

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Тракторы»

НАДЕЖНОСТЬ ТЯГОВЫХ
И ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН.
ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ
ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Методические указания
по выполнению практических работ для студентов
специальностей 1-37 01 03 «Тракторостроение»,
1-37 01 04 «Многоцелевые гусеничные
и колесные машины»

Минск
БНТУ
2010

УДК 623.437.42.017

ББК 39.34

Н17

С о с т а в и т е л и:

Г.П. Грибко, А.С. Поварехо, А.И. Рахлей, Ю.Д. Карпиевич

Р е ц е н з е н т ы:

Г.А. Дыко, М.И. Жилевич

Методические указания предназначены для выполнения практических работ по дисциплинам «Надежность трактора» и «Надежность машин».

В методических указаниях изложены основные понятия и показатели надежности, рассмотрены планы испытаний на надежность и виды экспериментальной информации для оценки ее показателей. Описаны методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. Приведен пример оценки этих показателей непараметрическими методами.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Надежность – одна из важнейших характеристик машин. Она весьма специфична, так как зависит от случайных факторов; определяется несколькими количественными характеристиками; экспериментальное ее исследование сопряжено с большими трудностями, чем исследование других технических характеристик (с большей затратой времени, материальных средств, труда квалифицированных работников). При изучении надежности производят исследования и испытания отдельных деталей, узлов, машин в целом и систем машин, которые в теории надежности называют **объектами**. Каждый объект предназначен для выполнения определенных функций, установленных технической документацией, стандартами, техническими условиями, и характеризуется эксплуатационными показателями, которые называют **выходными параметрами**. Допустимые значения выходных параметров устанавливаются технической документацией.

Объект может находиться в следующих состояниях: исправном и неисправном, работоспособном и неработоспособном. **Исправным состоянием** называют такое состояние, при котором объект соответствует всем требованиям технической документации. При неисправном состоянии объект не соответствует хотя бы одному из установленных требований. **Работоспособное состояние (работоспособность)** – это состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения всех заданных параметров в пределах, установленных технической документацией. **Неработоспособное состояние (неработоспособность)** характеризуется тем, что значение хотя бы одного параметра объекта, характеризующего способность выполнять заданные функции, вышло за допустимые пределы.

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

Событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта, т.е. в переходе его из работоспособного в неработоспособное состояние, называется отказом. Отличительный признак или совокупность признаков, по которым устанавливается факт возникновения отказа, называется **критерием отказа**.

Восстановлением называется событие, заключающееся в переходе объекта из неработоспособного в работоспособное состояние. Соответственно все объекты можно разделить на **восстанавливаемые** и **невосстанавливаемые**. Работоспособность восстанавливаемых объектов в случае возникновения отказа подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации, а невосстанавливаемых – не подлежит.

Продолжительность или объем работы объекта называется **наработкой** и измеряется часами, пробегом машины, числом циклов и т.д. Нарботка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа называется **наработкой до отказа**, а наработка объекта от окончания восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа – **наработкой между отказами**.

Ресурс – это суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Срок службы – это календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Срок сохраняемости – это календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течение которой сохраняются в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. По истечении срока сохраняемости объект должен соответствовать требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, установленным нормативно-технической документацией на объект.

Надежность – это 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 является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

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

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

Ремонтопригодность – это свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

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

2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Показателями надежности называются количественные характеристики одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта. Соответственно показатель надежности, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность объекта, называется единичным показателем надежности, а показатель надежности, характеризующий несколько свойств, составляющих надежность объекта – комплексным показателем надежности. По восстанавливаемости объектов показатели надежности делятся на показатели для восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов. Надежность объектов в зависимости от их вида может оцениваться частью или всеми показателями надежности.

Показатели безотказности

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Гамма-процентная наработка до отказа – наработка, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средняя наработка до отказа – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Средняя наработка на отказ – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Параметр потока отказов – отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки.

Показатели долговечности

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

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса.

Гамма-процентный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средний срок службы – математическое ожидание срока службы.

Показатели ремонтпригодности

Вероятность восстановления – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение.

Гамма-процентное время восстановления – время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа.

Показатели сохраняемости

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

Комплексные показатели надежности

Коэффициент готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Невосстанавливаемые объекты характеризуются только показателями безотказности, к которым относятся вероятность безотказной работы, гамма-процентная наработка до отказа, средняя наработка до отказа, интенсивность отказов.

Различают статистические (оценочные, приближительные) и вероятностные (точные) показатели. Статистические оценки – это результат наблюдений за некоторой выборкой N изделий. Если $N \rightarrow \infty$, то выборка приближается к генеральной совокупности, а статистическая оценка – к вероятностной. Обычно стремятся выбирать N так, чтобы обеспечить приемлемую погрешность наблюдений. Тогда данные по выборке принимают за данные по генеральной совокупности, а статистические оценки – за вероятностные.

Для определения вероятностных показателей надежности необходимо знать распределение отказов как случайных событий. Невосстанавливаемые объекты работают до первого отказа, для них понятия безотказности, долговечности и надежности совпадают. Показатели надежности невосстанавливаемых объектов можно определить по распределению наработки до отказа. Нарботка до отказа T , как и любая иная случайная величина, описывается функцией распределения $F(t)$, описываемой как вероятность P случайного события, заключающегося в том, что наработка до отказа T меньше некоторой заданной наработки t .

$$F(t) = P\{T < t\}.$$

Эта вероятность рассматривается как функция t во всем диапазоне возможных значений величины T .

Функция $F(t)$ является неубывающей функцией t и, как правило, непрерывна. Так как значения T не могут быть отрицательными, то $F(0) = 0$. При $t \rightarrow \infty$ величина $F(t)$ стремится к единице.

