

РАЗДЕЛ I. ПУТЬ И ПУТЕВОЕ ХОЗЯЙСТВО



Карпущенко Николай Иванович — заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения, д-р техн. наук, профессор.

Родился в 1936 г. В 1960 г. окончил факультет СЖД НИИЖТа. Академик Российской академии транспорта (1991 г.), заслуженный деятель науки РФ (2004 г.).

Область научных интересов — надежность пути, совершенствование рельсовых скреплений, взаимодействие пути и подвижного состава. Автор более 250 научных работ.

E-mail: kni@stu.ru



Величко Дмитрий Валерьевич — доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения, канд. техн. наук, доцент.

Родился в 1975 г. В 1998 г. окончил факультет СЖД СГАПС, в 1998–2000 гг. работал в ОПМС-19 ЗСЖД, 1999–2002 гг. — аспирант СГУПС (научный руководитель Н.И. Карпущенко), кандидат технических наук (2003 г.), доцент (2006 г.), с 2004 г. — ст. науч. сотр. НИЛ Путейспытательная СГУПС.

Область научных интересов — надежность пути, совершенствование элементов верхнего строения пути. Автор более 80 научных работ.

E-mail: vdv.nsk@mail.ru



Антерейкин Евгений Сергеевич — доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения, канд. техн. наук.

Родился в 1981 г. В 2004 г. окончил факультет СЖД СГУПС, 2004–2007 гг. — аспирант СГУПС (научный руководитель Н.И. Карпущенко), кандидат технических наук (2010 г.), с 2011 г. — зам. декана факультета СЖД.

Область научных интересов — взаимодействие пути и подвижного состава. Автор более 20 научных работ.

E-mail: antereykin@ngs.ru

УДК 625.143

Н.И. КАРПУЩЕНКО, Д.В. ВЕЛИЧКО, Е.С. АНТЕРЕЙКИН

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ НАРАСТАНИЯ ИЗНОСА РЕЛЬСОВ И ВЕРОЯТНОСТЬ ИХ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ

В статье проанализировано влияние различных эксплуатационных факторов на величину износа рельсов в кривых участках пути. Получены зависимости бокового износа и ширины рельсовой колеи от наработанного тоннажа при учете радиуса кривой и осевой нагрузки подвижного состава, позволяющие прогнозировать срок службы рельсов в кривых.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельс, боковой износ, ширина рельсовой колеи, кривой участок пути.

Срок службы рельсов в кривых во многом зависит от величины бокового износа, который, в свою очередь, определяется рядом эксплуатационных параметров пути

(шириной рельсовой колеи, радиусом кривой, непогашенным ускорением, интенсивностью и силовым воздействием от подвижного состава, сроком эксплуатации и т.д.), в разной степени влияющих на интенсивность процесса износа, которую можно учесть методами математической статистики.

Статистические зависимости описываются математическими моделями процесса, т.е. регрессионными выражениями, связывающими независимые значения X (факторы) с зависимой переменной Y (результативный признак, функция цели, отклик). Модель по возможности должна быть простой и адекватной.

Суть регрессионного анализа сводится к установлению уравнения регрессии, т.е. вида кривой между случайными величинами (аргументами X и функцией Y), оценке тесноты связей между ними, достоверности и адекватности результатов измерений.

Различают однофакторные (парные) и многофакторные регрессионные зависимости. Парная регрессия при парной зависимости может быть аппроксимирована прямой линией, параболой, гиперболой, логарифмической, степенной или показательной функцией, полиномом и др. Двухфакторное поле можно аппроксимировать плоскостью, параболоидом второго порядка, гиперболоидом. Для переменных факторов связь может быть установлена с помощью мерного пространства уравнениями второго порядка:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2, \quad (1)$$

где Y — функция цели (отклика) многофакторных переменных; X_i — независимые факторы; b_i — коэффициенты регрессии, характеризующие влияние фактора X_i на функцию цели; b_{ij} — коэффициенты, характеризующие двойное влияние факторов X_i, X_j на функцию цели.

