

## ПАКЕТ ПРОГРАММ «НАДЕЖНОСТЬ» ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ

С.В. Ремизов  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

*Предлагаемый пакет программ «Надёжность» позволяет решать широкий спектр задач по определению надёжностных характеристик изделий на основе статистической обработки данных с использованием различных законов надёжности. Кроме того, пакет программ «Надёжность» может быть использован при проведении анализа методик и моделей, используемых при расчётах надёжности, в частности, для получения оценки правдоподобия различных гипотез, выдвигаемых при обработке данных. Простой и интуитивно понятный интерфейс предлагаемого пакета позволяет работать с ним даже пользователям, не имеющим опыта программирования.*

**Ключевые слова:** оценка надёжности, пакет программ, моделирование, статистические данные, функции распределения.

### Введение

Одним из важных этапов при создании современной аппаратуры является вычисление надёжностных характеристик как для всей системы в целом, так и для отдельных её компонентов. Это позволяет выявить «слабые места» и предложить мероприятия по увеличению надёжности работы разрабатываемых систем.

В общем случае задача вычисления надёжностных характеристик довольно сложна. В настоящее время существует ряд программных пакетов, которые можно применить для решения этой задачи: популярные и широко известные универсальные программы для математических расчетов, такие как MatLab (разработчик Mathworks, <http://www.mathworks.com/>), Maple (разработчик Maplesoft, <http://www.maplesoft.com/>), Mathematica (разработчик Wolfram Research, Inc; <http://www.wolfram.com/>), MatCad (разработчик Mathsoft Engineering & Education, Inc, <http://ptc.com/>), и более узкоспециализированные пакеты для статистических расчетов, например, Statistica (разработчик StatSoft, <http://www.statsoft.com/>). Помимо довольно высокой цены для всех этих пакетов, характерно использование собственного языка программирования, что требует от пользователя довольно большого времени на его освоение.

Предлагаемая нами программа «Надёжность» имеет достаточно простой и интуитивно понятный графический интерфейс и, хотя и не предполагает наличия у пользователя опыта программирования, в то же время позволяет решать широкий спектр задач, связанных с надёжностью. В частности, с её помощью возможно: вычисление параметров для произвольных функций распределения по имеющимся статистическим данным (при этом у пользователя есть возможность как воспользоваться встроенными в программу несколькими десятками распространен-

ных функций, так и задавать функцию самостоятельно); моделирование статистических данных на основе произвольных функций распределения, например, с целью изучения применимости различных критериев оценки надёжности (в том числе предусмотрена работа с цензурированными выборками); наглядное представление полученных результатов с помощью встроенной возможности отображения графиков с автоматическим масштабированием, в том числе для нескольких функций одновременно; возможность экспорта и импорта данных с использованием обычных текстовых файлов. Это позволяет использовать программу «Надёжность» совместно с практически любыми другими пакетами для статистической обработки данных.

К достоинствам пакета «Надёжность» следует отнести:

- универсальность. Пакет, имея в своем составе библиотеку, состоящую из более 40 известных математических функций распределения, создан с учётом различных моделей отказов изделий, реализация которых возможна при длительной эксплуатации. Кроме того, для пользователя имеется возможность, по желанию, пополнять используемую в пакете библиотеку функций распределения по своему усмотрению;
- возможность обработки разнородной информации о наработках изделий и получение эмпирической оценки надёжности:

- вероятности безотказной работы  $P(t)$ ;
- плотности распределения  $f(t)$ ;
- интенсивности отказов  $\lambda(t)$ ;

- возможность определения оптимального времени тренировки элементов и изделий, так как на оценку надёжности по результатам испытаний в большой степени влияет предварительная отработка (тренировка) элементов, блоков.

