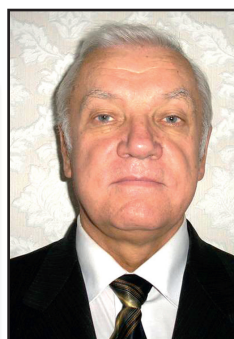


# Моделирование технического состояния пути при наработке тоннажа выше нормативного



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 нормативного ресурса (срока службы) пути	Одиночный выход рельсов	Количество негодных и дефектных элементов на 1 км верхнего строения пути, % (от и выше)	Негодные дерев. шпалы, %	Негодные скрепления, %	Число шпал с выплесками, %	Частота откозов, шт. в год/км
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 ГПК 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 скреплений		
4	Б	– отказ скреплений не произошел
5	Б0	– отказ скреплений произошел, $n_B < 736$ шт. на км
6	Б	– отказ скреплений 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 скреплений, 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 скреплений, 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

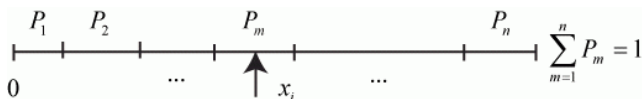
$$\sum_{n=1}^{n=81} A_i \cdot B_j \cdot C_k \cdot D_m = 1.$$

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.  $(A \cdot B \cdot C \cdot D_0)$  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.  $(A \cdot B \cdot C \cdot \bar{D})$  количество отклонений ГРК 2-й степени не произошло  $n_d = 0$

Вероятности появления этих событий соответственно будут равны:

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

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

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

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  $\gamma$  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:  $P(A_0) = n_{A_0}/N$ ;  $P(A) = n_A/N$ ;  $P(\bar{A}) = n_{\bar{A}}/N$ .

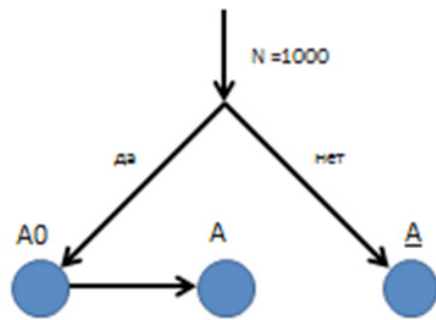


Рис. 3. Принцип моделирования события  $A$ .

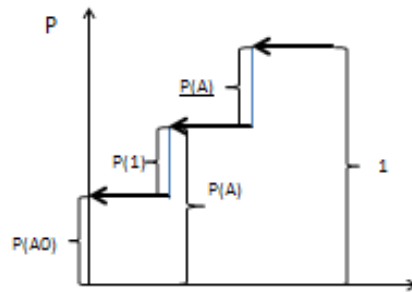


Рис. 4. Вероятность появления события  $A$ .

Оценка вероятности появления события в модели оценивается через частоту – статическую 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 скреплений, 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 • <u>Д</u>	+			+			+					+
4	A0 • B0 • C • D0	+			+				+		+		
5	A0 • B0 • C • Д	+			+				+			+	
6	A0 • B0 • C • <u>Д</u>	+			+				+				+
7	A0 • B0 • <u>C</u> • D0	+			+					+	+		
8	A0 • B0 • <u>C</u> • Д	+			+					+		+	
9	A0 • B0 • <u>C</u> • <u>Д</u>	+			+					+			+
10	A0 • B • C0 • D0	+				+		+			+		
11	A0 • B • C0 • Д	+				+		+				+	
12	A0 • B • C0 • <u>Д</u>	+				+		+					+
13	A0 • B • C • D0	+				+			+		+		
14	A0 • B • C • Д	+				+			+			+	
15	A0 • B • C • <u>Д</u>	+				+			+				+
16	A0 • B • <u>C</u> • D0	+				+				+	+		
17	A0 • B • <u>C</u> • Д	+				+				+		+	
18	A0 • B • <u>C</u> • <u>Д</u>	+				+				+			+
19	A0 • <u>B</u> • C0 • D0	+					+	+			+		
20	A0 • <u>B</u> • C0 • Д	+					+	+				+	
21	A0 • <u>B</u> • C0 • <u>Д</u>	+					+	+					+
22	A0 • <u>B</u> • C • D0	+					+		+		+		
23	A0 • <u>B</u> • C • Д	+					+		+			+	
24	A0 • <u>B</u> • C • <u>Д</u>	+					+		+				+
25	A0 • <u>B</u> • <u>C</u> • D0	+					+			+	+		
26	A0 • <u>B</u> • <u>C</u> • Д	+					+			+		+	
27	A0 • <u>B</u> • <u>C</u> • <u>Д</u>	+					+			+			+
28	A • B0 • C0 • D0		+		+		+	+			+		
29	A • B0 • C0 • Д		+		+		+	+				+	
30	A • B0 • C0 • <u>Д</u>		+		+		+	+					+
31	A • B0 • C • D0		+		+				+		+		
32	A • B0 • C • Д		+		+				+			+	
33	A • B0 • C • <u>Д</u>		+		+				+				+
34	A • B0 • <u>C</u> • D0		+		+					+	+		
35	A • B0 • <u>C</u> • Д		+		+					+		+	
36	A • B0 • <u>C</u> • <u>Д</u>		+		+					+			+
37	A • B • C0 • D0		+			+		+			+		
38	A • B • C0 • Д		+			+		+				+	
39	A • B • C0 • <u>Д</u>		+			+		+					+
40	A • B • C • D0		+			+			+		+		
41	A • B • C • Д		+			+			+			+	
42	A • B • C • <u>Д</u>		+			+			+				+
43	A • B • <u>C</u> • 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.

