

## Прогнозирование состояния стохастической системы на электрифицированных железных дорогах

*П.А. Бодров, Н.А. Попова, А.Л. Ганашек*

*Ростовский государственный университет путей сообщения*

**Аннотация:** Стохастические системы - системы, в которых изменения носят случайный характер, в которых предсказываемые значения зависят от распределения вероятностей. Примером стохастической системы является энергосистема, на работу которой воздействует множество случайных факторов, их анализ и контроль позволит контролировать безопасный цикл и надежность работы. Повышение эффективности и надежности энергетической системы невозможно без разработки специальных средств контроля и прогнозирования их состояния.

**Ключевые слова:** электрифицированные железные дороги, стохастические системы, надежность эксплуатации, вероятность отказа, прогнозирование

Существующее многообразие задач, встречающихся при прогнозировании состояния стохастических систем, демонстрирует возможность применения, и обработки большого количества разнородных параметров, которые определяются произвольным образом. Такими параметрами будут являться различные и произвольные воздействия внешней среды, которые могут оказывать влияние в разные моменты времени, при этом любая система может находиться в неопределенном состоянии. Системы, в которых выбор переменных недетерминирован, прилагаемые воздействия и влияния являются случайными величинами, формализованы стохастически.

Прогнозирование состояния стохастических систем является значимым теоретическим направлением, вызывающим весомый интерес и имеющим определенное прикладное значение в различных областях научных исследований [1], в том числе и в оценке надежности технических систем железнодорожного транспорта.

Прогнозирование вероятности отказов является одним из перспективных методов повышения надежности различных технических систем в рамках их эксплуатационного цикла. Интересным в методологической основе прогнозирования отказов является то, что из информации о самой системе и

ее компонентах, а также из зависимостей, об изменениях самих параметров выявляются с определенной точностью неисправные составляющие системы за определенный временной период до момента возникновения самого отказа, на практике это позволяет заменять дефектные или изношенные части или восстановить их.

В процессе достижения конечной цели прогнозирования предложен некоторый объем изученных статистических и математических методологий, которые различаются аппаратами вычислений входных данных и видом формирования аналитических результатов. Стандартными подходами являются и чаще всего применяются вероятностные методы прогнозирования и методы статистического анализа данных.

Также могут применяться методы, основанные на машинном обучении с учителем и без, позволяющие строить прогностические модели на основе обработки как ретроспективных, так и актуальных данных, поступающих в данный момент с различных диагностических устройств, получать, при этом, неочевидные регрессии и закономерности, позволяющие оптимизировать модель. Блоки самообучения позволяют достаточно быстро анализировать и изменять параметры моделей прогнозирования при динамически меняющихся факторах функционирования составляющих элементов и рассчитывать временные интервалы проведения планируемых, точечных ремонтов, при этом значительно сокращаются аварийные простои оборудования и повышается его надежность.

Существенным ограничительным фактором применения данных методов являются ситуации, в которых статистика отказов составляющих элементов обладает свойством ограниченного объема, т.е. отказы в системе происходят дискретно, нечасто, а также существенное количество времени, необходимое на обучение модели нейронной сети в условиях критически большого количества данных.

---

Наиболее подходящим действием по прогнозированию отказов объектов и их составляющих элементов, узлов, на железнодорожном транспорте, является внедрение автоматизированного контроля, обеспечивающего большую степень охвата данных и предотвращение возможных неисправностей и отказов, приводящих к тяжелым аварийным ситуациям. Данные действия частично внедрены в работу инфраструктуры ОАО «РЖД», в данные системы подается поток данных о состоянии конкретных анализируемых объектов [2], при правильной обработке можно определять появление всевозможных отказов.

Информация собирается и обрабатывается в разработанных автоматизированных отраслевых системах КАСАНТ, КАСАТ, АС УРРАН. В основном это выходные отчеты, протоколы об отказах технических средств на основе данных эксплуатации и деятельности хозяйств, используемых в перевозочном процессе.

Нельзя не учитывать, что структурированные по определенным признакам данные позволяют при недостатках финансирования продлевать выставленный производителем или предприятием запланированный эксплуатационный цикл, при этом срок службы объектов, узлов и элементов достигает границ их предельного состояния. Все вышесказанное достигается с помощью внедрения оценки рисков отказов и перераспределения финансовых потоков на повышение характеристик надежности и условий безопасности перевозочного процесса как на наиболее приемлемых участках, так и в проблемных местах сети железнодорожного транспорта.

