Вестник ВНИИЖТ. 2021. Т. 80. № 5. С. 251 – 259

CC BY 4.0

УДК 625.172

DOI: https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259

Перспективные подходы к прогнозному моделированию деградационных процессов элементов верхнего строения пути и их применение при создании цифровых двойников

О. А. СУСЛОВ, В. И. ФЕДОРОВА

Научный информационно-аналитический центр акционерного общества «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (НИАЦ АО «ВНИИЖТ»), Санкт-Петербург, 196128, Россия

Аннотация. Использование объема информации, поступающей с различных систем, предназначенных для управления перевозочным процессом и планирования его работы, с учетом современных экономических требований и ресурсных ограничений невозможно без применения цифровых технологий. Цифровые двойники в настоящее время являются наиболее перспективным инструментом для решения задач управления технически насыщенными многоуровневыми активами, к которым относится железнодорожный транспорт. Путевое хозяйство — один из наиболее дорогих активов, и вопросы организации управления техническим обслуживанием железнодорожного пути стоят очень остро, поскольку напрямую связаны с безопасностью движения поездов, поэтому разработка цифрового двойника железнодорожного пути является приоритетной задачей для путейской науки. Цифровой двойник железнодорожного пути должен содержать в себе элементы технологии BigData в виде массивов диагностических данных, поступающих в режиме онлайн с мобильных и стационарных средств диагностики, массив паспортных данных об устройстве пути, а также набор моделей, способных эти данные преобразовать в матрицы «состояние—действие», пригодные для принятия организационно-технических решений по управлению путевым комплексом, начиная от уровня линейных предприятий и заканчивая сетевыми задачами. В статье представлены модели, которые могут быть приняты в качестве фундамента для построения цифровых двойников железнодорожного пути. Также приведены результаты верификации и апробации предложенных моделей в программном комплексе «Нейроэксперт-Путь».

Ключевые слова: цифровой двойник; железнодорожный путь; верхнее строение пути; прогнозирование деградации железнодорожного пути

Введение. Освоение потребных объемов перевозок в установленные сроки с заданным уровнем безопасности, надежности и экономической эффективности — это основная задача железнодорожной инфраструктуры. Возможные варианты освоения перевозок могут включать в себя комплекс мероприятий по повышению массы и/или длины поезда, осевой нагрузки, пропускной способности станционных горловин и прочие мероприятия, приводящие к увеличению маршрутной скорости грузовых поездов. Для выбора оптимальной схемы овладения заданными объемами перевозок необходимо проведение комплексного технико-экономического анализа, включающего в себя увязку способа повышения провозной и пропускной способности с изменением режимов работы и нагруженности элементов пути, тягового и грузового подвижного состава, контактной сети, схем и графиков организации движения поездов [1]. Реализация данного подхода с требуемым качеством, сроками и комплексностью решений невозможна без применения современных цифровых технологий моделирования анализа и прогнозирования работы всех элементов железнодорожной инфраструктуры.

Понятие «цифровой двойник» и его состав для железнодорожной инфраструктуры. Современные тенденции развития цифровых технологий, связанных с управлением активами (asset management), к которым относится в том числе и железнодорожная инфраструктура, последние 10 лет сосредоточены на применении подхода цифровых двойников, когда создается виртуальный объект, обладающий свойствами, аналогичными его реальному прототипу [2, 3]. В [4] предложено следующее понятие цифрового двойника: цифровой двойник — это виртуальное адаптивно изменяющееся отображение физического объекта/процесса, которое учитывает функциональные особенности и физические связи всех его составных частей, сопровождает его на всем жизненном цикле (от этапа проектирования до этапа утилизации), позволяет изучать текущее состояние физического объекта/процесса и прогнозировать его изменения в будущем на микро- и макроуровнях с помощью мультифизического, многомасштабного, вероятностного моделирования и на основе собранных в режиме реального времени данных с установленных систем мониторинга, а также за счет обратной связи с физическим объектом/процессом выдавать управляющие воздействия. Это определение наиболее точно описывает все задачи, которые

E-mail: Suslov.Oleg@vniizht.ru (О. А. Суслов)

© АО «ВНИИЖТ», 2021

Алгоритм построения цифрового двойника [4, с. 96]
Algorithm for constructing a digital twin [4, p. 96]

должен решать цифровой двойник железнодорожной инфраструктуры, и свойства, которыми он должен обладать:

1) наличие в составе цифрового двойника математической модели объектов железнодорожной инфраструктуры, позволяющей моделировать его фактическое состояние и прогнозировать его изменение во времени;

2) отображение работы объектов железнодорожной инфраструктуры на всех этапах жизненного цикла;

3) необходимость сбора в режиме реального времени диагностических данных о состоянии и воздействии на объекты железнодорожной инфраструктуры (применение технологии BigData);

4) наличие обратной управляющей связи «цифровой двойник — реальный объект».