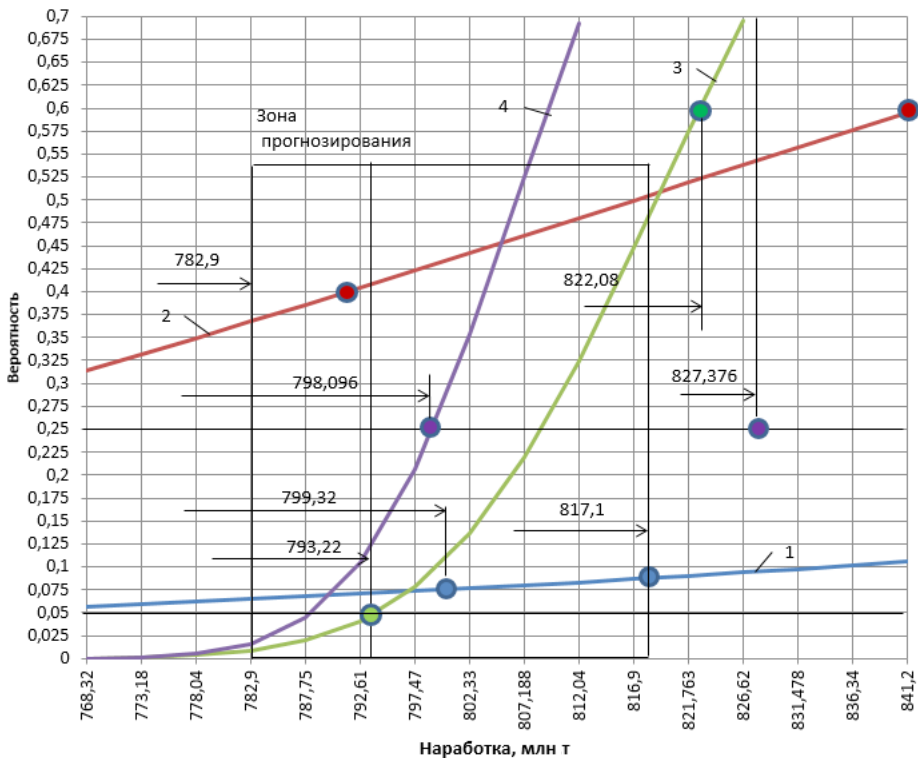
В разработанной на кафедре «Путь и путевое хозяйство» модели для исследования заданных параметров могут быть использованы нормальный, экспоненциальный и обобщённый законы распределения, закон Вейбулла.

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	$782,9 < t \leq 817,1$	$f(t) = \frac{1}{100,5 \cdot \sqrt{2}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t-817}{100,5} \right)}$
С	Выплески	$782,9 < t \leq 793,224$	$f(t) = 0,005 + \frac{1}{15,1 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t-818,9}{15,1} \right)^2}$
		$793,224 < t \leq 817,1$	$f(t) = 0,01 + \frac{1}{15,1 \cdot \sqrt{2}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t-818,9}{15,1} \right)}$
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	Вероятность	Событие	Вероятность	Событие	Вероятность	Событие	Вероятность
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•Bi•Ci•Di  
(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

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

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





Предельные значения диагоналей n-мерного пространства (критерии)

Одномерное пространство	Двухмерное пространство	Трёхмерное пространство	Четырёхмерное пространство
$P_1 = P_A / P_{A0} = 1$	$P_{12} = \sqrt{P1^2 + P2^2} = \sqrt{2}$	$P_{123} = \sqrt{P1^2 + P2^2 + P3^2} = \sqrt{3}$	$P_{1234} = \sqrt{P1^2 + P2^2 + P3^2 + P4^2} = 2$
$P_2 = P_B / P_{B0} = 1$	$P_{13} = \sqrt{P1^2 + P3^2} = \sqrt{2}$	$P_{134} = \sqrt{P1^2 + P3^2 + P4^2} = \sqrt{3}$	
$P_3 = P_C / P_{C0} = 1$	$P_{14} = \sqrt{P1^2 + P4^2} = \sqrt{2}$	$P_{234} = \sqrt{P2^2 + P3^2 + P4^2} = \sqrt{3}$	
$P_4 = P_D / P_{D0} = 1$	$P_{23} = \sqrt{P2^2 + P3^2} = \sqrt{2}$	$P_{124} = \sqrt{P1^2 + P2^2 + P4^2} = \sqrt{3}$	
	$P_{24} = \sqrt{P2^2 + P4^2} = \sqrt{2}$		
	$P_{34} = \sqrt{P3^2 + P4^2} = \sqrt{2}$		

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.

Значения математических ожиданий

№	Событие	Мат. ожидание Mi	№	Событие	Мат. ожидание Mi
			28	A0 • B • C • D	0,1
2	A • B • C • D0	0,0721	29	A0 • B • C • D0	0,007
10	A • B0 • C • D	0,163	37	A0 • B0 • C • D	0,015
11	A • B0 • C • D0	0,034	38	A0 • B0 • C • D0	0,003
19	A • B • C • D	1,78	46	A0 • B • C • D	0,04
20	A • B • C • D0	0,07	47	A0 • B • C • D0	0,007

Таблица 12

Предельные значения наработки тоннажа для исследуемых параметров

События	Предельная нормативная вероятность, P <sub>i</sub>	Предельная расчётная наработка тоннажа, T <sub>i</sub> (млн т)
A (отказ рельсов)	P <sub>A01</sub> = 0,075	T <sub>A0</sub> = 799,32
До седьмого дефекта	P <sub>A02</sub> = 0,0875	T <sub>A02</sub> = 817,10
B (отказ креплений)	P <sub>B01</sub> = 0,2	T <sub>B01</sub> = 731,58
	P <sub>B02</sub> = 0,4	T <sub>B02</sub> = 790,87
C (кол. выплесков)	P <sub>C0</sub> = 0,05	T <sub>C0</sub> = 793,32
D (кол. откл. ГРК 2 ст.)	P <sub>D0</sub> = 0,025	T <sub>D0</sub> = 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 • B • C • 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 B (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 • B • C • D0), 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-



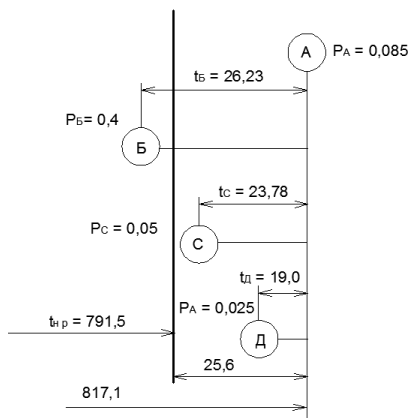


Рис. 6. Схема расчёта.