Для решения данных задач предлагается использовать метод интервального прогнозирования (ИП) нестационарных процессов [3,4] со свободным распределением факторов и независимыми отчетами по времени. Интервальное прогнозирование оказывается эффективнее обычной методики [5], так как обеспечивает выполнение прогнозируемого процесса при соблю-

---

дении строго определенном интервала наблюдений на любом временном отрезке.

В нашем случае большой интерес представляет анализ технических систем, тогда мы сможем учитывать в полной мере процессы воздействия случайных факторов [6,7] или воздействий. Для этого будем использовать модель со стохастическими дифференциальными уравнениями (СДУ) в качестве аппарата вычисления используем алгоритмы ИП. Уравнения учитывают участки динамической компоненты прогнозируемого процесса и саму нестационарность событий, что подтверждает перспективность применения данной методологии для большого диапазона описываемых систем и происходящих в них процессов, описываемых заданными СДУ.

СДУ и известные уравнения с заданными параметрами нужны для вычисления определенных зависимостей:

$$\mathcal{G}(t) + a(t, \mathcal{G}) = g\sqrt{t} \zeta(t) \quad (1)$$

$$\mathcal{G}_i = \mathcal{G}_{i-1} - \Delta a_{i-1} + g \int_{t_{i-\Delta}}^{t_i} \sqrt{t} \zeta(t) dt \quad (2)$$

постепенного износа  $A = -a_{i-1}$ , уравнение диффузии  $B(t_i) = \bar{B}t_i$ , усреднённой переменной  $M_{\xi_i} = \mathcal{G}_{i-1} - \Delta a_{i-1}$  и дисперсии  $D_{g_i} = \bar{D}t_i$ .

Рассчитаем величину параметра масштаба  $D$  из логарифмического уравнения  $-\sum_{i=1}^k \partial \ln P(\mathcal{G}_i | \mathcal{G}_{i-1}) / \partial D = 0$ . В результате получим:

$$D_k^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{(\mathcal{G}_i - M_{g_i})^2}{t_i}, \quad (3)$$

$$a_p^\pm = \langle M_{g_p}^* \rangle \pm \sqrt{2D_k^* t_p} \text{Erf}^{-1}(\gamma). \quad (4)$$

$\langle M_{g_p}^* \rangle$  величина, которая показывает динамику усредненной переменной. При разложении ряда функции  $a(\mathcal{G}_{i-1})$  по первым степенным показателям  $\mathcal{G}_{i-1}$ , включая вторые соответственно, получим

$\langle M_{g_p}^* \rangle = \mathcal{G}_0 [r^{-p} - \mathcal{G}_0 (T_g / T_{1g}) (1 - r^{-p})]^{-1}$ , где  $T_g = \langle a_g' \rangle^{-1}$ ,  $T_{1g} = \langle a_g'' / 2 \rangle^{-1}$  – временные постоянные,  $r = \exp(-\Delta / T_g)$ . Если при равенстве  $\langle a_g'' \rangle = 0$ , то  $\langle M_{g_p}^* \rangle = \mathcal{G}_0 r^p$ , тогда можно говорить о максимальном сходстве при стохастическом процессе с экспоненциально-коррелированным, также для моментов времени  $t_p, t_{p-1}$  – при пределе  $\Delta \rightarrow 0$ :

$$a^\pm(t) = m_g^*(t) \pm \sqrt{2D_T^*(1-r^2)t} \operatorname{Erf}^{-1}(\gamma) \quad t > t_k = T, \quad (4)$$

Для таких моментов проведенный анализ показывает точное описание алгоритма ИП, с применением модели СДУ, в результате становится существенным наличие в стохастически описываемом процессе средней составляющей, мешающей алгоритму. При процессе с  $\lim_{t \rightarrow \infty} m_g(t) = 0$ , при небольших временных постоянных  $m_g^*(t)$  ИП практически независимо от входных параметров, тем не менее зависимость может резко изменяться при больших постоянных времени СДУ или в случае нестационарной особенности самого процесса  $\mathcal{G}(t)$  относительно среднего, т.е.  $\lim_{t \rightarrow \infty} m_g(t) \neq 0$ .

