



УДК 625.172

**А. В. Андреев, В. П. Бельтюков, А. В. Сенникова,  
И. А. Симонюк, А. А. Третьяков**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ**

Предложены принципы выбора участков железнодорожного пути, подлежащих ремонту, на основании прогнозируемых значений показателей состояния пути. Произведены практические расчеты интенсивности нарастания дефектности элементов конструкции пути и неисправностей геометрических параметров рельсовой колеи. В методике прогнозирования рассмотрены последовательность отбора данных, их обработки для формирования статистики, алгоритм расчета показателей местной интенсивности нарастания неисправностей рельсовой колеи и дефектности элементов конструкции. Обоснован механизм учета интенсивности развития остаточных деформаций при прогнозировании на конкретных участках.

железнодорожный путь, прогнозирование, интенсивность нарастания остаточных деформаций, дефектность элементов верхнего строения пути, неисправности геометрии рельсовой колеи, безопасность эксплуатации, ресурсный элемент пути.

#### **Введение**

В нынешней системе содержания железнодорожного пути для принятия решения о необходимости назначения ремонта требуется достижение предельного состояния пути. Предельное состояние пути наступает при выработке срока службы ресурсными элементами пути.

Ресурсный элемент пути – элемент пути, окончание сроков службы которого вызывает необходимость ремонта определенного вида. Выделение различных ресурсных элементов (рельсы, шпалы, скрепления, балласт) позволяет разделять ремонты по назначению и устраняемым неисправностям.

По техническому состоянию отдельных ресурсных элементов выбирают участки, подлежащие ремонту определенного вида. В конце срока их службы в объектах пути резко возрастает интенсивность отказов ресурсных элементов. При этом сохранение объема затрат на техническое обслуживание повышает вероятность нарушения критериев безопасности и делает дальнейшую эксплуатацию экономически нецелесообразной. Предельное состояние пути определяется износом, усталостью и старением отдельных элементов конструкции и железнодорожного пути в целом.

Поскольку железнодорожный путь является многоэлементной восстанавливаемой

системой и его отказы связаны с комплексным сочетанием неблагоприятных факторов, для предупреждения предельного состояния всей конструкции железнодорожного пути важно учитывать влияние каждого элемента на предотказы и отказы пути.

Таким образом, комплексная задача путевого хозяйства в настоящее время состоит в обеспечении непревышения:

- допустимой вероятности отказа (интенсивности отказа);
- допустимых расходов на обслуживание пути.

Но для этого необходимо владеть информацией, отражающей процессы износа, усталости и старения верхнего строения пути с точки зрения:

- текущего состояния в заданные моменты времени в прошлом;
- развития в процессе эксплуатации в будущем.

Будущие значения показателей по заданным факторам на основании модели можно получить посредством их прогнозирования. Это подтверждает актуальность и необходимость обеспечения путевой инфраструктуры эффективными алгоритмами оценки и прогнозирования изменения технического состояния пути.

Методика прогнозирования изменения технического состояния участков пути, эксплуатируемая в настоящее время на сети железных дорог ОАО «РЖД», описывает теоретические основы этого процесса, однако недостаточно полно раскрывает их практическую реализацию [1].

## **1 Среднесрочное прогнозирование остаточных деформаций**

Работа над прогнозированием как областью исследований проводится сравнительно давно и прослеживается в работах В. Б. Тихомирова, Е. С. Ашпиза, З. Л. Крейниса, А. А. Сеньковского и других.

Из числа последних исследований по выявлению нестабильных участков пути и прогнозированию их состояния особо стоит отметить труд А. В. Дворникова, который затрагивает преимущественно определение показателей стабильности геометрических показателей рельсовой колеи, их прогнозирование и использование при оценке потребности в проведении путевых работ [2]. В то же время работоспособность железнодорожного пути определяется не только отступлениями рельсовой колеи, но и уровнем дефектности его элементов.

Нормативные документы по комплексной оценке состояния пути регламентируют ее проведение после весеннего и осеннего генеральных осмотров пути и предназначены преимущественно для оптимизации распределения фондов затрат на текущее содержание и ремонты пути [3]. Но крайне важно учитывать также перспективное планирование затрат и объемов путевых работ.