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:

$$\begin{aligned} T_{A02} &= 817,1 \text{ млн т.} \\ t_A &= 0; t_B = 817,1 - 790,87 = 26,23 \text{ (млн т);} \\ t_C &= 817,1 - 793,32 = 23,78 \text{ (млн т);} \\ t_D &= 817,1 - 798,096 = 19 \text{ (млн т);} \\ \sum P_i &= 0,4 + 0,05 + 0,025 = 0,475. \end{aligned}$$

Относительный срок назначения ремонта:

$$T_H = (0,4 \cdot 26,23 + 0,05 \cdot 23,78 + 0,025 \cdot 19) / 0,457 = 25,6 \text{ (млн т).}$$

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. УРРАН. 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. Моник 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. Беспально за оказанную помощь в разработке программы к модели для оценки состояния железнодорожного пути.

# MODELING OF TRACK TECHNICAL STATE WHEN OPERATING TIME IN TERMS OF TONNAGE IS HIGHER THAN NORMATIVE

**Derzhavin, Alexey N.**, Russian University of Transport, Moscow, Russia.  
**Lysenko, Nikolay N.**, Russian University of Transport, Moscow, Russia.  
**Kovalenko, Nikolay I.**, Russian University of Transport, Moscow, Russia.

## ABSTRACT

In the current provision on the system of track management of JSC Russian Railways, the existing criteria for assignment of main types of repair of the track do not allow making unequivocal decisions on timing of future repairs. The article discusses a methodology and model that helps to justify the time of overhaul in order

to actualize the application of the specified criteria and extend the period of operation of the track in the zone of track sections where tonnage of transported goods has exceeded the standard cumulated value, requiring thus maintenance works (called operating time in terms of tonnage). This methodology is based on forecasting of failures of its elements using the developed model.

**Keywords:** railway, track, mean tonnage value, mean time between overhauls, residual resource, overhaul, management decision, mathematical model.

**Background.** In the strategy of scientific and technological development of JSC Russian Railways the guidelines for innovative development have been defined until 2030. From this strategy, the authors selected two indicators: an increase in the time between capital repairs of sections of the track using closed-haul technology to 1500 million gross tons in 2015 and 2500 million tons gross in 2030; reduction (as compared to 2012 basic year) one year cost of life cycle of the track superstructure by 1,3 times [1]. Proceeding from this, in the article a special place is given to a problem of management of a technical condition of a railway track in a zone of its operation with operating time in terms of tonnage (or simply operating time of tonnage) above normative value.

The untimely carrying out of such labor-intensive works as overhaul and average repairs leads to additional costs for current maintenance of the track, because the problem remains to maintain it in a state that allows uninterrupted and safe movement of trains with established speeds.

Under the existing conditions, the strategy of integrated management of reliability, safety, risks and resources in rail transport (URRAN) is in demand and is actively applied [1–3]. The most common approach

is to maintain reliability in the operation of technical systems.

**Objective.** The objective of the authors is to consider modeling of track technical state if operating time of tonnage is higher than normative.

**Methods.** The authors use general scientific and engineering methods, comparative analysis, evaluation approach, mathematical apparatus.

## Results.

### Model-based research

Within the framework of the URRAN concept in Pic. 1 a control scheme for planning the repair of a track in a zone with operating time of tonnage above the normative value is presented, taking into account estimation and forecasting of the residual life of track elements.

In modeling the process of operating the track in the zone under study, the following main tasks are solved:

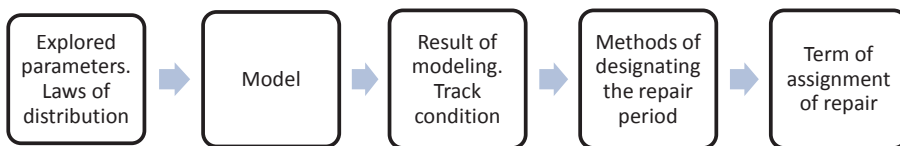
1. Extension of the track lifetime, taking into account forecasting of the residual life of its elements and designation of a deadline for completion of overhaul.
2. Justification of decision-making when assigning track repairs.

In accordance with the Regulations on the Track Maintenance System of JSC Russian Railways when assigning overhaul of the track it is

**Table 1**

**Criteria for selecting track sections to be reconstructed, overhauled on new materials [5]**

Track class	Main criteria		Additional criteria			URRAN criteria (not less than)	
	Operating time of track in % of the normative resource (lifetime) of the track	Single output of rails	Number of unsuitable and defective elements per 1 km of the track superstructure, % (from and above)	Defective wooden sleepers, %	Defective fastenings, %	Number of sleepers with splashes, %	Frequency of failures, number per year/km
1	Not less than 100 %	4 and more	15	15	4	0,2	0,5
2	Not less than 100 %	6 and more	18	20	5	0,2	0,5



**Pic. 1. The scheme for managing the planning of track repair based on the developed methodology and model.**



**Criteria for choosing the track sections subject to RPC**

Class of a track	Main criteria		Additional criteria		
	Number of deviations of GRT 2 <sup>nd</sup> degree, pcs/km and more	Pollution of rubble, % by weight	Unsuitable wooden sleepers, % and no more than	Sleepers with splashes, % and no more than	Unsuitable fastenings, % and no more than
1 and 2	25	up to 30	10	3	10
3	30	up to 30	15	5	15
4	40	up to 30	20	10	20
5	At the discretion of the head of track maintenance department				