В общем виде цифровой двойник железнодорожной инфраструктуры может быть декомпозирован на следующие цифровые двойники объектов и процессов:

- железнодорожного пути;
- инфраструктуры вагонного подвижного состава;
- локомотивной инфраструктуры;
- инфраструктуры контактной сети и тягового энергоснабжения;
- систем и процессов организации и управления движением поездов.

Столь широкий спектр объектов цифровизации требует расстановки приоритетов по выбору первичных задач, и с позиции затратности и потенциальной максимальной эффективности можно отметить блок путевого хозяйства как наиболее ресурсоемкий и поэтому первичный с точки зрения создания его цифрового двойника — цифрового двойника железнодорожного пути (далее — ЦДП). В общем виде алгоритм создания цифрового двойника приведен в [4, с. 96] (см. рисунок).

Разработка семейства моделей для прогнозирования изменения состояния элементов верхнего строения пути и геометрии рельсовой колеи. Ядром ЦДП должно являться семейство цифровых моделей следующего типа:

- модели расчета параметров взаимодействия в системе «колесо—рельс»;
- модели расчета напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути;
- деградационные модели расчета изменения состояния элементов верхнего строения пути и геометрии рельсовой колеи.

В качестве примера решения задачи разработки семейства моделей, формирующих ядро ЦДП, выбрана деградационная модель расчета изменения состояния элементов пути и геометрии рельсовой колеи. Основным соотношением, положенным в деградационную модель, свойства которой значимо не меняются в процессе анализируемого времени эксплуатации, является следующее выражение [5]:

© АО «ВНИИЖТ», 2021

$$D_i^t = \sum_t d_i n_i, \quad (1)$$

где D_i^t — ресурс i-го элемента или узла верхнего строения пути по какому-либо отказу или неисправности, исчерпанный за период эксплуатации t; d_i — мера исчерпания ресурса i-го элемента или узла верхнего строения пути в одном цикле нагружения (нагруженность элемента или узла); n_i — число циклов нагружения, воспринимаемое i-м элементом или узлом верхнего строения пути в процессе эксплуатации.

В свою очередь, для определения прогнозного срока службы элемента или узла может быть использовано следующее выражение:

$$[n_i] = \frac{[D_i]}{d_i}, \quad (2)$$

где $[n_i]$ — нормативное (прогнозное) число циклов нагружения, допускаемое для восприятия i-м элементом или узлом до его перехода в нерабочее или предотказное состояние; $[D_i]$ — нормативное (прогнозное) значение ресурса i-го элемента или узла по какому-либо отказу.

Переход от числа циклов нагружения к показателям времени службы или пропущенного тоннажа осуществляется в зависимости от вида элемента или узла с учетом того, что является для данного элемента (узла) циклом нагружения — проход одиночной оси поезда или тележки подвижного состава.

Остаточный ресурс i-го элемента или узла верхнего строения пути определяется, в свою очередь, следующим выражением:

$$\Delta D_i = [D_i] - D_i^t. \quad (3)$$

Таким образом, для решения задачи определения срока службы i-го элемента или узла верхнего строения пути по какому-либо отказу или неисправности необходимо разработать алгоритм для получения показателей d_i и $[D_i]$. Основные узлы и элементы, принятые для прогнозирования, — рельсы, узлы скреплений, шпалы, балластный слой, основная площадка земляного полотна. Основные целевые прогнозы определяются для неисправностей и отказов, связанных с исчерпанием ресурса в процессе эксплуатации, т. е. зависящих от циклического воздействия подвижного состава на рассматриваемые элементы и узлы.