Производная от функции распределения по текущей переменной называется плотностью распределения:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}.$$

Вероятность безотказной работы $P(t)$ связана с функцией распределения $F(t)$ и плотностью распределения $f(t)$ наработки до отказа:

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

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt.$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ определяется как условная плотность вероятности отказа объекта в момент t при условии, что до этого момента отказы не возникали:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{dP(t)}{dt} \frac{1}{P(t)},$$

отсюда

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

Гамма-процентные показатели надежности определяют как корни t_γ уравнения

$$F(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100},$$

где $F(t)$ – функция распределения наработки до отказа (ресурса, срока службы).

В частности, гамма-процентную наработку до отказа t_γ определяют из уравнения

$$P(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100},$$

где $P(t_\gamma)$ – вероятность безотказной работы.

Гамма-процентные показатели равны квантилям соответствующих распределений. Квантилью называют значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности.

Средние значения наработки до отказа (ресурса, срока службы, времени восстановления, срока сохраняемости) равны математическим ожиданиям соответствующих случайных величин:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt = \int_0^{\infty} t f(t) dt.$$

Средняя наработка до отказа T_1 выражается через вероятность безотказной работы:

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Отсюда следует, что средняя наработка до отказа геометрически равна площади под кривой $P(t)$.

Работа N восстанавливаемых объектов отличается тем, что при возникновении отказов происходит восстановление и работа объектов продолжается. Таким образом, имеем $N = \text{const}$ и $r \neq N$ в потоках отказов и восстановлений, сопровождающих работу объектов. Средняя наработка на отказ T_0 определяется по формуле

$$T_0 = \frac{t}{M\{r(t)\}},$$

где t – суммарная наработка;

$r(t)$ – число отказов, наступивших в течение этой наработки;

$M\{r(t)\}$ – математическое ожидание этого числа.

Для стационарных потоков отказов средняя наработка на отказ от t не зависит.

Параметр потока отказов ω и средняя наработка на отказ в простейшем потоке связаны соотношением

$$\omega = \frac{1}{T_0}.$$

Вероятность безотказной работы восстанавливаемого объекта – это вероятность события, что в интервале от его пуска до случайного момента t отказ не произойдет. В период нормальной эксплуата-

ции объекта наработки между отказами в простейшем потоке подчиняются экспоненциальному распределению, и вероятность безотказной работы определяется зависимостью

$$P(t) = e^{-\omega t} = e^{-\frac{t}{T_0}}.$$

3. ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Испытаниями на надежность называются испытания, проводимые для определения показателей надежности в заданных условиях. В зависимости от цели проведения испытания на надежность делят на определительные и контрольные. **Определительные** – это испытания, проводимые для определения показателей надежности с заданной точностью и достоверностью и при необходимости параметров законов распределения таких случайных величин, как наработка до отказа и между отказами, время восстановления и др. Цель **контрольных испытаний** – проверка соответствия фактических значений показателей надежности требованиям технической документации, т.е. принятие решения типа «да/нет» о соответствии или несоответствии надежности объекта предъявляемым требованиям (не говоря более конкретно о том, чему равно значение показателя надежности).

План испытаний на надежность – совокупность правил, устанавливающих объем выборки, порядок проведения испытаний, критерии их завершения и принятия решения по результатам испытаний.

Возможны различные планы испытаний, обусловленные следующими обстоятельствами. Испытуемые N объектов при отказах могут не заменяться (объекты U), заменяться (объекты R) или восстанавливаться (объекты M). Испытания могут быть прекращены, когда истекла заданная наработка при испытаниях T , число отказавших объектов стало равным заранее установленному числу r или при достижениях r или T в зависимости от того, что из них достигнуто раньше.

Событие, приводящее к прекращению испытаний объекта до наступления отказа изучаемого характера, называется **цензурированием**. Таким образом, сокращение продолжительности испытаний достигается путем цензурирования. Дополнительными причинами, приводящими к цензурированию, могут быть: разновременность

начала и (или) окончания испытаний; снятие с испытаний некоторых объектов по организационным причинам или из-за отказов составных частей, надежность которых не исследуется. Различают два типа цензурирования: прекращение испытаний при заданной наработке (тип I); прекращение испытаний при заданном количестве отказов (тип II).

Наработка до цензурирования – наработка объекта от начала испытаний до наступления цензурирования. **Цензурированная выборка** – выборка, элементами которой служат значения наработки до отказа и наработки до цензурирования. Сокращение испытания на надежность порождают соответствующие цензурированные выборки, специфика которых зависит от плана испытаний.

ГОСТ 27.410-87 предусматривает следующие планы определенных испытаний на надежность (табл. 1).

Таблица 1

Термины и определения планов испытаний на надежность

Термин	Определение
1. План испытаний [$NU\tau$]	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, испытания прекращают по истечении времени испытаний или наработки T для каждого неотказавшего объекта
2. План испытаний [NUr]	План испытаний, согласно которому испытывают одновременно N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, испытания прекращают, когда число отказавших объектов достигло r
3. План испытаний [$NU(r, T)$]	План испытаний, согласно которому испытывают одновременно N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, испытания прекращают, когда число отказавших объектов достигло r или при истечении времени испытаний или наработки T каждого неотказавшего объекта в зависимости от того, какое из этих условий выполнено ранее

Термин	Определение
4. План испытаний [$NR\bar{T}$]	План испытаний, согласно которому одновременно начинают испытания N объектов, отказавшие во время испытаний объекты заменяются новыми, испытания прекращают при истечении времени испытаний или наработки T для каждой из N позиций. Каждый из объектов занимает определенную позицию (стенд, испытательную площадку и т.д.), применительно к которой в дальнейшем исчисляется продолжительность испытаний T независимо от замен объектов, отказавших на данной позиции
5. План испытаний [$NR\bar{r}$]	План испытаний, согласно которому одновременно начинают испытания N объектов, отказавшие во время испытаний объекты заменяются новыми, испытания прекращают, когда число отказавших объектов, суммарное по всем позициям достигло r
6. План испытаний [$NR(r, T)$]	План испытаний, согласно которому одновременно начинают испытания N объектов, отказавшие во время испытаний объекты заменяются новыми, испытания прекращают, когда число отказавших объектов, суммарное по всем позициям достигло r или при истечении времени испытаний, или наработки T в каждой позиции в зависимости от того, какое из этих условий выполнено ранее
7. План испытаний [NMT]	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов, после каждого отказа объект восстанавливают, каждый объект испытывают до истечения времени испытаний или наработки T