При создании пакета «Надёжность» мы использовали самые современные из известных нам алгоритмов для таких ресурсоемких задач как

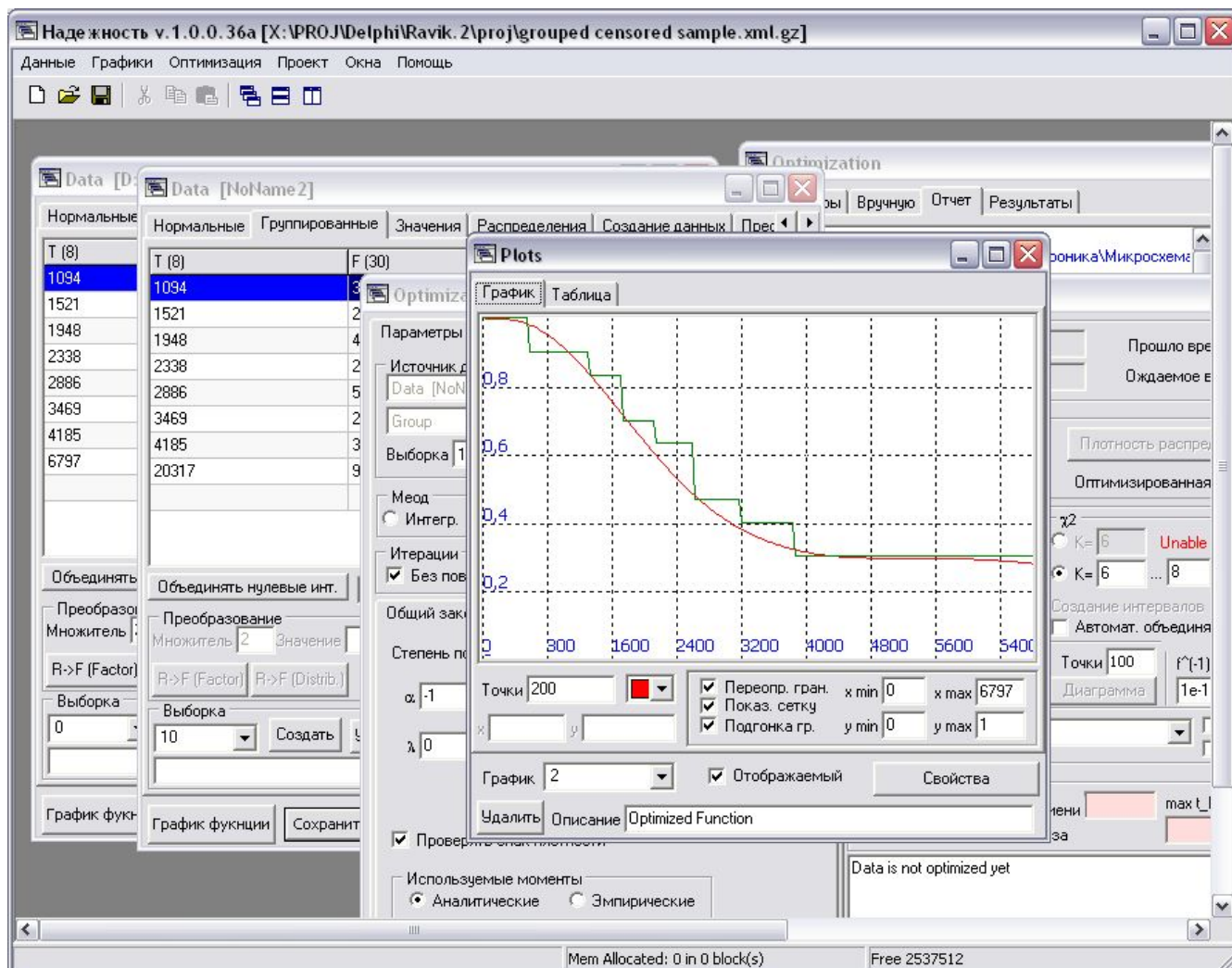


Рис. 1. Главное окно программы. В проекте одновременно открыто несколько модулей хранения и оптимизации данных

сортировка данных и вычисления спецфункций, что совместно с оптимизацией кода позволило достичь достаточно большой скорости и точности вычислений.

### Структура пакета «Надёжность»

Для достижения максимальной гибкости и простоты в использовании, а также для облегчения расширения возможностей программы в будущем нами была выбрана модульная структура. Мы выделили три функционально различных типа модулей:

- модуль для хранения статистических данных для обработки;
- вычислительный модуль для обработки данных;
- модуль для отображения результатов в виде графиков или таблиц.