Table 3

**Designation and description of modeled events**

No.	Designation of events	Description of events
		Single output of rails
1	A	– rail failure did not occur
2	A0	– rail failure occurred, $n_A < 6$ pcs per km
3	A	– rail failure occurred, $n_A \geq 6$ pcs per km
		Failure of fastenings elements
4	B	– failure of fastenings did not occur
5	B0	– failure of fastenings occurred, $n_B < 736$ pcs per km
6	B	– failure of fastenings occurred, $n_B \geq 736$ pcs per km
		Number of sleepers with splashes
7	C	– splash under the sleeper did not occur
8	C0	– splash under the sleeper occurred, $n_C < 92$ pcs per km
9	C	– splash under the sleeper occurred, $n_C \geq 92$ pcs per km
		Number of deviations of GRT 2 <sup>nd</sup> degree
10	D	– deviation of GRT 2 <sup>nd</sup> degree did not occur
11	D0	– deviation of GRT 2 <sup>nd</sup> degree occurred, $n_D \leq 25$ pcs per km
12	D	– deviation of GRT 2 <sup>nd</sup> degree occurred, $n_D > 25$ pcs per km

necessary to be guided by the criteria given in Table 1.

As can be seen from Table 1, some parameters (such as a single output of rails, defective fastenings, number of sleepers with splashes) are random variables and fulfillment of all of them simultaneously is a very problematic condition. As a result, there is a residual resource of operating time of tonnage by separate parameters (elements), which must be estimated and predicted when assigning track repair.

For a wider use of the model, one more parameter is added, this is a deviation of the geometry of the rail track (GRT) of the 2<sup>nd</sup> degree, which allows assigning the track alignment to the assignment of overhaul.

In accordance with the provision on the system of track maintenance [5], the criteria for assigning a regular preventive correction (RPC) are the parameters given in Table 2

As a result of comparison of options for modeling, a list of track parameters characterizing its state at a certain point in time was adopted. This is a single output of rails, the number of unsuitable fastenings, the number of sleepers with splashes, the number of deviations of GRT 2<sup>nd</sup> degree.

For the decision to assign repair of the track, a system is simulated, in which 12 events that determine the

technical state of the track elements are combined. The modeled events and their notation are shown in Table 3.

When modeling railway track conditions, it is assumed that the occurrence of events – rail defect, splash, failure of fastenings, deviation of GRT 2<sup>nd</sup> degree – is simultaneously possible, therefore we believe that these simple events are joint and independent.

Now we define a complete group of complex incompatible events of the type  $A \cdot B \cdot C \cdot D$ , during which the track passes from one state to another during operation.

The total group of all complex events is  $N = n^4 = 3^4 = 81$  and is shown in Table 4.

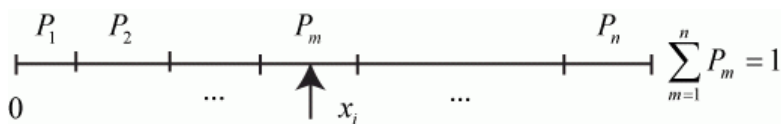
The track in the process of operation deteriorates and passes from one state to another. The order of occurrence of events depends on the failure rate of the track elements.

Based on the criteria in Table 4, overhaul should be scheduled when the following events occur:

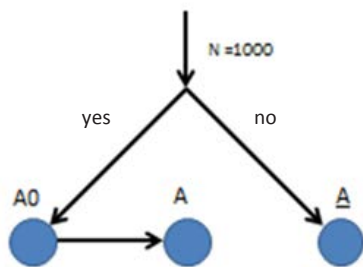
40. ( $A \cdot B \cdot C \cdot D0$ ) with the number of deviations of GRT 2<sup>nd</sup> degree  $n_D \leq 25$  pcs per km.

41. ( $A \cdot B \cdot C \cdot D$ ) with the number of deviations of GRT 2<sup>nd</sup> degree  $n_D > 25$  pcs per km.

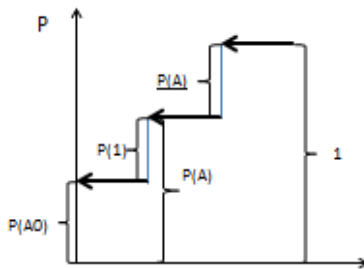
42. ( $A \cdot B \cdot C \cdot \bar{D}$ ), the number of deviations of GRT 2<sup>nd</sup> degree did not occur  $n_D = 0$



Pic. 2. Scheme of the algorithm.



Pic. 3. The principle of modeling the event A.



Pic. 4. The probability of occurrence of the event A.

The probability of occurrence of these events will accordingly be equal to:

$$P_{A0} = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D0);$$

$$P_{A1} = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D);$$

$$P_{A2} = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D) = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot [1 - P(D)].$$

The algorithm for modeling the parameters under study is based on a theorem, which is interpreted as follows.

In the complete group of incompatible complex events (track states), the model of occurrence of the event  $A_m$  occurring with the probability  $P_m$  is the hit of the value of  $X_i$  on the interval  $[0, 1]$  of the uniformly distributed set  $\gamma$  and equal to  $P_m$  of the numerical scale,