Критерием близости корреляционной зависимости между X и Y к линейной функциональной зависимости является коэффициент парной или просто коэффициент корреляции r , показывающий степень тесноты связи X и Y и определяемый отношением

$$r = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{[n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2][n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2]}}, \quad (2)$$

где n — число измерений. Значение коэффициента корреляции всегда меньше единицы. При $r = 1,0$ X и Y связаны функциональной связью (в данном случае линейной), т.е. каждому значению X соответствует только одно значение Y . Если $r < 1,0$, то линейной связи не существует. При $r = 0$ линейная корреляционная связь между X и Y отсутствует, но может существовать нелинейная регрессия. Обычно считают тесноту связи удовлетворительной при $r \geq 0,5$; хорошей при $r = 0,8 \dots 0,85$. Для определения процента разброса (изменчивости) искомой функции Y относительно ее среднего значения, определяемого изменчивостью фактора X , вычисляют коэффициент детерминации

$$k_d = r^2. \quad (3)$$

Уравнение регрессии прямой можно представить выражением

$$Y = \bar{Y} + r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} (X - \bar{X}). \quad (4)$$

На практике часто возникает потребность в установлении связи между Y и многими параметрами $X_1, \dots, X_n$ на основе многофакторной регрессии.

Многофакторные теоретические регрессии аппроксимируются полиномами первого или второго (1) порядка. Математические модели характеризуют стохастический процесс изучаемого явления, уравнение регрессии определяет систематическую, а ошибки разброса — случайную составляющую.

Теоретическую модель множественной регрессии можно получить методами математического планирования, т.е. активным экспериментом, а также пассивным, когда точки факторного пространства выбираются в процессе эксперимента произвольно.

На ряде опытных участков Западно-Сибирской железной дороги (Инская, Заринская и Болотнинская дистанции пути) авторами в течение четырех лет велись наблюдения за износом рельсов и изменением параметров рельсовой колеи в кривых в процессе эксплуатации.

Путь в кривых опытных участков работает в различных условиях эксплуатации — бесстыковой и звеньевой путь, скорости движения поездов, от 60 до 120 км/ч, радиусы кривых от 296 до 598 м, грузонапряженность от 78 до 110 млн т км бр./км в год (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики опытных и контрольных кривых на Западно-Сибирской железной дороге

Перегон	км, ПК	Путь	Радиус кривой R , м	Профиль i , ‰	Длина кривой L , м	Возвышение наружного рельса h , мм	Скрепление	Шпалы	G , млн т км бр./км в год	Пропущенный тоннаж на начало наблюдений, млн т	$V_{\text{тес}}$, км/ч	$V_{\text{гр}}$, км/ч	Начальная ширина колеи после смены рельсов, мм
1. Издревая – Жеребцово	17пк9–18пк5	II	337	II 6,3	573	99	КБ	Ж.б.	58,3	0	70	60	1530
2. Издревая – Жеребцово	19пк4–19пк9	II	393	II 3,5	360	89	КБ	Ж.б.	58,3	22,0	70	60	1520
3. Издревая – Жеребцово	20пк3–20пк5	I	627	II 0,8	270	80	ДО	Дер.	71,7	496,2	70	60	1538
4. Издревая – Жеребцово	20пк8–20пк10	I	552	C 2,3	349	85	ДО	Дер.	71,7	496,2	70	60	1528

В табл. 2 приведены параметры рельсовой колеи на опытных участках длиной 250 м в круговых кривых № 1–4 и корреляционные зависимости между боковым износом и параметрами колеи.

