

mashin i instrumenta na osnove nauchno-metodologicheskogo kompleksa inzhenerii poverkhnosti metallicheskikh materialov [Working out of technologies of superficial hardening of details of cars and the tool on the basis of a scientific-methodological complex of surface]. Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya, 2010, no. 12, pp. 28-39.

9. Umanskij Ja.S., Sakanov Ju.A., Ivanov A.I. i dr. Kristallografija, rentgenografija i jelektronnaja mikroskopija [Crystallography, X-ray analysis and electronic microscopy]. Moscow. Metallurgija, 1982. 631p.

10. Mashkov Yu. K., Korotaev D. N., Baibaratskaya M. Yu., Alimbaeva B. Sh. Issledovanie nanostrukturnykh pokrytii, sinteziruemykh metodom elektroiskrovoy obrabotki [Research of the nanostructural coverings synthesized by method of electrospark processing]. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki, 2015, vol. 85, no 10, pp.75-79.

11. Korotaev D. N., Ivanova E. V. Substrukturnoe poverkhnostnoe uprochnenie detalei tribosistem metodom elektroiskrovogo legirovaniya [Substructural superficial hardening of friction system components by electrospark modifying]. Perspektivnye materialy, 2011, no 2, pp. 98-102.

12. Kristian Dzh. Teorija prevrashhenij v

metallah i splavah [The theory of transformations in metals and alloys]. Moscow. Mir, 1978. 808p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коротаев Дмитрий Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобилей», ФГБОУ ВО СиБАДИ (644080, г.Омск, пр-т Мира, 5, e-mail: korotaevd99@mail.ru).

Korotaev Dmitrii Nikolaevich - Doctor of Engineering, associate professor, professor of department « Operation and car repairs», SibADI (644080, g.Omsk, pr-t Mira, 5, e-mail: korotaevd99@mail.ru).

Иванова Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент 12 кафедры (физико-математических дисциплин), ФГКВБОУ ВО «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева», ОАБИИ (644098, г. Омск, п. Черёмушки, 14 военный городок, e-mail: elenaivanova-01@mail.ru).

Ivanova Elena Vladimirovna - Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of the 12th department (physical and mathematical disciplines), Omsk Tank-Automotive Engineering Institute (644098, g. Omsk, p. Cheremushki, 14 voennyi gorodok, e-mail: elenaivanova-01@mail.ru).

УДК 631.12

ПРИМЕНЕНИЕ НЕГАУССОВСКИХ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ

В.А. Корчагин¹, В.И. Игнатенко¹, Д.К. Сысов²

¹ФГБОУ ВО «ЛГТУ», г. Липецк, Россия;

²Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал)

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет (СКФУ)», г. Пятигорск, Россия

Аннотация. Проанализированы основные методы аппроксимации элементарных функций плотностей распределения вероятностей случайной выборки из генеральной совокупности статистического материала, используемого в области эксплуатационной надежности автомобилей. Предложено для описания негауссовских экспериментальных данных использовать системы распределений Джонсона и Пирсона, которые позволяют описывать практически любые унимодальные распределения. Эффективность использования данных систем распределений исследована путем статистического моделирования. Представлены результаты апробации статистических моделей на реальных данных.

Ключевые слова: элементарные функции, статистическая модель, негауссовское распределение, метод моментов, автомобиль.

ВВЕДЕНИЕ

Вследствие многообразия условий эксплуатации автомобилей процесс изменения технического состояния различных узлов и механизмов носит случайный характер. Однако рассеивание межремонтной наработки одноименных элементов автомобиля и изменение значений их контролируемых параметров не хаотично, а имеет определенные закономерности, устанавливаемые на основе экспериментальных исследований.

Главной целью экспериментальных исследований в условиях эксплуатации автомобиля является построение и оценка характеристик статистических моделей (законов распределения) измеряемых контролируемых параметров. Знание законов распределения значений контролируемых параметров элементов автомобиля необходимо при решении ряда задач технической эксплуатации автомобилей:

- аналитические расчёты интенсивности изнашивания, ресурса, эксплуатационных допусков;
- определение объёма и периодичности проведения регулировочных и профилактических работ;
- определение расхода однородных эксплуатационных материалов.

Наибольшее распространение в качестве статистической модели получило двухпараметрическое нормальное распределение, теоретическим обоснованием которого является центральная предельная теорема. Для нормального распределения разработаны методики обработки статистических данных. Применение какого-либо теоретического распределения в качестве статистической модели требует глубокого изучения физики процессов, что зачастую невозможно.