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

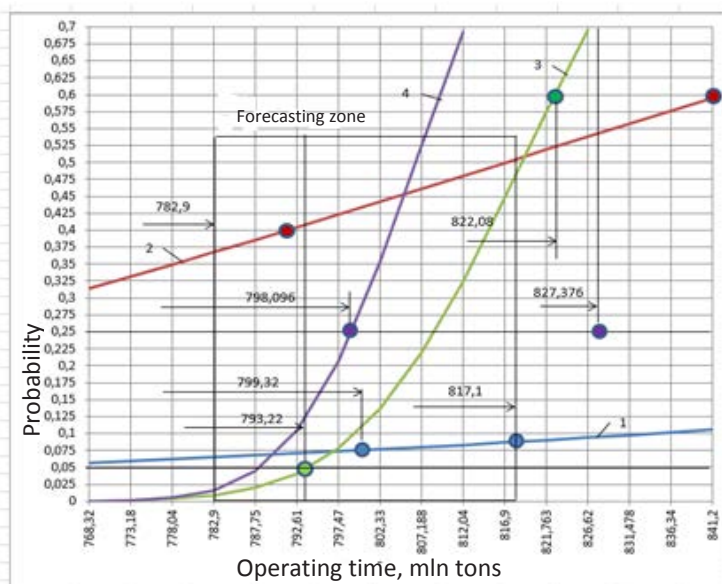
where  $n$  is the total number of complex incompatible events;  $A_m$  are complex events of the type  $(A0 \cdot B0 \cdot C0 \cdot D0)$ ;  $P_m$  is the probability of a complex event;  $X_i = (r_1, r_2, r_3, r_4)$  – is a vector consisting of a set of random numbers  $(r_1, r_2, r_3, r_4)$ , issued by the random number generator and belonging to the interval  $[0, 1]$ .

Graphically, implementation of one of the complex events looks as shown in Pic. 2.

The principle of modeling is shown on a simple event A (rail defect), which is schematically represented in Pic. 3:

- Event A0 occurs if the number of defects is  $n_{A0} < 6$ .
- Event A – if the number of defects is  $n_A \geq 6$ .
- Event  $\bar{A}$ , when no event occurs.

We write down the general identity that characterizes that the event will necessarily occur.



Pic. 5. Distributions of the parameters under study in the forecasting range: 1 – distribution of rail failure; 2 – distribution of failures of fastenings of KB type; 3 – distribution of splashes; 4 – distribution of deviations of GRT 2nd degree.



Complete group of complex events

№	Designation of a complex event	Event A occurred			Event B occurred			Event C occurred			Event D occurred		
		yes		no	yes		no	yes		no	yes		no
		A0	A	A	B0	B	B	C0	C	C	D0	D	D
		$0 < n_A < 6$	$6 \leq n_A \leq N$	$n_A = 0$	$0 < n_B < 736$	$736 \leq n_B \leq N$	$n_B = 0$	$0 < n_C < 92$	$92 \leq n_C \leq N$	$n_C = 0$	$0 < n_D \leq 25$	$25 < n_D \leq N$	$n_D = 0$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	A0•B0•C0•D0	+			+			+			+		
2	A0•B0•C0•D	+			+			+				+	
3	A0•B0•C0•D	+			+			+					+
4	A0•B0•C•D0	+			+				+		+		
5	A0•B0•C•D	+			+				+			+	
6	A0•B0•C•D	+			+				+				+
7	A0•B0•C•D0	+			+					+	+		
8	A0•B0•C•D	+			+					+		+	
9	A0•B0•C•D	+			+					+			+
10	A0•B•C0•D0	+				+		+			+		
11	A0•B•C0•D	+				+		+				+	
12	A0•B•C0•D	+				+		+					+
13	A0•B•C•D0	+				+			+		+		
14	A0•B•C•D	+				+			+			+	
15	A0•B•C•D	+				+			+				+
16	A0•B•C•D0	+				+				+	+		
17	A0•B•C•D	+				+				+		+	
18	A0•B•C•D	+				+				+			+
19	A0•B•C0•D0	+					+	+			+		
20	A0•B•C0•D	+					+	+				+	
21	A0•B•C0•D	+					+	+					+
22	A0•B•C•D0	+					+		+		+		
23	A0•B•C•D	+					+		+			+	
24	A0•B•C•D	+					+		+				+
25	A0•B•C•D0	+					+			+	+		
26	A0•B•C•D	+					+			+		+	
27	A0•B•C•D	+					+			+			+
28	A•B0•C0•D0		+		+		+	+			+		
29	A•B0•C0•D		+		+		+	+				+	
30	A•B0•C0•D		+		+		+	+					+
31	A•B0•C•D0		+		+				+		+		
32	A•B0•C•D		+		+				+			+	
33	A•B0•C•D		+		+				+				+
34	A•B0•C•D0		+		+					+	+		
35	A•B0•C•D		+		+					+		+	
36	A•B0•C•D		+		+					+			+
37	A•B•C0•D0		+			+		+			+		
38	A•B•C0•D		+			+		+				+	
39	A•B•C0•D		+			+		+					+
40	A•B•C•D0		+			+			+		+		
41	A•B•C•D		+			+			+			+	
42	A•B•C•D		+			+			+				+
43	A•B•C•D0		+			+				+	+		

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			+				+				+				+

Note: The sum of all the complex events given is equal to one, that is  $\sum_{i=1}^{n=81} A_i \cdot B_j \cdot C_k \cdot D_m = 1$ .

$P(A0) + P(A) + P(\underline{A}) = 1$  or  $n_{A0}/N + n_A/N + n_{\underline{A}}/N = 1$ .  
It looks graphically, as shown in Pic. 4.

During the modeling, the probability values of the events are obtained:  $P(A0) = n_{A0}/N$ ;  $P(A) = n_A/N$ ;  $P(\underline{A}) = n_{\underline{A}}/N$ .

Estimating the probability of occurrence of an event in a model is estimated through frequency – a static probability estimate:

$P(r \leq R) = n/N$ ,  
where  $n$  – number of events that occurred;  $N$  – number of repetitions of the experiment (in the model it is assumed that  $N = 1000$ ).

Based on the modeling results, it is possible to determine which of the events will occur earlier, and which later. There is an opportunity to play scenarios for assigning track repairs, that is, to predict them [6–8].

**Tasks engaging the model**

1. Direct task, determination of the probability of occurrence of individual simple events under study (A, B, C, D) on a selected track section at a predetermined operating time of tonnage (rail defect fastening failure, occurrence of splash, the number of deviations of GRT 2<sup>nd</sup> degree) and as a consequence – finding the number of these individual events.
2. The inverse problem, the determination of operating time of tonnage by the given value of failure of one of the events.
3. Determination of the probability of occurrence of track states (complex events of the type A • B, A • B • C, A • B • C • D, consisting of simple ones).
4. The ability to determine the sequence of emergence of track states (simple and complex events).





