

УДК 656.075:51-74

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕСУРСА СТРЕЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Горелик А.В., Дорохов В.С., Орлов А.В., Смагин Ю.С.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, e-mail: gatsroat@yandex.ru

Стрелочные электроприводы (СЭ) – это устройства массового применения в железнодорожной автоматике ОАО «РЖД». Важной задачей является оценка динамики их состояния во времени по данным технической диагностики и результатам осмотров, извлекаемых из информационных систем. С учетом того, что довольно значительная часть СЭ в ОАО «РЖД» функционирует с продлением срока службы, более важной является оценка на основе динамики технического состояния их остаточного ресурса. В статье предложен статистический метод индивидуальной оценки остаточного ресурса каждого обследуемого СЭ, так как техническое состояние и его динамика, наработка, а также характеристики предельного состояния каждого из них в существенной мере зависят от условий эксплуатации. В качестве исходных данных для оценки остаточного ресурса СЭ используются данные о событиях разного уровня критичности с точки зрения надежности его функционирования: об отступлениях от норм содержания, о предотказных состояниях и отказах. Оценка остаточного ресурса базируется на анализе регрессионного тренда, построенного взвешенным методом наименьших квадратов (взвешенным МНК), модифицированным для снижения чувствительности к специфическому поведению регистрируемых статистических данных и учета характера динамики состояния стрелочного электропривода. На описывающих типичную статистическую совокупность, извлекаемую из информационных систем, моделированных данных приведена сравнительная характеристика предложенного метода построения тренда с классическим МНК. Метод может использоваться для получения уточненных точечных оценок индивидуального остаточного ресурса стрелочных электроприводов в конкретных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: остаточный ресурс, стрелочные электроприводы, хозяйство автоматики и телемеханики, ключевой показатель, предельное состояние, регрессионный тренд

STATISTICAL EVALUATION OF THE ELECTRIC SWITCH MECHANISM RESOURCE

Gorelik A.V., Dorokhov V.S., Orlov A.V., Smagin Yu.S.

*Federal State Institution of Higher Education «Russian University of Transport», Moscow,
e-mail: gatsroat@yandex.ru*

Electric switch mechanisms (ESM) are devices of massive use in railway automation of JSC Russian Railways. An important task is to assess dynamic of their state in time according to the technical diagnostics data and the results of inspections extracted from the information systems. Taking into account the fact that a rather significant part of the ESM at JSC Russian Railways operates with lifetime extension, it is more important to assess technical state dynamics of their residual resource. The article provides a statistical method of individual evaluation of the residual resource of each inspected ESM, since the technical condition and its dynamics, the operating time and the limiting state of each one of them depends crucially on the operating conditions. As input for evaluation of the ESM's residual resource, the data on the events of different critical levels in terms of functioning reliability is used: on the deviations from the maintenance standards, on the pre-failure conditions and on the failures. Residual resource assessment is based on the analysis of a regression trend, constructed by the weighted least-squares method (weighted LSM) which is modified to reduce instability to the specific behavior of the recorded statistical data and to take into account the characteristics of ESM's state dynamics. The article provides a comparative analysis of the proposed method of constructing a trend with the classical LSM, applied to the simulated statistical data that describes the typical aggregated data, extracted from the information systems. The method can be used to obtain the refined point estimation of the individual residual resource of electric switch mechanisms that operate in the specific conditions.

Keywords: residual resource, electric switch mechanisms, automation and remote control systems, key indicator, limiting state, regression trend

На сети железных дорог ОАО «РЖД» в эксплуатации находится более 120 тыс. стрелочных электроприводов (СЭ) различных типов. По большей части это устаревшие СЭ типа СП-6М и СП-6, которые составляют приблизительно 68% и 19% соответственно от общего числа. По данным ОАО «РЖД» за 2018 г. именно на СЭ вышеупомянутых типов приходится наибольшее число отказов, четверть из которых носят деградационный характер. СЭ являются дорогостоящими устройствами железнодорожной автоматики с продолжительным назначенным сроком службы. По истечении назначенного срока

службы СЭ, как и другая аппаратура, должен подлежать списанию и утилизации, однако часто имеет место продление срока эксплуатации. Сложившаяся практика обусловлена дефицитом ресурсов компании ОАО «РЖД», который привел к невозможности реализации регламентного метода технического обслуживания. В частности, оказалось невозможным выполнять в полном объеме и в установленные сроки все необходимые работы по техническому обслуживанию и ремонту, а также проводить массовую замену аппаратуры, выработавшей назначенный срок службы.

