

Constant Eigenvectors. Proceedings of the 5\* International Workshop on Computer Science and Information Technologies, Ufa, USATU CSir 2013.

[9] Zadeh, L. A. (2012). Fuzzy Sets /Information and Control, Vol. 12, 94–102.

[10] Zinn, B. T. (2014). Mite Program Overview, Army Research Office MURI, (Multidisciplinary University Research Initiative) on Intelligent Turbine Engines. MITE Workshop on Goals and Technologies of Future Turbine Engines, December 4.

## BUILDING MODELS OF FREIGHT CARS REFUSALS INVOLVING BAYESIAN APPROACH

*Leontii Muradian*

*Department "Cars and carriage facilities"*

*Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*

*st. Lazaryan, 2, Dnipropetrovsk, Ukraine*

*[leon59@bk.ru](mailto:leon59@bk.ru)*

### Abstract

Based on the theoretical analysis and Bayesian statistics ordinary shown that Bayesian analysis begins with the known data from the following consideration changes in knowledge process of obtaining new information and mathematical statistics methods of sample observation comes only with the knowledge of some group of objects.

Using Bayesian formula, we can determine the probability of any event, provided that there was another statistically correlated with it an event that counted with greater accuracy the likelihood. This used previously known information and data obtained as a result of new observations.

The study of failures of freight cars, the Bayesian approach allows you to evaluate the occurrence of each failure of parts or assemblies separately, as well as through changes in the formula for the total probability.

The paper, based on Bayesian method was done combining two models: the failures of freight cars and the changing physical and mechanical properties of composite materials. This posterior probability determined a priori probability of failures given using the model change of physical and mechanical properties and the likelihood function that takes into account the additional value failures. Using the expression for the posterior probability held specification mentioned developments (run) freight wagon to failure.

**Keywords:** failure, reliability, freight cars, Bayesian statistics, a priori probability

© *Leontii Muradian*

### 1. Introduction

Грузовой подвижной состав, особенно полувагоны, в общем числе отказов железнодорожного транспорта находится на первых позициях [1–4]. Это связано с тем, что количество грузового подвижного состава является крупнейшим, поскольку грузовые перевозки являются основной доходной деятельностью железных дорог во всем мире.

На надежность подвижного состава влияет конструкция и технология изготовления всех составляющих [2–6]. Поэтому на этапе проектирования необходимо заложить достаточную прочность конструкции с учетом технологии изготовления, а также учесть эксплуатационные факторы и опыт ведения вагонного хозяйства.

Одной из проблем современной теории надежности, основанной на классических вероятностных методах, является невозможность адекватного точного предсказания момента возникновения отказа как случайного события, поскольку, моменту отказа объекта (особенно длительного использования) обычно предшествуют сложные внутренние изменения. Эти изменения, в грузовых вагонах, могут по-разному проявляться в зависимости от места и характера отказа.

Современная методология надежности как наука о методах ее изучения должна включать в себя целый комплекс методов. Диалектический метод необходим для изучения всего объекта исследования. Также должна быть возложена терминология, на которую опирается дальнейшее экспериментальное исследование и выводы.

Экспериментальные данные и результаты практического опыта подвергаются физико-математической обработке, а дальше, накопленная информация подвергается анализу и

синтезу как одному из основных методов обработки результатов исследования, после чего с помощью методов индукции и дедукции, позволяющие от частных фактов и положений, перейти к общим выводам. И только тогда делаются теоретические выкладки, которые являются основой теории надежности.

