



Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Мобильные и технологические комплексы»

НАДЕЖНОСТЬ И ИСПЫТАНИЯ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

ПОСОБИЕ

**для студентов специальности
1-36 12 01 «Проектирование и производство
сельскохозяйственной техники»
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2024

УДК 629.018:631.3(075.8)
ББК 40.72-07я73
Н17

*Рекомендовано научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 11 от 28.06.2022 г.)*

Составители: *С. И. Кирилюк, С. В. Шишков*

Рецензент: доц. каф. «Технология машиностроения» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук *М. Ю. Целуев*

Надежность и испытания мобильных машин : пособие для студентов специальности
Н17 1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники» днев. и заоч.
форм обучения / сост.: С. И. Кирилюк, С. В. Шишков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого,
2024. – 192 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; сво-
бодное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим досту-
па: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Приведены основные определения и понятия надежности, изложена методика статистической обработки информации по износам деталей, включены справочные данные для определения теоретического закона распределения износов. Предложен материал по принятым в Республике Беларусь видам и методам проведения испытаний мобильных машин, методикам определения эксплуатационных показателей мобильных машин, по организации испытаний мобильных сельскохозяйственных машин и основным показателям, характеризующим мобильную сельскохозяйственную технику во время испытаний, по методам анализа результатов экспериментальных исследований.

УДК 629.018:631.3(075.8)
ББК 40.72-07я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

1 Основные понятия и определения теории надежности.....	6
1.1 Предмет и задачи теории надежности	6
1.2 Основные понятия теории надежности	7
1.2.1 Надежность.....	7
1.2.2. Состояния объекта. События, связанные с отказами и восстановлением	7
1.2.3 Составляющие надежности	10
1.3 Основные показатели надежности, их взаимосвязь	12
1.3.1 Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов	12
1.3.2 Показатели безотказности восстанавливаемых объектов	22
1.3.3 Показатели долговечности.....	24
1.3.4 Показатели ремонтпригодности.....	26
1.3.5 Показатели сохраняемости	27
1.3.6 Комплексные показатели надежности.....	28
2 Отказы. Модели отказов.....	30
2.1 Источники и причины отказов объектов	30
2.2 Классификация отказов	32
2.3 Модели отказов	35
2.3.1 Общие сведения	35
2.3.2 Модели внезапных отказов.....	36
2.3.3 Двумерная модель внезапного отказа. Пример определения показателей безотказности металл-полимерной силовой системы.....	40
2.3.4 Модель постепенного отказа	42
3 Комплексные показатели надежности	47
4 Расчет показателей надежности.....	53
5 Предельное состояние (износы) деталей, сопряжений сборочных единиц и механизмов машин	61
6 Методы испытаний и контроля надежности сельскохозяйственной техники. Классификация методов	66
6.1 Стендовые и полигонные испытания.....	67
6.2 Уплотненные по времени испытания.....	68
6.3 Учащенные испытания	69
6.4 Ужесточенные по нагружению испытания	71
7 Эксплуатационные испытания машин на надежность.....	72
8 Испытания по параметру состояния и нагруженности.	76
Техническая диагностика надежности.....	76
9 Контрольные испытания машин на надежность.....	81
10 Основные направления повышения надежности сельскохозяйственной техники. Конструктивные и технологические мероприятия повышения надежности.....	83

11 Эксплуатационные мероприятия повышения надежности.....	86
12 Мероприятия по повышению долговечности машин.	
Ремонтные мероприятия повышения надежности машин.....	88
13 Оценка безопасности, эргономичности и охраны окружающей среды при испытаниях новой техники.....	92
14 Агротехническая оценка как метод определения качества выполнения машиной технологического процесса. Общие положения по агротехнической оценке сельскохозяйственных машин	93
15 Этапы агротехнической оценки для определения качества выполнения машиной технологического процесса	96
16 Агротехническая оценка косилок и валковых жаток.....	98
17 Агротехническая оценка кормоуборочных комбайнов.....	108
18 Агротехническая оценка зерноуборочных комбайнов.....	110
19 Агротехническая оценка машин для химической защиты растений....	119
20 Агротехническая оценка машин и орудий для обработки почвы. Агротехническая оценка машин для внесения удобрений	124
20.1 Агротехническая оценка машин и орудий для обработки почвы.....	124
20.2 Агротехническая оценка машин для внесения удобрений	129
21 Метрологическое обеспечение при проведении испытаний с/х машин	133
22 Техническая экспертиза машин. энергетические показатели машин. Эксплуатационноэкономические показатели машин.....	138
22.1 Техническая экспертиза машин	138
22.2 Энергетические показатели машин.....	139
22.3 Эксплуатационно–экономические показатели машин.....	141
23 Основы методики статической обработки результатов измерений при проведении испытаний.....	144
24 Анализ вероятностных связей между факторами и результатами испытаний. основные положения.....	146
25 Сущность метода ранговой корреляции при проведении испытаний и исследовании машин.....	151
26 Дисперсионный анализ результатов испытаний. Последовательность проведения дисперсионного анализа.....	155
26.1 Дисперсионный анализ результатов испытаний.....	155
26.2 Последовательность проведения дисперсионного анализа	158
27 Метод случайного баланса. Порядок проведения исследования методом случайного баланса	160
27.1 Метод случайного баланса	160
27.2 Порядок проведения исследования методом случайного баланса	161
28 Полный факторный эксперимент. Алгоритм эксперимента.....	165
28.1 Полный факторный эксперимент	165
28.2 Алгоритм эксперимента	168

29 Дробный факторный эксперимент. Алгоритм эксперимента.....	169
29.1 Дробный факторный эксперимент	169
29.2 Алгоритм эксперимента	173
30 Классификация тормозных механизмов испытательных стендов	174
31 Испытание зубчатых передач с/х машин на контактную прочность. Заедание и износ.....	177
32 Машины и стенды для испытаний деталей с/х машин.....	184
Литература	18491

1 Основные понятия и определения теории надежности

1.1 Предмет и задачи теории надежности

Одним из ключевых понятий, используемым в теории надежности, является понятие **системы** – упорядоченной совокупности взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, образующих единое функциональное целое (предназначенное для решения определенных задач), обладающей новым свойством, отличным от свойств ее элементов. **Элемент системы** – часть системы, выполняющая определенные функции, не делимая на составные части при данном уровне рассмотрения.

В дальнейшем, говоря о системе или ее элементе, будем иметь в виду абстрактный объект. Каждый объект характеризуется рядом выходных параметров, допустимые значения которых в процессе эксплуатации оговорены в нормативно-технической (стандарты, технические условия) и (или) конструкторской (проектной) документации.

Предметом теории надежности является изучение закономерностей изменения показателей качества объектов во времени и разработка методов, позволяющих с минимальной затратой времени и ресурсов обеспечить необходимую продолжительность и эффективность их работы [1].

Можно выделить следующие основные **задачи теории надежности**:

- анализ значений показателей надежности объектов, а также динамики их изменения во времени;
- синтез систем по заданным критериям надежности;
- обеспечение и повышение надежности объектов.

Исторически наука о надежности развивалась по двум основным направлениям. *Математическое направление* возникло в радиоэлектронике и связано с развитием математических методов оценки надежности, разработкой методов статистической обработки информации о надежности, обоснованием структур систем, обеспечивающих высокий уровень надежности. Теоретической базой этого направления являются: теория вероятностей, математическая статистика, теория случайных процессов, теория массового обслуживания, математическое моделирование и другие разделы математики.

Физическое направление возникло в машиностроении и связано с изучением природы отказов, разработкой методов расчета на прочность, износостойкость, теплостойкость и др. Теоретической базой

этого направления являются естественные науки, изучающие различные аспекты разрушения, старения и изменения свойств материалов: теории упругости, пластичности и ползучести, теория усталостной прочности, механика разрушения, трибология, трибофатика, физико-химическая механика материалов и др.

В настоящее время наблюдается процесс активного синтеза перечисленных направлений, взаимного перенесения рациональных идей из одной области в другую и формирование на этой основе единой науки о надежности.

1.2 Основные понятия теории надежности

1.2.1 Надежность

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Надежность – комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, другие свойства или их сочетания (рисунок 1.1).

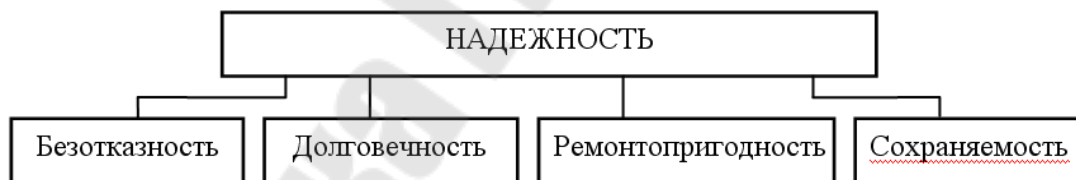


Рисунок 1.1 – Составляющие надежности по ГОСТ 27.002-89

1.2.2. Состояния объекта. События, связанные с отказами и восстановлением

Перед рассмотрением основных составляющих надежности рассмотрим технические состояния, в которых могут находиться объекты (с позиции надежности): исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное и предельное [2].

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

Если хотя бы по одному из требований объект не соответствует нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, состояние объекта считается **неисправным**.

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

Повреждение – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния (рисунок 1.2).

Состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, называется **неработоспособным**.

Для сложных объектов возможно наличие нескольких работоспособных состояний, отличающихся уровнем эффективности применения объекта. Возможно также наличие нескольких неработоспособных состояний, при этом из всего множества неработоспособных состояний выделяют частично неработоспособные состояния, при которых объект способен частично выполнять требуемые функции.

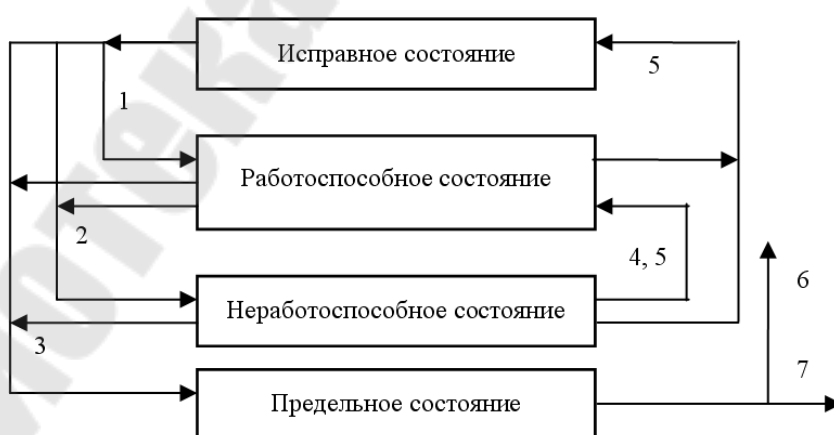


Рисунок 1.2 – Схема основных состояний и событий в объекте: 1 – повреждение; 2 – отказ; 3 – ресурсный отказ; 4 – восстановление; 5 – ремонт; 6 – капитальный ремонт; 7 – списание

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, определяемое некоторыми формальными критериями (рисунок 1.2).

Критерий отказа – признак или совокупность признаков неработоспособного состояния объекта, установленных в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Типичными критериями отказов являются, например:

- прекращение выполнения объектом заданных функций (отказ функционирования);
- снижение качества функционирования по одному или нескольким параметрам (производительность, мощность, точность и др.) за пределы допустимого уровня;
- внешние проявления, связанные с наступлением или предпосылками наступления неработоспособного состояния (шум, вибрации, перегрев и др.).

Процесс перевода объекта из неработоспособного в работоспособное состояние называется восстановлением. Комплекс операций по восстановлению исправного или работоспособного состояния с восполнением ресурса объекта или его элементов называется ремонтом (рисунок 1.2).

Ресурсный отказ – событие, в результате которого объект достигает предельного состояния (рисунок 1.2).

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно (рисунок 1.2).

Предельное состояние обусловлено физической невозможностью дальнейшей эксплуатации объекта либо недопустимым снижением его эффективности, либо требованиями безопасности и определяется установленными критериями предельного состояния.

Критерий предельного состояния – признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией. Типичные критерии предельных состояний:

- отказ одной или нескольких составных частей, восстановление или замена которых на месте эксплуатации не предусмотрены документацией (должны выполняться на предприятии-изготовителе или на специализированном ремонтном предприятии);

- механический износ ответственных деталей (узлов) или снижение физических свойств материалов до предельно допустимого уровня;
- снижение наработки на отказ (повышение интенсивности отказов) ниже (выше) допустимого уровня;
- повышение установленного уровня текущих (суммарных) затрат на техническое обслуживание и ремонт или другие признаки, определяющие экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации объекта.

1.2.3 Составляющие надежности

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Наработка – продолжительность или объем работы объекта. Наработка определяется видом объекта и особенностями его применения, например, наработка двигателя измеряется в моточасах, автомобиля – в километрах пробега, станка-автомата – количеством обработанных деталей, реле – количеством циклов срабатывания и т. п. Наработка может определяться до отказа, между отказами, до наступления предельного состояния или до некоторого фиксированного момента времени.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Основное отличие понятий «безотказность» и «долговечность» состоит в том, что понятие «безотказность» предполагает работу объекта, абстрагированную от вмешательства извне для поддержания его работоспособности. Понятие «долговечность» предполагает рассмотрение работоспособности объекта за весь период его эксплуатации и учитывает, что длительное функционирование объекта (особенно сложного) невозможно без проведения мероприятий по поддержанию и восстановлению его работоспособности, утрачиваемой в процессе эксплуатации.

Показатели долговечности могут выражаться через ресурс или срок службы. Наработка объекта от начала эксплуатации (или ее возобновления после ремонта) до перехода в предельное состояние называется ресурсом (техническим ресурсом). Ресурс невозстанавливаемого объекта определяется через его наработку до отказа, а восстанавливаемого объекта – равен его суммарной наработке до *ресурс-*

ного отказа (периоды функционирования чередуются с периодами восстановления работоспособности). Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации объекта от начала его применения (возобновления эксплуатации после ремонта) до наступления предельного состояния.

Назначенный ресурс – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния. Аналогично определяется понятие «назначенный срок службы». По истечении назначенного ресурса (назначенного срока службы) объект должен быть изъят из эксплуатации и должно быть принято решение, предусмотренное соответствующей нормативно-технической документацией: направление в ремонт, списание, уничтожение, проверка и установление нового назначенного срока (ресурса) и т. д. Указанные временные понятия применяются по отношению к объектам, предельные состояния которых приводят к большим экономическим потерям, угрожают безопасности человека или приводят к вредному воздействию на окружающую среду.

Остаточный ресурс (остаточный срок службы) – суммарная наработка (календарная продолжительность эксплуатации) объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, а также поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Ремонтопригодность объекта характеризуется оперативной продолжительностью (трудоемкостью) операций обнаружения отказа, поиска и устранения причин и последствий отказа. При этом полная продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта, кроме оперативной продолжительности (времени, затрачиваемого непосредственно на операции по восстановлению работоспособности объекта), включает в себя время, затрачиваемое на организационные мероприятия (поиск ремонтной документации, доставка запасных частей и т. п.), продолжительность которых не связана с уровнем ремонтпригодности объекта.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Это свойство особенно важно для объектов, эксплуатируемых сезонно (сельскохозяйственные, асфальтоукладочные, снегоуборочные машины) или которые применяют по назначению в аварийных или особых условиях (противопожарная техника, средства аварийной сигнализации и т. п.).

1.3 Основные показатели надежности, их взаимосвязь

1.3.1 Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов

Вероятность безотказной работы $P(t)$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки $t > 0$ отказ объекта не возникнет:

$$P(t) = P(\xi > t) = 1 - P(\xi \leq t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(x) dx, \quad (1.1)$$

где ξ – наработка объекта до отказа; $F(t)$ – вероятность отказа в течение заданной наработки t (функция распределения случайной величины ξ); $f(x)$ – функция плотности распределения случайной величины ξ .

Из формулы (1.1) следует, что вероятность отказа $F(t)$ и вероятность безотказной работы $P(t)$ равны площадям криволинейных трапеций, ограниченных функцией плотности распределения $f(t)$ и осью абсцисс на интервалах $[0, t]$ и (t, ∞) соответственно (рисунок 1.3).

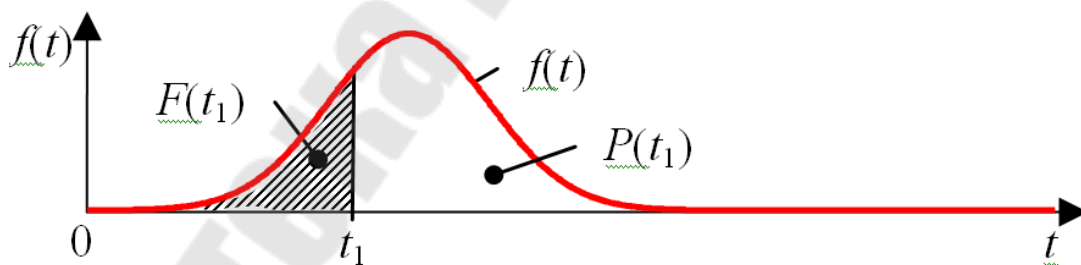


Рисунок 1.3 – Графическая интерпретация вероятности безотказной работы и вероятности отказа

С ростом наработки вероятность безотказной работы невосстанавливаемого объекта $P(t)$ монотонно уменьшается от 1 при $t=0$, асимптотически приближаясь к 0 при $t \rightarrow \infty$, а вероятность отказа $F(t)$ возрастает от 0 до 1 (рисунок 1.4).

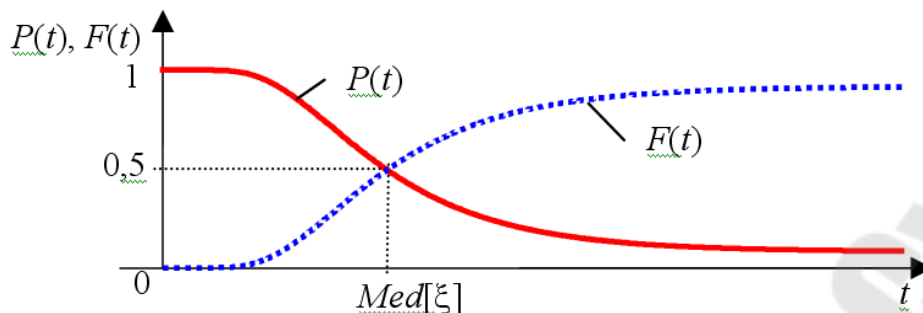


Рисунок 1.4 – Зависимость вероятности безотказной работы и вероятности отказа объекта от наработки

Вероятность безотказной работы объекта в интервале наработки $(t, t + \Delta t)$ есть условная вероятность $P(t, t + \Delta t)$ того, что на этом интервале наработки отказ объекта не наступит, определяемая при условии, что объект сохранил работоспособность к началу этого интервала t :

$$P(t, t + \Delta t) = P(\xi > t + \Delta t | \xi > t) = \frac{P(t + \Delta t)}{P(t)} = \frac{\int_t^{\infty} f(x) dx}{\int_t^{\infty} f(x) dx}, \quad (1.2)$$

где $P(t + \Delta t)$ – вероятность безотказной работы объекта на интервале наработки $(0, t + \Delta t)$; $P(t)$ – вероятность безотказной работы объекта на интервале наработки $(0, t)$.

Средняя наработка до отказа \bar{t} – математическое ожидание наработки объекта до отказа:

$$\bar{t} = M[\xi] = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t dF(t) = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.3)$$

Последнее равенство можно доказать, если взять по частям первый интеграл. Таким образом, *средняя наработка до отказа равна площади криволинейной трапеции, ограниченной функцией вероятности безотказной работы $P(t)$ от наработки объекта и осью абсцисс* (рисунок 1.4).

Гамма-процентная наработка до отказа t_γ – наработка до отказа, которая обеспечивается для $\gamma \cdot 100\%$ объектов рассматриваемого типа:

$$P(t_\gamma) = \int_{t_\gamma}^{\infty} f(t) dt = \gamma. \quad (1.4)$$

Вероятность отказа (функция распределения случайной величины ξ – наработки объекта до отказа) в течение наработки t_γ составляет (рисунок 1.5)

$$F(t_\gamma) = 1 - P(t_\gamma) = \int_0^{t_\gamma} f(t) dt = 1 - \gamma, \quad (1.5)$$

т. е. гамма-процентная наработка до отказа есть квантиль распределения случайной величины ξ уровня $(1 - \gamma)$; соответственно $(1 - \gamma) \cdot 100\%$ есть процент объектов, для которых отказы в течение наработки t_γ в среднем имеют место.

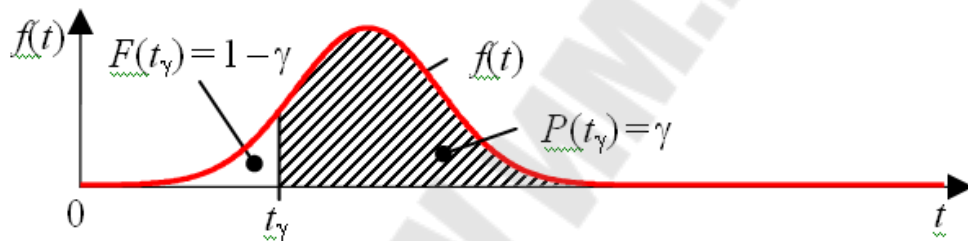


Рисунок 1.5 – Графическая интерпретация гамма-процентной наработки до отказа

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ в момент наработки t – предел отношения вероятности отказа объекта в полуинтервале наработки $(t, t + \Delta t]$ при условии, что к моменту t отказ еще не наступил, к величине интервала Δt при его стремлении к нулю, т. е.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < \xi \leq t + \Delta t | \xi > t)}{\Delta t}. \quad (1.6)$$

Преобразуем выражение (1.6), применяя к условной вероятности в числителе теорему умножения для зависимых событий $\{t < \xi \leq t + \Delta t\}$ и $\{\xi > t\}$:

$$\begin{aligned} P(t < \xi \leq t + \Delta t | \xi > t) &= \frac{P(\{t < \xi \leq t + \Delta t\} \cap \{\xi > t\})}{P(\xi > t)} = \\ &= \frac{P(t < \xi \leq t + \Delta t)}{P(\xi > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{P(\xi > t)}. \end{aligned}$$

Подставляя полученное выражение в формулу (1.6), получим

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{P(\xi > t) \Delta t} = \frac{1}{P(\xi > t)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t}.$$

Выражая вероятность $P(\xi > t)$ через функцию распределения $F(t)$ наработки объекта до отказа ξ ,

$$P(\xi > t) = 1 - P(\xi \leq t) = 1 - F(t),$$

и, учитывая взаимосвязь функции распределения $F(t)$ и функции плотности распределения $f(t)$ наработки до отказа ξ

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = F'(t) = f(t),$$

получим следующее выражение для интенсивности отказов:

$$\lambda(t) = \frac{1}{P(\xi > t)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (1.7)$$

Несложно показать, что

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1 - P(t))}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.8)$$

Следовательно,

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = -\frac{d}{dt} [\ln P(t)]. \quad (1.9)$$

Умножая обе части этого равенства на $(-dt)$ и интегрируя в пределах от 0 до t , получаем

$$-\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t d[\ln P(t)] = \ln P(t) \Big|_0^t = \ln P(t) - \ln P(0) = \ln P(t) - \ln(1) = \ln P(t).$$

Потенцируя последнее равенство, получаем выражение, которое называют **основной формулой надежности**:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right). \quad (1.10)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ невосстанавливаемых технических объектов (рисунок 1.6), как правило, определяется суммой интенсивности отказов объекта вследствие наличия скрытых дефектов изготовления $\lambda_1(t)$ (рисунок 1.6), интенсивности внезапных отказов объекта $\lambda_2(t)$ и интенсивности износных и деградационных отказов $\lambda_3(t)$ (рисунок 1.6). На этой кривой $\lambda(t)$ выделяют три характерных участка: период приработки, период нормальной эксплуатации и период старения (рисунок 1.6).

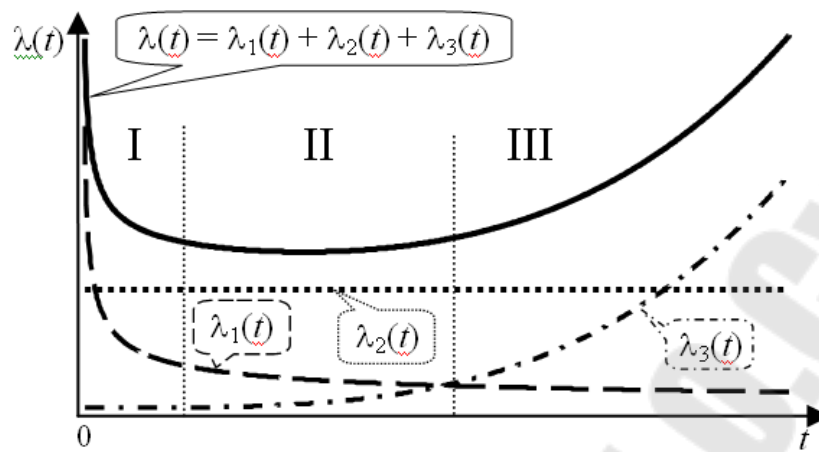


Рисунок 1.6 – Зависимость интенсивности отказов технических объектов от наработки:

- I – период приработки;
- II – период нормальной эксплуатации;
- III – период старения

Начальный период эксплуатации (период приработки). Повышенный уровень интенсивности отказов на этом участке объясняется наличием скрытых дефектов изготовления, которые проявляются в начальный период эксплуатации объекта. Функция интенсивности отказов объектов вследствие наличия скрытых дефектов изготовления представлена на рисунке 1.6 кривой $\lambda_1(t)$.

Контроль качества материалов и элементов, приработочные испытания и другие специальные мероприятия позволяют существенно уменьшить интенсивность отказов системы в этот период. Поэтому обычно в расчетах надежности данный период игнорируется.

Пример 1.1. Допустим, интенсивность отказов объекта описывается степенной функцией вида (рисунок 1.7)

$$\lambda(t) = \alpha \beta^{-\alpha} t^{\alpha-1}. \quad (1.11)$$

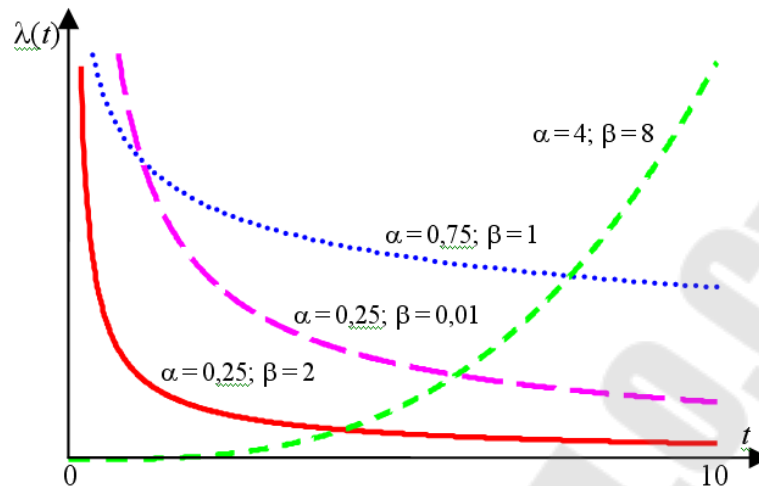


Рисунок 1.7 – Интенсивность отказов, описываемая степенной функцией

Тогда, в соответствии с основной формулой надежности (1.10) и выражением (1.7)

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \frac{\alpha x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} dx\right) = \exp\left(-\frac{\alpha t^\alpha}{\beta^\alpha \alpha}\right) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right), \quad (1.12)$$

$$f(t) = \lambda(t)P(t) = \frac{\alpha t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right). \quad (1.13)$$

Таким образом, при условии (1.11) наработка объекта до отказа подчиняется распределению Вейбулла (приложение А, п. А.3).

Период нормальной эксплуатации. В течение этого периода, когда уровень накопленных износных повреждений еще не настолько высок, чтобы вызвать ухудшение выходных качественных параметров объекта, интенсивность отказов обычно имеет стабильно низкое значение, уровень которого определяется особенностями вида объекта, его исходным качеством, режимами и условиями эксплуатации. Обычно на этом периоде эксплуатации наблюдается несколько характерных для объекта видов внезапных отказов (поломки мелкоразмерного инструмента технологических систем обработки материалов резанием, поломки деталей предохранительных устройств и т. п.), которые в совокупности определяют уровень интенсивности отказов на этом участке. Функция интенсивности отказов объектов вследствие внезапных отказов представлена на рисунке 1.6 кривой $\lambda_2(t)$.

Пример 1.2. В частном случае, при $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ (рисунок 1.8) в соответствии с (1.10) наработка объекта до отказа подчиняется экс-

по экспоненциальному закону распределения (см. приложение А, п. А.3), который широко используется для моделирования внезапных отказов элементов и систем.

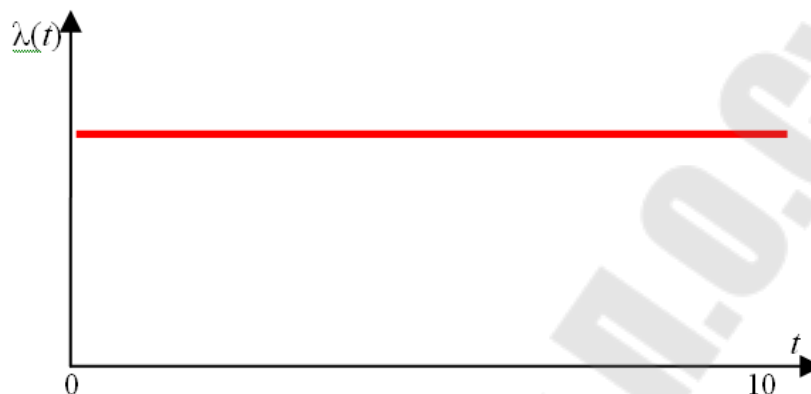


Рисунок 1.8 – Постоянная интенсивность отказов

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) = \exp\left(-\int_0^t \lambda dt\right) = e^{-\lambda t}; \quad (1.14)$$

$$F(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad (1.15)$$

$$f(t) = \lambda(t)P(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (1.16)$$

Заключительный период эксплуатации (период старения). В течение этого периода эксплуатации происходит прогрессивное ухудшение выходных параметров объекта, вызванное накопленными износными и деградиационными повреждениями, что вызывает монотонное возрастание интенсивности отказов. Функция интенсивности отказов объектов вследствие износных отказов представлена на рисунке 1.6 кривой $\lambda_3(t)$.

Пример 1.3. Пусть интенсивность отказов может быть описана линейно возрастающей функцией вида (рисунок 1.9)

$$\lambda(t) = c \cdot t. \quad (1.17)$$

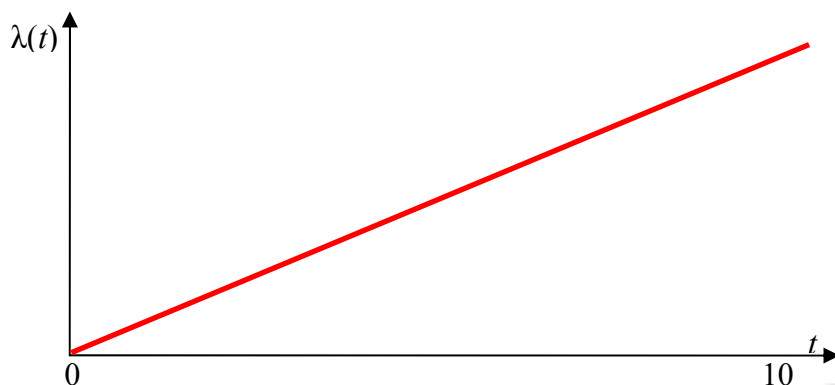


Рисунок 1.9 – Линейно возрастающая интенсивность отказов

Тогда в соответствии с основной формулой надежности (1.10) и выражением (1.7)

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t c t dt\right) = \exp\left(-\frac{ct^2}{2}\right), \quad (1.18)$$

$$f(t) = \lambda(t)P(t) = ct \cdot \exp\left(-\frac{ct^2}{2}\right). \quad (1.19)$$

Таким образом, при условии (1.17), наработка объекта до отказа имеет распределение Рэля (где $c = \beta^{-2}$, см. приложение А, п. А.3).

Типичная кривая функции интенсивности отказов $\lambda(t)$ организационных систем и программного обеспечения ЭВМ приведена на рисунке 1.10.

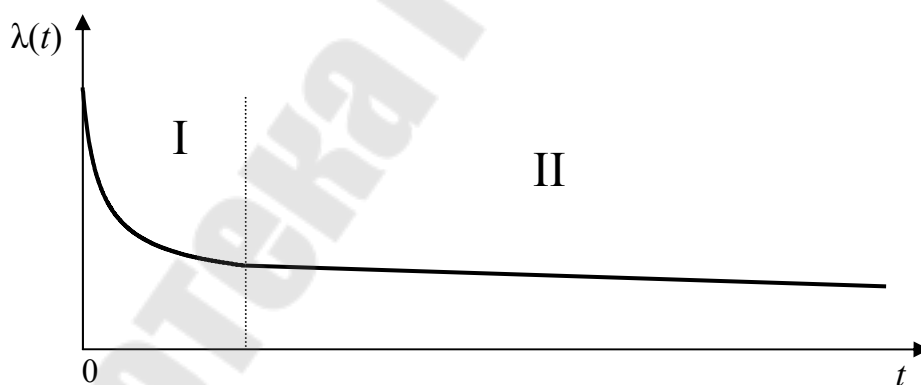


Рисунок 1.10 – Функция интенсивности отказов организационных систем и программного обеспечения ЭВМ:

I – период приработки; II – нормальной эксплуатации

В таблице 1.1 представлены сведения об интенсивности отказов некоторых объектов.

Таблица 1.1 – Интенсивности отказов некоторых объектов

Объект / система	Интенсивность отказов, 1/ч
Зубчатые передачи цилиндрические одноступенчатые	$1,2 \cdot 10^{-3}$
то же червячные	$2,0 \cdot 10^{-3}$
» цилиндрические коробок передач	$6,8 \cdot 10^{-3}$
Валы трансмиссий	$3,2 \cdot 10^{-7}$
1000 км нефтепровода	$4,6 \cdot 10^{-5}$
Пассажирский самолет	10^{-4}
Станционное электронное оборудование ADM-16/1, используемое в волоконно-оптических системах связи	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Лазер 1550 мкм волоконно-оптических систем связи	$2 \cdot 10^{-5}$
Изоляция 1 км кабеля	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Жилы 1 км кабеля	$0,8 \cdot 10^{-6}$

Важной характеристикой обслуживаемых объектов является **остаточная наработка до отказа** ξ_τ – наработка объекта от момента контроля технического состояния τ до момента отказа ξ (рисунок 1.11):

$$\xi = \tau + \xi_\tau \quad (\text{при условии } \{\xi > \tau\}). \quad (1.20)$$

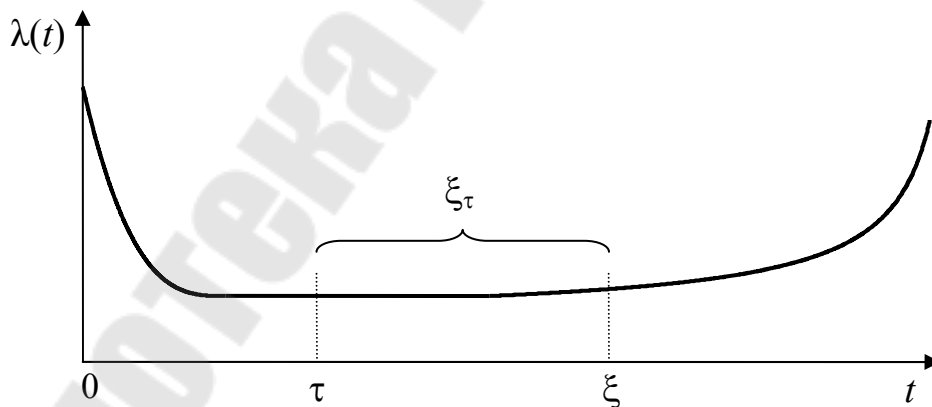


Рисунок 1.11 – Интерпретация остаточной наработки объекта до отказа

Вероятность безотказной работы объекта, определяемая по его остаточной наработке, отсчитываемой с момента контроля технического состояния объекта τ ,

$$P_{\tau}(t) = P(\xi_{\tau} > t | \xi > \tau) = P(\xi > \tau + t | \xi > \tau), \quad (1.21)$$

где условие $\{\xi > \tau\}$ указывает на то, что в момент контроля τ объект находился в работоспособном состоянии.

В соответствии с выражениями (1.2) и (1.10) получаем

$$\begin{aligned} P_{\tau}(t) &= P(\xi > \tau + t | \xi > \tau) = \frac{P(\tau + t)}{P(\tau)} = \\ &= \exp\left(-\int_0^{\tau+t} \lambda(z) dz\right) / \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda(z) dz\right) = \exp\left(-\int_{\tau}^{\tau+t} \lambda(z) dz\right), \end{aligned} \quad (1.22)$$

из чего следует, что вероятность безотказной работы объекта, определяемая по его остаточной наработке, не зависит от интенсивности отказов объекта на интервале $(0, \tau)$, т. е. до момента контроля технического состояния объекта.

Функция плотности распределения остаточной наработки до отказа $f_{\tau}(t)$ (случайной величины ξ_{τ}) определяется в соответствии с (1.8) выражением

$$\begin{aligned} f_{\tau}(t) &= -\frac{dP_{\tau}(t)}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[\frac{P(\tau + t)}{P(\tau)} \right] = -\frac{1}{P(\tau)} \frac{dP(\tau + t)}{dt} = \left| \frac{u = \tau + t}{du = dt} \right| = \\ &= -\frac{1}{P(\tau)} \frac{dP(u)}{du} = \frac{f(u)}{P(\tau)} = \frac{f(\tau + t)}{P(\tau)}, \end{aligned} \quad (1.23)$$

где f – функция плотности распределения наработки объекта до отказа.

Средняя остаточная наработка до отказа – математическое ожидание величины ξ_{τ}

$$M[\xi_{\tau}] = \int_0^{\infty} t f_{\tau}(t) dt = \int_0^{\infty} t \frac{f(\tau + t)}{P(\tau)} dt = \frac{1}{P(\tau)} \int_0^{\infty} t f(\tau + t) dt. \quad (1.24)$$

Установленная наработка до отказа t_y – наработка объекта, в течение которой отказ объекта считается невозможным событием. Данный показатель предполагает, что $f(t) = 0$ при $t < t_y$ (рисунок 1.12).

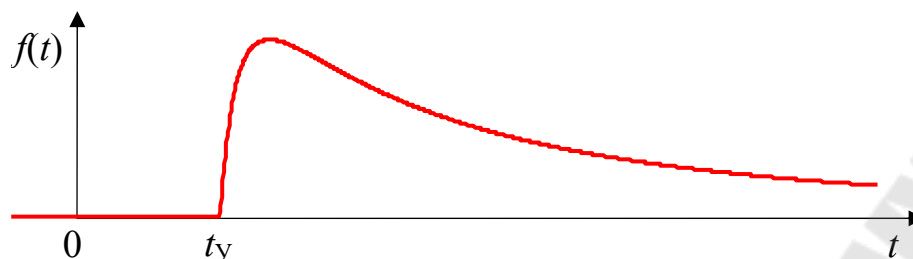


Рисунок 1.12 – К определению понятия установленной наработки до отказа

Для оценки безотказности высоконадежных объектов, подверженных параметрическим отказам (см. разд. 2), когда основные показатели малоинформативны (например, вероятность безотказной работы $P(t) \approx 1$), может использоваться **запас надежности** объекта K_n :

$$K_n = \frac{X_{\max}}{X_{\text{ex}}}, \quad (1.25)$$

где X_{\max} – максимально допустимое значение выходного параметра X объекта (например, износа), соответствующее наступлению отказа; X_{ex} – наибольшее эксплуатационное значение выходного параметра X по всей совокупности объектов рассматриваемого типа.

На интервале наработки $(0, t_y)$ запас надежности объекта $K_n > 1$; при наработке $t \geq t_y$ (рисунок 1.12) запас надежности объекта считается исчерпанным ($K_n \leq 1$), а отказы физически возможны.

1.3.2 Показатели безотказности восстанавливаемых объектов

Для характеристики безотказности восстанавливаемых объектов при рассмотрении периода до первого отказа или между двумя последовательными отказами могут использоваться те же показатели, что и для невозстанавливаемых объектов. Ниже приведены специфические показатели безотказности восстанавливаемых объектов.

Средняя наработка на отказ $T(t)$ – отношение суммарной наработки t восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки:

$$T(t) = \frac{t}{M[r(t)]}, \quad (1.26)$$

где t – суммарная наработка объекта; $r(t)$ – число отказов объекта, наступивших в течение суммарной наработки t .

В таблице 1.2 представлены сведения о показателях безотказности некоторых восстанавливаемых объектов.

Таблица 1.2 – Показатели безотказности некоторых объектов

Объект	Средняя наработка на отказ
Кормоуборочный комбайн КСК-100 («Гомсельмаш», 1980 г.)	7 моточасов
Зерноуборочный комбайн КЗР-10 («Гомсельмаш»)	70 моточасов
Универсальное энергетическое средство УЭС-2-250А «Полесье»	80 моточасов
Армейский грузовой автомобиль США грузоподъемностью 2,5 т	5 тыс. км пробега

Математическое ожидание числа отказов восстанавливаемого объекта в течение суммарной наработки t также называют **ведущей функцией потока отказов**:

$$\Omega(t) = M[r(t)]. \quad (1.27)$$

Параметр потока отказов $\omega(t)$ – отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки. Иными словами, параметр потока отказов есть производная по наработке от ведущей функции потока отказов:

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t + \Delta t) - r(t)]}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t + \Delta t)] - M[r(t)]}{\Delta t} = \Omega'(t). \quad (1.28)$$

В свою очередь, ведущая функция потока отказов может быть выражена через параметр потока отказов:

$$\Omega(t) = \int_0^t \omega(t) dt. \quad (1.29)$$

Математическое ожидание числа отказов объекта на интервале наработки (t_1, t_2) :

$$M[r(t_2) - r(t_1)] = M[r(t_2)] - M[r(t_1)] = \Omega(t_2) - \Omega(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt. \quad (1.30)$$

Осредненный параметр потока отказов $\omega(t_1, t_2)$ – отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за конечную наработку к значению этой наработки:

$$\omega(t_1, t_2) = \frac{M[r(t_2) - r(t_1)]}{t_2 - t_1}. \quad (1.31)$$

1.3.3 Показатели долговечности

Гамма-процентный ресурс $t_{p\gamma}$ – наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах (рисунок 1.13):

$$\int_{t_{p\gamma}}^{\infty} f_p(t) dt = \gamma, \quad (1.32)$$

где $f_p(t)$ – функция плотности распределения случайной величины ξ_p – ресурса объекта.

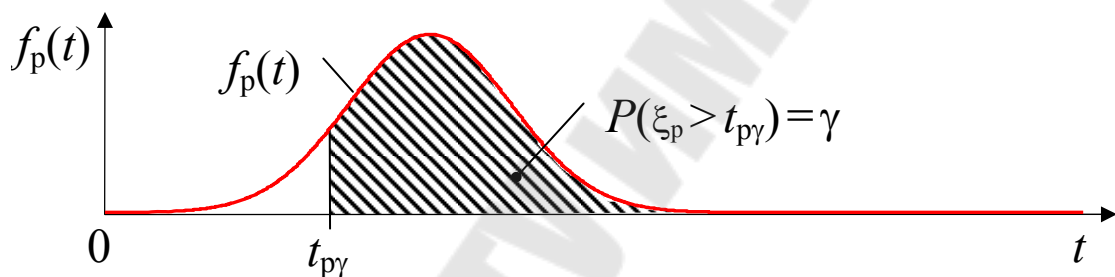


Рисунок 1.13 – Графическая интерпретация гамма-процентного ресурса

Средний ресурс \bar{t}_p – математическое ожидание ресурса объекта:

$$\bar{t}_p = M[\xi_p] = \int_0^{\infty} t f_p(t) dt. \quad (1.33)$$

Гамма-процентный срок службы $t_{c\gamma}$ – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах:

$$\int_{t_{c\gamma}}^{\infty} f_c(t) dt = \gamma, \quad (1.34)$$

где $f_c(t)$ – функция плотности распределения случайной величины ξ_c – срока службы объекта.

Средний срок службы \bar{t}_c – математическое ожидание срока службы объекта:

$$\bar{t}_c = M[\xi_c] = \int_0^{\infty} t f_c(t) dt. \quad (1.35)$$

В таблицах 1.3 и 1.4 представлены сведения о показателях долговечности и безотказности некоторых объектов.

Таблица 1.3 – Показатели долговечности некоторых объектов

Объект	90-гамма-процентный ресурс
Подшипники качения бытовых приборов	0,5–4,0 тыс. ч
то же автомобилей	1–10 тыс. ч
» шахтных насосов	100 тыс. ч
Зубчатые передачи турбогенераторов	100 тыс. ч
Автомобиль МАЗ-200 (выпуска 1964 г.)	120 тыс. км пробега
Современный МАЗ-5440	800 тыс. км пробега
Трактор «Беларус» МТЗ-5 (выпуска 1957 г.)	2 тыс. моточасов
Трактор МТЗ-80 (выпуска 1974 г.)	9 тыс. моточасов
Рекомендация стандарта ASAE	
Гусеничный трактор	16 тыс. моточасов
Прицепной зерноуборочный комбайн	2 тыс. моточасов
Самоходный зерноуборочный комбайн	3 тыс. моточасов
Картофелеуборочный комбайн	2,5 тыс. моточасов
95-гамма-процентный ресурс	
Самолет	40 тыс. летных ч
Грузовой и магистральный тепловоз	1,8 млн км пробега
90-гамма-процентный срок службы	
Судовые механизмы	20 лет

Таблица 1.4 – Заданные в ТУ значения показателей долговечности и безотказности колесных тракторов «Беларус»

Класс трактора	Средний срок службы, лет	Средняя наработка до отказа, моточас
0,6	10	300
1,4	10	500–700
2,0	10	600
3,0	10	550
5,0	12–15	750

1.3.4 Показатели ремонтпригодности

Вероятность восстановления $P_B(t)$ – вероятность того, что время восстановления объекта не превысит заданное значение t :

$$P_B(t) = P(\xi_B \leq t) = \int_0^t f_B(t) dt, \quad (1.36)$$

где $f_B(t)$ – функция плотности распределения случайной величины ξ_B – времени восстановления работоспособного состояния объекта (рисунок 1.14).