Нагруженность элемента или узла по какому-либо отказу или неисправности определяется значением d_i. Основной фактор, определяющий значение нагруженности, — это нагрузка от подвижного состава, передаваемая на рельс и далее на все остальные элементы и узлы верхнего строения пути, а значение d_i является функцией от нагрузки.

Целевой прогноз необходимо осуществлять для следующих отказов и неисправностей:

- выход рельсов по дефектам контактно-усталостного схождения;
- выход из строя узлов скреплений;
- выход шпал из строя;
- накопление неисправностей по перекосам, просадкам, уровню;
- накопление неисправностей по ширине колеи;
- накопление неисправностей по рихтовке;
- накопление неисправностей в балластном слое и основной площадке земляного полотна.

В современной практике теории надежности, например, для изделий из металлов и иных изделий, обладающих свойствами сплошного тела, основным показателем повреждаемости является значение σ^2, где σ – это напряжение в цикле. В свою очередь, напряжения являются функцией от сочетания сил, передаваемых на объект, и его размеров, поэтому в общем случае выражение для определения значения величины нагруженности элемента или узла верхнего строения пути можно представить в виде

$$d_i = \left[f(F, \sigma)^2 \right]^{\frac{\lambda}{2}}, \quad (4)$$

где F, σ — вектор сил или напряжений, действующих на элемент или узел в одном цикле нагружения; λ — степенной коэффициент, учитывающий условия работы и физические характеристики элемента.

С учетом имеющихся результатов исследований [5–9] можно представить следующие показатели повреждаемости для элементов верхнего строения пути и накопления неисправностей:

– повреждаемость для элементов верхнего строения пути:

- рельсов

$$d_{\text{рс}} = \left\{ \left(\frac{\bar{\sigma}_{\text{к.н}} + \bar{\sigma}_{\text{к.в}}}{2} \right)^2 + \left[\frac{\left(\hat{\sigma}_{\text{к.н}}\right)^2 + \left(\hat{\sigma}_{\text{к.в}}\right)^2}{4} \right] \right\}^{\frac{x_{\sigma+}}{2}} + \left\{ \left(\frac{\bar{\sigma}_{\text{к.н}} - \bar{\sigma}_{\text{к.в}}}{2} \right)^2 + \left[\frac{\left(\hat{\sigma}_{\text{к.н}}\right)^2 - \left(\hat{\sigma}_{\text{к.в}}\right)^2}{4} \right] \right\}^{\frac{x_{\sigma-}}{2}}; \quad (5)$$

- скреплений

$$d_{\text{скр}} = \left[\left(\bar{P}_{\text{шп}}\right)^2 + \left(\hat{P}_{\text{шп}}\right)^2 \right]^{\frac{x_{P(\text{скр})}}{2}} + \left[\left(\bar{H}_{\text{шп}}\right)^2 + \left(\hat{H}_{\text{шп}}\right)^2 \right]^{\frac{x_{H(\text{скр})}}{2}}; \quad (6)$$

© АО «ВНИИЖТ», 2021

• шпал

$$d_{\text{шп}} = \left[\left(\bar{P}_{\text{шп}}\right)^2 + \left(\hat{P}_{\text{шп}}\right)^2\right]^{\frac{x_{\text{шп}}}{2}}; \quad (7)$$

– накопление неисправностей:

• по ширине колеи

$$d_{\text{ш.к}} = \left[\left(\bar{P}_{\text{шп}}\right)^2 + \left(\hat{P}_{\text{шп}}\right)^2\right]^{\frac{x_{P(\text{ш.к})}}{2}} + \left[\left(\bar{H}_{\text{шп}}\right)^2 + \left(\hat{H}_{\text{шп}}\right)^2\right]^{\frac{x_{H(\text{ш.к})}}{2}}; \quad (8)$$

• по перекосам, просадкам, уровню

$$d_{\text{п, пр, ур}} = \left[\left(\bar{\sigma}_{\text{балл}}\right)^2 + \left(\hat{\sigma}_{\text{балл}}\right)^2\right]^{\frac{x_{\text{балл}}}{2}}; \quad (9)$$

• по рихтовке

$$d_{\text{рихт}} = \frac{\left[\left(\bar{H}_{\text{шп}}\right)^2 + \left(\hat{H}_{\text{шп}}\right)^2\right]^{\frac{x_{P(\text{рихт})}}{2}}}{\left[\left(\bar{P}_{\text{шп}}\right)^2 + \left(\hat{P}_{\text{шп}}\right)^2\right]^{\frac{x_{H(\text{рихт})}}{2}}}; \quad (10)$$