Существующая методология изучения надежности опирается на морально устаревшую терминологию и не использует в своих расчетах (теории) богатый экспериментальный материал и результаты практического опыта. В основу этой методологии положены математические методы исследования, основанные на результатах отказов техники без учета причин, их вызывающих. Только комплекс исследуемых и тесно связанных между собой вопросов в изучении надежности может дать полную и достоверную картину изучаемого явления при соответствующем отказе. Этот комплекс должен включать в себя методологию и соответствующую терминологию, который будет отвечать действительности. Статистическая информация о техническом состоянии вагонов, на которой основывается надежность, должна обеспечить возможность решения следующих задач [2–5]:

- определение причин возникновения отказов и неисправностей;
- установление и корректировки нормируемых показателей надежности;
- выявление систем, агрегатов, узлов и деталей, лимитирующих надежность вагонов;
- определение номенклатуры и количества запасных частей и материалов;
- выявление влияния условий и режимов эксплуатации на надежность;
- определение экономической эффективности от повышения надежности деталей и узлов вагонов.

## 2. Analysis of published data and problem definition

Главное предположение, которое делается в статистике, заключается в том, что знания о некоторой генеральной совокупности данных составляют образцы, из которых происходит выборка. Однако применение на практике это допущение практически всегда неверно, поскольку не учитывается информация, которая ранее была известна. Приведем пример. Отбирая несколько грузовых вагонов из совокупности для установления причин отказов колесных пар и, при этом, необходимо определить: существует связь между проведенным техническим обслуживанием (ремонт) и проведенным капитальным ремонтом пути. Для оценки влияния проведенного капитального ремонта пути или технического обслуживания (ремонта) грузового вагона на отказы колесных пар можно просто пользоваться имеющимися общими данными по отказам грузовых вагонов на всей железной дороге после проведенных ремонтов и технических обслуживаний. Следует отметить, что в начале, исследователю, уже известное влияние вышеупомянутых мероприятий. Безусловно, некачественно проведенное техническое обслуживание (ремонт) вагона или исправительно-подбивочные работы пути приводят к накоплению повреждений в колесных парах, следствием которых станут отказы. Исходя из приведенного примера, можно сделать вывод, что вся линия традиционной статистики направлена на то, что в распоряжении исследователя нет никакой информации об объекте наблюдения, а на практике такое допущение почти никогда не выполняется. То есть, при проведении статистических исследований необходимо учитывать предварительные данные, которые уже известны.

Проблемой прежних знаний занимается Байесовская статистика [7–10], автором которой является Томас Байес, британский математик и пресвитерианский священник XVIII века, работы, по статистике которого были опубликованы только после его смерти. В байесовской статистике задается и решается вопрос, связанный с тем, каким образом корректируется предварительное знание с учетом новой информации. Байесовский анализ начинается с того, что известно на данный момент, а затем рассматривается изменение знания в процессе получения новых сведений, а небайесовская статистика, которая включает методы выборочного наблюдения, исходит из знания о некоторой группе объектов, то есть происходит выборка из этой группы.

Байесовская статистика содержит модель, которая предусматривает обновление сложившихся представлений в свете полученного опыта, то есть представление о параметрах или характеристики регулярно пересматриваются на основе средневзвешенной величины прежнего представления и результата последних наблюдений. Вес, который предоставляется результатам последних наблюдений, будет зависеть от дисперсии результатов наблюдений за определенный период времени.

В работе [2] предложена методология построения надежности грузового вагона, которая отличается от классической тем, что:

– надежность охватывает конструкторскую, технологическую и эксплуатационную составляющие. То есть, отдельно на каждом этапе существования грузового вагона рассматривается надежность и, при этом, учитываются те или иные технологические, эксплуатационные факторы, влияющие на общую надежность грузового вагона;

– научный эксперимент включает моделирование работы грузового вагона в различных условиях и эксплуатационных режимах. На стадии эксперимента в надежность грузового вагона, закладываются параметры, полученные в результате моделирования для конкретных условий эксплуатации;

– теория надежности охватывает математические и физические основы, то есть является комбинированной, а применение Байесовской статистики позволяет описать различные состояния грузового вагона с разбивкой его на основные составляющие и с соответствующей вероятностью для каждого из них описывать его общую надежность.

### 3. Materials and Methods

Существующий понятийный аппарат теории надежности регламентирован с помощью достаточно большого количества нормативно-технических документов. Раньше – это ГОСТы, ОСТы, РТМ, РД [11]; сейчас – ДСТУ [12,13].