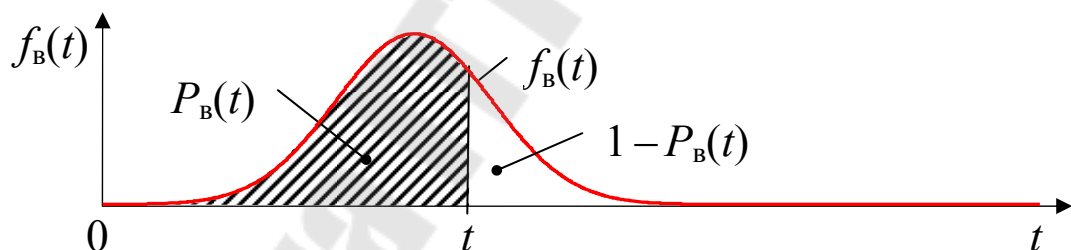


Рисунок 1.14 – Графическая интерпретация вероятности восстановления

Гамма-процентное время восстановления $t_{B\gamma}$ – время, необходимое для восстановления объекта с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах (рисунок 1.15):

$$P_B(t_{B\gamma}) = P(\xi_B \leq t_{B\gamma}) = \int_0^{t_{B\gamma}} f_B(t) dt = \gamma. \quad (1.37)$$

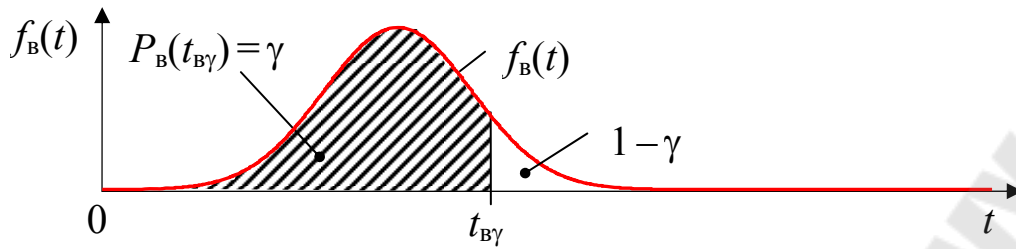


Рисунок 1.15 – Графическая интерпретация гамма-процентного времени восстановления

Среднее время восстановления \bar{t}_B – математическое ожидание времени восстановления работоспособности объекта:

$$\bar{t}_B = M[\xi_B] = \int_0^{\infty} t f_B(t) dt. \quad (1.38)$$

Интенсивность восстановления $\mu(t)$ – предел отношения вероятности восстановления работоспособного состояния объекта в полуинтервале времени $(t, t + \Delta t]$ при условии, что к моменту t восстановление еще не завершено, к величине интервала Δt при его стремлении к нулю, т. е.

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < \xi_B \leq t + \Delta t | \xi_B > t)}{\Delta t} = \frac{f_B(t)}{1 - P_B(t)}. \quad (1.39)$$

Вывод выражения справа аналогичен приведенному в (1.6)–(1.7) выводу выражения для интенсивности отказов.

1.3.5 Показатели сохраняемости

Гамма-процентный срок сохраняемости $t_{cx\gamma}$ – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах (рисунок 1.16):

$$\int_{t_{cx}}^{\infty} f_{cx}(t) dt = \gamma, \quad (1.40)$$

где $f_{cx}(t)$ – функция плотности распределения случайной величины ξ_{cx} – срока сохраняемости объекта.

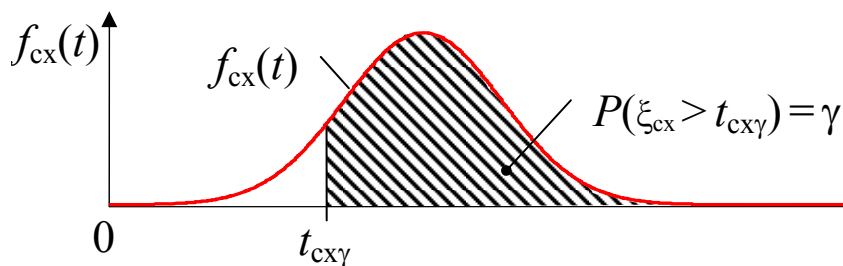


Рисунок 1.16 – Графическая интерпретация гамма-процентного срока сохраняемости

Средний срок сохраняемости $\overline{t_{cx}}$ – математическое ожидание срока сохраняемости:

$$\overline{t_{cx}} = M[\xi_{cx}] = \int_0^{\infty} t f_{cx}(t) dt. \quad (1.41)$$

Назначенный срок хранения – срок хранения, по достижении которого хранение объекта должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

1.3.6 Комплексные показатели надежности

Коэффициент готовности $K_r(t)$ – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени t , кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается (например, профилактика, техническое обслуживание, ожидание использования по назначению и т. д.). Коэффициент готовности является комплексным показателем надежности, отражающим свойства безотказности и ремонтпригодности. Низкие значения $K_r(t)$ свидетельствуют о том, что мероприятия по техническому обслуживанию не полностью выполняют свою роль.

Значение коэффициента готовности для *стационарного процесса функционирования* объектов (когда $K_r(t) = K_r$, т. е. не изменяется во времени) можно определить из выражения:

$$K_r = \frac{T}{T + \overline{t_b}}, \quad (1.42)$$

где T – средняя наработка на отказ восстанавливаемого объекта, определяемая выражением (1.26); $\overline{t_b}$ – среднее время восстановления, определяемое выражением (1.38).

В таблице 1.5 представлены нормируемые значения коэффициента готовности некоторых объектов.

Таблица 1.5 – Нормируемые значения коэффициента готовности некоторых систем

Объект	Коэффициент готовности
100 км волоконно-оптических линий связи	0,99989
Микропроцессорная централизация стрелок и сигналов	0,9995

Коэффициент оперативной готовности $K_{ор}(t, t + \Delta t)$ – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени t , кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени $(t, t + \Delta t)$. Показатель определяется выражением

$$K_{ор}(t, t + \Delta t) = K_{г}(t) P(t, t + \Delta t), \quad (1.43)$$

где $K_{ор}(t)$ – значение коэффициента готовности объекта в момент времени t ; $P(t, t + \Delta t)$ – вероятность безотказной работы объекта в интервале наработки $(t, t + \Delta t)$, определяемая выражением (1.2).

Коэффициент оперативной готовности характеризует надежность объекта, необходимость в применении которого возникает в произвольный момент времени и требуется непрерывно в течение заданного интервала времени.

Коэффициент технического использования $K_{ти}$ – отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период (при этом не учитываются простои по организационным причинам). Он характеризует долю времени нахождения объекта в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации и обычно оценивается за длительный период эксплуатации (от начала эксплуатации до капитального ремонта, между капитальными ремонтами, за весь период эксплуатации):

$$K_{\text{ти}} = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{рем}}}, \quad (1.44)$$

где $T_{\text{раб}}$ – суммарное время пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый длительный период эксплуатации; $T_{\text{рем}}$ – суммарное время восстановлений, ремонтов и технического обслуживания за этот же период эксплуатации.

Коэффициент технического использования можно рассматривать как вероятность того, что в данный, произвольно взятый момент времени, объект работоспособен, а не находится в ремонте.

2 Отказы. Модели отказов

2.1 Источники и причины отказов объектов

Во время эксплуатации объект подвергается внешним и внутренним воздействиям, которые с течением времени приводят к потере работоспособности объекта. Выделяют [4] три источника воздействий:

1) действие энергии окружающей среды (включая человека, выполняющего функции оператора и ремонтника);

2) внутренние источники энергии, связанные с рабочими процессами, протекающими в объекте;

3) накопленная потенциальная энергия материалов, из которых изготовлен объект (внутренние напряжения в отливках, монтажные напряжения и т. п.).

Различные виды энергии (механическая, тепловая, электромагнитная и проч.), действуя на объект, инициируют в его составных частях процессы, изменяющие свойства или состояние материалов. Эти процессы связаны, как правило, со сложными физико-химическими явлениями и приводят к деформации, износу, поломке и другим видам повреждений (отклонений контролируемых свойств материалов от их первоначального уровня). Накопление повреждений, в свою очередь, влечет за собой изменение выходных качественных параметров объекта, что, в конечном счете, приводит к отказу.

Процессы, снижающие работоспособность объекта, по признаку скорости протекания можно разделить на три группы [2]:

1) быстропротекающие имеющие периодичность изменения, составляющую малую долю продолжительности рабочего цикла объекта. К ним можно отнести:

- вибрации деталей и узлов;
- изменения сил трения в подвижных сопряжениях;
- колебания уровня рабочих нагрузок и другие процессы, искажающие рабочий цикл объекта;

2) средней скорости, имеющие периодичность, сравнимую с длительностью рабочего цикла объекта. Они приводят к монотонному изменению выходных параметров объекта. Например:

- необратимый процесс изнашивания режущего инструмента (интенсивность изнашивания инструмента значительно превосходит интенсивность изнашивания деталей подвижных сопряжений);
- обратимые процессы тепловых деформаций, обусловленные как диссипацией энергии рабочих процессов, так и суточными колебаниями температуры окружающей среды.

Обратимые процессы (в отличие от необратимых) временно изменяют выходные параметры объекта без тенденции прогрессивного ухудшения. Следует отметить, что в ряде случаев обратимый процесс может инициировать необратимый процесс, приводящий к накоплению повреждений, например, тепловая деформация шпинделя металлорежущего станка может привести к возрастанию нагрузки на подшипники и их ускоренному износу или поломке, т. е. отказу;

3) медленные с периодичностью, сравнимой с длительностью межремонтного периода. К ним можно отнести:

- процессы изнашивания деталей подвижных сопряжений;
- перераспределение внутренних напряжений в деталях вследствие процесса старения материалов;
- ползучесть материалов;
- процессы коррозии;
- загрязнение трущихся поверхностей деталей.

Обычными методами борьбы с последствиями медленных процессов являются периодические ремонты и технические обслуживания.

Виды повреждений объектов и их составных частей и соответствующие им отказы можно разбить на две группы:

- допустимые, возникающие при нормальных условиях эксплуатации (износ режущего инструмента, поломки деталей предохранительных устройств и т. п.). Полностью устранить этот вид повреждений невозможно, но можно замедлить их проявление;
- недопустимые, возникающие вследствие наличия дефектов или случайных неконтролируемых внешних причин, непосредственно

не связанных с техническим состоянием рассматриваемого объекта (аварии, стихийные бедствия и т. п.).

Под **дефектом** понимается каждое отдельное несоответствие объекта установленным требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации, снижающее его уровень надежности. Следует отметить, что объект, имеющий дефект, может находиться в работоспособном состоянии. Дефект рассматривается как возможная причина возникновения отказа, но наличие дефекта не означает, что отказ произошел.

По стадии происхождения дефекты можно разделить на три группы:

1) дефекты (ошибки) проектирования, например:

- недостаточная защищенность узлов трения;
- наличие концентраторов напряжений на деталях;
- неправильный расчет несущей способности деталей (приводит к их статическому разрушению или малоцикловой усталости);
- неправильный выбор материалов;
- неправильное определение предполагаемого уровня эксплуатационных нагрузок и т. п.;

2) дефекты изготовления (производственные):

- заготовок (пористость, инородные включения и т. п.);
- механической обработки (заусенцы, избыточная локальная пластическая деформация и т. п.);
- сварки (трещины, остаточные напряжения, термические повреждения и т. п.);
- термообработки (перегрев, закалочные трещины, поводка, коробление, обезуглероживание поверхностного слоя);
- сборки (повреждения поверхностей, задиры, перекосы, внесение абразива и т. п.);

3) дефекты эксплуатации:

- нарушение условий применения;
- неправильное техническое обслуживание и ремонт;
- наличие перегрузок;
- применение некачественных эксплуатационных материалов.

2.2 Классификация отказов

Как уже указывалось, отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Можно дать классификацию отказов по ряду критериев [4].

1. Характер изменения выходного параметра объекта до момента возникновения отказа. По этому признаку различают следующие виды отказов:

- внезапные, возникающие в результате сочетания неблагоприятных факторов и случайных внешних воздействий, превышающих возможности объекта к их восприятию. Они характеризуются скачкообразным характером зависимости степени повреждения объекта от наработки. Скорость процесса повреждения при внезапном отказе стремится к бесконечности.

Для внезапных отказов зачастую характерна независимость интенсивности отказов от наработки объекта [$\lambda(t) = \lambda$], т. е. вероятность отказа на малом интервале Δt наработки объекта зависит только от длины этого интервала и не зависит от предыдущей наработки объекта (не связана с накоплением повреждений). Время наработки объектов до внезапного отказа, как правило, подчиняется экспоненциальному закону распределения;

- постепенные (износные), которые возникают в результате постепенного протекания того или иного процесса повреждения, прогрессивно ухудшающего выходные параметры объекта. Основным признаком постепенного отказа является монотонно возрастающий характер зависимости интенсивности отказов от наработки объекта. К постепенным относятся отказы, связанные с процессами изнашивания, коррозии, усталости и ползучести материалов;

- сложные – отказы, которые включают особенности двух предыдущих. Скорость процесса повреждения при сложном отказе является конечной (не стремящейся к ∞). Например, недопустимые воздействия на раму кузова автомобиля инициируют процесс возникновения и развития усталостных трещин. Скорость этого процесса конечна, но имеет тенденцию к увеличению. В некоторый момент усталостные трещины достигают критического размера, и происходит отказ функционирования объекта – разрушение рамы.

2. Возможность дальнейшего функционирования объекта после возникновения отказа. По этому признаку различают отказы:

- функционирования, при которых объект перестает выполнять свои функции (в результате поломок, заклинивания и т. п.);

- параметрические, характеризующиеся отклонением хотя бы одного рабочего параметра объекта за пределы допуска. При этом у технологических систем в результате параметрического отказа сохраняется функционирование, но происходит выход одного или несколь-

ких показателей качества и (или) ритма выпуска за пределы, допускаемые в документации.

3. Возможность последующего использования объекта после возникновения отказа. По этому признаку отказы бывают:

- полные – отказы, после которых использование объекта по назначению невозможно (для восстанавливаемых объектов использование невозможно до восстановления);
- частичные – отказы, после возникновения которых объект может быть использован по назначению, но с меньшей эффективностью или когда вне допустимых пределов находятся значения не всех, а одного или нескольких выходных параметров объекта.

4. Связь между отказами объекта. По этому признаку различают отказы:

- независимые – отказы, не обусловленные другими отказами или повреждениями объекта;
- зависимые – отказы, обусловленные другими отказами или повреждениями объекта.

5. Устойчивость состояния неработоспособности. По этому признаку отказы могут быть:

- устойчивые, которые можно устранить только путем восстановления (ремонта);
- самоустраняющиеся, устраняемые без операций восстановления путем регулирования или саморегулирования;
- перемежающиеся – многократно возникающие самоустраняющиеся отказы одного и того же характера;
- сбои – самоустраняющиеся отказы или однократные отказы, устраняемые незначительным вмешательством оператора.

6. Наличие внешних проявлений отказа. По этому признаку бывают отказы:

- явные, обнаруживаемые визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению;
- скрытые, не обнаруживаемые визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемые при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики. Большинство параметрических отказов относятся к категории скрытых.

7. В зависимости от **причины возникновения** различают отказы:

- конструктивные, возникающие по причинам, связанным с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования;
- производственные, происходящие из-за несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии;
- эксплуатационные, связанные с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации;
- деградиционные, обусловленные естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

8. **Природа происхождения** отказа. По этому признаку различают отказы:

- искусственные, вызываемые преднамеренно, например, с исследовательскими целями или с целью необходимости прекращения функционирования объекта;
- естественные, происходящие без преднамеренной организации.

9. **Время возникновения** отказа. В этом случае могут происходить отказы:

- при испытаниях;
- приработочные (рисунок 1.6);
- периода нормальной эксплуатации (рисунок 1.6);
- периода старения (рисунок 1.6).

10. **Возможность устранения** отказа. По этому признаку отказы бывают:

- устранимые;
- неустранимые.

11. **Критичность** отказа (уровень прямых и косвенных потерь, трудоемкость восстановления). По этому признаку различают отказы:

- критические (существенные);
- некритические (несущественные).

2.3 Модели отказов

2.3.1 Общие сведения

В литературе наиболее изученными являются следующие модели отказов.

1. Модель мгновенных повреждений (внезапные отказы). Если предположить, что отказ элемента происходит при превышении нагрузкой (или иным входным воздействием) допустимого уровня, то вследствие случайного характера изменения нагрузки момент отказа также является случайным и не зависит от того, сколько времени элемент уже находился в эксплуатации.

2. Модель накапливающихся изменений (постепенные отказы). Постепенное старение и (или) износ элементов приводит к изменению значений их рабочих параметров. Постепенно ухудшается качество функционирования всего изделия. Выход показателей качества функционирования системы за нижний допустимый предел влечет за собой отказ изделия.

3. Модель релаксации. Эта схема наблюдается в тех случаях, когда старение и (или) износ могут явиться косвенной причиной отказа. Если, например, допустимые пределы на параметры элементов не установлены, то постепенное изменение параметров может привести к скачкообразному изменению состояния изделия. Например, отказ резервных электронных элементов приводит иногда к перегрузке основных элементов и к отказу системы.

4. Модель действия нескольких независимых причин. Три перечисленных выше способа часто реализуются в сочетании друг с другом.

5. Модель действия нескольких зависимых причин. В четвертой и пятой схемах совокупность зависимых (или независимых) причин возможно (хотя и сложно) заменить одной «эквивалентной».

Рассмотрим две первые, наиболее простые, схемы отказов.

2.3.2 Модели внезапных отказов

2.3.2.1 Нагрузка случайна, а допустимый уровень нагрузки фиксирован. Пусть на элемент системы действует нагрузка X (внешнее воздействие: давление, импульс, электрическое напряжение и т. п.), уровень которой подчиняется некоторому закону распределения с функцией плотности $f_n(x)$ и функцией распределения $F_n(x)$. При этом допустимый уровень данной нагрузки (предел прочности, предел текучести и т. п.) составляет X_d . Тогда вероятность безотказной работы элемента равна вероятности того, что нагрузка X не превысит допустимого уровня X_d :

$$R = P(X \leq X_d) = F_n(X_d) = \int_{-\infty}^{X_d} f_n(x) dx = P(X_d - X \geq 0). \quad (2.1)$$

На рисунке 2.1 заштрихована криволинейная трапеция, площадь которой равна вероятности безотказной работы элемента.

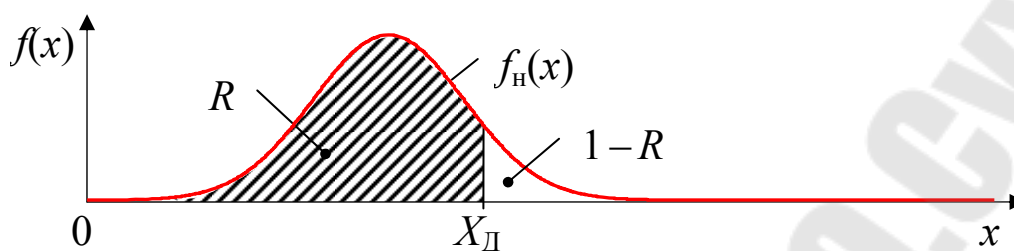


Рисунок 2.1 – Графическая интерпретация вероятности безотказной работы и вероятности отказа объекта

2.3.2.2 *Нагрузка и ее допустимый уровень случайны.* Пусть (как и прежде) на элемент системы действует нагрузка X , уровень которой подчиняется некоторому закону распределения с функцией плотности $f_n(x)$ и функцией распределения $F_n(x)$. В силу различных причин (анизотропия материала, отступления от технологии изготовления, изменение условий эксплуатации) допустимый уровень нагрузки Y также является случайной величиной с функцией плотности $f_d(x)$ и функцией распределения $F_d(x)$ (рисунок 2.2). Тогда вероятность безотказной работы элемента равна вероятности того, что нагрузка X не превысит допустимого уровня Y :

$$R = P(X \leq Y) \quad (2.2)$$

или

$$R = P(Y - X \geq 0). \quad (2.3)$$

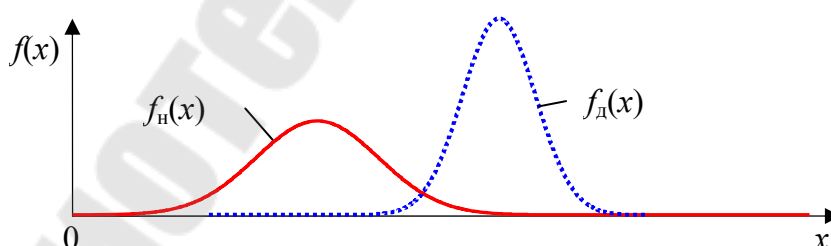


Рисунок 2.2 – Графическая интерпретация работы элемента при случайной нагрузке и случайном значении ее допустимого уровня

Применяя к выражению (2.2) формулу полной вероятности, получим

$$R = P(X \leq Y) = \sum_x P(X = x) P(x \leq Y | X = x), \quad (2.4)$$

где x – некоторое произвольное значение действующей нагрузки X ; $P(X = x)$ – вероятность того, что нагрузка окажется равной значению x ; $P(x \leq Y | X = x)$ – условная вероятность того, что действующее значение нагрузки x не превысит допустимый уровень Y , при условии, что нагрузка X равна значению x , определяемая выражением

$$P(x \leq Y | X = x) = \int_x^{\infty} f_d(y | X = x) dy = 1 - F_d(x | X = x). \quad (2.5)$$

Вероятность того, что значение нагрузки X окажется в некотором полуинтервале $(x, x + dx)$ при $dx \rightarrow 0$, определяется через функцию плотности распределения $f_H(x)$

$$P(x < X \leq x + dx) \approx f_H(x) dx. \quad (2.6)$$

Подставляя выражения (2.5) и (2.6) в формулу (2.4), получим

$$\begin{aligned} R = P(X \leq Y) &= \sum_x [P(X = x) P(x \leq Y | X = x)] \approx \\ &\approx \sum_x [P(x < X \leq x + dx) P(x \leq Y | X = x)] = \sum_x \left[f_H(x) dx \int_x^{\infty} f_d(y | X = x) dy \right]. \end{aligned} \quad (2.7)$$

В пределе $dx \rightarrow 0$ сумма в выражении (2.7) преобразуется в интеграл:

$$R = P(X \leq Y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_H(x) \left[\int_x^{\infty} f_d(y | X = x) dy \right] dx. \quad (2.8)$$

В предположении, что нагрузка X и ее допустимое значение есть независимые величины, выражение (2.8) преобразуется следующим образом:

$$R = P(X \leq Y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_H(x) \left[\int_x^{\infty} f_d(y) dy \right] dx, \quad (2.9)$$

или, в соответствии с выражением (2.5),

$$R = P(X \leq Y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_H(x) [1 - F_d(x)] dx. \quad (2.10)$$

Выражениям (2.9) и (2.10) тождественны равенства:

$$R = P(X \leq Y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_d(y) \left[\int_{-\infty}^y f_H(x) dx \right] dy, \quad (2.11)$$

$$R = P(X \leq Y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_d(y) [F_H(y)] dy, \quad (2.12)$$

а в случае, когда X и Y – неотрицательные независимые случайные величины, то и выражение

$$R = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_d(y+x) f_H(x) dx dy. \quad (2.13)$$

2.3.2.3 Вероятность безотказной работы при показательном распределенных нагрузке и ее допустимом уровне. Пусть нагрузка X , действующая на элемент системы, и ее допустимый уровень Y независимы и подчиняются показательному распределению с параметрами λ_X и λ_Y соответственно. Требуется определить вероятность безотказной работы элемента R .

Воспользуемся выражением (2.10):

$$\begin{aligned} R = P(X \leq Y) &= \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) [1 - F_Y(x)] dx = \\ &= \int_0^{\infty} \lambda_X \exp(-\lambda_X x) [1 - (1 - \exp(-\lambda_Y x))] dx = \\ &= \lambda_X \int_0^{\infty} \exp(-\lambda_X x) \exp(-\lambda_Y x) dx = \lambda_X \int_0^{\infty} \exp(-(\lambda_X + \lambda_Y)x) dx = \\ &= \lambda_X \left(\frac{\exp(-(\lambda_X + \lambda_Y)x)}{-(\lambda_X + \lambda_Y)} \right) \Big|_0^{\infty} = \\ &= \frac{-\lambda_X}{\lambda_X + \lambda_Y} [\exp(-(\lambda_X + \lambda_Y)\infty) - \exp(-(\lambda_X + \lambda_Y)0)] = \\ &= \frac{-\lambda_X}{\lambda_X + \lambda_Y} (0 - 1) = \frac{\lambda_X}{\lambda_X + \lambda_Y}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

2.3.2.4 Вероятность безотказной работы при нормально распределенных нагрузке и ее допустимом уровне. Пусть нагрузка X , действующая на элемент системы, и ее допустимый уровень Y независимы и подчиняются нормальному распределению с параметрами μ_X , σ_X и μ_Y , σ_Y соответственно. Требуется определить вероятность безотказной работы элемента.

Воспользуемся выражением (2.3). Известно, что случайная величина $Z = Y - X$, равная разности нормально распределенных величин, также подчиняется нормальному закону распределения с параметрами

$$\mu = M[Y - X] = M[Y] - M[X] = \mu_Y - \mu_X$$

и

$$\sigma = \sigma[Y - X] = \sqrt{\sigma^2[Y] + \sigma^2[X]} = \sqrt{\sigma_Y^2 + \sigma_X^2}.$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} R = P(Y - X > 0) &= P(Z > 0) = 1 - P(Z \leq 0) = 1 - F_Z(0) = \\ &= 1 - \left(\frac{1}{2} + \Phi \left(\frac{0 - (\mu_Y - \mu_X)}{\sqrt{\sigma_Y^2 + \sigma_X^2}} \right) \right) = \frac{1}{2} + \Phi \left(\frac{\mu_Y - \mu_X}{\sqrt{\sigma_Y^2 + \sigma_X^2}} \right), \end{aligned} \quad (2.15)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – функция Лапласа.

2.3.3 Двумерная модель внезапного отказа. Пример определения показателей безотказности металл-полимерной силовой системы

2.3.3.1 Случай независимых воздействий. В п. 2.3.2 были рассмотрены модели внезапных отказов элементов систем, учитывающие только один воздействующий фактор. В действительности таких факторов может быть несколько.

Рассмотрим пример построения модели и определения показателей безотказности простейшей металл-полимерной силовой системы типа вал – подшипник скольжения. Требуется определить вероятность отказа системы при совместном действии нормального и фрикционного напряжений. Величины действующих напряжений X и Y детерминированы и известны. Значения предела выносливости вала σ_{-1} , выполненного из нормализованной стали 45, заданы функцией распределения Вейбулла в виде

$$F_{\sigma_{-1}}(X) = P(\sigma_{-1} \leq X) = \begin{cases} 1 - \exp \left(- \eta_{\sigma} \left(\frac{X - \sigma_{-1\min}}{\sigma_w} \right)^{m_Y} \right), & X > \sigma_{-1\min}, \\ 0, & X \leq \sigma_{-1\min}, \end{cases} \quad (2.16)$$

где η_{σ} – коэффициент, учитывающий форму тела и схему его циклического деформирования (0,016); $\sigma_{-1\min}$ – минимальное значение предела выносливости вала (150 МПа); σ_w – параметр напряжений Вейбулла (160 МПа); m_Y – параметр механической неоднородности стали (16,4). Данная функция имеет смысл вероятности отказа вала по критерию сопротивления механической усталости при напряжении X .

Значения предела фрикционной усталости контртела τ_f (вкладыша подшипника скольжения), выполненного из полимера ВКВ-30Н, заданы функцией распределения Фреше в виде

$$F_{\tau_f}(Y) = P(\tau_f \leq Y) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\eta_\tau \left(\frac{\tau_{ff}^{(1)} \Delta T}{\tau_d - Y}\right)^{m_s}\right), & Y < \tau_d, \\ 1, & Y \geq \tau_d, \end{cases} \quad (2.17)$$

где η_τ – коэффициент, учитывающий форму контртела и схему его контактного взаимодействия с телом в процессе трения, принимает значение (0,12); $\tau_{ff}^{(1)}$ – единичное термофлуктуационное напряжение (0,21 МПа); ΔT – приращение температуры при заданном термодинамическом состоянии полимера (40 °С); τ_d – верхняя граница предельных напряжений (49,5 МПа); m_s – параметр механической неоднородности полимера (4,6). Данная функция имеет смысл вероятности отказа полимерного контртела по критерию сопротивления фрикционной усталости при напряжении Y .

Отказ рассматриваемой силовой системы (вал – подшипник) происходит при разрушении хотя бы одного элемента, поэтому вероятность безотказной работы будем определять как вероятность совместного выполнения двух событий:

- $\{X < \sigma_{-1}\}$ – действующее значение нормального напряжения X на вал меньше предела выносливости вала σ_{-1} ;
- $\{Y < \tau_f\}$ – действующее значение фрикционного напряжения Y меньше предела фрикционной усталости контртела τ_f , т. е.

$$R = P(\{X < \sigma_{-1}\} \cap \{Y < \tau_f\}). \quad (2.18)$$

Предполагая, что воздействия нормального и фрикционного напряжений независимы и влекут разрушение соответствующего элемента,

$$\begin{aligned} R &= P(\{X < \sigma_{-1}\} \cap \{Y < \tau_f\}) = P(X < \sigma_{-1}) P(Y < \tau_f) = \\ &= [1 - P(\sigma_{-1} \leq X)][1 - P(\tau_f \leq Y)] = [1 - F(X)][1 - F(Y)]. \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.3.3.2 Два случая зависимых воздействий. Предполагая, что воздействия нормального и фрикционного напряжений в примере, рассматриваемом в предыдущем подпункте, зависимы, вероятность безотказной работы силовой системы будет определяться выражением

$$\begin{aligned} R &= P(\{Y < \tau_f\} \cap \{X < \sigma_{-1}\}) = P(Y < \tau_f) P(X < \sigma_{-1} | Y < \tau_f) = \\ &= [1 - P(\tau_f \leq Y)][1 - P(\sigma_{-1} \leq X | Y < \tau_f)] = [1 - F_{\tau_f}(Y)][1 - F_{\sigma_{-1}}(X | Y < \tau_f)]. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Известно, что математическое ожидание предела выносливости вала σ_{-1} , подчиняющегося распределению Вейбулла, в (2.16) прямо пропорционально параметру напряжений Вейбулла σ_w , т. е.

$$M[\sigma_{-1}] = \text{const} \cdot \sigma_w. \quad (2.21)$$

Примем допущение о том, что математическое ожидание предела выносливости вала σ_{-1} зависит также от величины приложенного фрикционного напряжения Y следующим образом:

$$M[\sigma_{-1}] = \text{const} \cdot \sigma_w = \text{const} (160 - 0,5 Y). \quad (2.22)$$

Тогда условная функция распределения предела выносливости вала σ_{-1}

$$F_{\sigma_{-1}}(X|Y < \tau_f) = P(\sigma_{-1} \leq X|Y < \tau_f) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\eta_\sigma \left(\frac{X - \sigma_{-1\min}}{160 - 0,5 Y}\right)^{m_Y}\right), & X > \sigma_{-1\min}; \\ 0, & X \leq \sigma_{-1\min}. \end{cases} \quad (2.23)$$

Определение других функций и значения количественных параметров аналогичны п. 2.3.3.1.

Рассмотрим второй случай зависимых воздействий. Будем предполагать, что условная функция распределения предела выносливости вала в (2.20) такова, что вероятность безотказной работы силовой системы определяется выражением

$$R = [1 - F_{\sigma_{-1}}(X)][1 - F_{\tau_f}(Y)]\Psi(X, Y), \quad (2.24)$$

где $\Psi(X, Y)$ – функция взаимосвязи нормального и фрикционного напряжений, определяемая выражением

$$\Psi(X, Y) = 1 - \frac{Y M[\sigma_{-1}]}{X M[\tau_f]} \exp\left(-\frac{Y M[\sigma_{-1}]}{X M[\tau_f]}\right). \quad (2.25)$$

Определение других функций и значения количественных параметров аналогичны предыдущему примеру.

2.3.4 Модель постепенного отказа

2.3.4.1 Общая схема формирования постепенного отказа. Рассмотрим общую схему формирования отказа объекта, отражающую вероятностный характер процессов, приводящих к отказу, на всех этапах работы объекта (рисунок 2.3).

Вначале имеет место рассеяние начальных значений выходного параметра (параметров) объекта $X(t)$, характеризуемое функцией

плотности распределения $f_X(x, t=0)$ параметра $X(t)$ при $t=0$. Наличие рассеяния начальных значений выходного параметра обусловлено погрешностями изготовления и быстропротекающими процессами (вибрация, упругая деформация и т. п.), влияние которых проявляется в самом начале применения объекта.

Затем в процессе эксплуатации параметры объекта ухудшают процессы средней скорости и медленно протекающие процессы (изнашивание, коррозия). В общем случае их влияние сказывается через некоторое время задержки T_B , которое также является случайной величиной с функцией плотности распределения $f_B(t)$ и связано с накоплением повреждений (например, усталостных или износом). Для внезапных (и сложных) отказов время задержки T_B соответствует времени возникновения внешнего воздействия, вызывающего отказ (или инициирующего процесс повреждений, приводящий к отказу).

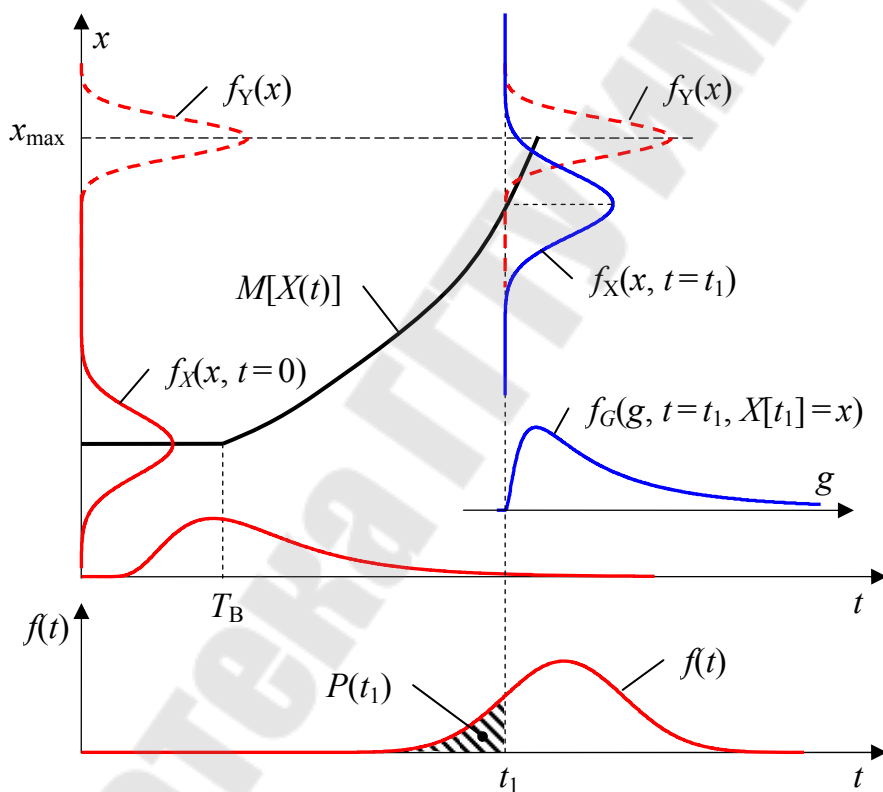


Рисунок 2.3 – Иллюстрация схемы формирования постепенного отказа

Процесс изменения выходного параметра $X(t)$ при $t > T_B$ характеризуется скоростью изменения $G = dX/dt$, которая также является случайной величиной, характеризуемой функцией плотности распределения $f_G(g, t, X(t))$, в общем случае зависящей от t – времени (наработки объекта) и текущего значения выходного параметра $X(t)$.

В текущий момент времени (наработки) t_1 рассеивание случайной величины X характеризуется функцией плотности распределения $f_X(x, t_1)$, зависящей от наработки t_1 . В свою очередь допустимое (максимальное) значение Y выходного параметра также может быть случайной величиной с функцией плотности распределения $f_Y(y)$.

Тогда вероятность безотказной работы объекта в рассматриваемый момент времени (наработки) t_1 при условии, что к моменту t_1 отказ не возник [см. выражения (2.9) и (2.11)]

$$R = P(X[t_1] \leq x_m) = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x, t_1) \left[\int_x^{\infty} f_Y(y) dy \right] dx = \int_{-\infty}^{\infty} f_Y(y) \left[\int_{-\infty}^y f_X(x, t_1) dx \right] dy. \quad (2.26)$$

С другой стороны, вероятность безотказной работы объекта выражается через функцию плотности распределения $f(t)$ случайной величины ξ – наработки объекта до отказа:

$$R = P(\xi > t_1) = \int_{t_1}^{\infty} f(t) dt. \quad (2.27)$$

Данная схема в общем виде описывает процесс возникновения отказа и при частных значениях входных параметров может отражать те или иные случаи, характерные для рассматриваемого конкретного вида объектов и особенностей их применения. Если $T_b = 0$, то получаем типичную схему формирования постепенного параметрического отказа, который при резком возрастании значений выходного параметра $X(t)$ по достижении уровня x_m может перейти в отказ функционирования (привести к поломке объекта).

Если в процессе формирования отказа основную роль играет случайная неконтролируемая внешняя причина, проявляющаяся в момент $T_b = 0$, а затем процесс повреждения развивается с высокой скоростью ($G \rightarrow \infty$), то получим модель формирования внезапного отказа.

2.3.4.2 Частный случай формирования постепенного отказа: начальное значение выходного параметра равно нулю. Рассмотрим распространенный случай (рисунок 2.4), когда выходной параметр объекта X является линейной функцией времени (наработки):

$$X(t) = G t. \quad (2.28)$$

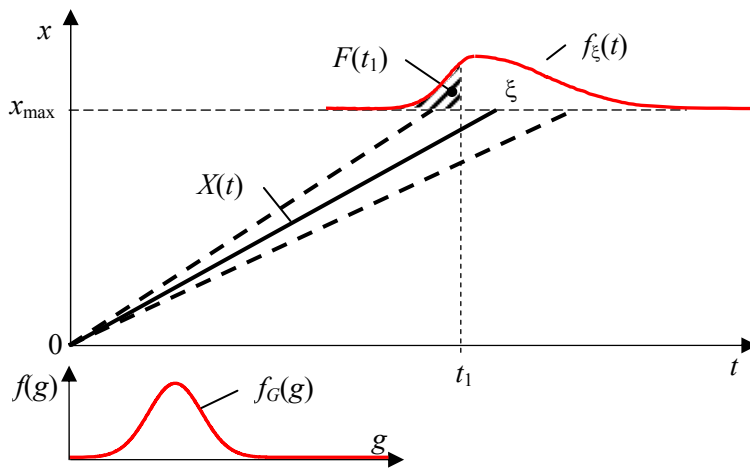


Рисунок 2.4 – Модель постепенного отказа при нулевом начальном значении выходного параметра X

Скорость изменения выходного параметра G зависит от большого числа случайных факторов (нагрузки, режимы и условия эксплуатации), поэтому допустим, что она подчиняется нормальному закону распределения с функцией плотности

$$f_G(g) = \frac{1}{\sigma_G \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(g - \mu_G)^2}{2\sigma_G^2}\right), \quad (2.29)$$

где μ_G – математическое ожидание скорости изменения выходного параметра $X(t)$; σ_G – стандартное отклонение скорости изменения выходного параметра.

Случайная величина ξ – наработка объекта до отказа – является функцией случайного аргумента G (считается, что отказ наступает при достижении выходным параметром X предельного значения x_{\max}):

$$\xi = \frac{x_{\max}}{G}. \quad (2.30)$$

Задача заключается в отыскании закона распределения непрерывной случайной величины ξ при известном законе распределения величины G (рисунок 2.4). В теории вероятностей для определения функции плотности распределения монотонно убывающей функции случайного аргумента $t = \varphi(g)$ (2.30) применяется формула

$$f_\xi(t) = f_G(\psi(t)) |\psi'(t)|, \quad (2.31)$$

где $\psi(t)$ – функция, обратная к $t = \varphi(g)$, т. е.

$$\psi(t) = \frac{x_{\max}}{t}, \quad (2.32)$$

$$\psi'(t) = -\frac{x_{\max}}{t^2}. \quad (2.33)$$

Подставляя выражения (2.32) и (2.33) в (2.31) и учитывая, что $x_{\max} > 0$ и $t > 0$, получаем

$$f_{\xi}(t) = \frac{1}{\sigma_G \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\frac{x_{\max}}{t} - \mu_G\right)^2}{2\sigma_G^2}\right) \frac{x_{\max}}{t^2}. \quad (2.34)$$

Выражение (2.34) можно записать в виде

$$f_{\xi}(t) = \frac{t_{Me}}{V_G t^2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t_{Me} - t)^2}{2V_G^2 t^2}\right), \quad (2.35)$$

где $V_G = \frac{\sigma_G}{\mu_G}$ – коэффициент вариации скорости изменения выходного

параметра $X(t)$; $t_{Me} = \frac{x_{\max}}{\mu_G}$ – наработка до отказа, соответствующая

средней скорости изменения выходного параметра.

Таким образом, можно отметить, что время наработки объекта до отказа подчиняется распределению, которое отличается от нормального распределения. Важно, что медиана и мода времени наработки объекта до отказа равны, соответственно, $Med[\xi] = t_{Me}$ и

$$Mod[\xi] = t_{Me} \left(\frac{\sqrt{1 + 8V_G^2} - 1}{4V_G^2} \right), \text{ причем } Med[\xi] > Mod[\xi].$$

Из этого следует, что закон распределения времени наработки объекта до отказа ξ является асимметричным – график функции плотности распределения $f_{\xi}(t)$ обладает большим «правым хвостом» (рисунок 2.4). Этот вывод важен при оценке надежности объектов, к которым предъявляются высокие требования безотказности: применение в модели отказа объекта вместо (2.35) другого симметричного, например, нормального закона распределения с тем же математическим ожиданием, дает более высокие значения вероятности отказа в области наработки $0 < t < Mod[\xi]$, что приводит к заниженным оценкам ресурса объекта.

Для определения вероятности отказа объекта в течение наработки t_1 необходимо проинтегрировать функцию плотности распределения (2.35):

$$F(t_1) = \int_0^{t_1} f_{\xi}(t) dt = \frac{t_{Me}}{V_G \sqrt{2\pi}} \int_0^{t_1} \frac{1}{t^2} \exp\left(-\frac{(t_{Me}-t)^2}{2V_G^2 t^2}\right) dt. \quad (2.36)$$

Выполнив в (2.36) замену переменной $z = \frac{t_{Me}-t}{V_G t}$ $\left(dz = \frac{-t_{Me}}{V_G t^2} dt; \right.$
 $\left. z_1 = \frac{t_{Me}-t_1}{V_G t_1} \right)$, получим

$$\begin{aligned} F(t_1) &= \frac{t_{Me}}{V_G \sqrt{2\pi}} \int_0^{t_1} \frac{1}{t^2} \exp\left(-\frac{(t_{Me}-t)^2}{2V_G^2 t^2}\right) dt = \\ &= \frac{-t_{Me}}{V_G \sqrt{2\pi}} \int_{\infty}^{z_1} \frac{V_G t^2}{t^2 t_{Me}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{z_1}^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_1} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \frac{1}{2} - \Phi(z_1), \end{aligned} \quad (2.37)$$

где $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{1}{2}$ – интеграл Пуассона;

$$\Phi(z_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_1} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \text{ – функция Лапласа.}$$

Следовательно, вероятность безотказной работы

$$P(t_1) = 1 - F(t_1) = \frac{1}{2} + \Phi(z_1) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{t_{Me}-t_1}{V_G t_1}\right) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{x_{\max} - \mu_G t_1}{\sigma_G t_1}\right). \quad (2.38)$$

3 Комплексные показатели надежности

Показатели обеспечения и оценки надежности, предусмотренные ГОСТ.

Коэффициент готовности K_G показывает вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назначению не предусматривается.

Этот коэффициент статистически определяется как отношение суммарного времени пребывания наблюдаемых объектов в работоспособном состоянии к произведению числа этих объектов (N) на

продолжительность эксплуатации (за исключением простоев при проведении плановых ремонтов и технического обслуживания):

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{NT_{\text{раб}}}$$

где t_i – суммарное время пребывания i -го объекта в работоспособном состоянии ($i = 1, 2, \dots, N$); $T_{\text{раб}}$ – продолжительность эксплуатации работы, состоящей из последовательно чередующихся интервалов времени работы и восстановления (устранения отказов).

При порядке обслуживания, предусматривающем немедленное начало восстановления отказавшего объекта, т. е. при установившемся режиме эксплуатации, коэффициент готовности вычисляют по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{T + T_B} = \frac{1}{1 + \frac{T_B}{T}} = \frac{1}{1 + \rho}, \quad (3.1)$$

где T – наработка на отказ, характеризующая безотказность; T_B – среднее время восстановления, характеризующее ремонтпригодность.

Из формулы (3.1) видно, что коэффициент готовности показывает долю, которую составляет время работы от суммарного времени, расходуемого на работу и восстановление. Он характеризует одновременно два различных свойства объекта, его безотказность и ремонтпригодность, а поэтому является комплексным показателем.

Коэффициент технического использования. $K_{\Gamma.И.}$ – отношение математического ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени пребывания объекта в работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и времени ремонта за тот же период эксплуатации.

Этот коэффициент статистически определяется как отношение:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{T_{\text{экспл}}}$$

где $T_{\text{экспл}}$ – продолжительность эксплуатации, состоящей из интервалов времени работы, технического обслуживания и ремонта.

Если заданное время эксплуатации $T_{\text{экспл}}$ различно для каждого объекта, то для подсчета величины $K_{T.I.}$ применяется формула:

$$K_{T.I.} = \frac{t_{\text{сум}}}{t_{\text{сум}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{обсл}}} = \frac{1}{1 + \frac{t_{\text{рем}} + t_{\text{обсл}}}{t_{\text{сум}}}}, \quad (3.2)$$

где $t_{\text{сум}}$ – суммарная наработка всех объектов; $t_{\text{рем}}$ – суммарное время простоев из-за планового и внепланового ремонта всех объектов; $t_{\text{обсл}}$ – суммарное время простоев из-за планового и внепланового технического обслуживания всех объектов (время простоев по организационным причинам здесь не учитывается).