Программа «Надёжность» составлена таким образом, чтобы проект мог содержать произвольное

количество модулей произвольного типа, при этом каждому модулю соответствует свое окно в интерфейсе программы. Такой подход позволяет довольно просто решать как задачу по обработке одних и тех же данных различными методами, так и применять один и тот же метод обработки для различных данных и в обоих случаях наглядно представлять полученные результаты для сравнения. Кроме того, существует возможность одновременной параллельной работы нескольких задач по обработке данных, что может оказаться полезным на современных компьютерах с многоядерными процессорами.

Совокупность используемых пользователем модулей для хранения исходных данных, методов их обработки, а также полученные промежуточные и конечные результаты образуют проект. Хотя в любой момент времени программа «Надёжность» мо-

жет работать только с одним проектом, это не накладывает каких-либо серьезных ограничений на возможности программы по обработке данных. Особое внимание было уделено тому, чтобы пользователь мог полностью сохранить текущее состояние проекта, и в последствии продолжить работу с данными ровно с того места, где он остановился, не производя заново каких-либо вычислений или выполняя какие-либо иные вспомогательные действия.

### Модуль для хранения данных

В программе «Надежность» предусмотрена возможность работы с различными видами исходных статистических данных. В частности, поддерживается работа со следующими типами выборок:

- с *нормальной выборкой*, которая представляет собой наработки до отказа, безотказные наработки или их смесь и задается таблицей из двух столбцов: времени, когда произошло событие, и типа события – снятие образца с испытаний, обозначаемое буквой «R» или отказ, обозначаемый буквой «F»;
- с *группированной выборкой*, которая представляет собой сгруппированные данные, включая усеченные.

Предполагается, что интервалы, на которых заданы данные, примыкают непосредственно вплотную друг к другу без пропусков, поэтому достаточно задать только их правые границы, поскольку левые границы легко вычисляются автоматически, как правая граница предыдущего интервала или 0 для самого первого интервала. Таким образом, для полного описания данных этого типа достаточно задать таблицу из трех столбцов: правая граница интервала и число отказов и снятий на соответствующем интервале.

*ЭФР* служит для задания эмпирической функции распределения (ЭФР), которую может задать пользователь самостоятельно, «по точкам».

Для удобства обработки нескольких однотипных выборок, для каждого из перечисленных выше типов данных можно сформировать пакет, к каждой выборке которого впоследствии можно применить заданную пользователем методику обработки и на выходе получить таблицу с параметрами функции распределения (ФР) для каждой выборки, среднюю величину для каждого параметра, дисперсию и т.п.

Для исследования правдоподобия различных гипотез, выдвигаемых при статистической обработке данных, модуль для хранения данных был расширен путем введения следующих дополнений:

- *ФР*, служащей для явного задания закона распре-

деления и его параметров. При этом могут использоваться как встроенные, так и задаваемые пользователем функции распределения;

- *генерации данных*, служащей для создания нормальных или группированных выборок в соответствии с заданным пользователем законом распределения. Эта возможность может оказаться полезной для сравнения результатов, полученных при использовании различных методик обработки данных, с целью выбора наиболее предпочтительной методики в том или ином случае;

- *преобразования данных*, служащей для модификации нормальных данных по задаваемому пользователем закону и получения на основе этого данных для регрессии;

- *регрессии*, служащей для проведения регрессионного анализа данных и построения регрессионной таблицы.

### Модуль для обработки данных

Данный модуль предназначен непосредственно для выполнения расчетов по определению надежных характеристик на основании различных законов надежности.

Оценка параметров функций распределений в программе «Надежность» может осуществляться как методом наименьших квадратов, так и методом максимального правдоподобия.

Наряду с возможностью воспользоваться Общим законом надежности, основанном на разложении плотности распределения по обобщенным ортогональным полиномам Лагерра, предложенным в [1 – 4], существует возможность воспользоваться также и другими функциями распределения как встроенными в программу (таблица), так и произвольными, задаваемыми пользователем по своему усмотрению.

В программе имеется три способа определения аналитических моментов ЭФР, основанных на методе наименьших квадратов:

- *дискретный*. При использовании этого способа приближение ЭФР осуществляется в моменты отказов изделий. Хотя этот способ и является наиболее точным и потому более предпочтительным, вычисления могут занять достаточно много времени;

- *равномерный*. Для применения этого способа необходимо задать число точек разбиения по оси  $t$ . Приближение ЭФР осуществляется по получившейся равномерной сетке;

- *интегральный*. В этом случае приближение ЭФР осуществляется на всем временном интервале и моменты считаются с помощью численного интегрирования соответствующих выражений.