В исследованиях кафедры «Железнодорожный путь» рассмотрена возможность количественной оценки текущего технического состояния железнодорожного пути [4]. Источником данных для прогнозирования интенсивности нарастания остаточных деформаций (ИНОД) является автоматизированная система управления путевым хозяйством (АСУ-П), в перспективе – единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой. Однако положения данной методики, как отмечалось ранее, недостаточно полно раскрывают их практическую реализацию [1].

Подробнее методика практического прогнозирования ИНОД рассматривается в работе, выполненной на кафедре «Железнодорожный путь» [5], где преимущественное внимание уделяется учету среднесетевых зависимостей развития процессов ИНОД в конструкции верхнего строения пути при увеличении наработки тоннажа. Совершенствование методики требует более подробного рассмотрения развития ИНОД и прогнозирования их изменения на отдельных участках

железнодорожного пути на основе статистики о дефектности элементов конструкции и отступлениях рельсовой колеи.

Зарубежный опыт оценки и прогнозирования состояния пути сосредоточен на комплексной оценке состояния пути по критериям безопасной эксплуатации с установленными скоростями. При неблагоприятных показателях безопасности управляющие решения направлены на уменьшение эксплуатационных скоростей либо на определение потребных объемов ремонта, которые потенциально снижают значения ИНОД.

Таким образом, задача практического прогнозирования изменения технического состояния пути для качественного планирования ремонтов остается незавершенной, несмотря на важность и актуальность.

## 2 Методические цели и задачи исследования

На предшествующих этапах разработки методики прогнозирования технического состояния участков пути были определены ключевые показатели технического состояния верхнего строения пути, количественная оценка которых определяет потребность ремонтов железнодорожного пути [1]. Был установлен среднесетевой алгоритм их оценки и прогнозирования. При этом использовалась статистика по всей сети железных дорог.

При оценке и прогнозировании параметров технического состояния отдельного участка пути ключевая задача состоит в получении максимально достоверных и актуальных данных при недостатке статистики и вариативности эксплуатационных условий.

Требуется решение подзадач, направленных на разработку алгоритмов:

- фактической оценки технического состояния отдельного участка пути (подробнее п. 2.1);
- прогнозирования интенсивности нарастания дефектности элементов конструкции и отступлений рельсовой колеи на участке

пути с учетом их предшествующего изменения (подробнее п. 2.2);

- совершенствования системы планирования ремонтов пути и путевых работ (подробнее п. 2.3).

В основе методики исследования лежит статистическая обработка массивов данных о состоянии элементов конструкции железнодорожного пути и их аппроксимация с заданным шагом.

### 2.1 Фактическая оценка технического состояния участка пути

При решении подзадачи необходимо было построить эффективный аналитический алгоритм, позволяющий получить достаточно достоверные данные об интенсивности нарастания дефектности и неисправностей железнодорожного пути при недостатке статистики.

При определении среднесетевых зависимостей изменения технического состояния пути для однотипных конструкций и условий эксплуатации пути объем статистической выборки, как правило, превышает несколько сотен записей. При покิโลметровой оценке зависимостей изменения технического состояния пути объем статистики сокращается до одной записи на каждый год эксплуатации, при этом многократно увеличивается количество отдельных расчетных циклов ввиду множества участков. Укрупнение анализируемых участков позволяет повысить количество и качество статистики для прогнозирования, при этом сокращая объем расчетов.

Из множества аппроксимаций линейная позволяет оценить тенденцию развития дефектности или неисправности на километре (участке).

Уравнение линейной функции имеет вид:

$$y = m \cdot x + b, \quad (1)$$

где  $y$  – интенсивность нарастания дефектности и неисправностей, шт./км;  $x$  – пропущенный тоннаж (срок эксплуатации), млн т

брутто или лет;  $m$  – наклон прямой, местная скорость изменения интенсивности нарастания дефектности и неисправностей, шт. в год, в месяц или на млн т брутто;  $b$  – параметр линейной зависимости, точка пересечения прямой с осью ординат  $Y$ , шт.