Если разделить числитель и знаменатель выражения (3.2) на общее количество отказов m , наблюдавшихся в рассматриваемый период времени, то

$$K_{T.I.} = \frac{1}{\frac{1}{K_G} + K_{II}}, \quad (3.3)$$

где $K_{II} = T_{II} / T = t_{\text{обсл}} t_{\text{сум}}$ – коэффициент профилактики; T_{II} – среднее время, затрачиваемое при техническом обслуживании (профилактике) на один отказ.

Таким образом, значение коэффициента $K_{T.I.}$ находится в обратной зависимости от отношений T_{II} / T и T_B / T или в прямой зависимости от значения коэффициента K_G .

Коэффициент технического использования $K_{T.I.}$ — обобщенный комплексный показатель надежности и более полной характеристики ремонтпригодности, чем коэффициент готовности, так как учитывает все простои, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом объекта.

Коэффициент оперативной готовности $K_{O.G.}$ – вероятность того, что объект, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в произвольный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Под режимом ожидания понимается нахождение объекта при полной или облегченной нагрузке без выполнения основных (рабочих) функций. При этом возможно возникновение отказов, которые должны быть устранены с восстановлением работоспособности объекта для выполнения требуемого задания. Для выполнения задания

необходимо также, чтобы в момент возникновения необходимости в "использовании объект был работоспособен.

Если вероятность безотказной работы объекта $P(t_p)$ в течение времени t_p не зависит от момента начала работы t , то величину коэффициента оперативной готовности определяют по формуле:

$$K_{o.g.} = K_r P(t_p). \quad (3.4)$$

Коэффициент оперативной готовности может характеризовать надежность техники для уборки урожая, кормоприготовительных машин животноводческих комплексов и т. п.

Показатели, учитывающие суммарную и удельную суммарную трудоемкость (стоимость) технического обслуживания и ремонта, предусмотренные ГОСТ как комплексные показатели надежности, следующие.

Средняя суммарная трудоемкость технического обслуживания – математическое ожидание суммарных трудозатрат на проведение технического обслуживания за определенный период эксплуатации.

Средняя суммарная трудоемкость ремонта – математическое ожидание суммарных трудозатрат на все виды ремонта объекта за определенный период эксплуатации.

Средняя суммарная стоимость технического обслуживания (ремонта) – математическое ожидание суммарных затрат на проведение технического обслуживания (на все виды ремонта) объекта за определенный период эксплуатации.

Для этих показателей наряду с их средними значениями применяют удельные величины, которые определяют как отношение средних суммарных величин к соответствующему математическому ожиданию суммарной наработки объекта за один и тот же период эксплуатации.

Важным показателем является *коэффициент восстановления ресурса*, равный отношению среднего ресурса капитально отремонтированных объектов $t_{восст}$ к их среднему ресурсу до первого капитального ремонта (новых объектов) $t_{нов}$, который должен быть не менее 80 %:

$$K_B = \frac{t_{восст}}{t_{нов}} 100\%; \quad K_{BP} = \frac{T_{MP}}{T_{ДР}} 100\%, \quad (3.5)$$

где T_{MP} и $T_{ДР}$ соответственно межремонтный и доремонтный ресурсы.

Для сопоставления количественных показателей надежности агрегатов новых и капитально отремонтированных тракторов определяют величину $(T_{\text{отр}} / T_{\text{нов}})100\%$ (по гамма-процентному ресурсу) или для оценки уровня безотказности делением средней наработки «на отказ соответствующей группы сложности капитально отремонтированных агрегатов или систем на соответствующий показатель агрегатов новых машин. Если известно среднее число отказов по новым и капитально отремонтированным тракторам за одну и ту же установленную наработку, определяют величину

$$\left(\frac{m_{\text{сп}}^{\text{нов}}}{m_{\text{сп}}^{\text{отр}}} \right) 100\% \quad (3.6)$$

Показатели эксплуатационной технологичности характеризуют затраты времени, труда и средств на подготовку сельскохозяйственной техники к эксплуатации, на плановые технические обслуживания в процессе эксплуатации и работы, проводимые после эксплуатации сельскохозяйственной техники (постановка на хранение, консервация и т. п.).

Показатели ремонтной технологичности характеризуют приспособленность конструкции объекта и его составных частей (деталей, сборочных единиц и т. п.) к ремонтным работам, выполняемым для восстановления их работоспособности на ремонтных предприятиях.

К этим показателям относятся: среднее время ремонта, вероятность, окончания ремонта в заданное время, средние абсолютные затраты на ремонт данного вида, а также относительные затраты, отнесенные к единице времени нахождения машины в эксплуатации (для деталей, сборочных единиц и т. п.) или к единице произведенной продукции (для станков, машин и т. д.).

Дополнительные показатели ремонтпригодности в сочетании с основными позволили более конкретно формулировать отдельные требования к ремонтпригодности.

Показатели, характеризующие общее техническое совершенство конструкции машины, в том числе и конструктивные решения, — это коэффициент применяемости конструктивных элементов, коэффициент унификации, коэффициент конструктивной преемственности, коэффициент взаимозаменяемости, коэффициент кратности обслуживания и сроков службы конструктивных элементов, коэффициент общей контролепригодности.

Коэффициент применяемости конструктивных элементов – отношение суммы числа наименований типоразмеров стандартизированных, нормализованных, заимствованных и покупных деталей и узлов к общему количеству наименований конструктивных элементов объекта.

Коэффициент применяемости и коэффициент унификации и конструктивной преемственности являются одними из важнейших показателей стандартизации.

Коэффициент унификации показывает, какая доля из использованных в объекте деталей унифицирована. Например, коэффициент унификации двигателей ЯМЗ составляет около 0,9.

Коэффициент конструктивной преемственности — отношение числа наименований ранее освоенных сборочных единиц и деталей к общему числу наименований конструктивных элементов в объекте.

Преемственность позволяет значительно упростить организацию и технологию изготовления машин и более рационально решать вопросы их эксплуатации и ремонта.

Коэффициент взаимозаменяемости определяют как отношение количества взаимозаменяемых элементов к общему количеству конструктивных элементов машины.

Рациональный уровень взаимозаменяемости конструктивных элементов в машине – важное средство снижения затрат времени, труда и средств при устранении отказов в ремонте.

Коэффициент кратности обслуживания и сроков службы конструктивных элементов – отношение соответственно числа элементов машины, периодичности обслуживания и ремонта базового конструктивного элемента к общему количеству наименований конструктивных элементов.

Соблюдение требования и кратности или равной периодичности и сроков службы элементов машины позволяет значительно сократить суммарное время простоя машины и затраты на ее обслуживание и ремонт.

Коэффициент общей контролепригодности – отношение числа конструктивных элементов, приспособленных к контролю различными способами по техническому состоянию машины в процессе эксплуатации, к общему числу элементов машины, контроль которых необходим в процессе эксплуатации.

Показатели, характеризующие приспособленность конструкции машины к проведению профилактических и восстановительных работ, следующие.

Коэффициент удобства поз — отношение общего числа удобных поз при выполнении работ к общему числу возможных поз.

Коэффициент доступности учитывает суммарную трудоемкость балластных работ, которые необходимо выполнить при устранении отказов и техническом обслуживании. К балластным работам обычно относят подготовку машины, необходимые разборочно-сборочные работы и т. п.

Коэффициент веса демонтируемых сборочных единиц характеризует легкосъемность конструкции машины. Его определяют из отношения числа демонтируемых сборочных единиц, вес которых не превышает установленного предельного значения при демонтаже вручную, к общему числу демонтируемых единиц машины при устранении отказов, техническом обслуживании и ремонте, проводимых в процессе эксплуатации.

4 Расчет показателей надежности

Расчеты объектов на надежность предназначены для определения количественных показателей надежности. Их проводят на этапах разработки, создания и эксплуатации объектов (машин, оборудования и приборов).

На этапе проектирования расчет надежности производят с целью прогнозирования ожидаемой надежности разрабатываемого объекта.

При испытаниях и эксплуатации расчеты на надежность проводят для оценки количественных показателей надежности. Результаты расчетов в данном случае показывают, какой надежностью обладали объекты, прошедшие испытания или используемые в определенных условиях эксплуатации. На основании этих расчетов определяют слабые элементы объектов, намечают основные направления по повышению надежности, дается оценка надежности объекта и влияния на нее различных факторов.

При этом задача сводится к определению одной или нескольких количественных характеристик надежности сельскохозяйственной техники. Так, например, на основании расчета машины и ее элемен-

тов на надежность определяют вероятность безотказной работы, коэффициент готовности, коэффициент технического использования и др., а затем указывают пути улучшения полученных показателей надежности. При этом не все показатели надежности можно рассчитывать, некоторые из них определяют экспериментально.

Исходные данные для расчета – это данные по конструкции элементов объектов, характеристике сил, применяемым материалам, режимам работы, условиям эксплуатации и ремонта, а также по другим параметрам, определяющим работоспособность сельскохозяйственной техники.

Оценка вероятности безотказной работы объектов.

Вероятность безотказной работы объекта (машины) $P_0(t)$ при совместном действии постепенных (износных) и внезапных отказов подсчитывается по теореме умножения вероятностей:

$$P_0(t) = P_{И}(t)P_{В}(t), \quad (4.1)$$

где $P_{И}(t)$ – безотказность при износных отказах; $P_{В}(t)$ – безотказность при внезапных отказах.

Например, если рассматривать гидроагрегаты с позиций числа уплотнений, которые чаще всего приводят к внезапным отказам, и с учетом постепенных (износных) отказов подвижных сопряжений, то из формулы (1) следует, что в наихудшем положении среди других агрегатов гидросистем находятся гидронасосы, имеющие большое число резиновых уплотнений.

По формуле (4.1), если известны параметры законов распределения (\bar{T} , σ и λ), можно рассчитать вероятность безотказной работы объекта или его элементов.

В случае если износные отказы подчиняются нормальному закону распределения, а внезапные – экспоненциальному, формула (4.1) примет следующий вид:

$$P_0(t) = \frac{e^{-\lambda t}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\bar{T})^2}{2\sigma^2}} dt. \quad (4.2)$$

В начальный период работы объекта основное влияние на $P_0(0)$ оказывают внезапные отказы, а затем все больше влияют износные отказы.

Сельскохозяйственная техника – это сложные объекты (системы), которые состоят из отдельных элементов, находящихся в сложном взаимодействии. Отказ любого элемента отражается на работоспособности объекта, так как она зависит от работоспособности входящих в него элементов, а также от способа их включения в систему.

Резервирование в технических системах

Резервирование – это метод повышения надежности объекта введением избыточности, т. е. введением дополнительных средств и возможностей сверх минимально необходимых, для выполнения объектом заданных функций.

Например, резервированием считается применение пусковых рукояток для двигателей, имеющих специальные системы пуска, запасных частей, резервных комбайнов и автомобилей на уборке урожая.

В зависимости от того, что предусматривается использовать при резервировании: избыточные элементы структуры объекта, избыточное время, избыточную информацию, резервирование бывает структурное, временное и информационное.

Функциональное резервирование предусматривает использование способности элементов выполнять дополнительные функции.

Нагрузочное резервирование предусматривает использование способности объекта воспринимать дополнительные нагрузки.

Основным называют элемент структуры объекта, минимально необходимыми для выполнения объектом заданных функций.

Резервный элемент (резерв) – элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

Кратность резервирования – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими основных элементов объекта.

Дублирование – резервирование, кратность которого равна единице.

Резервирование – один из способов значительного повышения надежности объектов. При выходе из строя одного из элементов резервный элемент выполняет его функции и объект не теряет работоспособности.

В надежности различают два основных вида соединения элементов: последовательное и параллельное.

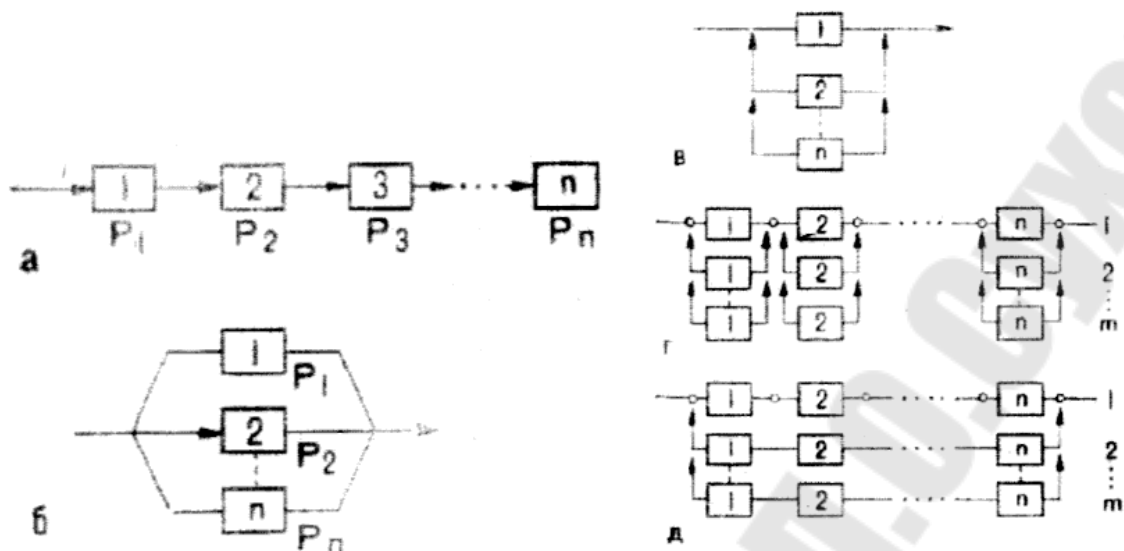


Рисунок 4.1 – Схемы различных видов соединения элементов сложных систем:

a – последовательное; *б* – параллельное с нагруженным или облегченным резервом; *в* – резервирование замещением ненагруженным резервом; *г* – раздельное резервирование; *д* – общее резервирование

Под последовательным соединением элементов (рисунок 4.1, *a*) в надежности понимают такое соединение, при котором отказ одного какого-либо элемента влечет за собой отказ всей системы. Этому условию подчинялся большинство приводов и механизмов передач машин, так как выход из строя любой шестерни, подшипника, электродвигателя и т. п. вызывает потерю работоспособности всей системы.

Если известна вероятность безотказной работы i -го элемента $P_i(t)$, с учетом вида соединения элементов безотказность $P(t)$ сложной системы можно подсчитать по формулам теории вероятностей.

Вероятность безотказной работы системы с последовательным соединением элементов. В этом случае вероятность безотказной работы определяется по формуле умножения вероятностей независимых событий и равна произведению вероятностей безотказной работы элементов:

$$P_{\text{посл}}(t) = P_1 P_2 \dots P_n = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (4.3)$$

Вероятность отказа последовательного элемента определяют по выражению:

$$q_{\text{посл}} = 1 - P_{\text{посл}}(t)$$

При одинаковой вероятности безотказной работы элементов формула принимает вид:

$$P_{\text{носл}}(t) = P_i^n. \quad (4.4)$$

Так, например, если система состоит из 50 последовательно соединенных элементов ($n = 50$) с вероятностью безотказной работы каждого элемента за определенный промежуток времени $P_i = 0,99$, то вероятность безотказной работы всей системы будет:

$$P_{\text{носл}}(t) = (0,99)^{50} \approx 0,6.$$

Для случая возникновения внезапных отказов, подчиняющихся экспоненциальному закону распределения $P_1 = e^{-\lambda_1 t}$, $P_2 = e^{-\lambda_2 t}$, $P_n = e^{-\lambda_n t}$ сделав соответствующие подстановки в формулу (4.3), получим

$$P_{\text{носл}}(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} = e^{-\lambda_0 t}.$$

Вероятность безотказной работы сложной системы в этом случае также подчиняется экспоненциальному закону с параметром

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

Вероятность отказа в этом случае:

$$q_{\text{носл}} = 1 - e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}.$$

При экспоненциальном распределении времени безотказной работы параметр потока отказов и наработка на отказ для восстанавливаемых объектов соответственно:

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i(t), \quad T(t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n T_i},$$

где $\omega(t)$, $T(t)$ – соответственно параметр потока отказов и наработка на отказ i -го элемента в течение времени (наработки) t .

В частности, если $\omega_i(t) = \text{const}$, то $\omega(t) = \text{const}$.

Вероятность безотказной работы при параллельном соединении элементов.

Параллельным соединением (рисунок 4.1,б) называется совокупность элементов, работоспособность которой нарушается только при условии отказа всех параллельных элементов, входящих в совокупность.

Параллельное соединение элементов в системе служит основой резервирования.

Следует заметить, что параллельное соединение не всегда может обеспечить необходимое резервирование. Если один и тот же элемент объекта (системы) подвержен различным по своей физической сущности отказам, то в зависимости от характера отказа резервный элемент необходимо включать либо последовательно, либо параллельно.

Каждое из указанных включений в отдельности сможет обеспечить лишь частичное резервирование.

В качестве примера можно рассмотреть фильтр гидросистемы, системы смазки или топливный фильтр, отказ которых может произойти либо в результате загрязнения фильтрующего элемента, либо в результате его повреждения (разрушения). В первом случае резервирование можно обеспечить параллельным включением резервного фильтра (фильтрующего элемента), а во втором – последовательным.

Чтобы справиться с объемом сельскохозяйственных работ с учетом выхода из строя машин, хозяйства приобретают резервные тракторы, комбайны, сельскохозяйственные машины. Обменный фонд запасных сборочных единиц и агрегатов, запас деталей на складе (а иногда и непосредственно на машине) служат этой же цели, так как позволяют быстро заменить отказавшие элементы объектов исправными.

Резервирование, повышая надежность систем, приводит к их усложнению и удорожанию.

Резервирование методом введения запасных частей, обменных агрегатов удорожает эксплуатацию машин, часто создает неоправданные их запасы. Поэтому целесообразность применения резервирования в каждом отдельном случае должна оцениваться с учетом его экономической эффективности, а также с учетом требований, предъявляемых к объекту с точки зрения безотказности.

Например, автомобиль оснащен двумя тормозами: ручным и ножным, на нем установлены две фары и больше. Если на него в целях резервирования установить два двигателя, две коробки передач и т. д., то он станет неоправданно сложным и громоздким.

При параллельном соединении, показанном на рисунке 4.1,б, резервные элементы постоянно присоединены к основным, находятся в том же режиме, что и основной элемент, т. е. мы имеем дело с нагруженным резервом. Если резервные элементы (например, золотники гидрораспределителя для присоединения выносных гидроцилиндров)

находятся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент (золотник основного гидроцилиндра), то это будет облегченное резервирование.

В данном случае будет постоянное резервирование, при котором резервные элементы участвуют в функционировании объекта наравне с основными.

Вероятность безотказной работы при нагруженном резервировании может быть подсчитана следующим образом.

Если обозначить q_1, q_2, \dots, q_n вероятности появления отказа каждого из элементов за время t , то отказ системы в этом случае параллельного соединения произойдет при условии отказа всех элементов.

Вероятность совместного появления всех отказов $q(t)$ по формуле умножения вероятностей будет:

$$q_{\text{нар}}(t) = q_1, q_2, \dots, q_n = \prod_{i=1}^n q_i.$$

Поэтому безотказность системы с параллельным соединением элементов будет:

$$P_{\text{нар}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (4.5)$$

Автомобиль или трактор имеет в системе освещения и сигнализации фары, подфарники и габаритные огни, которые соединены методом резервирования (по два изделия в каждой цепи). Отказ любого одного объекта (например, фары) не вызывает отказа и работе освещения и позволяет продолжить эксплуатацию автомобиля или трактора до возвращения в гараж и устранения отказа. В этом случае вероятность безотказной работы системы освещения и сигнализации определяется по формуле (4.5).

Для частного случая – экспоненциального закона распределения отказов расчетные формулы для параллельного соединения элементов можно представить в следующем виде:

$$P_{\text{нар}}(t) = \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}), \quad q_{\text{нар}}(t) = \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}).$$

На практике часто встречаются структурные схемы, состоящие из m параллельных цепей, а каждая цепь имеет n последовательно соединенных элементов. В этом случае вероятность безотказной работы вычисляют с использованием формул для параллельно-последовательных схем.

Ненагруженный резерв (см. рисунок 4.1,в), если резервный элемент (объект) практически не несет нагрузки. В этом случае используется резервирование замещением, при котором функции основного элемента объекта передаются резервному только после отказа основного элемента (объекта).

Резервирование замещением, при котором группа основных элементов объекта резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент в данной группе, называется скользящим резервированием.

Зная состав машинно-тракторного парка и количественные характеристики надежности машин, входящих в парк, и их элементов, можно рассчитать, сколько тех или иных сборочных единиц и деталей следует иметь в хозяйстве, чтобы уложиться в нормативы средств, выделенных на резервирование, при минимальных простоях.

Расчеты на надежность дают следующую практическую рекомендацию по созданию обменного фонда сборочных единиц и агрегатов: при прочих равных условиях и ограниченных денежных средствах выгоднее иметь лишь отдельные сборочные единицы сложных агрегатов.

Если в обменном фонде имеется двигатель в сборе, то это позволит пустить в работу только один неработоспособный трактор.

С другой стороны, имея в обменном фонде сборочные единицы двигателя (узлы топливной аппаратуры, головку блока в сборе, муфту сцепления и т. п.), можно восстановить работоспособность нескольких тракторов. Редко бывает, чтобы у всех неисправных тракторов одновременно произошел отказ одних и тех же сборочных единиц.

Расчеты по формулам теории надежности показывают, что один запасной двигатель, расчлененный на отдельные элементы, дает примерно такой же эффект, как и пять запасных двигателей, хранящихся в сборе.

Резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы, называется раздельным резервированием (рисунок 4.1, з).

При раздельном резервировании имеется возможность включить резервный элемент при выходе из строя любого элемента, что значительно повышает надежность объекта (технической системы).

Резервирование, при котором резервируется объект в целом, называется общим резервированием (рисунок 4.1, д).

Смешанное резервирование предусматривает совмещение различных видов резервирования. Например, на практике может применяться общее резервирование отдельных объектов и отдельное резервирование наиболее ответственных и менее надежных элементов.

Резерв бывает восстанавливаемый и невосстанавливаемый в зависимости от того, подлежит или не подлежит восстановлению его работоспособность в случае отказа.

Резервированием с восстановлением называется резервирование, при котором работоспособность любого основного и резервного элементов объекта в случаях возникновения их отказов подлежит восстановлению в процессе эксплуатации объекта.

В противном случае будет резервирование без восстановления.

5 Предельное состояние (износы) деталей, сопряжений сборочных единиц и механизмов машин

Обоснования и расчет предельного состояния позволяют полнее использовать каждую деталь, сопряжение, узел и механизм машины при минимальных затратах средств. При заниженных предельных состояниях ресурс сельскохозяйственной техники используется не полностью, а при завышенных могут возникнуть аварийные отказы, увеличатся простои сельскохозяйственной техники и затраты на ее эксплуатацию и ремонт.

Изменение состояния сопряжений характеризуется главным образом износом деталей, а поэтому предельное состояние сопряжений устанавливается по критериям (признакам) предельного износа.

Рекомендуется рассматривать три критерия предельного состояния деталей и сопряжений: технический (безотказность, работа без поломок), технологический (качество работы) и экономический.

Критерии предельного износа рекомендуется устанавливать в зависимости от того, какое влияние оказывает износ детали на работу машины. При этом рассматривается три случая.

В первом случае в результате износа машина не может больше функционировать, т. е. становится неработоспособной. Например, происходит поломка коленчатого вала, задир поверхностей вкладышей шатунных или коренных подшипников, поломка поршневого кольца, заедание зубьев шестерен и т. д.

Во втором случае износ приводит к попаданию в зону интенсивного выхода из строя машины и ее деталей. При этом возникают уда-

ры, происходит форсированное изнашивание поверхностей, возрастают вибрации машины, повышается температура узлов. На кривой износа в зависимости от наработки это период аварийного изнашивания.

Этот случай можно проиллюстрировать на примере верхнего поршневого компрессионного кольца, покрытого электролитическим хромом. Предельный износ наступит тогда, когда в результате изнашивания слой хрома будет снят и интенсивность изнашивания сопряжения при этом резко возрастет

В третьем случае в результате износа характеристики машины выходят за допустимые или рекомендуемые пределы (снижается точность работы, падает производительность и коэффициент полезного действия, уменьшается коэффициент подачи и т. п.).

Металлорежущий станок, например, не обеспечивает необходимой производительности и получения продукции заданного качества (по точности и шероховатости).

При износе деталей цилиндро-поршневой группы двигателя изменяется мощность, удельный расход топлива, повышается расход смазочного материала, прорыв газов в картер, усиливаются стуки. Двигатель может продолжать работать, но как только состояние его сопряжений будет соответствовать максимально допустимым изменениям его характеристики, это состояние станет предельным.

Насос гидросистемы при предельном состоянии не обеспечивает необходимой подачи.

Предельные износы основных деталей часто устанавливают на основании практических данных эксплуатации и ремонта машин отдельных марок.

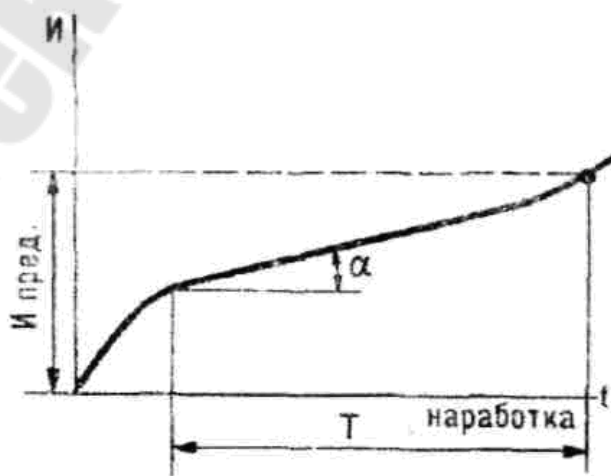


Рисунок 5.1 – Зависимость износа от наработки

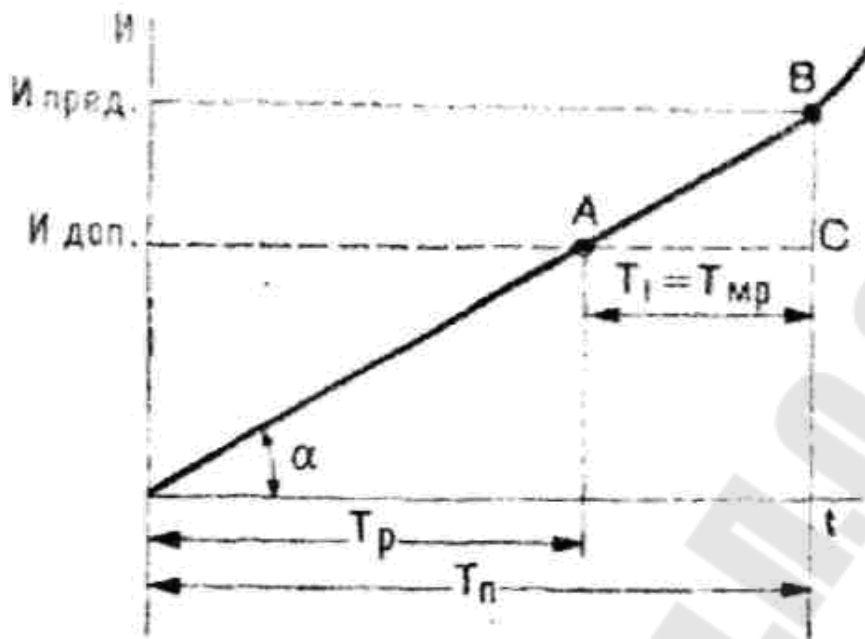


Рисунок 5.2 – К расчету допустимого и предельного износа детали

Для определения наработки (ресурса) T детали необходимо иметь кривую износа детали в зависимости от наработки (рисунок 5.1) и значение предельного износа $I_{пред}$ так как

$$T = \frac{I_{пред}}{\gamma}, \quad (5.1)$$

где γ – случайная функция, характеризующая скорость изнашивания сопряжения.

С другой стороны, $\gamma = dH / dt = f(P, v, K_m, K_э)$, т. е. функция, зависящая от нагрузки, скорости скольжения, технологических и эксплуатационных факторов

Допустимые износы $I_{доп}$ (рис 2) меньше предельных $I_{пред}$, так как деталь не должна выйти из строя в течение последующей межремонтной наработки T_1 . За период межремонтной наработки износ детали увеличивается на γT_1 .

Отсюда имеем:

$$I_{доп} + \gamma T_1 = I_{пред} \text{ или } I_{доп} = I_{пред} - \gamma T_1. \quad (5.2)$$

Учитывая, что $tg \alpha = \gamma = I_{доп} / T_p$, где T_p – наработка детали до выполняемого в данный момент ремонта, получим:

$$I_{\text{доп}} \left(1 + \frac{T_1}{T_p} \right) = I_{\text{пред}}, \quad I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{пред}}}{1 + \frac{T_1}{T_p}}. \quad (5.3)$$

Если от последнего ремонта данный периодический ремонт, при котором проводится дефектация деталей, будет K , то $T_p = KT_1$. Тогда формула для подсчета допустимого износа примет вид:

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{пред}}}{1 + \frac{T_1}{T_p}} = \frac{K}{K+1} I_{\text{пред}}. \quad (5.4)$$

По значениям $I_{\text{пред}}$ можно определять наработку T_p деталей, заменяемых при периодическом ремонте.

Подставляя в формулу значение $I_{\text{доп}} = \gamma T_p$, получаем

$$\gamma T_p = \frac{K}{K+1} I_{\text{пред}}$$

откуда следует

$$T_p = \frac{K}{(K+1)\gamma} I_{\text{пред}} \quad \text{или} \quad T_p = \frac{K}{K+1} T_n \quad (5.5)$$

Учитывая, что γ – случайная величина, в значительной мере зависящая от реальных условий эксплуатации, и, кроме того, наблюдается рассеивание величины T_p , на практике пользуются вероятностными показателями T_p, σ и др.

Рассмотрим пример определения предельных и допустимых размеров или других контрольных показателей технического состояния деталей, сопряжении, механизмов, которые необходимы для дефектации ремонтируемых машин.

Определение допустимых износов деталей и допустимых зазоров сопряжений, имеющих недолговечные сменные детали. На схеме (рисунок 5.3) построены линии износа деталей № 1 и № 2, работающей в сопряжении с деталью № 1. Начальный зазор в сопряжении деталей на схеме обозначен $S_{\text{нач}}$. Средняя интенсивность (скорость) изнашивания детали № 1 характеризуется углом α_1 наклона линии износа, а детали № 2 – углом α_2 . Предельная наработка сопряжения, а следовательно, и предельный зазор в сопряжении определяется аналитически или графически. На схеме эти показатели отмечены верти-

кальной линией I–I, предельная наработка обозначена $T_{пред}$, а предельный зазор – $S_{пред}$



Рисунок 5.3 – К определению допустимых износов деталей и допустимых зазоров в сопряжениях

Если известно, через какую наработку данное сопряжение обязательно вторично поступит на ремонтное предприятие на контроль или ремонт, то по построенной схеме можно установить допустимый износ обеих деталей и допустимый зазор в сопряжении.

Для этого необходимо влево от вертикали I–I отложить значение T_1 , соответствующее межремонтной наработке, и провести вертикаль II–II. Размер $S_{доп}$ показанный на этой вертикали, будет соответствовать значению допустимого зазора в сопряжении, при котором детали с износом можно без восстановления оставить на машине, так как они отработают ресурс до следующего ремонта. Пересечение вертикали II–II с линией износа детали № 1 позволяет определить также допустимый ее износ, обозначенный на рисунке 5.3 $I_{доп1}$, а с линией износа детали № 2 – допустимый износ $I_{доп2}$.

Когда предельный зазор в сопряжении увеличить нельзя и по условиям работы сопряжения одна из деталей имеет больший ресурс

и большой предельный износ без опасности аварии, при ремонте машины можно восстанавливать работоспособность сопряжения заменой одной из деталей (например, детали № 1). В данном случае деталь № 2 будет иметь повышенные предельный и допустимый износы ($I'_{пред2}$ и $I'_{дон2}$)

Допустимые и предельные износы таких деталей, как шестерни, втулки, пальцы, и многих других и зазоры в основных сопряжениях получены с использованием этого метода.

6 Методы испытаний и контроля надежности сельскохозяйственной техники. Классификация методов

Цель испытаний и контроля – определение показателей надежности сельскохозяйственной техники и сравнение их с нормативами или с показателями для машин-аналогов. Различают исследовательские (определяющие) и контрольные испытания.

При исследовательских испытаниях определяют количественные показатели надежности и влияние на их значения различных факторов.

При контрольных испытаниях оценивают соответствие показателей надежности данного объекта заданным нормативам. Промежуточное место занимает техническая диагностика.

Такое деление испытаний носит условный характер. Иногда исследовательские испытания могут быть использованы для оценки соответствия объекта техническим условиям, контрольные испытания – для определения количественных показателей надежности и факторов. Однако это деление удобно, так как отличаются математические методы оценки этих видов испытаний

Исследовательские испытания могут быть стандартными и специальными. При стандартных испытаниях обычно объектами являются образцы изделий (испытания на износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость и т. д.), а результаты испытаний непосредственно не определяют показатели надежности. Этим испытаниям посвящены обширная техническая литература и государственные стандарты. Поэтому здесь, они не рассматриваются.

Будем рассматривать специальные испытания, которые проводятся для оценки показателей надежности. Специальные испытания могут проводиться на стендах, полигонах и в условиях эксплуатации. Каждый из типов испытаний подразделяется на виды, для которых с

учетом их особенностей рассматриваются применяемые средства испытаний, методы оценки показателей надежности и принятия решений.

Следует отметить, что основной вид испытаний машины на надежность в настоящее время – это испытания в хозяйственных условиях. Такие испытания широко используются как контрольные и проводятся на машиноиспытательных станциях (МИС) в условиях подконтрольной эксплуатации при соблюдении правил обслуживания и ремонта, с непрерывным хронометражем и т. д. Хозяйственные испытания также проводят и заводы – изготовители машин. Однако ограниченность агротехнических сроков и сезонность большинства видов работ не всегда позволяют за короткий период оценить надежность машин. Поэтому важно применение методов ускоренной оценки надежности техники и повышение точности получаемых результатов. Для машин серийного производства расширяют объем информации за счет сбора данных в рядовой эксплуатации. Для опытных образцов, имеющих в малых количествах, применяют методы имитационных и ускоренных испытаний на стендах и полигонах.

6.1 Стендовые и полигонные испытания

Стендовые и полигонные испытания проводят в основном как ускоренные, т. е. такие испытания, при которых информацию о надежности объекта получают в более короткие сроки, чем в условиях эксплуатации.

Ускоренные испытания можно подразделить на два вида: уплотненные (по времени) и ужесточенные (по факторам нагружения). Оба вида могут быть усеченными и полными. При усечении по времени испытания ведут либо до появления достаточной доли отказавших объектов из общего числа поставленных на испытания, либо до выявления закономерности изменения параметров состояния совокупности объектов или одного объекта. Усеченные испытания нельзя рассматривать в отрыве от прогнозирования технического состояния. В результате их устанавливают законы изменения вероятностей состояния (статистическое прогнозирование) или параметров состояния объекта (индивидуальное прогнозирование).

В большей мере, чем при стендовых и полигонных испытаниях, со статистическим прогнозированием приходится встречаться в эксплуатационных испытаниях.

Индивидуальный прогноз требует априорных сведений о закономерностях изменения параметров состояния. Использование априорных данных в задаче распознавания состояния объекта в настоящем и будущем, по существу, является задачей технической диагностики.

6.2 Уплотненные по времени испытания

Уплотненными по времени будем называть такие испытания, при которых ускоренное получение информации достигается без интенсификации (в сравнении с эксплуатацией) физико-химического процесса разрушения (без увеличения силового, объемного, поверхностного и других нагружений). Уплотнение времени достигается:

1. Круглосуточными испытаниями, что позволяет увеличить наработку в сравнении с нормальной эксплуатацией, где имеются простои в течение суток;

2. учащенным приложением нагрузки;

3. имитацией воздействия рабочей среды на сельскохозяйственную машину, что позволяет продолжить сезон эксплуатации;

4. воспроизведением неблагоприятного, но реального сочетания конструктивных, производственных, силовых, абразивных, климатических и других факторов (граничные испытания) и т. д.

Большое достоинство уплотненных испытаний – достижение эффекта ускорения, без искажения физической картины потери объектом работоспособности.

Опыт использования уплотненных по времени испытаний свидетельствует о возможности получения существенного ускорения получения информации. Существенное сокращение сроков испытаний позволяет получить разновидность граничных испытаний, при которых воспроизводится неблагоприятное сочетание факторов, проявляющееся не только в начале эксплуатации машины, но и в процессе ее использования.

Известно, что нарушение режимов обслуживания, качества сборки в процессе текущего ремонта и т. д. может приводить к существенному снижению работоспособности объектов. Воспроизводя при стендовых испытаниях неблагоприятные, но возможные нарушения правил эксплуатации и ремонта, можно также ускорить получение информации о времени наступления отказа, не нарушив физическую картину потери работоспособности.

При оценке уплотненных по времени испытаний следует отличать граничные испытания от учащенных в части определения по их результатам действительной надежности объекта в эксплуатации.

6.3 Учащенные испытания

Если при учащенных испытаниях известно, что частота приложения нагрузки увеличена в K_n раз или объект реализовал наработку в K_n раз большую за календарное время, чем в эксплуатации, то средний ресурс, полученный при ускоренных испытаниях T_y , пересчитывается на ожидаемый средний ресурс эксплуатации $T_э$,

$$T_э = K_n T_y,$$

где K_n – коэффициент перехода (ускорения).

При граничных испытаниях получают минимальный ресурс, возможный с определенной вероятностью в эксплуатации при неблагоприятном сочетании условий. Задача состоит в том, чтобы по этим результатам рассчитать средний гамма-процентный ресурс объектов в эксплуатации.

Рассмотрим сначала случай линейной зависимости параметра v , характеризующего работоспособность объекта от влияющих на него факторов:

$$v = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots, \quad (6.1)$$

где a_0, a_1, a_2, \dots – коэффициенты; x_1, x_2, \dots – факторы.

Эту зависимость выводят на основании расчетов или предварительных исследований. Для конкретности полагаем, что v – скорость изнашивания.

Пусть изменения факторов независимы между собой. Тогда среднее и среднеквадратичное значения параметра v равны:

$$\bar{v} = a_0 + a_1 \bar{x}_1 + a_2 \bar{x}_2 + \dots,$$

$$D_v = a_1^2 D_{x_1} + a_2^2 D_{x_2} + \dots$$

Известными методами по первым двум моментам можно построить плотность и функцию распределения параметра v [$f(v)$ и $F(v)$]. Пусть износ определяется так:

$$I = vt^\alpha$$

Тогда вероятность безотказной работы:

$$P(I < I_{пред}) = P(vt < I_{пред}) = P\left(v < \frac{I_{пред}}{t^\alpha}\right) = F\left(v < \frac{I_{пред}}{t^\alpha}\right) = \gamma,$$

где $I_{пред}$ – предельный износ, F – функция распределения параметра v .

Пусть при испытаниях необходимо воспроизвести гамма-процентный ресурс t_γ . Тогда из последнего условия по зависимости $F(v) = \gamma$ находим

$$v_\gamma = \frac{I_{пред}}{t_\gamma^\alpha}. \quad (6.2)$$

Варьируя параметрами x_1, x_2 в формуле (6.1), обеспечиваем при испытаниях величину $v = v_\gamma$, при которой экспериментально полученный ресурс должен соответствовать гамма-процентному (6.2). Такие испытания дают возможность оценить и другие характеристики надежности объекта.

Граничные испытания имеют и самостоятельную ценность. Они могут быть использованы как контрольные (может быть установлен минимальный допустимый ресурс, который должен обеспечить изготовитель продукции). Коэффициент ускорения испытания при граничных испытаниях:

$$K_n = \alpha \sqrt{\frac{v_\gamma}{v_{50}}}.$$

Он может достигать существенных значений: от 2...3 до 50 и выше, в зависимости от закона распределения ресурса и вида зависимости (6.1). Приведенный метод рассмотрен на примере линейной зависимости (6.1). Это предположение не обязательно.

Естественно, что под v можно понимать не только скорость изнашивания, но и другой параметр состояния: например, изменение длины трещины в раме машины в единицу времени, увеличение площади питтинга на поверхности зуба шестерни в единицу времени, увеличение меры повреждения при усталостном повреждении и т. д.

Несмотря на эффективность уплотненных испытаний, они не всегда могут дать достаточное ускорение в получении информации о надежности объекта, и приходится прибегать к ужесточению по факторам нагружения.

6.4 Ужесточенные по нагружению испытания

Ужесточенными по нагружению испытаниями будем называть такие, при которых ускоренное получение информации достигается с интенсификацией (в сравнении с эксплуатацией) физико-химического процесса разрушения (с увеличением силового – объемного, поверхностного и др. нагружения).

Ужесточенные испытания сокращают время проведения испытаний, однако их следует использовать весьма осторожно, поскольку результаты этих испытаний могут не соответствовать данным эксплуатации. Другими словами, отказы при ускоренных испытаниях могут не повторяться в эксплуатации, и смысл таких ускоренных испытаний теряется. Чтобы обеспечить эффективность ужесточенных испытаний, необходимо соблюсти их подобие с эксплуатационными испытаниями. Подобие испытаний можно сформулировать с двух позиций: физическое и математическое

Физическое подобие состоит в том, чтобы физическая картина отказа при ужесточенных и эксплуатационных испытаниях была одинакова по характеру и виду разрушения (место разрушения, вид и характер деформированного состояния, температурные режимы, форма изношенной поверхности, вид износа и т. д.). Каждый процесс разрушения имеет свою критическую область, при выходе из этой области происходят качественные его изменения. Режим ужесточенных испытаний следует выбирать так, чтобы эта критическая область не была достигнута и, следовательно, качественная сторона процесса разрушения осталась неизменной.

Математическое подобие состоит в том, чтобы вероятности безотказной работы объекта при ужесточенных и эксплуатационных испытаниях были одинаковы (принцип равных вероятностей):

$$P(t_y) = P(t_э) \quad (6.3)$$

Если ввести, как и ранее, коэффициент перехода от ускоренных испытаний к эксплуатационным $K_n = \frac{T_э}{T_y}$ и потребовать из условия масштабного подобия, чтобы

$$K_n = \text{const.} \quad (6.4)$$

для любого t , то условие равенства вероятностей приведет к равенству коэффициентов вариации времени безотказной работы при ускоренных испытаниях и в эксплуатации:

$$v_y = v_t.$$

Этот вывод справедлив для любых законов распределения, но одинаковых при ускоренных и эксплуатационных испытаниях. Поскольку средние ресурсы и коэффициенты вариации при испытаниях определяются по конечным выборкам, то математические условия (6.3) и (6.4) должны выполняться в статистическом смысле.

Пусть проведены ускоренные испытания n_y образцов и эксплуатационные $n_э$ образцов. Тогда, принимая в качестве средних полученные из опыта $T_э, T_y, \sigma_э, \sigma_y$, вычислим $K_n = \frac{T_э}{T_y}$, $v_э = \frac{\sigma_э}{T_э}$, $v_y = \frac{\sigma_y}{T_y}$.

После чего удовлетворение условия (6.4) проверяется выполнением неравенства

$$\frac{|v_э - v_y|}{\sqrt{\frac{v_э^2}{2n_э} + \frac{v_y^2}{2n_y}}} < 3.$$

Если оно удовлетворено, то условие подобия (6.4) выполнено.

7 Эксплуатационные испытания машин на надежность

Ранее были изложены методы определения показателей надежности по полным выборкам, т. е. когда все объекты, поставленные на испытания, отказали. В условиях реальных испытаний это бывает редко. Погрешности при оценке показателей надежности объектов в результате эксплуатационных испытаний возникают вследствие следующих причин:

- 1) ограниченности объема выборки (статистическая погрешность);
- 2) потери части информации об отказах (систематическая погрешность).

Вид погрешности, как правило, связан с методом получения информации о надежности.

Испытания на отказ. Серийные машины, продолжительность испытаний случайная, информационный параметр – наработка до отказа. Вероятность безотказной работы объекта χ при испытаниях со

случайной продолжительностью (многократноусеченная выборка) определяется по выражению:

$$R(t) = \exp \left\{ -P \int_0^t \frac{\tilde{f}_{OT}(t)}{1 - \tilde{F}_\Sigma(t)} dt \right\}, \quad (7.1)$$

где P – вероятность отказа объекта при испытаниях со случайной продолжительностью (доля отказавших объектом по всей совокупности); $f_{OT}(t)$ – плотность распределения наработки до отказа отказавших при испытаниях объектов; $F_\Sigma(t)$ – функция распределения совокупности наработок до отказа и наработок до приостановки испытаний (неотказавшие объекты).

Если, например, наработки до отказа и общей совокупности наработок распределены по закону Вейбулла:

$$\tilde{f}_{OT}(t) = \frac{b}{a_{OT}} \left(\frac{t}{a_{OT}} \right)^{b-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{a_{OT}} \right)^b \right],$$

$$F_\Sigma(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{a_{OT}} \right)^b \right],$$

то вероятность безотказной работы подсчитывают по формуле

$$R(t) = \exp \left\{ \frac{Pa}{a_{OT}^b - a^b} \left[1 - \exp \left[\left(\frac{t}{a} \right)^b - \left(\frac{t}{a_{OT}} \right)^b \right] \right] \right\} \text{ при } t < \infty. \quad (7.2)$$

Воспользоваться формулой (7.2) можно в том случае, если имеется достаточная выборка наработок отказавших объектов. Отметим, что параметры распределения Вейбулла целесообразно определять с помощью вероятностной бумаги.

При подконтрольных испытаниях серийных машин, несмотря на достаточный объем выборки, часто число отказавших объектов мало. В этом случае необходимо привлечь дополнительную информацию, для чего выразим функцию распределения совокупностей наработок $F_\Sigma(t)$ – в виде:

$$\tilde{F}(t) = P\tilde{F}_{OT}(t) + (1 - P)\tilde{F}_{np}(t), \quad (7.3)$$

где $\tilde{F}_{OT}(t)$ – функция распределения наработки отказавших объектов; $\tilde{F}_{np}(t)$ – функция распределения наработки до приостановки испыта-

ний объектов в случае, если испытания были прерваны не вследствие отказов, а по другим причинам.