**Table 5**

**The laws of distribution of the parameters under study in a given range**

Event	Parameters	Forecasting range	Distribution function
A	Rails	782,9 < t ≤ 817,1	$f(t) = \frac{1}{222 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t-119}{222} \right)^2}$
B	Fastenings	782,9 < t ≤ 817,1	$f(t) = \frac{1}{100,5 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t-100,5}{100,5} \right)^2}$
C	Splashes	782,9 < t ≤ 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 ≤ 817,1	$f(t) = 0,01 + \frac{1}{15,1 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t-818,9}{15,1} \right)^2}$
D	Deviations of GRT 2 <sup>nd</sup> degree	782,9 < t ≤ 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 ≤ 817,1	$f(t) = 0,075 + \frac{1}{11,06 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t-848,7}{11,06} \right)^2}$

**Table 6**

**The result of modeling of simple single events of type A, B, C, D**

Event	Probability	Event	Probability	Event	Probability	Event	Probability
A	0,9280	B	0,6440	C	1,0000	D	0,9860
A0	0,072	B0	0,2000	C0	0	D0	0,0140
A	0	B	0,3560	C	0	D	0

5. Determination of speed of transition of one track state to another (one complex event to another).

6. Determination of the optimal time for assignment of repair work on the selected track section.

To estimate track conditions, the laws of distribution of the investigated parameters are introduced into the database of initial data.

In the model developed at the department of Track and Track Facilities, normal, exponential and general distribution laws, the Weibull law, can be used to study the specified parameters.

To obtain these laws, we took truncated samples of parameters for the kilometer under study from the passport of the track maintenance section and track-measuring cars, as well as information from scientific printed sources.

When modeling the parameters under study in a given range of operating time, the distribution laws are obtained, which are given in Table 5.

Pic. 5 shows the graphs of the distribution laws of the selected parameters for 131 kilometers of the Moscow–Ryazan direction.

Forecasting of failures of the parameters given in Table 5 is carried out in the range of operating time of tonnage 782,9 ≤ t ≤ 817,1 (million tons).

The points in Pic. 5 shows the limiting values of operating time of tonnage of individual parameters, under which the repair of track should be assigned according to the regulations.

As can be seen from Pic. 6, the emergence of the same (with the same operating time) limiting values of the parameters is unlikely, therefore, the authors propose a method for determining the assignment of overhaul of the track when operating time of tonnage is above the limiting normative value.

Tables 6 and 7 show the results of modeling the parameters under study with operating time of

tonnage of 782,9 million tons for 131 km of the Moscow–Ryazan direction.

From Table 6 it can be seen that event A for a given operating time of tonnage has not reached its limiting normative value  $P_A = 0,075$ .

Event B overstepped the limiting value of probability with the value  $P_B = 0,356 > 0,2$ .

Event C did not occur, so  $P_C = 0$ .

Event D did not reach its limiting normative value  $P_D = 0,25$  and is equal to  $P_{D0} = 0,014$ .

During the research, it is necessary to understand the state in which the track will be for a given operating time of tonnage, for this, modeling of complex events of the type A, B, C, D (see Table 7) is made.

Next, it is necessary to determine which of these events (track states) are the limiting ones, that is, the most appropriate ones for the purpose of repairing the track, for which criteria should be chosen for their evaluation.

For single events, the limiting normative values of the probability of occurrence of each of them are given in Table 8.

To normalize and obtain evaluation criteria, we introduce the concept of a normalized probability, which is expressed for each simple event as follows:

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

We consider that it is possible to construct four-dimensional space from these vectors (in the general case, n is a space with its own measure on each axis), in which the limiting values of the diagonals of the n-dimensional space are taken as criteria.

For the case under consideration, the limiting values of the diagonals are given in Table 9.

We determine the value of diagonals of a vector space for their comparative estimation. The non-zero values of the diagonals calculated for 131 km are given in Table 10.

Table 7

**The result of modeling all complex events of the type  $A_i \cdot B_i \cdot C_i \cdot D_i$   
(probability of occurrence of a complex event)**