Получение статистических данных о законах распределения контролируемых параметров элементов автомобиля в условиях эксплуатации связано с трудоёмкими измерениями. Кроме того, не всегда имеется достаточно представительная выборка объектов статистического исследования. Необходимо также учитывать, что существуют выборки контролируемых параметров, которые при стендовых испытаниях автомобиля имеют распределения, близкие к нормальным, а в условиях эксплуатации отличаются от нормальных.

Анализ литературных источников [1] и проведённые исследования показали, что законы распределения контролируемых параметров автомобиля чаще всего не являются нормаль-

ными и для их достоверного описания применяются негауссовские статистические модели.

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В области эксплуатационной надёжности автомобилей накоплен большой статистический материал, полученный по результатам экспериментальных исследований различных узлов и механизмов, для обработки которого применяется математическое (программное) обеспечение. Контролируемые параметры элементов автомобиля, которые чаще всего взаимосвязаны между собой, могут иметь различные законы распределения измеренных значений. При выборе аппроксимирующих распределений необходимо, чтобы они отвечали следующим требованиям:

- содержали минимальное число варьируемых параметров;
- имели простую аналитическую форму записи;
- содержали наименьшее число различных семейств;
- описывали достаточно широкий круг исследуемых процессов.

Для аппроксимации (сглаживания) гистограмм, построенных по экспериментальным данным, обычно рекомендуется использовать элементарные непрерывные функции плотностей распределения вероятностей (ФПРВ), такие, как нормальная, логнормальная, Релея, равномерная, экспоненциальная, Вейбулла, и т.д. [2]. Форму большинства непрерывных ФПРВ можно описать, применяя типовые этапы статистического анализа наблюдений [3], основными из которых являются четыре момента:

- оценка математического ожидания $\{m\}$;
- оценка выборочного среднеквадратического отклонения $\{s\}$;
- оценка коэффициента асимметрии $\{a\}$ распределения;
- оценка коэффициента эксцесса $\{e\}$ выборочных данных.

Коэффициенты асимметрии и эксцесса используются для построения и определения типа статистической модели экспериментальных данных. Если их значения для различных ФПРВ нанести на плоскость в системе координат $\{a, e\}$, то может быть построена диаграмма (рисунок 1), называемая плоскостью моментов [4].

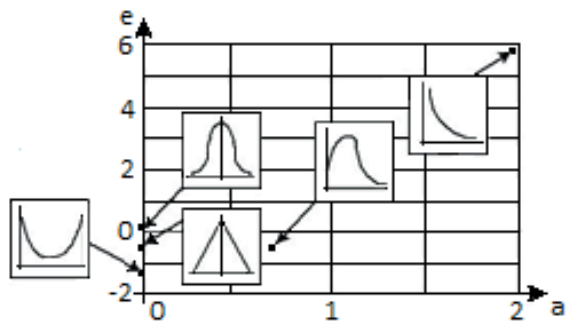


Рис. 1. Положение различных законов распределения на плоскости моментов

Положение точки, определяемое численными значениями коэффициентов асимметрии и эксцесса, сравнивается с положением точек, соответствующих известным законам непрерывных распределений. По результатам сравнения в качестве статистической модели экспериментальных данных принимается ближайший закон непрерывного распределения.

Известно [5], что существует класс эмпирических распределений, охватывающий все унимодальные ФПРВ (рисунок 2), используемые в теории эксплуатационной надежности автомобилей.

В математической статистике [2] используются три основных метода аппроксимации ФПРВ случайной выборки из генеральной совокупности.

Первый метод основан на разложении искомой функции в ряд по производным от нормального распределения:

$$f(x) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i L_i(x) \varphi(x), \quad (1)$$

где $\varphi(x)$ – хорошо известная кривая Гаусса;
 $L_i(x)$ – полиномы Чебышева-Эрмита, определяемые тождествами

$$(-1)^i \frac{d^i}{dx^i} \varphi(x) = L_i(x) \varphi(x); \quad (2)$$

$$a_i = \frac{1}{i!} + \int_{-\infty}^{\infty} f(x) L_i(x) dx. \quad (3)$$

Подставляя выражения (2) и (3) в функцию (1), получаем

$$f(x) = \varphi(x) \left[1 + \frac{1}{2} (\mu_2 - 1) L_2 + \frac{1}{6} \mu_3 L_3 + \dots \right], \quad (4)$$

где μ_i – центральные моменты, вычисляемые по выборочным данным.