Термин	Определение
8. План испытаний [NMT_{Σ}]	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов, после каждого отказа объект восстанавливают, испытания прекращают при истечении суммарного по всем объектам времени испытаний или наработки T_{Σ}
9. План испытаний [NMf]	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов, после каждого отказа объект восстанавливают, испытания прекращают, когда суммарное по всем объектам число отказов достигло f
10. План испытаний [$NM(f, T_{\Sigma})$]	План испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов, после каждого отказа объект восстанавливают, испытания прекращают, когда суммарное по всем объектам число отказов достигло f или при истечении суммарного по всем объектам времени испытаний или наработки T_{Σ} в зависимости от того, какое из этих условий выполнено ранее
11. План испытаний [$NU(r_1, n_1), (r_2, n_2) \dots$... $(r_{k-1}, n_{k-1}), r_k$]	План испытаний, согласно которому испытывают одновременно N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, после возникновения r_1 отказов с испытаний снимают n_1 неотказавших объектов, после возникновения r_2 отказов с испытаний снимают n_2 неотказавших объектов и т.д., испытания прекращают, когда число отказавших объектов достигло r_k отказов

Термин	Определение
12. План испытаний [$NU(T_1, n_1), (T_2, n_2) \dots$ $\dots(T_{k-1}, n_{k-1}), T_k]$	План испытаний, согласно которому испытывают одновременно N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, после истечения времени или наработки T_1 с испытаний снимают n_1 неотказавших объектов (если число неотказавших объектов больше n_1 , в противном случае испытания прекращают) и т.д., испытания прекращают при истечении времени или наработки T_k
13. План испытаний [$NUz]$	План испытаний, согласно которому испытывают одновременно N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, каждый объект испытывают в течение наработки z_i , где $z_i = \min(t_i, \tau_i)$

В результате испытаний на надежность (или эксплуатации) может быть получена полная или цензурированная выборка объектов. Если для каждого объекта выборки количественная характеристика какого-либо свойства, составляющего надежность конкретных объектов выборки, полностью определена, то набор представляет **полную выборку**. Результаты испытаний по плану [NUM] представляют собой такую выборку.

Однократно цензурированная выборка – выборка, в которой значения всех наработок до цензурирования равны между собой. Результаты испытаний по плану [NUt] представляют собой однократно цензурированную выборку типа I, а план [NUr] обеспечивает получение однократно цензурированной выборки типа II. План [$NU(r, T)$] может привести к одному из указанных типов цензурированных выборок.

Применение планов типа [NUr] и [NUt] предполагает соблюдение некоторых «жестких» условий: одновременность постановки объектов на испытания, невозможность снятия объектов (без отказа) до окончания испытаний, непрерывность контроля функциони-

рования (точную фиксацию момента отказа). Из-за этого обстоятельства рассмотренные планы испытаний не всегда могут быть реализованы на практике.

Многократно цензурированная выборка – выборка, в которой значения наработок до цензурирования не равны между собой. Цензурирование может производиться в несколько стадий, тогда имеется многократное (прогрессивное) цензурирование типа I (план $[NU(T_i, n_i) T_k]$) или типа II (план $[NU(r_i, n_i) r_k]$). В соответствии с этим можно говорить о многократно цензурированных выборках типа I или типа II.

Все упомянутые виды цензурирования являются запланированными. Однако часты, например, эксплуатационные наблюдения, когда цензурирование происходит случайно. К случайным многократно цензурируемым выборкам приводит план $[NU_z]$.

Выборки, порождаемые планом $[NU_z]$, обобщают выборки, реализуемые в результате проведения сокращенных испытаний по другим планам.

4. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

4.1. Исходная информация для оценки показателей надежности

Для вычисления оценок показателей надежности проводят следующие работы:

- выбор плана испытаний на надежность;
- планирование испытаний;
- сбор необходимой информации.

В технически обоснованных случаях допускается не проводить планирование испытаний.

Экспериментальная информация для оценки показателей надежности зависит от плана испытаний. Исходными данными служат.

1. При плане $[NUM]$:

- выборочные значения наработки до отказа, ресурса, срока службы, времени восстановления, срока сохраняемости t_1, t_2, \dots, t_N
- объем выборки N .

2. При плане $[NUR]$:

- выборочные значения наработки до отказа, ресурса, срока службы, срока сохраняемости t_1, t_2, \dots, t_r

- число отказов r_i ;
- объем выборки N .
- 3. При плане $[NUT]$:
 - выборочные значения наработки до отказа, ресурса, срока службы, срока сохраняемости t_1, t_2, \dots, t_d ;
 - продолжительность испытаний T ;
 - объем выборки N .
- 4. При плане $[NUZ]$:
 - выборочные значения наработки до отказа, ресурса, срока службы, срока сохраняемости t_1, t_2, \dots, t_d ;
 - выборочные значения наработки работоспособных изделий (наработки цензурирования) до отказа, ресурса, срока службы, срока сохраняемости $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$;
 - число отказов r_i ;
 - объем выборки N .
- 5. При планах $[NMr]$, $[NRr]$:
 - выборочные значения наработки между отказами t_1, t_2, \dots, t_r ;
 - число отказов r ;
 - объем выборки N .
- 6. При планах $[NMT]$, $[NRT]$:
 - выборочные значения наработки между отказами t_1, t_2, \dots, t_d ;
 - продолжительность испытаний T ;
 - объем выборки N .