Таблица 2

Параметры опытных участков в кривых и корреляционные зависимости между ними и боковым износом рельсов

№ кривой	Радиус, м			Уровень, мм			Ширина колеи, мм			Непогашенное ускорение, м/с ²			Боковой износ, мм		
	$R_{\text{сп}}$	σ_R	$r_{R\delta}$	$Y_{\text{сп}}$	σ_Y	$r_{Y\delta}$	$S_{\text{сп}}$	σ_S	$r_{S\delta}$	$\alpha_{\text{н.сп}}$	σ_α	$r_{\alpha\delta}$	$h_{\text{сп}}$	σ_h	$r_{h\delta}$
1	337	67,52	0,607	99	10,68	0,246	1540	2,45	0,542	0,52	0,001	0,773	10,1	1,49	1
2	393	94,45	0,683	89	7,46	0,265	1535	3,27	0,735	0,44	0,001	0,736	9	1,18	1
3	627	92,44	0,655	79	8,19	0,235	1535	3,93	0,755	0,12	0,001	0,735	6,6	2,95	1
4	552	84,43	0,680	85	6,86	0,3	1535	6,3	0,435	0,16	0,001	0,752	7	4,5	1

Графические изображения одного из промеров величины бокового износа, ширины колеи, радиуса, уровня и непогашенного поперечного ускорения на длине опытного участка кривой № 1 приведены на рис. 1. Графики корреляционных зависимостей между указанными параметрами приведены на рис. 2 и 3.