No.	Event	Value of $P_i$	No.	Event	Value of $P_i$	No.	Event	Value of $P_i$
1	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0,4828	28	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0,0314	55	$A \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0
2	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D0}$	0,0721	29	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D0}$	0,0047	56	$A \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D0}$	0
3	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0	30	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0	57	$A \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0
4	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0	31	$A0 \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0	58	$A \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0
5	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D0}$	0	32	$A0 \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D0}$	0	59	$A \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D0}$	0
6	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0	33	$A0 \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0	60	$A \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0
7	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D}$	0	34	$A0 \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D}$	0	61	$A \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D}$	0
8	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D0}$	0	35	$A0 \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D0}$	0	62	$A \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D0}$	0
9	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D}$	0	36	$A0 \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D}$	0	63	$A \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D}$	0
10	$\underline{A} \cdot \underline{B0} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0,1634	37	$A0 \cdot \underline{B0} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0,0106	64	$A \cdot \underline{B0} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0
11	$\underline{A} \cdot \underline{B0} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D0}$	0,0244	38	$A0 \cdot \underline{B0} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D0}$	0,0016	65	$A \cdot \underline{B0} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D0}$	0
12	$\underline{A} \cdot \underline{B0} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0	39	$A0 \cdot \underline{B0} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0	66	$A \cdot \underline{B0} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0
13	$\underline{A} \cdot \underline{B0} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0	40	$A0 \cdot \underline{B0} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0	67	$A \cdot \underline{B0} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0
14	$\underline{A} \cdot \underline{B0} \cdot C0 \cdot \underline{D0}$	0	41	$A0 \cdot \underline{B0} \cdot C0 \cdot \underline{D0}$	0	68	$A \cdot \underline{B0} \cdot C0 \cdot \underline{D0}$	0
15	$\underline{A} \cdot \underline{B0} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0	42	$A0 \cdot \underline{B0} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0	69	$A \cdot \underline{B0} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0
16	$\underline{A} \cdot \underline{B0} \cdot C \cdot \underline{D}$	0	43	$A0 \cdot \underline{B0} \cdot C \cdot \underline{D}$	0	70	$A \cdot \underline{B0} \cdot C \cdot \underline{D}$	0
17	$\underline{A} \cdot \underline{B0} \cdot C \cdot \underline{D0}$	0	44	$A0 \cdot \underline{B0} \cdot C \cdot \underline{D0}$	0	71	$A \cdot \underline{B0} \cdot C \cdot \underline{D0}$	0
18	$\underline{A} \cdot \underline{B0} \cdot C \cdot \underline{D}$	0	45	$A0 \cdot \underline{B0} \cdot C \cdot \underline{D}$	0	72	$A \cdot \underline{B0} \cdot C \cdot \underline{D}$	0
19	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0,3341	46	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0,0217	73	$A \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0
20	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D0}$	0,0499	47	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D0}$	0,0032	74	$A \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D0}$	0
21	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0	48	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0	75	$A \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0
22	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0	49	$A0 \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0	76	$A \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0
23	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D0}$	0	50	$A0 \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D0}$	0	77	$A \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D0}$	0
24	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0	51	$A0 \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0	78	$A \cdot \underline{B} \cdot C0 \cdot \underline{D}$	0
25	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D}$	0	52	$A0 \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D}$	0	79	$A \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D}$	0
26	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D0}$	0	53	$A0 \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D0}$	0	80	$A \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D0}$	0
27	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D}$	0	54	$A0 \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D}$	0	81	$A \cdot \underline{B} \cdot C \cdot \underline{D}$	0

As a criterion for choosing an event, the maximum value of the mathematical expectation is taken, which is determined by the formula [6]:

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

where  $X_i$  – value of the vector,  $P_i$  – probability of its emergence.

The calculated mathematical expectations of events are summarized in Table 11.

From the results obtained, it follows that when operating time of tonnage is 782,9 million tons, event № 19 ( $\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$ ) should occur, which should be noted, since the mathematical expectation of this event has a maximum value of  $M_{19} = 1,78$ . The probability of its occurrence is  $P = 35,6\%$ .

Further, it can be noted that there was only one simple event B (failure of fastening), the probability of which was  $P_B = 0,356$  and which exceeded the limiting normative value  $P_B = 0,2$ .

**Table 8**  
**Limiting values for probability of occurrence of a simple event**

Events	Normative limiting value of probability
A	$P_{A0} = 0,075$
B	$P_{B0} = 0,2$
C	$P_{C0} = 0,05$
D	$P_{D0} = 0,25$

Of complex events, the event № 20 ( $\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D0}$ ) took place, in which the mathematical expectation is  $M_{19} = 0,07$ , and the probability of its occurrence is  $P = 5\%$ .

After determining and assessing the track state in which it fell at a given operating time of tonnage, it is necessary to designate the period for performing the repair at the selected kilometer. For this purpose,



**Limiting values of diagonals of n-dimensional space (criteria)**

One-dimensional space	Two-dimensional space	Three-dimensional space	Four-dimensional space
$P_1 = P_A / P_{A0} = 1$	$P_{12} = \sqrt{P1^2 + P2^2} = \sqrt{2}$	$P_{123} = \sqrt{P1^2 + P2^2 + P3^2} = \sqrt{3}$	$P_{1234} = \sqrt{P1^2 + P2^2 + P3^2 + P4^2} = 2$
$P_2 = P_B / P_{B0} = 1$	$P_{13} = \sqrt{P1^2 + P3^2} = \sqrt{2}$	$P_{134} = \sqrt{P1^2 + P3^2 + P4^2} = \sqrt{3}$	
$P_3 = P_C / P_{C0} = 1$	$P_{14} = \sqrt{P1^2 + P4^2} = \sqrt{2}$	$P_{234} = \sqrt{P2^2 + P3^2 + P4^2} = \sqrt{3}$	
$P_4 = P_D / P_{D0} = 1$	$P_{23} = \sqrt{P2^2 + P3^2} = \sqrt{2}$	$P_{124} = \sqrt{P1^2 + P2^2 + P4^2} = \sqrt{3}$	
	$P_{24} = \sqrt{P2^2 + P4^2} = \sqrt{2}$		
	$P_{34} = \sqrt{P3^2 + P4^2} = \sqrt{2}$		

Table 10

**Values of diagonals of a vector space**

No.	Event	Value	No.	Event	Value
			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

Table 11

**Values of mathematical expectations**

No.	Event	Mathematical expectation Mi	No.	Event	Mathematical expectation Mi
			28	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0,1
2	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot D0$	0,0721	29	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot D0$	0,007
10	$\underline{A} \cdot B0 \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0,163	37	$A0 \cdot B0 \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0,015
11	$\underline{A} \cdot B0 \cdot \underline{C} \cdot D0$	0,034	38	$A0 \cdot B0 \cdot \underline{C} \cdot D0$	0,003
19	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	1,78	46	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot \underline{D}$	0,04
20	$\underline{A} \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot D0$	0,07	47	$A0 \cdot \underline{B} \cdot \underline{C} \cdot D0$	0,007

the authors propose a technique for assigning overhaul of the track when operating time of tonnage is in excess of the normative value.

**Method of assignment of repair**

First it is necessary to choose the forecasting range and determine the distribution laws of the parameters under study, for this we use Pic. 6, which shows the distribution of parameters in a given range of operating time and indicates the limiting points in which it is required to repair the track elements to eliminate the resulting failures.

The distribution of rail failure (the appearance of defects) is accepted as the basic distribution, and the value of  $P_{A0} = 0,075$  reflects the limiting probability

(at which the entire kilometer of the strings is to be replaced).