4.2. Методы оценки показателей надежности

Показатели надежности оценивают двумя методами:

- 1) непараметрическим – при неизвестном законе распределения, включающем непосредственную оценку показателей надежности;
- 2) параметрическим – при известном законе распределения, включающем оценку параметров закона распределения, входящих в расчетную формулу оцениваемого показателя надежности, и оценку показателя надежности по вычисленным оценкам параметров закона распределения.

Под оценками показателей надежности понимают точечную или интервальную (границы доверительного интервала, который с заданной вероятностью содержит истинное значение показателя) оценки показателя.

Точечные оценки дают представление о значении показателя надежности, но ничего не говорят о точности этой оценки. Они используются при сравнении конструктивных вариантов изделий и оценке влияния других факторов на надежность. Чтобы учесть возможное отличие точечных оценок показателей надежности от истинных значений, вводится понятие доверительной вероятности.

Доверительной вероятностью (достоверностью) называют вероятность того, что истинное значение оцениваемого параметра или числовой характеристики лежит в заданном интервале, называемом *доверительным*. Доверительный интервал в общем случае ограничен нижней и верхней доверительными границами. На практике основной интерес представляет односторонняя вероятность, что числовая характеристика не меньше нижней или не выше верхней границы. Первое условие, в частности, относится к вероятности безотказной работы и средней наработке до отказа, второе – к среднему времени восстановления.

Если невозможно установить вид закона распределения наработки до отказа с приемлемой уверенностью по прежним экспериментам или из теоретических соображений, желателен непараметрический подход при оценивании показателей надежности, не связанной с вычислением параметров распределения. Более того, как показано в [3], при оценке надежности высоконадежных изделий возможны ситуации, когда параметрические методы вообще оказываются бесполезными.

Непараметрический подход объединяет большое число статистических процедур, свободных от вида закона распределения и его параметров. Общим для этих методов является вычисление эмпирической функции распределения по общему вариационному ряду, в котором наработки до отказа и наработки до цензурирования выстроены в порядке неубывания.

4.3. Оценка показателей надежности непараметрическими методами

Точечные оценки показателей надежности вычисляют непараметрическими методами при числе отказов $r > 5$. При $r \leq 5$ используют нижние доверительные границы показателей надежности.

Последовательность вычисления оценок показателей надежности для планов типа [NU...] следующая.

Наработки до отказа t_i и наработки до цензурирования τ_j (для планов, отличных от $[NUM]$) выстраивают в общий вариационный ряд в порядке неубывания. Если отдельные значения наработки до отказа равны некоторым значениям наработок работоспособных изделий, то в вариационном ряду сначала указывают наработки до отказа, затем наработки до цензурирования.

Вычисляют оценку функции распределения $\hat{F}(t_j)$:

$$\hat{F}(t_j) = 1 - \prod_{j=1}^i \frac{N_j - 1}{N_j}; \quad i = \overline{1, r},$$

где N_j – количество работоспособных изделий до j -го отказа в вариационном ряду.

Для планов $[NUM]$, $[NUr]$ и $[NUT]$ эта формула переходит в следующую:

$$\hat{F}(t_j) = i / N; \quad i \leq m,$$

где m – номер последнего отказа в вариационном ряду.

Вычисляют точечные оценки показателей надежности по формулам, приведенным ниже.

Оценка средней наработки до отказа, среднего ресурса (срока службы, срока сохраняемости, времени восстановления):

– для плана $[NUM]$:

$$\hat{T}_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i;$$

– для планов $[NUr]$ и $[NUT]$:

$$\hat{T}_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^m t_j}{m} + \frac{N - m}{m} t_m;$$

– для плана [NUZ]:

$$\hat{t}_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^r t_i \Delta F(t_i) + \max(t_r, \tau_n) [1 - F(t_r)],$$

где $\Delta F(t_i) = \hat{F}(t_i) - \hat{F}(t_{i-1})$; $t_0 = 0$; $\hat{F}(t_0) = 0$.

Среднее время восстановления оценивают для плана [NUM].

Оценка гамма-процентной наработки, гамма-процентного ресурса (срока службы, срока сохраняемости):

$$\hat{t}_{\gamma} = t_{i-1} + d_1(t_i - t_{i-1}),$$

где $\hat{F}(t_{i-1}) < 1 - \frac{\gamma}{100} < \hat{F}(t_i)$, $d_1 = \frac{1 - \gamma/100 - \hat{F}(t_{i-1})}{\hat{F}(t_i) - \hat{F}(t_{i-1})}$.

Если выполнено одно из условий $1 - \frac{\gamma}{100} = \hat{F}(t_{i-1})$ или

$1 - \frac{\gamma}{100} = \hat{F}(t_i)$, то $\hat{t}_{\gamma} = t_{i-1}$ или $\hat{t}_{\gamma} = t_i$.

Оценка вероятности безотказной работы за наработку t .

$$\hat{P}(t) = 1 - \hat{F}(t_{i-1}) - d_2[\hat{F}(t_i) - \hat{F}(t_{i-1})],$$

где $t_{i-1} < t < t_i$, $d_2 = \frac{t - t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$.

Если выполнено одно из условий $t = t_{i-1}$ или $t = t_i$, то $\hat{P}(t) = 1 - \hat{F}(t_{i-1})$ или $\hat{P}(t) = 1 - \hat{F}(t_i)$.

Точечные оценки вероятности безотказной работы и гамма-процентной наработки до отказа вычисляются только на интервале $[0; t_m]$.