В связи с этим в настоящее время компания меняет концепцию технической эксплуатации инфраструктуры в сторону рационализации расходов. На протяжении ряда лет внедряется методология управления ресурсами, рисками и анализа надежности, или УРРАН [1], которая базируется на разработанной для европейских железных дорог методологии RAMS [2]. В основе подхода, воплощаемого в методологии УРРАН применительно к инфраструктуре, лежит адресное распределение ресурсов по фактической потребности с одновременной минимизацией стоимости жизненного цикла аппаратуры.

Потребность в ресурсах определяется на основе диагностики состояния аппаратуры. В связи с необходимостью принятия решений по реализации различных мероприятий на основе фактического состояния аппаратуры и вышеуказанными проблемами технической эксплуатации непрерывная техническая диагностика и периодические осмотры приобретают особую важность. В настоящее время в компании применяется большое количество систем технической диагностики, а также иных информационных систем, в которых регистрируются различные данные о функционировании аппаратуры. Однако используются эти данные не в полной мере, так как они локализируются в своих информационных системах, представляются в разных видах и прирастают высокими темпами. В связи с этим особый интерес специалистами компании проявляется в направлении предиктивной аналитики [3]. В полной мере это относится к СЭ. Их состояние часто контролируется той или иной системой технической диагностики и мониторинга (СТДМ), выявляющей помимо прочего предотказные состояния. Если в СЭ происходят отказы, то они фиксируются в системах КАСАНТ и АСУ-Ш-2; результаты комиссионных осмотров в виде отступлений от норм содержания фиксируются в системе ЕК АСУИ. Эти сведения, представляющие собой преимущественно статистические данные, в совокупности позволяют определять фактическое состояние каждого СЭ и динамику его изменения, а следовательно, с их использованием можно попытаться дать индивидуальную оценку остаточного ресурса до достижения предельного состояния, что с учетом вышесказанного актуально для реализации мето-

дологии УРРАН. Однако различные данные по-разному характеризуют состояние СЭ.

В настоящей статье предлагается метод индивидуальной точечной оценки остаточного ресурса СЭ, впервые позволяющий обобщить статистические данные из различных источников.

Метод оценки остаточного ресурса СЭ базируется на взвешенном методе наименьших квадратов (взвешенном МНК), где веса определяются с учетом специфики хранимых в разных информационных системах статистических данных.

Следует отметить, что ранее предпринимались попытки оценки остаточного ресурса [4]. Вместе с тем ранее применялся классический МНК, приводивший к существенным отклонениям оценок остаточного ресурса при наличии «промахов». Кроме того, метод применялся целиком для систем железнодорожной автоматики и телемеханики, а не для аппаратуры.

Цель исследования: разработка метода для получения уточненных точечных оценок остаточного ресурса СЭ.

Основными задачами являются:

- разработка математической модели, обобщающей статистические данные из разных информационных систем;
- формирование регрессионного тренда взвешенным МНК для оценки динамики состояния СЭ;
- формирование критерия остаточного ресурса СЭ.

Метод оценки остаточного ресурса стрелочных электроприводов

Исходные данные представляют собой моменты наступления различных событий с СЭ: отказов, предотказных состояний и отступлений от норм содержания СЭ. События происходят формально в случайные моменты времени. Формат данных единообразен для всех категорий событий, поэтому для удобства все перечисленные случайные события будем называть общим термином «событие».

