

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ РАБОТ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ



А.В. Горелик



А.Н. Малых

Предложена математическая модель, позволяющая определить периодичность работ по техническому обслуживанию систем железнодорожной автоматики и телемеханики по критерию максимизации коэффициента готовности по отказам 1 и 2 категории.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика и телемеханика, математическая модель, техническое обслуживание

DOI: 10.53883/20749325_2021_04_26

В настоящее время периодичность технического обслуживания (ТО) систем и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) определяется плановыми графиками технического обслуживания в дистанциях СЦБ и зависит в первую очередь от класса и специализации железнодорожной линии. В то же время на функционирование систем и устройств ЖАТ значительно влияет интенсивность их использования при реализации процесса движения поездов [1].

Различие параметров перевозочного процесса, таких как интенсивность движения поездов, пропускная и провозная способность участка железных дорог, специализация железнодорожной линии и ряда других

приводит при прочих равных условиях к различным рискам, связанным с задержками в движении поездов — рискам потерь поездо-часов.

Управление рисками является важной частью внедряемой компанией ОАО «РЖД» методологии управления ресурсами, рисками и анализа надежности.

В связи с этим целесообразно разработать модель периодичности ТО, которая позволила бы обеспечивать допустимый уровень рисков, описывающих влияние возникающих в системах ЖАТ отказов на перевозочный процесс.

Для учета влияния на перевозочный процесс в математической модели предлагается использовать коэффициент готовности по отказам 1 и 2 категории.

Горелик Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: эффективность функционирования и технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Автор 350 научных и методических работ, в том числе трех монографий и четырех учебников. Имеет 61 патент на изобретения.

Малых Александр Николаевич, старший преподаватель кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: влияние надежности и эффективности систем железнодорожной автоматики и телемеханики на перевозочный процесс. Автор 28 научных работ.

Орлов Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: моделирование и оценка, анализ и обеспечение эффективности технических систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Автор 82 научных работ.

К отказам 1 и 2 категории относят отказы, вызвавшие задержку в движении поездов более шести минут [2]. Такие задержки считаются существенными.

Состояние системы ЖАТ в течение длительной эксплуатации может быть описано регенерирующим процессом [3]. В этом случае коэффициент готовности по отказам 1 и 2 категории определяется соотношением математических ожиданий:

$$k_{\Gamma 12} = \frac{MX^{(0)}}{M\tilde{X}}, \quad (1)$$

где $X^{(0)}$ — случайное время, в течение которого система ЖАТ на периоде регенерации находится во множестве состояний, за исключением неработоспособных, вызывающих задержку в движении поездов в соответствии с классификацией отказов на 1 и 2 категории;

$\tilde{X}$ — длительность периода регенерации.

В модели предлагается коэффициент готовности системы ЖАТ по отказам 1 и 2 категории определять на основе аналогичных показателей отдельных устройств различных типов, из которых она состоит.

Коэффициент готовности по отказам 1 и 2 категории для совокупности устройств ЖАТ общим количеством N_q , представляют в виде

$$k_{\Gamma 12}(\tau) = \frac{\tau}{\tau + M_{\gamma} + \sum_{j=1}^{N_q} T_j \cdot H_j(\tau)}, \quad (2)$$

где τ — интервалы времени между ТО устройств ЖАТ;

M_{γ} — математическое ожидание оперативного времени работ по ТО устройств ЖАТ;

T_j — математическое ожидание времени устранения отказов 1 и 2 категории;

$H_j(\tau)$ — функция восстановления, находящаяся решением уравнения:

$$H_j(t) = F_j(t) + \int_0^t F_j(t-x) dH_j(x), \quad (3)$$

здесь $F_j(t)$ — функция распределения времени ξ_j безотказной работы устройства j :

$$F_j(t) = P(\xi_j < t). \quad (4)$$

Уравнение (3) принято решать с помощью преобразования Лапласа:

$$H_j^*(p) = \frac{F_j^*(p)}{1 - F_j^*(p)}, \quad (5)$$

где p — обозначение оператора Лапласа:

$$F_j^*(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} dF_j(t). \quad (6)$$

Если рассматривать группы устройств и систем ЖАТ одного типа s , то значения интенсивности отка-

зов 1 и 2 категории у них принимаются одинаковыми, тогда формулы (2)–(6) могут быть разрешены в конкретном виде.