Доверительные границы для средней наработки до отказа, среднего ресурса (срока службы, сохраняемости, времени восстановления):

– нижняя доверительная граница:

$$\underline{I}_{\text{cp}} = \hat{T}_{\text{cp}} - U_q \sqrt{\sum_{i=1}^r \frac{\Delta F(t_i)}{r} (t_i - \hat{T}_{\text{cp}})^2};$$

– верхняя доверительная граница:

$$\bar{T}_{\text{cp}} = \hat{T}_{\text{cp}} + U_q \sqrt{\sum_{i=1}^r \frac{\Delta F(t_i)}{r} (t_i - \hat{T}_{\text{cp}})^2},$$

где U_q – квантиль нормального распределения, соответствующая вероятности q .

Доверительные границы для гамма-процентных показателей:

$$\underline{I}_\gamma = t_{i-1} + d_3(t_i - t_{i-1}); \quad t_0 = 0; \quad \bar{F}(t_{i-1}) < 1 - \gamma/100 < \bar{F}(t_i);$$

$$\bar{F}(t_i) = \frac{\chi_q^2[2(r_i + 1)]}{2N - r_i + 0,5\chi_q^2[2(r_i + 1)]};$$

$$d_3 = \frac{1 - \Phi/100 - \bar{F}(t_{i-1})}{\bar{F}(t_i) - \bar{F}(t_{i-1})};$$

$$\bar{T}_\gamma = t_{i-1} + d_4(t_i - t_{i-1}); \quad t_0 = 0; \quad \underline{F}(t_{i-1}) < 1 - \gamma/100 < \underline{F}(t_i);$$

$$\underline{F}(t_i) = \frac{\chi_{1-q}^2[2(r_i)]}{2N - r_i + 1 + 0,5\chi_{1-q}^2(2r_i)};$$

$$d_4 = \frac{1 - \Phi/100 - \underline{F}(t_{i-1})}{\underline{F}(t_i) - \underline{F}(t_{i-1})},$$

где $\chi_q^2(l)$ – квантиль Хи-квадрат распределения с числом степеней свободы l , соответствующая вероятности q .

Для плана $[NUZ]$

$$r_i = \{N \cdot \hat{F}(t_i)\},$$

где $\{x\}$ – целая часть x .

Если выполнено одно из условий $1 - \gamma/100 < \bar{F}(t_{i-1})$; $1 - \gamma/100 < \bar{F}(t_i)$, $1 - \gamma/100 < \underline{F}(t_{i-1})$ или $1 - \gamma/100 < \underline{F}(t_i)$, то $\underline{T}_\gamma = t_{i-1}$; $\underline{T}_\gamma = t_i$; $\bar{T}_\gamma = t_{i-1}$ или $\bar{T}_\gamma = t_i$ соответственно.

Доверительные границы для вероятности безотказной работы за наработку t :

$$\underline{P}(t) = 1 - \bar{F}(t_{i-1}) - d_2[\bar{F}(t_i) - \bar{F}(t_{i-1})]; \quad t_{i-1} < t < t_i; \quad t < t_m;$$

$$\bar{P}(t) = 1 - \underline{F}(t_{i-1}) - d_2[\underline{F}(t_i) - \underline{F}(t_{i-1})]; \quad t_{i-1} < t < t_i; \quad t < t_m.$$

Если выполнено одно из условий $t = t_{i-1}$ или $t = t_i$, то $\underline{P}(t) = 1 - \bar{F}(t_i)$ или $\bar{P}(t) = 1 - F(t_i)$ соответственно.

Для планов $[NMr]$ и $[NMl]$ точечную оценку средней наработки на отказ вычисляют по формуле $\hat{T}_0 = S/m$, где S – суммарная наработка изделий за время испытаний.

Интервальные оценки средней наработки на отказ вычисляют приближенно [11].

Для планов испытаний типа $[NM...]$ точечную оценку коэффициента готовности вычисляют по формуле

$$\hat{K}_r = T_0 / (T_0 + T_B),$$

где T_0 и T_B – оценки средней наработки на отказ и среднего времени восстановления.

Интервальные оценки коэффициента готовности вычисляются по формулам:

$$\underline{K}_r = \left(1 + \frac{\hat{t}_0 \hat{t}_B + U_q \sqrt{\hat{t}_0^2 \frac{\hat{S}_B^2}{m} + T_B^2 \frac{\hat{S}^2}{m} - U_q^2 \frac{S_B^2 \hat{S}^2}{m^2}}}{T_0^2 - U_q^2 \frac{\hat{S}^2}{m}} \right)^{-1}$$

$$\overline{K}_r = \left(1 + \frac{\hat{t}_0 \hat{t}_B + U_{1-q} \sqrt{\hat{t}_0^2 \frac{\hat{S}_B^2}{m} + T_B^2 \frac{\hat{S}^2}{m} - U_{1-q}^2 \frac{S_B^2 \hat{S}^2}{m^2}}}{T_0^2 - U_{1-q}^2 \frac{\hat{S}^2}{m}} \right)^{-1};$$

где $\hat{S}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (t_i - \hat{t}_0)^2$; $\hat{S}_B^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (t_{B,i} - \hat{t}_B)^2$.

Пример

По результатам испытаний по плану [NUZ] получены следующие исходные данные для оценки показателей надежности:

– 10 выборочных значений наработки до отказа t (тыс. км): 25; 59; 61; 65; 79; 98; 109; 118; 153; 195;

– 10 выборочных значений наработки до цензурирования τ (10 изделий осталось в работоспособном состоянии к моменту окончания испытаний): 36; 48; 71; 85; 88; 102; 129; 138; 156; 200.

Определить точечные оценки средней наработки до отказа \hat{t}_{cp} ; вероятности безотказной работы за 72 тыс. км $\hat{P}(72)$ и с доверительной вероятностью $q = 0,8$ нижние доверительные границы \underline{I}_{cp} и $\underline{P} = (72)$.