Параметры  $m$  и  $b$  определяются регрессионным анализом.

В методику расчета вводится ограничение: состояние пути при нормальной эксплуатации не стабилизируется без внешнего воздействия, т. е. в расчете используются значения  $m$  больше нуля, предполагающие нарастание остаточных деформаций по мере эксплуатации.

## 2.2 Прогнозирование параметров технического состояния пути с учетом предшествующего изменения его состояния

В основу методики прогнозирования положен совместный учет соотношения, скорости изменения и весовых коэффициентов местных и среднесетевых интенсивностей на основании достоверности статистики и расчетов.

При этом решение подзадачи имеет вид:

$$\Omega_{\text{прогн}} = \Omega_{\text{ср.сет}} \cdot K + \gamma \cdot m \cdot T + (1 - \gamma) \cdot K \cdot \sum_{i=1}^n J_{\text{ср}i} \cdot \beta \cdot T, \quad (2)$$

где  $\Omega_{\text{прогн}}$  – местная прогнозируемая интенсивность нарастания дефектности и неис-

правностей, шт.· $i$ /км;  $\Omega_{\text{ср.сет}}$  – прогнозируемая интенсивность нарастания дефектности и неисправностей в среднем по сети, шт.· $i$ /км;  $K$  – поправочный коэффициент, связывающий местные и среднесетевые интенсивности нарастания дефектности и отступлений рельсовой колеи;  $T$  – прогнозируемый пропущенный тоннаж, млн т-км брутто;  $J_{\text{ср}i}$  – среднесетевая скорость изменения интенсивности, шт. в год, в месяц или на млн т брутто;  $m$  – местная интенсивность нарастания дефектности или неисправностей, шт. в год, в месяц или на млн т брутто;  $\gamma$  – коэффициент доверительной вероятности, определяющий долю местной интенсивности нарастания дефектности и неисправностей при их прогнозировании;  $\beta$  – табличный поправочный коэффициент к  $J_{\text{ср}i}$ , зависящий от конструкции пути и условий эксплуатации.

Таким образом, решение выделенной подзадачи приобретает комплексную структуру, дающую тем более достоверный и точный результат, чем надежнее исходные статистические данные.

## 2.3 Совершенствование системы планирования ремонтов пути и путевых работ

На момент планирования ремонтов пути и затрат будущего года используется статистика, собранная по состоянию на предыдущий год, в то время как планы составляются на будущий год (см. рисунок).



Текущее планирование затрат и объемов работ

Поскольку интенсивность нарастания дефектности элементов конструкции и отступлений рельсовой колеи в методике определяется как среднее за год, то к началу проведения ремонтов пути статистические данные отчетных баз данных устаревают на два года. То есть показатели состояния пути должны прогнозироваться на два года.

### 3 Прогнозирование

Для прогнозирования интенсивности нарастания дефектности элементов конструкции и отступлений геометрических показателей рельсовой колеи необходимо:

- выбрать для прогнозирования данные о конструкции железнодорожного пути, об эксплуатационных условиях и прогнозируемых

дефектных элементах или неисправностях по геометрическим показателям рельсовой колеи;

- укрупнить данные путем объединения участков с однотипными условиями эксплуатации, конструкцией пути;
- спрогнозировать интенсивность нарастания дефектности и неисправностей.

Практическое использование методики продемонстрировано на основе данных, выбранных для пути с различающимися эксплуатационными условиями (пропущенный тоннаж, последний вид ремонта). Источником является база данных автоматизированной системы управления путевым хозяйством АСУ-П.

