	0,913	1,48	0,886	1,74	0,917	2,00	1,000
1,24	0,908	1,50	0,886	1,76	0,921	2,50	1,329

Таблица 12 - Значения $t_{\alpha/\sqrt{N}}$ и q

$t_{\alpha/\sqrt{N}}$				q			
$N \backslash \alpha$	0,80	0,90	0,95	$N \backslash \alpha$	0,80	0,90	0,95
4	0,82	1,17	1,59	4	2,29	2,93	3,67
5	0,69	0,95	1,24	5	2,05	2,54	3,08
6	0,60	0,82	1,05	6	1,90	2,29	2,73
7	0,54	0,73	0,92	—	-	-	-
8	0,50	0,67	0,83	8	1,72	2,01	2,31
9	0,47	0,62	0,77	—	—	—	—
10	0,44	0,58	0,72	10	1,61	1,83	2,08
15	0,35	0,45	0,55	15	1,46	1,62	1,78
20	0,30	0,39	0,47	20	1,37	1,51	1,64
25	0,26	0,34	0,41	25	1,33	1,44	1,55
30	0,24	0,31	0,37	30	1,29	1,39	1,48
40	0,20	0,26	0,32	40	1,24	1,32	1,40
50	0,18	0,24	0,28	50	1,21	1,28	1,35
80	0,14	0,19	0,22	80	1,16	1,21	1,26
100	0,13	0,17	0,20	100	1,14	1,19	1,23

Таблица 13 - Ордината « у » в мм при ЗНР

ΣP_{oni}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	—	-	13,6	22,3	28,8	34,0	38,5	42,5	46,0	49,3
0,1	52,2	55,0	57,5	60,0	62,3	64,5	66,6	68,6	70,5	72,4
0,2	74,2	76,0	77,7	79,3	81,0	82,5	84,1	85,6	87,1	88,6
0,3	90,1	91,5	92,99	94,3	95,7	97,0	98,4	99,7	101,0	102,2
0,4	103,6	104,9	106,2	107,5	108,7	110,0	110,3	112,5	113,8	115,0
0,5	116,3	117,6	118,8	120,1	121,3	122,6	123,9	125,1	126,4	127,7
0,6	129,0	130,3	131,6	132,9	134,2	135,6	136,9	138,3	139,7	141,1
0,7	142,5	144,0	145,5	147,0	148,5	150,1	151,6	153,3	154,9	156,6
0,8	158,4	160,2	162,1	164,0	166,0	168,1	170,3	172,3	175,1	177,6
0,9	180,4	183,3	186,6	190,1	194,1	198,6	203,8	210,3	219,0	-

Таблица 14 - Ордината « у » в мм при ЗРВ

ΣP_{oni}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	-	0,5	15,7	24,6	30,9	35,9	40,0	43,4	46,4	49,1
0,1	61,5	53,7	55,7	57,6	59,3	60,9	62,5	63,9	65,3	66,6
0,2	67,8	69,0	70,2	71,3	72,3	73,3	74,3	75,3	76,2	77,1
0,3	78,0	78,9	79,7	80,5	81,3	82,1	82,9	83,6	84,4	85,1
0,4	85,8	86,5	87,2	87,9	88,6	89,2	89,9	90,5	91,2	91,8
0,5	92,4	93,1	93,7	94,3	94,9	95,5	94,1	96,7	97,3	97,9
0,6	95,5	99,1	99,7	100,3	100,8	101,4	102,0	102,6	103,2	103,8
0,7	104,4	105,0	105,6	106,2	106,9	107,5	108,1	108,7	109,4	110,1
0,8	110,7	111,4	112,1	112,8	113,5	114,3	115,1	118,9	116,7	117,6
0,9	118,5	119,5	120,5	121,6	122,9	124,2	125,8	127,6	130,0	133,6

Таблица 15 - Распределение критерия Колмогорова

λ	0,0	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
$P(\lambda)$	1,0	0,96	0,71	0,54	0,39	0,27	0,18	0,11	0,07

Литература

1. Лисунов Е.А. Практикум по надёжности технических систем.- СПб.:Лань,2015
2. Тюрёва А.А., Козарез И.В. Восстановление типовых поверхностей и деталей сельскохозяйственной техники. Брянск: Издательство БГСХА, 2013. – 151 с.
3. Малафеев С.И. Надёжность технических систем, Примеры и задачи.- СПб.:Лань,2012.
4. Беленький Д.М. Теория надёжности машин и металлоконструкций. Ростов н/Д.:Феникс, 2011
5. Надёжность технических систем.-М:Академия,2010
6. И.М.Жарский Технологические методы обеспечения надёжности деталей машин.-Мн.:Вышэйшая школа, 2005
7. Лисунов Е.А. Сборник задач и упражнений по надёжности технических систем. Н.Новгород: НГСХА, 2003
8. Курчаткин В.В., Тельнов Н.Ф.,
9. Ачкасов К.А. и др. Надёжность и ремонт машин. Колос, 2000
- 10.Серый И.С., Смелов А.П., Черкун В.Е.
- 11.Курсовое и дипломное проектирование по надёжности и ремонту машин: учеб. Пособие для вузов М.: Агропромиздат, 1991
12. Решетов Д.Н., Исанов А.С., Фадеев В.З. Надёжность машин: учеб. Для вузов. М.: Высш. шк., 1988.
13. Артемьев Ю.Н. Основы надёжности сельскохозяйственной техники: лекции и расчетные упражнения М.: МИИСП, 1973.
14. Бардадын Н.А. Восстановление и упрочнение прецизионных деталей топливной аппаратуры диффузионным бороникелированием: автореф. на соиск. уч. степени к.т.н./ Н.А. Бардадын. – Москва, 1995. – 20 с.

Учебное издание

Бардадын Николай Александрович

**ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Редактор Павлютина И.П.

Подписано в печать 26.10.2015 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага типографская офсетная. Усл. печ. л. 5,34. Тираж 25 экз.
Изд. № 3735. Издательство Брянского ГАУ.

243365 Брянская обл., Выгоничский р-он, с. Кокино,
Брянский ГАУ