• в основной площадке земляного полотна

$$d_{\text{опзп}} = \left[\left(\bar{\sigma}_{\text{опзп}}\right)^2 + \left(\hat{\sigma}_{\text{опзп}}\right)^2\right]^{\exp\left(\frac{\sigma_{\text{опзп}}^{\text{мах.вер}}}{\left[\sigma_{\text{опзп}}\right]}\right)}; \quad (11)$$

• в балластном слое (накопление загрязненности балласта)

$$d_{\text{загр}} = \left[\left(\bar{\sigma}_{\text{балл}}\right)^2 + \left(\hat{\sigma}_{\text{балл}}\right)^2\right]^{\exp\left(\frac{\sigma_{\text{балл}}^{\text{мах.вер}}}{\left[\sigma_{\text{балл}}\right]}\right)} + \left[\left(\bar{\sigma}_{\text{опзп}}\right)^2 + \left(\hat{\sigma}_{\text{опзп}}\right)^2\right]^{\exp\left(\frac{\sigma_{\text{опзп}}^{\text{мах.вер}}}{\left[\sigma_{\text{опзп}}\right]}\right)}, \quad (12)$$

где $\bar{\sigma}_{\text{к.н}}$ — среднее значение кромочных напряжений (наружная кромка подошвы рельса), МПа; $\bar{\sigma}_{\text{к.в}}$ — среднее значение кромочных напряжений (внутренняя кромка подошвы рельса), МПа; $\hat{\sigma}_{\text{к.н}}$ — среднеквадратическое отклонение значений кромочных напряжений (наружная кромка подошвы рельса); $\hat{\sigma}_{\text{к.в}}$ — среднеквадратическое отклонение значений кромочных напряжений (внутренняя кромка подошвы рельса); $\bar{P}_{\text{шп}}$ — среднее значение вертикальной силы, действующей на шпалу, кН; $\hat{P}_{\text{шп}}$ — среднеквадратическое отклонение значений вертикальных сил, действующих на шпалу; $\bar{H}_{\text{шп}}$ — среднее значение горизонтальной силы, действующей на шпалу, кН; $\hat{H}_{\text{шп}}$ — среднеквадратическое отклонение значений горизонтальных сил, действующих на шпалу; $\bar{\sigma}_{\text{балл}}$ — среднее значение напряжений в балласте под шпалой, МПа; $\hat{\sigma}_{\text{балл}}$ — среднеквадратическое отклонение значений напряжений в балластном слое под шпалой; $\bar{\sigma}_{\text{опзп}}$ — среднее значение напряжений на основной площадке земляного полотна, МПа; $\hat{\sigma}_{\text{опзп}}$ — среднеквадратическое отклонение значений напряжений на основной площадке земляного полотна; $x_{\sigma+}, x_{\sigma-}$ — соответственно степенные коэффициенты, учитывающие влияние изгиба (полусумма кромочных напряжений) и кручения (полуразность кромочных напряжений) на значение повреждаемости рельсов; $x_{P(\text{скр})}, x_{H(\text{скр})}$ — соответственно степенные коэффициенты, учитывающие влияние вертикальной и горизонтальных сил, действующих от рельса на шпалу, на значение повреждаемости скреплений; $x_{\text{шп}}$ — степенной коэффициент, учитывающий влияние вертикальной силы, действующей от рельса на шпалу, на значение повреждаемости шпал; $x_{P(\text{ш.к})}, x_{H(\text{ш.к})}$ — соответственно степенные коэффициенты, учитывающие влияние вертикальной и горизонтальных сил, действующих от рельса на шпалу, на значение повреждаемости для ширины колеи; $x_{\text{балл}}$ — степенной коэффициент, учитывающий влияние напряжений в балласте под шпалой, на значение повреждаемости балласта (перекос, просадки, уровень); $x_{P(\text{рихт})}, x_{H(\text{рихт})}$ — соответственно степенные коэффициенты, учитывающие влияние вертикальной и горизонтальных сил, действующих от рельса на шпалу, на значение повреждаемости для накопления неисправностей в плане (рихтовка); $\sigma_{\text{опзп}}^{\text{мах.вер}}$ — максимально вероятное значение напряжений на основной площадке земляного полотна, МПа; $\sigma_{\text{балл}}^{\text{мах.вер}}$ — максимально вероятное значение напряжений сжатия в балласте под шпалой в подрельсовой зоне, МПа; $\left[\sigma_{\text{опзп}}\right]$ — допускаемые напряжения на основной площадке земляного полотна; $\left[\sigma_{\text{балл}}\right]$ — допускаемые напряжения сжатия в балласте под шпалой в подрельсовой зоне.

