

## Предиктивный анализ состояния объектов как новая стратегия технической эксплуатации электрифицированных железных дорог

П.А. Бодров, Н.А. Попова

Ростовский государственный университет путей сообщения

**Аннотация:** Стабильные характеристики надежности являются залогом неаварийной эксплуатации электрифицированных железных дорог, и, несомненно, растет рентабельность перевозочных процессов. В статье предложена инновационная методика определения характеристик надежности, с уменьшением риска возникновения отказа или аварийной ситуации. Электрическая тяга задействована на большей части полигона железных дорог. Необходимо рассмотреть вопросы надежности системы электроснабжения для прогнозирования состояния системы и изучить закономерности взаимодействия, которые влияют на системные и внесистемные связи.

Деятельность компании «ОАО» РЖД привязана к числу и длительности отказов, для учета отказов были созданы отдельные системы. Система электроснабжения насчитывает большое число объектов, узлов и элементов, рассредоточенных на большой площади, подающих под разные нагрузки.

**Ключевые слова:** электрифицированные железные дороги, предиктивный анализ, надежность эксплуатации, вероятность отказа, прогнозирование

Рассмотрим особенности системы тягового электроснабжения (рис. 1).

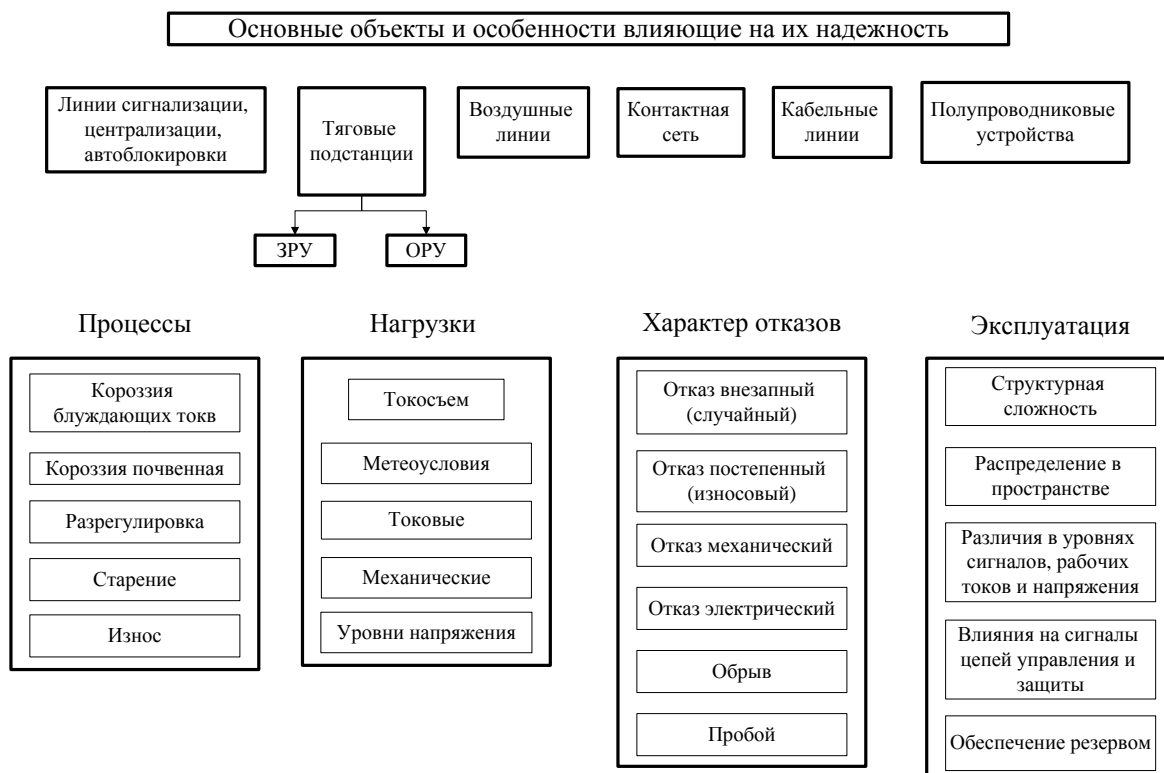


Рис. 1 – Особенности, влияющие на работу системы электроснабжения

Приведенные данные не являются исчерпывающим списком. Существует стохастичность влияющих факторов системы тягового электроснабжения [1,2], и даже один из таких факторов будет затруднять выбор методов и подходов для прогнозирования отказов.