В качестве ключевого показателя при оценке остаточного ресурса предлагается использовать частоту событий, вычисляемую на основе данных о моментах их регистрации. В этом случае исходные данные о различных событиях для оценки остаточного ресурса конкретного типа СЭ по частоте событий можно представить короткежем вида

$$R = \langle x_j, z_j, s_j, t_{\text{соб } j}, n_{\text{соб } ij} \mid j = 1, \dots, N; i = 1, \dots, 3, \rangle \quad (1)$$

где x_j – инвентарный номер СЭ;

z_j – двоичный оператор, учитывающий год эксплуатации (1 – последний год до прекращения эксплуатации, 0 – не последний год до прекращения эксплуатации);

s_j – условный номер года начала отсчета при формировании статистической совокупности данных о событиях (используется сквозная нумерация от 1 (год начала наблюдения) до m (год окончания наблюдения));

$t_{\text{cob } j}$ – время регистрации события с начала наблюдения, выраженное в часах;

$n_{\text{cob } ij}$ – количество зарегистрированных событий в момент времени $t_{\text{cob } j}$;

i – уровень критичности (приоритета) события;

N – мощность кортежа событий.

Моменты наступления событий t_{cob} следует упорядочить в порядке регистрации во времени от более ранних событий к более поздним по индексу j .

Уровень критичности для событий вида «отступления от норм содержания» и «предотказные состояния» определяют в соответствии с утвержденными в хозяйстве автоматики и телемеханики классификаторами.

На основе кортежа (1) формируют кортеж для определения значения частоты событий, соответствующей предельному состоянию СЭ:

$$R = \langle x_j, s_j, t_{\text{cob } j}, n_{\text{cob } ij} \mid j = 1, \dots, N; i = 1, \dots, 3, z_j = 1 \rangle. \quad (2)$$

Уровень приоритета (критичности) событий предлагается учитывать соотношением

$$\delta_{\text{cob } k} = \frac{1}{k^r}, \quad (3)$$

где r – коэффициент приоритета (критичности) событий (натуральное число, рекомендуемое значение $r = 2$).

Для каждого элемента кортежей (1) и (2) выполняют расчет результирующей частоты событий по формуле

$$f_{\text{cob } j} = \sum_{k=1}^2 \delta_{\text{cob } k j} \cdot f_{\text{cob } k j}, \quad 1/\text{ч}, \quad (4)$$

а также интервала между событиями:

$$T_{\text{cob } j} = \min \{ T_{\text{cob } k j} \mid k = 1, 2 \}, \quad \text{ч}. \quad (5)$$

После обработки с помощью формул (3)–(5) кортежа (1) формируют кортеж, используемый для построения регрессионного тренда, описывающего динамику ключевого показателя различных СЭ определенного типа во времени:

$$R_{\text{cob}} = \langle x_j, s_j, t_{\text{cob } j}, T_{\text{cob } j}, f_{\text{cob } j} \mid j = 1, \dots, N; i = 1, \dots, 3, z_j = 0 \rangle. \quad (6)$$

Результаты расчета реализаций частоты событий, выполненных на основе кортежа (2) и характеризующих предельное состояние СЭ, описывают кортежем вида

$$R_{\text{пред}} = \langle s_j, t_{\text{пред } j}, T_{\text{пред } j}, f_{\text{пред } j} \mid j = 1, \dots, N; i = 1, \dots, 3, z_j = 1 \rangle, \quad (7)$$

где $t_{\text{пред } j}$ – время события с начала наблюдения ($t_{\text{пред } j} = t_{\text{cob } j} \mid z_j = 1$);

$T_{\text{пред } j}$ – интервал времени между событиями ($T_{\text{пред } j} = T_{\text{cob } j} \mid z_j = 1$);

$f_{\text{пред } j}$ – результирующая частота событий ($f_{\text{пред } j} = f_{\text{cob } j} \mid z_j = 1$).

Таким образом, формируется единая совокупность реализаций частоты различных событий с СЭ.