$$\bar{P}_{\text{шп}} = \frac{\bar{P}_{\text{в}} \text{К}_{\text{в}} l_{\text{шп}}}{2}; \quad (13)$$

$$\hat{P}_{\text{шп}} = \frac{\bar{P}_{\text{в}} \text{К}_{\text{в}} l_{\text{шп}}}{2}; \quad (14)$$

$$\bar{H}_{\text{шп}} = \frac{\bar{Y}_{\text{б}} \text{К}_{\text{г}} l_{\text{шп}}}{2}; \quad (15)$$

$$\hat{H}_{\text{шп}} = \frac{\hat{Y}_{\text{б}} \text{К}_{\text{г}} l_{\text{шп}}}{2}; \quad (16)$$

$$\bar{\sigma}_{\text{балл}} = \frac{\bar{P}_{\text{шп}}}{S_{\text{шп}}}; \quad (17)$$

$$\hat{\sigma}_{\text{балл}} = \frac{\hat{P}_{\text{шп}}}{S_{\text{шп}}}, \quad (18)$$

где $\bar{P}_{\text{в}}$ — среднее значение вертикальной силы, передаваемой от колеса на рельс, кН; $\hat{P}_{\text{в}}$ — среднеквадра-

© АО «ВНИИЖТ», 2021

тическое отклонение значений вертикальной силы, передаваемой от колеса на рельс; $\overline{Y}_б$ — среднее значение боковой силы, передаваемой от колеса на рельс, кН; $\hat{Y}_б$ — среднеквадратическое отклонение значений боковой силы, передаваемой от колеса на рельс; $к_в$ — относительная жесткость пути в вертикальном направлении, м$^{-1}$; $к_г$ — относительная жесткость пути в горизонтальном направлении, м$^{-1}$; $l_{шп}$ — расстояние между осями шпал, см; $S_{шп}$ — площадь опирания полушпалы на балластный слой, см^2.

Значения $[D_i]$ могут быть определены на основе математического моделирования, результатов лабораторных исследований или статистического анализа работы конструкции в реальных условиях эксплуатации.

Общий алгоритм определения значения $[D_i]$ следующий:

1) задаем значение d_i, характеризующее появление рассматриваемого отказа или неисправности для i-го элемента или узла. При выполнении математического моделирования или лабораторных исследований значение d_i задается в модели или на стенде на основе имеющихся данных о вертикальных или боковых силах и напряжениях. При выполнении статистического анализа фактических отказов нагруженность на анализируемом участке определяется на основе натурных измерений воздействия подвижного состава или по результатам моделирования, учитывающего особенности участка;

2) определяем число циклов нагружения, при котором наступил отказ или неисправность для i-го узла или элемента. При математическом моделировании или лабораторных экспериментах расчеты или испытания проводим до наступления состояния, соответствующего отказу; при статистическом анализе фактических отказов число циклов определяется на основе данных о пропущенном тоннаже с учетом типов обращающегося подвижного состава, осевых нагрузок и грузонапряженности по следующей формуле:

$$[n_i] = \frac{T_i}{P_i}, \tag{19}$$

где T_i — тоннаж, пропущенный по участку наблюдений до появления рассматриваемого отказа или неисправности для i-го элемента, млн т брутто; P_i — средняя осевая нагрузка на участке наблюдений $\left(P_i = \sum_{j=1}^{m} P_j \gamma_j\right)$, где P_j — осевая нагрузка подвижной единицы j-го типа, тс; γ_j — доля подвижных единиц j-го типа в общем поездопотоке;

3) на основе полученных значений d_i и $[n_i]$ определяется значение $[D_i]$:

$$[D_i] = d_i [n_i]. \tag{20}$$

По результатам полученных массивов значений $[D_i]$ для различных отступлений и отказов в узлах и элементах верхнего строения пути формируется доверительная статистика значений $[D_i]$ для дальнейшего применения при прогнозировании. Для учета влияния изменения состояния пути во времени и корректировки значения $[D_i]$ для конкретных участков при моделировании должны быть использованы данные диагностики и накопления неисправностей этих участков.