Формула (7.3) позволяет оценивать вероятность безотказной работы, используя различные выборки из генеральной совокупности наработок до отказа и до приостановок. Так, плотность распределения $f_{OT}(t)$ может быть оценена по данным о рекламациях и другим сведениям только об отказавших объектах, которые обычно имеются на заводах-изготовителях. Функция распределения $F_{np}(t)$ и доля отказавших объектов достаточно точно определяются по результатам испытаний подконтрольной выборки.

Таким образом, удалось избежать построения плотности распределения наработок отказавших объектов, которых в подконтрольной выборке мало. Отметим, что при этом предварительно необходимо проверить статистическую однородность дополнительно привлеченной и основной подконтрольной выборки.

В связи с тем, что доля отказавших объектов в подконтрольной выборке мала, необходимо вычислить доверительные границы для вероятности P .

Подставляя их в (7.2), (7.3), определяем $R(t)$ и $\underline{R}(t)$.

Опытные машины, продолжительность испытаний случайная, информационный параметр – наработка до отказа. В этом случае число объектов и отказавших, и приостановленных мало. Вероятность безотказной работы целесообразно вычислять по формуле (7.2), а параметры распределений a, b, a_{OT} – с помощью вероятностной бумаги; доверительные границы для b – по формулам. При отсутствии вероятностной бумаги параметр b задается на основании данных об объекте-аналоге, а параметры a, a_{OT} могут быть подсчитаны по формулам:

$$a_{OT} = \left[\frac{\sum_{k=1}^r t_k^b + \sum_{K=r+1}^N T_k^b}{N} \right]^{1/b}, \quad a_{OT} = \left[\frac{\sum_{K=1}^N \bar{T}_k^b}{N} \right]^{1/b}, \quad (7.4)$$

где t_k и T_k – наработки до отказов и приостановок; \bar{T}_k – наработка совокупности объектов.

При отсутствии отказов в выборке нижняя доверительная граница \underline{a}_{OT} равна:

$$\underline{a}_{OT} = \left[-\frac{\sum_{K=1}^N T_k^b}{\ln \alpha} \right]^{1/b}, \quad (7.5)$$

где α – доверительная вероятность.

Естественно, что при малом числе объектов, поставленных на испытания, и при малом числе их отказов точность вычислений невелика. Ее можно повысить, привлекая к анализу данных априорную информацию.

Серийные машины, сбор информации дискретный, информационный параметр – наработка до отказа. Одноразовый дискретный контроль методом опроса удобен при испытаниях сельскохозяйственной техники в условиях рядовой эксплуатации тем, что позволяет получить большой объем данных и оценить влияние рассеивания эксплуатационных воздействий на надежность машины и ее элементов. Такую систему сбора информации правомерно отнести к системам типа «человек – техника». Ранее при сборе информации предполагали абсолютную надежность ее передающего звена – механизатора, работающего на машине. Однако практика контроля надежности методом дискретного опроса показывает, что по объективным и субъективным причинам часть информации, особенно о мелких, легкоустраняемых отказах при этом теряется, что приводит к завышению показателей надежности на 15...20 %.

Определение надежности объекта, работающего в различных режимах. Пусть объект работает в нескольких режимах: P_1, P_2, P_3, \dots с вероятностями $R(P_1), R(P_2), R(P_3), \dots$

Пользуясь формулой полной вероятности, определим безусловную вероятность безотказной работы:

$$R(t) = R(P_1)R\left(\frac{t}{P_1}\right) + R(P_2)R\left(\frac{t}{P_2}\right) + R(P_3)R\left(\frac{t}{P_3}\right) + \dots \quad (7.6)$$

Определение надежности объекта по данным о распределении времени безотказной работы, полученным из разных источников. Пусть из разных источников получены плотности распределения вре-

мени безотказной работы объекта (эксплуатационные, стендовые, имитационные испытания и др.): $f_1(t), f_2(t), f_3(t)$.

Необходимо оценить ожидаемую плотность распределения. Пользуясь формулой полной вероятности, получим

$$f(t) = \sum_{i=1}^k P_i f_i(t), \quad (7.7)$$

где $P_i = n_i / N$ – весовые коэффициенты; $N = \sum_{i=1}^k n_i$ – общее число испытанных объектов; n_i – число объектов, испытанных при каждом испытании.

Пользуясь приведенной формулой, можно аналогично записать выражение для среднего времени безотказной работы и дисперсии:

$$T = \sum_{i=1}^k P_i T_i, \quad D = \sum_{i=1}^k P_i^2 D_i. \quad (7.8)$$

8 Испытания по параметру состояния и нагруженности. Техническая диагностика надежности

Испытания по параметру состояния. Пусть в процессе испытаний удастся измерить в каждом конкретном образце изменение некоторого параметра во времени (износ, зазор, температура и т. п.), то есть построить реализации процессов. Пусть также каждая реализация описывается аналитическим выражением вида:

$$I = a + bt^{\nu}, \quad (8.1)$$

где a и b – определенные для каждой реализации значения, в совокупности представляющие собой случайные числа, по конкретным значениям которых можно построить плотности распределений $f(a)$ и $f(b)$, определить математические ожидания a , b и дисперсии $D(a)$ и $D(b)$, ν – постоянный параметр, характерный для данного вида объекта.

При $\nu = 1$ коэффициент b – скорость изменения параметра (износа) I и каждое его значение определяют по одному измерению:

$$b_i = \frac{N_i}{t_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Реализации такого вида достаточно широко распространены в практике. Отказ объекта наступает тогда, когда выполняется неравенство:

$$I > I_{\text{пред}}; \quad y = I - I_{\text{пред}} > 0,$$

где $I_{пред}$ – предельное значение параметра.

Вероятность этого события определяет вероятность отказа, а противоположного ($I - I_{пред} > 0$,) – вероятность безотказной работы.

$$R(t) = P(I - I_{пред} > 0) = \int_0^{\infty} f(y) dy. \quad (8.2)$$

Для вычисления вероятности безотказной работы необходимо вычислить плотность распределения параметра y . Будем считать, что предельное значение $I_{пред}$ – величина случайная, I – также величина случайная. Положим, что обе эти величины распределены по нормальному закону. Тогда параметр y также распределен нормально.

Параметры этого нормального распределения (математическое ожидание и дисперсия) равны соответственно разности математических ожиданий и сумме дисперсий параметров I и $I_{пред}$:

$$M(y) = M(I_{пред}) - M(I); \quad D(y) = D(I_{пред}) + D(I).$$

Определим $M(I)$ и $D(I)$.

Если в выражении (8.1) a и b независимы и распределены по нормальному закону, то

$$M(I) = M(a) + M(b)t^{\nu}; \quad D(I) = D(a) + D(b)t^{2\nu}.$$

Вероятность безотказной работы при $D > (I_{пред}) = 0, M(I_{пред}) = I_n$ определяется по формуле:

$$R(t) = F_0 \left[\frac{I_{пред} - M(a) - M(b)t^{\nu}}{\sqrt{D(a) + D(b)t^{2\nu}}} \right], \quad (8.3)$$

где $F_0[z]$ – функция Лапласа.

Задавая различные значения t , строим функцию $R(t)$, из которой можно легко определить все остальные характеристики надежности (средний ресурс, гамма-процентный ресурс и т. д.).

Не всегда удается определить характеристики реализации параметра, поскольку это требует непрерывных измерений во времени достаточно большого числа объектов.

Испытания по параметру погруженности. При испытаниях машин зачастую измеряют нагруженность деталей, то есть тем или другим способом фиксируют действующие переменные нагрузки в функции времени работы. Эти данные обычно используют для оценки

усталостной прочности деталей. Как известно, усталость – это процесс накопления повреждений под действием переменных напряжений. Переменные напряжения характеризуются циклами. К типовым циклам нагружений приводят действительные сложные изменения напряжений в деталях машин. Основные характеристики цикла: амплитуда, максимальное, минимальное, среднее значения, размах, коэффициент асимметрии напряжения цикла, период одного цикла.

Различают симметричный цикл, пульсирующий цикл, асимметричный цикл. Ассиметричный цикл напряжений наиболее характерен для деталей сельскохозяйственной техники. В качестве основных характеристик сопротивления усталости принимают кривые усталости, параметры которых определяют или экспериментальным методом, или путем испытания детали в натуральную величину, или путем испытания стандартных образцов.

Техническая диагностика

Техническая диагностика машин – это научная дисциплина, обеспечивающая разработку методов и средств для получения достоверной информации о настоящем и будущем техническом состоянии конкретной машины и ее составных частей. Она позволяет своевременно выявлять и предотвращать отказы и, следовательно, повышать надежность и эффективность эксплуатации, создавать предпосылки к переходу в эксплуатации технических систем от планово-предупредительной системы обслуживания к обслуживанию и ремонту по состоянию. При обслуживании по состоянию каждый экземпляр эксплуатируется до предельного состояния в соответствии с рекомендациями системы технической диагностики.

В настоящее время серийно изготавливают и повсеместно используют простые и достаточно надежные диагностические средства в виде передвижных установок, оборудования стационарных постов, комплектов переносных приборов и устройств. Правильное применение этих средств показало высокую технико-экономическую эффективность: например, уменьшение простоев тракторов в 2 ... 2,5 раза, сокращение числа их ремонтов в 1,3... 1,5 раза, увеличение фактической межремонтной наработки на 500 моточасов и др.

Основные определения и задачи диагностики. Основные термины и определения технической диагностики регламентированы ГОСТ.

Техническое состояние – совокупность свойств объекта, характеризующаяся в определенный момент времени признаками (параметрами) состояния.

Диагностический признак (параметр) – признак (параметр), используемый для определения технического состояния объекта, косвенно характеризующий его работоспособность (температура, шум, вибрация, расход топлива, масла и др.).

Структурный параметр – параметр, непосредственно характеризующий работоспособность объекта (износ, размер детали, зазор, натяг в сопряжении и др.).

Реализация параметра – непрерывное изменение параметра состояния конкретного объекта диагностирования.

Обобщенный параметр – диагностический параметр, характеризующий техническое состояние нескольких составных частей машины.

Номинальное значение параметра – значение параметра, определяемое его функциональным назначением и служащее началом отсчета отклонений.

Допускаемое значение параметра – граничное значение параметра, с которым составную часть еще допускают к эксплуатации после контроля без операции технического обслуживания и ремонта, обеспечивающее надежную работу элемента до следующего, планового контроля.

Предельное значение параметра – наибольшее или наименьшее значение параметра, которое может иметь работоспособная составная часть.

Алгоритм диагностирования – совокупность предписаний о проведении диагностирования.

Термин «диагностика» означает распознавание. В процессе технического диагностирования устанавливают диагноз, то есть определяют (распознают) состояние технической системы для принятия решения о необходимости профилактических или ремонтных работ. Основная особенность технической диагностики состоит в том, что распознавание состояния происходит в условиях ограниченной информации. Действительно, распознавая состояние индивидуального объекта, обычно пользуются безразборным методом, в противном случае это приводит к лишним затратам, если разборка выполнена преждевременно.

При безразборном диагностировании могут быть определены лишь диагностические, подчас обобщенные, а не конкретные структурные признаки (параметры) объекта. Вместе с тем работоспособность объекта характеризуется структурными параметрами. Поэтому, чтобы диагностировать состояние машины или ее составной части, необходимо установить связи (детерминированные или вероятностные) между диагностическими и структурными параметрами. Поскольку при диагностировании к распознаванию состояния предъявляют на момент диагностирования один образец, то эти связи принципиально можно установить лишь путем предварительного анализа аналогичных образцов диагностируемого объекта.

Таким образом, первая принципиальная отличительная особенность диагностики технического состояния – наличие предварительной (априорной) информации о связях между диагностическими и структурными параметрами объекта в фиксированный момент времени.

Однако задача диагностики состоит в том, чтобы не только установить техническое состояние объекта, но и принять решение, является ли оно приемлемым для дальнейшей эксплуатации изделия или требуется применение профилактических и ремонтных работ. Если параметры состояния достигли предельных значений, то решение очевидно, если же нет, то необходимо установить, когда это произойдет. В противном случае возникает потребность непрерывно определять техническое состояние изделия. Это возможно, и существует так называемая встроенная система диагностирования, которая непрерывно выдает информацию о техническом состоянии объекта. Она применяется либо в том случае, когда практическая ее реализация возможна простыми средствами (замер давления масла, температуры и др.), либо в особо ответственных случаях.

В большинстве случаев необходимо знать предполагаемую функциональную временную зависимость для диагностических параметров. Такую зависимость можно получить двумя способами: либо изучать предысторию для данного диагностируемого объекта, что снова требует встроенной системы диагностирования; либо предварительно собрать информацию о совокупности временных диагностических реализаций для аналогичных объектов и, сравнив их с результатами диагностики объекта в данный момент, принять ту или иную гипотезу о дальнейшем поведении параметров объекта диагностирования. Эту задачу обычно называют задачей индивидуального прогно-

зирования состояния объекта. Она тесно связана и с задачей определения оптимальной периодичности проведения диагностики.

Итак, вторая принципиальная отличительная особенность при дискретном (в отдельные моменты времени эксплуатации) диагностировании – необходимость иметь предварительные данные (априорную информацию) о реализациях диагностических параметров для аналогичных образцов.

Объединяя обе отличительные особенности, можно утверждать, что для диагностирования объекта необходимо иметь в общем случае априорную информацию о диагностических параметрах (признаках) в пространстве параметров (признаков) и во времени.

Очевидно, что теоретически возможны и частные случаи. Если диагностический параметр и параметры состояния совпадают, то необходимость в априорном определении связей между ними отпадает и остается лишь априорная информация во времени. Если реализации диагностических параметров не имеют рассеивания от объекта к объекту, то априорная информация требуется в минимальном количестве и это позволяет достаточно строго предвидеть момент наступления предельного состояния, а значит, потребность в диагностировании во времени отпадает и остается лишь диагностика в пространстве параметров (признаков) для целенаправленного проведения профилактических и ремонтных работ.

Практически в «чистом» виде ни один из случаев не встречается.

9 Контрольные испытания машин на надежность

Контроль качества и надежности техники при изготовлении и ремонте – один из основных методов обеспечения ее работоспособности в эксплуатации.

В процессе производства действуют факторы, которые приводят к понижению надежности изготовленных объектов. Эти факторы можно условно подразделить на две группы. Первая группа – грубые нарушения норм технологического процесса, выражающиеся в виде ошибок монтажа, скрытых дефектов в комплектующих изделиях. Вторая группа – непредусмотренные частичные изменения первоначальных свойств элементов и материалов, понижающих их надежность.

Дефекты первой группы обнаруживают путем полной проверки системы на соответствие ее параметров требованиям технических условий (ТУ). Контроль дефектов второй группы – это контроль надежности системы, и он во многих случаях связан с существенной выработкой ресурса или даже с разрушением контролируемых изделий.

Если контроль прост и стоимость его невелика, то используют так называемый сплошной контроль (проверяют все изделия). В результате контроля изделие не разрушается. Обычно при контроле надежности применяют так называемый выборочный (статистический) контроль, поскольку требуется разрушение изделия. При выборочном контроле проверяют часть из партии изделий (выборка), и по ней принимается заключение о надежности всей партии.

Различают два вида статистического выборочного контроля надежности, контроль по альтернативному признаку и контроль по количественному признаку.

При контроле по альтернативному признаку все изделия в выборке разбиваются на две группы: годные и дефектные. Оценку надежности партии проводят по доле дефектных изделий в общем числе проверенных изделий. Испытания проводят в течение заданного времени, при этом фиксируют только число изделий, отказавших за это время. Отказавшие изделия считаются дефектными, не отказавшие – годными.

При контроле по количественному признаку у каждого изделия при испытаниях определяют один или несколько параметров и оценку партии проводят по статистическим характеристикам распределения этих параметров. При испытаниях, например, на долговечность все изделия выборки доводят до отказа фиксируют наработку каждого из них, а затем, анализируя статистические характеристики наработки, устанавливают соответствие всей партии нормативам надежности.

Контроль по альтернативному признаку и по количественным показателям можно выполнять несколькими методами: однократной выборкой, многократной выборкой и последовательным контролем.

Метод последовательного контроля не устанавливает заранее число изделий, которые следует поставить на испытания, а их берется столько, сколько требуется для принятия решения: удовлетворяет партия объектов техническим условиям или нет.

10 Основные направления повышения надежности сельскохозяйственной техники. Конструктивные и технологические мероприятия повышения надежности

Повышение надежности тракторов и других сельскохозяйственных машин при их **конструировании** ведется по следующим основным направлениям.

Выбор долговечных материалов деталей и рациональных их сочетаний в парах.

Материалы деталей и рациональное их сочетание подбирают на основе двух главных требований: получение нужной долговечности и невысокой их стоимости.

Для каждой конкретной детали (сопряжения) учитывают условия работы, вид изнашивания, применение термической, химико-термической и других видов упрочняющей обработки, требования точности изготовления и т. д. Долговечность большинства деталей (сопряжений) сельскохозяйственной техники определяют сопротивляемостью их изнашиванию и главным образом в сочетании с воздействием абразивных частиц. Большая группа деталей (коленчатые валы, коленчатые оси, поворотные цапфы и др.) в работе подвергается воздействию циклических и динамических нагрузок, в связи с чем, к материалам этих деталей наряду с износостойкостью предъявляются дополнительные требования – высокая усталостная прочность и ударная вязкость. К материалам таких деталей, как шестерни, подшипники скольжения и качения, кулачковые валы, крестовины карданных валов и дифференциалов и другие, предъявляются еще и требования высокой контактной усталостной прочности.

Обеспечение нормальных условий работы деталей при наименьших потерях на трение. Для длительной и надежной работы деталей прежде всего расчетами определяют рациональные размеры трущихся (контактирующих) поверхностей, их геометрическую форму и другие параметры. Например, поверхности подшипников скольжения рассчитывают на удельные нагрузки; поверхности шлицев и опор валов – на смятие; фрикционные пары – на нагрев; рессоры – на усталость и т. д. Во многих случаях конструктор стремится вместо подшипников скольжения применить наиболее долговечные и дешевые подшипники качения, обеспечить минимальные потери на трение в трущихся парах. Переход на подшипники качения повышает их надежность, уменьшает расход цветных металлов, значительно снижает

пусковые моменты, упрощает обслуживание. Вместе с тем необходимо помнить, что подшипники качения выдерживают меньшие скорости и нагрузки, требуют увеличения размеров деталей, обеспечивают меньшую точность работы механизмов, вызывают шум в передачах и снижают сопротивляемость их вибрациям.

Снижение концентрации напряжений при выборе формы и размеров детали. Особое внимание необходимо обратить на это в местах галтелей, надрезов, канавок и других поверхностей, особенно деталей, подверженных динамическим и циклическим нагрузкам.

Создание оптимальных температурных режимов работы сопряжений деталей, сборочных единиц и агрегатов в форсированных машинах играет весьма важную роль в повышении их долговечности. Температурные условия процесса прежде всего оказывают влияние на износ деталей и форму его проявления. Регулировать температуру в узлах трения и нагрев деталей вообще в двигателях можно за счет охлаждения воды (воздуха) и картерного масла, а также применением таких конструкторских решений, как создание теплоизолирующих прорезей (в головках блока и на поршнях), установка в бобышках поршней пластинок из инвара, заполнение пустотелых впускных клапанов металлическим натрием и др.

Обеспечение хороших условий смазывания трущихся поверхностей деталей.

Создание эффективных устройств для очистки воздуха топлива, смазки. Эффективными мероприятиями по улучшению очистки воздуха, топлива и смазки в двигателях следующие: по очистке воздуха – применение циклонных и комбинированных воздухоочистителей, по двойной очистке топлива – использование фильтров грубой и тонкой очистки с фильтрующими бумажными элементами, по очистке масла – создание полнопоточных масляных центрифуг, применение центробежной очистки масла в полостях шатунных шеек коленчатых валов и т.д.

Улучшение конструкции и материалов уплотнительных устройств и герметизация сборочных единиц и агрегатов для с/х техники.

Обеспечение достаточной жесткости базовых деталей машин и устойчивости их к вибрациям. Базовые детали (рамы, блоки цилиндров, корпуса коробок перемены передач и задних мостов) определяют работоспособность других деталей и обеспечивают для них доста-

точную жесткость, устойчивость и стабильность размеров, особенно взаимного расположения рабочих поверхностей.

Другие мероприятия: применение двойных силовых пружин для сцепления; использование распределительных валов с безударным профилем кулачков; гидравлическое натяжение гусениц и защитных устройств для них; повышение качества крепежа; увеличение жесткости трансмиссий тракторов, использование поддерживающих роликов с резиновыми бандажами; повышение надежности пружин подвески; применение двухслойных пальцев гусениц и измененной конструкции звеньев гусениц; обеспечивающих безударную работу опорных катков и лучший контакт со звездочкой в зацеплении; введение гидротрансмиссии; использование новой конструкции

Производства высококачественных деталей для сельскохозяйственной техники конструкторы добиваются в тесном контакте с технологами путем выполнения следующих основных **технологических** (чаще конструктивно-технологических) мероприятий.

Обеспечение необходимой точности и качества изготовления деталей зависит от уровня используемого обрабатывающего оборудования и точности размеров рабочих поверхностей деталей, а также от точности взаимного расположения этих поверхностей.

С повышением точности изготовления деталей уменьшаются начальные зазоры в подвижных сопряжениях и более жестко регламентируются натяги в неподвижных соединениях, что значительно повышает долговечность машин, их доремонтный ресурс. Машиностроительное производство постоянно стремится к повышению качества рабочих поверхностей деталей (уменьшению их шероховатости и искажений макрогеометрии). В зависимости от условий эксплуатации машин в трущихся парах устанавливается определенная шероховатость, которую и необходимо соблюдать при производстве техники. Эта оптимальная шероховатость должна задаваться и для поверхностей деталей с неподвижными посадками. Чем меньше шероховатость, тем больше сопротивляемость поверхностей деталей к коррозионным износам. Существенное влияние оказывает шероховатость поверхности на циклическую, а также на динамическую прочность деталей машин.

Достижение высоких геометрических характеристик качества поверхностей возможно при использовании принципиально различных методов и оснастки: срезание неровностей поверхностей путем тонкого шлифования, хонингования, суперфиниша и полирования,

особенно с применением синтетических алмазов; смятие поверхностей за счет поверхностного пластического деформирования обкатывания, раскатывания, алмазного выглаживания; создание нового микропрофиля поверхности применением электрических методов обработки: электрохимической, электромеханической, обработкой в магнитном поле и тд.

Выбор наиболее рационального вида обработки для различных групп деталей и их рабочих поверхностей. Отделочные операции необходимы не только для улучшения шероховатости, но и для удаления тонкого дефектного поверхностного слоя со сниженными физико-механическими свойствами.

11 Эксплуатационные мероприятия повышения надежности

Условия эксплуатации машин решающе влияют на показатели их надежности и могут свести на нет любые достижения конструкторов и технологов. В связи с этим выполнению эксплуатационных мероприятий, повышающих доремонтные и межремонтные сроки службы машин, должно уделяться огромное внимание.

Долговечность и безотказность машин в эксплуатации зависят от целого ряда мероприятий, которые необходимо соблюдать всем инженерно-техническим работникам, механизаторам хозяйств и рабочим ремонтных предприятий.

Обкатка новых (отремонтированных) машин в хозяйствах фактически закладывает основы длительной и безотказной работы машин и должна проводиться в течение 50... 60 ч при постепенном повышении нагрузки в соответствии с рекомендациями заводоизготовителей или ремонтных предприятий.

Обкатка тракторов включает в себя: опробование работы двигателя без нагрузки и обкатку трактора с постепенным повышением нагрузки при выполнении полезных сельскохозяйственных и транспортных работ, не требующих значительных тяговых усилий. Легкие транспортные работы особенно рекомендуются для тракторов в первые 20...25 ч обкатки. Во время обкатки постоянно ведут контроль за работой двигателя и всех агрегатов с целью выявления повышенного нагрева, шумов и стуков, утечки масла и др. Тщательно выполняют все операции ежедневного ТО. По завершении обкатки проводится плановое ТО-1 трактора с заменой смазки в двигателе и во всех агрегатах и сборочных единицах трансмиссии и ходовой части. За период

производственной обкатки рекомендуется трижды менять смазку, а ограничение мощности снимать через 120 ч работы двигателя. Это позволит лучше приработать трущиеся поверхности и подготовить их к нормальному нагружению.

Организация технического обслуживания и создание для его проведения необходимой базы – основные условия обеспечения надежной и экономичной работы машино-тракторного парка.

Система технического обслуживания сельскохозяйственной техники предусматривает проведение ежесменных (через 8... 10 ч), сезонных (2 раза в год) и плановых технических обслуживания.

Периодичность проведения технических обслуживания машин необходимо строго соблюдать независимо от загрузки их различными сельскохозяйственными работами. Работа на машинах без проведения установленных технических обслуживания запрещается.

Наиболее прогрессивная форма учета продолжительности работы тракторов и определения конкретных сроков проведения плановых технических обслуживания – жетонная система, основанная на учете израсходованного топлива.

Проведение периодических технических осмотров и технического диагностирования состояния машин, сборочных единиц и агрегатов. Периодические технические осмотры – составная часть общей системы технического обслуживания машин. Их проводят один-два раза в год с целью контроля за уровнем эксплуатации и хранением машин, выборочной проверки их технического состояния (особенно с применением средств технической диагностики), организации и деятельности инженерной службы в хозяйстве, ведения технической документации и др. Проведение технических осмотров машин в значительной мере улучшает деятельность технических служб хозяйств и повышает надежность используемой ими сельскохозяйственной техники.

Обеспечение нормального режима работы машин, особенно в зимнее время, повышает их долговечность. Перегрузка машин (по нагрузке и скорости), неправильные регулировки зазоров в подшипниках, шестернях и других соединениях вызывают нарушения температурного режима работы трущихся поверхностей деталей, условий смазывания, что приводит к форсированному их износу. Наиболее высокие удельные нагрузки на детали машин и крайне ухудшенные условия их смазывания наблюдаются при начальных запусках двигателей и включении агрегатов трансмиссий в холодное время года (при

температуре ниже 5 °С). Несколько минут такой работы вызывают износы (которые могли бы появиться за десятки и даже сотни часов нормальной эксплуатации) и часто приводят к авариям.

Соблюдение установленных правил хранения машин. Основные эксплуатационные мероприятия, обеспечивающие высокую сохранность сельскохозяйственной техники, особенно в периоды, свободные от работы, и в осенне-зимнее время, следующие: организация специальных помещений и площадок с твердым покрытием, использование различных подставок и подкладок, очистка деталей от технологических загрязнений и почвы, нанесение на неокрашиваемые рабочие и другие поверхности защитных смазок, своевременное восстановление нарушенных лакокрасочных покрытий, хранение в закрытых помещениях электрооборудования, резины, приборов, рабочих органов машин и др.

Контроль и постоянное соблюдение требуемой герметизации агрегатов, сборочных единиц и систем машин в целях предупреждения попадания в них абразива для сельскохозяйственной техники – важный фактор повышения долговечности. Герметичность в большинстве случаев нарушается вследствие ослабления креплений крышек под действием вибраций, из-за низкого качества прокладочного материала, износа, несвоевременной замены сальниковых уплотнителей, короблений корпусных деталей и их плоскостей разъемов и из-за других причин.

Так как в процессе эксплуатации машин внутри их агрегатов температура повышается до 70...90 °С и в результате температурного перепада из окружающей атмосферы во внутренние полости агрегатов засасывается воздух, обильно содержащий абразивные частицы (особенно на таких работах, как культивация, боронование и др.), герметизации узлов и агрегатов следует уделять особое внимание. При эксплуатации машин в тяжелых условиях (повышенная запыленность воздуха, высокая температура окружающего воздуха и др.) рекомендуется воздухоочистители промывать через 25...30 ч, а центрифуги – через 120 ч работы.

12 Мероприятия по повышению долговечности машин. Ремонтные мероприятия повышения надежности машин

Подготовка и выполнение восстановительных процессов, используемых для «возрождения» изношенных деталей машин, оказы-

вают решающее влияние на их послеремонтный ресурс в целом. Это происходит потому, что восстановлению подвергают обычно быстроизнашивающиеся детали, и работоспособность любой машины в первую очередь зависит от качества деталей, устанавливаемых в нее при ремонте.

Качество и долговечность восстанавливаемых деталей зависят главным образом от выбора рационального способа восстановления, применения упрочняющей технологии и получения заданного качества поверхности, особенно на стадии финишных операций обработки и упрочнения восстанавливаемых деталей.

Применяя различные технологические процессы восстановления, особенно металлопокрытиями, и упрочняющую технологию, можно не только восстанавливать потерянные размеры деталей и первоначальные служебные свойства, но и значительно их повышать.

Примером этому может служить создание биметаллических поверхностей у новых деталей и значительное повышение их долговечности (хромированные поршневые кольца, наплавленные клапаны двигателей, рабочие органы сельскохозяйственных машин и др.).

Анализ конструктивно-технологических характеристик, условий работы и износа деталей эксплуатируемых, а особенно, перспективных тракторов, показывает, что сельскохозяйственное ремонтное производство должно применять следующие способы восстановления деталей, обеспечивающих им высокие показатели долговечности:

1. Восстановление и повышение долговечности деталей наплавкой;
2. Восстановление деталей и повышение их долговечности сваркой;
3. Упрочнение деталей, восстанавливаемых наплавкой и сваркой;
4. Восстановление и упрочнение деталей гальваническими покрытиями;
5. Восстановление деталей полимерными материалами.

Ремонт машин – представляет собой весьма важное звено в общей системе поддержания машино-тракторного парка в работоспособном состоянии. При ремонте машин одновременно возможны их модернизация и проведение мероприятий по повышению долговечности. Основные пути решения этой задачи следующие.

Обеспечение сохраняемости ремонтного фонда поступающего на ремонтные предприятия. Достигается организацией соответ-

вующих складов и площадок, применением различных подставок и подкладок, антикоррозионных смазок и других средств. Особое внимание следует уделять защите от коррозии ремонтного фонда деталей машин, поступающих для восстановления, которые при неудовлетворительном хранении могут быть превращены в металлолом.

Внедрение на ремонтных предприятиях эффективной мойки и очистки деталей от различных загрязнений – одно из наиболее решающих условий обеспечения высокого послеремонтного ресурса машин. Удаление нагара, смолистых отложений, накипи и других загрязнений – специфический ремонтный процесс, отличающийся определенными трудностями и требующий большого внимания, а также использования современных моечных машин и установок, новых комплексных моечных препаратов, содержащих поверхностно-активные компоненты, и обеспечения заданных режимов мойки, особенно поддержания температуры моечных ванн (75...90 °С).

Контроль и дефектация изношенных деталей машин в значительной мере определяют сроки их службы. Учитывая, что 80 % деталей тракторов подвергаются износу до 0,2 мм, а также, принимая во внимание высокую точность изготовления автотракторных деталей (1,2, 3-го класса) и новые (ужесточенные) технические условия на ремонт машин с повышенным ресурсом, на ремонтных предприятиях следует расширить номенклатуру деталей, подвергаемых сплошному контролю, применение предельных (пробки, калибры, скобы), универсальных (индикаторы, микрометры, миниметры) измерительных инструментов и средств пневматического контроля, обеспечивающих повышение точности измерений размеров (геометрии) до 0,01...0,001 мм. Такие детали машин, как коленчатые валы, шатуны, коленчатые оси и поворотные цапфы, блоки и гильзы цилиндров и другие, в целях повышения надежности отремонтированных машин должны обязательно быть проверены на отсутствие скрытых дефектов (особенно трещин) методами, широко используемыми в машиностроении на передовых ремонтных предприятиях (магнитная, люминесцентная, ультразвуковая и рентгеновская дефектоскопия, гидравлическая опрессовка и др.).

Сплошной контроль размеров и геометрии рабочих поверхностей базовых деталей машин, поступающих в ремонт, а также точности их взаимного расположения. За время эксплуатации на машинах в этих деталях в результате старения материала, износов, а также воздействия различных нагрузок и перераспределения внут-

ренных напряжений происходят изменения размеров, геометрии, и взаимного расположения рабочих поверхностей, которые должны быть устранены. Это обеспечивает высокую работоспособность не только самой базовой детали, но и всего агрегата. Восстановлением и стабилизацией размеров базовой детали ремонтные предприятия имеют возможность повышать ресурс отремонтированных машин даже по сравнению с новыми, детали которых не подвергались искусственному старению.

Внедрение на ремонтных предприятиях входного контроля, особенно новых деталей, диктуется необходимостью в связи с тем, что многочисленными проверками установлены значительные отклонения их размеров и геометрии от заданных значений по рабочим чертежам.

Тщательный весовой и размерный подбор деталей цилиндропоршневой группы. В связи с форсированием современных двигателей по оборотам и нагрузке необходим тщательный подбор по массе деталей цилиндропоршневой группы. Особенно это важно для ремонтных предприятий, так как в результате износов ослабляется прочность и жесткость ряда деталей, наблюдаются их раскомплектовка и замена, а также другие отклонения. В качестве примера можно указать, что для отремонтированных двигателей СМД-14 разность в массе комплекта поршней не должна превышать 7 г, а шатунов – 12 г.

Динамическая балансировка коленчатых и карданных валов, маховиков, муфт сцепления и других узлов и деталей. Для динамической балансировки деталей ремонтные предприятия оснащаются специальными машинами БМ-У4.

Обеспечение регламентированных посадок, усилий затяжки и сборки резьбовых соединений и других требований при сборке агрегатов машин, особенно авто-тракторных двигателей, – ответственное мероприятие, границы которого для каждой машины определены типовой технологией сборки.

Обеспечение хорошей герметизации агрегатов и сборочных единиц определяется не только заменой сальниковых уплотнений, но и устранением постоянно возникающих короблений плоскостей разъемов деталей, а также восстановлением изношенных резьбовых креплений, применением специального прокладочного материала и герметизирующих паст. Необходима проверка качества сборки и герметизации сборочных единиц (агрегатов).

Стендовая обкатка и испытания – ответственный начальный период работы смонтированных сборочных единиц и агрегатов машин. Поэтому в условиях ремонтных предприятий они должны выполняться и совершенствоваться: введением обкатки под нагрузкой (не только двигателей, но и агрегатов трансмиссий машин), применением обкаточных масел и присадок к топливу, тщательной очисткой, охлаждением и централизованной подачей масла, а также топлива и воды.

Повышение качества окраски ремонтируемых машин, а следовательно, их сопротивляемости коррозии в условиях ремонтных предприятий выполняется следующими приемами: снятием старой окраски в горячих щелочных ваннах, применением эффективных грунтов и эмалей, окраской отдельно агрегатов (до общей сборки машин) и машин в целом (после обкатки и испытаний) с применением новых методов окраски (в электростатическом поле, гидродинамическим распылением и др.).

13 Оценка безопасности, эргономичности и охраны окружающей среды при испытаниях новой техники

Оценки безопасности и эргономичности техники при испытаниях предусматривает определение фактических значений показателей безопасности сельскохозяйственной техники, сопоставление их с установленными стандартами и другой нормативной документацией значениями с целью создания конструкции новых машин, обеспечивающих безопасную работу обслуживающего персонала, сохранение здоровья людей и охрану окружающей среды. Безопасность продукции (машины, процессов) означает отсутствие недопустимого риска, связанного с возможностью нанесения ущерба. Безопасность машин характеризует те свойства их конструкции, которые обеспечивают защиту оператора от опасных и вредных факторов, обуславливающих заболевания и несчастные случаи. Эргономичность машины означает совокупность свойств их конструкции, отражающих удобство и эффективность деятельности оператора. Термин «охрана окружающей среды» означает защиту окружающей среды от неблагоприятного воздействия продукции. Требования безопасности и эргономичности к технике установлены стандартами Системы безопасности труда (СБТ) и Системы «человек–машина» (СЧМ). Нормативные величины

основных показателей безопасности и эргономичности конструкции машин регламентированы следующими основными стандартами: 8

ГОСТ 12.2.019 устанавливает общие требования безопасности, требования к средствам доступа на рабочее место оператора, требования к обзорности и освещенности, требования при монтаже, транспортировании и хранении тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин.

ГОСТ 12.2.120 регламентирует требования к конструкции кабин, оборудованию их устройствами нормализации микроклимата, стеклоочистителями, смывателями и др., требования к рабочему месту оператора (микроклимат, температура внутренних поверхностей кабины, система вентиляции, концентрация пыли и окиси углерода), уровню звука, расположению органов управления, силе сопротивления органов управления.

ГОСТ 12.1.003 устанавливает общие требования безопасности по шуму.

ГОСТ 12.1.012 устанавливает общие требования по вибрационной безопасности.

ГОСТ 12.2.111 регламентирует требования безопасности к конструкции навесных и прицепных сельскохозяйственных машин.

ГОСТ 12.2.042 устанавливает общие требования безопасности к конструкции машин и технологического оборудования (в том числе малогабаритной техники и средств малой механизации) для содержания и кормления животных и птицы, а также заготовки, переработки и приготовления кормов. В технических заданиях на проектирование новой техники на основании стандартов СБТ, СЧМ устанавливаются требования безопасности к конкретному изделию.

14 Агротехническая оценка как метод определения качества выполнения машиной технологического процесса. Общие положения по агротехнической оценке сельскохозяйственных машин

Одним из важных требований, предъявляемых к сельскохозяйственным машинам для механизации растениеводства, является обеспечение высокого качества выполнения технологического процесса. Качество выполнения технологических процессов определяется путем проведения лабораторно-полевых, лабораторных и стендовых испытаний.

Агротехническая оценка сельскохозяйственных машин необходима для сравнительного определения всей совокупности показателей, характеризующих качество выполнения технологического процесса новой техникой. Ввиду разнообразия типов сельскохозяйственных машин насчитывается несколько сотен показателей для комплексов машин в полеводстве. Для каждого из них разработаны специфические методы в стандартах на испытания отдельных видов машин. Агротехнические показатели машин можно условно разделить на несколько групп. Показатели первой группы характеризуют технологические возможности применения сельскохозяйственных машин. К ним относятся предельные показатели условий применения техники, агротехнических фонов, режимов работы и технологических характеристик, на которых может удовлетворительно осуществляться технологический процесс:

- 1) влажность почвы и технологического материала;
- 2) плотность, засоренность, твердость почвы и ее тип;
- 3) урожайность, полеглость хлебов;
- 4) пропускная способность;
- 5) норма внесения технологического материала и т. п.

Показатели второй группы характеризуют качество работы машин, чаще всего в благоприятных и типичных для региона условиях при оптимальных и предельных режимах. Эти показатели весьма разнообразны и регламентируются агротехническими требованиями технического задания и стандартами на методы испытаний каждой группы машин. Для типичных групп машин можно назвать следующие характерные показатели.

Почвообрабатывающие машины:

- 1) глубина обработки;
- 2) подрезание сорняков и заделка растительных остатков;
- 3) крошение почвы;
- 4) выравненность ее поверхности.

Посевные и посадочные машины:

- 1) количество семян (растений) на единице площади;
- 2) глубина и качество заделки;
- 3) распределение их по площади (в рядках, гнездах);
- 4) полевая всхожесть семян или приживаемость растений;
- 5) динамика всходов;
- 6) повреждение семян или растений (рассады и саженцев);
- 7) величина прослойки почвы между семенами и удобрениями и

т. п.

Машины для ухода за посевами:

- 1) уничтожение сорняков;
- 2) повреждение культурных растений;
- 3) степень покрытия листьев ядохимикатами (для опыливателей и опрыскивателей);
- 4) нормы внесения технологического материала (воды для дождевальных установок, ядохимикатов для опыливателей и опрыскивателей, удобрений для подкормщиков и т. д.).

Уборочные машины:

- 1) полнота уборки или потери основной и сопутствующей продукции (зерно, клубни, корнеплоды, плоды, солома, и т.д.) в машине и в отдельных рабочих органах;
- 2) повреждение продукции (дробление, раздавливание);
- 3) засорение вороха земель, сорняками и другими примесями.

Машины для послеуборочной обработки продукции:

- 1) потери;
- 2) повреждение и засорение;
- 3) сортность (товарная, семенная);
- 4) порча или сохранность питательных свойств (содержание сахара, белка, крахмала, каротина, витаминов и др.).

Показатели третьей группы характеризуют устойчивость протекания технологического процесса в пространстве и во времени при различных условиях, т. е. значение отклонений показателей качества. Получаемые при экспериментах показатели качества работы машины подвергаются анализу различными методами. В настоящее время применяется несколько вариантов оценки агротехнических показателей:

- 1) сравнение с нормативами;
- 2) оценка по влиянию на урожай и другие экономические и комбинированные критерии.

Сравнение с нормативами предусматривает сопоставление фактических показателей, полученных при испытании, с показателями, регламентированными требованиями технического задания или другой нормативной документации.

Величина урожая является одним из наиболее распространенных критериев агротехнической оценки машин и комплексов для уборки сельскохозяйственных культур. Потери урожая и соответствующие убытки для уборочных машин определять значительно проще, чем потенциальный урожай от применения новых плугов, сеялок, культиваторов, луцильников, разбрасывателей удобрений, катков,

опрыскивателей и других машин. Влияние этих машин и комплексов на урожай должно устанавливаться закладкой полевых опытов с доведением до урожая. Этот путь очень трудоемкий и длительный. По общепринятой методике опыты закладывают в течение трех лет. Только после этого можно давать соответствующие рекомендации. Но и по данным трехлетних опытов не всегда удается выявить преимущества или недостатки машины. Поэтому в большинстве случаев при испытаниях ограничиваются сопоставлением полученных фактических значений качественных показателей работы машины с требованиями технического задания. Такой способ оценки исходит из того, что в ТЗ включены научно обоснованные значения показателей.

Количество продукции и повышение (снижение) ее качества являются важным экономическим критерием оценки машины. Он применяется в основном для уборочных машин, а также машин для послеуборочной доработки и хранения сельскохозяйственной продукции. Затраты средств на доведение качества продукции до агротехнических показателей заданного уровня также являются важным экономическим критерием. Например, если при работе свеклоуборочной машины наблюдается повышенное содержание земли и ботвы в ворохе корней, то для доведения этих показателей до нормы нужно затратить определенное количество труда по удалению земли и ботвы. Затраты средств на эти операции отражают агротехнические показатели машин и должны учитываться при экономической оценке.

15 Этапы агротехнической оценки для определения качества выполнения машиной технологического процесса

Для проведения агротехнической оценки составляется рабочая программа и методика испытаний (РПМИ), которая является организационно-методическим документом по испытаниям конкретной машины. РПМИ устанавливает режимы, условия и место проведения испытаний, определения показателей с указанием погрешности, средств измерений и исполнителей испытаний. РПМИ разрабатывается на основании типовой программы и методики испытаний, разработанной для группы сельскохозяйственной техники. Полученные при оценке значения показателей сопоставляются с требованиями нормативной документации (ГОСТ, СТБ, ТЗ, ТУ и т. п.), а также с показателями машины-аналога. На основании полученной информации делается вывод о соответствии показателей нормативным требованиям,

анализируются причины изменения показателей и дается заключение о пригодности машины по качественным показателям работы к применению в сельскохозяйственном производстве. Выполнение агротехнической оценки проводится по этапам, изложенным в таблице 15.1.

Таблица 15.1 – Этапы агротехнической оценки для определения качества выполнения машиной технологических процессов в растениеводстве

Технологические операции при оценке	Функциональные задачи
Определение цели испытаний	Изучение НД на машину и технологические процессы, определение функциональных показателей качества выполнения машиной технологического процесса, выбор машины–аналога.
Формирование номенклатуры показателей оценки	Формирование номенклатуры и значений показателей, характеризующих условия применения и качество работы машины.
Выбор методов оценки	Подбор и (или) разработка методов определения показателей назначения (качества выполнения технологических процессов). Формирование рабочей программы и методики испытаний.
Приборное обеспечение	Подбор и (или) разработка приборов и оборудования для определения показателей назначения (качества выполнения технологического процесса), обеспечивающих требуемую точность измерений. Аттестация и проверка приборов, оборудования и методики применения.
Выбор фонов и режимов для проведения опытов	Подбор фонов и режимов использования машины с целью проведения опытов по определению показателей, характеризующих её назначение.

<p>Определение показателей, проведение лабораторных, стендовых, лабораторно– полевых опытов.</p>	<p>Определение и регистрация значений показателей условий применения и назначения (качества выполнения технологического процесса) машины в условия использования её на установленных фонах и режимах.</p>
<p>Анализ показателей и выработка рекомендации</p>	<p>Обработка данных опытов с использованием методов математической статистики, оценка достоверности показателей и анализ полученных значений показателей назначения, сопоставление значения показателей с требованиями НД и показателями машины–аналога. Оценка соответствия полученных показателей требованиям НД и выработка рекомендаций по возможности использования машины, по показателям назначения, направлениям доработки</p>

16 Агротехническая оценка косилок и валковых жаток

На основании предварительно проведенных теоретических и экспериментальных исследований, которыми вскрыты причины возникновения потерь в зоне делителя, установлено, что вследствие незаконченности деления часть этих потерь транспортируется в валок. Указанные потери характерны в основном для делителей комбинированного типа, которые применяются на серийных жатках ЖНУ–4,0 в различных зонах возделывания и уборки риса. Поэтому для оценки потерь непосредственно за делителем с учетом потерь транспортируемых в валок необходимо выделить их из общего технологического потока потерь за катками в зависимости от типа делителей, применяемых на машине. Существующая методика агротехнической оценки валковых жаток по ОСТ 70,81–81, разработанная Агропром СССР, не отражает оценку потерь, возникающих конкретно за делителями [1]. Указанная методика предусматривает оценку общих потерь за жаткой, и не учитывает потери за делителем, возникающие при нарушении технологического процесса деления стеблей в виде свободного зерна или срезанных метелок под валком, неравномерность валка по вине делителя. Поэтому во многих случаях создается ложное пред-

ставление о малой величине потерь в зоне делителя, т.к. указанные потери имеют скрытый характер их распределения.