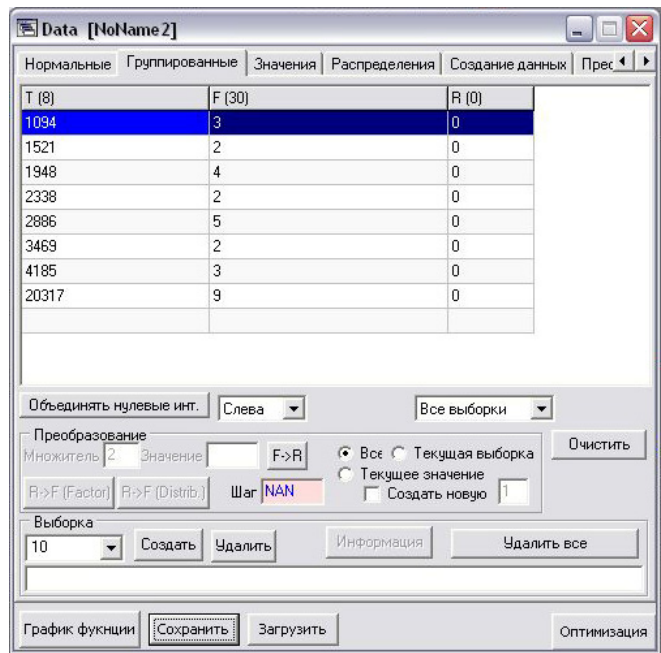


Рис. 2. Интерфейс модуля хранения данных

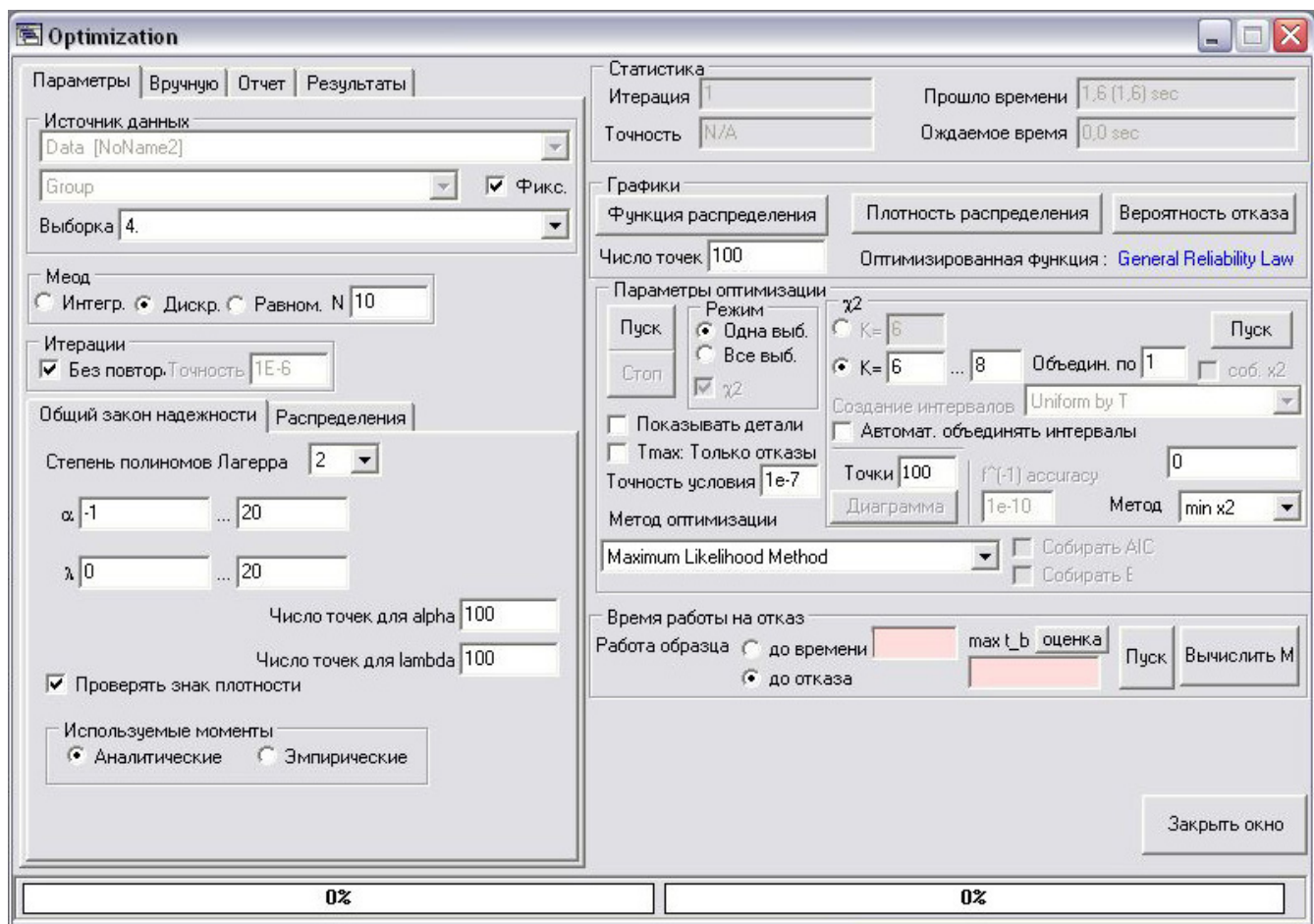


Рис. 3. Интерфейс модуля обработки выборок

## Основные распределения, встроенные в программу «Надёжность»

Закон надежности	Функция распределения, $t > 0$
Экспоненциальное распределение	$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right)$
Распределение Вейбулла	$P(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^k\right)$
Нормальное распределение	$P(t) = 1 - \operatorname{Erf}\left(\frac{t}{\sqrt{2}\sigma}\right)$
Логнормальное распределение	$P(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{Erf}\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right)$
Гамма-распределение	$P(t) = 1 - \frac{1}{\Gamma(k)\lambda^k} \int_0^t x^{k-1} e^{-x/\lambda} dx$