Основная задача прогнозных расчетов — получение временных или иных оценок длительности эксплуатации пути до появления отказа (неисправности) узла или элемента, который необходимо устранить. Исходными данными для прогнозирования являются значения d_i и $[D_i]$.

Значение d_i характеризует условия эксплуатации конструкции, значение $[D_i]$ — свойства конструкции. Прогнозные расчеты выполняются в следующей последовательности:

1) на основе анализа эксплуатационных условий участка методами математического моделирования или натурных измерений определяются значения боковых и вертикальных сил и напряжений на рассматриваемом участке, действующих на путь от подвижного состава. На основе полученных результатов определяются значения d_i для прогнозируемого отказа или появления неисправности в i-м узле или элементе;

2) на основе значений $[D_i]$ и d_i определяется число циклов $n_i = [D_i]/d_i$, которое будет воспринято i-м узлом или элементом до появления в нем рассматриваемого отказа или неисправности пути.

Значения n_i переводятся во временные или физические оценки (пропущенный тоннаж), позволяющие выполнить прогнозирование даты проведения работ по устранению неисправностей или отказов.

Срок эксплуатации до появления отказа или неисправности (лет) рассчитывается по следующей формуле:

$$t_i = \frac{n_i P_i}{10^6 \Gamma_i}, \tag{21}$$

где Γ_i — грузонапряженность на рассматриваемом участке, млн т·км в год.

Тоннаж, пропущенный до появления отказа или неисправности, определяется по формуле

$$T_i = \frac{n_i P_i}{10^6}. \tag{22}$$

© АО «ВНИИЖТ», 2021

Вторая задача прогнозирования — определение количества выходов из строя элементов верхнего строения пути или количества появления отказов пути на заданном этапе эксплуатации — m_i^k, шт./км в год

$$m_i^k = \left[a_i\left(d_i n_i\right)^5 + b_i\left(d_i n_i\right)^4 + c_i\left(d_i n_i\right)^3 + \right.$$
$$\left. + s_i\left(d_i n_i\right)^2 + e_i(d_i n_i) + f_i\right], \qquad (23)$$

где $a_i, b_i, c_i, s_i, e_i, f_i$ — степенные коэффициенты к функции аппроксимации кривой надежности для i-го вида отказа или выхода из строя элемента верхнего строения пути; k — расчетный год эксплуатации.

Коэффициент готовности определяется по формуле

$$K_{\text{готов}}^k = 1 - \sum m_i^k \gamma_i^m, \qquad (24)$$

где γ_i^m — весовой коэффициент для рассматриваемой неисправности или выхода элементов верхнего строения пути из строя, 1/(шт./км в год).

Выражения (1–24) описывают деградационную модель и модель расчета напряженно-деформированного состояния пути. Для работы этих моделей необходима модель определения параметров взаимодействия в системе «колесо—рельс». В современной практике можно выделить ряд подходов, реализующих возможность такого моделирования, которые описаны М. Ф. Вериго, А. Я. Коганом [10] и Ю. С. Роменом [11], кроме того, такие данные могут быть получены по результатам натурных измерений или мониторинга воздействия подвижного состава на путь системами типа «НЕВА», WILD, LASCA [12]. Возможна также комбинация подходов, когда данные, полученные в ходе моделирования и натурных экспериментов, объединяются в единую базу данных, которая используется для обучения нейросетевой модели, позволяющей определять показатели взаимодействия пути и подвижного состава [13].