Методика помогает решить задачи, где нужно достичь границ  $G^\pm = [G^-, G^+]$  прогнозируемыми процессами, и рассчитывать прогнозируемое время их достижения  $t_{zp} = \min(t_{zp}^-, t_{zp}^+)$ . В упрощенном случае модели тренда  $f^*(t) = \lambda_0^* + \lambda_1^* t$ ,  $G^\pm = G^\pm(t)$  и  $m_g^*(t_{zp})$  получим следующие выражения –  $t_{zp}^{(\pm)} = \left( \theta_T^* \pm \sqrt{\theta_T^{*2} + 4(G^{(\pm)} - \lambda_0^*)\lambda_1^*} \right)^2 / 4\lambda_1^{*2}$ ,  $\theta_T^* = \sqrt{2D_T^*(1-r^2)} \operatorname{Erf}^{-1}(\gamma)$ . Произведя расчет более вероятного времени достижения интервальной границы, можно вывести наиболее благоприятное для процесса время прогнозирования  $t_p^g = t_{zp}$  определенной стохастической модели при параметрах:

$t_{zp}$  функция доверительной вероятности;

$t_p^o = t_p^o(\gamma)$  Эффективное время прогнозирования с заданной доверительной вероятностью.

Интервальное определение рассчитывает приближение границ прогнозируемыми процессами, а также дает аналитическое определение временной адекватности прогнозируемого процесса. Моделированием параметров надежности стохастической системы с точки зрения учета вероятностных процессов является применение моделей с использованием цепей Маркова, такие модели помогают проанализировать показатели надежности системы как поток отказов.

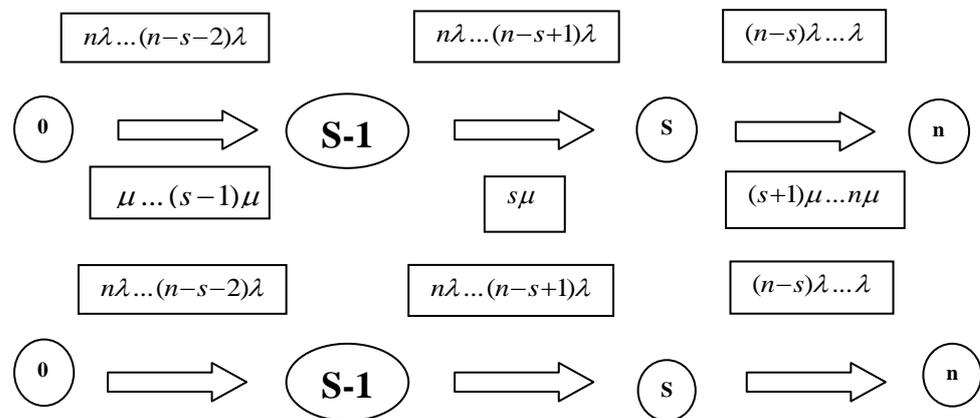


Рис. 1 – Граф описания системы с устройствами одной группы, границей отказа, с множеством нагруженных устройств и неограниченным ремонтом по времени; графом с элементами одной группы, порогом отказа, со всеми нагруженными элементами

Определение параметров надежности различных составляющих электрифицированных железных дорог, которые являются сложной функцией с  $n$  одной группы отказов с восстанавливаемыми устройствами с интенсивностями отказов  $\lambda$  и восстановления  $\eta$ , причем система нефункциональна при более  $s$  устройств или элементов, при этом  $1 \leq s \leq n$ . При достижении состояния  $s-1$  система вновь становится функциональной. Причем, возможно, од-

новременно могут выйти из строя  $f$  устройств, а  $1 \leq f \leq n$ , и одновременно могут реабилитировать свое состояние не более  $r$  устройств, при  $1 \leq r \leq n$ .  
 $\lambda_i = \lambda \min(n-i, f)$ ;  $i = 0 \dots n-1$ ;  $\mu_j = \mu \min(j, r)$ ;  $j = 1 \dots n$ .

### Базовые показатели надежности системы

Стационарный коэффициент готовности к функционированию заданной системы:

$$K_r = \frac{\sum_{k=0}^{s-1} \lambda^k \mu^{n-k} \prod_{i=0}^{k-1} \min(n-i, f) \prod_{j=k+1}^n \min(j, r)}{\sum_{q=0}^n \lambda^q \mu^{n-q} \prod_{i=0}^{q-1} \min(n-i, f) \prod_{j=q+1}^n \min(j, r)}; \quad (5)$$

В случае полного исправного состояния системы усредненной время наработки до первого отказа:

$$T_{0,s} = \frac{1}{\lambda} \sum_{k=0}^{s-1} \frac{\mu^{s-1-k}}{\lambda^{s-1-k}} \sum_{q=0}^k \frac{\prod_{j=1}^{s-1-k} \frac{\min(q+j, r)}{\min(n-q-j, f)}}{\min(n-q, f)}; \quad (6)$$