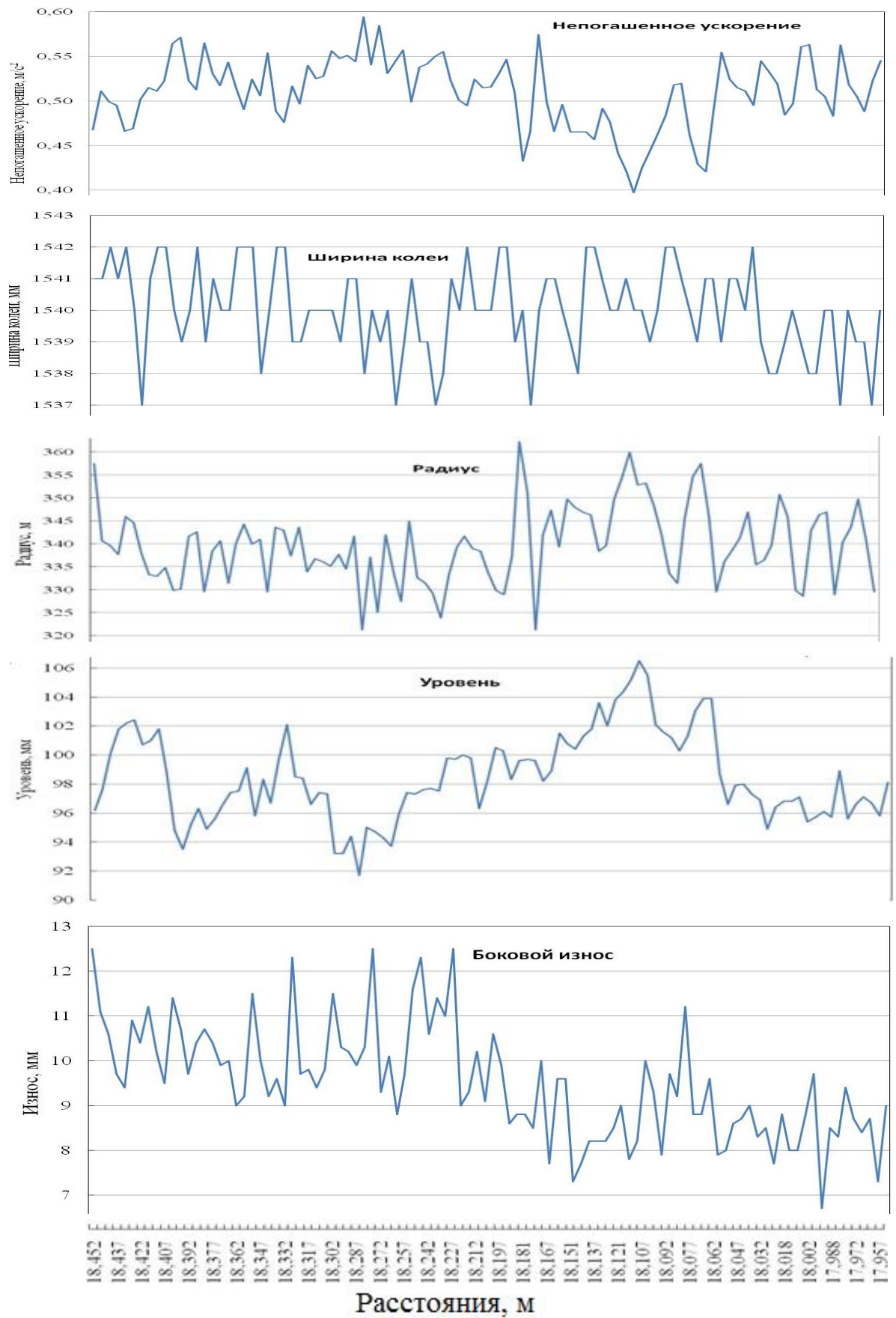


Рис. 1. Взаимосвязь между боковым износом и шириной колеи, радиусом кривой, уровнем и непогашенным ускорением в кривой № 1

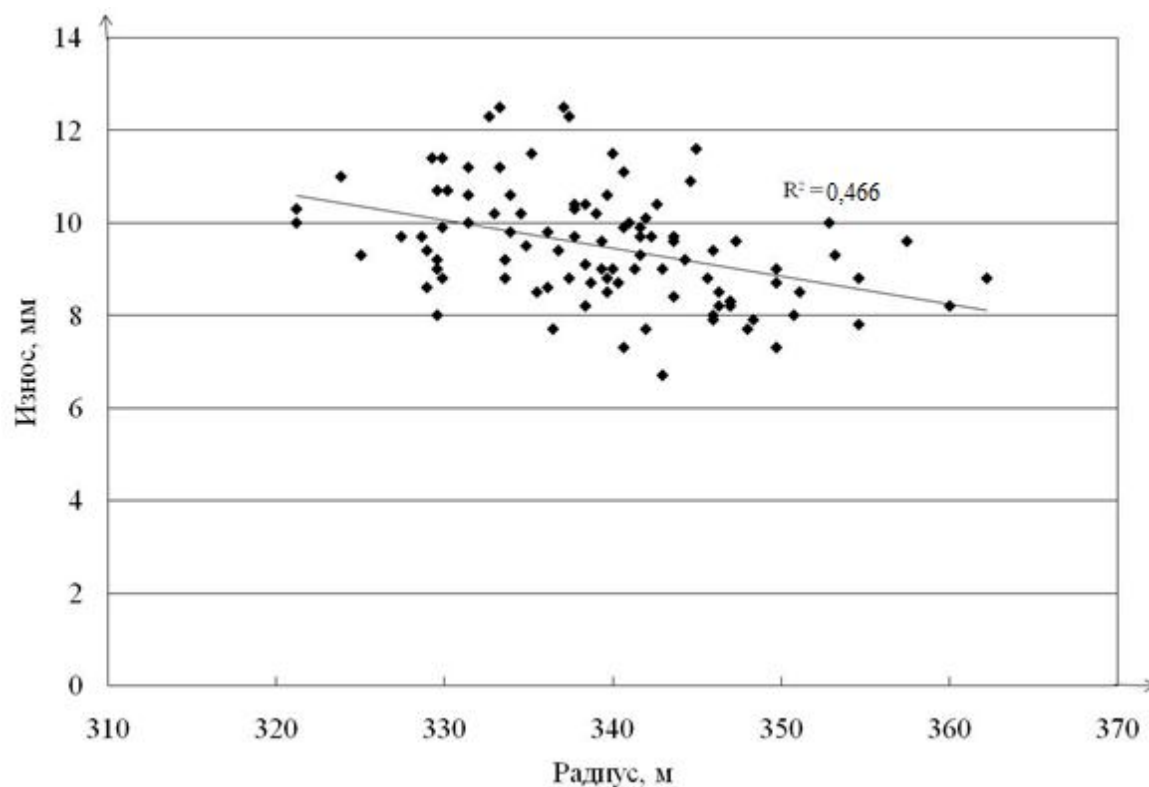


Рис. 2. График корреляционной зависимости между боковым износом и радиусом кривой