In accordance with the normative value, the kilometer of the strings is replaced when more than six defects appear in it. The operating time of tonnage for this number of defects is 799,32 million tons.

We determine the operating time of tonnage before the appearance of the next seventh defect. The value of tonnage for it will be 817, 1 million tons.

The assignment of overhaul at this kilometer long section should be made before the appearance of the seventh defect, therefore the boundary of operating time of tonnage 817, 1 million tons is taken for the reference line. Further limiting values for the

Table 12

## Limiting values of operating time of tonnage for the parameters under study

Event	Limiting normative probability, $P_i$	Limiting estimated operating time of tonnage, $T_i$ (mln tons)
A (rail failure)	$P_{A01} = 0,075$	$T_{A0} = 799,32$
Up to the seventh defect	$P_{A02} = 0,0875$	$T_{A02} = 817,10$
B (failure of fastenings)	$P_{B01} = 0,2$	$T_{B01} = 731,58$
	$P_{B02} = 0,4$	$T_{B02} = 790,87$
C (number of splashes)	$P_{C0} = 0,05$	$T_{C0} = 793,32$
D (number of deviations of GRT 2 <sup>nd</sup> degree)	$P_{D0} = 0,025$	$T_{D0} = 798,096$

remaining parameters are found. They are listed in Table 12.

The term of assignment of repair of the track is determined by the formula [6]:

$$T_n = \frac{\sum P_i t_i}{\sum P_i},$$

where  $P_i$  – limiting normative probability;  $T_i$  – limiting estimated operating time of tonnage.

Thus, for the reference frame, the total operating time of tonnage  $T_{A02} = 817,1$  mln tons is taken.

$t_A = 0$ ;  $t_B = 817,1 - 790,87 = 26,23$  (mln tons);  $t_C = 817,1 - 793,32 = 23,78$  (mln tons);

$t_D = 817,1 - 798,096 = 19$  (mln tons);  $\sum P_i = 0,4 + 0,05 + 0,025 = 0,475$ .

Relative period of assignment of repair:

$T_n = (0,4 \cdot 26,23 + 0,05 \cdot 23,78 + 0,025 \cdot 19) / 0,475 = 25,6$  (mln tons).

The term of assignment for total operating time of tonnage will be:

$T_{nr} = 817,1 - 25,6 = 791,5$  (mln tons).

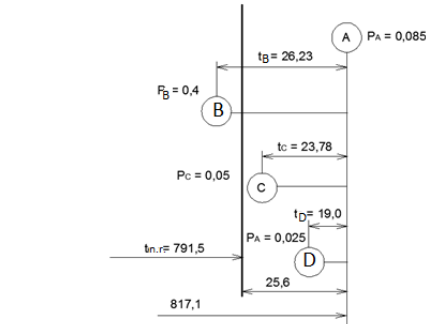
Graphically the calculation scheme is shown in Fig. 6.

**Conclusion.** When operating the selected kilometer long section in the range of operating time of tonnage  $782,9 \leq t \leq 817,1$  (mln tons), in accordance with the considered methodology, overhaul should be assigned for operating time of tonnage  $t_{nr} = 791,5$  (mln tons).

The team of authors thanks D.Sc. (Eng), professor of the department of Cars and Cars Facilities of Russian University of Transport S. B. Bespalko for the assistance in developing the software of the model for assessing the state of the railway track.

## REFERENCES

1. The concept of integrated management of reliability, risks, cost of life cycle in railway transport. URRAN. Approved by JSC Russian Railways on 31.07.2010 [Konceptiya kompleksnogo upravleniya nadezhnost'ju, riskami, stoimost'ju zhiznennogo cikla na zheleznodorozhnom transporte. URRAN. Uiv. OAO «RZD» 31.07.2010]. Moscow, 2010, 132 p.



Pic. 6. The calculation scheme.

2. Zamyshlyayev, A. M. Automation of the processes of integrated management of technical maintenance of the railway transport infrastructure. D.Sc. (Eng) thesis [Avtomatizatsiya processov kompleksnogo upravleniya tehnikeskim soderzhaniiem infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta / Dis... dok. tehn. nauk]. Moscow, 2013, 328 p.

3. Patra, A. Maintenance Decision Support Models for Railway Infrastructure using RAMS & LCC Analyses, Division of Operation and Maintenance Engineering, Lulea University of Technology, 2007.

4. Patra, A. RAMS and LCC in Rail Track Maintenance, Division of Operation and Maintenance Engineering, Lulea University of Technology, 2009.

5. Regulations on the system of track maintenance of JSC Russian Railways. Approved. JSC Russian Railways on 31.12.2015 [Polozhenie o sisteme vedeniya putevogo hozhajstva OAO «Rossijskie zheleznnye dorogi». Uiv. OAO «RZD» 31.12.2015]. Moscow, 2015, 93 p.

6. Monsik, V. B., Skrynnikov, A. A. Probability and statistics: Study guide [Veroyatnost' i statistika: Ucheb. posobie]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy publ., 2011, 381 p.

7. Kan, O. S., Kibzun, A. I. Tasks of stochastic programming with probabilistic criteria [Zadachi stokhasticheskogo programirovaniya s veroyatnostnymi kriterijami]. Moscow, Fizmatlit publ., 2009, 372 p.

8. Buslenko, N. P. Modeling of complex systems [Modelirovanie slozhnyh system]. Moscow, Nauka publ., 1978, 399 p.

Information about the authors:

**Derzhavin, Alexey N.** – Ph.D. student of the department of Track and Track Facilities of Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, +7 (499) 972-14-96.

**Lysenko, Nikolay N.** – Ph.D. (Eng), associate professor of Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, lysenko-pph@rambler.ru.

**Kovalenko, Nikolay I.** – D.Sc. (Eng), professor of Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, kni50@mail.ru.

Article received 02.10.2017, accepted 25.12.2017.