При экспоненциальном законе надежности для одного устройства ЖАТ заданного типа

$$F_{1s}^*(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} dF_{1s}(t) = \frac{2\lambda_{12s}}{p + \lambda_{12s}} - \frac{2\lambda_{12s}}{p + 2\lambda_{12s}}, \quad (7)$$

Тогда

$$H_{1s}^*(p) = \frac{F_{1s}^*(p)}{1 - F_{1s}^*(p)} = \frac{2\lambda_{12s}^2}{p(p + 3\lambda_{12s})} = \frac{2\lambda_{12s}}{3p} - \frac{2\lambda_{12s}}{3(p + 3\lambda_{12s})}; \quad (8)$$

$$H_{1s}(t) = \frac{2}{3} \cdot \lambda_{12s} \cdot t - \frac{2\lambda_{12s}}{3} \cdot \frac{1 - e^{-3\lambda_{12s}t}}{3 \cdot \lambda_{12s}}; \quad (9)$$

$$H_{1s}'(t) = \frac{2}{3} \cdot \lambda_{12s} \cdot (1 - e^{-3\lambda_{12s}t}). \quad (10)$$

Подстановка в формулу (2) позволяет получить выражение для вычисления зависимости коэффициента готовности по отказам 1 и 2 категории совокупности устройств ЖАТ типа s :

$$k_{\Gamma 12s}(T_{\text{ТО } s}) = \frac{\tau_s}{\tau_s + t_{\text{оп уст } s} + m_s \cdot T_{\text{пер}} \cdot H_{1s}(\tau_s)} = \frac{\tau_s}{\tau_s + t_{\text{оп уст } s} + m_s T_{\text{пер}} \left(\frac{2}{3} \lambda_{12s} \tau_s - \frac{2\lambda_{12s}}{3} \cdot \frac{1 - e^{-3\lambda_{12s} \tau_s}}{3 \cdot \lambda_{12s}} \right)}. \quad (11)$$

Величину τ_s находят по формуле:

$$\tau_s = \frac{8760}{X_s}, \quad X_s = \frac{T_{\text{ТО } s} - T_{\text{ТО } s \text{ min}} + \frac{T_{\text{ТО } s \text{ max}} - T_{\text{ТО } s \text{ min}}}{\tau_{s \text{ min}} - \tau_{s \text{ max}}} \cdot \tau_{s \text{ max}}}{\frac{T_{\text{ТО } s \text{ max}} - T_{\text{ТО } s \text{ min}}}{\tau_{s \text{ min}} - \tau_{s \text{ max}}}}. \quad (12)$$

здесь $T_{\text{ТО } s \text{ max}}, T_{\text{ТО } s \text{ min}}$ — периодичность ТО (раз в год) устройств и систем ЖАТ типа s для линии 5-го и 1-го классов соответственно;

$\tau_{s \text{ min}}, \tau_{s \text{ max}}$ — средняя величина интервалов между ТО τ_s для устройств ЖАТ типа s на линии 5-го и 1-го классов соответственно (допустимо взять минимальное и максимальное значение интервала при текущей технологии).

Таким образом, формула (11) является соотношением, характеризующим зависимость коэффициента готовности по отказам 1 и 2 категории группы устройств типа s от периодичности их ТО $T_{\text{ТО } s}$.

Уравнение для определения интервала между ТО устройств ЖАТ при условии максимизации коэффи-

циента готовности по отказам 1 и 2 категории имеет вид:

$$\tau_s \cdot \sum_{j=1}^{N_q} T_j \cdot H'_j(\tau_s) - \sum_{j=1}^{N_q} T_j \cdot H_j(\tau_s) = M_{\gamma}. \quad (13)$$

Замена переменных и подстановка выражений (9) и (10) приводит выражение (13) к виду:

$$\tau_s \cdot m_s \cdot T_{\text{пер}} \cdot \frac{2}{3} \cdot \lambda_{12s} \cdot (1 - e^{-3 \cdot \lambda_{12s} \cdot \tau_s}) - m_s \cdot T_{\text{пер}} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \lambda_{12s} \cdot \tau_s - \frac{2 \lambda_{12s}}{3} \cdot \frac{1 - e^{-3 \cdot \lambda_{12s} \cdot \tau_s}}{3 \cdot \lambda_{12s}} \right) = t_{\text{оп уст } s}.$$

После преобразований получим:

$$\frac{9}{2} \cdot \frac{t_{\text{оп уст } s}}{m_s \cdot T_{\text{пер}}} = 1 - e^{-3 \cdot \lambda_{12s} \cdot \tau_s} \cdot (1 + 3 \cdot \lambda_{12s} \cdot \tau_s).$$

Из этого выражения может быть найдена периодичность τ_s . При расчете следует учесть, что в рамках применяемого в ОАО «РЖД» риск-менеджмента значения λ_{12s} могут соответствовать границам между разными смежными уровнями риска в соответствующей матрице.