Среднее время наработки на отказ:

$$T_{s-1,s} = \frac{1}{\lambda} \sum_{k=0}^{s-1} \frac{\mu^{s-1-k}}{\lambda^{s-1-k}} \sum_{q=0}^k \frac{\prod_{j=1}^{s-1-k} \frac{\min(k+j, r)}{\min(n-k-j, f)}}{\min(n-k, f)}; \quad (7)$$

Усредненное время до первого восстановления из полностью неисправного состояния:

$$T_{n,s-1} = \frac{1}{\mu} \sum_{k=0}^{n-s} \frac{\lambda^{n-s-k}}{\mu^{n-s-k}} \sum_{q=0}^k \frac{\prod_{j=1}^{n-s-k} \frac{\min(q+j, r)}{\min(n-q-j, f)}}{\min(n-q, f)}; \quad (8)$$

Среднее время восстановления системы:

$$T_{s,s-1} = \frac{1}{\mu} \sum_{k=0}^{n-s} \frac{\lambda^{n-s-k}}{\mu^{n-s-k}} \sum_{q=0}^k \frac{\prod_{j=1}^{n-s-k} \frac{\min(k+j, f)}{\min(n-k-j, r)}}{\min(n-k, r)}. \quad (8)$$

Для построения стохастической модели воспользуемся данными эксплуатационного цикла, которые заносим в Марковскую матрицу. Оценка вероятности переходов в данном случае - статистическая оценка временных ве-

роятностей марковской цепи. В дальнейшем осуществляется подсчет регистрируемых фактов по событиям за избранный период и последующее вычисление элементов матрицы по формуле:

$$P_{ijk} = \frac{N_{ijl}}{\sum_{j=1}^m N_{ijl}} \quad (14)$$

где  $N_{ijl}$  – число событий  $\{X(t_{n+1}) = X_i, X(t_n) = X_j, U(t_n) = U_k\}$ , а знаменатель  $P_{ijk}$  соответствует числу событий  $\{X(t_n) = X_i, U(t_n) = U_k\}$ . Где  $X_i$  комбинация событий,  $U_k$  управляющий параметр, далее получаем полную систему событий, заключающихся в переходах в состояния  $X_j$ . Нормализация делает матричную структуру  $P$  стохастической.



Рис. 2. – Вероятностное поле на базе матрицы Маркова

Метод Монте-Карло и метод функционального преобразования производят моделирование координатной плоскости состояния [5] (вероятностное поле Маркова) (рис.2), при этом необходимо на каждом шаге моделирования  $t_n$  определить текущее состояние процесса при  $X_i$  и текущее управление  $U_k$ .

Вероятности отказа работы некоторых устройств

Таблица 1

Оборудование и устройства	Факторы, параметры по степени значимости и воздействия				
	Напря- жение	Воздействие окружающей среды	Процессы старения, срок эксплуа- тации прой- ден в %	Периодичность выполняемых ремонтов	Факты воз- никновения отказов, на- рушений
<b>Трансформаторы и автотрансформаторы</b> Вероятность безотказной работы $P(n_i)$ $n$ – фактор и параметр; $i$ – степень значимости и воздействия; Вероятность отказа $Q(n_i)$ $n$ – фактор и параметр; $i$ – степень значимости и воздействия;	6 – 10  0,9955  0,005	Слабое  0,9011  0,099	30  0,8242  0,176	В срок  0,9326  0,068	Редко  0,9562  0,044
<b>Узлы подстанций</b> Вероятность безотказной работы $P(n_i)$ $n$ – фактор и параметр; $i$ – степень значимости и воздействия; Вероятность отказа $Q(n_i)$ $n$ – фактор и параметр; $i$ – степень значимости и воздействия;	20 – 35  0,9942  0,0058	Среднее  0,897  0,103	60  0,82  0,18	С минималь- ными отклоне- ниями 0,9  0,1	Частично, система функциони- ровала 0,619  0,381
<b>Выключатели</b> Вероятность безотказной работы $P(n_i)$ $n$ – фактор и параметр; $i$ – степень значимости и воздействия; Вероятность отказа $Q(n_i)$ $n$ – фактор и параметр; $i$ – степень значимости и воздействия;	110 – 220  0,9938  0,0062	Сильное  0,872  0,128	90  0,783  0,217	С отклонения- ми выше нор- мы 0,721  0,279	Часто систе- ма выведена из строя 0,532  0,468

Далее рассчитываем распределение и вычисляем интегральную функцию распределения  $F(X_j)$ :

$$F(x) = \int_{-\infty}^x p(x) dx \quad (15)$$

$$F(X_j) = \text{Prob}\{X(t_n) < X_j\} = \sum_{s=1}^j P_{isk} \quad (16)$$

Далее произведены расчеты вероятности отказа работы задействованных в тяговом электроснабжении некоторых устройств под воздействием факторов и изменений их характеристик, это позволило оценить состояние