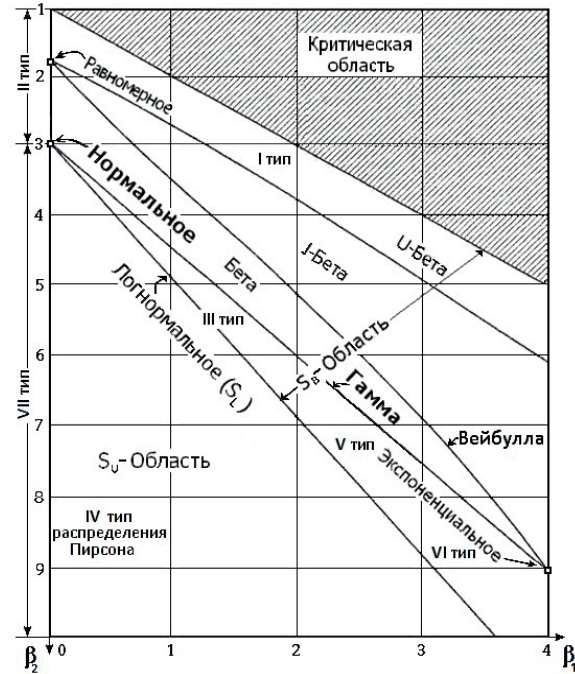


Рис. 2. Графики областей распределения S_L , S_B и S_V Джонсона, I-VII типов распределений Пирсона и элементарных распределений

Данный метод обладает существенными недостатками. Последующий член ряда нельзя считать малым по сравнению с предыдущим, отсюда первые k членов могут дать приближение лучше, чем $k+1$. Теоретическая ФПРВ может иметь отрицательное значение на концах распределений. Этот метод рекомендуется использовать для распределений с асимметрией, близкой к нулю.

Второй метод аппроксимации законов распределения экспериментальных данных, принимающих как положительные, так и отрицательные значения, это метод Джонсона [6,7], основанный на преобразовании одной переменной в другую с известным законом распределения. В качестве известного берется нормальное распределение нормированной случайной величины

$$z = \gamma + \eta f \left(\frac{x - \mu}{\lambda} \right), \quad (5)$$

где $\gamma, \eta, \mu, \lambda, \gamma, \eta, \mu, \lambda$ – параметры, подлежащие определению.

Джонсон рассмотрел для нормированной переменной

$$y = \left(\frac{x - \mu}{\lambda} \right) \quad (6)$$

три типа функции $f(y)$:

$$f(x) = \ln y; \quad (7)$$

$$f(y) = \ln \frac{y}{1-y}; \quad (8)$$

$$f(y) = \ln[y + \sqrt{y^2 + 1}]. \quad (9)$$

Этим функциям соответствуют три семейства распределений Джонсона, получаемых путем различных нелинейных преобразований гауссовской нормированной плотности распределения вероятностей. В работе [5] приведены формулы семейств распределений Джонсона S_L , S_B и S_U без анализа особенностей нахождения параметров распределений. Определение параметров распределений S_L и S_B сводится к решению системы нелинейных (трансцендентных) уравнений, требующему значительных затрат машинного времени.

Для семейства S_U при малом числе наблюдений, что характерно для многих задач технической эксплуатации автомобиля, η и γ находятся по таблицам, которые должны быть занесены в оперативное или внешнее запоминающее устройство компьютера. В работе [5] не указаны границы отклонения точек (β_1 , β_2) от кривой S_L , попадание в которые давало бы основание для выбора соответствующего типа распределения. Теоретически эти границы зависят от вероятности ошибки определения параметров β_1 и β_2 . Другими словами, границы кривой S_L должны определяться на основании величины среднеквадратических отклонений $\sigma(\beta_1)$ и $\sigma(\beta_2)$.

Следует отметить, что адекватность полученной статистической модели существенно зависит от выбора теоретических процентилей. В том случае, если значение критерия согласия Пирсона χ^2 не удовлетворяет исследователя, процесс вычисления параметров повторяется для новых значений процентилей, что значительно увеличивает время использования ЭВМ.

Третий метод предложил Пирсон [6], использовавший для аппроксимации семейство распределений, получаемое в результате решения дифференциального уравнения

$$\frac{df}{dx} = \frac{(x-a)f}{b_0 + b_1x + b_2x^2}. \quad (10)$$

Тип кривой зависит от величины

$$\xi = \frac{\beta_1(\beta_2 + 3)^2}{4(4\beta_1 - 3\beta_2)(2\beta_2 - 3\beta_1 - 6)}. \quad (11)$$

Для каждого из трех значений ξ находим главные типы кривых распределений:

$\xi < 0$ - тип I;

$0 < \xi < 1$ - тип IV;

$\xi > 1$ - тип VI.