Для полного анализа потерь за полевым делителем жаток необходимо их выделить под валком. Для проведения указанных работ был разработан метод выделения потерь, который успешно прошел апробацию в южных зонах Украины и Краснодарского края в 1979 – 1981 г.г. при изучении жаток ЖНУ–4,0 и ЖРК–5 в полевых условиях с различными вариантами полевых делителей. Сущность метода выделения потерь заключалась в получении эталонных и рабочих прокосов и сравнительной оценки потерь по зонам их возникновения на ширине захвата жатки и под валком. При проведении полевых экспериментов по оценке потерь за делителями априорно постулирует, что полученные замеры входят в генеральные выборки, которые подчиняются закону нормального распределения. В соответствии с вышеизложенным работы по оценке потерь за полевым делителем, установленным на встречно – поточной жатке необходимо проводить в следующей последовательности:

1. Снять характеристику агрофона перед началом проведения эксперимента;

2. Произвести обкос чека по периметру и центральный прокос с получением в зависимости от технологической схемы жатки сдвоенного или одинарного валка;

3. Провести разбивку чека относительно центрального прокоса на участки, равные удвоенному проходу жатки с выделением отрезков по 5–10 м для учета потерь, разгона и регулировки, определения фазового сдвига мест замера потерь под валком и толщины валка. При этом участки необходимо разбивать по ширине с учетом величины перепуска захвата жатки на скошенное поле равном 300 мм;

4. Фиксировать валками параллельные сечения на рабочих и эталонных прокосах жатки;

5. Отделить участки для эксперимента от не скошенного массива стеблей;

6. Провести учетные проходы в 2–х повторностях. При работе жатки с боковым отбросом перед учетным проходом замерить потери в зоне делителя от предыдущего прохода жатки;

7. Провести замеры толщины и ширины валка;

8. Перенести валки с рабочих проходов на участки для обкатки, разгона и регулировки;

9. Провести замеры потерь в соответствии с технологическими схемами укладки валка.

Порядок получения эталонных валков при проведении эксперимента на встречно – поточной жатке производить в соответствии с рисунком 16.1.

Перед началом эксперимента производится обкашивание чека по периметру жаткой ЖРК–5, навешенной на гусеничный комбайн СКД–5Р. Полученный валок до проведения эксперимента подбирается и обмолачивается комбайном. Затем производится центральный прокос, которым участок разбивается на две части. Относительно центрального прокоса отбивается с левой и правой стороны участка риса, равные 9,4 м, что соответствует двум проходам жатки ЖРК–5 с учетом перепуска захвата машины на 200 мм в сторону скошенного массива относительно не скошенного стеблестоя. Полученные участки повторно отделяют от не скошенного риса и размечают вешками на учетные проходы по 5–10 м, предназначенные для отбора потерь, и проходы по 10 м для разгона жатки и регулировки. По отдельному от остального массива участка в 9,4 м производится скашивание с выходом машины на торцевую часть чека с заездом на участок 3 для проведения второй повторности опыта. Затем жатка возвращается в исходное положение и скашивает эталонный участок 3 и 2 со стеблестоем, не имеющим связи с полевой стороной. Указанные участки предварительно размещаются вешками таким образом, чтобы учетные проходы по 5–10 м располагались параллельно проходам, размещенным на предыдущих участках 4 и 2. После указанных подготовительных работ валки на зачетных проходах обмеряются по ширине и толщине и вручную или с помощью вешек переносятся незачетные проходы длиной 10 м. Потери замеряются в зоне делителя, зоне жатки, под валком с учетом фазового сдвига потерь при их транспортировки в валок. Для проведения замеров применяются специально изготовленные рамки сечением (0,5×0,5 м) и (1,6×0,15 м), которые устанавливаются на ширине захвата жатки, в зоне делителя и месте расположения валка с учетом фазового сдвига валка по времени, относительно места замера потерь за делителем. Аналогично проводятся замеры потерь в параллельных сечениях на эталонном участке. Замеры сдвига потерь под валком и толщины валка производятся на отдельных участках выделенных для проведения настройки жатки. Для этой цели отмеряется метровая полоса стеблестоя по ширине захвата жатки, по которой протягивается меченный красной краской шнур. До учет-

ной полосы отмеряется участок в 8 м для проведения разгона жатки и получения устойчивого процесса схода валка. Производится скашивание массива с фиксированием времени схода меченого шнура в валок, затем производятся замеры расположения шнура в валке по длине, относительно отмеренной метровой полосы уже скошенного стеблестоя. При этом жатка отводится в исходное положение на участке замеров. Опыт повторяется при изменении направления полегания и скорости движения машины. Полученные результаты заносятся в таблицу. При проведении агрооценки работы полевого делителя, навешенного на жатку с боковым отбросом валка схема выделения потерь указана на рисунке 16.2.

Отличие указанной схемы (рисунок 16.2) от предыдущей состоит в том, что по центру чека укладывается сдвоенный валок с двух проходов жатки ЖНУ – 4.0. потери в зоне делителя на участке 4 и 1 от предыдущего прохода учитываются при проведении анализа потерь под валком при рабочем и эталонном проходе жатки.

Схема замеров потерь за полевыми делителями показана на рисунках 16.3, 16.4.

При проведении сбора потерь под валком на основании предварительно проведенных полевых исследований принимается, что эти замеры потерь по вине делителя необходимо проводить для жатки встречно – поточной на участках 1 – 2 (рисунок 16.5) для жатки с боковым сбросом на участках 3 – 4 (рисунок 16.6). При проведении экспериментов принимаются следующие допущения:

1) при отсутствии контрольных обмолотов статическая оценка не равномерности толщины валка производится по величине среднеквадратического отклонения относительно эталонной неравномерности валка;

2) для упрощения полевых работ оценка неравномерности валка по толщине производится после скашивания без учета осадки валка, возникающей при его высыхании перед подбором;

3) прямыми потерями считаются свободное зерно, срезанные метелки размером 60 мм и ниже собранные по зонам жатки. При этом априорно постулирует, что размеры метелок более указанного будут подобраны подборщиком комбайна.

4) с целью упрощения обработки полученных данных и последующей статистической оценки срезанные метелки и не срезанные растения с метелками целесообразно переводить в разрез свободного зерна.

5) при изучении характера распределения потерь по ширине захвата жатки и качественной оценки их за рабочими органами для каждого проводимого опыта необходимо фиксировать структуру потерь ее процентное содержание в виде свободного зерна, срезанных метелок, не срезанных растений, свободного зерна и срезанных метелок под валком;

6) потери срезанными метелками размером 60 мм и ниже, расположенные в зоне жатки под валком, в зоне делителя принимаются как невозвратимые;

7) срезанные метелки размером 60 мм и ниже, лежащие в зоне делителя на полегшем рисе необходимо отнести к разряду прямых невозвратимых потерь.

Оценку потерь за делителем необходимо проводить с учетом доли потерь под валком. При этом для сравнения и оценки соответствия общих потерь за жаткой агротехническими требованиями определяются общие потери за жаткой с учетом потерь по зонам, их распределения по ширине захвата машин. Для упрощения последующей обработки, после сбора потерь с учетных рамок проводится подготовка статического массива данных в определенной последовательности (П.1,4). Расчет потерь за делителем выполнялся в соответствии со схемами (рисунок 16.3, 16.4) на фоне общих потерь за жаткой (П.3,4).

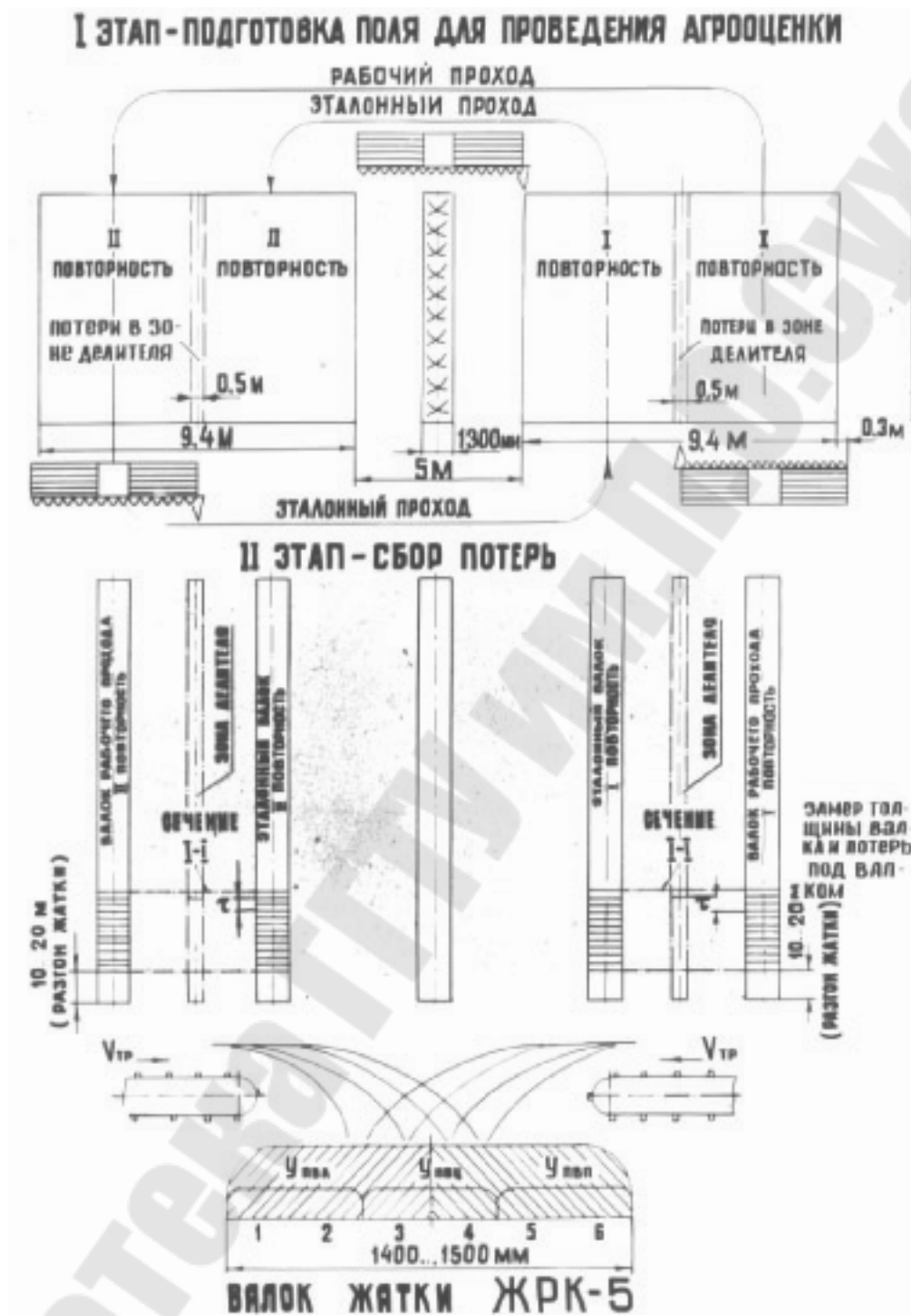


Рисунок 16.1 – Схема выделения потерь за вибрационным полевым делителем жатки ЖРК – 5 в полевых условиях

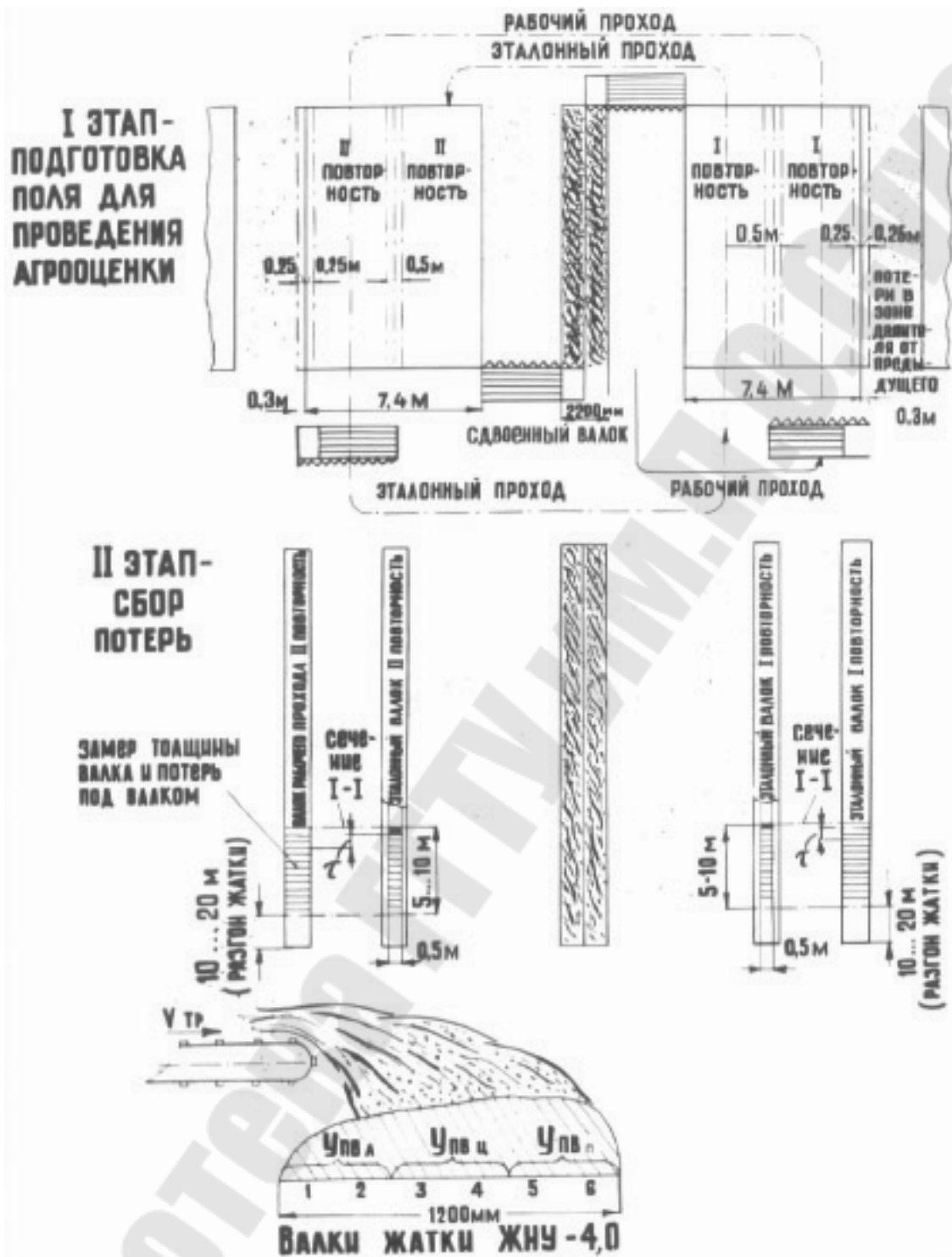


Рисунок 16.2 – Схема выделения потерь за вибрационным полевым делителем жатки ЖНУ–4.0 в полевых условиях

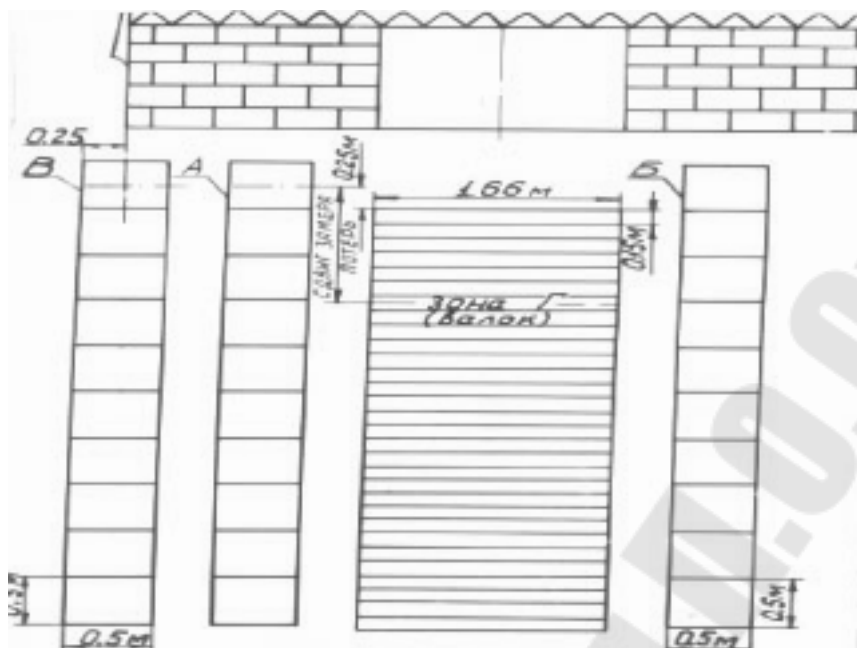


Рисунок 16.3 – Схема замера потерь и неравномерности валка за полевым делителем жатки ЖРК–5

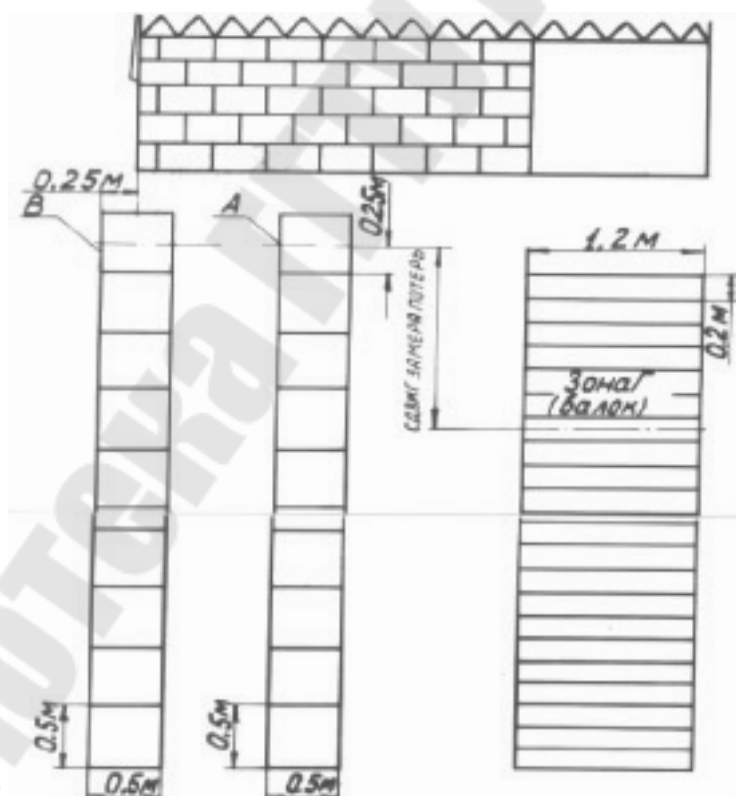


Рисунок 16.4 – Схема замера потерь и неравномерности толщины валка за полевым делителем жатки ЖРК–5

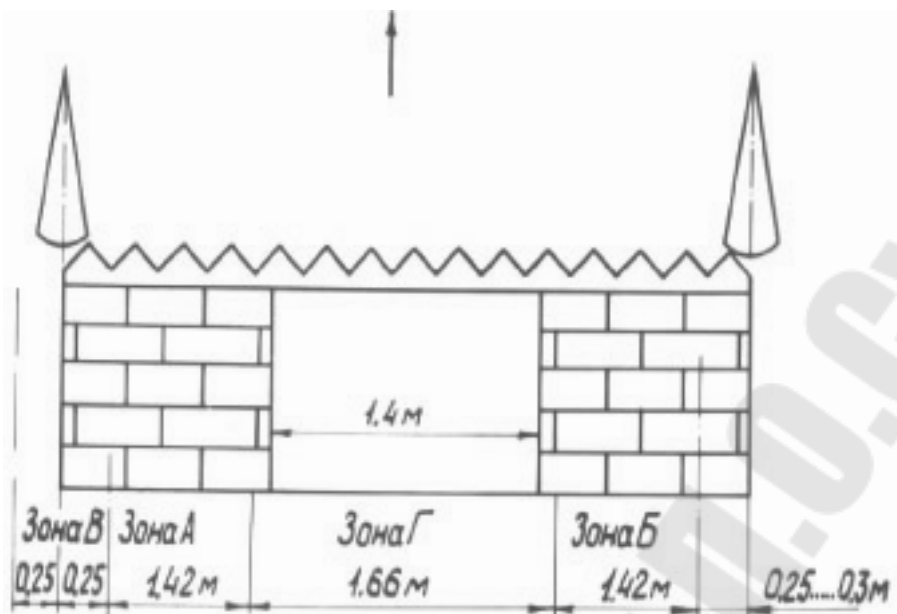


Рисунок 16.5 – Схема оценки потерь за жаткой ЖРК–5

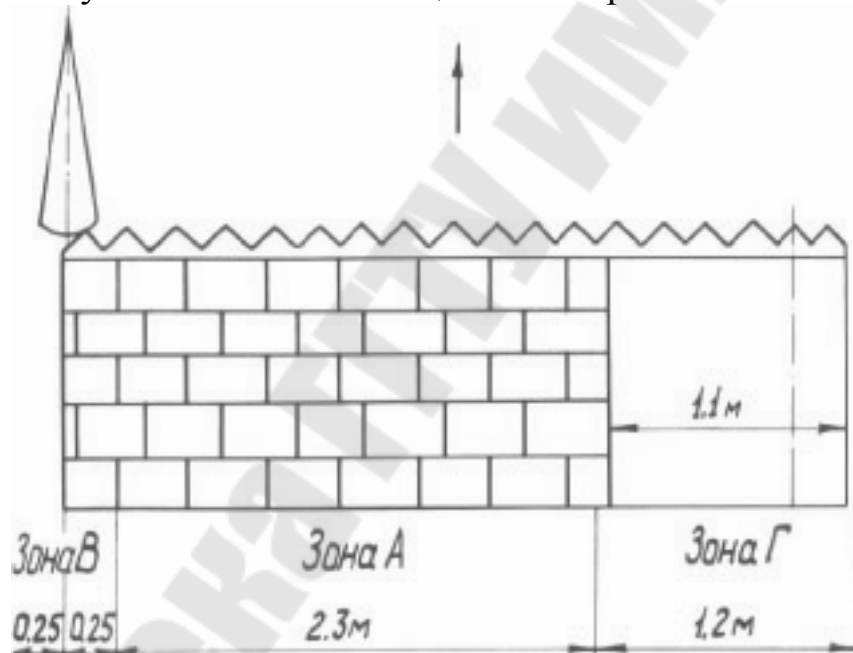


Рисунок 16.6. Схема оценки потерь за жаткой с боковым сбросом валка

Качество работы валковой жатки характеризуют следующие параметры

1. Ширина захвата, м:

$$B_{\text{ж}} = \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{n}.$$

2. Высота среза, см:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}.$$

Среднеквадратическое отклонение, см:

$$\delta_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}}$$

Коэффициент вариации, %:

$$V = \frac{\delta_h}{h} \cdot 100.$$

Аналогичная процедура оценки производится при определении:

- высоты валка, см;
- толщины валка, см;
- просвета между почвой и валком, см;
- ширины валка, см;

Потери зерна за жаткой, %:

а) потери за жаткой свободного зерна в межвалковом пространстве, %:

$$\Delta q_{сзж} = \frac{10 \cdot q_{сзж}}{S_2 \cdot Y_3} - \frac{10 \cdot q_c}{S \cdot Y_3},$$

где $q_{сзж}$ – потери свободного зерна в межвалковом пространстве, г;

q_c – потери зерна от самоосыпания, г;

S_2 – площадь рамки для учета потерь свободного зерна в межвалковом пространстве, м²;

S – площадь, с которой учтены потери от самоосыпания, м²;

Y_3 – урожайность зерна, ц/га;

$$Y_3 = \frac{G_3 \cdot Z_m}{L \cdot B_{жс}} + \frac{q_{нкжс}}{10 \cdot S_1} + \frac{q_{скк}}{10 \cdot S_1} + \frac{q_{сзз}}{10 \cdot S_2} + \left[\frac{q_{сзз}}{10 \cdot S_3} - \frac{q_{сзз}}{10 \cdot S_2} \right] \cdot \frac{S_3}{S_2 + S_3},$$

где G_3 – масса зерна в бункере, кг;

Z_m – содержание основного зерна и зерновой примеси в зерне из бункера, %;

L – длина учетной делянки, с которой собрано зерно в бункер, м;

$q_{нкжс}$ – потери зерна в не срезанных колосьях в межвалковом пространстве, г;

S_1 – площадь рамки для учета потерь в срезанных и не срезанных колосьях, м²;

$q_{сзэж}$ – потери свободного зерна под валком;

S_3 – площадь рамки для учета потерь свободного зерна под валком, м²;

б) потери за жаткой свободного зерна под валком, %

$$\Delta q'_{сзэж} = \frac{10 \cdot q_{сзэж}}{Y_3 \cdot S_3} - \frac{10 \cdot q_e}{Y_3 \cdot S} \cdot \frac{S_3}{S_2 + S_3}$$

в) потери за жаткой зерна в срезанных колосьях в межвалковом пространстве, %

$$\Delta q_{скэж} = \frac{10 \cdot q_{скэж}}{Y_3 \cdot S_1},$$

где $\Delta q_{скэж}$ – потери зерна в срезанных колосьях, %,

г) потери за жаткой зерна в не срезанных колосьях, %,

$$\Delta q_{кэж} = \frac{10 \cdot q_{кэж}}{Y_3 \cdot S_1};$$

д) потери за жаткой зерна в не срезанных колосьях под валком, %,

$$\Delta q'_{нкэж} = \frac{10 \cdot q'_{нкэж}}{Y_3 \cdot S_4} \cdot \frac{S_4}{S_4 + S_1},$$

где $q'_{нкэж}$ – потери зерна в не срезанных колосьях под валком, г;

S_4 – площадь рамки для учета потерь зерна в не срезанных колосьях под валком, м²;

е) суммарные потери зерна за жаткой, %,

$$\Delta q_{ж} = \Delta q_{сзэж} + \Delta q_{кэж} + \Delta q_{скэж} + \Delta q'_{сзэж} + \Delta q'_{нкэж};$$

Производительность комбайна в час основного времени при уровне потерь зерна за молотилкой 1,5% на подборе валков, т;

$$W = 3,6 \cdot \frac{G_z \cdot Z_m}{t \cdot 1000},$$

где t – время прохождения учетной делянки, с.

17 Агротехническая оценка кормоуборочных комбайнов

Агротехническую оценку машины проводят при лабораторно–полевых испытаниях. При этом проводят:

– выбор фона и характеристику условий испытаний;

- подготовку машины к лабораторно–полевым испытаниям;
- определение показателей качества работы;

При наличии полеглого травостоя измеряют высоту растений в выпрямленном и естественном положении.

1. Полеглость определяют как отношение разности измерений высоты растений в выпрямленном и естественном состоянии к высоте растений в выпрямленном положении.

$$n_{\text{пол}} = \frac{l - l_1}{l} \cdot 100,$$

где l – средняя высота растений в выпрямленном положении, см;

l_1 – средняя высота растений в естественном положении, см;

2. Определяют частоту травостоя по формуле:

$$n_{\text{тр}} = \frac{n_p}{S_0},$$

где n_p – количество растений на учетной площадке, шт.;

S_0 – площадь учетной площадки.

3. Определяют урожайность по формуле:

$$Y = \frac{Y_1 \cdot (100 - W_1)}{100 - W},$$

где Y_1 – урожайность травы при фактической влажности, т/га;

W_1 – фактическая влажность травы, %;

W – влажность травы, равная 18%

4. Определяют производительность машины Q и погрешность ее Q по формуле:

$$Q = 0,36 \cdot B \cdot V$$

$$\Delta Q = 0,7 \cdot \sqrt{B^2 \cdot S_V^2 + V^2 \cdot S_B^2}$$

где V – скорость машины, м/с;

B – ширина захвата, м;

S_V^2 – среднее квадратическое отклонение скорости движения машины, \pm м/с ;

S_B^2 – среднее квадратическое отклонение ширины захвата, м;

5. Определяют потери по видам в тоннах на гектар по формуле:

$$n_g = \frac{m_n}{100 \cdot S_0},$$

где m_n – масса потерь по видам, собранных с учетом площадки, г;

S_0 – площадь учетной площадки, м²;

6. Определяют потери (n_y) в процентах к урожайности по формуле:

$$n_y = \frac{n_e \cdot 100}{Y}$$

где Y – урожайность травы, т/га.

7. Определяют динамику сушки травы по формуле:

$$D = \frac{W_i - W_{i-1}}{t_i - t_{i-1}},$$

где $W_i - W_{i-1}$ – измерение влажности в период смежных измерений, %;

$t_i - t_{i-1}$ – интервал между смежными измерениями, ч

8. Определяют линейную плотность валка путем взвешивания 10 равноудаленных проб, отбираемых с 1 м его длины. Объемы пробы определяют по линейным размерам и профилю валка.

9. Полноту плющения определяют по трем усредненным пробам массой не менее 2 кг каждая, отбираемым по минимальной длине по всей ширине и высоте валка. Все растения по признаку механического повреждения стеблей делятся на группы: полностью плющенные, плющенные на $\frac{1}{2}$ длины стебля и не плющенные. Полностью плющенными считаются стебли, имеющие механические повреждения в виде сплюснутых участков, продольных трещин и изломов с повреждением кутикулы (водонепроницаемой оболочки). При этом каждое междоузлие должно иметь повреждение. Определению полноты плющения подлежат только основные стебли без боковых веточек и подгона длиной менее 60% от средней длины стебля.

10. Полноту плющения в процентах определяют по формуле:

$$\lambda = \frac{m' + 0,5 \cdot m''}{M},$$

где M – масса пробы, кг;

m' и m'' – масса стеблей, плющенных полностью и на $\frac{1}{2}$ длины стебля, соответственно, кг.

18 Агротехническая оценка зерноуборочных комбайнов

Оценка показателей качества выполнения технологического процесса производится по методам ОСТ 70.8.1 «Испытания сельско-

хозяйственной техники. Машины зерноуборочные. Программа и методы испытаний».

Определяемые показатели условий испытаний и качества выполнения технологического процесса зерноуборочных комбайнов, валковых жаток и подборщиков следующие.

А. Характеристика культуры перед прямым комбайнированием и скашиванием в валки:

Культура, сорт.

Способ уборки.

Спелость культуры, %:

$$C = \frac{n_i}{n} \cdot 100,$$

где n_i – количество зерен данной группы в партии, шт;

n – общее количество зерен в партии, шт. (Вычисления производятся до целого числа).

Высота растений, см:

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i,$$

где l_i – высота отдельных растений, см;

n – количество измерений.

Полеглость растений, %:

$$П = \frac{\bar{l} - \bar{l}_2}{\bar{l}} \cdot 100,$$

где \bar{l} – средняя высота растений, см;

\bar{l}_2 – среднее расстояние от поверхности почвы до вершины склонившегося колоса, см;

$$\bar{l}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_{2i},$$

где l_{2i} – расстояние от поверхности почвы до вершины склонившегося колоса отдельных растений, см;

n – количество измерений.

Распределение колосьев по высоте, %:

$$P = \frac{P_i}{n} \cdot 100,$$

где P_i – количество колосьев в i -ой группе, шт.

n – суммарное количество растений, срезанных с десяти площадок, шт.

Засоренность культуры над фактической высотой среза (по массе), %. Потери зерна от самоосыпания, %:

$$\bar{q}_l = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_{li},$$

где q_{li} – масса зерна, собранного с i -той учетной площадки, г;

n – количество учетных площадок.

Отношение массы зерна к массе соломы.

Влажность зерна, %.

Влажность соломы, %.

Урожайность зерна, ц/га.

Масса 1000 шт. зерен, г.

Б. Характеристика валка и культуры в валке, определяемая перед подбором валков:

Тип валка.

Высота валка, см.

Толщина валка, см.

Просвет между почвой и валком, см.

Ширина валка, см.

Расстояние между валками, м.

Ширина захвата жатки, м.

Длина стеблей в валке, см.

Потери зерна за валковой жаткой, %.

Масса 1 м валка, кг:

$$q_B = \frac{G_3 + G_C}{L},$$

где G_3 – масса зерна, собранного с учетной делянки, кг;

G_C – масса соломы и половы, собранных с учетной делянки, кг;

L – длина учетной делянки, м.

Урожайность зерна, ц/га.

Масса 1000 шт. зерен, г.

Отношение массы зерна к массе соломы:

$$\gamma = 1 : \frac{G_C}{G_3},$$

где G_C – масса соломы и половы, собранной с учетной делянки, кг;

G_3 – масса зерна, собранного с учетной делянки, кг;

: – знак отношения, а не деления.

При эксплуатационно–технологической оценке отношение массы зерна к массе соломы определяют по результатам взвешивания продуктов обмолота в каждой повторности опыта. Вычисления производят по формуле:

$$\gamma = 1 : \frac{G_C \cdot L}{G_3 \cdot L'}$$

где L – длина делянки, с которой собрано зерно, м;

L' – длина учетной делянки, с которой отобрана проба соломы, м; или же определяют по результатам анализа пробных снопов и анализа частей валка:

$$\gamma = 1 : \frac{q_{pm} - q_3}{q_3}$$

где q_{pm} – общая масса снопа с учетом массы сорняков над соответствующей линией среза или части валка, г;

q_3 – масса зерна, выделенного из снопа или части валка, г.

Распределение зерна по ширине валка, %:

слева;

посередине;

справа.

Характеристика поля и почвы.

Уклон поля, град.

Количество камней на 1 м², шт.

Влажность почвы в слое 0–10 см, %.

Твердость почвы в слое 0–10 см, Па.

В. Показатели качества работы

В1. Качество работы валковой жатки:

Ширина захвата, м:

$$B_{жс} = \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{n}$$

Высота среза, см:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}$$

Среднеквадратическое отклонение, см:

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}}.$$

Коэффициент вариации, %:

$$V = \frac{\sigma_h}{h} \cdot 100.$$

Высота валка, см.

Толщина валка, см.

Просвет между почвой и валком, см.

Ширина валка, см.

Потери зерна за жаткой, %:

а) потери за жаткой свободного зерна в межвалковом пространстве, %,

$$\Delta q_{сзж} = \frac{10 \cdot q_{сзж}}{S_2 \cdot Y_3} - \frac{10 \cdot q_c}{S \cdot Y_3},$$

где $q_{сзж}$ – потери свободного зерна в межвалковом пространстве, г;

q_c – потери зерна от самоосыпания, г;

S_2 – площадь рамки для учета потерь свободного зерна в межвалковом пространстве, м²;

S – площадь, с которой учтены потери от самоосыпания, м²;

Y_3 – урожайность зерна, ц/га;

$$Y_3 = \frac{G_3 \cdot Z_m}{L \cdot B_{ж}} + \frac{q_{нкж}}{10 \cdot S_1} + \frac{q_{скк}}{10 \cdot S_1} + \frac{q_{сзз}}{10 \cdot S_2} + \left[\frac{q'_{сзз}}{10 \cdot S_3} - \frac{q_{сзз}}{10 \cdot S_2} \right] \cdot \frac{S_3}{S_2 + S_3},$$

где G_3 – масса зерна в бункере, кг;

Z_m – содержание основного зерна и зерновой примеси в зерне из бункера, %;

L – длина учетной делянки, с которой собрано зерно в бункер, м;

$q_{нкж}$ – потери зерна в не срезанных колосьях в межвалковом пространстве, г;

S_1 – площадь рамки для учета потерь в срезанных и не срезанных колосьях, м²;

$q'_{сзж}$ – потери свободного зерна под валком;

S_3 – площадь рамки для учета потерь свободного зерна под валком, м²;

б) потери за жаткой свободного зерна под валком, %

$$\Delta q'_{сзж} = \frac{10 \cdot q'_{сзж}}{Y_3 \cdot S_3} - \frac{10 \cdot q_e}{Y_3 \cdot S} \cdot \frac{S_3}{S_2 + S_3}$$

в) потери за жаткой зерна в срезанных колосьях в межвалковом пространстве, %.

$$\Delta q'_{скж} = \frac{10 \cdot q'_{скж}}{Y_3 \cdot S_1},$$

где $\Delta q_{скж}$ – потери зерна в срезанных колосьях, %,

г) потери за жаткой зерна в не срезанных колосьях, %,

$$\Delta q_{кж} = \frac{10 \cdot q_{кж}}{Y_3 \cdot S_1};$$

д) потери за жаткой зерна в не срезанных колосьях под валком, %,

$$\Delta q'_{нкж} = \frac{10 \cdot q'_{нкж}}{Y_3 \cdot S_4} \cdot \frac{S_4}{S_4 + S_1},$$

где $q'_{нкж}$ – потери зерна в не срезанных колосьях под валком, г;

S_4 – площадь рамки для учета потерь зерна в не срезанных колосьях под валком, м²;

е) суммарные потери зерна за жаткой, %,

$$\Delta q_{ж} = \Delta q_{сзж} + \Delta q_{кж} + \Delta q_{скж} + \Delta q'_{сзж} + \Delta q'_{нкж};$$

Производительность комбайна в час основного времени при уровне потерь зерна за молотилкой 1,5% на подборе валков, т;

$$W = 3,6 \cdot \frac{G_3 \cdot 3_m}{t \cdot 1000},$$

где t – время прохождения учетной деланки, с.

Распределение зерна по ширине валка, %:

слева;

посередине;

справа.

В2. Качество работы жатки комбайна

Определяют показатели по п. В1 до а), а также следующие.

Потери зерна за жаткой, %:

а) потери за жаткой свободным зерном, %,

$$\Delta q_{сз} = \frac{10 \cdot q_{сз}}{S_2 \cdot Y_3} - \frac{10 \cdot q_c}{S \cdot Y_3},$$

где $q_{сз}$ – потери свободного зерна, г;

Y_3 – урожайность зерна, ц/га;

$$Y_3 = \frac{G_3 \cdot Z_m}{L \cdot B_{жс}} + \frac{q_{нк}}{10 \cdot S_1} + \frac{q_{ск}}{10 \cdot S_1} + \frac{q_{сз}}{10 \cdot S_2}.$$

где $q_{нк}$ – потери зерна в несрезанных колосьях, г;

$q_{ск}$ – потери зерна в срезанных колосьях, г;

$q_{сз}$ – потери свободного зерна, г;

S_1 – площадь рамки для учета потерь зерна в срезанных и несрезанных колосьях, м²;

S_2 – площадь рамки для учета потерь свободным зерном, м²;

б) потери за жаткой зерна в срезанных колосьях, %,

$$\Delta q_{ск} = \frac{10 \cdot q_{ск}}{Y_3 \cdot S_1},$$

в) потери за жаткой зерна в несрезанных колосьях, %,

$$\Delta q_{нк} = \frac{10 \cdot q_{нк}}{Y_3 \cdot S_1},$$

г) суммарные потери зерна за жаткой, %,

$$\Delta q' = \Delta q_{сз} + \Delta q_{ск} + \Delta q_{нк}.$$

Высота среза, см:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n};$$

где \bar{h} – среднее значение, см;

h_i – текущее значение;

n – количество измерений;

среднеквадратическое отклонение, см:

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n - 1}}$$

Коэффициент вариации, %:

$$V = \frac{\sigma_h}{\bar{h}} \cdot 100.$$

ВЗ. Качество работы молотилки комбайна

Пропускная способность молотилки при отношении массы зерна к массе соломы 1:1,5 и уровне потерь 1,5%, кг/с.

Отношение массы зерна к массе соломы:

$$\gamma = 1 : \frac{G_C + G_{II}}{G_3},$$

где G_C – масса соломы, кг;

G_{II} – масса половы, кг;

G_3 – масса зерна, кг.

Урожайность зерна на учетной делянке повторности опыта, ц/га:

$$Y_3 = \frac{G_3 \cdot Z_m + 0,1q \cdot \eta}{L \cdot B_{ж}},$$

где Z_m – содержание основного зерна и зерновой примеси в зерне из бункера, %;

$$\eta = \frac{q + q_1}{q},$$

где η – коэффициент тарировки лабораторной молотилки;

q – масса потерь при первом обмолоте пробы на лабораторной молотилке;

q_1 – масса потерь при повторном обмолоте пробы на лабораторной молотилке.

Подача фактическая, кг/с:

$$P_{\phi} = \frac{G_C + G_{II} + G_3}{t},$$

Подача приведенная, кг/с:

$$P_{II} = 1,67 \cdot \frac{G_C + G_{II}}{t},$$

Масса 1м валка, кг:

$$G_B = \frac{G_C + G_{II} + G_3}{L},$$

среднеквадратическое отклонение, ±кг: ;

$$\sigma_h = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_B - \bar{G}_B)^2}{n-1}}$$

Потери зерна за молотилкой, г:

$$q_m = q_{nc} + q_{nn} + q_{cc} + q_{cn} + .$$

Потери зерна недомолотом в соломе (за соломотрясом), %:

$$\Delta q_m = \frac{\eta_m \cdot q_{nc} \cdot 100}{10 \cdot G_3 \cdot Z_m + q_m \cdot \eta_m}.$$

где q_{nc} – потерн зерна недомолотом в соломе, г;

η_m – коэффициент тарировки молотилки.

Потери зерна недомолотом в полове (за очисткой), %:

$$\Delta q_{nn} = \frac{\eta_m \cdot q_{nn} \cdot 100}{10 \cdot G_3 \cdot Z_m + q_m \cdot \eta_m}.$$

Потери свободным зерном в соломе, %:

$$\Delta q_{cc} = \frac{\eta_m \cdot q_{cc} \cdot 100}{10 \cdot G_3 \cdot Z_{II} + q_m \cdot \eta_m}.$$

Потери свободным зерном в полове, %:

$$\Delta q_{cn} = \frac{\eta_m \cdot q_{cn} \cdot 100}{10 \cdot G_3 \cdot Z_{II} + q_m \cdot \eta_m}.$$

Потери зерна в щели комбайна, %:

$$\Delta q_{щ} = \frac{q_{щ} \cdot 100}{10 \cdot G_3 \cdot Z_m \cdot q_{щ} \cdot q_m \cdot \eta_m}.$$

где $q_{щ}$ – потери зерна в щели комбайна, г.

Потери зерна распылом, %:

$$\Delta q_{dp} = D_{dp} \cdot K_p$$

где D_{dp} – дробление зерна, %;

K_p – коэффициент распыла.

Суммарные потери зерна за молотилкой, %:

$$\Delta q = \Delta q_{nc} + \Delta q_{cc} + \Delta q_{cn} + \Delta q_{nn} + \Delta q_{dp} + \Delta q_{щ};$$

Подача соломы на соломотряс, кг/с:

$$P_C = \frac{G_C}{t}.$$

Подача вороха па очистку, кг/с:

$$P_B = \frac{G_C \cdot G_{II}}{t}.$$

Содержание сорной примеси в зерне из бункера, %.

Дробление зерна, %.

Обрушивание зерна (для пленчатых культур), %.

Микроповреждение зародыша зерна, %.

В4. Качество работы подборщика

Урожайность зерна ц/га:

$$Y_3 = \frac{G_3 \cdot 3_M}{L \cdot B_{ж}} + \frac{q_{снк}}{10l_1 \cdot B_{ж}} + \frac{q_{сзз}}{10l_2 \cdot B_{ж}}.$$

где l_1 – длина рамки для учета потерь зерна в колосьях за подборщиком, м;

l_2 – длина рамки для учета потерь свободного зерна за подборщиком, м;

$q_{снк}$ – потери зерна в колосьях, г;

$q_{сзп}$ – потери свободного зерна, г;

$B_{ж}$ – ширина, с которой сформирован валок, м.

Потери за подборщиком зерна (в колосьях), %:

$$\Delta q_{снк} = \frac{10 \cdot q_{сзп}}{l_2 \cdot B_{ж} \cdot Y_{ж}} - \Delta q_{сжж}.$$

где $\Delta q_{сжж}$ – потери зерна за валковой жаткой в срезанных колосьях в межвалковом пространстве.

Потери за подборщиком свободного зерна, %:

$$\Delta q_{сзп} = \frac{10 \cdot q_{сзп}}{l_2 \cdot B_{ж} \cdot Y_{ж}} - \Delta q'_{сзж}.$$

где $\Delta q'_{сзж}$ – потери свободного зерна под валком.

Суммарные потери зерна за подборщиком, %:

$$\Delta q_n = \Delta q_{снк} + q_{сзп}.$$

Скорость движения, км/ч:

$$V = 3,6 \cdot 10^2 \cdot \frac{L}{t}.$$

19 Агротехническая оценка машин для химической защиты растений

Агротехническая оценка опрыскивателей проводится при лабораторных (стендовых) и лабораторно–полевых испытаниях. Лабораторные (стендовые) испытания включают определение характеристики исходного материала, определение показателей, характеризующих работу распыливающих и дозирующих устройств, определение показателей, характеризующих работу насоса, заправочного устройства.

Лабораторно–полевые испытания включают определение характеристики исходного материала:

- выбор фона и характеристику условий испытаний;
- выбор режимов работы;
- определение показателей качества работы;
- определение биологической эффективности обработок;
- анализ агротехнической оценки.

Условия испытаний характеризуются следующими основными параметрами: – температура воздуха, °С;

- относительная влажность воздуха, %;
- скорость и направление ветра, м/с;
- вид и название препарата;
- тип почвы, ее влажность и твердость;
- тип насаждения и его характеристика;
- количество сорняков, вредителей или фаза развития болезни.

Условия испытаний зачастую являются определяющими при оценке показателей работы опрыскивателей. Так, к примеру, повышение температуры атмосферного воздуха приводит к увеличению испаряемой и распыленной жидкости и меньшей эффективности обработок, то же относится и к ветру. В каждой стране существуют свои законные требования к машинам и технологиям химической защиты растений, а показатели использования машин сопоставляются при одинаковых определенных условиях испытаний, в частности при температуре воздуха 15°С и относительной влажности 75–80 %.

При оценке (испытаниях) полевых штанговых опрыскивателей определяются следующие основные показатели качества выполнения технологического процесса:

1. Диапазон норм вылива рабочей жидкости в рабочих диапазонах скоростей движения агрегата и давлений в коммуникации, л/га. Нормы вылива рабочей жидкости определяются при стендовых испытаниях методом вылива жидкости из распылителей (при различных давлениях в напорной коммуникации) и сбора ее в мерные цилиндры за определенный период времени, с последующим взвешиванием и расчетом по формуле:

$$q = \frac{Q \cdot V \cdot B}{600 \cdot n}, \text{ или } Q = \frac{600 \cdot q \cdot n}{V \cdot B},$$

где Q – расход (норма вылива) рабочей жидкости, л/га;

q – расход жидкости через один распылитель, л/мин;

V – рабочая скорость движения агрегата, км/ч;

B – рабочая ширина захвата (равна произведению количества распылителей на шаг их установки, обычно 0,5 м), м;

n – количество распылителей на штанговом рабочем органе;

600 – согласующий переводной коэффициент.

С использованием указанных формул строят таблицы и графики настройки опрыскивателя на норму вылива рабочей жидкости.

2. Неравномерность распределения жидкости между распылителями по ширине захвата штангового рабочего органа. Определяется на основании данных проливов методом математической обработки данных как коэффициент вариации (K_v):

$$K_v = \frac{\delta}{\bar{x}} \cdot 100,$$

где $\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}$ – среднеквадратичное отклонение;

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x}{n} \text{ – среднее арифметическое значение массы пробы.}$$

Неравномерность распределения жидкости является одним из основных показателей, характеризующих технический уровень опрыскивателя; чем показатель меньше (в абсолютном значении), тем технологический процесс более качественный, экономически эффективный и экологически безопасный.