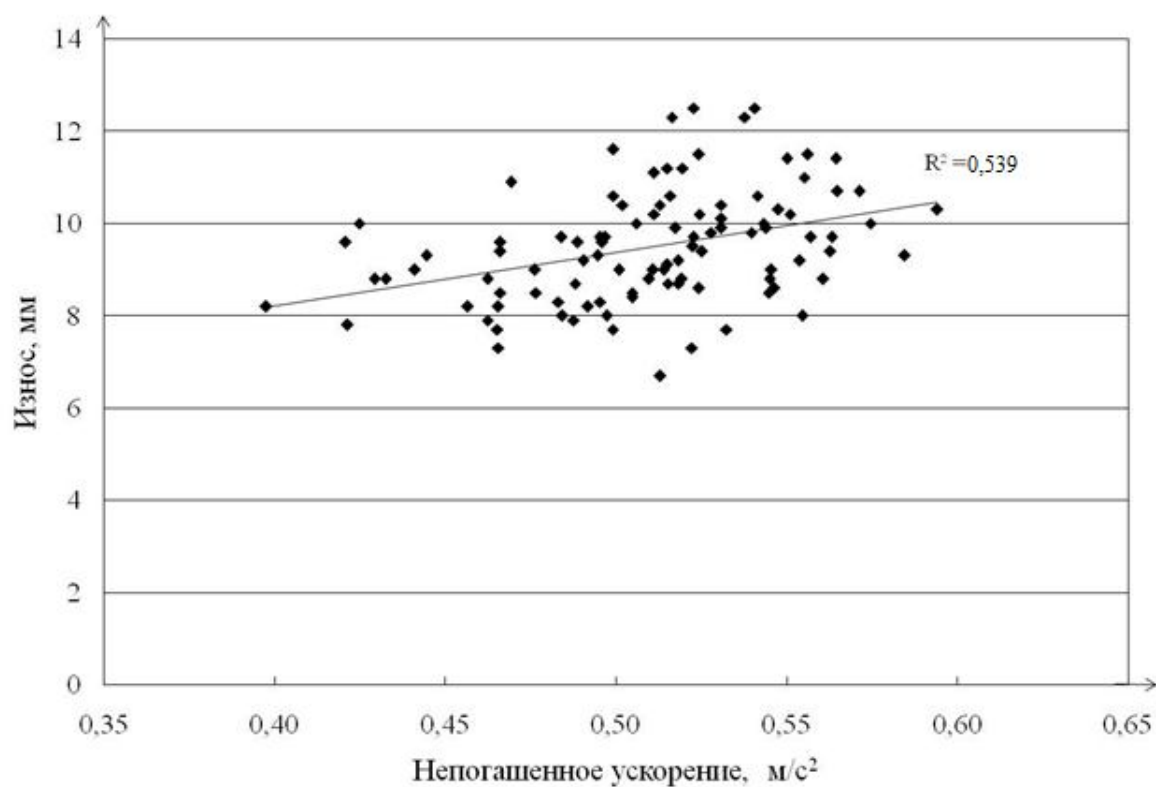


Рис. 3. График корреляционной зависимости между боковым износом и непогашенным ускорением

Анализ полученных данных показывает, что наиболее тесная корреляционная зависимость имеется между величинами бокового износа и переменными значениями радиуса в конкретных сечениях кривой. Достаточно тесная связь наблюдается также между боковым износом и непогашенным поперечным ускорением. Объясняется это тем, что радиус кривизны определяет величину поперечного скольжения колес при вписывании жесткой базы в кривую, а непогашенное ускорение — величину направляющего усилия в точке контакта гребня колеса и боковой грани рельса.

Корреляционная зависимость между боковым износом и шириной колеи недостаточно тесная, объясняется это тем, что при больших значениях ширины колеи (1540 мм и более) путейцы прибегают к ее корректировке, что приводит к ослаблению корреляционных связей.

Выполненный анализ статистических рядов измерений износа рельсов и ширины колеи в кривых участках выявил их явную зависимость от наработанного тоннажа T , радиуса кривых R и осевой нагрузки подвижного состава P .