Валидация, верификация и апробация моделей для прогнозирования изменения состояния элементов верхнего строения пути и геометрии рельсовой колеи. В период 2018–2021 гг. была выполнена реализация этого семейства моделей в веб-версии программного комплекса «Нейроэксперт-Путь» (язык программирования — Python), а также проведена первичная верификация и валидация результатов его работы. Веб-версия включает в себя следующие блоки:

- блок 1. Построение расчетной модели железнодорожного пути с необходимой степенью детализации по имеющимся данным средств диагностики и базам паспортных данных (климатические условия, план, профиль, состояние пути, тип рельсов, шпал, скреплений, балласт);
- блок 2. Формирование эксплуатационных условий — учет данных вагонопотока (типы вагонов, загрузка вагонов, техническое состояние, скорости движения) и поездопотока (масса обращающихся поездов);
- блок 3. Определение параметров взаимодействия в системе «колесо—рельс» для расчетной модели железнодорожного пути (блок 1) в заданных эксплуатационных условиях (блок 2);
- блок 4. Расчет напряженно-деформированного состояния элементов верхнего строения пути на основе данных силовой динамики взаимодействия;
- блок 5. Формирование данных о силовой нагруженности характерных элементов, сечений, точек верхнего строения пути;
- блок 6. Прогнозирование деградации состояния элементов верхнего строения пути во времени и пространстве (расчет остаточного ресурса, надежности, прочности, устойчивости, безопасности движения, уровней рисков, затрат на обслуживание).

Верификация и валидация программного кода расчетных блоков 3, 4, 5 выполнялась путем проведения сравнительных расчетов, выполненных при одинаковых исходных данных в ранее верифицированных программных комплексах «ВЭИП 2.0», «Универсальный механизм» [14, 15] и по утвержденной методике оценки воздействия подвижного состава на путь [9]. Верификация и валидация программного кода расчетного блока 6 выполнялась на основе сравнения результатов прогнозирования с данными, полученными по наблюдениям за накоплением неисправностей и отказами реальных участков пути Куйбышевской железной дороги и Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» (Щербинка). В ходе расчетов силового воздействия и напряженно-деформированного состояния элементов пути были получены значения погрешности от 2 до 5%, погрешность прогнозных расчетов деградации пути, выхода из строя элементов и накопления неисправностей геометрии рельсовой колеи составила от 8 до 15%. Полученные значения подтверждают возможность применения разработанных моделей и реализующего их программного кода в качестве основы для дальнейшего формирования ЦДП.

Результаты расчетов представляются как в графическом, так и текстовом виде. В таблице представлен пример выходной информации по результатам работы блока 6. Данные таблицы могут быть использованы в дальнейшем для детального планирования работы путевого хозяйства на участке расчета, а также служить контрольными показателями для оценки фактического состояния пути и качества выполнения ремонтных работ и работ по текущему содержанию.

© АО «ВНИИЖТ», 2021

Прогнозные значения накопления неисправностей верхнего строения пути (горно-перевальный участок, средняя нагрузка на ось – 23,6 тс)
Predicted values of the accumulation of malfunctions of the track superstructure (mountain-pass section, average axle load — 23.6 tf)