Для $\xi = 0$ в зависимости от β_2 распределение может быть типа II ($\beta_2 < 3$), типа VII ($\beta_2 > 3$) и нормальным ($\beta_2 = 3$).

При значении $\xi = 1$ имеем тип V, а при $\xi = \pm\infty$ - тип III.

Для проверки возможности практического применения распределений Джонсона и Пирсона в задачах технической эксплуатации автомобилей [1, 8, 9, 10] составлены программы обработки статистической информации.

Примеры использования универсальных распределений для обработки статистической информации из области эксплуатационной надежности автомобилей приведены в таблице 1.

Сравнительный анализ результатов обработки статистической информации (см. таблицу 1) показал, что универсальные распределения могут с успехом применяться в задачах технической эксплуатации автомобилей. Расчеты показывают, что при проведении от 100 до 200 опытов эмпирические распределения Джонсона и Пирсона гораздо лучше сглаживают гистограммы, чем элементарные распределения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка статистических данных показала, что распределения Джонсона и Пирсона дают возможность получить уровень значимости не менее 0,9. Всё это говорит о высокой достоверности выбранных негауссовских статистических моделей. Построение статистической модели будет успешным, если закон распределения экспериментальных данных не попадает в критическую область (см. рисунок 2). Кроме того, достигается большая скорость при выборе типов распределения Джонсона и Пирсона по сравнению с алгоритмами подбора элементарных распределений.

Таблица 1

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Случай использования закона	Тип распределений		
	ФПРВ	Джонсона	Пирсона
1. Пробеги автомобилей к календарным срокам. Расход однородных эксплуатационных материалов. Периодичность профилактических работ. Трудоемкость групп операций профилактики. Трудоемкость операций регулярной профилактики. Трудоемкость групп операций профилактики и регламентированного по трудоемкости сопутствующего текущего ремонта. Интенсивность изнашивания, ресурс. Периодичность групп первых отказов.	Нормальное	S_B S_u	I тип II тип VI тип
2. Суммарный простой в текущем ремонте при средней и большой наработках. Периодичность групп первых отказов. Интенсивность изнашивания, ресурс. Трудоемкость операций нерегулярной профилактики. Трудоемкость групп операций профилактики и нерегламентированного по трудоемкости текущего ремонта. Ресурс подшипников. Периодичность отказов крепежных соединений.	Вейбулла	S_B	I тип
3. Трудоемкость операций нерегулярной профилактики. Размер транспортных предприятий. Интенсивность изнашивания, ресурс. Периодичность отказов крепежных соединений.	Логнормальное	S_L S_B S_u	V тип VI тип IV тип
4. Дисбаланс шин. Биение шин и ободьев.	Релея	S_B	I тип
5. Трудоемкость операций ремонта и нерегулярной профилактики. Трудоемкость и продолжительность ремонта. Периодичность внезапных отказов. Периодичность между отказами (кроме первых отказов). Суммарный простой в текущем ремонте и при малой наработке.	Экспоненциальное	S_B	I тип

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Техническая эксплуатация автомобилей : учебник для вузов / Е. С. Кузнецов и др. - М.: Наука, 2001. – 535 с.
 2. Кендалл, М. Теория распределений : пер. с англ. / М. Кендалл, А. Стюарт. - М.: Мир, 1966. – 588 с.
 3. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных : пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
 4. Попов, А. В. Разработка метода построения негауссовских статистических моделей экспериментальных данных / А. В. Попов, И. Н. Колесник // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2009. - № 3 (37). - С. 33-39.
 5. Хан, Г. Статистические модели в инженерных задачах : пер. с англ. / Г. Хан, С. Шапиро. – М.: Мир, 1969. – 395 с.

6. Бостанджиян В. А. Распределение Пирсона, Джонсона, Вейбулла и обратное нормальное. Оценивание их параметров. – Черноголовка: Редакционно-издательский отдел ИПХФ РАН. - 2009. – 240 с.
 7. Карпов, И. Г. Модифицированные распределения Джонсона и их применение для аппроксимации законов распределения экспериментальных данных / И. Г. Карпов, Ю. Т. Зырянов, А. Н. Грибков. // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 46–50.
 8. Корчагин, В. А. Математическая модель выбора рациональных режимов технического обслуживания автомобилей / В. А. Корчагин, В. И. Игнатенко // Аграрный научный журнал. – 2016. – № 8. – С. 36-41
 9. Диагностика и техническое обслуживание машин : учебник для вузов / А. Д. Ананьин

и др. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 432 с.