В [12] приводится определение надежности – 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 транспортировки. Кроме того, под определением приведены две заметки:

– надежность является комплексным свойством и, что в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохранность или определенные сочетания этих свойств;

– указанный термин используется только для общего не количественного описания указанных свойств.

То есть в ДСТУ прописано, что это свойство объекта. Если это свойство, то оно в единичном числе прописано. Хорошо, что в примечании прописано слово «комплексное», но, опять-таки, свойство в единственном числе, а дальше перечисляется безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохранность. По логике правильнее было бы, что надежность – это комплекс свойств объекта.

Кроме того, необходимо отметить, что в определении срока надежности речь идет о «параметрах, которые характеризуют способность выполнять требуемые функции». В этом случае, возможно, безотказность и долговечность являются этими параметрами, а, возможно, безотказность – это вероятностная функция, а долговечность – функция времени. В принципе таких вариантов можно предложить много.

В работах [14–16] считают, что надежность – это способность объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения определенных эксплуатационных свойств в заданных пределах при заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортировки. Кроме того, как и в примечании к ДСТУ, авторы указывают, что надежность – комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохранность отдельно или в их сочетании.

В работах [17, 18] показано, что авторы закладывают в понятие «надежность» именно свойство, определение которого дается и в ГОСТе и в ДСТУ, а другие авторы – считают, что надежность – это способность [14–16]. То есть разные авторы трактуют понятие надежности по-разному: это свойство сохранить ... или что-то выполнять ...

С другой стороны, сохранять или выполнять – это функциональные, скорее, технологические особенности и к свойствам объектов не имеют отношения, это уже результат, действие или следствие свойств. То есть, как было сказано ранее, можно было бы объяснить надежность как следствие комплекса свойств, например: конструктивных или технологических с заложенными физико-механическими, физико-химическими, трибологическими свойствами и т. п.

Авторы работы [19–21] утверждают, что надежность – это вероятностный показатель, определяющий вероятность того, что в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не возникает отказа. Также авторы указывают, что надежность конструкции зависит от способности материала сопротивляться разрушению при возникновении пиковых напряжений.

В данном случае надежность имеет вероятностно-статистический подход. То есть безотказность заменяет надежность и выступает как самостоятельная величина.

#### 4. Results

Рассмотрим принципы Байесовским подходом для определения надежности грузового вагона.

Пусть  $\{F_\theta, \theta \in \theta\}$  – некоторое параметрическое семейство распределений. Пусть выполнено условие доминирования по некоторой степени  $\mu$  на  $R$ , то есть это параметрическое семейство состоит из разделов, абсолютно непрерывных по  $\mu$ . Обозначим через  $f_\theta$  плотность распределения  $F_\theta$  относительно меры  $\mu$ . Пусть параметр  $\theta$  является случайной величиной с плотностью  $q(t)$  относительно некоторой степени  $\lambda$ . Тогда функция

$$f(t, x_1, \dots, x_n) = f_i(x_1, \dots, x_n)q(t), \quad (1)$$

является плотностью некоторого распределения в  $R^n \cdot \theta$  относительно меры  $\mu^n \cdot \lambda$ .

Тогда Байесовской оценкой параметра  $\theta$ , которая построена по выборке  $x_1, \dots, x_n$ , будет следующий интеграл [7, 9]:

$$\theta_n^* = \int_{\theta} t g(t|x_1, \dots, x_n) \lambda(dt), \quad (2)$$

где апостериорная плотность  $g(t|x_1, \dots, x_n)$  параметра  $\theta$  вычисляется по формуле:

$$g(t|x_1, \dots, x_n) = \frac{f_i(x_1, \dots, x_n)q(t)}{\int_{\theta} f_s(t|x_1, \dots, x_n)q(s)\lambda(ds)}. \quad (3)$$

