

Моделирование технического состояния пути при наработке тоннажа выше нормативного



Алексей ДЕРЖАВИН
Alexey N. DERZHAVIN

Николай ЛЫСЕНКО
Nikolay N. LYSENKO



Николай КОВАЛЕНКО
Nikolay I. KOVALENKO

Державин Алексей Николаевич — аспирант кафедры пути и путевого хозяйства Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

Лысенко Николай Николаевич — кандидат технических наук, доцент РУТ (МИИТ), Москва, Россия.

Коваленко Николай Иванович — доктор технических наук, профессор РУТ (МИИТ), Москва, Россия.

Modeling of Track Technical State when Operating Time in terms of Tonnage is Higher than Normative

(текст статьи на англ. яз. — English text of the article — p. 175)

В действующем положении о системе ведения путевого хозяйства ОАО «РЖД» существующие критерии назначения основных видов ремонта пути не позволяют принимать однозначные решения о сроках предстоящих ремонтов. В статье рассматриваются методика и модель, помогающие обосновать время капитального ремонта с целью актуализации применения предусмотренных критериев и продления периода эксплуатации пути в зоне с наработкой тоннажа выше нормативного на основе прогнозирования отказов его элементов с использованием разработанной модели.

Ключевые слова: железная дорога, путь, наработка тоннажа, остаточный ресурс, капитальный ремонт, управленческое решение, математическая модель.

В стратегии научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» определены ориентиры инновационного развития до 2030 года. Из этой стратегии авторами выбраны два показателя: увеличение срока между капитальными ремонтами участков пути по технологии закрытых перегонов до 1500 млн тонн брутто в 2015 году и до 2500 млн тонн брутто в 2030 году; снижение к уровню 2012 года приведённой к одному году стоимости жизненного цикла верхнего строения пути в 1,3 раза [1]. Исходя из этого, в статье отводится особое место проблеме управления техническим состоянием железнодорожного пути в зоне его эксплуатации с наработкой тоннажа выше нормативного значения.

Несвоевременное проведение таких трудоёмких работ, как капитальный и средний ремонты, приводит к дополнительным затратам на текущее содержание пути, ибо неизменной остаётся задача поддержания его в состоянии, позволяющим обеспечить

Таблица 1

Критерии выбора участков пути, подлежащих реконструкции, капитальному ремонту на новых материалах [5]

Класс пути	Основные критерии		Дополнительные критерии			Критерии УРРАН (не менее)	
	Наработка пути в % от нор- мативного ресурса (срока службы) пути	Оди- ночный выход рельсов	Количество негодных и дефектных эле- ментов на 1 км верхнего строения пути, % (от и выше)			Частота отка- зов, шт. в год/км	Затраты на текущее содержа- ние пути, доля от аморти- зации
			Негодные дерев. шпалы, %	Негодные скрепления, %	Число шпал с вы- плесками, %		
1	Не менее 100 %	4 и более	15	15	4	0,2	0,5
2	Не менее 100 %	6 и более	18	20	5	0,2	0,5

Таблица 2

Критерии выбора участков пути, подлежащих ППР

Класс пути	Основные критерии		Дополнительные критерии		
	Количество отступлений ГРК 2 ст., шт./км и более	Загрязнённость щебня, % по массе	Негодные деревянные шпалы, % и не более	Шпалы с выплесками, % и не более	Негодные скрепления, % и не более
1 и 2	25	до 30	10	3	10
3	30	до 30	15	5	15
4	40	до 30	20	10	20
5	По усмотрению начальника дистанции пути				

бесперебойное и безопасное движение поездов с установленными скоростями.

В создавшихся условиях востребована и активно применяется стратегия комплексного управления надёжностью, безопасностью, рисками и ресурсами на железнодорожном транспорте (УРРАН) [1–3]. Наиболее распространённый подход при этом заключается в сохранении надёжности в процессе эксплуатации технических систем.

ИССЛЕДОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ

В рамках концепции УРРАН на рис.1 представлена схема управления планированием ремонта пути в зоне с наработкой тоннажа выше нормативного значения — управления с учётом оценки и прогнозирования остаточного ресурса путевых элементов.

При моделировании процесса эксплуатации пути в исследуемой зоне решаются следующие основные задачи:

1. Продление срока эксплуатации пути с учётом прогнозирования остаточного

ресурса его элементов и назначение предельного срока выполнения капитального ремонта.

2. Обоснование принятия решения при назначении ремонтов пути.

В соответствии с положением о системе ведения путевого хозяйства ОАО «РЖД» при назначении капитального ремонта пути руководствуются критериями, приведёнными в таблице 1.

Как видно из этой таблицы, некоторые параметры (такие, как одиночный выход рельсов, дефектные скрепления, число шпал с выплесками) являются случайными величинами и наличие одновременно их всех становится условием весьма проблематичным. В результате и появляется остаточный ресурс наработки тоннажа по отдельным параметрам (элементам), который необходимо оценить и спрогнозировать при назначении ремонта пути.