В настоящее время нормативное значение этого показателя во многих странах установлено «не более 5 %».

3. Неравномерность отложения препарата на эффективной ширине захвата. Показатель тесно связан с предыдущим (зависит от неравномерности распределения жидкости между распылителями и в большой степени от условий испытаний) и определяется при лабораторно–полевых испытаниях методом обработки специально разложенных на рабочей ширине захвата улавливающих препарат (в данном случае имитатор) карточек из полиэтиленовой пленки, последующем смывании следов осевших капель, калориметрировании раствора и обработке данных по методам математической статистики. Нормативным значением неравномерности отложения препарата на эффективной ширине захвата для полевых штанговых опрыскивателей является 25 %. Многие штанговые опрыскиватели (в отличие от

вентиляторных) удовлетворяют этому требованию, однако при минимальных (до 1,0 м/с) скоростях движения воздуха, при увеличении скорости воздуха (что характерно для условий Беларуси) показатель резко ухудшается. Создание эффективных, не требовательных к погодным условиям распыливающих устройств является одной из актуальных проблем многих фирм–разработчиков и изготовителей опрыскивателей, а задачей испытателей (исследователей) является объективная оценка их на должном техническом уровне проведения работ (исследований).

4. Густоту покрытия (шт./см²) и дисперсность (размер капель) распыла (в микронах) жидкости опрыскивателями определяют на карточках из мелованной (или другой, обработанной специальным составом) бумаги, которые раскладывают в определенном порядке на рабочей ширине захвата машины. Предварительно в баке опрыскивателя готовится определенный (1–2%) раствор в воде интенсивного водорастворимого красителя (нигрозина или т. п.), а после тщательного перемешивания и настройки машины на требуемую норму вылива опрыскиватель проезжает над разложенными на поверхности карточками. Капли оседают на них и засыхают, затем карточки собираются и подвергаются микроскопированию с подсчетом количества капель на учетной площади и их размера в микронах. На основании специальной обработки полученных размеров капель определяется так называемый медианно–массовый диаметр капель (ММД), имеющий следующий физический смысл: ММД капель – это тот размер (диаметр) капель, который свидетельствует, что масса жидкости в каплях меньших ММД соответствует массе жидкости, заключенной в каплях больших ММД. По результатам микроскопирования и нахождения ММД метод химической обработки (и саму машину, его осуществляющую) относят к обычному (ММД = 500–1000 мкм), мелкокапельному (ММД = 100–500 мкм) или высокодисперсному (ММД менее 100 мкм) опрыскиванию. Следует отметить, что приведенные значения ММД не являются общепризнанными, не носят четко определенного значения и в различных странах трактуются по–разному. Микроскопирование учетных карточек с целью определения медианно–массового диаметра капель является одной из трудоемких и скрупулезных операций в системе оценки сельскохозяйственных машин. Недопустима обработка карточек двумя и более специалистами, т. к. нарушается методология оценки и тем самым объективность. В настоящее время ведущие фирмы–разработчики и изготовители распы-

лителей и опрыскивателей проводят оценку дисперсности распыла на специально изготовленных установках (стендах) с использованием лазерной и компьютерной техники. Указанные установки имеют высокую стоимость, но использование их окупается оперативностью и объективностью исследований с целью создания конкурентоспособной продукции в условиях широкой конкуренции.

Оценка опрыскивателей предполагает определение и других показателей качества выполнения технологического процесса, таких как стабильность поддержания технологического режима, оценка средств автоматизации, агротехническая и биологическая эффективность химических обработок, изучение сноса препарата и воздействие этого явления на экологию, санитарно-гигиеническая оценка, оценка ультрамалообъемного опрыскивания и др., которые требуют специальной подготовки в специализированных (аккредитованных) центрах и лабораториях после получения основных знаний. Обработка результатов испытаний проводится в соответствии с положениями РД 10.6.1 «Испытания сельскохозяйственной техники. Опрыскиватели, опыливатели, расселители энтомофагов, машины для приготовления и транспортировки рабочей жидкости. Программа и методы испытаний». Указанный документ предусматривает характер и формы записи и регистрации определяемых показателей, а также отображение их в отчете (протоколе) испытаний.

Результаты агротехнической оценки обрабатывают на ЭВМ по соответствующим программам. Исходными данными являются показатели, полученные при лабораторно-полевых испытаниях, которые обрабатывают методом математической статистики с определением среднего арифметического значения, среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации. Данные по качеству работы после обработки заносят в соответствующие ведомости протокола испытаний. По результатам агротехнической оценки полученные показатели по испытываемой машине сопоставляются с нормативными требованиями и сравниваются с показателями машины-аналога. При этом используется и другая имеющаяся техническая информация, позволяющая дать объективное обоснование показателей, при этом необходимо иметь ссылку на конкретный источник. Полученные показатели качества агротехнической оценки необходимо тесно привязывать к условиям испытаний и конструкции испытываемой машины. При соответствии показателей испытываемой машины требованиям НД и лучшим их значениям в сравнении с показателями машины-

аналога делаются положительные выводы. При несоответствии полученных показателей требованиям НД анализируется причина несоответствия и даются рекомендации по приведению их в соответствие.

20 Агротехническая оценка машин и орудий для обработки почвы. Агротехническая оценка машин для внесения удобрений

20.1 Агротехническая оценка машин и орудий для обработки почвы

Агротехническая оценка почвообрабатывающих машин проводится при лабораторно–полевых испытаниях, которые включают выбор фона и определение характеристики условий испытаний, выбор режимов работы, определение показателей качества работы и анализ агротехнической оценки. Условия испытаний почвообрабатывающих машин характеризуются следующими параметрами:

- тип почвы и название по механическому составу;
- рельеф (уклон); – влажность и твердость почвы;
- засоренность почвы камнями;
- характеристика дернового покрова, пожнивных и растительных остатков;
- предшествующая обработка.

Участок для лабораторно–полевых испытаний почвообрабатывающих машин и орудий выбирают в соответствии с их назначением; он должен обеспечивать возможность выполнения работ, намеченных программой испытаний. Поле следует выбирать однородным по предшествующей обработке, растительному покрову и почве, которая должна быть характерной для зоны. Лабораторно-полевые испытания плугов проводят, как правило, на двух агрофонах: пласт трав и стерня. Качество работы плугов и глубокорыхлителей характеризуется их устойчивостью по ширине захвата и глубине обработки почвы, крошением почвы, степенью заделки растительных и пожнивных остатков, глубиной их заделки, оборотом пласта и др. При опытах измеряют:

- скорость движения, м/с;
- рабочая ширина захвата, м;
- глубина обработки, см;
- крошение почвы, %;
- полнота заделки растительной и пожнивной массы, %;

- глубина заделки растительной и пожнивной массы, см;
- гребнистость поверхности поля (высота гребней), см;
- плотность почвы, г/см³;
- высота гребня на поверхности дна борозды, см;
- путь заглубления (для каменистых почв), м;
- угол оборота пласта, град.

Скорость движения пахотного агрегата определяется по формуле:

$$V = \frac{S}{t},$$

где S – пройденный путь, м; t – время прохождения делянки, с.

Для определения пути и времени прохождения делянки на учетных проходах делянки отмечают вешками длиной не менее 50 м. Время прохождения делянки фиксируется секундомером. Повторность – четырехкратная (два прохода агрегата в прямом и два – в обратном направлениях). Для измерения скорости пахотного агрегата можно использовать путеизмерительное колесо, которое располагается сзади заднего корпуса плуга и катится по гладкому дну борозды. Устойчивость плуга по рабочей ширине захвата и глубине обработки определяется путем измерения рабочей ширины захвата и глубины обработки по заднему корпусу. Ширина захвата и глубина вспашки определяются одновременно по двум проходам плуга в 50 точках, расположенных через 1–3 м по ходу пахотного агрегата на каждом учетном проходе. Рабочую ширину захвата плуга определяют как разницу двух замеров между обрезом борозды и кольщиками до и после учетного прохода агрегата с использованием специального приспособления, обеспечивающего перпендикулярность установки измерительной ленты в стенке борозды по направлению от учетных кольшков. Рабочую ширину захвата чизельного плуга ($B_{раб}$) в метрах определяют по следующей формуле:

$$B_{раб} = n \cdot M,$$

где n – число чизельных рабочих органов, шт.; M – ширина междуследия рабочих органов, см.

Глубину обработки почвы по ходу движения пахотного агрегата измеряют бороздомером по борозде, образованной задним корпусом. В местах измерения борозду очищают от насыпи (валика). Глубину обработки почвы чизельными плугами, плугами–рыхлителями, плоскорезами–щелевателями и плоскорезами–щелерезами измеряют по следу прохода стоек рабочих органов с помощью специального щупа.

Глубину обработки по ширине захвата определяют методом поперечного профилирования. Крошение почвы определяют по пробам, отбираемым в четырех точках участка с площади $0,25\text{ м}^2$ на глубину обработки. Пробы осторожно переносят на набор решет с диаметром отверстий, указанных в ТЗ на испытываемую машину. Затем содержимое каждого решета взвешивают с погрешностью не более ± 50 г, данные записывают в форму, а далее вычисляют массовую долю i -й фракции комков (P_{ki}) в процентах по формуле:

$$P_{ki} = \frac{m_i \cdot 10^3}{m},$$

где m_i – масса i -й фракции в пробе, кг; m – общая масса пробы, кг. Качество заделки пожнивных и растительных остатков определяют по массе оставшихся на поверхности незаделанных пожнивных и растительных остатков. Учет незаделанных остатков производят на учетных площадках длиной 5 м, шириной, равной ширине захвата машины. Незаделанные остатки собираются, состригаются и взвешиваются с погрешностью ± 50 г. С каждой учетной делянки берут по одной пробе. При обработке полученных данных подсчитывают среднее арифметическое значение растительных и пожнивных остатков по четырем пробам. Массовую долю незаделанных и пожнивных остатков (α) в процентах определяют по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{q_1 - q_2}{q_1},$$

где q_1 – масса пожнивных и растительных остатков до прохода машины, переведенная на площадь учетной площадки ($5 \cdot S_0$), кг; q_2 – масса пожнивных и растительных остатков после прохода машины, кг; S_0 – площадь учетной площадки до прохода машины, м^2 .

Определение глубины заделки растительной массы должно производиться по вертикальным разрезам пашни на полную ширину захвата орудия по каждому корпусу или рабочему органу (при поперечном профилировании). По вертикальной стенке разреза устанавливают верхнюю границу расположения запаханных растительных остатков. Измерения проводят линейкой с погрешностью не более ± 1 см. Угол оборота пласта определяют при помощи специального приспособления, которое является нестандартизированным рабочим средством измерения. В основу метода измерения угла оборота (наклона) пласта при пахоте заложен принцип измерения угла параллелограммным механизмом, опорное основание которого устанавливается на

обернутый пласт почвы при вертикальном расположении боковых стоек. Отсчет измеряемого угла наклона производится по циферблату транспорта, закрепленного на верхней стороне механизма с помощью горизонтально устанавливаемой стрелки–уровня. При измерении угла наклона пласта приспособление или угломер накладывается на откос борозды так, чтобы основание его плотно прилегало к откосу по большей части длины пласта. При измерении угла стрелку–уровень устанавливают в горизонтальном положении. По циферблату транспорта отсчитываются показания, указанные стрелкой–уровнем, и записываются в ведомость лабораторных измерений. Угол оборота пласта измеряется не менее чем в 30 точках.

Качество работы машин и орудий для поверхностной обработки почвы характеризуется:

- устойчивостью глубины хода их рабочих органов;
- вспушенностью обработанной поверхности;
- гребнистостью поверхности почвы;
- степенью рыхления (крошения почвы);
- степенью подрезания сорняков;
- степенью повреждения культурных растений;
- степенью залипания и забивания рабочих органов.

Общие показатели по машинам и орудиям для предпосевной подготовки почвы:

- скорость движения, м/с;
- рабочая ширина захвата, м;
- глубина обработки, см;
- крошение почвы, %;
- гребнистость поверхности поля (высота гребней), см;
- подрезание (уничтожение) сорных растений, %.

Кроме того, по дисковым луцильникам и боронам определяют:

- измельчение пожнивных остатков (для крупностебельных культур), %;
- заделку пожнивных остатков (для крупностебельных культур), %.

По комбинированным агрегатам кроме общих показателей дополнительно определяют:

- уплотнение почвы, г/см³;
- неравномерность дна борозды по ширине захвата, см.

По боронам зубовым, пружинным, ножевидным, лапчатым, игольчатым кроме общих показателей дополнительно определяют:

- разрушение почвенной корки, %;

– повреждение культурных растений (при обработке посевов озимых многолетних трав и других культур), %.

По выравнителям почвы определяют:

- скорость движения, м/с;
- рабочую ширину захвата, м;
- поперечную и продольную выравненность почвы (среднее квадратическое отклонение до и после прохода выравнителя), ± см.

По полевым каткам:

- агрегатный состав почвы, %;
- плотность почвы в слоях (до и после прохода катков), г/см³.

Глубина обработки определяется методом поперечного и продольного профилирования и проводится следующим образом: Для поперечного профилирования на каждой учетной делянке перед проходом машины вбивают две опорные стойки, на которые горизонтально устанавливают координатную рейку перпендикулярно к направлению движения агрегата. Вертикальные расстояния от поверхности поля до нижней стороны рейки измеряют линейкой по всей ширине захвата машины с интервалом 10 см. Погрешность измерения ±1,0 см. Результаты измерений заносят в ведомость профилирования. Продольное профилирование определяют по ходу агрегата. Для этого перед проходом орудия вдоль хода агрегата кладут координатную рейку длиной 3–6 м. Один конец устанавливают на рейке поперечного профилирования, а второй – на вспомогательной рейке, помещенной на двух опорных стойках. После этого снимают продольный профиль до прохода. Делают отметки на вспомогательной и поперечной рейках, чтобы после прохода орудия рейка для продольного профилирования смогла снова занять свое первоначальное положение. Затем все рейки убирают. После прохода машины рейки вновь устанавливают и начинают снимать профиль поверхности и дна взрыхленного слоя. Измеряют вертикальные расстояния от дна борозды до нижней стороны рейки. Результаты заносят в таблицу. Подрезание сорняков (P_c) в процентах определяют по формуле:

$$P_c = \frac{K_1 - K_2}{K_1} \cdot 10^2,$$

где K_1 – количество сорняков учетной площадки до прохода, шт.; K_2 – количество сорняков, не подрезанных в пределах учетной площадки после прохода машины, шт.

Повреждение культурных растений (P_k) в процентах определяют по формуле:

$$P_k = \frac{K_1 - K_2}{K_1} \cdot 10^2,$$

где K_1 – количество культурных растений в пределах учетной площадки до прохода бороны, шт.; K_2 – количество поврежденных (вырванных) культурных растений в пределах учетной площадки после прохода бороны, шт.

Плотность почвы определяют до и после прохода уплотняющих машин (катков) на глубину до 15 см. До прохода машины пробы для определения плотности почвы определяют в трех точках, равномерно расположенных по ширине захвата, в 4-кратной повторности при проходе машины в прямом и обратном направлениях (два раза по ходу, два раза – обратно). После прохода машины пробы для определения плотности почвы отбирают в тех же точках, что и до прохода машины. Определение плотности проводят согласно ГОСТ 20915. Уплотнение обработанного слоя почвы определяют по разности плотности почвы до и после прохода агрегата.

20.2 Агротехническая оценка машин для внесения удобрений

Агротехническую оценку машин для внесения удобрений необходимо проводить:

1) не менее чем на двух видах машин с различными физико-механическими свойствами твердых минеральных удобрений;

2) не менее чем на двух видах твердых органических удобрений. Органические удобрения не должны содержать посторонних примесей (металл, камни, строительные отходы, стекло). Максимальный размер комков удобрений не более 150 мм;

3) не менее чем на двух видах жидких органических удобрений. Участок, выбранный для агротехнической оценки, должен быть однородным по механическому составу, рельефу, влажности почвы, задернению и качеству предшествующей обработки почвы.

Условия опытов характеризуются следующими основными показателями:

- вид удобрений;
- насыпная плотность, кг/м³;
- влажность удобрений, %;

- гранулометрический состав, %;
- тип почвы;
- рельеф;
- уклон участка, %, и микрорельеф;
- температура воздуха, °С;
- относительная влажность воздуха, %;
- скорость ветра, м/с;
- направление ветра относительно движения машины, град.

При испытаниях машин для внесения жидких органических удобрений дополнительно определяют неравномерность перемещения удобрений по формуле:

$$M = \frac{m_{oi} \cdot 10^2}{m_{ci}},$$

где m_{oi} – масса осадка в i -й пробе после высушивания, г; m_{ci} – масса суспензии в i -й пробе до отстаивания, г.

Схемы расстановки противней, в которые попадают удобрения при проведении опытов по агротехнической оценке машин, приведены на рисунках 20.1–20.3.



Рисунок 20.1 – Схема расстановки противней с симметричным двусторонним характером внесения удобрений по ширине и ходу движения машины



Рисунок 20.2 – Схема расстановки противней при одностороннем характере внесения удобрений по ширине и ходу движения машины

Полученные показатели сопоставляются с нормативными требованиями на машину и сравниваются с показателями машины-аналога. Основными оцениваемыми показателями качества выполнения технологического процесса машин для внесения удобрений являются:

- 1) рабочая ширина внесения удобрений, которая должна быть технологически обоснована; 2) диапазон доз внесения удобрений;
- 3) неравномерность внесения удобрений на рабочей ширине захвата и по ходу движения агрегата, которая в настоящее время составляет 15–25 %;
- 4) нестабильность дозы внесения удобрений, которая составляет 5–10 %.

При соответствии показателей испытываемой машины требованиям нормативной документации и лучшим их значениям в сравнении с показателями сравниваемой машины дается положительная оценка испытываемого образца. При несоответствии полученных показателей требованиям НД анализируется причина несоответствия и даются рекомендации по приведению их в соответствие с нормативными требованиями.

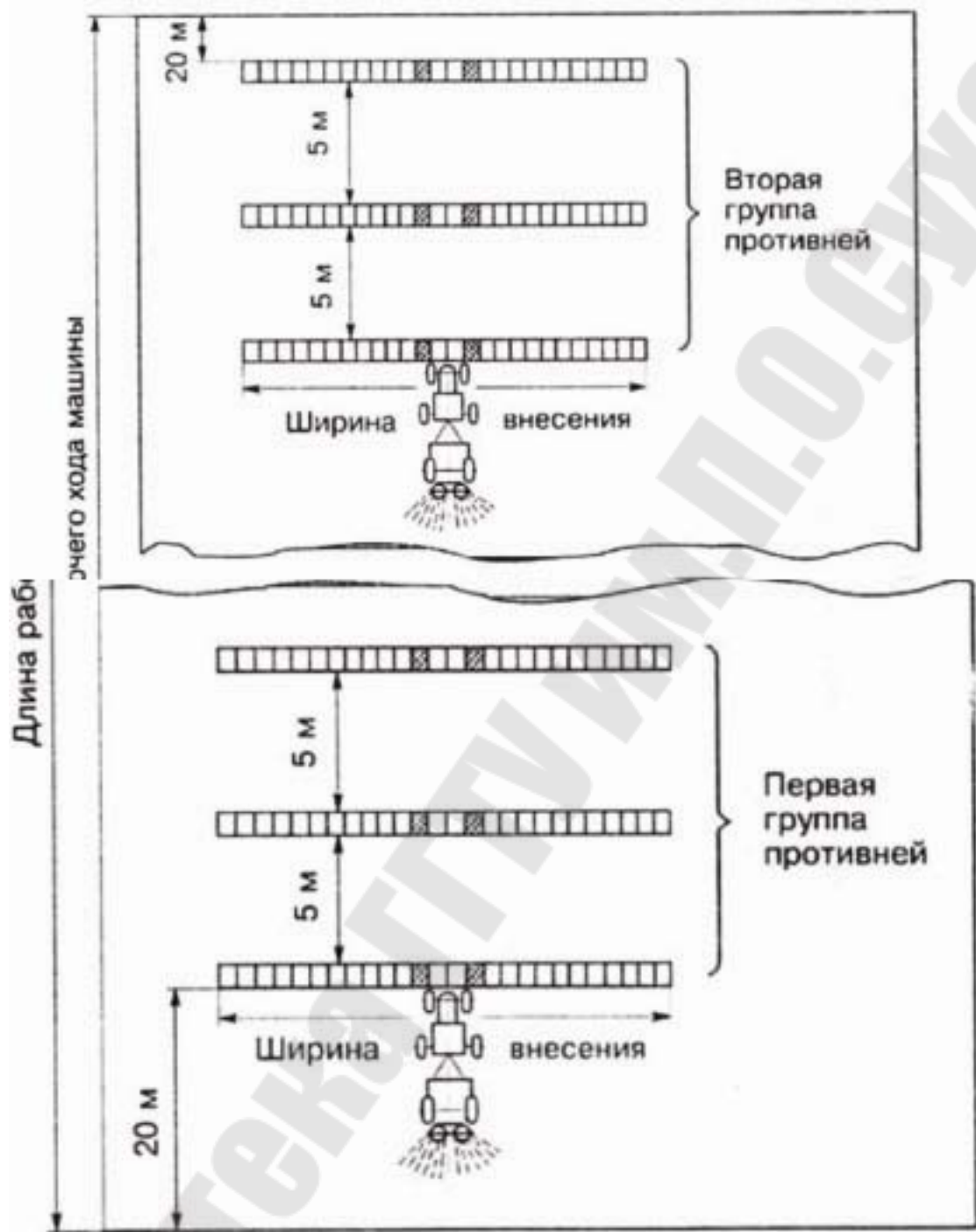


Рисунок 20.3 – Схема расстановки противней при определении нестабильности дозы внесения удобрений

21 Метрологическое обеспечение при проведении испытаний с/х машин

1. СТО АИСТ 19.2–2008 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и оборудование для приготовления кормов. Методы оценки функциональных показателей» переработан в ТКП 273–2010(02150) «Сельскохозяйственная техника. Машины и оборудование для приготовления кормов. Порядок определения функциональных показателей» (Внесен в реестр государственной регистрации за № 884 от 22.12.2010).

2. ГОСТ Р 52759–2007 «Машины для внесения твердых органических удобрений. Методы испытаний» переработан в ТКП 274–2010(02150) «Сельскохозяйственная техника. Машины для внесения твердых органических удобрений. Порядок определения показателей» (Внесен в реестр государственной регистрации за № 885 от 22.12.2010).

3. ГОСТ Р 52758–2007 «Погрузчики и транспортеры сельскохозяйственного назначения. Методы испытаний» переработан в ТКП 275–2010(02150) «Сельскохозяйственная техника. Погрузчики и транспортеры сельскохозяйственного назначения. Порядок определения показателей» (Внесен в реестр государственной регистрации за № 886 от 22.12.2010).

4. ГОСТ Р 52757–2007 «Машины свеклоуборочные. Методы испытаний» переработан в ТКП 276–2010(02150) «Сельскохозяйственная техника. Машины свеклоуборочные. Порядок определения показателей» (Внесен в реестр государственной регистрации за № 887 от 22.12.2010).

5. СТО АИСТ 8.5–2006 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для уборки и послеуборочной обработки картофеля. Методы оценки функциональных показателей» переработан в ТКП 277–2010(02150) «Сельскохозяйственная техника. Машины для уборки и послеуборочной обработки картофеля. Порядок определения функциональных показателей» (Внесен в реестр государственной регистрации за № 888 от 22.12.2010).

6. СТО АИСТ 23.5–2008 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для уборки сена и соломы. Методы оценки функциональных показателей» переработан в ТКП 278–2010(02150) «Сельскохозяйственная техника. Машины для уборки сена и соломы. Порядок

определения функциональных показателей» (Внесен в реестр государственной регистрации за № 889 от 22.12.2010).

7. СТО АИСТ 10 8.23–2003 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для уборки сахарной свеклы. Показатели назначения. Общие требования» переработан в ТКП 279–2010(02150) «Сельскохозяйственная техника. Машины для уборки сахарной свеклы. Правила установления показателей назначения» (Внесен в реестр государственной регистрации за № 890 от 22.12.2010).

8. СТО АИСТ 8.21–2004 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для уборки ботвы корнеплодов. Методы оценки функциональных показателей» переработан в ТКП 280–2010(02150) «Сельскохозяйственная техника. Машины для уборки ботвы корнеплодов и картофеля. Порядок определения функциональных показателей» (Внесен в реестр государственной регистрации за №891 от 22.12.2010).

9. ГОСТ Р 52777–2007 «Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки» переработан в ТКП 281–2010(02150) «Сельскохозяйственная техника. Порядок определения показателей энергетической оценки» (Внесен в реестр государственной регистрации за № 892 от 22.12.2010).

10. СТО АИСТ 2.8–2007 «Испытания сельскохозяйственной техники. Надежность. Методы оценки показателей» переработан в ТКП 282–2010(02150) «Сельскохозяйственная техника. Надежность. Порядок определения показателей» (Внесен в реестр государственной регистрации за № 893 от 22.12.2010).

11. СТО АИСТ 10.2–2004 «Испытания сельскохозяйственной техники. Зерноочистительные машины и агрегаты, зерноочистительно–сушильные комплексы. Методы оценки функциональных показателей» переработан в ТКП 283– 2010(02150) «Сельскохозяйственная техника. Зерноочистительные машины и агрегаты» зерноочистительно–сушильные комплексы. Порядок определения функциональных показателей» (Внесен в реестр государственной регистрации за № 894 от 22.12.2010).

12. СТО АИСТ 2.9–2007 «Испытания сельскохозяйственной техники. Надежность. Оценка приспособленности к техническому обслуживанию» переработан в ТКП 284–2010(02150) «Сельскохозяйственная техника. Надежность. Оценка приспособленности к техническому обслуживанию» (Внесен в реестр государственной регистрации за № 895 от 22.12.2010). 45

13. СТО АИСТ 28.1–2008 «Испытания сельскохозяйственной техники. Очистители и охладители молока. Методы оценки функциональных показателей» переработан в ТКП 285–2010(02150) «Сельскохозяйственная техника. Очистители и охладители молока. Порядок определения функциональных показателей» (Внесен в реестр государственной регистрации за № 896 от

14. РД 10 1.10–2000 «Требования к техническим средствам производства, обеспечивающим соблюдение технологий возделывания и уборки сельскохозяйственной продукции». Распространяется на технические средства производства (сельскохозяйственные машины), предназначенные для основных технологических операций возделывания и уборки продукции растениеводства. Устанавливает номенклатуру требований к техническим средствам для реализации технологий возделывания и уборки продукции растениеводства

15. СТО АИСТ 8.7–2004 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для уборки овощных и бахчевых культур. Методы оценки функциональных показателей». Распространяется на машины для уборки овощных и бахчевых культур: томатов, огурцов, баклажанов, сладкого перца, лука, чеснока, моркови, столовой свеклы, редиса, турнепса, редьки, брюквы, цикория, капусты, зеленого горошка, зеленой фасоли, арбузов, дынь, тыквы, кабачков, патиссонов. Устанавливает номенклатуру функциональных показателей и методы их определения при всех видах испытаний вышеперечисленных типов машин.

16. СТО АИСТ 11.1–2004 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей». Распространяется на машины и установки дождевальные, работающие позиционно и в движении с комплектующим технологическим оборудованием (дождевальные аппараты, устройства для внесения с поливной водой минеральных удобрений, микроэлементов, подготовленных животноводческих стоков, системы автоматики и приборы, входящие в состав машин согласно НД). Устанавливает номенклатуру функциональных показателей и методы их определения при всех видах испытаний вышеперечисленных типов машин.

17. СТО АИСТ 11.3–2004 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки поливные. Методы оценки функциональных показателей». Распространяется на машины и установки для полива по бороздам, чекам, капельного полива и на вспомогательное

оборудование (сифоны– водовыпуски, трубки–сифоны, гибкие поливные трубопроводы). Устанавливает номенклатуру функциональных показателей и методы их определения при всех видах испытаний.

18. СТО АИСТ 14.1–2004 «Испытания сельскохозяйственной техники. Сцепки тракторные. Методы оценки функциональных показателей». Распространяется на сцепки тракторные навесные, полунавесные, прицепные гидрофицированные, универсальные гидрофицированные, используемые для составления машинно–тракторных агрегатов, применяемых в технологиях возделывания различных сельскохозяйственных культур. Устанавливает номенклатуру 46 функциональных показателей и методы их определения при всех видах испытаний вышеперечисленных типов машин.

19. СТО АИСТ 10.4–2004 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для подготовки семян. Методы оценки функциональных показателей». Распространяется на комплекты оборудования, линии и машины для калибрования, шлифования, сегментирования, дражирования, протравливания, протравливания с инкрустацией, термического и электрофизического обеззараживания семенного материала. Устанавливает номенклатуру функциональных показателей и методы их определения при всех видах (предварительные, приемочные, периодические, типовые, квалификационные и сертификационные) испытаний вышеперечисленных комплексов, линий и машин.

20. СТО АИСТ 10.6–2004 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины, технологические линии и пункты для послеуборочной обработки овощных и бахчевых культур. Методы оценки функциональных показателей». Распространяется на машины, технологические линии и пункты для послеуборочной обработки овощных и бахчевых культур: лука–репки, лука–севка, чеснока, капусты, томатов, огурцов, корнеплодов, баклажанов, перца, арбузов, дынь, тыквы. Устанавливает номенклатуру функциональных показателей и методы их определения при всех видах испытаний вышеперечисленных машин, технологических линий и пунктов.

21. СТО АИСТ 2.10–2007 «Испытания сельскохозяйственной техники. Надежность. Методы оценки приспособленности к ремонту». Распространяется на тракторы, самоходные шасси, сельскохозяйственные машины и оборудование для животноводства и кормопроизводства и их агрегаты. Устанавливает номенклатуру показателей, а также методы сбора информации и расчета показателей для оценки приспособленности изделий к ремонту при всех видах испытаний.

22. РД 10.2.33–89 «ССБТ. Машины и оборудование для животноводства и кормопроизводства. Методы оценки безопасности и эргономичности». Распространяется на машины и оборудование для животноводства и кормопроизводства. Устанавливает типовые методы как основу для разработки рабочих программ и методик оценки безопасности и эргономичности при предварительных, государственных приемочных и государственных периодических испытаниях машин по опасным и вредным производственным факторам, регламентированным системой стандартов безопасности труда (ССБТ) и системой «человек–машина».

23. СТО АИСТ 5.3–2005 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины рассадопосадочные. Методы оценки функциональных показателей». Распространяется на автоматические и полуавтоматические рассадопосадочные машины для посадки: овощных культур (капусты, томатов, огурцов, перца, баклажанов), табака, махорки; клубники, дичков плодовых культур; сахарной свеклы. Устанавливает номенклатуру функциональных показателей и методы их определения при всех видах испытаний вышеперечисленным типов машин.

24. СТО АИСТ 8.13–2005 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для уборки и первичной обработки кукурузы. Методы оценки функциональных показателей». Распространяется на машины для уборки и первичной обработки кукурузы: комбайны кукурузоуборочные; очистители початков от оберток; молотилки для обмолота початков; линии, комплекты оборудования, комплексы для обработки кукурузы в початках. Устанавливает номенклатуру функциональных показателей и методы их определения при приемочных, квалификационных, типовых, периодических, предварительных испытаниях и испытаниях для целей сертификации вышеперечисленных типов машин.

22 Техническая экспертиза машин. энергетические показатели машин. Эксплуатационноэкономические показатели машин

22.1 Техническая экспертиза машин

Практика эксплуатации транспортной техники показывает, что в настоящее время при минимальных затратах работоспособное состояние машины позволяют поддерживать принципы технического обслуживания и ремонта, которые носят планово–предупредительный характер.

Техническое обслуживание – это комплекс операций или операция по поддержанию работоспособности или исправности транспортных средств при использовании их по назначению, хранении и транспортировании.

Ремонт – это комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности транспортных средств и восстановлению их ресурсов или ресурсов составных частей.

В соответствии с руководством по эксплуатации машину ставят на техническое обслуживание и ремонт в плановом порядке с учетом принятой периодичности и графика проведения работ, чем и обуславливается плановый порядок их проведения. Предупредительность заключается в своевременном выполнении процессов и операций технического обслуживания и ремонта по принятой технологии, что предупреждает появление отказов. Вид и порядок чередования технического обслуживания и ремонта (график проведения работ) устанавливается по каждому типу и модельному ряду машин отдельно.

При более широком внедрении методов и средств технического диагностирования можно перейти от планово–предупредительной системы к стратегии технического обслуживания и ремонта по результатам диагностирования технического состояния машин. В этом случае в плановом порядке намечено осуществлять только контроль за состоянием сборочных единиц и составных частей, а сами работы возможно выполнять по потребности на основе диагностирования их технического состояния.

Цель технического диагностирования – выявить неисправности машины без ее разборки, определить ресурс безотказной работы сборочных единиц, фактическую потребность в производстве работ при техническом обслуживании и ремонте, момент возникновения отказа или неисправности сборочных единиц.

Техническое диагностирование машины организуется во взаимосвязи с технологическими процессами технического обслуживания и ремонта, приведенными в руководстве по эксплуатации машины.

Диагностирование машин включает в себя:

- анализ их технического состояния,
- выбор методов диагностирования сборочных единиц,
- разработку условий выполнения диагностических операций,
- выбор средств диагностирования,
- разработку дополнений по диагностированию к эксплуатационной документации.

В основу организации технической диагностики машин положен принцип специализации и разделения труда, когда диагностирование проводится не мастерами и слесарями технического обслуживания и ремонта, а специальной службой технической диагностики, которая состоит из специально подготовленных специалистов: инженера–диагноста, мастера–диагноста и звена слесарей–диагностов.

Диагностирование является неотъемлемым технологическим элементом всей системы технического обслуживания и ремонта транспортной техники, обеспечивает проведение работ технического обслуживания и ремонта по фактическому техническому состоянию транспортных средств.

Техническое диагностирование транспортных средств планируют и выполняют по потребности; производится также ресурсное диагностирование.

Плановое диагностирование проводят после отработки транспортным средством установленного количества моточасов.

22.2 Энергетические показатели машин

При энергетической оценке сельскохозяйственных машин и стационарных агрегатов с приводом от двигателя внутреннего сгорания или трактора определяют следующие показатели:

- часовой расход топлива;
- мощность, потребляемую сельскохозяйственной машиной или стационарным агрегатом;
- удельные энергозатраты;
- тяговое сопротивление навесных, полунавесных и прицепных сельскохозяйственных машин, присоединяемых к трактору;

– мощность, потребляемую на привод рабочих органов навесных, полунавесных и прицепных сельскохозяйственных машин, присоединяемых к трактору.

При энергетической оценке стационарных агрегатов с приводом от асинхронных электрических двигателей определяют следующие показатели:

- активную и реактивную мощности, потребляемые стационарным агрегатом;
- средний коэффициент мощности;
- удельные энергозатраты.

Величины, измеряемые при испытаниях

Показатели энергетической оценки определяют по результатам измерений, полученных при испытаниях. На каждом режиме работы сельскохозяйственной машины или агрегата должны быть выполнены не менее четырех измерений каждой величины, продолжительностью не менее 20с.

При определении показателей энергетической оценки самоходной сельскохозяйственной машины или стационарного агрегата с приводом от двигателя внутреннего сгорания или трактора измеряют:

- время измерения;
- количество топлива, израсходованного за время измерения;
- длину пути, пройденного самоходной машиной за время измерения.

При определении показателей энергетической оценки навесных, полунавесных или прицепных сельскохозяйственных машин, присоединяемых к трактору, измеряют:

Для сельскохозяйственных машин без привода рабочих органов от трактора: – время измерения;

- тяговое сопротивление сельскохозяйственной машины при выполнении технологических операций;
- длину пути, пройденного сельскохозяйственной машиной за время измерения.

Для сельскохозяйственных машин с приводом рабочих органов от вала отбора мощности трактора дополнительно:

- крутящий момент вала отбора мощности;
- частоту вращения вала отбора мощности.

Для сельскохозяйственных машин с гидравлическим приводом от трактора на рабочие органы :

- расход рабочей жидкости, поступающей в механизмы привода рабочих органов;
- перепад давлений рабочей жидкости между входящей и выходящей линиями гидравлического привода.

22.3 Эксплуатационно–экономические показатели машин

Мощность, потребляемая самоходной сельскохозяйственной машиной или стационарным агрегатом с приводом от двигателя внутреннего сгорания или трактора определяют по зависимости эксплуатационной мощности полученной при определении его регуляторной характеристики.

Регуляторную характеристику двигателя определяют по ГОСТ 18509. Регуляторную характеристику двигателя следует определять перед проведением испытаний с установленным на сельскохозяйственных машинах или агрегатах устройством для измерения расхода топлива.

По регуляторной характеристике и нагрузке двигателя внутреннего сгорания более чем 100% из двух значений мощности, полученных при одинаковом часовом расходе топлива, выбирается то, которое соответствует измеренной частоте вращения коленчатого вала $n_{об}$.

Часовой расход топлива G_T , кг/ч, вычисляют по формулам:

$$G_T = 3,6 \frac{m_T}{t},$$

$$G_T = 3,6 \frac{V_T \cdot \rho}{t},$$

где m_T – масса топлива, израсходованного двигателем самоходной сельскохозяйственной машины или трактора за время измерения, г; t – время измерения, с; V_T – объем топлива, израсходованного двигателем самоходной сельскохозяйственной машины или трактора за время измерения, см³; ρ – плотность топлива при стандартной температуре, г/см³.

Мощность, потребляемую навесными, полунавесными, прицепными, сельскохозяйственными машинами, присоединяемыми к трактору N_M , кВт, вычисляют по формулам:

– для сельскохозяйственных машин без привода рабочих органов от трактора:

$$N_M = 10^{-3} \cdot R_T,$$

где R – тяговое сопротивление сельскохозяйственной машины, Н; v – поступательная скорость движения сельскохозяйственной машины, м/с;

– для сельскохозяйственных машин с приводом рабочих органов от вала отбора мощности трактора:

$$N_M = 10^{-3} \cdot R_T + N_{ВОМ},$$

где $N_{ВОМ}$ – мощность привода рабочих органов от ВОМ, кВт;

– для сельскохозяйственных машин с гидравлическим приводом от трактора на рабочие органы:

$$N_M = 10^{-3} \cdot R_T + N_G,$$

где N_G – мощность гидравлического привода на рабочие органы, кВт.

Допускается мощность, потребляемую навесными, полунавесными и прицепными сельскохозяйственными машинами N_M , кВт, вычислять по формуле:

$$N_M = N_{Ta} - N_{Tc},$$

где N_{Ta} – мощность, затрачиваемая машинно–тракторным агрегатом при выполнении технологических операций, кВт; N_{Tc} – мощность, потребляемая на самопередвижение трактора, кВт.

В этом случае при испытаниях дополнительно измеряют:

– частоту вращения коленчатого вала двигателя трактора, s^{-1} ;

– объем топлива, израсходованного двигателем машинно–тракторного агрегата и трактора при движении его без сельскохозяйственной машины, cm^3 .

Мощности N_{Ta} и N_{Tc} определяют по величинам часового расхода топлива G_{TA} и G_{TC} .

Определение мощности, потребляемой на привод рабочих органов навесных, полунавесных, прицепных сельскохозяйственных машин, присоединяемых к трактору.

Для сельскохозяйственных машин с приводом рабочих органов от ВОМ трактора $N_{ВОМ}$, кВт, вычисляют по формуле:

$$N_{ВОМ} = 1,047 \cdot 10^{-4} \cdot M_{ВОМ} \cdot n_{ВОМ},$$

где $M_{ВОМ}$ – крутящий момент на хвостовике вала отбора мощности, Н·м; $n_{ВОМ}$ – частота вращения хвостовика вала отбора мощности, об/мин.

Для сельскохозяйственных машин с гидравлическим приводом рабочих органов N_{Γ} , кВт, вычисляют по формуле:

$$N_{\Gamma} = \Delta p \cdot Q_{ж},$$

где Δp – перепад давлений между входящей и выходящей гидравлическими линиями привода, МПа; $Q_{ж}$ – расход рабочей жидкости, $\text{дм}^3/\text{с}$.

Определение показателей энергетической оценки сельскохозяйственных машин или агрегатов с циклическим режимом работы.

Среднюю мощность за время цикла – N_{MCC} , кВт, вычисляют по формуле:

$$N_{MCC} = \frac{\sum_{i=1}^l N_{Mt} \cdot t_i}{t_n},$$

где N_{Mt} – мощность, потребляемая сельскохозяйственной машиной или агрегатом при выполнении технологической операции, кВт; t_i – время одной технологической операции, с; t_n – время технологического цикла, с; l – число технологических операций в цикле.

Мощность наиболее энергоемкой операции цикла

Поступательную скорость движения сельскохозяйственной машины v , м/с, вычисляют по формуле:

$$v = \frac{S}{t},$$

где S – длина пути, пройденного сельскохозяйственной машиной за время измерения, м.

Определение тягового сопротивления навесных, полунавесных или прицепных сельскохозяйственных машин, присоединяемых к трактору

Тяговое сопротивление навесных, полунавесных или прицепных сельскохозяйственных машин определяют прямым или косвенным измерением.

При определении мощности, потребляемой сельскохозяйственной машиной, по расходу топлива тяговое сопротивление R_M , Н, вычисляют по формуле:

$$R_M = 10^3 \cdot \frac{(N_{TA} - N_{ВОМ} - N_{ТС})}{v},$$

Тяговое сопротивление сельскохозяйственной машины R_M , Н, вычисляют по формуле:

$$R_M = R_{TA} - R_{TC},$$

где R_{TA} – тяговое сопротивление машинно–тракторного агрегата при выполнении технологических операций, Н; R_{TC} – тяговое сопротивление трактора при его движении без сельскохозяйственной машины, Н.

23 Основы методики статической обработки результатов измерений при проведении испытаний

Обработку результатов измерений проводят методами математической статистики для получения среднего значения величины из всех повторностей опыта.

Для параметров с явно выраженными циклами, записанными в аналоговой форме, первичную обработку проводят интервальным методом по характерным участкам периода цикла. Показатели энергетической оценки МТА помещают в ведомость (таблица 23.1). Анализ результатов энергетической оценки проводят по оценочным показателям, номенклатуру которых устанавливают в соответствии с принятым методом их определения и нормируемым их значениям.

В анализе результатов энергетической оценки указывают достаточность тяговых и мощностных показателей энергетического средства для устойчивого выполнения технологического процесса на различных режимах работы, влияние фона, кроме того, сопоставляют энергоемкости сравниваемых машин и указывают причины их повышения или понижения. Рекомендуются для наглядности результаты энергетической оценки представлять графиками, отражающими зависимость энергосиловых параметров машины от режимов работы. Результаты испытаний объемного гидропривода помещают в ведомость по форме таблицы 23.2.

Таблица 23.1 – Показатели энергетической оценки МТА

Наименование показателей	Значение показателей						
	по ТЗ	по испытуваемой машине			по сравняваемой машине		
	2	3	4	5	6	7	8
<p>Удельный расход топлива, кг/га, кг/т</p> <p>Удельные энергозатраты на физическую единицу наработки за час основного времени. кВт.ч/га, кВт. ч/т</p> <p>Буксование, %</p> <p>Мощность, потребляемая машиной от ВОМ трактора, кВт</p> <p>Коэффициент использования эксплуатационной мощности двигателя, %</p> <p>Эффективная мощность двигателя, кВт</p> <p>Тяговое сопротивление машины, кН</p> <p>Тяговая мощность. кВт</p> <p>Удельное тяговое сопротивление машины. кН/м, Н/см.</p> <p>Условия и режимы проведения энергетической оценки:</p> <p>–вид работы скорость движения, м/с</p> <p>–ширина захвата, м</p> <p>–глубина хода рабочих органов, см</p> <p>–производительность, га/ч</p> <p>–подача, кг/с</p> <p>Характеристика почвы:</p> <p>–тип</p> <p>–влажность почвы, %, в слоях, см:</p> <p>– твердость почвы, МПа, в слоях, см:</p>							

Таблица 23.2 – Показатели оценки параметров объёмного гидропривода

Показатель	Значение показателя	
	по испытываемому гидроприводу	по гидроприводу–аналогу
1	2	3
Мощность, потребляемая гидронасосом, кВт Мощность, развиваемая гидромотором, кВт Полный КПД гидропередачи. Коэффициент использования установленной мощности насоса Коэффициент соотношения мощностей условной потенциальной насоса гидропривода трансмиссии и двигателя Показатели условий и режимов работы: Положение регулируемого органа насоса, рад. Температура рабочей жидкости. °С Марка рабочей жидкости		

Анализ показателей испытаний гидропривода проводят по средним значениям мощности, развиваемой гидромотором (гидроцилиндром) и потребляемой гидронасосом, КПД гидропередачи, по коэффициенту использования установленной мощности насоса и коэффициенту соотношения мощностей условной потенциальной насоса гидропривода трансмиссии и двигателя, температурному режиму.

24 Анализ вероятностных связей между факторами и результатами испытаний. основные положения

Целью исследований является проверка определённых предположений; об агротехнических преимуществах новой машины над старой, достоинствах некоторых режимов работы, сравнение экспериментальных и теоретических выводов и т.д. Если разница между параметрами среднеарифметической величины \bar{X} среднеарифметиче-

ским отклонением σ сравниваемых выборок незначительна, то считают, что различие между ними имеют случайный характер, а выборки принадлежат единому генеральному распределению. Для оценки значимости указанной разницы используют параметрические и непараметрические критерии достоинства.

Первые строятся на основе параметров \bar{X} и σ выборки, вторые основаны на функциях от вариант – выборки с соответствующими частотами.

Параметрические критерии обладают более сильной “разрешающей” способностью, но они применимы лишь в тех случаях, когда исследуемая выборка распределена по закону, не очень сильно отличающемуся от нормального. Из параметрических критериев чаще всего применяется F – критерий Фишера для сравнения дисперсией и t – критерий Стьюдента при сравнении средних величин.

При сравнении распределений двух выборок в первую очередь сравнивают дисперсии, а затем средние величины. Гипотеза о неравенстве дисперсии двух выборок ($\sigma_A^2 > \sigma_B^2$) подтверждается с помощью одностороннего критерия Фишера.

$$\frac{\sigma_A^2}{\sigma_B^2} > F_{1-\alpha}$$

$F_{1-\alpha}$ – табличное значение критерия Фишера при степенях свободы

$$v_1 = n_A - 1 \text{ и } v_2 = n_B - 1$$

n_A, n_B – объём каждой из выборок;

α – вероятность риска принять неверное решение.