В табл. 1 приведены параметры конструкции пути и эксплуатационных условий для выбранного участка, на основании которых

ТАБЛИЦА 1. Параметры конструкции пути и эксплуатационные условия

Номер укрупненного участка	Путь	Километр	Грузонапряженность	Тип рельса	Признак укладки	Длина рельсов	Пропущенный тоннаж	Подрельсовое основание	Тип скрепления	Балласт	Класс	Группа	Тип последнего ремонта	Год последнего ремонта
1	1	166	29,95	P65	Н	б. п.	318,87	ШЖБ	КБ	Ще-бенъ	1	В	КРн	1997
1	1	167	29,95	—  —	—  —	—  —	318,87	—  —	—  —	—  —	1	—  —	—  —	1997
2	1	169	29,95	—  —	—  —	—  —	296,77	—  —	—  —	—  —	1	—  —	ППВ	2008
2	1	171	29,95	—  —	—  —	—  —	296,77	—  —	—  —	—  —	1	—  —	—  —	2008
3	1	172	29,95	—  —	—  —	—  —	296,77	—  —	—  —	—  —	1	—  —	КРн	1998
4	1	179	29,95	—  —	—  —	—  —	796,47	ЖБП	—  —	—  —	1	—  —	Шли-фовка поверхности	2008
4	1	180	29,95	—  —	—  —	—  —	796,47	—  —	—  —	—  —	1	—  —	—  —	2008
4	1	181	29,95	—  —	—  —	—  —	796,47	—  —	—  —	—  —	1	—  —	—  —	2008
4	1	182	29,95	—  —	—  —	—  —	796,47	—  —	—  —	—  —	1	—  —	—  —	2008
4	1	183	29,95	—  —	—  —	—  —	796,47	—  —	—  —	—  —	1	—  —	—  —	2008

ТАБЛИЦА 2. Параметры конструкции пути и эксплуатационные условия

Номер укрупненного участка	Путь	Группа км	Пропущенный тоннаж	Грузонапряженность	$\Omega$ на текущий год, $n$	$\Omega_{\text{прогн}}$ на год $(n+1)$	$\Omega_{\text{прогн}}$ на год $(n+2)$
1	1	166–167	318,87	29,95	0,5	1,100	1,665
2	1	169–171	296,77	29,95	0,5	1,189	1,740
3	1	172	296,77	29,95	0	0,219	0,444
4	1	179–180–181–182–183	796,47	29,95	0,2	0,263	0,301

дифференцированы данные по отдельным участкам.

Для каждого километра по отчетной статистике АСУ-П вычислена интенсивность одиночного выхода рельсов на каждый километр (табл. 2). Километры с одинаковыми условиями эксплуатации и конструкцией пути разделены на укрупненные участки (столбец 1 табл. 2).

Интенсивность нарастания одиночного выхода рельсов  $\Omega$  по состоянию на отчетный год приведена в столбце 6 табл. 2. По формуле прогнозирования подробнее в пункте 2.2. Для двух последующих лет эксплуатации вычисленные значения интенсивности приведены в столбцах 7 и 8 табл. 2, соответственно.

## Заключение

Совершенствование механизмов прогнозирования технического состояния пути позволит качественно повысить точность управленческих решений, принимаемых по результатам диагностики и комплексной оценки состояния железнодорожной инфраструктуры.

Реализация положений методики в перспективе позволит:

- снизить вероятность развития отказов и предотказов железнодорожного пути за счет заблаговременного выявления потенциально опасных участков;

- повысить эффективность расходования средств на ремонты и текущее обслуживание железнодорожного пути;

- заложить теоретические основы для определения остаточного ресурса железнодорожного пути на основе прогнозирования показателей экономичности и безопасности его обслуживания.

## Библиографический список

1. **Технические условия** на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» № 75 р. от 18 января 2013 г.
2. **Выявление нестабильных участков пути и прогнозирование их состояния** : дис. ... канд. техн. наук (05.22.06) / А. В. Дворников. – Москва, 2008. – 146 с.
3. **Руководство** по комплексной оценке состояния участка пути (километра) на основе данных средств диагностики и генеральных осмотров пути: распоряжение ОАО «РЖД» № 2536 р от 14 декабря 2009 г.
4. **Оптимизация среднесрочных перспективных планов ремонтов железнодорожного пути** / В. П. Бельтюков // Транспорт РФ. – 2011. – № 3 (34). – С. 71–74.
5. **Прогнозирование интенсивности накопления остаточных деформаций верхнего строения железнодорожного пути для среднесрочного планирования путевых работ** : дис. ... канд. техн. наук (05.22.06) / И. А. Симонюк. – Санкт-Петербург, 2014. – 147 с.