Для более широкого использования модели добавляется ещё один параметр, это отступление геометрии рельсовой колеи



Рис. 1. Схема управления планированием ремонта пути на основе разработанных методики и модели.



Обозначение и описание моделируемых событий

№	Обозначение событий	Описание событий
Одиночный выход рельсов		
1	А	— отказ рельсов не произошел
2	А0	— отказ рельсов произошел, $n_A < 6$ шт. на км
3	А	— отказ рельсов произошел, $n_A \geq 6$ шт. на км
Отказ элементов креплений		
4	Б	— отказ креплений не произошел
5	Б0	— отказ креплений произошел, $n_B < 736$ шт. на км
6	Б	— отказ креплений произошел, $n_B \geq 736$ шт. на км
Число шпал с выплесками		
7	С	— выплеск под шпалой не произошел
8	С0	— выплеск под шпалой произошел, $n_C < 92$ шт. на км
9	С	— выплеск под шпалой произошел, $n_C \geq 92$ шт. на км
Количество отступлений ГРК 2 ст.		
10	Д	— отступление ГРК 2 ст. не произошло
11	Д0	— отступление ГРК 2 ст. произошло, $n_D \leq 25$ шт. на км
12	Д	— отступление ГРК 2 ст. произошло, $n_D > 25$ шт. на км

(ГРК) 2-й степени, позволяющее назначать выправку пути до назначения капитального ремонта.

В соответствии с положением о системе ведения путевого хозяйства [5] критериями для назначения планово-предупредительной выправки (ППР) являются параметры, приведённые в таблице 2.

В результате сопоставления вариантов для моделирования принят перечень параметров пути, характеризующих его состояние в определённый момент времени. Это одиночный выход рельсов, количество негодных креплений, число шпал с выплесками, количество отступлений ГРК 2-й степени.

Для принятия решения о назначении ремонта пути моделируется система, в которой сочетаются 12 событий, определяющих техническое состояние путевых элементов. Моделируемые события и их обозначения приведены в таблице 3.

При моделировании состояний железнодорожного пути принимается, что появление событий — дефект рельса, выплеск, отказ креплений, отклонение ГРК 2-й степени — одновременно возможно, по-

этому считаем, что эти простые события совместны и независимы.

Теперь определяем полную группу сложных несовместных событий типа $A \cdot B \cdot C \cdot D$, во время которых путь при эксплуатации переходит из одного состояния в другое.

Полная группа всех сложных событий равна $N = n^4 = 3^4 = 81$ и приведена в таблице 4.

Примечание: Сумма всех приведённых сложных событий равна единице, то есть

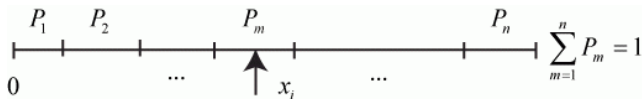
$$\sum_{n=1}^{n=81} A_i \cdot B_j \cdot C_k \cdot D_m = 1.$$

Путь в процессе эксплуатации ухудшается и переходит из одного состояния в другое. Очередность появления событий зависит от интенсивности отказов элементов пути.

На основании критериев, приведённых в таблице 4, капитальный ремонт должен назначаться при появлении следующих событий:

40. $(A \cdot B \cdot C \cdot D0)$ с количеством отступлений ГРК 2-й степени $n_D \leq 25$ шт. на км.

Рис. 2. Схема работы алгоритма.



41. $(A \cdot B \cdot C \cdot D)$ с количеством отступлений ГРК 2-й степени $n_d > 25$ шт. на км.

42. $(A \cdot B \cdot C \cdot D)$ количество отклонений ГРК 2-й степени не произошло $n_d = 0$

Вероятности появления этих событий соответственно будут равны:

$$P_{40} = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D_0);$$

$$P_{41} = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D);$$

$$P_{42} = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D) = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot [1 - P(D)].$$

Алгоритм моделирования исследуемых параметров основан на теореме, которая трактуется следующим образом.

В полной группе несовместных сложных событий (состояний пути) моделью свершения события A_m , происходящего с вероятностью P_m , является попадание значения X_i на отрезок $[0, 1]$ равномерно распределённого множества γ и равный P_m числовой шкалы,

$$\sum_{m=1}^n P_m = 1,$$

где n — общее число сложных несовместных событий; A_m — сложные события типа $(A_0 \cdot B_0 \cdot C_0 \cdot D_0)$; P_m — вероятность реализации сложного события; $X_i = (r_1, r_2, r_3, r_4)$ — вектор, состоящий из набора случайных чисел (r_1, r_2, r_3, r_4) , выданных генератором случайных чисел и принадлежащих интервалу $[0, 1]$.