Гипотеза о равенстве дисперсии ($\sigma_A^2 = \sigma_B^2$) подтверждается двухсторонним критерием Фишера:

$$\frac{1}{F_t - \frac{\alpha}{2}} \leq \frac{\sigma_A^2}{\sigma_B^2} \leq F_t - \frac{\alpha}{2}.$$

Для проверки однородности нескольких дисперсий при равных объемах выборки используется критерий Кохрена:

$$G_P = \frac{\sigma_{\max}^2}{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2},$$

где σ_{\max}^2 –наибольшая из выборочных дисперсий; m – число выборок;

$\sum_{i=1}^m \sigma_i^2$ –сумма всех дисперсий, в том числе и σ_{\max}^2 .

Гипотеза односторонности дисперсий принимается, если табличное значение Кохрена $\sigma_i \succ \sigma_F$.

Соблюдение этого условия свидетельствует о том, что $\sigma \sigma >$ результаты опытов относятся к одной генеральной совокупности.

Значимость различия двух средних значений при $(\sigma_A^2 = \sigma_B^2)$ оценивается критерием

$$t_P = \frac{|\bar{X}_A - \bar{X}_B|}{\sqrt{n_A \cdot \sigma_A^2 + n_B \cdot \sigma_B^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_A \cdot n_B (n_A + n_B - 2)}{n_A + n_B}}.$$

Если одна из выборок имеет очень большой объём, например $n_A = \infty$, то этом случае

$$t'_P = \frac{|\bar{X}_A - \bar{X}_B|}{\sigma}.$$

Число степеней свободы, используемого для определения табличного значения t_m ,

$$v = n_a + n_B - 2$$

В этом случае число степеней свободы определяемой по формуле:

$$\frac{t}{v} = \frac{d^2}{n_a - 1} + \frac{(1 - d)^2}{n_B - 1},$$

$$\text{где } c = \frac{\frac{\sigma_a^2}{n_a}}{\frac{\sigma_a^2}{n_a} + \frac{\sigma_b^2}{n_b}}.$$

Если сравнению подвергаются не две, а большее число выборок, связанных между собой и образующих пары, то критерий достоверности различных средних значений:

$$t''_P = \frac{\bar{d}}{S_d},$$

где \bar{d} – усредненная разность среднеарифметических значений.

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n \cdot (n - 1)}}$$

где S_d – ошибка средней разности; d – разность среднеквадратических значений внутри пар; n – число независимых, попарно связанных наблюдений (число МИС, где испытывались две жатки; число сезонных испытаний; число агрофонов для сравнительных испытаний двух жаток и т.д.)

Число степеней свободы, используемых для определения табличного значения $t_m: v = n - 1$. Гипотеза о равенстве средних принимается, если

$$t_p < t_p; t'_p < t_p \text{ или } t''_p < t_p$$

Если изучаемые признаки имеют закон распределения, существенно отличающихся от нормального, то используют критерии независимые от характера распределения, т.е. непараметрические критерии. В этом случае однородность выборок оценивается равенством характеристик положений и рассеяния конкретного признака. Для решения задачи используются методы квартилей или медиан. При сравнении выборок с попарно не связанными вариантами замеров применяют критерии «Вандер–Вардена» (λ – критерий или «Уайта» (T – критерий)). Для сравнения выборок с попарно вариантами используется « W – критерий Вилкоксона» (критерий знаков).

В процессе изучения явлений устанавливаются взаимосвязи между факторами, определяющими явление. Указанная связь устанавливается с помощью корреляционного анализа.

К изучению связи методом корреляции обращается в том случае, когда нельзя изолировать влияние посторонних факторов, либо потому, что они неизвестны, либо из-за невозможности их изоляции.

Поэтому метод корреляции применяется для того, чтобы при сложном взаимодействии посторонних влияний выяснить, какова бы была зависимость между результатом и факторами, если бы посторонние факторы не изменялись и своим изменением не искажали бы основную зависимость.

При этом число наблюдений должно быть достаточно велико, так как малое число наблюдений не позволяет обнаружить закономерность связей.

Первая задача корреляции заключается в выявлении на основе значительного числа наблюдений того, как меняется в среднем ре-

зультативный признак в связи с изменением одного или нескольких факторов. Это изменение предполагает условие неизменности ряда других факторов, хотя искажающие влияние последних на самом деле есть.

Вторая задача – определение различных показателей тесноты связей между факторами, определяющими явление (процесс).

Первая задача решается определением уровня регрессии и носит название регрессионного анализа.

Вторая задача является корреляционным анализом. Корреляционный анализ количественно оценивает связь между двумя или несколькими взаимодействующими явлениями.

Его применение позволяет определить наличие и силу связи между явлениями.

Регрессионный анализ дает возможность установить, как в среднем изменяется результативный признак под влиянием одного или нескольких факторных признаков.

Теоретически обоснованной мерой тесноты связи между двумя статически связанными признаками служит линейный коэффициент корреляции (γ). Он может принимать как положительные, так отрицательные значения.

Положительное значение указывает на прямую связь между признаками, отрицательное – на обратную связь между ними.

Линейный коэффициент корреляции для парной таблицы связей исчисляется по формуле:

$$\gamma = \frac{\bar{x}\bar{y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\delta_x \cdot \delta_y}; \quad \bar{x}\bar{y} = \frac{\sum x \cdot y}{n}; \quad \bar{x} = \frac{\sum x}{n}; \quad \bar{y} = \frac{\sum y}{n}$$
$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n} - \bar{x}^2}; \quad \delta_y = \sqrt{\frac{\sum y^2}{n} - \bar{y}^2}$$

Если $\bar{x}\bar{y} > \bar{x} \cdot \bar{y}$, то δ положителен, если $\bar{x}\bar{y} < \bar{x} \cdot \bar{y}$, то δ отрицателен.

Квадрат коэффициента корреляции называется коэффициентом детерминации.

Линейный коэффициент корреляции можно вычислить и по другим формулам:

$$\gamma = \frac{n \cdot \sum y \cdot x - \sum x \cdot \sum y}{\sqrt{[n \cdot \sum y^2 - (\sum y)^2] \cdot [n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2]}}$$

Часто применяется формула, основанная на расчетах отклонений от средней

$$\gamma = \frac{\sum (x - \bar{x}) \cdot (y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2 \cdot (y - \bar{y})^2}$$

Полученный при расчетах линейный коэффициент корреляции имеет ошибку, которая вычисляется по формуле:

$$\delta_\gamma = \frac{1 - \gamma^2}{\sqrt{n - 1}}$$

При этом предполагается, что число наблюдений, по которым велись расчеты, является лишь выборкой из общего числа наблюдений “генеральной совокупности”, а вычисленный коэффициент корреляции – только положительная оценка того истинного коэффициента, который характерен для нее. Поэтому вместо единственной оценки этого “истинного коэффициента” корреляции строится доверительный интервал, в котором он находится. Доверительный интервал определяется по формуле:

$$\gamma - t \cdot \delta_\gamma \leq \delta + t \cdot \delta_\gamma$$

где δ_γ – средняя квадратическая ошибка “выборочного” коэффициента корреляции; t – доверительная величина, определяющая степень вероятности утверждения.

25 Сущность метода ранговой корреляции при проведении испытаний и исследовании машин

Сформулировав цель исследования и уяснив задачи проведения эксперимента, приступают к обработке информации. При этом источниками информации исследования могут быть:

–литературные данные; научные труды, журнальные статьи, технические отчеты; протоколы технологических и других советов и т.д.;

–опыт и значение специалистов в области износостойкости и надежности узлов трения;

–экспериментальный материал;

При изучении сложных процессов работы сельскохозяйственных машин на первом этапе исследования целесообразно выделить наиболее существенные факторы из большого числа независимых пе-

ременных. Это позволит резко сократить объем экспериментальных работ.

Для выявления степени влияния факторов могут быть исследованы следующие методы отсеивающего эксперимента:

–метод ранговой коррекции, основанный на опросе специалистов – экспертов, обработке литературных данных и объективной статической обработке результатов;

–метод случайного баланса, позволяющий использовать сверхнасыщенные планы эксперимента, в которых число опытов меньше числа исследуемых факторов.

Метод ранговой коррекции основан на том, что кругу специалистов одной или нескольких научных школ предлагают расположить потенциально возможные фактора, действующие на изучаемый процесс в порядке убывания степени их влияния на выбранные параметры оптимизации.

Для этого используют анкеты опроса, в которых указаны наименования факторов, их различность, область определения параметр оптимизации. Каждый из опрашиваемых специалистов указывает ранг факторов, отмеченных в анкете, при чем экспертом могут быть дополнительные факторы, и если он считает предлагаемый ему список факторов не полный. На основании заполненных экспертами анкет составляется матрица рангов (сводная анкета для априорного ранжирования факторов) (таблица 25.1).

Таблица 25.1 – Матрица рангов

Специалисты (эксперты)	факторы						Суммы
	X_1	X_2	....	X_i	....	X_k
1	a_{11}	a_{21}	a_{i1}	a_{k1}	
2	a_{12}	a_{22}	....	a_{i2}	....	a_{k2}
....	
J	a_{1j}	a_{2j}	....	a_{ij}	....	a_{kj}
....	
M	a_{1m}	a_{2m}	....	a_{im}	....	a_{km}
Сумма рангов $\sum_{j=1}^m a_{ij}$	$\sum_{j=1}^m a_{1j}$	$\sum_{j=1}^m a_{2j}$	$\sum_{j=1}^m a_{ij}$	$\sum_{j=1}^m a_{kj}$		$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}}{k}$

Отклонения от средней суммы рангов $\Delta_i = \sum_{j=1}^m (a_{ij} - \bar{a})$	Δ_1	Δ_2	....	Δ_i	....	Δ_k	
Квадрат отклонений	Δ_1^2	Δ_2^2	....	Δ_i^2	....	Δ_k^2	$S = \sum_{i=1}^k \Delta_i^2$

В формулах: i – номер фактора $i = 1, 2, \dots, k$, j – номер эксперта $j = 1, 2, \dots, m$. Порядок расчета суммы рангов по столбцам $\sum_{j=1}^m a_{ij}$; средней суммы рангов \bar{a} ; отклонений от средней суммы рангов Δ_i , квадрата отклонений Δ_i^2 ; и их суммы S представлены в таблице.

При ранжированной оценке результатов опроса специалисты расходятся во мнениях по решению рассматриваемой задачи. Для статической оценки степени согласованности мнений специалистов, можно использовать дисперсионный коэффициент конкордации.

Для расчета оценки дисперсии можно использовать формулу:

$$S^2 = \frac{1}{k-1} \cdot \sum_{i=1}^k (a_i - \bar{a})^2,$$

где $a_i = \sum_{j=1}^m a_{ij}$, $\bar{a} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k a_i$

где k – число факторов.

Тогда коэффициент конкордации можно определить как отношение дисперсии, полученной в результате реализации опроса специалистов, к максимальному её значению:

$$W = \frac{S^2}{S_{\max}^2}.$$

Так как S может изменяться от нуля до S_{\max}^2 , то коэффициент конкордации W принимает значение от нуля до 1, т. е. $0 \leq W \leq 1$.

Максимальное значение дисперсии S_{\max}^2 будет соответствовать полному совпадению мнений специалистов и равно:

$$S_{\max}^2 = \frac{m^2 \cdot (k^3 - k)^2}{12 \cdot (k - 1)},$$

где m – число специалистов. Используя значение квадрата отклонений от средней суммы рангов можно записать оценку дисперсией.

$$S^2 = \frac{1}{k - 1} \cdot S.$$

Подставляя значения S_{\max}^2 и S^2 в формулу после соответствующих преобразований получим выражение для расчета коэффициента конкордации для случая отсутствия связанных рангов:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (k^3 - k)}.$$

Если эксперт затрудняется указать ранги двум или нескольким факторам, то им присваивают один и тот же номер, т.е. вводятся так называемые связанные ранги.

Для случая связанных рангов коэффициент конкордации определяют по формуле:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (k^3 - k) - m \cdot \sum_{i=1}^m T_{ij}},$$

где $T_{ij} = \sum_{q=1}^Q (t_{jq}^3 - t_{iq})$, t_j – число одинаковых рангов в j – м ранжировании.

Суммы T_j подсчитывают для тех специалистов, которые представили связанные ранги. Так уже указывалось, коэффициент конкордации меняется от 0 до +1. При полном согласии мнений специалистов $W = 1$, а при отсутствии его $W = 0$. Для оценки значимости коэффициента конкордации можно использовать различные статические критерии.

При числе исследуемых факторов более 7 значимость коэффициента конкордации оценивают по критерию χ^2 .

$$\chi^2 = m \cdot (k - 1) \cdot W = \frac{12 \cdot S}{m \cdot k \cdot (k + 1)}.$$

Величина $m \cdot (k - 1)$ имеет распределение χ^2 с числом степеней свободы $f = k - 1$. При наличии связанных рангов критерий χ^2 рассчитывают по формуле:

$$x_p^2 = \frac{12 \cdot S}{m \cdot k \cdot (k+1) - \frac{1}{k-1} \cdot \sum_{j=1}^m T_j}.$$

Полученное значение x^2 сравнивают с табличным при выбранном уровне значимости и числе степеней свободы $j = k - l$. Если вычисленное значение $x_0^2 >$ табулированного $x_{табл}^2$ табл, т.е. $x_p^2 > x_{табл}^2$ то можно утверждать, что согласованность специалистов не является случайной. После ранжирования в ряд отбирают наиболее значимые факторы для дальнейшего экспериментирования с ними, а остальные относят к тупиковому полю и учитывают в виде ошибки эксперимента. Полученные результаты опросов специалистов позволяют позволить диаграмму рангов. Для этого по оси абсцисс откладывают факторы в порядке убывания их значимости, а по оси ординат – суммы рангов соответствующих факторов. С помощью полученной диаграммы производится оценка значимости факторов. В случае неравномерного убывания диаграммы отбирают лишь небольшую часть «главных факторов», а остальных из дальнейшего исследования. Если получается диаграмма с монотонным убыванием, то в дальнейшем исследование следует включать как можно больше число первых факторов.

Процедура проведения анализа методом ранговой корреляции состоит в следующем:

1. Проводится опрос и анкетирование факторов намеченных по априорной информации.
2. Статическая обработка анкет и составление матриц рангов.
3. Оценка согласованности мнений специалистов.
4. Построение диаграмм рангов.
5. Анализ диаграмм рангов за исключением незначительных факторов.

26 Дисперсионный анализ результатов испытаний. Последовательность проведения дисперсионного анализа

26.1 Дисперсионный анализ результатов испытаний

С помощью дисперсионного анализа изучается степень влияния одного или нескольких факторных признаков на результативный при-

знак, т. е. решается задача аналогичная корреляционному анализу, отличий дисперсионного анализа состоит в том, что в ходе его изучается колеблемость лишь одного признака результативного, а простейшим показателем колеблемости служит дисперсия, которая, как известно из правила сложения дисперсий может быть разложена межгрупповую и внутригрупповую.

Межгрупповая дисперсия возникает под действием какого-либо фактора, который приводит к разным величинам средних, имеющих в отдельных группах и отражает колеблемость этих средних. Внутригрупповая дисперсия возникает под действием прочих факторов, которые можно назвать случайными; она отражает среднюю колеблемость внутри групп. При разложении общей дисперсии на две ее составляющих можно выделить ту часть, которая обусловлена действием одного затем другого, третьего и т.д. факторов в общей дисперсии, т.е. получить возможность измерять их действие. Изучение влияния факторов по их дисперсиям называется дисперсионным анализом. Здесь измерение влияния факторов ведется с помощью дисперсий. При этом нужно различать дисперсию как сумму квадратов отклонений всех вариантов от средней и дисперсию на одну степень свободы, когда эта сумма делится на число степеней свободы.

Общая дисперсия (дисперсия всего комплекса) признака представляет собой просто сумму квадратов отклонений всех вариантов результативного признака от общей его средней:

$$D_Y^2 = \sum (y_i - \bar{y})^2,$$

где y_i – отдельные значения результативного признака; \bar{y} – их общая средняя, средняя комплекса.

Общая дисперсия всегда больше дисперсии, показывающие влияние изучаемых факторов, поскольку в одном исследовании невозможно освободиться от действия многих других факторов, влияющих на результативный признак. При разложении общей дисперсии (дисперсии комплекса) выделяется факторная дисперсия, идентичная межгрупповой и случайной или остаточной, дисперсией, вызванная не учитываемыми в данном опыте факторами, идентичная внутригрупповой.

Факторная дисперсия – это сумма квадратов отклонений частных (групповых) средних от общей средней, умноженных на число единиц в каждой группе (n_x):

$$D_X^2 = \sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \cdot n_x,$$

где \bar{y}_i – частные (групповые) средние.

Случайная дисперсия – это сумма групповых сумм квадратов отклонений всех вариантов результативного признака в них:

$$D_Z^2 = \sum \sum (y_i - \bar{y}_i)^2,$$

при этом $D_Y^2 = D_X^2 + D_Z^2$.

В дисперсионном анализе используются свойства сумм квадратов отклонений от средней арифметической, состоящее в том, что при действии различных факторов на результативный признак сумма факторных дисперсий, измеряющая колеблемость под влиянием отдельных факторов, равна общей дисперсии, характеризующей колеблемость под влиянием их комплексов:

$$D_A^2 + D_B^2 + D_C^2 + \dots = D_Y^2,$$

где $D_A^2, D_B^2, D_C^2, \dots$ – дисперсии под воздействием факторов А, В, С и т.д.

Отношение факторной дисперсии к общей показывает долю колеблемости, под воздействием изучаемого фактора в общей колеблемости.

Эти отношения называются корреляционным и показывает степень статического влияния данных факторов на результативный признак:

$$\eta_x^2 = \frac{D_X^2}{D_Y^2}; \quad \eta_x = \sqrt{\frac{D_X^2}{D_Y^2}}; \quad \eta_z^2 = \frac{D_Z^2}{D_Y^2}; \quad \eta_z = \sqrt{\frac{D_Z^2}{D_Y^2}},$$

где η_x^2 – показывает влияние факторов η_z^2 – влияние случайных причин.

$$\text{Причем } \eta_x^2 + \eta_z^2 = 1$$

Дисперсия как показатель колеблемости зависит от числа единиц в группе. Для определения степени влияния факторов, найденных по выборочным данным, нужен показатель, свободный от подобного влияния и позволяющий сравнивать группы с разной численностью. Такими показателями служат дисперсии, вычисляемые на одну степень свободы вариации: дисперсия на одну степень свободы по комплексу:

$$\sigma_Y^2 = \frac{D_Y^2}{K_Y} = \frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}{K_Y};$$

факторная дисперсия на одну степень свободы:

$$\sigma_X^2 = \frac{D_X^2}{K_X} = \frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}{K_X};$$

случайная дисперсия на одну степень свободы:

$$\sigma_Z^2 = \frac{D_Z^2}{K_Z} = \frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}{K_Z},$$

где K_Y – число степеней свободы по комплексу;

$K_Y = n - 1$ число наблюдений в комплексе, без 1; K_X – число степеней свободы для факторной дисперсии; $K_X = \delta - 1$ – число групп без 1; K_Z – число степеней свободы случайной дисперсии; $K_Z = n - \delta$.

При этом $K_Y = K_X + K_Z$.

Дисперсия на одну степень свободы позволяет определить достоверность вывода, сделанного по выборочному обследованию, для чего исчисляется отношение факторной дисперсии к случайной F , каждая из которых рассчитана на одну степень свободы, т.е. $\sigma_X^2 : \sigma_Z^2$.

Если F равно или больше стандартной величины, которая определяется с разной степенью вероятности по таблицам математической статистики, то вывод на основании корреляционного отношения достоверен. F табличное, в свою очередь зависит от числа степеней свободы, большей и меньшей из факторной и случайной дисперсий.

В дисперсном анализе при изучении влияния одного фактора решается однофакторный комплекс, при изучении влияния двух факторов – двухфакторный комплекс и т.д.

26.2 Последовательность проведения дисперсионного анализа

Последовательность проведения дисперсионного анализа состоит в следующем:

1. Находят общую дисперсию комплекса.
2. Определяют факторную дисперсию.
3. Вычисляют корреляционное отношение, показывающего степень статистического влияния фактора (факторов).

4. Находим случайную дисперсию.
5. Проверяют равенство суммы факторной и случайной дисперсии:

$$D_Y^2 = D_X^2 + D_Z^2.$$

6. Определяют число степеней свобода вариаций для дисперсии комплекса, факторной и случайной дисперсии (проследить, что бы $K_Y = K_X + K_Z$)

7. Производят вычисления этих дисперсий расчете на одну степень свободы.

8. Рассчитывают величину F (критерия Фишера).

9. Определить табличное значение (по таблицам).

10. Производят сравнение расчетных и табличных значений F . Делают выводы о достоверности заключения о влиянии факторов. При этом необходимо, чтобы при данных числах степеней свободы K_X и K_Z при заданной вероятности того, что различные вычисленных дисперсий неслучайно; отношение вычисленных дисперсий $\sigma_X^2 : \sigma_Z^2$ было равно или больше такого же отношения, найденного по таблицам.

При решении двух – трех факторных комплексов D_X^2 представляет собой дисперсию суммарным действия для изучаемых факторов. Она различается на частные факторные дисперсии и дисперсии по сочетанию факторов. Если дисперсия по отдельным фактором получается как сумма квадратов отношений частных средних от общей средней, взвешенных по численностям групп, то дисперсию по сочетанию факторов можно рассчитать как разность между факторной дисперсией и суммой частных дисперсий. Например, при изучении действия двух факторов А и В получим:

$$D_A^2 = \sum (\bar{y}_A - \bar{y})^2 \cdot n_A; D_B^2 = \sum (\bar{y}_B - \bar{y})^2 \cdot n_B;$$

$$D_{AB}^2 = D_X^2 - D_A^2 - D_B^2.$$

Величина D_X^2 находится как сумма квадратов отклонений средних групп, выделенных по всем факторам, от общей средней:

$$D_X^2 = \sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \cdot n_x.$$

Действие каждого фактора определяется корреляционным отношением:

$$\eta_A = \sqrt{\frac{D_A^2}{D_Y^2}}; \eta_B = \sqrt{\frac{D_B^2}{D_Y^2}}; \eta_{AB} = \sqrt{\frac{D_{AB}^2}{D_Y^2}}.$$

Дисперсионный анализ позволяет определить также достоверность вывода о действии каждого фактора по отношению на одну степень свободы по всему комплексу и сравнению этого отношения с табличным по описанной схеме.

27 Метод случайного баланса. Порядок проведения исследования методом случайного баланса

27.1 Метод случайного баланса

Суть метода заключается в том, что если факторы расположить в порядке убывания их доли, вносимой в дисперсию критерия оптимизации, то получится ранжированный ряд вида убывающей экспоненты. Наибольшим числом опытов воспроизводят этот ряд и при помощи регрессионного анализа оценивают наиболее значимые эффекты факторов на шумовом поле, создаваемом несущественными факторами.

Построение ранжированного ряда производится в две стадии. Вначале проводят серию опытов по специально составленной матрице, а затем строят диаграммы рассеяния для визуальной оценки степени влияния того или иного фактора и оценивают его количественно.

Наиболее распространенным методом построения матрицы отсеивающих экспериментов является метод случайного баланса. Идея этого метода заключается в том, что вместо небольшой выборки систематической матрицы полного факторного эксперимента берут случайные выборки из него. Построение матрицы случайного баланса осуществляется двумя путями: при помощи таблицы случайных чисел распределяют уровни факторов по столбцам матрицы случайным образом, или же матрицу составляют случайным смешиванием двух полу реплик.

Первый метод считается менее эффективным и используется тогда, когда число уравнений варьирования факторов больше двух.

Прежде чем строить матрицу отсеивающих экспериментов следует назначить уровни варьирования факторами и закодировать их

знаками (+) и (-). Уровни варьирования следует выбирать с учетом центра эксперимента.

При построении матрицы отсеивающих экспериментов методом случайного смешивания двух полу реплик рассматриваемые факторы делятся на две части (не обязательно равные) и из каждой половины строится полу реплика. Для одной половины факторов полу реплика используется полностью, а для других факторов строки матрицы распределяются случайным образом (по таблице случайных чисел). При этом в первую половину следует поместить те факторы, которые по априорной информации являются наиболее существенными. Это может сократить объем экспериментов в последующей стадии решения экстремальной задачи (при крутом восхождении), так как если мало существенные факторы (из второй половины факторов) будут отсеяны, то результаты отсеивающих экспериментов могут быть использованы и при крутом восхождении. Число опытов (строк) в матрице отсеивающих экспериментов следует выбирать таким образом, чтобы оно было кратным $2n$, и превышало бы число $n+1$, если n – число факторов. Это условие значительно облегчит обработку и улучшит анализ результатов опытов. Построение матрицы на конкретном примере изложено в литературе.

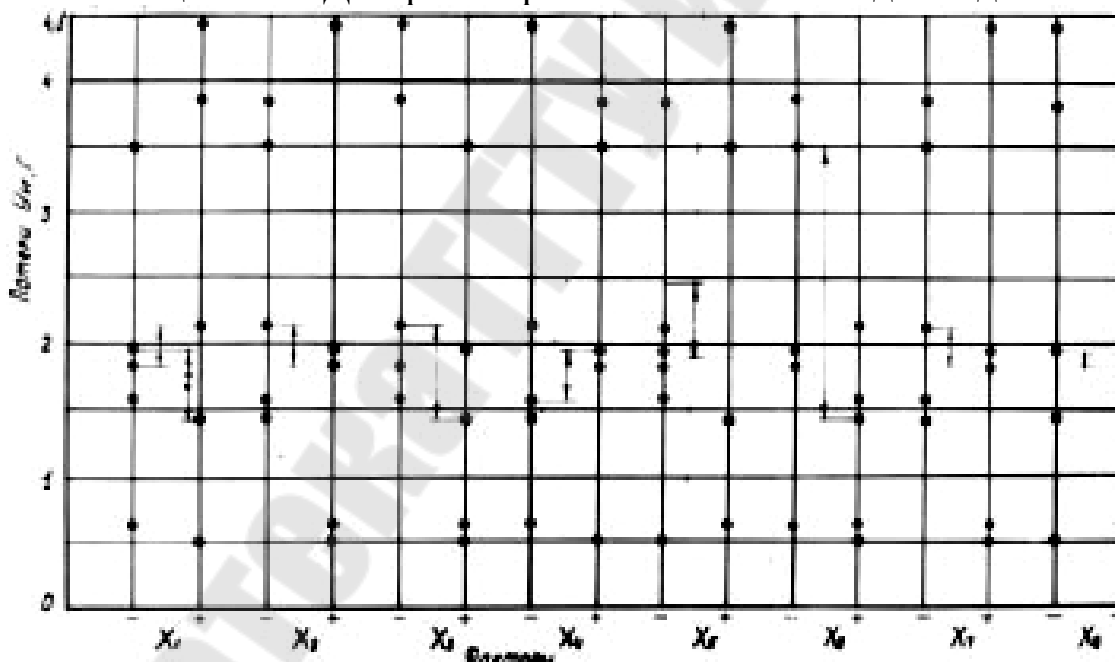
27.2 Порядок проведения исследования методом случайного баланса

Порядок проведения исследования методом случайного баланса состоит в следующем: Определяют факторы участвующие в экспериментах и их уровни. Строят матрицу отсеивающего эксперимента (таблица 27.1). Проводят эксперимент и записывают значения критерия оптимизации по строке. В таблицу вписывают среднее значение критерия оптимизации, полученные в том или ином опыте. Повторности опытов вписывают в дополнительные столбцы (таблица 27.1). Для анализа результатов исследования строят диаграммы рассеивания [13]. Для этого по оси абсцисс наносят все факторы с их уровнями (таблица 27.2).

Таблица 27.1 – Матрица отсеивающего эксперимента

№	Факторы								Значение критерия оптимизации, (г)			
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	У	У1	У2	У3
1	+	+	+	+	+	+	+	+	4,5	,495	2,428	34,345
2	+	+	+	+	+	+	+	+	0,5	1,578	3,583	3,443
3	-	-	-	-	-	-	-	-	0,65	2,733	3,52	3,251
4	-	-	-	-	-	-	-	-	3,52	3,52	2,915	3,504
5	+	+	+	+	+	+	+	+	3,92	2,915	2,528	3,441
6	+	+	+	+	+	+	+	+	1,45	2,528	3,683	2,915
7	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6	3,683	2,7	2,449
8	-	-	-	-	-	-	-	-	1,85	1,85	3,228	3,683
9	+	+	+	+	+	+	+	+	2,15	3,228	2,81	2,7
10	-	-	-	-	-	-	-	-	1,96	1,96		3,228
												3,633

Таблица 27.2 – Диаграмма рассеивания по исходным данным



Анализ степенных влияния факторов оценивают визуально по разности значений медиан и по числу точек выделяющихся на шумовом поле диаграммы. Оценка эффектов факторов количественно. Оценка эффектов производится с помощью таблиц с двумя входами факторов. Величина эффектов факторов подсчитывается по формуле:

$$X_t = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_3 + \bar{y}_5 + \dots + \dots \bar{y}_n)}{k_t} - \frac{(\bar{y}_2 + \bar{y}_4 + \bar{y}_6 + \dots + \dots \bar{y}_{n+2})}{k_t},$$

где $\bar{y}_1, \bar{y}_3, \bar{y}_n$ – среднее значение критерия оптимизации в каждой клетке для уравнения факторов (+); $\bar{y}_2, \bar{y}_4, \bar{y}_{n+1}$ – среднее значение критерия оптимизации для уровня факторов (-); k_i – число средних значений критерия оптимизации.

Проверка значимости факторов по t – критерию Стьюдента для каждого фактора по формуле:

$$t = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_1 + \dots + \bar{y}_n) + (\bar{y}_2 + \bar{y}_4 + \dots + \bar{y}_{n+1})}{S_R \cdot \sqrt{\sum \frac{1}{n_i}}},$$

где S_R – среднеквадратичная ошибка, характеризующая рассеяние относительно средних в клетках таблицы с несколькими входами.

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n-1} - \frac{(\sum \bar{y})^2}{n_i \cdot (n_i - 1)}},$$

где n – число наблюдений в i –й клетке таблицы с несколькими входами.

Проведение первой корректировки результатов экспериментов путем прибавления с обратным знаком значений эффектов $X_1 : X_6$ ко всем значениям критерия оптимизации, находящихся на уровнях $+ X_1$ и $+ X_6$. Получение значения критерия оптимизации \bar{y}_1 .

Последующее построение диаграммы рассеивания и выделение точек, относящихся к эффектам X_2 и X_7 . Количественная оценка эффектов факторов аналогично предыдущей оценки.

Вычисление эффектов факторов X_2, X_7 аналогично пункту 4 с последующим подсчетом значимости факторов по t – критерию Стьюдента для каждого фактора аналогично пункту 5.

Проведение второй корректировки со снятием действия эффектов X_2 и X_7 путем прибавления с обратным знаком значения эффектов факторов ко всем значениям критерия оптимизации, находящимся на высшем уровне и получения значения критерия \bar{y}_2 .

Построение диаграммы рассеяния и последующее выделение факторов X_3 и X_4 в аналогичной последовательности согласно пунктам 7; 8;9.

Проведение третьей корректировки с получением критерия оптимизации \bar{y}_3 и последующей процедурой определения t – критерия Стьюдента.

Занесение результатов количественной оценки выделенных факторов в таблицу и определением значимости факторов на уровне 0,05 и 0,1.

Построение точечной диаграммы распределения результатов наблюдений (рисунок 27.1). Построение гистограммы ранжированного ряда эффектов факторов в порядке их значимости (рисунок 27.2)

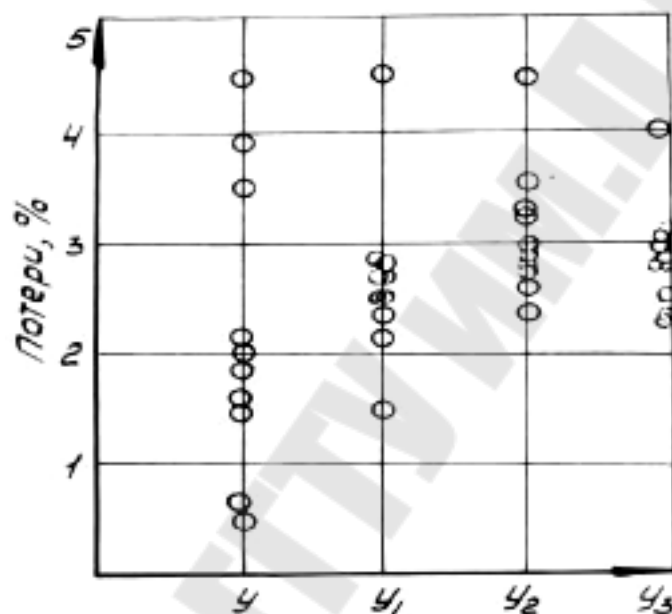


Рисунок 27.1 – Точечная диаграмма распределения результатов наблюдений при изучении процесса разделения стеблей колебательным делителем

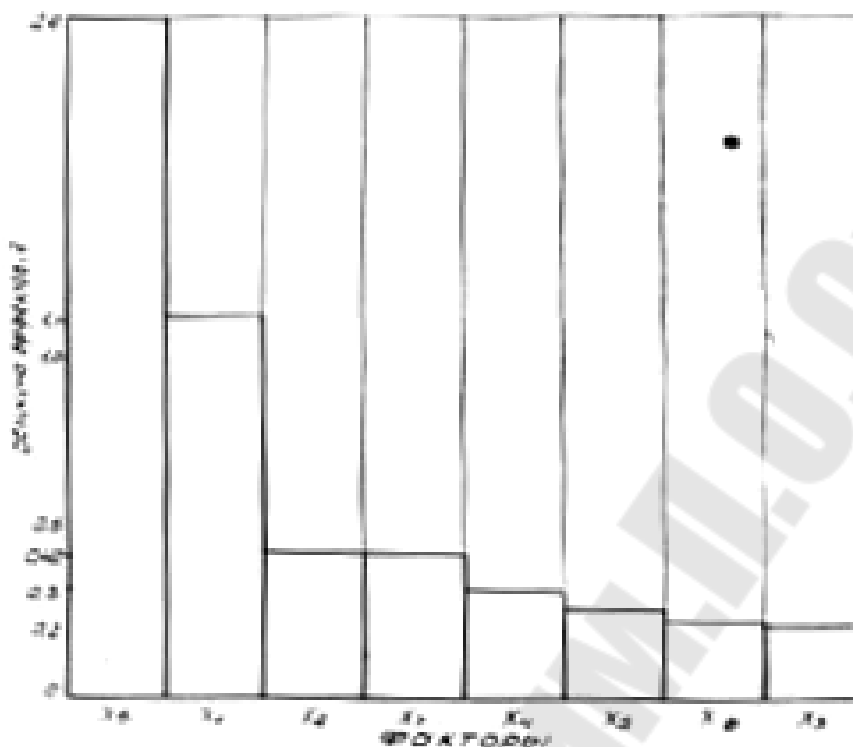


Рисунок 27.2 – Гистограмма распределения эффектов факторов в порядке значимости

28 Полный факторный эксперимент. Алгоритм эксперимента

28.1 Полный факторный эксперимент

При рассмотрении каждой физической системы (в нашем случае объекта исследования) можно различать входные воздействия, влияющие на систему, и соответствующие реакции системы.

Параметры воздействия на систему называют факторами или входом «черного ящика».

Реакцию системы на внешнее воздействие называют откликом, параметром или критерием оптимизации (при решении экстремальных задач) или выходом «черного ящика».

Многофакторный эксперимент имеет ряд преимуществ, из которых наиболее существенны следующие:

1. Значительно сокращается число опытов по сравнению с традиционным методом, где последовательно изучается действие каждого фактора.

2. Сокращается время на проведение опытов и затраты материально – технических средств.

3. Увеличивается емкость информации от эксперимента за счет получения данных о роли взаимодействия различных факторов.

При применении факторного анализа в теории планирования эксперимента различают:

Интерполяционные задачи: установление количественных связей между факторами воздействия и откликом системы.

Экстремальные задачи: установление значения воздействующих факторов исследуемой системы, при которых параметр оптимизации достигает экстремальных значений.

В теории планирования экспериментов математической моделью объекта исследования («черного ящика») является функция отклика связывающая реакцию – отклик системы (y) с факторами x_1, x_2, x_3 :

$$y = \Phi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

или

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i x_j,$$

где b_i, b_{ij} – коэффициенты регрессии.

Функция отклика должна обладать следующими свойствами:

Функция должна быть непрерывной, включая и первую производную.

Должны выполняться следующие требования регрессионного анализа:

Функция отклика – независима случайная величины, имеющая нормальный закон распределения.

Дисперсия « y » не зависит от значений x_1, x_2, x_3 , т.е. для разных опытов дисперсии « y » однородны.

Все факторы x_1, x_2, x_3, \dots суть не случайные величины.

В качестве функции отклика выбирают наиболее характерную физическую величину (параметр оптимизации), которая характеризует наилучшим образом объект исследования. Каждая система характеризуется полно несколькими параметрами. По этому, выбирая в качестве функции отклика наиболее характерный параметр оптимизации остальные принимают только как ограничивающие условия. При выборе параметра оптимизации помогает учет следующих свойств:

Параметр оптимизации должен быть по возможности универсальным.

Параметр оптимизации должен быть статически эффективным, т.е. иметь наименьшую при данных условиях дисперсию.

Параметр оптимизации должен выражаться численно.

Факторы оптимизации могут быть количественными и качественными. Каждое возможное значение фактора называют уровнем фактора. При факторном анализе рекомендуется факторы брать только на двух уровнях, достаточно удаленных между собой. Число факторов (n) может быть не более 15. Чем меньше число факторов, тем проще решается задача. Число опытов $N = 2^n$.

Факторы должны отвечать следующим требованиям:

Факторы должны быть управляемы.

Факторы должны быть однозначны.

Факторы должны быть совместимы.

Факторы должны быть независимы.

Точность замеров уровней факторов должны быть выше точности фиксирования значений параметра оптимизации.

Изменение отклика системы при изменении уровня фактора называют эффектом фактора. Эффекторы каждого из факторов x_i называют основными. Взаимодействие факторов $x_i x_j$ между собой может давать в некоторых случаях так же существенный эффект. В линейной модели взаимодействия факторов не дает эффекта, т.е. взаимодействие факторов не значимо.

Возможные взаимодействия факторов в факторном эксперименте типа 2^n приведены ниже в таблице 1.

Эффекты основных факторов рассматриваются как взаимодействие нулевого порядка, парные взаимодействия ($x_1 x_2, x_1 x_3, x_2 x_3$ и др.) первого порядка, тройные ($x_1 x_2 x_3, x_1 x_2 x_4$ и т.д.) – второго порядка и т.д.

Взаимодействия высокого порядка, начиная с третьего, в большинстве случаев бывают незначительны.

Если в эксперименте реализуются все возможные сочетания уровней факторов, то такой эксперимент называют полным факторным экспериментом (ПФЭ). ПФЭ характеризуется матрицей планирования.

В матрице планирования верхний уровень факторов обозначают знаком плюс а нижний знаком минус.

Таблица 28.1 – Структура эффектов факторного эксперимента

n	2^n	Число основных эффектов	Число взаимодействий порядка					
			1-го	2-го	3-го	4-го	5-го	6-го
1	2	1	–	–	–	–	–	–
2	4	2	1	–	–	–	–	–
3	8	3	3	1	–	–	–	–
4	16	4	6	3	1	–	–	–
5	32	5	10	10	5	1	–	–
6	64	6	15	15	15	6	1	–
7	128	7	21	35	35	21	7	1

Рандомизация опытов

Для исключения влияния систематических ошибок, вызванных внешними условиями и осуществления различных опытов в одинаковых условиях, необходимо проводить рандомизацию опытов. Это позволит усреднить влияние эффектов неконтролируемых факторов и сравнить результаты подобных опытов. Под рандомизацией понимается чередование отдельных опытов или групп опытов в случайном порядке (от английского *random* – случайный). Рандомизация проводится с помощью таблиц случайных чисел.

28.2 Алгоритм эксперимента

1. Выбор параметра оптимизации.
2. Выбор факторов, воздействующих на объект исследования.
3. Кодирования факторов и выбор интервалов их варьирования. Разность между верхним (нижним) и нулевым уровнем фактора называют интервалом варьирования.
4. Определение числа повторностей опытов.
5. Рандомизация опытов.
6. Составление матрицы планирования.
7. Проведение эксперимента.
8. Расчет коэффициентов регрессии математической модели объекта исследования, представляемой в виде линейного или нелинейного уравнения регрессии. Следует отметить, что если в уравнении регрессии раскодировать значение факторов, то после подставки

числовых значений коэффициентов получается физическое значение параметра отклика.

9. Оценка рассеивания результатов опытов и определение дисперсии параметра оптимизации.

10. Проверка однородности дисперсии с помощью критерия Кохрена. Однородность дисперсий показывает, что рассеяние результатов одного порядка. Если $Sing(G - G_{табл}) < 0$, то дисперсия однородна и можно продолжать дальнейшие вычисления. Если $Sing(G - G_{табл}) > 0$ то дисперсия неоднородна и матрица планирования не может быть принята. В этом случае необходимо изменять масштаб для параметра оптимизации за счет введения функции от параметра оптимизации в виде квадратного корня или логарифма. $G_{табл}$, определяется по таблицам математической статистики.

11. Проверка адекватности модели (проверка пригодности уравнения регрессии для описания исследуемого процесса) с помощью оценки дисперсии адекватности по F критерию Фишера. Если $Sing(F_{табл} - F) > 0$, то модель адекватна. Если $Sing(F_{табл} - F) < 0$, то модель неадекватна. $F_{табл}$, определяется по таблицам математической статистики.

12. Проверка значимости коэффициентов регрессий с помощью критерия Стьюдента. Значимость коэффициентов регрессии показывает, что абсолютная величина этого коэффициента больше его доверительных интервалов. Если $Sing(t - t_{табл}) > 0$, то соответствующий коэффициент значим. Если $Sing(t - t_{табл}) < 0$ то соответствующий коэффициент незначим. $t_{табл}$, определяется по приложению. Если все b_{ij} незначимы, то справедливо линейная модель уравнения регрессии, если же какой то их коэффициентов b_{ij} значим, то уравнение регрессий не линейно.

29 Дробный факторный эксперимент. Алгоритм эксперимента

29.1 Дробный факторный эксперимент

В полном факторном эксперименте количество опытов превосходит значительное число определяемых коэффициентов регрессии в

уравнении. Поэтому для сокращения числа опытов возможно применение дробного факторного эксперимента (ДФЭ), при котором существенно сокращается объем матрицы планирования в сравнении с матрицей ПФЭ. Для этого используют незначимые взаимодействия факторов. Незначимое взаимодействие факторов можно заменить новым фактором в многофакторном эксперименте, который дает прибавку к отклику системы. Новому фактору присваивается вектор – столбец матрицы, принадлежащий взаимодействию, которым можно пренебречь. Значение нового фактора в условиях опытов определяется знаком этого столбца.

В некоторых случаях ДФЭ приносит эффект в связи с возможностью увеличения числа повторностей, а не сокращения числа опытов.

При этом следует ожидать увеличение точности эксперимента.

Например: вместо четырехфакторного ПФЭ при трех повторностях, что дает $3 \cdot 2^4 = 48$ реакцией опытов. При тех же 48 реализациях опытов ДФЭ получим шесть повторностей, т.к. $6 \cdot 2^{4-1} = 48$.

Специальная оценка показывает, что значение полученных коэффициентов регрессии при ДФЭ остаются достаточно точными для большинства практических задач.

Эксперимент, оставляющий по объему только часть ПФЭ, называют дробной репликой от ПФЭ. Целесообразность применения дробных реплик возрастает с ростом количества факторов. ДФЭ целесообразно применять при количестве факторов свыше трех.

Произведение факторов, образующих новый фактор, называют генерирующим соотношением, ибо оно генерирует систему смещения оценок. Генерирующее соотношение может быть взято со знаком плюс и со знаком минус.

Для определения смешанных эффектов при ДФЭ введем понятие определяющего контраста. Символическое обозначение произведения столбцов, образующего из данного генерирующего соотношения плюс или минус единицу, называется определяющим контрастом.

При выборе полу реплик 2^{4-1} возможны следующие варианты генерирующих соотношений:

- | | |
|---------------------|-------------------------|
| 1) $X_4 = X_1 X_2$ | 5) $X_4 = X_1 X_3$ |
| 2) $X_4 = -X_1 X_2$ | 6) $X_4 = -X_1 X_3$ |
| 3) $X_4 = X_2 X_3$ | 7) $X_4 = X_1 X_2 X_3$ |
| 4) $X_4 = -X_2 X_3$ | 8) $X_4 = -X_1 X_2 X_3$ |

Если имеется информация об эффектах взаимодействия, то в качестве генерирующего соотношения следует брать те взаимодействия, которые имеют минимальную значимость. Если такой информации нет, то реплики имеют так называемую максимальную разрешающую способность, т.к. тройные взаимодействия менее значимы, чем парные.

Таблица 29.1 – Условные обозначения дробных реплик и число опытов

Число опытов факторов	Дробная реплика	Условные обозначения	Число опытов	
			Для дробной реплики	Для полного факторного эксперимента
1	2	3	4	5
3	$\frac{1}{2}$ – реплика 2^3	2^{3-1}	4	8
4	$\frac{1}{2}$ – реплика 2^4	2^{4-1}	8	16
5	$\frac{1}{4}$ – реплика 2^5	2^{5-2}	8	32
6	$\frac{1}{8}$ – реплика 2^6	2^{6-3}	8	64
7	$\frac{1}{16}$ – реплика 2^7	2^{7-4}	8	128
5	$\frac{1}{2}$ – реплика 2^5	2^{5-1}	16	32
6	$\frac{1}{4}$ – реплика 2^6	2^{6-2}	16	64
7	$\frac{1}{8}$ – реплика 2^7	2^{7-3}	16	128
8	$\frac{1}{16}$ – реплика 2^8	2^{8-4}	16	256
9	$\frac{1}{32}$ – реплика 2^9	2^{9-5}	16	512
10	$\frac{1}{64}$ – реплика 2^{10}	2^{10-6}	16	1024
11	$\frac{1}{128}$ – реплика 2^{11}	2^{11-7}	16	2048
12	$\frac{1}{256}$ – реплика 2^{12}	2^{12-8}	16	4096
13	$\frac{1}{512}$ – реплика 2^{13}	2^{13-9}	16	8192
14	$\frac{1}{1024}$ – реплика 2^{14}	2^{14-10}	16	16384
15	$\frac{1}{2048}$ – реплика 2^{15}	2^{15-11}	16	32768

В качестве генерируемого соотношения принято произведение:

$$X_4 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

Для выбранного генерирующего соотношения определяющим контрастом будет:

$$X_4 \cdot X_4 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4, \text{ т.к.}$$

$$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 = 1.$$

Тогда смещенные парные взаимодействия определяются в соотношениями, которые получаются путем соответственно умножения правой и левой частей определяющего контраста на факторы:

$$X_1 \cdot X_2 = X_3 \cdot X_4$$

$$X_1 \cdot X_3 = X_2 \cdot X_4$$

$$X_1 \cdot X_4 = X_2 \cdot X_3$$

Для ДФЭ 2^{4-1} требуется провести восемь опытов.