Решение

Наработки до отказа и наработки до цензурирования выстраивают в общий вариационный ряд в порядке неубывания наработок (наработки до цензурирования помечены *): 25; 36*; 48*; 59; 61; 65; 71*; 79; 85*; 88*; 98; 102*; 109; 118; 129*; 138*; 153; 156*; 195; 200*.

Вычисляют оценку функции распределения $\hat{F}(t)$:

$$\hat{F}(t_1) = \hat{F}(25) = 1 - \frac{N_1 - 1}{N_1} = 1 - \frac{20 - 1}{20} = 0,050;$$

$$\hat{F}(t_2) = \hat{F}(59) = 1 - \frac{N_1 - 1}{N_1} \cdot \frac{N_2 - 1}{N_2} = 1 - \frac{20 - 1}{20} \cdot \frac{17 - 1}{17} = 0,106;$$

$$\begin{aligned} \hat{F}(t_3) = \hat{F}(61) &= 1 - \frac{N_1 - 1}{N_1} \cdot \frac{N_2 - 1}{N_2} \cdot \frac{N_3 - 1}{N_3} = \\ &= 1 - \frac{20 - 1}{20} \cdot \frac{17 - 1}{17} \cdot \frac{16 - 1}{16} = 0,162; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{F}(t_4) = \hat{F}(65) &= 1 - \frac{N_1 - 1}{N_1} \cdot \frac{N_2 - 1}{N_2} \cdot \frac{N_3 - 1}{N_3} \cdot \frac{N_4 - 1}{N_4} = \\ &= 1 - \frac{20 - 1}{20} \cdot \frac{17 - 1}{17} \cdot \frac{16 - 1}{16} \cdot \frac{15 - 1}{15} = 0,218; \end{aligned}$$

Аналогично подсчитывают:

$$\hat{F}(t_5) = \hat{F}(79) = 0,278;$$

$$\hat{F}(t_6) = \hat{F}(98) = 0,350;$$

$$\hat{F}(t_7) = \hat{F}(109) = 0,431;$$

$$\hat{F}(t_8) = \hat{F}(118) = 0,513;$$

$$\hat{F}(t_9) = \hat{F}(153) = 0,634;$$

$$\hat{F}(t_{10}) = \hat{F}(195) = 0,817.$$

Зависимость $\hat{F}(t)$ представляет собой ступенчато возрастающую функцию (рис. 1).

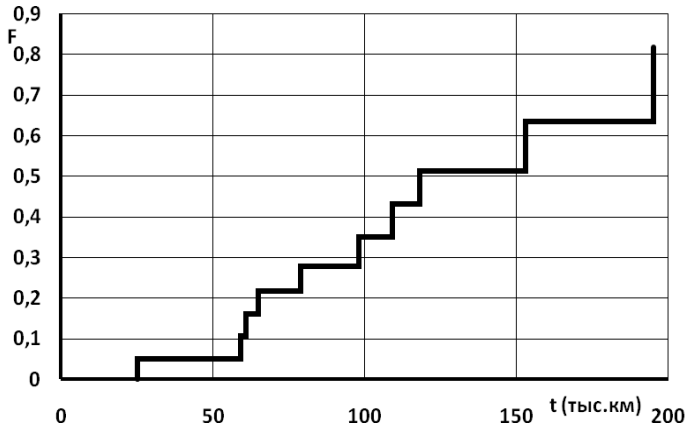


Рис. 1. Оценка функции распределения

Вычисляют точечные оценки $\hat{t}_{\text{ср}}$ и $\hat{P}(t)$:

$$\hat{t}_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^r t_i [\hat{F}(t_i) - \hat{F}(t_{i-1})] + [1 - \hat{F}(t_r)] \cdot z_{\text{max}}$$

Здесь $z_{\text{max}} = \max(195; 200) = 200$.

$$\begin{aligned} \hat{t}_{\text{ср}} = & 25(0,050 - 0) + 59(0,106 - 0,05) + 61(0,162 - 0,106) + \\ & + 65(0,218 - 0,162) + 79(0,278 - 0,218) + 98(0,350 - 0,278) + \\ & + 109(0,431 - 0,350) + 118(0,513 - 0,413) + 153(0,634 - 0,513) + \\ & + 195(0,817 - 0,634) + 200(1 - 0,817) = 134 \text{ (тыс. км)}. \end{aligned}$$

Вычисляют нижнюю доверительную границу для средней наработки до отказа:

$$T_{cp} = T_{cp} - U_q \sqrt{\sum_{i=1}^r \frac{\Delta F(t_i)}{r} (t_i - T_{cp})^2} = 134 - 0,85 \times$$

$$\times \left\{ \frac{1}{10} [(25-134)^2 \cdot 0,05 + (52-134)^2 \cdot 0,056 + (61-134)^2 \cdot 0,056 + \right.$$

$$+ (65-134)^2 \cdot 0,056 + (79-134)^2 \cdot 0,06 + (98-134)^2 \cdot 0,072 +$$

$$+ (109-134)^2 \cdot 0,81 + (118+134)^2 \cdot 0,1 + (153-134)^2 \cdot 0,121 +$$

$$\left. + (195-134)^2 \cdot 0,183] \right\}^{\frac{1}{2}} = 120 \text{ (тыс. км)}.$$