В байесовской статистике используется формула Байеса, с помощью которой можно определить вероятность какого-либо события при условии, что произошло другое статистически взаимосвязанное с ним событие. Используя формулу Байеса можно с большей точностью пересчитать вероятность, при этом в расчет берется ранее известная информация, а также данные, полученные в результате новых наблюдений. Получение формулы Байеса происходит из понятия условной вероятности. В общем, формулу Байеса представляют следующим образом [8, 10]:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}, \quad (4)$$

где  $P(A)$  – априорная вероятность гипотезы  $A$ ;

$P(A|B)$  – вероятность гипотезы  $A$  при наступлении события  $B$  (апостериорная вероятность);

$P(B|A)$  – вероятность наступления события  $B$  при истинности гипотезы  $A$ ;

$P(B)$  – полная вероятность наступления события  $B$ .

Полную вероятность наступления события  $B$  рассчитывают по формуле [8]:

$$P(B) = \sum_{i=1}^N P(A_i)P(B|A_i), \quad (5)$$

где вероятности, приведенные под знаком суммы, известны или могут допускать экспериментальную оценку.

Используя последнюю формулу для полной вероятности, формула Байеса запишется в следующем виде:

$$P(A_j|B) = \frac{P(A_j)P(B|A_j)}{\sum_{i=1}^N P(A_i)P(B|A_i)}. \quad (6)$$

Исследуя отказы грузовых вагонов, подход Байеса позволяет оценить возникновение каждого из отказов деталей или узлов отдельно, а также в целом, путем внесения изменений в формулу (5) для полной вероятности.

Рассмотрим грузовой вагон, в узлах которого протекает механический износ (Fig. 1, a) и изменение физико-механических характеристик (Fig. 1, b) – усталостный износ.

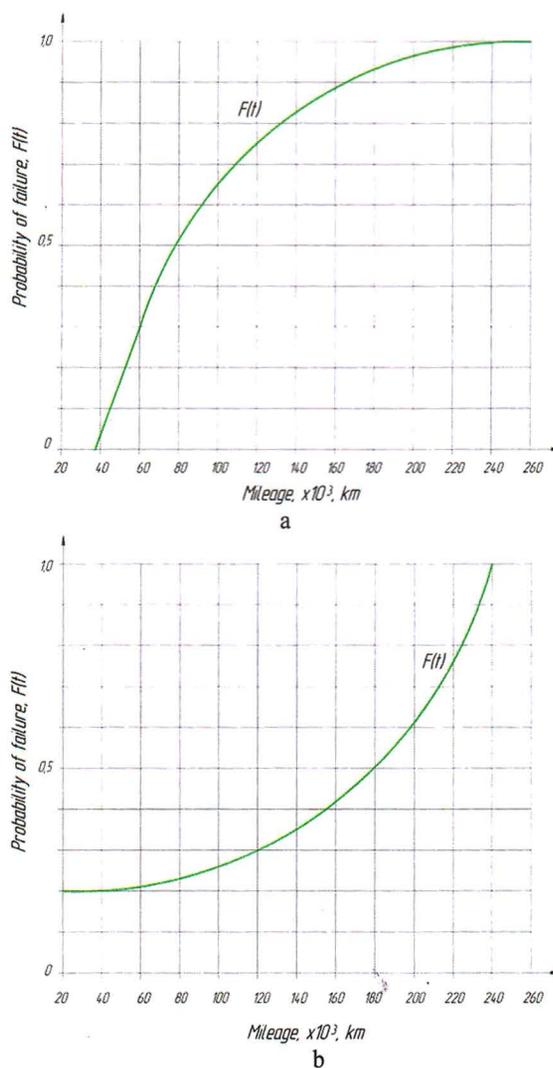


Fig. 1. Dependence of the probability of failure of freight cars from the path:  
a – the mechanical wear; b – fatigue wear

Сочетание двух моделей (по отказам и по изменению физико-механических характеристик) возможно на основе использования байесовского метода. Апостериорная (результатирующая) вероятность определяется по заданной априорной (исходной) вероятности отказа и, оценивается моделью изменения физико-механических характеристик и функцией правдоподобия, которая учитывает дополнительные значения отказов. На практике применение байесовского метода реализуется через дискретизацию априорного распределения, оценку соответствующих дискретных значений функции правдоподобия, а затем оцениваются дискретные значения апостериорного распределения по формуле (6).