Распределение Гомпреца-Мейкема	$P(t) = \exp\left(-t/\lambda_1 - A(e^{t/\lambda_2} - 1)\right)$
Обратное распределение Гаусса	$P(t) = 1 - \int_0^t \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi x^3}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2 \lambda}{2x\mu^2}\right) dx$
Распределение Парето	$P(t) = \begin{cases} 1, & t > A \\ \left(\frac{A}{t}\right)^k, & t > A \end{cases}$
Гиперболическое распределение	$P(t) = \left(\frac{A}{t+A}\right)^k$
Логарифмически-логистическое распределение	$P(t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{\lambda}\right)^k}$
Модель Хьерта	$P(t) = \exp\left(-\frac{At^2}{2}\right) (1 + t/\lambda)^{B\lambda}$

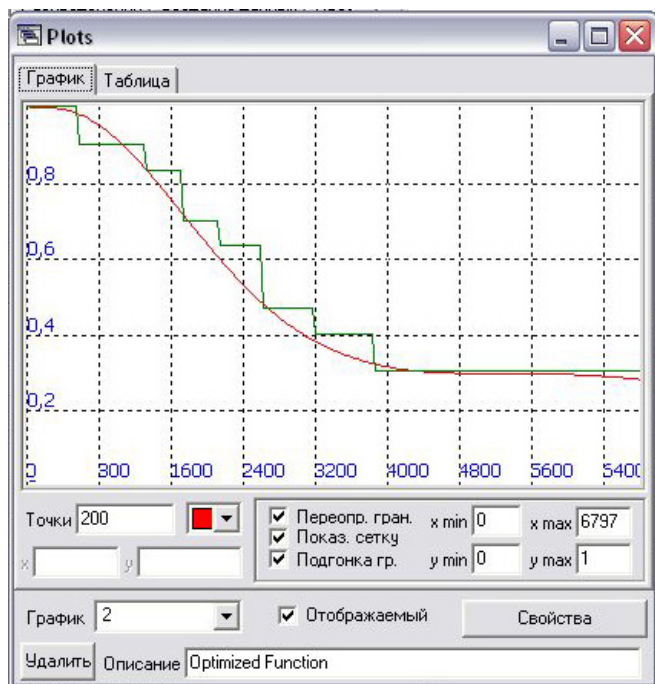
Для нахождения оптимального набора параметров ЭФР может использоваться два способа:

- полный перебор значений параметров, который осуществляется по сетке, которая, в свою очередь, строится на основе заданных для каждого параметра максимального, минимального значения и шага. Для удобства пользователя предусмотрена итерационная процедура поиска, которая автоматически выбирает шаг, а также максимальное и минимальное значения на каждой итерации и продолжает процесс в автоматическом режиме пока при поиске параметров не будет достигнута точность, задаваемая пользователем;
- метод главных направлений, который может использоваться, если число параметров ЭФР больше 1. Ис-

пользование этого способа существенно уменьшает время поиска оптимальных значений параметров ЭФР.

Чтобы доказать адекватность гипотетической функции распределения опытным данным, используются критерии согласия. Однако на практике имеют место случаи, когда некоторые гипотетические функции распределения не отвергаются критериями согласия. В этих случаях в пакете «Надёжность» предусмотрена возможность использовать другие критерии для отбора наилучшей модели:

- критерий минимума  $\chi^2$ ;
- информационный критерий АИС;
- ПСКО (приведенный среднеквадратичный критерий для усеченной выборки).



**Рис. 4. Интерфейс модуля построения графиков. Показана возможность наложения гистограммы, соответствующей обрабатываемой выборке и кривой, полученной в результате её обработки**

Предложенные критерии  $\chi^2$  и ПСКО позволяют проанализировать новые математические модели и отобрать из них наилучшие, что позволяет довольно точно определить оптимальное время приработки (тренировки) изделий.

#### Модуль для графического отображения результатов

Данный модуль служит для визуальной оценки качества полученного результата вычислений на основе его графического представления.

Основной частью интерфейса данного модуля является поле для отображения графической информации, на котором результаты обработки исходных данных в виде выбранной пользователем плотности или функции распределения с вычисленными параметрами могут быть отображены в виде графика. Кроме того, в программе имеется возможность отображать исходные статистические данные графически в виде диаграммы, описывающей интенсивности отказов, что полезно для оценки качества приближения статистических данных различными функциями распределения.

Пользователю предоставляется возможность наложения нескольких графиков друг на друга, при этом наряду с режимом автоматического масштабирования графиков, есть возможность задать границы по оси абсцисс и ординат «вручную». Для

удобства и повышения наглядности есть возможность для каждой кривой задать свое описание и цвет. В случае необходимости любой график можно временно «спрятать». Также, для удобства, данные, по которым построен график, могут быть отображены в виде таблицы, которую можно скопировать в буфер обмена и затем использовать в любой другой программе, поддерживающей работу с данными в CSV формате.

#### Апробация пакета «Надёжность»

Пакет «Надёжность» используется во ФГУП «НПП ВНИИЭМ» как непосредственно для расчетов надёжности, так и для проведения исследований методик и моделей, используемых при расчётах надёжности, с 2004 г. [5]. Результаты, полученные с помощью этого пакета, вошли в отчеты по оценкам надёжности систем космических аппаратов [6] и атомных станций [7]. О методиках расчета, используемых в пакете «Надёжность», а также о самом пакете и о полученных с его помощью результатах неоднократно докладывалось на российских и международных конференциях [8] и в публикациях в реферируемых журналах [9 – 11]. Так, в частности, в работе [9] было проведено исследование неоднородностей в полупроводниковых приборах, возникающих под действием различных причин, например, отличия в условиях производства разных партий при смешивании изделий одного типа или при нарушении технологического процесса. Неоднородность возникает и в том случае, если небольшая часть изделий имеет одно распределение с малым сроком службы (так называемые дефектные изделия), а основная часть – другое распределение с большим сроком службы. Поэтому, даже если какое-либо изделие имеет большой средний срок службы, то это еще не дает оснований считать, что изделие обладает высоким качеством, ибо если у данного изделия высокий коэффициент вариации, то надёжность его будет низкой. Таким образом, существование элементов как с большой, так и с малой неоднородностью приводит к тому, что они обладают различными статистическими свойствами, что необходимо принимать в расчёт при обработке испытаний и проектировании [5]. Поэтому важным является определение численной меры этой неоднородности. В работе [9] в качестве такой меры предложено использовать соотношение

$$Pr H = \frac{1}{2} \left( \frac{|a-c|}{\max(a,c)} + \frac{|b-d|}{\max(b,d)} \right),$$