Далее на основе данных, представленных в виде кортежа (6), для каждого x_j СЭ выполняем построение линейного тренда.

Оценку текущего технического состояния СЭ и прогноз динамики его изменения предлагается осуществлять путем построения регрессионного тренда [5]. Для этого по указанным ранее причинам используем взвешенный метод наименьших квадратов, где вес каждой точки данных определяется давностью точки во времени и ее локальным отклонением от общей совокупности. Последнее является важным, так как в регистрируемых информационных системами статистических данных иногда встречаются значительные «промахи» (выбросы), существенно ухудшающие точность построения тренда обычным методом наименьших квадратов.

Общее уравнение зависимости фактического значения частоты событий, произошедших с конкретным СЭ, от времени имеет вид

$$\tilde{f}_{\text{cob}}(t) = a \cdot t + b, \quad 1/\text{ч}. \quad (8)$$

Коэффициенты a и b – параметры тренда.

Для расчета коэффициентов используем формулы взвешенного метода наименьших квадратов вида

$$a = \frac{M_{xy} - M_x \cdot M_y}{M_{x^2} - (M_x)^2}, \quad (9)$$

$$b = M_y - \frac{M_{xy} - M_x \cdot M_y}{M_{x^2} - (M_x)^2} \cdot M_x, \quad (10)$$

где $M_{xy}, M_{x^2}, M_x, M_y$ – коэффициенты, определяемые на основе статистических данных из кортежа (6) по формулам

$$M_{x^2} = \frac{\sum_{j=1}^N \omega_j \cdot t_{\text{cob } j}^2}{\sum_{j=1}^N \omega_j}, \quad (11)$$

$$M_x = \frac{\sum_{j=1}^N \omega_j \cdot t_{\text{cob } j}}{\sum_{j=1}^N \omega_j}, \quad (12)$$

$$M_{xy} = \frac{\sum_{j=1}^N \omega_j \cdot t_{\text{cob } j} \cdot f_{\text{cob } j}}{\sum_{j=1}^N \omega_j}, \quad (13)$$

$$M_y = \frac{\sum_{j=1}^N \omega_j \cdot f_{\text{cob } j}}{\sum_{j=1}^N \omega_j}. \quad (14)$$

Расчет параметров тренда осуществим в два этапа:

- предварительная грубая оценка;
- окончательная уточненная оценка.

Для грубой оценки параметров тренда уравнение (8) представим в виде

$$\tilde{f}_{\text{cob } \text{гр}}(t) = a_{\text{гр}} \cdot t + b_{\text{гр}}, \quad 1/\text{ч}. \quad (15)$$

При данной оценке в выражениях (11)–(14) установим значения коэффициентов ω_j равными единице: $\omega_j = 1 \mid j = 1 \dots N$.

Для окончательной уточненной оценки (по формуле (8)) параметров тренда $f_{\text{cob}}(t)$ выполним расчет весовых коэффициентов ω_j по формуле:

$$\omega_j = \left[R - (f_{\text{cob } j} - \tilde{f}_{\text{cob } \text{гр } j})^2 + \frac{F}{c} \right] \cdot \frac{1}{(f - s_j)}, \quad (16)$$

$$R = \max \{ (f_{\text{cob } j} - \tilde{f}_{\text{cob } \text{гр } j})^2 \mid j = 1 \dots N \}, \quad (17)$$

$$F = \frac{\sum_{j=1}^N (f_{\text{cob } j} - \tilde{f}_{\text{cob } \text{гр } j})^2}{N}, \quad (18)$$

где f – количество лет, входящих в интервал наблюдения;

c – коэффициент, подбираемый опытным путем;

N – объем статистической совокупности событий в таблице.

Допустимое значение частоты событий, характеризующее наступление предельного состояния СЭ $f_{\text{пред}}$, вычислим по элементам кортежа (7), удовлетворяющим условию $s_j = 1$:

$$f_{\text{пред}} = \frac{\sum_{j=1}^M f_{\text{пред } j} \{s_j = 1\}}{M}, \quad 1/\text{ч}, \quad (19)$$

где M – объем статической совокупности с $s_j = 1$ в кортеже (7).