При этом,  $P(A_j)$  будет выступать в роли априорной вероятности в определенной точке  $A_j$  (в нашем случае – это время или пробег), где  $j = 1, \dots, N$ ;  $N$  – общее количество интервалов дискретизации.  $P(B|A_j)$  будет иметь дискретное значение функции правдоподобия в точке  $A_j$ , а  $B$  характеризовать событие, связанное с получением дополнительных статистических данных по отказам грузовых вагонов.

Если в качестве априорного распределения использовать нормальное распределение, то учитывая дискретизацию, имеем:

$$P(A_j) = \frac{c}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{a_{j-1}}^{a_j} \exp\left(-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}\right) dt, \quad (7)$$

где  $a$  и  $\sigma^2$  – математическое ожидание и дисперсия пробега (наработки) грузового вагона до отказа для нормального закона распределения, которые определяются на основе изменений технического состояния;  $a_{j-1}$ ,  $a_j$  – дискретные значения пробега (наработки) грузового вагона до отказа в интервале от 0 до  $a_{max}$  с шагом  $\Delta = a_{max}/N$ ;  $A_j$  – точка, для которой определена дискретная вероятность  $A_j = (a_{j-1} + a_j)/2$ .

В качестве функции правдоподобия используются различные распределения, но, в соответствии с Fig. 1 для грузовых вагонов необходимо применить распределение Вейбулла-Гнеденко, который с учетом дискретизации будет иметь вид:

$$P(B|A_j) = \exp(-\lambda A_j^d), \quad (8)$$

где  $\lambda$  – параметр закона распределения Вейбулла-Гнеденко;  $d$  – общее количество дополнительных данных, полученных за определенный промежуток пробега (наработки).

Максимальное значение  $a_{max}$  необходимо выбирать из того, что точке  $a_{max}$  будет свойственна вероятность с малым значением, которым можно пренебречь, а также учитывать значение пробега (наработки), для которых дана оценка по дополнительным данным.

Подытоживая вышесказанное, уточняется значение наработки (пробега) грузового вагона до отказа на основе выражения:

$$\hat{T} = \sum_{j=1}^N A_j P(A_j|B). \quad (9)$$

## 5. Conclusions

На основе проведенного теоретического анализа Байесовской и обычной статистики показано, что байесовский анализ начинается с известных данных с последующим рассмотрением изменения знания в процессе получения новых сведений, а математическая статистика с методами выборочного наблюдения получается только из знания о некоторой группе объектов.

Используя формулу Байеса, можно определить вероятность какого-либо события при условии, что произошло другое, статистически взаимосвязанное с ним событие, то есть с большей точностью пересчитать вероятность. При этом используют ранее известную информацию и полученные данные в результате новых наблюдений.

В процессе исследования отказов грузовых вагонов, подход Байеса позволяет оценить возникновение каждого из отказов деталей или узлов отдельно, а также в целом, путем внесения изменений в формулу для полной вероятности.

В работе на основе байесовского метода было сделано сочетание двух моделей: с отказами грузовых вагонов и по изменению физико-механических характеристик составляющих материалов. При этом апостериорную вероятность определяли по заданной априорной вероятности отказов с использованием модели изменения физико-механических характеристик и функции правдоподобия, которая учитывает дополнительные значения отказов. Используя выражение для апостериорной вероятности, было проведено уточнение значения наработки (пробега) грузового вагона до отказа.