Для решения удобно выполнить замену переменных:

$$3 \cdot \lambda_{12s} \cdot \tau_s = x; 1 - \frac{9}{2} \cdot \frac{t_{\text{оп уст } s}}{m_s \cdot T_{\text{пер}}} = y. \quad (14)$$

Получим трансцендентное уравнение вида:

$$y = 1 - e^{-x} \cdot (1 + x).$$

Преобразуем выражение и выполним подстановку $m = 1 + x$, где $-x = -m + 1$. С учетом подстановки:

$$1 - y = m e^{-m+1};$$

$$\frac{y-1}{e} = -m e^{-m}.$$

Выполним подстановку функции Ламберта $W(u \cdot e^u) = y$ [3].

$$W\left(\frac{y-1}{e}\right) = W(-m e^{-m});$$

$$W\left(\frac{y-1}{e}\right) = -m;$$

$$x = -W\left(\frac{y-1}{e}\right) - 1,$$

W -функция Ламберта определена на интервале

$(-\frac{1}{e}; \infty)$. Если $\frac{y-1}{e} > -\frac{1}{e}$, то имеется решение $x \in R$.

Если $\frac{y-1}{e} < 0$, то W -функция двузначна — имеется две

ветви: $W_0(x)$ и $W_{-1}(x)$.

Рассмотрим пример из [4] (рисунок). Пусть $y = 0,45$, тогда:

$$W_0\left(\frac{-0,55}{e}\right) \approx -0,263; x_0 \approx 0,263 - 1 \approx -0,737;$$

$$W_{-1}\left(\frac{-0,55}{e}\right) \approx -2,523; x_1 \approx 2,523 - 1 \approx 1,523.$$

Поскольку величина x неотрицательна ($\lambda_{12s} \geq 0; \tau_s \geq 0$), то решением будет являться $x_1 \approx 1,523$. Также решение может быть найдено итерационным способом.

Тогда интервал между ТО определяется из формулы (13):

$$\tau_{\text{расч } s} = \frac{x_1}{3 \cdot \lambda_{12s}}.$$

Окончательно периодичность ТО устройств и систем ЖАТ типа s находится по формуле:

$$T_{\text{ТО расч } s} = \frac{T_{\text{ТО } s \text{ max}} - T_{\text{ТО } s \text{ min}}}{\tau_{s \text{ min}} - \tau_{s \text{ max}}} \times (1 / \tau_{\text{расч } s} - \tau_{s \text{ max}}) + T_{\text{ТО } s \text{ min}}, \text{ раз в год.} \quad (15)$$

Достижимый максимум коэффициента готовности устройств и систем ЖАТ типа s можно найти подстановкой результата (15) в формулу (12) и последующего расчета формулы (11), однако максимум коэффициента готовности можно найти по формуле:

$$k_{\Gamma 12s}(T_{\text{ТО } s}) = \frac{1}{1 + m_s \cdot T_{\text{пер}} \cdot H'_{1s}(\tau_{\text{расч } s})} = \frac{1}{1 + m_s \cdot T_{\text{пер}} \cdot \frac{2}{3} \cdot \lambda_{12s} \cdot (1 - e^{-3 \cdot \lambda_{12s} \cdot \tau_{\text{расч } s}})}.$$

Значение коэффициента готовности системы ЖАТ по отказам 1 и 2 категории для i -й границы уровней риска определяется как:

$$K_{\Gamma 12i}(T_{\text{ТО}}) = \begin{cases} K_{\Gamma 12 \Gamma 1 is}(T_{\text{ТО}}) \cdot K_{\Gamma 12 \Gamma 1 is}(T_{\text{ТО}}) \Rightarrow \text{для станции;} \\ K_{\Gamma 12 \Gamma 1 is}(T_{\text{ТО}}) \Rightarrow \text{для перегона.} \end{cases}$$

В свою очередь, значение коэффициента готовности по устройствам ЖАТ вне главного хода находится по формуле:

$$K_{\Gamma 12 \Gamma 1 is}(T_{\text{ТО } s}) = \prod_{s=1}^{q_{\Gamma 1}} K_{\Gamma 12 \Gamma 1 is}(T_{\text{ТО } s}),$$

где $q_{\Gamma 1}$ — количество типов устройств вне главного хода.