Графически реализация одного из сложных событий выглядит, как показано на рис. 2.

Принцип моделирования представлен на простом событии A (дефект рельса), который схематически представлен на рис. 3:

- Событие A_0 произойдёт если количество дефектов будет $n_{A_0} < 6$.
- Событие A — при количестве дефектов $n_A \geq 6$.
- Событие $\bar{A}$, когда не происходит никакого события.

Записываем общее тождество, которое характеризует, что событие обязательно произойдёт.

$$P(A_0) + P(A) + P(\bar{A}) = 1 \text{ или } n_{A_0}/N + n_A/N + n_{\bar{A}}/N = 1.$$

Графически это выглядит, как показано на рис. 4.

В процессе моделирования получают значения вероятностей событий: $P(A_0) = n_{A_0}/N$; $P(A) = n_A/N$; $P(\bar{A}) = n_{\bar{A}}/N$.

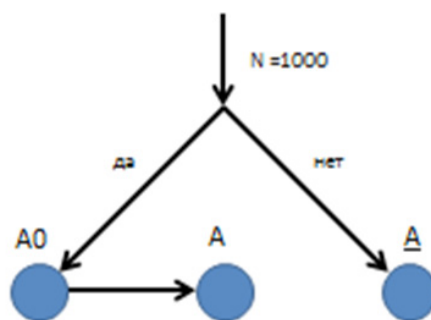


Рис. 3. Принцип моделирования события A .

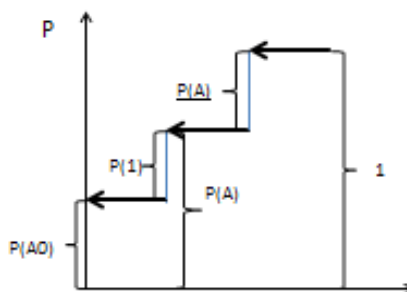


Рис. 4. Вероятность появления события A .

Оценка вероятности появления события в модели оценивается через частоту — статистическую оценку вероятности:

$$P(r \leq R) = n / N,$$

где n — число произошедших событий; N — число повторений опыта (в модели принято $N = 1000$).

По результатам моделирования можно определить, какое из событий произойдёт раньше, а какое позже. Появляется возможность разыгрывать сценарии назначения ремонтов пути, то есть их прогнозировать [6–8].

ЗАДАЧИ С УЧАСТИЕМ МОДЕЛИ

1. Прямая задача, определение вероятности возникновения отдельных простых исследуемых событий (A, B, C, D) на выбранном участке пути при заданной нагрузке тоннажа (дефект рельса, отказ креплений, появление выплесков, число отклонений ГРК 2-й степени) и как следствие — нахождение количества этих отдельных событий.

2. Обратная задача, определение нагрузки тоннажа по заданной величине отказов одного из событий.



