

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 стохастического процесса 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.

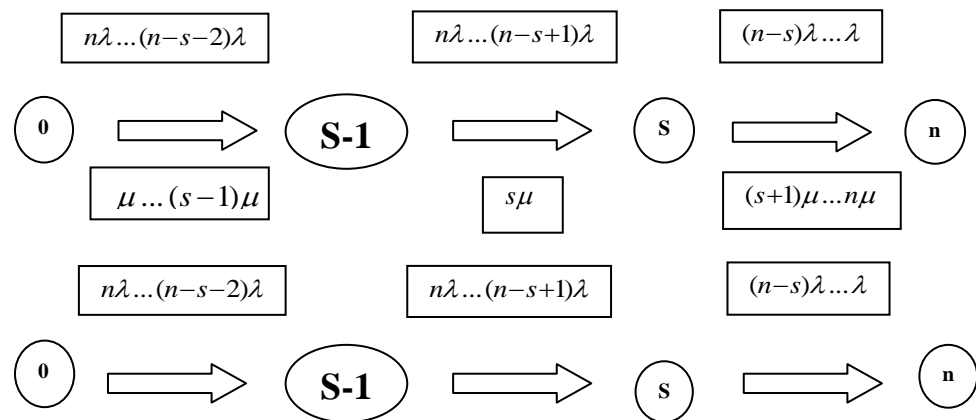


Рис. 1 – Граф описания системы с устройствами одной группы, границей отказа, с множеством нагруженных устройств и неограниченным ремонтом по времени; графом с элементами одной группы, порогом отказа, со всеми нагруженными элементами

Определение параметров надежности различных составляющих электрифицированных железных дорог, которые являются сложной функцией с n одной группы отказов с восстанавливаемыми устройствами с интенсивностями отказов λ и восстановления η , 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-

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

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
Трансформаторы и автотранс- форматоры 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	Слабое	30	В срок	Редко
	0,9955	0,9011	0,8242	0,9326	0,9562
	0,005	0,099	0,176	0,068	0,044
Узлы подстанций 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	Среднее	60	С минималь- ными отклоне- ниями 0,9	Частично, система функциони- ровала 0,619
	0,9942	0,897	0,82	0,1	0,381
	0,0058	0,103	0,18		
Выключатели 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	Сильное	90	С отклонения- ми выше нор- мы 0,721	Часто систе- ма выведена из строя 0,532
	0,9938	0,872	0,783	0,279	0,468
	0,0062	0,128	0,217		

Далее рассчитываем распределение и вычисляем интегральную функ-
 цию 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 задействован-
 ных в тяговом электроснабжении некоторых устройств под воздействием
 факторов и изменений их характеристик, это позволило оценить состояние

факторов и спрогнозировать изменение их характеристик. Полученные данные сведены в таблицу 1.

Для внедрения предложенных методов прогнозирования стохастической системы необходимо провести комплексные изменения в жизненном цикле электрифицированных железных дорог (рис. 3).



Рис. 3. – Изменения в жизненный цикл электротранспортной системы

Многие объекты электрифицированного железнодорожного транспорта являются стохастическими, т.е. их параметры зависят от случайных характерных воздействий.

Кроме того, некоторые параметры устройств и элементов изменяются в процессе эксплуатации и жизненного цикла [8,9], также массовое изготовление по одинаковой технической документации не дает полной уверенности, что несколько различающиеся статических и динамических характеристик не повлияют на работу системы в целом. Данные характеристики представляются в моделировании как случайные функции [10], для которых существуют определенные характеристики (математическое ожидание, дисперсия).

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
9. Kondrashov, I.A Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №7. 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.