Получить статистические закономерности можно только с помощью диагностических данных, которые будут показывать изменение состояния в достаточном для прогнозирования диапазоне. В большинстве случаев это требует закупки передвижных и стационарных диагностических лабораторий, такие данные можно получить только при установленном дорогостоящем оборудовании. Циклический сбор данных необходим для присутствия в анализе зависимостей [3,4], описывающих процессы в системе, а именно цикл отказа. Рассмотрим связи между внутренними и внешними параметрами:

$$F(X, D, U) = 0 \quad (1)$$

где  $X$  – внутренние параметры;  $D$  – внешний параметр воздействий;  $U$  – вектор внешних факторов воздействия.

Модель до наступления отказа  $Z = \psi(X, Y_{нач}, t)$ , где  $\psi$  – система передаточных функций;  $X$  –  $n$ -мерный вектор поступающих на вход воздействий, а  $Z$  – результирующая выходная функция;  $Y_{нач}$  –  $n$ -мерный вектор начально поступающих воздействий;  $t$  – время. ОД [5], находящийся в  $i$ -м неисправном состоянии, представляется моделью  $Z^i = \psi^i(X, Y_{нач}^i, t)$ , где  $Y_{нач}^i$  начальное значение внутренних переменных  $i$ -го отказного состояния не совпадающее с  $Y_{нач}$ . Конкретная система с состоянием  $Z^* = \psi^*(X, Y_{нач}, t)$ .

Анализ случайных факторов, влияющих на систему, подразумевает наличие математического ожидания при расчетах, необходимо знать закон распределения. Имея функции дисперсии и распределения случайной величины, можно получить аналитическую и статистическую модель, у которой значе-

ния функции будут постоянными величинами, а внешние условия и факторы будут исчисляться известными случайными функциями.

Целесообразным будет рассмотрение вероятностного метода [6,7], теоремы Байеса. Состояние системы характеризуется некоторыми факторами или воздействиями  $K_j$ , указанная группа может выходить за границы нормального состояния процесса как при наличии параметрически зависимого состояния  $D_i$ , так и при его отсутствии. Важно лишь то, что появление фактора  $K_j$  является случайным, но статистически зависимым от наступления состояния (например предотказное состояние)  $D_i$ . Вероятность совместного появления событий (наличие у объекта состояния  $D_i$  и группы  $K_j$ ):

$$P(D_i, K_j) = P(D_i) \cdot P(K_j / D_i) = P(K_j) \cdot P(D_i / K_j), \quad (2)$$

Получим теорему Байеса:

$$P(D_i / K_j) = P(D_i) \frac{P(K_j / D_i)}{P(K_j)}, \quad (3)$$

где  $P(D_i)$  – априорная вероятность состояния, определенная по статистическим данным;  $P(D_i / K_j)$  – вероятность появления группы  $K_j$  у объектов с состоянием  $D_i$ ;  $P(K_j)$  – вероятность появления группы  $K_j$  во всех объектах независимо от состояния.

В начале расчета имеем функцию плотности вероятности, в результате чего можно получить апостериорное распределение оценок параметров или переменных модели. На выходе производится пересчет вероятности состояния, с учетом априорных и апостериорных данных. Формула Байеса для расчета желаемой вероятности:

$$P_A(H_i) = \frac{P(H_i) \cdot P_{H_i}(A)}{\sum_{i=1}^n P(H_i) \cdot P_{H_i}(A)}, \quad (4)$$

где  $P_{H_i}(A)$  – вероятность наступления состояния или события  $A$  при выборе  $i$ -й гипотезы;

$P(H_i)$  – априорная вероятность;

$P_A(H_i)$  – апостериорная вероятность  $i$ -й гипотезы после возникновения состояния или события  $A$ .

Из выводов теоремы получаем аналитическое прогнозирование события, и в результате имеем данные о риске наступления воздействия или события с привязкой к фактору или признаку. Рассмотрим конкретный пример:

1. Зафиксирован отказ узла контактной подвески – событие  $E$ , оно связано с событиями  $H_1, H_2, \dots, H_n$ .

2. Имеем вероятность отказа  $E$ , при условии, что одно из событий  $H_1, H_2, \dots, H_n$  наступило:  $P(E/H_1), P(E/H_2), \dots, P(E/H_n)$ , не исключено, что все предшествующие отказу события уже произошли.