Полная группа сложных событий

№	Обозначение сложного события	Событие А произошло			Событие Б произошло			Событие С произошло			Событие Д произошло		
		да		нет	да		нет	да		нет	да		нет
		A0	A	A	B0	Б	Б	C0	C	C	D0	Д	Д
		$0 < n_A < 6$	$6 \leq n_A \leq N$	$n_A = 0$	$0 < n_B < 736$	$736 \leq n_B \leq N$	$n_B = 0$	$0 < n_C < 92$	$92 \leq n_C \leq N$	$n_C = 0$	$0 < n_D \leq 25$	$25 < n_D \leq N$	$n_D = 0$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	A0 • B0 • C0 • D0	+			+			+			+		
2	A0 • B0 • C0 • Д	+			+			+				+	
3	A0 • B0 • C0 • Д	+			+			+					+
4	A0 • B0 • C • D0	+			+				+		+		
5	A0 • B0 • C • Д	+			+				+			+	
6	A0 • B0 • C • Д	+			+				+				+
7	A0 • B0 • C • D0	+			+					+	+		
8	A0 • B0 • C • Д	+			+					+		+	
9	A0 • B0 • C • Д	+			+					+			+
10	A0 • B • C0 • D0	+				+		+			+		
11	A0 • B • C0 • Д	+				+		+				+	
12	A0 • B • C0 • Д	+				+		+					+
13	A0 • B • C • D0	+				+			+		+		
14	A0 • B • C • Д	+				+			+			+	
15	A0 • B • C • Д	+				+			+				+
16	A0 • B • C • D0	+				+				+	+		
17	A0 • B • C • Д	+				+				+		+	
18	A0 • B • C • Д	+				+				+			+
19	A0 • B • C0 • D0	+					+	+			+		
20	A0 • B • C0 • Д	+					+	+				+	
21	A0 • B • C0 • Д	+					+	+					+
22	A0 • B • C • D0	+					+		+		+		
23	A0 • B • C • Д	+					+		+			+	
24	A0 • B • C • Д	+					+		+				+
25	A0 • B • C • D0	+					+			+	+		
26	A0 • B • C • Д	+					+			+		+	
27	A0 • B • C • Д	+					+			+			+
28	A • B0 • C0 • D0		+		+		+	+			+		
29	A • B0 • C0 • Д		+		+		+	+				+	
30	A • B0 • C0 • Д		+		+		+	+					+
31	A • B0 • C • D0		+		+				+		+		
32	A • B0 • C • Д		+		+				+			+	
33	A • B0 • C • Д		+		+				+				+
34	A • B0 • C • D0		+		+					+	+		
35	A • B0 • C • Д		+		+					+		+	
36	A • B0 • C • Д		+		+					+			+
37	A • B • C0 • D0		+			+		+			+		
38	A • B • C0 • Д		+			+		+				+	
39	A • B • C0 • Д		+			+		+					+
40	A • B • C • D0		+			+			+		+		
41	A • B • C • Д		+			+			+			+	
42	A • B • C • Д		+			+			+				+
43	A • B • C • D0		+			+				+	+		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
44	A • B • C • D		+			+				+		+	
45	A • B • C • D		+			+				+			+
46	A • B • C0 • D0		+				+	+			+		
47	A • B • C0 • D		+				+	+				+	
48	A • B • C0 • D		+				+	+					+
49	A • B • C • D0		+				+		+		+		
50	A • B • C • D		+				+		+			+	
51	A • B • C • D		+				+		+				+
52	A • B • C • D0		+				+			+	+		
53	A • B • C • D		+				+			+		+	
54	A • B • C • D		+				+			+			+
55	A • B0 • C0 • D0			+	+			+			+		
56	A • B0 • C0 • D			+	+			+				+	
57	A • B0 • C0 • D			+	+			+					+
58	A • B0 • C • D0			+	+				+		+		
59	A • B0 • C • D			+	+				+			+	
60	A • B0 • C • D			+	+				+				+
61	A • B0 • C • D0			+	+					+	+		
62	A • B0 • C • D			+	+					+		+	
63	A • B0 • C • D			+	+					+			+
64	A • B • C0 • D0			+		+		+			+		
65	A • B • C0 • D			+		+		+				+	
66	A • B • C0 • D			+		+		+					+
67	A • B • C • D0			+		+			+		+		
68	A • B • C • D			+		+			+			+	
69	A • B • C • D			+		+			+				+
70	A • B • C • D0			+		+				+	+		
71	A • B • C • D			+		+				+		+	
72	A • B • C • D			+		+				+			+
73	A • B • C0 • D0			+			+	+			+		
74	A • B • C0 • D			+			+	+				+	
75	A • B • C0 • D			+			+	+					+
76	A • B • C • D0			+			+		+		+		
77	A • B • C • D			+			+		+			+	
78	A • B • C • D			+			+		+				+
79	A • B • C • D0			+			+			+	+		
80	A • B • C • D			+			+			+		+	
81	A • B • C • D			+			+			+			+

3. Определение вероятности появления состояний пути (сложных событий типа A • B, A • B • C, A • B • C • D, состоящих из простых).

4. Возможность определить последовательность (очередность) появления состояний пути (простых и сложных событий).

5. Определение скорости перехода одного состояния пути в другое (одного сложного события в другое).

6. Определение оптимального срока назначения ремонтных работ на выбранном участке пути.

Для оценки состояний пути в базу исходных данных вводятся законы распределения исследуемых параметров.

В разработанной на кафедре «Путь и путевое хозяйство» модели для исследования заданных параметров могут быть использованы нормальный, экспоненциальный и обобщённый законы распределения, закон Вейбулла.

Для получения этих законов брались усечённые выборки параметров на исследуемый километр из паспорта дистанции пути и путеизмерительных вагонов, а также



Законы распределения исследуемых параметров в заданном диапазоне

Событие	Параметры	Диапазон прогнозирования	Функция распределения
А	Рельсы	$782,9 < t \leq 817,1$	$f(t) = \frac{1}{222 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-1119}{222} \right)^2}$
Б	Скрепления	$782,9 < t \leq 817,1$	$f(t) = \frac{1}{100,5 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-817}{100,5} \right)^2}$
С	Выплески	$782,9 < t \leq 793,224$	$f(t) = 0,005 + \frac{1}{15,1 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-818,9}{15,1} \right)^2}$
		$793,224 < t \leq 817,1$	$f(t) = 0,01 + \frac{1}{15,1 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-818,9}{15,1} \right)^2}$
Д	Отклонения ГРК 2-й ст.	$782,9 < t \leq 798,096$	$f(t) = 0,05 + \frac{1}{11,06 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-806,5}{11,06} \right)^2}$
		$798,096 < t \leq 817,1$	$f(t) = 0,075 + \frac{1}{11,06 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-848,7}{11,06} \right)^2}$