Графическое представление полученных данных по износу рельсов и ширине колеи в конкретных условиях эксплуатации позволяет аппроксимировать статистические данные зависимостями вида [1].

$$Y = \alpha + \gamma T \prod K_i, \quad (5)$$

где α , γ — постоянные коэффициенты; K_i — коэффициенты, учитывающие условия эксплуатации, прежде всего радиус кривой и осевую нагрузку подвижного состава.

Параметр α — начальное значение ширины колеи и бокового износа рельсов.

Параметр γ (тангенс угла наклона прямой с осью T) определяется в стандартных условиях при $K_i = 1$ зависимостью

$$Y = \frac{Y_i - \alpha}{T_i}. \quad (6)$$

Влияние радиуса кривых и осевых нагрузок подвижного состава на изменение ширины колеи и износа рельсов учитывается коэффициентами K_R и K_P .

Для их определения можно применить степенную зависимость. В связи с тем, что стандартными условиями испытаний элементов верхнего строения пути в трудных условиях считаются кривые $R = 400$ м и осевые нагрузки $P = 150$ кН, для коэффициентов, учитывающих влияние радиуса кривой, принято выражение

$$K_R = \left(\frac{400}{R_{\text{ср}}} \right)^{\beta}, \quad (7)$$

а для учета влияния осевых нагрузок

$$K_P = \left(\frac{P_{\text{ср}}}{150} \right)^{\delta}. \quad (8)$$

В этом случае уравнение (4) будет иметь вид:

$$Y = \alpha + \gamma T K_R K_P \quad (9)$$

В результате обработки статистических данных для звеньев пути с деревянными шпалами и щебеночным балластом получены приближенные зависимости для определения величин бокового износа h_0 и ширины колеи S , мм, в функции наработанного тоннажа T , млн т бр, при учете радиуса кривой $R_{\text{ср}}$ и средней осевой нагрузки подвижного состава $P_{\text{ср}}$:

$$h_6 = 0,17T \left(\frac{400}{R_{cp}} \right)^{1,1} \left(\frac{P_{cp}}{150} \right)^{0,7}; \quad (10)$$

$$S = 1525 + 0,16T \left(\frac{400}{R_{cp}} \right)^{0,9} \left(\frac{P_{cp}}{150} \right)^{0,7}. \quad (11)$$

Формулы (10) и (11) представляют собой выражения для определения математического ожидания случайных величин бокового износа рельсов и ширины колеи в функции наработанного тоннажа T при учете радиуса кривизны пути и осевых нагрузок подвижного состава.

Согласно [2] дисперсия произведения условно независимых центрированных случайных величин равна произведению их дисперсий:

$$D_{hs} = D_{\gamma h} D_R D_P; \quad (12)$$

$$D_s = D_{\gamma s} D_R D_P. \quad (13)$$

Выполненный регрессионный анализ процессов нарастания износа рельсов и ширины рельсовой колеи на опытных участках с использованием ЭВМ позволил получить эмпирические параметры, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Эмпирические параметры для прогнозирования бокового износа рельсов и уширения колеи

Прогнозируемый процесс	Вид эмпирической зависимости	Эмпирические параметры			
		α	β	γ	δ
Боковой износ рельсов	$h_6 = \alpha + \gamma T \left(\frac{400}{R_{cp}} \right)^{\beta} \left(\frac{P_{cp}}{150} \right)^{\delta}$	0	1,1	0,17	0,7
Ширина рельсовой колеи	$S = \alpha + \gamma T \left(\frac{400}{R_{cp}} \right)^{\beta} \left(\frac{P_{cp}}{150} \right)^{\delta}$	1525	0,9	0,16	0,7

Расчет ресурса и вероятности безотказной работы рельсов

Рассмотрим общую схему формирования отказа изделия, когда протекание различных процессов повреждения приводит к изменению во времени выходного параметра Y . Отказ возникнет при достижении параметром своего предельно допустимого значения $Y_{\max}$, что произойдет через некоторый случайный промежуток времени работы изделия [3].