Критерий предельного состояния имеет вид

$$Z = \begin{cases} \tilde{f}_{\text{cob}}(t) < f_{\text{пред}} \Rightarrow 0; \\ \tilde{f}_{\text{cob}}(t) \geq f_{\text{пред}} \Rightarrow 1, \end{cases} \quad (20)$$

где при $Z = 0$ – состояние СЭ не является предельным, при $Z = 1$ – состояние СЭ является предельным.

Остаточный ресурс будем рассматривать как интервал времени, по истечении которого СЭ из текущего состояния перейдет в предельное, если предельное состояние на настоящий момент времени еще не достигнуто.

Для оценки остаточного ресурса СЭ, прежде всего, определим момент на шкале времени тренда, от которого потребуются проводить оценку остаточного ресурса [4]:

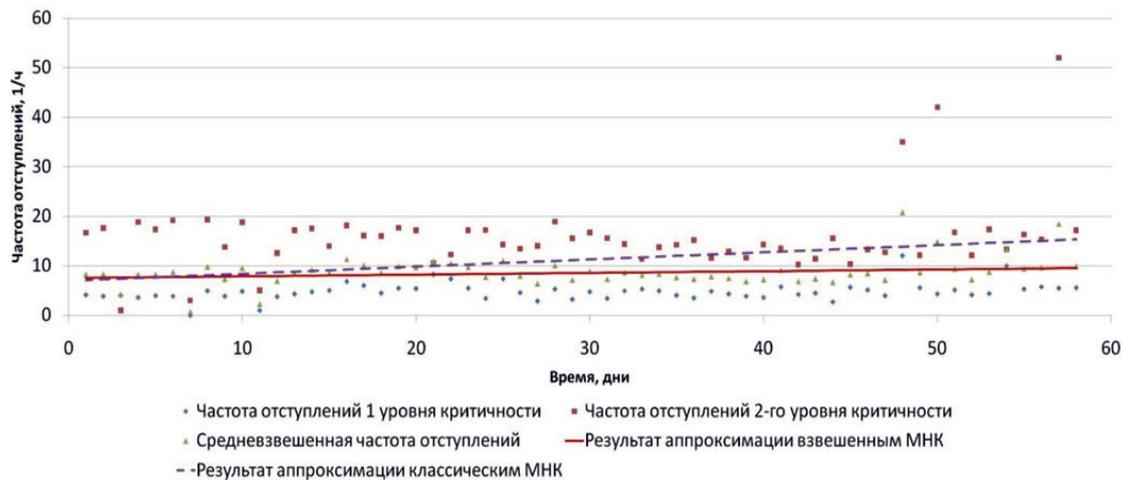
$$t_{\text{оц}} = t_{\text{cob } N} + t_{\text{отч}}, \quad \text{ч}, \quad (21)$$

где $t_{\text{cob } N}$ – момент события, соотношенный с последним элементом кортежа (6);

$t_{\text{отч}}$ – интервал времени от момента фиксации последнего события $t_{\text{cob } N}$ до момента времени, когда выполняется расчет остаточного ресурса, ч.