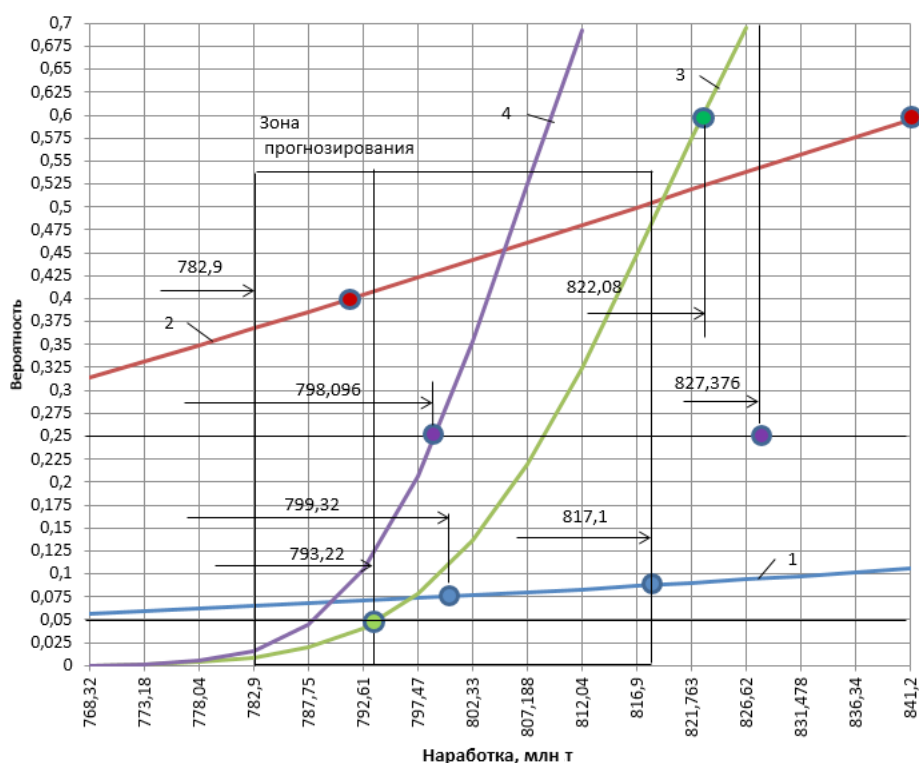


Рис. 5. Распределения исследуемых параметров в диапазоне прогнозирования: 1 – распределение отказов рельсов; 2 – распределение отказов креплений типа КБ; 3 – распределение выплесков; 4 – распределение отклонений ГРК 2-й степени.

информация из научных печатных источников.

При моделировании исследуемых параметров в заданном диапазоне наработки получены законы распределений, которые приведены в таблице 5.

На рис. 5 показаны графики законов распределения выбранных параметров для 131 километра направления Москва–Рязань.

Прогнозирование отказов приведённых в таблице 5 параметров осуществляется

Таблица 6

Результат моделирования простых одиночных событий типа А, Б, С, Д

Событие	Вероят- ность	Событие	Вероят- ность	Событие	Вероят- ность	Событие	Вероят- ность
А	0,9280	В	0,6440	С	1,0000	Д	0,9860
А0	0,072	В0	0,2000	С0	0	Д0	0,0140
А	0	В	0,3560	С	0	Д	0

Таблица 7

Результат моделирования всех сложных событий типа Аi • Би • Сi • Ди
(вероятность появления сложного события)