Если после постановки восьми опытов возникнут сомнения, то можно поставить еще восемь опытов, приняв:

$$X_4 = -X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$1 = -X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$$

$$X_1 \cdot X_2 = -X_3 \cdot X_4$$

$$X_1 \cdot X_3 = -X_2 \cdot X_4$$

$$X_1 \cdot X_4 = -X_2 \cdot X_3.$$

Полученные таким образом парные взаимодействия заносятся в соответствующую матрицу планирования.

Таким образом, при планировании многофакторного эксперимента могут, применяться следующие методы:

- метод полного факторного эксперимента (ПФЭ)
- метод дробного факторного эксперимента (ДФЭ).

Рандомизация опытов.

Для исключения влияния систематических ошибок, вызванных внешними условиями и осуществления различных опытов в одинаковых условиях, необходимо проводить рандомизацию опытов. Это позволит усреднить влияние эффектов неконтролируемых факторов и сравнить результаты подобных опытов.

Под рандомизацией понимается чередование отдельных опытов или групп опытов в случайном порядке (от английского *random* – случайный). Рандомизация проводится с помощью таблиц случайных чисел.

29.2 Алгоритм эксперимента

1. Выбор параметра оптимизации.
2. Выбор факторов, воздействующих на объект исследования.
3. Кодирование факторов и выбор интервалов их варьирования.

Разность между верхним (нижним) и нулевым уровнем фактора называют интервалом варьирования.

4. Определение числа повторностей опытов.
5. Рандомизация опытов.
6. Составление матрицы планирования.
7. Проведение эксперимента.
8. Расчет коэффициентов регрессии математической модели объекта исследования, представляемой в виде линейного или нелинейного уравнения регрессии. Следует отметить, что если в уравнении регрессии раскодировать значение факторов, то после подстановки числовых значений коэффициентов получается физическое значение параметра отклика.

9. Оценка рассеивания результатов опытов и определение дисперсии параметра оптимизации

10. Проверка однородности дисперсии с помощью критерия Кохрена. Однородность дисперсий показывает, что рассеяние результатов одного порядка. Если $Sing(G - G_{табл}) < 0$, то дисперсия однородна и можно продолжать дальнейшие вычисления. Если $Sing(G - G_{табл}) > 0$ то дисперсия неоднородна и матрица планирования не может быть принята. В этом случае необходимо изменять масштаб для параметра оптимизации за счет введения функции от параметра оптимизации в виде квадратного корня или логарифма. $G_{табл}$, определяется по таблицам математической статистики.

11. Проверка адекватности модели (проверка пригодности уравнения регрессии для описания исследуемого процесса) с помощью оценки дисперсии адекватности по F критерию Фишера. Если $Sing(F_{табл} - F) > 0$, то модель адекватна. Если $Sing(F_{табл} - F) < 0$, то модель неадекватна. $F_{табл}$, определяется по таблицам математической статистики.

12. Проверка значимости коэффициентов регрессий с помощью критерия Стьюдента. Значимость коэффициентов регрессии показывает, что абсолютная величина этого коэффициента больше его доверительных интервалов. Если $Sing(t - t_{табл}) > 0$, то соответствующий

коэффициент значим. Если $Sing(t - t_{мабл}) < 0$ то соответствующий коэффициент незначим. $t_{мабл}$, определяется по приложению. Если все b_{ij} незначимы, то справедливо линейная модель уравнения регрессии, если же какой то их коэффициентов b_{ij} значим, то уравнение регрессий не линейно.

30 Классификация тормозных механизмов испытательных стендов

Изучение потерь для их последующего уменьшения важно как с точки зрения экономии энергии, так и с точки зрения уменьшения нагрева и износа машины. Кроме того, потери на трение могут быть использованы как показатель качества сборки. При простейших испытаниях ограничиваются определением потерь холостого хода; в остальных случаях дополнительно измеряют потери под нагрузкой и строят кривую зависимости КПД от нагрузки.

Подводимый к испытываемому узлу или детали момент обычно измеряют с помощью балансирного двигателя (рисунок 30.1) обыкновенного электродвигателя, у которого статор выполнен качающимся на подшипниках качения. Момент на статоре, равный моменту на роторе, легко измерить, уравневав статор грузами или динамометром.

Потери под нагрузкой и КПД определяют по разности мощностей на входе и выходе, величины которых могут быть близки, а поэтому должны измеряться с большой точностью.

Момент на выходе при испытаниях обычно создается и измеряется механическим, гидравлическим или электрическим тормозом.

Механические тормоза обычно применяют ленточно-колодочного типа (тормозы Прони, рисунок 30.2). Регулируют тормозной момент изменением натяжения ленты. В тормозах для малых моментов это осуществляется маховиком, насаженным на гайку винта, в более крупных тормозах дополнительно вводится червячная передача. Рычаг должен быть уравновешен специальным грузом. Для охлаждения на внутреннюю поверхность шкива подается эмульсия, которая отводится по трубе, расположенной навстречу вращения жидкости. Для предотвращения фрикционных колебаний на поверхность шкива подводится смазка через фитильную масленку. Механические тормоза выходят из употребления.

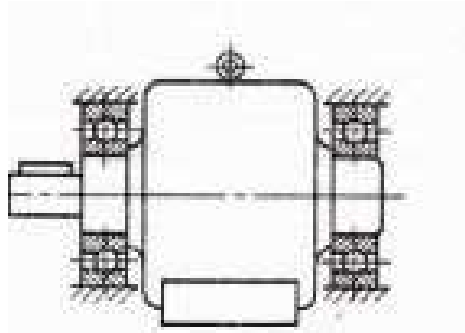


Рисунок 30.1 – Балансирный электродвигатель

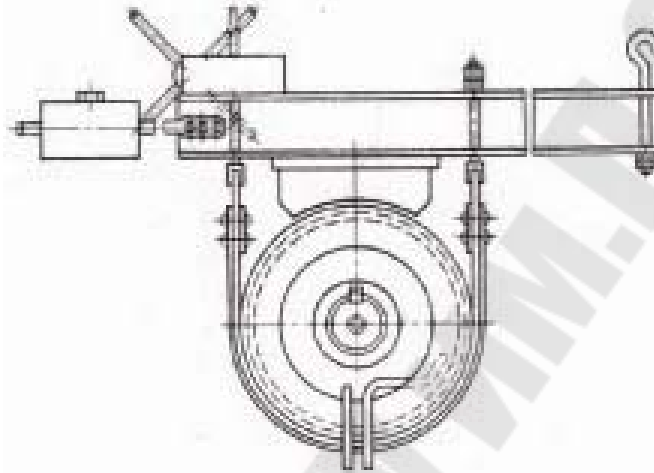


Рисунок 30.2 – Тормоз Прони

Широко применяемые гидравлические тормоза гидродинамического действия воспринимают момент, пропорциональный квадрату частоты вращения и потому при небольших частотах вращения – воспринимают малые моменты. Эти тормоза обеспечивают устойчивую работу и достаточно долговечны. В качестве рабочей среды в них обычно используют воду из водопровода, которая одновременно выполняет функции теплоотвода. Регулирование момента достигается изменением наполнения вихревых камер. Корпус тормозов выполняют поворотным на собственных подшипниках качения, что позволяет измерять момент с помощью мессдоз, тензодатчиков, наклеенных на рычаги, или весовых устройств.

Мощные тормозы выполняют с двойным ротором. Гидравлические тормозы могут снабжаться устройствами для автоматического поддержания постоянного момента при меняющемся режиме. Гидравлические тормозы в централизованном порядке выпускают фирмы Шенк, Гофманн и др.

В качестве электрических тормозов применяют следующие агрегаты: машины постоянного тока с независимым возбуждением; мо-

мент регулируют реостатом в цепи возбуждения или якоря; асинхронные электродвигатели с фазовым ротором; регулируют момент реостатом в цепи ротора; при работе с частотой вращения ниже синхронного переключением проводов обеспечивают вращение магнитного поля, противоположное вращению ротора. Можно также питать статор электродвигателя постоянным током с регулированием реостатом; индукционные тормоза, работающие по принципу вихревых токов; торможение осуществляется магнитными полями. Тормоза стабилизируют момент и позволяют применять автоматическое управление по заданной программе. Для повышения быстродействия роторы изготавливают в виде диска или цилиндра небольшого диаметра с минимальным моментом инерции. Для измерения момента статор выполняют поворотным на собственных подшипниках качения; порошковые электромагнитные тормоза (рисунок 30.3), являющиеся наиболее удобными; в них рабочей средой служит железный порошок, который под действием магнитного потока оказывает сопротивление сдвигу тем большее, чем он сильнее намагничен. Порошковые тормоза обладают стабильностью и точностью управления моментом, малой зависимостью момента от скорости, большой долговечностью, малыми габаритами.

НИМС-ом разработаны конструкции порошковых тормозов шести типоразмеров для наибольших моментов (в кгс·м) из следующего ряда 2,5; 6; 16; 40; 100; 250. Момент измеряется механическим динамометром со стрелочным индикатором.

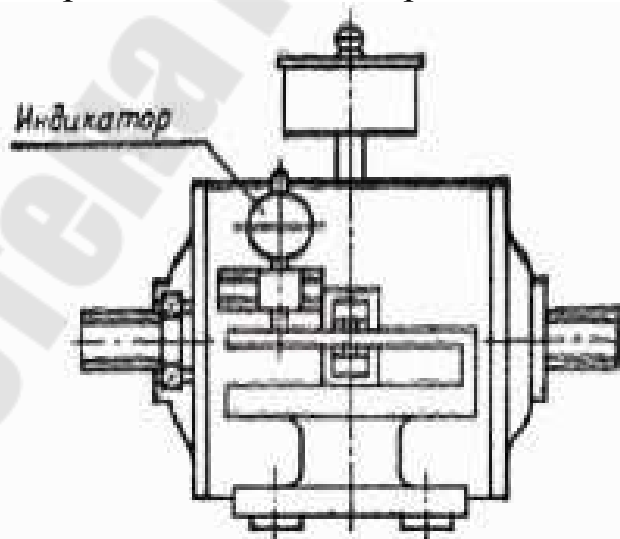


Рисунок 30.3 – Порошковый тормоз

Для повышения точности измерений широко применяется замкнутый способ испытаний, при котором мощность привода расходует-ся только на преодоление трения и может быть замерена с достаточ-ной точностью.

У большинства испытательных установок измеряемый момент включает в себя момент трения вспомогательных опор. Возможно, при-менение опор с сильно уменьшенным и даже исключенным трением.

Практическое исключение трения достигается одним из сле-дующих способов: периодическим изменением направления сил тре-ния по отношению к направлению движения. При этом силы трения то тормозят, то поддерживают движение и, следовательно, общий эффект их действия очень мал, например, в опорах вращательного движения наружным кольцам подшипников сообщается быстрое ка-чательное движение; приданием силам трения направления, перпен-дикулярного к плоскости измерений. Для этого создается быстрое ко-лебательное движение в плоскости, перпендикулярной плоскости из-мерения; приданием силам трения в двух приблизительно одинаково нагруженных опорах вала направления навстречу друг другу соответ-ствующим вращением наружных колец.

При малых скоростях скольжения наилучшие результаты дает применение гидростатических опор, в которых коэффициент трения удавалось свести до 0,6.

31 Испытание зубчатых передач с/х машин на контактную прочность. Заедание и износ

Многие факторы, влияющие на контактную прочность, заедание и износ передач, одинаковы. Это обуславливает и сходство методов испытаний и стендов. Методы испытаний отличаются режимами ис-пытаний и критериями оценки потери работоспособности контакти-рующих поверхностей, а стенды – оснащением их различными изме-рительными приспособлениями и приборами.

Испытания зубчатых передач проводят на стендах:

- с замкнутым контуром;
- тормозных;
- с программным нагружением;
- с повторно–периодическим нагружением.

Характерная особенность стендов с замкнутым контуром для испытания зубчатых передач заключается в способе нагружения их

силами упругости звеньев (в большинстве случаев – торсионных валов). Различают стенды с предварительным нагружением и с нагружением на ходу. Нагрузка создается силами упругости и внешним воздействием. В стендах с предварительным нагружением нагружающими устройствами (рисунок 31.1) являются постоянные муфты различных конструкций.

По типу нагружающих устройств стенды с нагружением на ходу делятся на:

- стенды с винтовыми механизмами (рисунок 31.2);
- стенды с поворотными корпусами (рисунок 31.3);
- стенды с перемещаемыми в окружном или поперечном направлениях отдельными зубчатыми колесами с планетарными и дифференциальными механизмами (рисунок 31.4);
- стенды с фрикционными муфтами, имеющими проскальзывание (рисунок 31.5); – стенды с гидравлическими или пневматическими механизмами (рисунок 31.6);
- стенды с механизмами программного нагружения (рисунок 31.7).

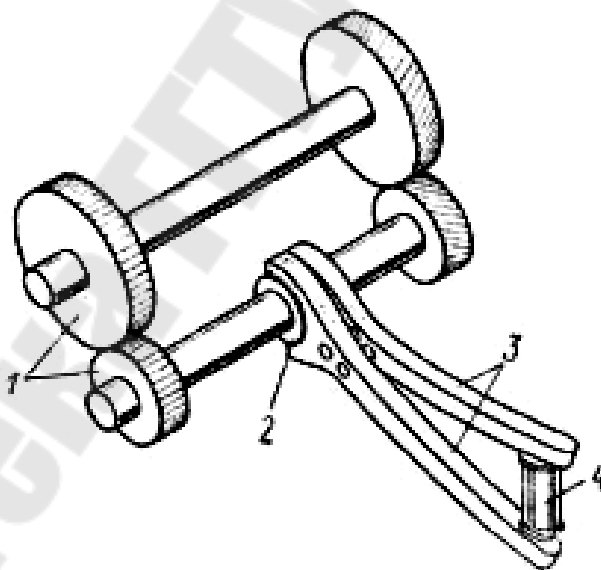


Рисунок 31.1 – Стенд с предварительным нагружением

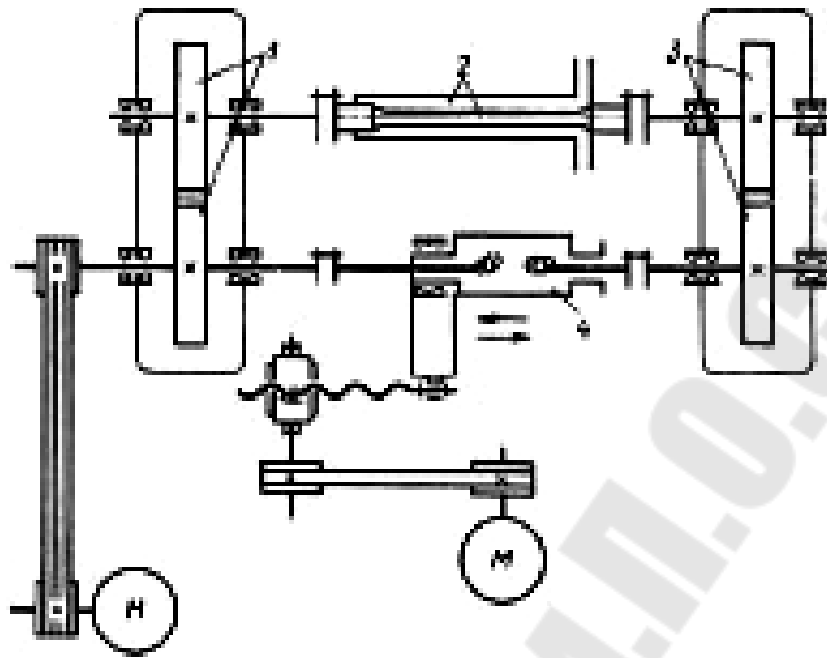


Рисунок 31.2 – Стенд с винтовыми механизмами

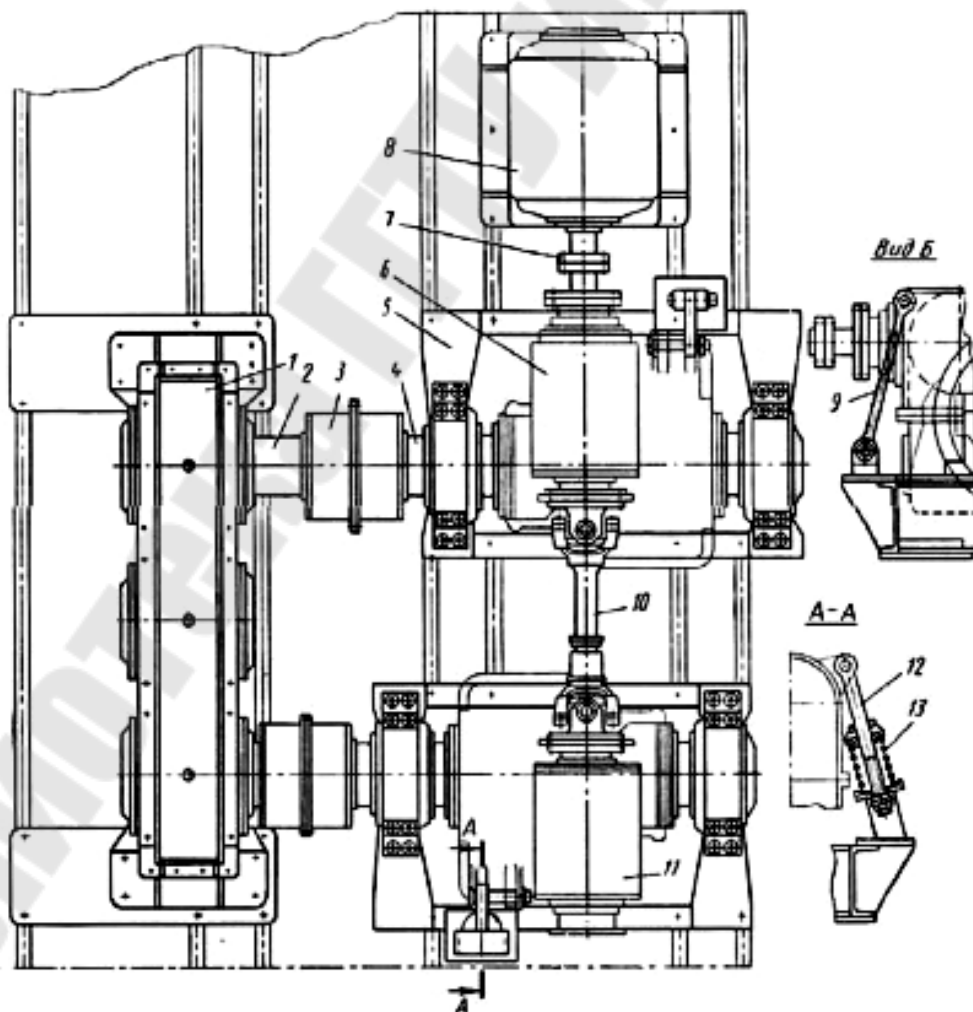


Рисунок 31.3 – Стенд с поворотным корпусом

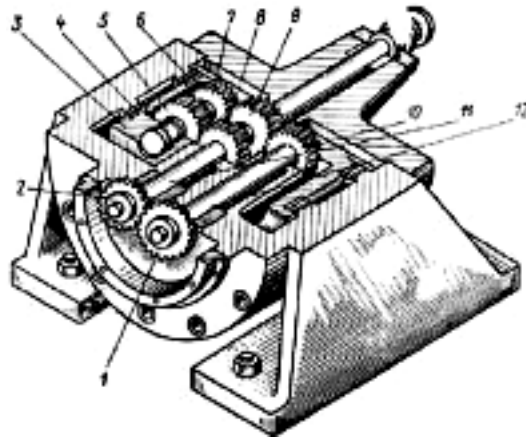


Рисунок 31.4 – Стенд с перемещаемыми в окружном направлении отдельными зубчатыми колесами

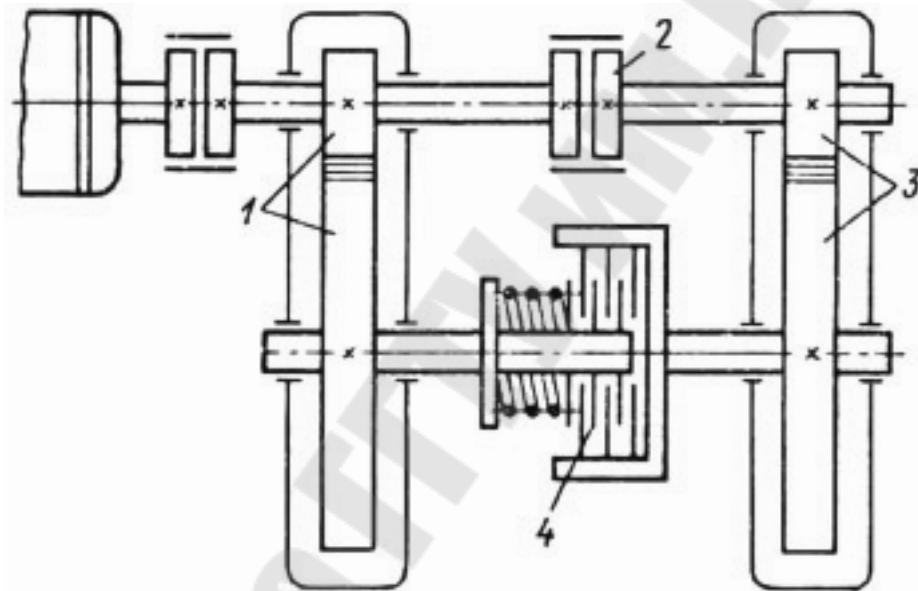


Рисунок 31.5 – Стенд с фрикционной муфтой

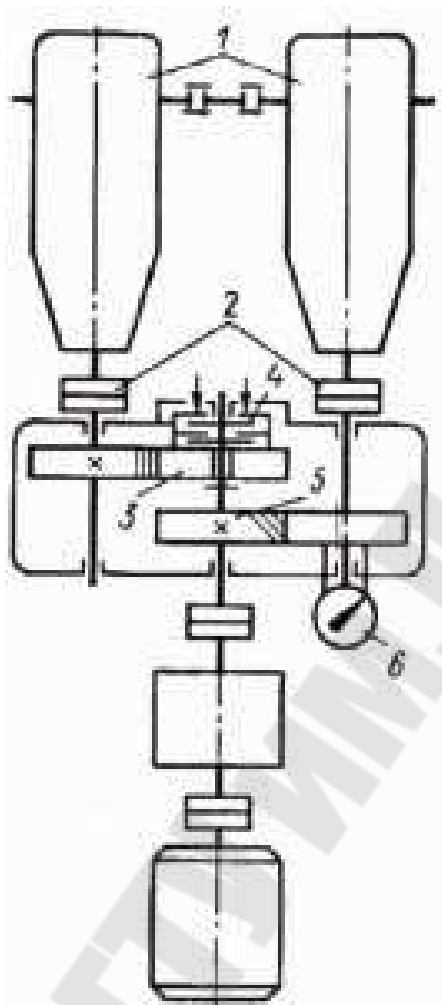


Рисунок 31.6 – Стенд с пневматическим механизмом

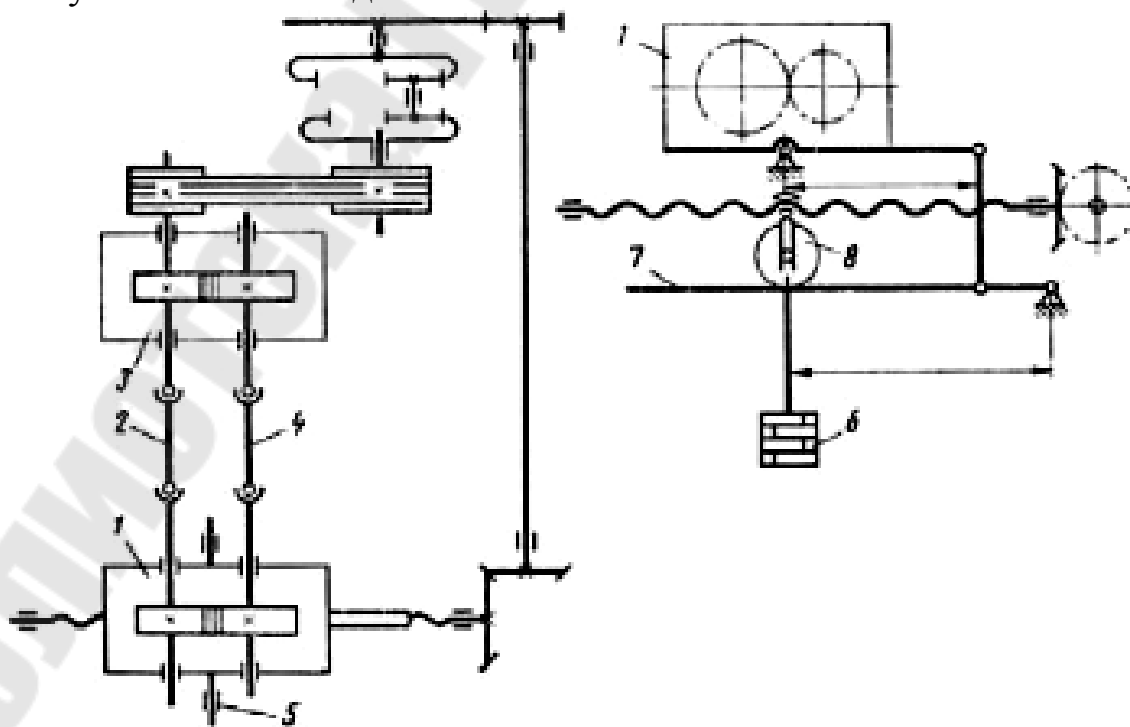


Рисунок 31.7 – Стенд с механизмом программного нагружения

Стенды замкнутой мощности также могут быть подразделены по объектам испытаний (для отдельных зубчатых передач и для редукторов); по числу секций (односекционные и многосекционные); по компоновке (с совмещенными и раздельными корпусами испытуемых и стендовых зубчатых передач); по межосевому расстоянию (с постоянным и изменяемым ступенчато или плавно межосевым расстоянием).

Стенды с замкнутым контуром с предварительным нагружением просты по конструкции, но обладают общими недостатками – пуском под нагрузкой и возможностью ослабления нагрузки.

В стендах с поперечно–свертными, конусными, глухими и зубчатыми муфтами закрутку торсионных валов производят грузами, подвешиваемыми к съемным рычажным ключам, или домкратами. Для точной закрутки валов на требуемый угол отверстия под болты поперечно–свертных муфт выполняют в виде окружных пазов или в одной полумуфте число отверстий делают на одно больше, чем в другой. Применение муфт с распорными болтами исключает необходимость в использовании рычажных ключей, грузов и домкратов. После закрутки валов распорные болты стопорят. В нагружающих устройствах с самотормозящими червячными передачами корпус червячной передачи с червяком крепят на одном валу, а червячное колесо на другом. Закрутку торсионного вала производят вращением червяка.

В стендах с винтовыми механизмами нагружения закрутку торсионных валов производят путем осевого перемещения косозубых колес, винтовыми муфтами и муфтами, совмещенными с зубчатыми колесами, перемещаемыми в осевом направлении.

В стендах с поворотными корпусами нагружение осуществляют также путем упругого деформирования деталей, образующих замкнутый контур, и главным образом закручиванием валов, соединяющих зубчатые передачи в неподвижных и подвижных корпусах. Вместе с корпусами могут перемещаться ось какого–либо одного зубчатого колеса относительно оси зацепляющегося с ним колеса, оси двух и более колес относительно оси колеса, расположенного между ними, или оси двух и более колес, расположенных в отдельном корпусе. Валы неподвижных и поворотных корпусов соединяют муфтами, которые допускают повышенные угловые смещения. Чаще всего применяют зубчатые и карданные муфты. Нагружение производят грузами, а также винтовыми и гидравлическими домкратами. Для стендов с поворотными корпусами характерны простота нагружения и возмож-

ность оснащения их несложными устройствами для программного нагружения.

Особенность стендов с планетарными и дифференциальными механизмами заключается в том, что планетарные и дифференциальные механизмы включаются в замкнутый контур таким образом, чтобы водила при работе стенда оставались подвижными. Нагружение осуществляют поворотом водила, сообщаящим соединяемым валам дополнительные угловые перемещения в противоположных направлениях.

Характерной особенностью стендов с фрикционными муфтами, работающими с малым проскальзыванием, является разница (на 1–3 %) в передаточных числах зубчатых передач, образующих замкнутый контур, что обуславливает скольжение в муфтах. Нагружение осуществляется силами трения, возникающими в муфтах. В связи с малыми скоростями скольжения мощность, потребляемая муфтами, мала и составляет незначительную часть от циркулирующей в замкнутом контуре мощности. Стенды такого типа удобны для испытания редукторов со встроенными предохранительными фрикционными муфтами, которые используются в качестве нагружающих устройств.

В стендах с гидравлическим и пневматическим нагружением используют винтовые механизмы с гидравлическим приводом, а также лопастные гидромуфты или рычажные механизмы с пневматическим приводом. В качестве винтовых механизмов используют или непосредственно косозубые передачи замкнутого контура, или автономные косозубые передачи, или же винтовые муфты, которые выполняют не только отдельно от гидроцилиндров, но делают их также встроенными и совмещенными.

При соответствующем оснащении стендов с гидравлическим и пневматическим нагружением программным регулятором давления они могут быть использованы для испытаний зубчатых передач при переменных режимах нагружения. Наряду со стендами замкнутой мощности при испытании зубчатых передач находят применение тормозные стенды, состоящие из привода, испытываемых передач и тормозного устройства. В отличие от стендов замкнутой мощности в тормозных стендах мощность привода равна потребной мощности для испытания зубчатых передач. Тормозные стенды подразделяют на стенды с механическими, гидравлическими и электрическими тормозными устройствами.

В стендах с механическим торможением используют колодочные, ленточно–колодочные и ленточные тормоза, а также дисковые фрикционные муфты. Как правило, крутящий момент на тормозном валу таких стендов не превышает 2000 кгс · м. В тормозных стендах с механическими тормозами точное определение крутящих моментов при малых частотах вращения затруднено из–за нестабильной работы тормозов, а при больших частотах вращения торможение сопровождается повышенным износом и нагревом.

Стенды с механическим торможением имеют ограниченное применение. В качестве тормозных устройств гидравлических стендов используют гидротурбины, гидронасосы и специальные тормоза, рабочей жидкостью которых служит вода или масло. Для увеличения тормозного момента в ряде случаев гидротурбины и гидронасосы включают в силовую цепь стенда через ускоряющие передачи. Момент изменяется дросселирующим вентилем.

Достоинством гидравлических тормозных устройств является плавность их работы. Однако они не обеспечивают больших тормозных моментов при малых скоростях, запуске и в периоды быстрого изменения скорости. Хорошая имитация условий работы зубчатых передач гребных винтов судов достигается водяными тормозами. При этом мощность стенда может составлять 20000 кВт.

32 Машины и стенды для испытаний деталей с/х машин

При испытаниях деталей машин по большинству критериев приходится измерять: перемещения и деформации (упругие и пластические перемещения и деформации, толщины масляных слоев, амплитуды колебаний, точные делительные перемещения, скорости вращательных и поступательных движений; силы и крутящие моменты.

Упругие и пластические перемещения на заданной базе измеряют тензометрами. Как и все средства измерений перемещений и деформаций, тензометры делятся на механические, оптические, пневматические, акустические (струнные) и электрические.

Механические тензометры увеличивают измеряемое перемещение с помощью механических рычажных или комбинированных рычажных и шестереннореечных передач. Коэффициент увеличения 100–2000.

Оптические тензометры, в которых использован оптический рычаг или принцип интерферометра, обладают высокой чувствительностью, но уступают электрическим по универсальности и удобству использования. Их применяют только в лабораторных условиях.

Пневматические тензометры основаны на изменении расхода воздуха через сопло при изменении зазора и на возникновении соответствующего перепада давления, которое измеряют манометром (обычно U-образным водяным). Коэффициент увеличения может быть очень большим. Пневматические приборы, как бесконтактные, удобны, в частности, для определения смещения вращающегося вала. Цена деления от 0,2 до 2 мкм.

Струнные тензометры основаны на изменении собственной частоты колебаний струны от изменения ее натяжения, вызванного деформацией исследуемой детали.

При испытаниях деталей машин наиболее широко применяют электрические методы измерения перемещений и соответственно электрические тензометры, основанные на измерении индуктивности, емкости и сопротивления.

Индуктивные датчики (рисунок 32.1, а) состоят из сердечника, якоря и катушки индуктивности. При смещении якоря меняются индуктивность катушки и магнитное сопротивление магнитопровода прибора. Для измерения малых перемещений (в частности, упругих перемещений на малых базах) применяют датчики с поперечным смещением якоря. При конструктивной возможности датчики выполняют дифференциальными с перемещением якоря между двумя сердечниками, что повышает чувствительность и расширяет линейный участок характеристики. Для измерения перемещений, не превышающих нескольких миллиметров, применяют датчики с продольным смещением якоря, линейный участок характеристики которых значителен по протяженности. Применение индуктивных датчиков при испытаниях деталей машин ограничивается габаритами.

Емкостные датчики (рисунок 32.1,б) представляют собой электрически изолированные пластинки (конденсатор); при смещении пластин меняется емкость конденсатора. Одной из пластин может служить поверхность одной из деталей, в том числе вращающегося вала. Основное применение имеют датчики для измерения малых перемещений с поперечным смещением пластин. Для средних перемещений применяют датчики с продольным перемещением пластин. Для точных измерений больших перемещений применяют емкостные

датчики телескопического типа с обкладками в виде труб, взаимно перемещаемых в осевом направлении. Емкостные датчики при испытаниях деталей машин успешно применяют, в частности, для измерения смещений валов в подшипниках скольжения.

Наибольшее распространение среди электрических методов измерения деформаций и перемещений имеют методы, основанные на тензоэффекте, т. е. на свойстве проводниковых и полупроводниковых материалов изменять электрическое сопротивление при деформациях. Среди приборов, основанных на тензоэффекте, доминирующее применение имеют тензорезисторные датчики (тензодатчики) с чувствительным элементом в виде решетки из тонкой проволоки или фольги или в виде пластинки из полупроводникового материала. Чувствительный элемент наклеен на бумагу, пленку или ткань, которые наклеивают на деталь. Широкое применение тензорезисторов связано с их малыми габаритами и массой, возможностью дистанционных измерений в большом числе точек, в широких частотных и температурных диапазонах.

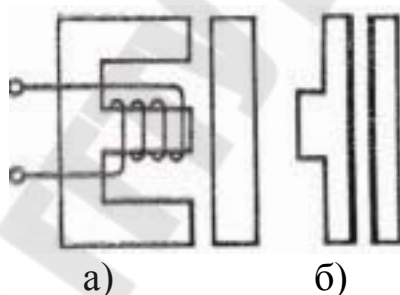


Рисунок 32.1 – Датчики: а) индуктивные, б) ёмкостные.

Проволочные тензорезисторы имеют чувствительный элемент из тонкой проволоки диаметром 2–30 мкм, выполняемый для повышения выходного сигнала, в форме решетки. Наиболее распространены тензорезисторы с многовитковой петлевой решеткой вследствие простоты их изготовления. Тензорезисторы с многовитковой беспетлевой решеткой применяют в связи с тем, что они почти свободны от поперечной чувствительности. Для измерения деформаций в разных направлениях в одной точке применяют многоэлементные тензорезисторы (розетки). Проволочные тензорезисторы изготавливают в централизованном порядке, в том числе общего назначения с активной базой от 2 до 100 мм и сопротивлением от 20 до 400 Ом, а также для низких, повышенных и высоких температур.

Фольговые тензорезисторы (рисунок 21.2,б) имеют чувствительный элемент в виде решетки из константановой фольги толщиной 5–10 мкм. Они характеризуются более высокими показателями, чем проволочные (большим допустимым током и выходным сигналом, меньшей поперечной чувствительностью, возможностью выполнения с малой базой от 0,3 мм). Технология изготовления фольговых тензорезисторов основана на фотохимических процессах. Тензорезисторы изготавливают нескольких типов: одноэлементные с одной прямоугольной решеткой, но разным расположением выводов, двухэлементные, состоящие из двух решеток под углом 90°, и трехэлементные, состоящие из трех решеток.

Полупроводниковые тензорезисторы имеют чувствительный элемент в виде монокристалла кремния, германия или другого полупроводника толщиной 20–50 мкм, шириной до 0,5 мм и длиной 2–12 мм. Полупроводниковые тензорезисторы обладают высокой чувствительностью и большим выходным сигналом, но ограниченным диапазоном деформирования и зависимостью показаний от температуры.

Тензорезисторы удобно встраиваются в тензометры, вибрографы и другие приборы.

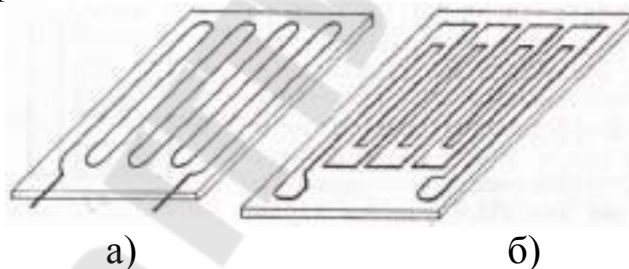


Рисунок 32.2 – Тензорезисторные датчики: а) проволочный, б) фольговый

Исследования жесткости

Испытанию на жесткость в машиностроении подвергают детали, узлы и машины в целом. Определяется жесткость, как отношение силы к перемещению в точках и направлениях, наиболее влияющих на работоспособность узла или машины. Условия испытания универсальных технологических машин и их узлов должны соответствовать наиболее типичным видам обработки. Вводится понятие средней жесткости и среднего квадратического отклонения жесткости по зоне обработки. Для узлов и машин кроме суммарной жесткости определяется баланс упругих перемещений, позволяющий установить наиболее эффективные пути повышения жесткости.

Испытания на жесткость обычно проводят при статическом нагружении. Используют внешнее нагружение, в частности, с помощью испытательных машин растяжения–сжатия, или внутреннее нагружение. Испытательные машины должны иметь достаточно большое рабочее пространство.

Для единичных испытаний можно в качестве нагружающего устройства использовать металлорежущие станки. На рисунке 32.3 показан универсальный стенд, позволяющий создавать нагрузку в любой точке рабочего пространства и под любым углом.

Внутреннее нагружение при испытаниях выполняют винтовыми домкратами или гидравлическими цилиндрами. Нагрузки обычно измеряют динамометрами. На точных испытательных машинах пользуются шкалами нагрузок машин.

При использовании гидравлических цилиндров (домкратов) можно контролировать нагрузку по показанию прецизионных манометров; при этом нужно заботиться об уменьшении трения в цилиндре, что достигается выполнением на плунжерах кольцевых канавок, выравнивающих давление, или гидростатической разгрузкой.

Для обеспечения точного направления и точных координат точки приложения сил на испытываемые детали в системе нагружения должны быть два шарнира (обычно они реализуются с помощью двух шариков, через которые нагрузка передается на динамометр и от динамометра на испытываемую деталь). Во всех случаях нагрузку правильнее передавать через шарики или детали со сферической опорной поверхностью.

Упругие перемещения в машинах складываются из собственных и контактных перемещений. Контактные упругие перемещения не подчиняются линейной зависимости от нагрузки.

Собственные упругие перемещения в связи с изменением условий контакта и со свойствами материала также могут не следовать линейной зависимости. В связи с этим при испытаниях определяют упругие перемещения при ступенчато нарастающих и убывающих нагрузках и строят соответствующие графики. При первом нагружении происходит выборка зазоров и пластические деформации микронеровностей, которые особенно существенны в условиях контакта по большой номинальной площади. Поэтому испытание ведут после двух–трех предварительных обжатий.

Упругие перемещения измеряют относительно недеформируемой базы или, если это затруднено, от сопряженных деталей. При ис-

пытаниях собственной жесткости обычно все измерения ведут от неподвижной базы, а при испытаниях контактной жесткости – преимущественно относительно сопряженной детали. Для построения упругой линии длинных деталей, типа станин станков пользуются теми же методами, как для проверки прямолинейности. Средства измерения упругих перемещений.

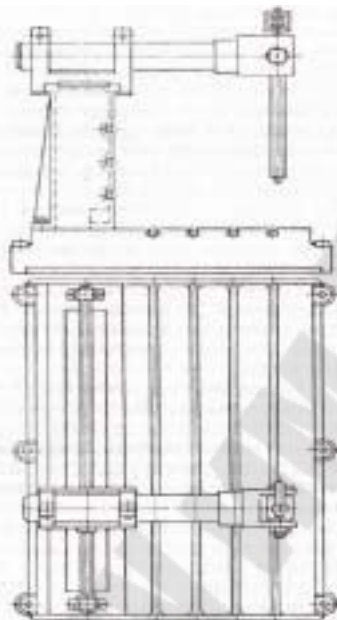


Рисунок 32.3 – Универсальный стенд для испытания на жесткость

Исследование жесткости проводят на натуральных машинах и на моделях. Исследования на натуральных машинах дают на более близкие к действительности результаты. Однако они не позволяют получать результаты для еще не реализованных в металле конструкций и затрудняют организацию сравнительных испытаний для изучения влияния отдельных элементов конструкций и отдельных параметров. При моделировании обычно следует предпочитать одной универсальной модели несколько простейших моделей, позволяющих изучать интересующие факторы в чистом виде.

Испытание жесткости на металлических моделях требует очень больших нагрузок и весьма точных измерительных средств. С уменьшением размера моделей при сохранении геометрического подобия упругие перемещения (в условиях нагружения в пределах пропорциональности материала) уменьшаются. Поэтому наиболее подходящим материалом для моделей является материал с малым модулем упругости, но относительно высоким пределом пропорциональности. Таким материалом является органическое стекло–плексиглас. Его дополни-

тельным достоинством является технологичность. Он легко обрабатывается и может хорошо склеиваться клеем, который имеет модуль упругости, мало отличающийся от модуля упругости плексигласа. При использовании составных моделей из плексигласа следует учитывать, что коэффициент трения плексигласа по плексигласу равен 0,5–0,6, т. е. он много больше, чем коэффициент трения металла по металлу. При моделировании конструкций из элементов с разными модулями упругости, например станин с фундаментами или бетонным полотном цеха, следует подбирать пластические массы с требуемым соотношением модулей упругости.

Литература

1. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин : учебник для вузов / И. М. Жарский [и др.]. – Минск : Выш. шк., 2010. - 335, [1] с. – (ВУЗ) УДК 621.81-192(075.8) ББК 34

2. Беленький, Д. М. Теория надежности машин и металлоконструкций / Д. М. Беленький, М. Г. Ханукаев. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2004. – 607 с.. – (Учебники для технических вузов) УДК 62-192(075.8) ББК 3

3. Основы надежности машин: учебное пособие для вузов : [16+] / А. Т. Лебедев, А. В. Захарин, П. А. Лебедев и др. ; Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет (СтГАУ), 2019. – 120 с. : ил., табл., схем. – Режим доступа: по подписке. – <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=614110> – Библиогр.: с. 112. – Текст : электронный.

4. Атапин, В. Г. Основы теории надежности : учебное пособие : [16+] / В. Г. Атапин ; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2017. – 94 с. : ил., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=574624> – Библиогр.: с. 85. – ISBN 978-5-7782-3230-3. – Текст : электронный.

5. Лавренченко, А. А. Методы испытаний транспортно-технологических машин и оборудования : учебное пособие / А. А. Лавренченко, Д. В. Доровских ; Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), 2017. – 84 с. : ил. – Режим доступа: по подписке. – <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=499166> – Библиогр.: с. 77. – ISBN 978-5-8265-1719-2. – Текст : электронный.

6. Кирилюк, С. И. Испытания мобильных машин [Электронный ресурс] : пособие для студентов специальности 1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники» дневной и заочной форм обучения / С. И. Кирилюк. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 111 с. <https://elib.gstu.by/handle/220612/24225>.

7. Надежность машин [Электронный ресурс] : практикум по выполнению лабораторных работ по одноименной дисциплине для студентов специальности 1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники» дневной и заочной форм обучения / сост.: В. Б. Попов, А. В. Голопятин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 11 с. <https://elib.gstu.by/handle/220612/24016>

8. Попов, В. Б. Надежность машин : электронный учебно-методический комплекс дисциплины для студ. спец. 1-36 12 01 «Про-

ектирование сельскохоз. техники» / В. Б. Попов, А. В. Голопятин, Е. П. Шельманова. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2014. [http://elib.gstu.by/handle/220612/11228\](http://elib.gstu.by/handle/220612/11228).

9. Лихачев В.С. Испытания тракторов: учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва, Машиностроение, 1974. – 286 с.

10. Ермолов, Л. С. Основы надежности сельскохозяйственной техники : учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Колос, 1982. – 271 с.

11. Кардашевский С.В., Испытания сельскохозяйственной техники, М. Машиностроение, 1979. – 279 с.

12. Короткевич А.В. Основы испытаний сельскохозяйственной техники: учеб. Пособие для студентов сельскохозяйственных вузов. – Минск : БГАТУ, 1997. – 283 с.

13. Неденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. – 3-е изд., перераб. И доп. – Москва : Колос, 1973. – 198 с.

14. Ивашко, В.С. Основы надежности сельскохозяйственной техники. – Минск, БГАТУ, 2001. – 146 с.

НАДЕЖНОСТЬ И ИСПЫТАНИЯ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

**Пособие
для студентов специальности
1-36 12 01 «Проектирование и производство
сельскохозяйственной техники»
дневной и заочной форм обучения**

**Составители: Кирилюк Сергей Иванович
Шишков Сергей Владимирович**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 09.01.24.

Рег. № 71Е.
<http://www.gstu.by>