Процесс изменения параметра Y со скоростью γ_y также является случайным и зависит от изменения повреждений отдельных элементов изделия (их износа со скоростью $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k$).

В результате всех этих явлений происходит формирование закона распределения $f(Y, t)$, который определяет вероятность выхода параметра Y за границу $Y_{\max}$, т.е. вероятность отказа $F(t) = 1 - P(t)$. Следует отметить, что в общем случае значение $Y_{\max}$ также может иметь рассеивание, если оно оценивает диапазон требований потребителя к предельным значениям показателей изделия.

Рассмотрим более распространенный случай, когда изменение параметра изделия Y подчиняется линейному закону

$$Y = kt. \quad (14)$$

В данном случае $k = \gamma$ — это скорость протекания процесса (скорость изнашивания γ), которая зависит, как правило, от большого числа случайных факторов — нагрузки, скорости, температуры, условий эксплуатации и т.п. Поэтому наиболее характерен случай, когда она подчинена нормальному закону, т.е.

$$f(\gamma) = \frac{1}{\sigma_\gamma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\gamma - \gamma_{\text{cp}})^2}{2\sigma_\gamma^2}}, \quad (15)$$

где $f(\gamma)$ — плотность вероятности; γ_{cp} — среднее значение (математическое ожидание) скорости процесса повреждения или изменения выходного параметра; σ_γ — среднее квадратическое отклонение скорости процесса.

Предельно допустимое значение параметров Y_{max} установлено из условия правильности функционирования изделия. При $Y = Y_{\text{max}}$ наступает предельное состояние, которое и определяет срок службы (наработку) изделия до отказа $t = T$. Срок службы T является функцией случайного аргумента γ , т.е.

$$T = \varphi(\gamma) = \frac{Y_{\text{max}}}{\gamma}. \quad (16)$$

Средний срок службы изделия

$$T_{\text{cp}} = \frac{Y_{\text{max}}}{\gamma_{\text{cp}}}. \quad (17)$$

Задача заключается в отыскании плотности распределения $f(t)$ по заданной функции $f(\gamma)$. Для функций случайного аргумента в теории вероятностей применяется формула

$$f(t = T) = f[\psi(T)] |\psi'(T)|, \quad (18)$$

где $\psi(T)$ — обратная функция $\varphi(\gamma)$, т.е. $\psi(T) = Y_{\text{max}}/T$; $\psi'(T) = -Y_{\text{max}}/T^2$ — производная этой функции.

Подставляя эти значения (18) и делая преобразования, получим

$$f(T) = \frac{T_{\text{cp}}}{\gamma \sqrt{2\pi}} \frac{1}{T^2} e^{-\frac{(T_{\text{cp}} - T)^2}{2\gamma T^2}}. \quad (19)$$

Данный интеграл сводится к функции Лапласа и, учитывая, что вероятность безотказной работы $P(T) = 1 - F(T)$, получим

$$P(T) = 0,5 + \Phi\left(\frac{Y_{\text{max}} - \gamma_{\text{cp}} T}{\nu \gamma_{\text{cp}} T}\right), \quad (20)$$

где Φ — нормированная функция Лапласа, $0 \leq \Phi \leq 0,5$; при $T = 0$ $P(T) = 1$, при $T = \infty$

$P(T) \rightarrow 0$; $\nu = \frac{\sigma_\gamma}{\gamma_{\text{cp}}}$ — коэффициент вариации (безразмерная величина).

При расчетах вероятности безотказной работы $P(T)$ по формуле (20) задача решается, как правило, в двух вариантах.

1. При заданном ресурсе $T = T_p$ подсчитывается вероятность безотказной работы $P(T)$, которая и служит характеристикой надежности изделия. В этом случае все параметры, определяющие аргумент функции Лапласа, известны, и с использованием таблицы этой функции подсчитывается $P(T)$.

2. Для изделий с высокими требованиями к надежности обычно задается $P(T)$ и необходимо подсчитать ресурс T_p , обеспечивающий данный уровень безотказности. В этом случае в формуле (20) искомым является значение T , которое входит в аргумент функции Лапласа. Аргумент функции Лапласа будет являться квантилем X_p нормального распределения, т.е. тем его значением, которое соответствует данной вероятности $P(T)$. Для квантилей нормального распределения имеются таблицы.