№	Событие	Значение Pi	№	Событие	Значение Pi	№	Событие	Значение Pi
1	А • Б • С • Д	0,4828	28	А0 • Б • С • Д	0,0314	55	А • Б • С • Д	0
2	А • Б • С • Д0	0,0721	29	А0 • Б • С • Д0	0,0047	56	А • Б • С • Д0	0
3	А • Б • С • Д	0	30	А0 • Б • С • Д	0	57	А • Б • С • Д	0
4	А • Б • С0 • Д	0	31	А0 • Б • С0 • Д	0	58	А • Б • С0 • Д	0
5	А • Б • С0 • Д0	0	32	А0 • Б • С0 • Д0	0	59	А • Б • С0 • Д0	0
6	А • Б • С0 • Д	0	33	А0 • Б • С0 • Д	0	60	А • Б • С0 • Д	0
7	А • Б • С • Д	0	34	А0 • Б • С • Д	0	61	А • Б • С • Д	0
8	А • Б • С • Д0	0	35	А0 • Б • С • Д0	0	62	А • Б • С • Д0	0
9	А • Б • С • Д	0	36	А0 • Б • С • Д	0	63	А • Б • С • Д	0
10	А • Б0 • С • Д	0,1634	37	А0 • Б0 • С • Д	0,0106	64	А • Б0 • С • Д	0
11	А • Б0 • С • Д0	0,0244	38	А0 • Б0 • С • Д0	0,0016	65	А • Б0 • С • Д0	0
12	А • Б0 • С • Д	0	39	А0 • Б0 • С • Д	0	66	А • Б0 • С • Д	0
13	А • Б0 • С0 • Д	0	40	А0 • Б0 • С0 • Д	0	67	А • Б0 • С0 • Д	0
14	А • Б0 • С0 • Д0	0	41	А0 • Б0 • С0 • Д0	0	68	А • Б0 • С0 • Д0	0
15	А • Б0 • С0 • Д	0	42	А0 • Б0 • С0 • Д	0	69	А • Б0 • С0 • Д	0
16	А • Б0 • С • Д	0	43	А0 • Б0 • С • Д	0	70	А • Б0 • С • Д	0
17	А • Б0 • С • Д0	0	44	А0 • Б0 • С • Д0	0	71	А • Б0 • С • Д0	0
18	А • Б0 • С • Д	0	45	А0 • Б0 • С • Д	0	72	А • Б0 • С • Д	0
19	А • Б • С • Д	0,3341	46	А0 • Б • С • Д	0,0217	73	А • Б • С • Д	0
20	А • Б • С • Д0	0,0499	47	А0 • Б • С • Д0	0,0032	74	А • Б • С • Д0	0
21	А • Б • С • Д	0	48	А0 • Б • С • Д	0	75	А • Б • С • Д	0
22	А • Б • С0 • Д	0	49	А0 • Б • С0 • Д	0	76	А • Б • С0 • Д	0
23	А • Б • С0 • Д0	0	50	А0 • Б • С0 • Д0	0	77	А • Б • С0 • Д0	0
24	А • Б • С0 • Д	0	51	А0 • Б • С0 • Д	0	78	А • Б • С0 • Д	0
25	А • Б • С • Д	0	52	А0 • Б • С • Д	0	79	А • Б • С • Д	0
26	А • Б • С • Д0	0	53	А0 • Б • С • Д0	0	80	А • Б • С • Д0	0
27	А • Б • С • Д	0	54	А0 • Б • С • Д	0	81	А • Б • С • Д	0

Таблица 8

Предельные значения вероятности
появления простого события

в диапазоне наработки тоннажа $782,9 \leq t \leq 817,1$ (млн т).

Точками на рис. 5 показаны предельные значения наработки тоннажа отдельных параметров, при которых по нормативам должен назначаться ремонт пути.

Как видно из рис. 6, появление всех одновременно (при одинаковой наработке) предельных значений параметров маловероятно, поэтому авторами предлагается метод определения назначения

События	Нормативное предельное значение вероятности
А	$P_{A0} = 0,075$
Б	$P_{B0} = 0,2$
С	$P_{C0} = 0,05$
Д	$P_{D0} = 0,25$



Таблица 9

Предельные значения диагоналей n-мерного пространства (критерии)

Одномерное пространство	Двухмерное пространство	Трёхмерное пространство	Четырёхмерное пространство
$P_1 = P_A / P_{A0} = 1$	$P_{12} = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} = \sqrt{2}$	$P_{123} = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2} = \sqrt{3}$	$P_{1234} = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + P_4^2} = 2$
$P_2 = P_B / P_{B0} = 1$	$P_{13} = \sqrt{P_1^2 + P_3^2} = \sqrt{2}$	$P_{134} = \sqrt{P_1^2 + P_3^2 + P_4^2} = \sqrt{3}$	
$P_3 = P_C / P_{C0} = 1$	$P_{14} = \sqrt{P_1^2 + P_4^2} = \sqrt{2}$	$P_{234} = \sqrt{P_2^2 + P_3^2 + P_4^2} = \sqrt{3}$	
$P_4 = P_D / P_{D0} = 1$	$P_{23} = \sqrt{P_2^2 + P_3^2} = \sqrt{2}$	$P_{124} = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + P_4^2} = \sqrt{3}$	
	$P_{24} = \sqrt{P_2^2 + P_4^2} = \sqrt{2}$		
	$P_{34} = \sqrt{P_3^2 + P_4^2} = \sqrt{2}$		

Таблица 10

Значения диагоналей векторного пространства

№	Событие	Значение	№	Событие	Значение
			28	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	1
2	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot D0$	1	29	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot D0$	1,41
10	$\underline{A} \cdot B0 \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	1	37	$A0 \cdot B0 \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	1,41
11	$\underline{A} \cdot B0 \cdot \underline{C} \cdot D0$	1,41	38	$A0 \cdot B0 \cdot \underline{C} \cdot D0$	1,73
19	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	1,78	46	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	2,04
20	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot D0$	2,04	47	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot D0$	2,27

капитального ремонта пути при наработке тоннажа выше предельного нормативного значения.