Оценку остаточного ресурса СЭ в часах выполним по формуле

$$T_{\text{ост(ч)}} = \begin{cases} b_{\text{рез}} \leq f_{\text{пред}}; a_{\text{рез}} \leq 0 \Rightarrow 26280; \\ b_{\text{рез}} < f_{\text{пред}}; a_{\text{рез}} > 0 \Rightarrow \begin{cases} \frac{f_{\text{пред}} - b_{\text{рез}}}{a_{\text{рез}}} - t_{\text{ои}} > 0 \Rightarrow \frac{f_{\text{пред}} - b_{\text{рез}}}{a_{\text{рез}}} - t_{\text{ои}}; \\ \frac{f_{\text{пред}} - b_{\text{рез}}}{a_{\text{рез}}} - t_{\text{ои}} \leq 0 \Rightarrow 0; \end{cases} \\ b_{\text{рез}} > f_{\text{пред}}; a_{\text{рез}} > 0 \Rightarrow 0; \\ b_{\text{рез}} > f_{\text{пред}}; a_{\text{рез}} < 0 \Rightarrow \begin{cases} \frac{f_{\text{пред}} - b_{\text{рез}}}{a_{\text{рез}}} - t_{\text{ои}} > 0 \Rightarrow \frac{f_{\text{пред}} - b_{\text{рез}}}{a_{\text{рез}}} - t_{\text{ои}}; \\ \frac{f_{\text{пред}} - b_{\text{рез}}}{a_{\text{рез}}} - t_{\text{ои}} \leq 0 \Rightarrow 0. \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$



Регрессионные тренды, построенные классическим и взвешенным МНК

Так как мероприятия по замене и капитальному ремонту оборудования в компании планируют на следующий по отношению к текущему календарный год, то остаточный ресурс выразим количеством календарных лет до достижения предельного состояния:

$$T_{\text{ост(лет)}} = \frac{T_{\text{ост(ч)}}}{8760}, \text{ лет.} \quad (23)$$

С целью оценки эффекта от применения взвешенного МНК по схеме (16), (17) была выполнена апробация метода на моделированных данных.

Апробация метода

В качестве моделированных данных использовались нормально распределенные реализации отступлений от норм содержа-

ния и предотказных состояний с уровнями критичности 1 и 2. Для событий 1-го уровня критичности параметры распределения были следующие: математическое ожидание – 5 1/ч, стандартное отклонение – 1 1/ч; для событий 2-го уровня критичности: математическое ожидание – 6 1/ч, стандартное отклонение – 3 1/ч. Дополнительно были подсеяны «промахи» для неблагоприятного случая.

На рисунке представлен результат построения регрессионного тренда различными модификациями метода наименьших квадратов на основе моделированных данных для наихудшего случая.

Для количественной оценки качества обоих трендов вычислялось остаточное стандартное отклонение. Результат представлен в таблице.

Сравнительная характеристика трендов, построенных классическим и взвешенным МНК

	Взвешенный МНК	Классический МНК
Без удаления промахов	2,1	3,0
После удаления промахов	0,9	2,3

Как видно из рисунка, регрессионный тренд, построенный взвешенным методом наименьших квадратов на основе взвешенных значений результирующей частоты событий, существенно менее чувствителен к выбросам в статистических данных и учитывает специфику данных об отказах, отступлениях от норм содержания и предотказных состояниях СЭ, когда интервалы между отдельными событиями могут быть очень малы.

Заключение

Разработанный метод позволяет получать более точные оценки остаточного ресурса, по сравнению с классическим МНК. В то

же время его реализация требует больших вычислительных ресурсов, поэтому целесообразность и объем применения предложенного метода должны определяться техническими возможностями информационных систем. В дальнейшем по мере их развития будет представлять интерес интервальная оценка остаточного ресурса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (номер гранта: 17-20-03072, код: офи-м-РЖД).

Список литературы

1. Замышляев А.М. Прикладные информационные системы управления надежностью, безопасностью, рисками и ресурсами на железнодорожном транспорте. Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2013. 143 с.
2. Mun Gyu Park. RAMS management of railway systems: Ph.D. thesis. Birmingham. 2013. 260 p.
3. Lakshay Swani, Prakita Tyagi. Predictive Modelling Analytics through Data Mining. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2017. Vol. 4. Issue 9. P. 5–11.
4. Безродный Б.Ф., Голубев А.С., Болотский Д.Н., Орлов А.В. К проблеме оценки остаточного ресурса объектов железнодорожной автоматики и телемеханики // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 34–40.
5. Draper N.R., Smith H. Applied Regression Analysis, 3rd ed. N.Y.: John Wiley & Sons, 1998. 705 p.