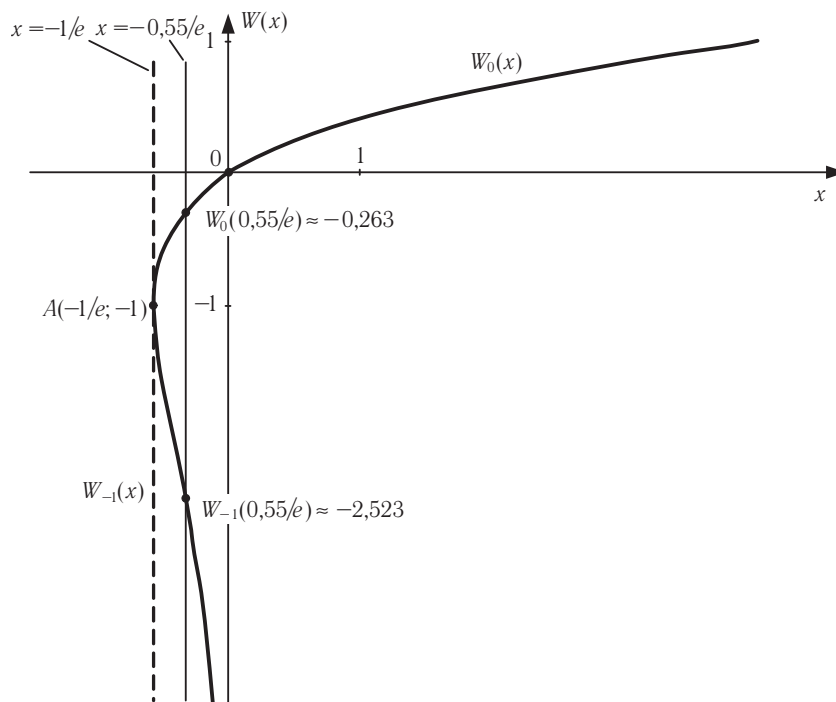


Рисунок. График функции Ламберта

Значения коэффициента готовности по устройствам ЖАТ на главном ходу находится по формуле:

$$K_{Г12\text{ глйс}}(T_{ТО\text{ с}}) = \prod_{s=1}^{q_{\text{гл}}} K_{Г12\text{ глйс}}(T_{ТО\text{ с}}),$$

где $q_{\text{гл}}$ — количество типов устройств на главном ходу.

Рассмотренная в статье математическая модель может быть использована при решении таких задач, как обоснование решений о целесообразности изменения периодичности ТО систем ЖАТ с учетом класса и специализации железнодорожной линии, интенсивности движения поездов, оценка уровня риска, связанного с надежностью функционирования устройств и систем ЖАТ, в случае некорректного учета работ по ТО систем ЖАТ на основе методологий ALARP и УРРАН, что в конечном счете может являться основой для методов, способствующих обеспечению эффективного распределения финансовых и материальных ресурсов. 

Литература

1. Горелик, А.В. Математическая модель технического обслуживания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики для участков различных классов и специализаций / А.В. Горелик, А.Н. Малых, А.В. Орлов. — Текст: непосредственный // РУТ(МИИТ). — Москва. — 2020. — 61 с. — Деп. в ВИНТИ 03.09.20, №49-В2020.
2. Методическое руководство по управлению ресурсами и рисками в хозяйстве автоматики и телемеханики на основе методологии УРРАН. Утверждено ОАО «РЖД» 21 ноября 2015 г.
3. Дубинов, А.Е. W-функция Ламберта и ее применение в математических задачах физики: учебное пособие для вузов / А.Е. Дубинов, И.Д. Дубинова, С.К. Сайков. — Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2006. — 160 с. — ISBN 5-9515-0065-6. — Текст: непосредственный.
4. Надежность и эффективность в технике: справочник: в 10 т. Т. 8: Эксплуатация и ремонт / [А.М. Андронов и др.]; Под ред. В.И. Кузнецова, Е.Ю. Барзиловича. — Москва: Машиностроение, 1990. — 319 с. — Текст: непосредственный.