В таблицах 6 и 7 приведены результаты моделирования исследуемых параметров при наработке тоннажа 782,9 млн т для 131 км направления Москва–Рязань.

Из таблицы 6 видно, что событие А при заданной наработке тоннажа не достигло своего предельного нормативного значения $P_A = 0,075$.

Событие Б перешагнуло предельное значение вероятности величиной $P_B = 0,356 > 0,2$.

Событие С не произошло, поэтому $P_C = 0$.

Событие Д не достигло своего предельного нормативного значения $P_D = 0,25$ и равно $P_{D0} = 0,014$.

При исследовании необходимо понять, в каком состоянии будет находиться путь при заданной наработке тоннажа, для этого производится моделирование сложных событий типа $A_i \cdot B_i \cdot C_i \cdot D_i$ (см. таблицу 7).

Далее предстоит определить, какие из этих событий (состояний пути) являются предельными, то есть наиболее подходящими при назначении ремонта пути, и сделать это следует, выбрав отвечающие целям оценочные критерии.

Для одиночных событий предельные нормативные значения вероятности появления каждого из них приведены в таблице 8.

Для нормирования и получения критериев оценки введём понятие нормированной вероятности, которая выражается для каждого простого события следующим образом:

$$P_1 = P_A / P_{A0}; P_2 = P_B / P_{B0}; P_3 = P_C / P_{C0}; P_4 = P_D / P_{D0}.$$

Считаем, что из перечисленных векторов можно построить четырёхмерное пространство (в общем случае n – пространство со своей мерой по каждой оси), в котором за критерии принимаются предельные значения диагоналей n-мерного пространства.

Таблица 11

Значения математических ожиданий

№	Событие	Мат. ожидание M_i	№	Событие	Мат. ожидание M_i
			28	$A_0 \cdot B \cdot C \cdot D$	0,1
2	$A \cdot B \cdot C \cdot D_0$	0,0721	29	$A_0 \cdot B \cdot C \cdot D_0$	0,007
10	$A \cdot B_0 \cdot C \cdot D$	0,163	37	$A_0 \cdot B_0 \cdot C \cdot D$	0,015
11	$A \cdot B_0 \cdot C \cdot D_0$	0,034	38	$A_0 \cdot B_0 \cdot C \cdot D_0$	0,003
19	$A \cdot B \cdot C \cdot D$	1,78	46	$A_0 \cdot B \cdot C \cdot D$	0,04
20	$A \cdot B \cdot C \cdot D_0$	0,07	47	$A_0 \cdot B \cdot C \cdot D_0$	0,007

Таблица 12

Предельные значения наработки тоннажа для исследуемых параметров

События	Предельная нормативная вероятность, P_i	Предельная расчётная наработка тоннажа, T_i (млн т)
А (отказ рельсов)	$P_{A01} = 0,075$	$T_{A0} = 799,32$
До седьмого дефекта	$P_{A02} = 0,0875$	$T_{A02} = 817,10$
Б (отказ креплений)	$P_{B01} = 0,2$	$T_{B01} = 731,58$
	$P_{B02} = 0,4$	$T_{B02} = 790,87$
С (кол. выплесков)	$P_{C0} = 0,05$	$T_{C0} = 793,32$
Д (кол. откл. ГРК 2 ст.)	$P_{D0} = 0,025$	$T_{D0} = 798,096$

Для рассматриваемого случая предельные значения диагоналей приведены в таблице 9.

Определяем величину диагоналей векторного пространства для их сравнительной оценки. Вычисленные для 131 км ненулевые значения диагоналей приведены в таблице 10.

В качестве критерия для выбора события принимается максимальное значение математического ожидания, которое определяется по формуле [6]:

$$M_i = \sum_{n=1}^m P_i \cdot X_i,$$

где X_i — значение вектора, P_i — вероятность его появления.

Вычисленные математические ожидания событий сведены в таблицу 11.

Из полученных результатов следует, что при наработке тоннажа величиной 782,9 млн т должно произойти событие № 19 ($A \cdot B \cdot C \cdot D$), на которое стоит обратить особое внимание, поскольку математическое ожидание этого события имеет максимальное значение $M_{19} = 1,78$. Вероятность его появления составляет $P = 35,6 \%$.

Далее можно отметить, что произошло только одно простое событие Б (отказ крепления), вероятность которого $P_B = 0,356$ и которое превысило предельное нормативное значение $P_{B0} = 0,2$.

Из сложных событий имело место № 20 ($A \cdot B \cdot C \cdot D_0$), у которого математическое ожидание составляет $M_{19} = 0,07$, а вероятность его появления $P = 5 \%$.

После определения и оценки состояния, в которое путь попал при заданной наработке тоннажа, на выбранном километре необходимо назначить срок выполнения ремонта. Для этого авторами предложена методика назначения капитального ремонта пути при наработке тоннажа выше нормативного значения.