3. Данные события могут являться предшествующими изменениями в результате влияния всевозможных факторов в узлах и элементах контактной подвески, или факторами, которые привели к отказу (событие  $E$ ).

4. Предположим, нам известно, что отказ произошел. В этом случае вероятность того, что какое-либо из событий  $H_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) наступило, определяется по следующей формуле:

$$P(H_i / E) = \frac{P(E / H_i) \cdot P(H_i)}{P(E / H_1) \cdot P(H_1) + P(E / H_2) + \dots + P(E / H_n) \cdot P(H_n)} = \frac{P(EH_i)}{P(E)} \quad (5)$$

где  $P(EH_i)$  – совместная вероятность событий  $E$  и  $H_i$ , т. е. вероятность того, что произойдут оба события вместе.

$P(H_i / E)$  – апостериорная вероятность.

$P(E)$  – полная вероятность события  $E$ .

В автоматизированных отраслевых системах учета риска и отказов, данные выводы помогут усовершенствовать процессы оценки вероятностей

отказов на основе статистических данных об отказах с упором на достоверность возникновения событий или влияния факторов. Рассмотрим табл. 1.

Оценка гипотезы

Таблица 1

Условие(фактор) наступления отказа	Степень влияния фактора	Отказ произойдет	Отказ не произойдет
Воздействие внешней среды	Сильное	10	15
	Слабое	5	6
Действия ремонтных бригад при локализации повреждения	Эффективное	12	43
	Недостаточное	24	23
Брак, неправильная эксплуатация	Часто	14	23
	Редко	24	21

При разных степенях воздействия окружающей среды [8,9], компетентности и действий ремонтных бригад, периодичности и качестве выявления брака или нарушений в процессе эксплуатации, необходимо дать характеристики возникновения отказа в узлах и элементах контактной сети. За предположения (гипотезы) берется количество прогнозируемых отказов –  $H_1$ .  $H_2$  – количество непредвиденных (произошедших). Имеет большое влияние на анализ группа из 3-х факторов, описывающих влияние на работу и эксплуатацию контактной сети (диагностические признаки  $E_1, E_2, E_3, E_4$ ). Группа из 3-х факторов принимается за событие  $E$ .

Наблюдаемым свидетельством выступает совокупность 3-х событий, которые наблюдаются совместно: сильное воздействие внешней среды, недостаточные действия ремонтных бригад, частый брак. Рассчитаем вероятности признаков с помощью формулы произведения вероятностей:

$$P(E / H_i) = P(E_1, E_2, E_3 / H_i) = P(E_1 / H_i)P(E_2 / H_i)P(E_3, H_i), i = 1, 2.$$

$P(H_i / E)$  – Полученная апостериорная вероятность выступает наиболее четкой оценкой вероятности обнаружения отказа контактной сети.

Для более полного анализа необходимо создание базы данных по каждой технической единице (табл.2).

Группы данных

Таблица 2

1 группа данных		2 группа данных
Тип оборудования	Кем произведена установка	Характеристика надежности
Маркировка оборудования	Должность наладчика	Математическая модель узла и элемента (в перспективе)
Заводской номер	Фамилия наладчика	Математическая модель системы, в которой задействована техническая единица (в перспективе)
Завод изготовитель	Должность приемщика	Неисправность оборудования
Отзыв о заводе изготовителе	Фамилия приемщика	Причины неисправностей
Дата изготовления	Состояние единицы	Последствия неисправностей
Место установки	Кем произведена установка	Аварийные случаи
Дата ввода в работу	Должность и фамилия производившего работы	Причины аварий
Даты обслуживания, опробования, обслуживания, контроля ревизии, ремонта, замены	Причина выполнения и невыполнения работ	Последствия аварий
Должность и фамилия производившего работы	Характеристика лиц, участвующих в выполнении работ	Факторы влияющие на эксплуатационный цикл
Квалификация всех задействованных в жизненном цикле технической единицы лиц	Вид и объем работ, который выполнен (осмотр, проверка, обслуживание, ремонт и т. д.)	Погодные условия
Замечания к работе (при обслуживании, в ремонте)	Время начала и окончания работ	Состояние (в работе, в резерве, в ремонте)

Необходимо также создание базы данных в реальном времени (рекомендуема периодичность внесения данных 2 раза в сутки) состояния технической единицы:

- Нагрузка
- Срабатывание устройств

- Отказы
- Наличие неисправностей
- Вид и объем работ (запланированный)

Данные будут вноситься в прогнозные ведомости, в которых будет содержаться полная информация о технической единице. Прогнозная ведомость будет составляться для элементов, например, для определения предотказного состояния контактного провода или несущего троса длиной 70 м до протяженных объектов, например, межподстанционной зоны в целом. Прогнозная ведомость может масштабироваться в зависимости от целей анализа.