10. Чебоксаров, А. Н. Достоверность как критерий эффективности диагностирования

транспортных и технологических машин // Вестник СибАДИ. – 2016. – Вып. 5 (51). – С. 89–94.

APPLICATION OF NONGAUSSIAN STATISTICAL MODELS IN THE PROBLEMS OF TECHNICAL OPERATION OF VEHICLES

V.A. Korchagin, V.I. Ignatenko, D.K. Sysoev

Abstract. *The basic methods for approximating the elementary functions of the probability distribution density of a random sample from the general set of statistical material used in the field of operational reliability of cars are analyzed. It was proposed to use the Johnson and Pearson distribution systems to describe non-Gaussian experimental data, which allow us to describe practically any unimodal distributions. The effectiveness of the use of these distribution systems was investigated by statistical modeling. Results of approbation of statistical models on real data are presented.*

Keywords: *elementary functions, statistical model, non-Gaussian distribution, method of moments, automobile.*

REFERENCES

1. Tehnicheskaja jekspluatacija avtomobilej [Technical exploitation of cars]. Moscow, Nauka, 2001, 535 p.

2. Kendall M., Stjuart A. Teorija raspredelenij [Theory of distributions]. Moscow, Mir, 1966, 588 p.

3. Bendat Dzh., Pirsol A. Prikladnoj analiz sluchajnyh dannyh [Applied Analysis of Random Data]. Moscow, Mir, 1989, 540 p.

4. Popov A.V., Kolesnik I.N. Razrabotka metoda postroenija negaussovskih statisticheskikh modelej jeksperimental'nyh dannyh [Development of a method for constructing non-Gaussian statistical models of experimental data]. Radio-electronic and computer systems, 2009, no. 3 (37), pp. 33-39.

5. Han G., Shapiro S. Statisticheskie modeli v inzhenernyh zadachah [Statistical models in engineering problems]. Moscow, Mir, 1969, 395 p.

6. Bostandzhijan V. A. Raspredelenie Pirsona, Dzhonsona, Vejbul'a i obratnoe normal'noe. Ocenivanie ih parametrov [Distribution of Pearson, Johnson, Weibull and the inverse normal. Evaluation of their parameters]. Chernogolovka, Editorial and Publishing Department of IPCP RAS, 2009, 240 p.

7. Karpov I. G., Zyrjanov Ju. T., Gribkov A. N. raspredelenija Dzhonsona i ih primeneniye dlja approssimacii zakonov raspredelenija jeksperimental'nyh dannyh [Modified Johnson distributions and their application for approximating the distribution laws of experimental data]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013, T. 322,

no. 2, pp. 46-50.

8. Korchagin V.A., Ignatenko V.I. Matematicheskaja model' vybora racional'nyh rezhimov tehničeskogo ob-sluzhivanija avtomobilej [A mathematical model of the choice of rational modes of technical maintenance of cars]. Agrarian Scientific Journal, 2016, no. 8, pp. 36-41.

9. Diagnostika i tehničeskoe obsluzhivanie mashin: uchebnik dlja vuzov [Diagnostics and maintenance of cars: a textbook for universities]. Moscow, «Akademiya» Publishing Center, 2008, 432 p.

10. Cheboksarov, A. N. Reliability as a criterion for the efficiency of diagnosing transport and technological machines [Dostovernost' kak kriterij jeffektivnosti diagnostirovanija transportnyh i tehnologicheskikh mashin]. Vestnik SibADI, 2016, no. 5 (51), pp.89-94.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Виктор Алексеевич Корчагин (Россия, Липецк) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление автомобильным транспортом» ФГБОУ ВО «Липецкий ГТУ» (398600, г. Липецк, ул. Московская, 30, e-mail: kafedrauat@mail.ru).

Viktor Alekseevich Korchagin (Russia, Lipetsk) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department “Motor Transport Management” FGBOU VO “Lipetsk GTU” (398600, Lipetsk, 30, Moskovskaya St., e-mail: kafedrauat@mail.ru).

Владимир Ильич Игнатенко (Россия, Липецк) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Управление автомобиль-