зависящее от разностей коэффициентов двух распределений Вейбулла, смесью из которых

$$F_w(t) = 1 - \varepsilon \exp\left(-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right) - (1 - \varepsilon) \exp\left(-\left(\frac{t}{c}\right)^d\right),$$

предложено приближать эмпирическую функцию надежности с помощью метода наименьших квадратов, для чего и была использована программа «Надежность». Проведенные в работе [9] расчёты показывают, что наличие неоднородностей приводит к необходимости использовать в качестве функций распределений отказов смеси распределений Вейбулла вместо двухпараметрических распределений.

Возможности пакета «Надежность» позволяют, кроме определения надежностных характеристик изделий, проводить анализ различных регрессионных моделей.

В работе [10] был предложен метод для анализа регрессионных моделей, основанный на использовании Обобщенного закона надежности, представляющего из себя разложение плотности распределения по обобщенным ортогональным полиномам Лагерра, и метода преобразования исходных данных типа времени жизни таким образом, чтобы привести их к модели ускоренных испытаний. В качестве примера рассматривается модель ускоренных испытаний, и на основе расчётов, проведенных в программе «Надежность», проводится анализ регрессионных моделей больших раком легких и лейкемией.

В работе [11] с помощью программы «Надежность» были получены оценки параметров для 10-параметрической смеси из трех распределений Вейбулла и экспоненциального распределения и было показано, что этот закон смертности гораздо точнее приближает эмпирические функции надежности по сравнению с известными моделями Hannerz и Thiele. С помощью данного закона ис-

следована динамика изменений продолжительности жизни шведок с 1751 г. по 2003 г.

### Литература

1. О сглаживании характеристик надежности полиномами Лагерра / Э.М. Баскин // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – М.: Наука, 1973. – № 5. – С. 79–82.
2. Приближение законов надежности обобщенными полиномами Лагерра / Э.М. Баскин // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – М.: Наука, 1973. – № 5. – С. 90–93.
3. Выравнивание эмпирических распределений в теории надежности / Э.М. Баскин // Труды ВНИИЭМ. Вопросы проектирования, надежности и регулирования электрических машин. – М.: ВНИИЭМ, 1975. – Т. 43 – С. 104–112.
4. Оценки теории надежности электромеханических изделий по результатам усеченных испытаний / Э.М. Баскин, Н.А. Гивартовская // Известия Высших учебных заведений. Электромеханика. – Новочеркасск: Наука, 1982. – № 6. – С. 700–709.
5. Э.М. Баскин. Общий закон надежности и его применение. – М.: Компания Спутник, 2004. – .... с.
6. Технический отчет ТАИК 001.226.064. Оценки надежности систем: СОК, СЭС, АБ, АП и герметичности контейнера по результатам эксплуатации КА «Метеор-2, Метеор-3, Ресурс-01», «Электро-1». ФГУП «НПП ВНИИЭМ». – 2007.
7. Технический отчет ТАИК.001112.013. Расчет надежности систем и блоков электрооборудования АЭС по результатам эксплуатации. ФГУП «НПП ВНИИЭМ». – 2005.
8. Применение пакета «Надежность» для обработки результатов испытаний и эксплуатации изделий / Э.М. Баскин // Международная научно-техническая конференция «Инноватика – 2007». – Сочи, 2007.
9. Исследование неоднородностей полупроводниковых приборов / Э.М. Баскин // Надежность. – М.: ИД «Технологии», 2007. – №1 (20).
10. Новый подход для анализа регрессионных моделей / Э.М. Баскин // Надежность. – М.: ИД «Технологии», 2008. – №1 (25).
11. О законе смертности / Э.М. Баскин // Надежность. – М.: ИД «Технологии», 2007. – №2 (21).

Поступила в редакцию 15.06.2010

*Сергей Валерьевич Ремизов, канд. физ.-мат. наук, научн. сотрудник,  
т. 8-916-191-70-74, e-mail: sremizov@gmail.com.*