Из формулы (20), приравняв к X_p значение аргумента функции Φ , получим

$$X_p = \frac{Y_{\max} - \gamma_{\text{cp}} T}{v \gamma_{\text{cp}} T}. \quad (21)$$

Порядок расчета заключается в том, что для заданного значения $P(T)$ по таблицам для квантилей нормального распределения находим соответствующее значение X_p и из уравнения (21) находим ресурс $T = T_p$.

Для частного случая при $P(T) = 0,5$ квантиль $X_p = 0$, из (21) получим

$$T_p = \frac{Y_{\max}}{\gamma_{\text{cp}}(1 + X_p \gamma)}, \quad T_{\text{cp}} = \frac{X_{\max}}{\gamma_{\text{cp}}}. \quad (22)$$

При расчетах по формулам (21) и (22) следует иметь в виду, что если имеется недостаточная информация о статистических значениях входящих величин (например, в результате испытаний на износ при малой статистической выборке), необходимо определить доверительные интервалы этих параметров и соответственно увеличить возможный диапазон изменения их значений.

Приведенная методика расчета позволяет на основании исходной информации о состоянии изделия, о возможных условиях его эксплуатации и при оценке интенсивности процессов потери работоспособности (износа) рассчитать ресурс изделия при требуемой вероятности безотказной работы и указать мероприятия, которые окажут наибольший эффект на повышение надежности, и количественно оценить удельный вес каждого фактора.

Пример расчета.

Для определения ресурса рельсов по предельному износу примем $h_{\text{бmax}} = 15$ мм; $P(T) = 0,95$.

Из данных табл. 3 получим математическое ожидание интенсивности бокового износа рельсов в кривых радиусом 400 м $\gamma_{\text{cp}} = 0,17$ мм/(млн т бр) среднее квадратическое отклонение $\sigma_{\gamma} = 0,076$ мм/(млн т бр) и коэффициент вариации $v = 0,35$. Квантиль нормального распределения $X_p = 1,282$.

Подставив эти значения в формулу (22), получим

$$T_p = \frac{15}{0,17(1 + 1,282 \cdot 0,35)} = 61 \text{ млн т бр},$$

Такое расхождение в величинах и объясняется большим разбросом данных по интенсивности износа даже на протяжении одной кривой.

$$T_{\text{cp}} = \frac{15}{0,17} = 88 \text{ млн т бр}.$$

Выводы

Регрессионный анализ процессов нарастания бокового износа рельсов и уширения колеи показал, что существует достаточно тесная корреляционная связь между боковым износом, радиусом и непогашенным поперечным ускорением по длине кривой.

Корреляционные зависимости между боковым износом и шириной колеи по длине кривой менее стабильны из-за периодических регулировок ширины колеи.

В результате обработки статистических данных получены приближенные зависимости величин бокового износа и ширины рельсовой колеи в функции наработанного тоннажа при учете радиуса кривой и средней осевой нагрузки подвижного состава.

Расчет ресурса и вероятности безотказной работы рельсов по разработанной модели формирования отказа из-за предельного бокового износа с использованием статистических параметров интенсивности износа в различных эксплуатационных условиях позволил с достаточной точностью прогнозировать срок службы рельсов в кривых.

Библиографический список

1. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. М.: Энергоатомиздат, 1986. 480 с.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М., 1969. 576 с.
3. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.

N.I. Karpuschenko, D.V. Velichko, E.S. Antereikin. The Regression Analysis of Rail Wear Increasing Processes and Their Survival Probability in the Curve Track Sections.

The article presents the analysis of different maintenance factors which affect magnitude of rail wear in the curve track sections. Findings on dependence of lateral wear and rail gauge on tonnage considering curve radius and average axleload of a rolling stock make it possible to predict the service life of rails in the curves.

Key words: *railway track, rail, lateral wear, rail gauge, curve track section.*