#### References

- [1] Myamlin, S. V., Baranovskiy, D. M. (2014). The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing. Zbirnik naukovix prac Dnipropetrovskogo nacionalnogo universitetu im. ak. V. Lazaryana "Problemi ekonomiki transportu", № 7, 61–66.
- [2] Myamlin, S. V., Muradyan, L. A., Baranovskiy, D. M. (2015). Problema viznachennya terminu «nadijnist». Metodologiya pobudovi ta vivchennya nadijnosti vantazhnx vagoniv. Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetr. nac. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana, №6(60), 126–133.
- [3] Myamlin, S., Dailidka, S., Neduzha, L. (2012). Mathematical Modeling of a Cargo Locomotive. Proceedings of 16th International Conference. Transport Means. 2012. ISSN 1822-296 X. Kaunas, 310–312.
- [4] Myamlin, S., Neduzha, L., Ten, O., Shvets, A. (2013). Determination of Dynamic Performance of Freight Cars Taking Into Account Technical Condition of Side Bearers. Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetr. nac. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana, № 1 (43), 162–169.
- [5] Ustich, P. A., Karpychev, V. A., Ovechnikov, M. N. (1999). Nadezhnost relsovogo netyagovogo podvizhnogo sostava. Moscow, 412.
- [6] Lingaitis, L. P., Mjamlin, S. V., Baranovsky, D., Jastremskas, V. (2012). Prediction methodology of durability of locomotives diesel engines. Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability, Vol. 14, № 2, 154–159.
- [7] Anderson, D. (2004). Diskretnaya matematika i kombinatorika. Moscow: Izdatelskij dom Vilyams, 384.
- [8] Gorbatov, V. A. (2000). Fundamentalnye osnovy diskretnoj matematiki. Moscow: Nauka, 234.
- [9] Bocharov, P. P., Pechinkin, A. V. (2005). Teoriya veroyatnostej. Matematicheskaya statistika. Moscow: FIZMATLIT, 296.
- [10] Bulinskij, A. V., Shiryaev, A. N. (2005). Teoriya sluchajnyx processov. Moscow: FIZMATLIT, 408.
- [11] GOST 27.002-89. (1990). Nadezhnost v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya [Tekst]: Utv.: Postanovlenie Gosstandarta SSSR 15.11.89 N 3375. Moscow: Transport, 32.
- [12] DSTU 2860-94. (1995). Nadijnist tekhniki. Terminy ta viznachennya. Kiev: Derzhstandart Ukraïni, 92.
- [13] DSTU 3433-96. (1998). Nadijnist tekhniki. Modeli vidmov. Osnovni polozhennya. Kiev: Derzhstandart Ukraïni, 41.
- [14] Shvedkov, E. L. (1982). Slovar-spravochnik po poroshkovej metallurgii. Kiev: Naukova dumka, 269.
- [15] Mezhdunarodnyj standart ISO 8402. (1988). Kachestvo. Slovar. Moscow: Izd-vo standartov, 16.
- [16] Lingaitis, L. P., Mjamlin, S. V., Baranovsky, D., Jastremskas, V. (2012). Experimental Investigations on Operational Reliability of Diesel Locomotives Engines. Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability, Vol. 14, № 1, 6–11.
- [17] Sozulya, V. D. (1979). Slovar-spravochnik po treniyu, iznosu i smazke detalej mashin. Kiev: Naukova dumka, 257.
- [18] Myamlin, S. V., Baranovskiy, D. M. (2011). Pracezdatnist, effektivnist ekspluatatsii ta dovgovichnist dizeliv specialnogo samoxidnogo ruxomogo skladu zaliznic. Dn-vsk: Vid-vo Makoveckij, 267.
- [19] Dyachenko, S. S., Rabuxin, V. B. (1987). Nadezhnost kolesnyx traktorov. Minsk.: Uradzhaj, 106.
- [20] Kaletin, C. B. (2007). Gruzovye vagonny novogo pokoleniya. Zheleznodorozhnyj transport, №8, 10–12.
- [21] Pavlov, I. V. (1978). Statisticheskie metody ocenki karakteristik nadezhnosti i effektivnosti slozhnyx sistem po rezultatam ispytaniy. Moscow: Sovetskoe radio, 36.