### **Вывод**

В статье рассмотрены вопросы прогнозирования вероятности отказа стохастических систем на электрифицированных железных дорогах. В результате проведенного анализа установлено, что оптимизация работы технических систем в рамках развития надежности не представляется возможным без разработки специальных современных прикладных средств и инструментов контроля и прогнозирования их состояния. Вопросы системного исследования проблем контроля, диагностики и оптимизации приобретает популярность в связи с поступательным развитием технологий и непрерывным усложнением контролируемых объектов.

### **Литература**

1. Концепция комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте. М.: ОАО «РЖД», 2010 – 87 с.
2. Бодров П.А., Ганашек А.Л. Повышение эксплуатационной надежности стохастических систем, путем прогнозирования отказов ее конструктивных элементов // «Транспортная энергетика», ФГБОУ ВО РГУПС, Ростов-на-Дону, – 2020 г. С. 61-65.
3. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. – 6-е изд. стер. – М.: Высшая. школа, 1999. – 576 с.
4. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем: учеб. пособие для электроэнергетических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1984. – 256 с.
5. Лебедев А.Н. и др. Вероятностные методы в инженерных задачах: справочник. – СПб. Энергоатомиздат. 2000. – 333 с.

6 Wu Z., Nagarajan T., Kumar A., Rennie S., Davis L. S., Grauman K., Feris R. BlockDrop: Dynamic Inference Paths in Residual Networks // arXiv. – 2017. – 312 p.

7 Kachala, V.V. Fundamentals of systems theory and systems analysis. – М: Goryachaya liniya-Telekom, 2007. – 216 p.

8 Трубицин М.А., Лукашевич О.Г. Проблема гололёда на проводах воздушных линий системы электроснабжения железнодорожного транспорта // Инженерный вестник Дона. – 2017. – №4. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4582

9 Кондрашов, И.А. Геометрия зоны нагрева контактного провода подвижной электрической дугой // Инженерный вестник Дона. – 2020. – №7. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2020/6542

10. Кондрашов, И.А., Семенов Ю.Г., Цой А.Д., Кецкало Д.А. Моделирование объёмных характеристик области нагрева контактного провода подвижной электрической дугой и их вычисление в среде MathCAD / // Вестник РГУПС. 2021. № 1. С. 140–148. DOI: 10.46973/0201–727X\_2021\_1\_140.

## References

1. Konceptsiya kompleksnogo upravleniya nadezhnost`yu, riskami, stoimost`yu zhiznennogo cikla na zheleznodorozhnom transporte [The concept of integrated management of reliability, risks, life cycle cost in railway transport]. М. ОАО «RZhD», 2010. 87 p.

2. Bodrov P.A., Ganashek A.L. [Increasing the operational reliability of stochastic systems by predicting the failures of its structural elements]. Sbornik nauchny`x trudov «Transportnaya e`nergetika», FGBOU VO RGUPS, Rostov-na-Donu, 2020. pp. 61-65.



3. Ventcel`, E.S. Teoriya veroyatnostej [Probability theory]: ucheb. dlya vuzov. 6-e izd. ster. M. Vy`ssh. shk., 1999. 576 p.
4. Kitushin V.G. Nadezhnost` e`nergeticheskix system [Reliability of energy systems]: ucheb. posobie dlya e`lektroe`nergeticheskix special`nostej vuzov. M. Vy`ssh.shk., 1984. 256 p.
5. Lebedev A.N. i dr. Veroyatnostny`e metody` v inzhenerny`x zadachax [Probabilistic methods in engineering problems]: spravochnik. SPb: E`nergoatomizdat. 2000. 333 p.
6. Wu Z., Nagarajan T., Kumar A., Rennie S., Davis L. S., Grauman K., Feris R. BlockDrop: Dynamic Inference Paths in Residual Networks arXiv. 2017.
7. Kachala, V.V. Fundamentals of systems theory and systems analysis. M: Goryachaya liniya-Telekom, 2007. 216 p.
8. Trubicin M.A., Lukashevich O.G Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №4. [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4582](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4582)
9. Kondrashov, I.A Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №7. [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2020/6542](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2020/6542)
10. Kondrashov, I.A., Semenov Yu.G., Czoj A.D., Keczkalo D.A. Vest-nik RGUPS. 2021. № 1. S. 140–148. DOI 10.46973/0201–727X\_2021\_1\_140.