МЕТОДИКА НАЗНАЧЕНИЯ РЕМОНТА

Для начала следует выбрать диапазон прогнозирования и определить законы распределения исследуемых параметров, для этого воспользуемся рис. 6, где показаны распределения параметров в заданном диапазоне наработки и указаны предельные точки, в которых требуется произ-



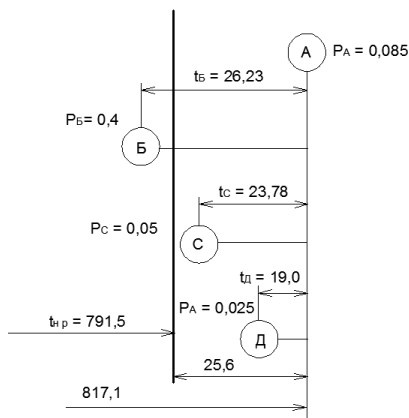


Рис. 6. Схема расчёта.

водить ремонт элементов пути для ликвидации возникающих отказов.

В качестве базового распределения принимается распределение отказов рельсов (появление дефектов), и предельную вероятность (при которой должен заменяться весь километр плети) отражает величина $P_{A0} = 0,075$.

В соответствии с нормативным значением километр плети заменяется при возникновении в нём более шести дефектов. Нарботка тоннажа для этого количества дефектов составляет 799,32 млн т.

Определяем наработку тоннажа до появления следующего седьмого дефекта. Величина наработки тоннажа для него будет составлять 817,1 млн т.

Назначение капитального ремонта на этом километре следует провести до появления седьмого дефекта, поэтому за линию отсчёта берётся граница наработки тоннажа 817,1 млн т. Далее находятся предельные значения наработок для остальных параметров. Они приведены в таблице 12.

Срок назначения ремонта пути определяется по формуле [6]:

$$T_H = \frac{\sum P_i \cdot t_i}{\sum P_i},$$

где P_i – предельная нормативная вероятность; t_i – предельная расчётная наработка тоннажа.

Таким образом, за базу отсчёта принимается общая наработка тоннажа:

$$T_{A02} = 817,1 \text{ млн т.}$$

$$t_A = 0; t_B = 817,1 - 790,87 = 26,23 \text{ (млн т);}$$

$$t_C = 817,1 - 793,32 = 23,78 \text{ (млн т);}$$

$$t_D = 817,1 - 798,096 = 19 \text{ (млн т);}$$

$$\sum P_i = 0,4 + 0,05 + 0,025 = 0,475.$$

Относительный срок назначения ремонта:

$$T_H = (0,4 \cdot 26,23 + 0,05 \cdot 23,78 + 0,025 \cdot 19) / 0,475 = 25,6 \text{ (млн т).}$$

Срок назначения по общей наработке тоннажа составит:

$$T_{н.р} = 817,1 - 25,6 = 791,5 \text{ (млн т).}$$

Графически схема расчёта показана на рис. 6.

ВЫВОД

При эксплуатации выбранного километра в диапазоне наработки тоннажа $782,9 \leq t \leq 817,1$ (млн т) в соответствии с рассмотренной методикой следует назначить капитальный ремонт при наработке тоннажа $t_{н.р.} = 791,5$ (млн т).

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция комплексного управления надёжностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте. УПРАН. Утв. ОАО «РЖД» 31.07.2010 г. – М., 2010. – 132 с.
2. Замышляев А. М. Автоматизация процессов комплексного управления техническим содержанием инфраструктуры железнодорожного транспорта / Дис... док. техн. наук. – М., 2013. – 328 с.
3. Patra A. Maintenance Decision Support Models for Railway Infrastructure using RAMS & LCC Analyses, Division of Operation and Maintenance Engineering, Lule University of Technology, 2007.
4. Patra A. RAMS and LCC in Rail Track Maintenance, Division of Operation and Maintenance Engineering, Lule University of Technology, 2009.
5. Положение о системе ведения путевого хозяйства ОАО «Российские железные дороги». Утв. ОАО «РЖД» 31.12.2015 г. – М., 2015. – 93 с.
6. Монсик В. Б., Скрынников А. А. Вероятность и статистика: Учеб. пособие. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 381 с.
7. Кан О. С., Кибзун А. И. Задачи стохастического программирования с вероятностными критериями. – М.: Физматлит, 2009. – 372 с.
8. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 399 с.

Координаты авторов: Державин А. Н. – +7 (499) 972-14-96, Лысенко Н. Н. – lysenko-pph@rambler.ru, Коваленко Н. И. – kni50@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 02.10.2017, принята к публикации 25.12.2017.

Коллектив авторов благодарит доктора технических наук, профессора кафедры вагонов и вагонного хозяйства Российского университета транспорта С. В. Беспалько за оказанную помощь в разработке программы к модели для оценки состояния железнодорожного пути.