1. По созданной критической базе собираем информацию, характеризующую отказ:

- было ли замечание (лаборатории контактной сети) за время до отказа  $t$ ;
- было ли устранено замечание;
- если замечание устранено, провести анализ работ;
- причина неустранения;
- сбор данных о технической единице, поиск закономерностей.

Рассмотрим пример для прогнозирования процесса с  $P$ -шагов. Наблюдаем процесс с заданной последовательностью  $\xi = [\xi_1, \dots, \xi_k]^T$ , принадлежащей нестационарной плотности (НП)  $P_\xi = P(\xi | X, t)$ , где  $X$  – набор параметров НП. Во времени модель процесса представляется СДУ:

$$\dot{\xi}(t) + a(t, \xi) = g(t)\zeta(t), \quad (6)$$

где  $a(t, \xi)$ ,  $g(t)$  – известные простые функции детерминированного процесса, удовлетворяющие условию Липшица,  $\zeta(t)$  – нормальный белый шум с нулевым средним  $\langle \zeta(t) \rangle = 0$  и корреляционной функцией

$\langle \zeta(t)\zeta(t') \rangle = N\delta(t-t')/2$ ,  $N$  – односторонняя спектральная плотность. Оптимальная разностная схема, при понимании СДУ (1) в форме Ито, имеет вид:

$$\xi_i = \xi_{i-1} - \Delta a_{i-1} + \Delta g_i \zeta_i, \quad (7)$$

где  $\Delta = t_i - t_{i-1}$  – небольшой интервал временного отрезка, с которого производится интегрирование,  $a_{i-1} = a(t_{i-1}, \xi_{i-1})$ ,  $\zeta_i = (1/\Delta) \int_{t_{i-1}}^{t_i} \zeta(t) dt$ ,  $M_{\xi_i} = \xi_{i-1} - \Delta a_{i-1}$

– математическое ожидание,  $D_{\xi_i} = B(t_i)\Delta$  – математическая дисперсия,

$B(t_i) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} (N/2\Delta) \int_{t_{i-1}}^{t_i} g^2(x) dx$  – коэффициент диффузии (в случае  $g = \text{const}$  этот

коэффициент  $B = Ng^2/2$ . Глобальная среднеквадратическая погрешность раз-

ностной схемы определяется величиной  $\sigma \leq \Delta \left( \int_0^T M \left[ (a'_\xi g(t))^2 \right] dt \right)^{1/2}$ ,  $T = k\Delta$ . В

дальнейшем, там, где это не вызывает сомнений, зависимости функций от аргументов опускается.

Очевидно, что ИП помогает с достижением преследуемых границ прогнозирования [10], протекающие процессы требуют оценки временной адекватности при построении модели прогнозирования.

### **Выводы**

Данные предложения позволят усовершенствовать существующую систему управления безопасным и надежным эксплуатационным циклом работы системы электроснабжения с помощью фундаментально математического обеспечения, повысить уровень готовности аварийно восстановительных сил и средств, скорости их реагирования на транспортные происшествия и ускорение времени восстановительных работ и снизить убытки от простоев поездов и затраты на отказы, аварийные ситуации.

### **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. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4582](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4582)

9 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.

10. Бодров П.А., Попова Н.А., Ганашек А.Л. Прогнозирование состояния стохастической системы на электрифицированных железных дорогах // Инженерный вестник Дона. – 2021. – №8. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7132](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7132)

---

## 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]. M. OAO «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. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4582](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4582)
  9. Kondrashov, I.A., Semenov Yu.G., Czoj A.D., Keczkalo D.A. Vestnik RGUPS. 2021. № 1. S. 140–148. DOI 10.46973/0201–727X\_2021\_1\_140.
  10. Bodrov P.A., Popova N.A., Ganashek A.L. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. №8. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7132](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7132).
-