Вычисляют нижнюю доверительную границу для вероятности безотказной работы:

$$\underline{P}(72) = 1 - \bar{F}(t_4) - d_2 [F(t_5) - F(t_4)];$$

$$\bar{F}(t_4) = \bar{F}(65) = \frac{\chi_{0,8}^2 [2 \cdot \{20 \cdot 0,218\} + 2]}{2 \cdot 20 - \{20 \cdot 0,218\} + 0,5 \chi_{0,8}^2 [2 \cdot \{20 \cdot 0,218\} + 2]} =$$

$$= \frac{\chi_{0,8}^2(10)}{40 - 4 + 0,5 \chi_{0,8}^2(10)} = \frac{13,477}{40 - 4 + 0,5 \cdot 13,477} = 0,315;$$

$$\bar{F}(t_5) = \bar{F}(79) = \frac{\chi_{0,8}^2 [2 \cdot \{20 \cdot 0,278\} + 2]}{2 \cdot 20 - \{20 \cdot 0,278\} + 0,5 \chi_{0,8}^2 [2 \cdot \{20 \cdot 0,278\} + 2]} =$$

$$= \frac{\chi_{0,8}^2(13)}{40 - 5 + 0,5 \chi_{0,8}^2(13)} = \frac{13,477}{40 - 5 + 0,5 \cdot 16,981} = 0,3901;$$

$$\underline{P}(72) = 1 - 0,315 - 0,5(0,390 - 0,315) = 0,647.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Анилович, В.Я. Прогнозирование надежности тракторов / В.Я. Анилович, А.С. Гринченко, В.Л. Литвиненко. – М.: Машиностроение, 1986.
2. Аронов, И.З. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний / И.З. Аронов, Е.И. Бурдасов. – М.: Издательство стандартов, 1987.
3. Беляев, Ю.К. Статистические методы обработки результатов испытаний на надежность / Ю.К. Беляев. – М.: Знание, 1982.
4. Лукинский, В.С. Прогнозирование надежности автомобилей / В.С. Лукинский, Е.И. Зайцев. – Л.: Политехника, 1991.
5. Решетов, Д.Н. Надежность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. – М.: Высшая школа, 1988.
6. Ротенберг, Р.В. Основы надежности системы «водитель–автомобиль–дорога–среда» / Р.В. Ротенберг. – М.: Машиностроение, 1986.
7. Проников, А.С. Параметрическая надежность машин / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 2002.
8. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1990.
9. ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции. Надежность в технике. Основные термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1990.
10. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. – М.: Издательство стандартов, 1988.
11. РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. – М.: Издательство стандартов, 1990.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Функция нормального распределения

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-y^2/2} dy$$

<i>x</i>	0,	1,	2,	3,
,00	0,500	0,841	0,9777	0,9 ² 865
,05	520	853	789	886
,10	540	864	821	0,9 ³ 032
,15	560	875	842	184
,20	573	885	861;	313
,25	599	894	878	423
,30	618	0,9032	893	517
,35	637	115	906	596
,40	655	192	0,9 ² 180	663
,45	674	265	286	720
,50	692	332	379	767
,55	709	394	461	807
,60	726	452	534	841
,65	742	505	589	860
,70	758	554	653	892
,75	773	599	702	912
,80	788	641	745	0,9 ⁴ 277
,85	802	678	781	409
,90	816	713	8ГЗ	519
,95	829	744	841	609

Примечание. Символ 0,9^{ka} означает (0,99...9a)/k соответственно.
Например, 0,9⁴277 = 0,9999277.

Таблица П2

m	$\chi^2_{P(m)}$ при P												
	0,01	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,96	0,99
2	0,023	0,102	0,21	0,445	0,711	1,023	1,383	1,836	2,414	3,227	4,602	5,992	9,211
4	0,305	0,711	1,04	1,643	2,195	2,758	3,352	4,039	4,883	5,992	7,773	9,492	13,273
6	0,87,2	1,635	2,204	3,064	3,826	4,564	5,350	6,205	7,236	8,561	10,645	12,592	16,812
8	1,646	2,733	3,490	4,586	5,523	6,430	7,352	8,352	9,523	11,023	15,362	13,507	20,090
10	2,558	3,940	4,865	6,182	7,275	8,291	9,346	10,479	11,787	13,447	15,987	18,307	23,209
12	3,571	5,226	6,304	7,811	9,029	10,178	11,338	12,580	14,010	15,814	18,549	21,026	26,217
14	4,660	6,571	7,790	9,468	10,821	12,079	13,337	14,690	16,222	18,149	21,064	23,685	29,141
16	5,812	7,962	9,312	11,148	12,617	13,977	16,336	16,773	18,414	20,461	23,542	26,296	32,000
18	7,015	9,390	10,868	12,858	14,440	15,899	17,341	18,870	20,593	22,755	25,939	28,869	34,805
20	8,260	10,851	12,443	14,580	16,260	17,803	19,436	20,947	22,763	25,029	28,412	31,410	37,566
22	9,542	12,338	14,041	16,312	18,106	19,728	21,339	23,026	24,938	27,301	30,813	33,924	40,289
24	10,856	13,848	15,659	18,064	19,939	21,650	23,338	25,107	27,100	29,549	33,196	36,415	42,980
26	12,198	15,379	17,292	19,824	21,792	23,582	25,333	27,174	29,244	31,795	35,563	38,885	45,042
28	13,565	16,928	18,939	21,595	23,646	25,505	27,337	29,251	31,397	34,022	37,916	41,337	48,278
30	14,953	18,493	20,599	23,357	25,510	27,444	29,333	31,311	33,523	36,248	40,256	43,773	50,892
32	16,362	20,072	21,271	25,148	27,367	29,383	31,336	33,383	35,664	38,461	42,585	46,194	53,486
34	17,789	21,664	23,952	26,936	29,244	31,319	33,328	35,436	37,793	40,682	44,903	48,602	56,061
36	19,233	23,269	25,643	28,731	31,122	33,249	35,311	37,503	39,929	42,582	47,212	50,998	58,619
38	20,691	24,884	27,343	30,537	33,000	35,189	37,341	39,568	42,036	45,079	49,513	53,384	61,162
40	22,164	26,509	29,051	32,354	34,873	37,139	39,326	41,631	44,170	47,275	51,805	55,758	63,691
42	23,650	28,144	30,765	34,161	36,755	39,073	41,339	43,677	46,181	49,460	54,090	58,124	66,206
44	25,148	29,787	32,487	35,970	38,645	41,019	43,339	45,735	48,399	51,643	56,369	60,481	68,710
46	26,657	31,439	34,215	37,796	40,525	42,973	45,332	47,791	50,509	52,822	58,641	62,830	71,201
48	28,177	33,098	35,949	39,615	42,416	44,912	46,338	49,846	52,611	55,998	60,907	65,171	74,683
50	29,707	34,764	37,689	41,449	44,318	46,869	49,335	51,886	54,718	58,160	63,167	67,505	76,154
52	31,246	36,437	39,433	43,285	46,205	48,807	51,333	53,936	56,831	60,334	65,422	69,832	78,616
54	31,793	38,116	41,183	45,121	48,100	50,763	53,334	55,997	58,924	62,497	67,673	72,153	81,069
56	34,350	39,801	42,937	46,956	50,005	52,712	55,337	58,014	61,024	64,661	69,919	74,468	83,513

Продолжение табл. П2

m	$\chi^2_{P(m)}$ при P												
	0,01	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,96	0,99
58	35,913	41,492	44,696	48,801	51,904	54,665	57,342	60,089	63,133	66,815	72,160	76,778	85,950
60	37,485	43,188	46,459	50,647	53,811	56,246	59,333	62,131	65,222	68,972	74,397	79,082	88,379
62	39,063	44,899	48,226	52,487	55,711	58,572	61,342	64,187	67,321	71,120	76,680	81,381	80,802
64	40,649	46,595	49,996	54,336	57,617	60,523	63,336	66,227	69,414	73,273	78,860	83,675	93,217
66	42,240	48,305	51,770	56,195	59,531	62,479	65,331	68,264	71,503	75,418	81,085	85,965	95,626
68	43,868	50,020	53,548	58,047	61,434	64,438	67,438	70,316	73,803	77,571	83,803	88,250	95,028
70	45,442	61,739	55,329	59,891	63,344	66,403	69,342	72,350	75,682	79,716	85,527	90,531	100,43
72	47,051	53,462	57,113	61,761	65,259	68,353	71,341	74,399	77,774	81,853	87,743	92,808	102,82
74	48,666	55,189	88,900	63,621	67,162	70,305	70,305	73,341	76,448	79,863	84,000	89,956	105,20
76	50,286	56,920	60,690	65,470	69,088	72,261	75,341	78,477	81,947	88,140	92,166	97,351	107,58
78	51,910	58,654	62,483	67,345	71,002	74,220	77,343	80,523	84,027	88,274	94,374	99,617	109,98
80	53,540	60,391	64,278	69,209	72,920	76,182	79,326	82,568	86,153	90,400	96,578	101,88	112,33
82	55,174	62,132	66,076	71,074	74,828	78,151	81,334	84,808	88,201	92,535	98,780	104,14	114,70
84	56,813	63,876	67,876	72,941	76,756	80,109	83,339	86,651	90,281	94,663	100,98	106,40	117,06
86	58,456	65,723	69,679	74,814	78,667	82,068	85,333	88,682	92,367	96,797	103,18	108,65	119,41
88	60,103	67,373	71,484	76,683	80,593	84,031	87,339	90,723	94,440	98,930	105,37	110,90	121,77
90	61,754	69,126	73,291	78,558	82,513	85,995	89,335	92,763	96,520	101,06	107,57	113,15	124,12
92	63,409	70,882	75,100	80,438	84,436	87,951	91,332	94,802	98,598	103,18	109,76	115,39	126,46
94	65,068	72,640	76,912	82,313	86,352	89,921	93,329	96,840	100,68	105,31	111,94	117,63	128,80
96	66,730	74,701	78,725	84,182	88,283	91,881	95,338	98,877	102,76	107,42	114,13	119,87	131,14
98	68,396	76,164	80,541	86,067	90,206	93,843	97,336	100,91	104,82	109,55	116,32	122,11	133,48
100	70,065	77,929	82,358	87,946	92,133	95,807	99,335	102,95	106,90	111,66	118,50	124,34	135,81
110	73,458	86,792	91,471	97,358	101,76	105,63	109,33	113,12	122,25	117,27	129,39	135,48	147,41
120	86,923	95,705	100,62	106,81	111,42	115,47	119,33	127,61	132,81	140,23	146,57	158,95	146,57
130	95,451	101,66	109,81	116,26	121,09	125,31	129,34	133,45	137,94	151,05	143,34	157,61	170,42
140	104,03	113,66	119,03	125,76	130,76	135,14	139,32	143,60	148,26	153,85	161,83	168,61	181,84
150	112,67	122,69	128,28	135,21	140,45	144,09	149,34	153,74	158,58	164,35	172,58	179,58	193,21
200	156,43	168,28	174,84	183,00	189,04	194,32	199,33	204,42	209,98	216,58	226,02	233,90	249,45

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Общие положения.....	3
2. Показатели надежности.....	5
3. Испытания на надежность.....	10
4. Оценка показателей надежности.....	15
4.1. Исходная информация для оценки показателей надежности.....	15
4.2. Методы оценки показателей надежности.....	16
4.3. Оценка показателей надежности непараметрическими методами.....	17
Литература.....	26
Приложение.....	27

Учебное издание

**НАДЕЖНОСТЬ ТЯГОВЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН.
ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ
ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ**

Методические указания
по выполнению практических работ для студентов
специальности 1-37 01 03 «Тракторостроение»,
1-37 01 04 «Многоцелевые гусеничные и колесные машины»

Составители:

ГРИБКО Геннадий Поликарпович
ПОВАРЕХО Александр Сергеевич
РАХЛЕЙ Андрей Иванович
КАРПИЕВИЧ Юрий Дмитриевич

Редактор Т.А. Подолякова
Компьютерная верстка Д.А. Исаева

Подписано в печать 20.09.2010.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,80. Уч.-изд. л. 1,41. Тираж 100. Заказ 336.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.