Наименование показателя	Значение показателя								
Год эксплуатации	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Общий пропущенный тоннаж, млн т брутто	160	320	480	640	800	960	1120	1280	1440
Количество дефектных рельсов, шт./км	0,445	0,826	1,724	3,568	7,301	0,445	0,826	1,724	3,568
Количество остродефектных рельсов, шт./км	0,049	0,092	0,192	0,396	0,811	0,049	0,092	0,192	0,396
Количество негодных узлов скреплений, шт./км	0,933	8,723	0,933	30,064	0,933	46,057	50,565	0,933	0,933
Количество негодных шпал, шт./км	0,613	5,736	0,613	19,776	0,613	30,305	33,277	0,613	0,613
Количество отступлений по ширине колеи, шт./км:									
2 степени	0,301	0,771	0,301	0,771	0,301	0,301	0,771	0,301	0,301
3 степени	0,100	0,257	0,100	0,257	0,100	0,100	0,257	0,100	0,100
4 степени	0,025	0,064	0,025	0,064	0,025	0,025	0,064	0,025	0,025
Количество неисправностей геометрии рельсовой колеи в профиле, шт./км:									
2 степени	7,287	12,255	7,287	12,255	7,287	7,287	12,255	7,287	7,287
3 степени	2,550	3,726	2,550	3,726	2,550	2,550	3,726	2,550	2,550
4 степени	0,956	1,398	0,956	1,398	0,956	0,956	1,398	0,956	0,956
Количество неисправностей геометрии рельсовой колеи в плане, шт./км:									
2 степени	0,921	1,445	0,921	1,445	0,921	0,921	1,445	0,921	0,921
3 степени	0,307	0,482	0,307	0,482	0,307	0,307	0,482	0,307	0,307
4 степени	0,307	0,482	0,307	0,482	0,307	0,307	0,482	0,307	0,307
Загрязненность щебня, %	19,410	27,037	29,510	30,628	32,023	19,410	27,037	29,510	30,628
Количество негодных скреплений, %	0,012	0,112	0,012	0,385	0,012	0,590	0,648	0,012	0,012
Количество негодных шпал, %	0,031	0,294	0,031	1,013	0,031	1,552	1,705	0,031	0,031
Число шпал с выплесками, %	1,941	2,704	1,941	3,063	1,941	1,941	2,704	1,941	1,941
Затраты на текущее содержание, тыс. руб./км в год	155,240	1220,840	243,917	1520,650	564,273	448,145	1492,490	243,917	350,306
Признак проведения ремонта*	–	В	–	В	РС	–	В	П	КРН
Индекс предотказа	0,161	0,252	0,177	0,338	0,245	0,236	0,321	0,177	0,199
Частота отказов, шт./км в год	0,074	0,156	0,217	0,461	0,836	0,074	0,156	0,217	0,422
Доля затрат текущего содержания от уровня амортизации, %	0,064	0,503	0,101	0,627	0,233	0,185	0,615	0,101	0,144
Суммарные затраты на техническое обслуживание, тыс. руб./км	155,240	1220,841	243,917	1520,652	11291,690	448,145	1492,495	2792,037	22179,050

* В – выправочный ремонт, РС – средний ремонт со сплошной заменой рельсов, П – подъемочный ремонт, КРН – капитальный ремонт первого уровня.
* В — renewal repair, РС — medium repair with continuous replacement of rails, П — raising repair, КРН — overhaul of the first level .

Заключение. 1. В современных экономических условиях планирование является основой для организации управления активами в любой отрасли, и в первую очередь на железнодорожном транспорте как стратегически важном объекте народного хозяйства.

2. Техническая сложность и огромное количество объектов и подсистем, формирующих железнодорожную инфраструктуру, требуют взаимоувязки при планировании их работы, что с учетом современных тенденций развития средств и методик управления активами наиболее продуктивно осуществлять с применением подхода цифровых двойников, а путевое хозяйство является приоритетным направлением их внедрения.

© АО «ВНИИЖТ», 2021

3. На основе определения понятия «цифровой двойник» была выполнена декомпозиция железнодорожной инфраструктуры и выделены основные требования к виртуальной части ЦДП, а также определен состав расчетных и прогнозных моделей, необходимых для реализации в рамках его создания.

4. В результате анализа имеющихся наработок в области моделирования железнодорожного пути, а также ранее проведенных исследований по вопросам прогнозирования его работы определены теоретические основы работы расчетных прогнозных моделей и выполнена их программная реализация. Кроме того, были проведены верификационные и валидационные исследования разработанного программного обеспечения, показавшие удовлетворительные результаты.

5. Выходные формы и массивы данных, полученные в ходе моделирования, могут быть использованы для планирования работы линейных предприятий путевого комплекса и оценки качества текущего содержания железнодорожного пути.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулый И. М. Подход к экономической оценке инвестиционных проектов развития железнодорожной инфраструктуры // Транспорт Российской Федерации. 2021. № 1–2 (92–93). С. 12–14.

2. Розенберг И. Н., Шабельников А. Н., Ольгейзер И. А. Разработка платформы цифровых двойников инфраструктурных объектов // Железнодорожный транспорт. 2019. № 9. С. 26–29.

3. Цифровая железная дорога — ERTMS, BIM, GIS, PLM и цифровые двойники / В. П. Куприяновский [и др.] // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2017. Т. 13. № 3. С. 129–166.

4. Шевченко Д. В. Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 2. С. 91–99. DOI: https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99.

5. Коган А. Я., Абдурашитов А. Ю. Прогнозирование отказов рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2014. № 4. С. 3–7.

6. Карпущенко Н. И. Надежность связей рельсов с основанием. М.: Транспорт, 1986. 150 с.

7. Повышение надежности и эффективности работы железнодорожного пути в условиях роста осевых нагрузок подвижного состава: межвуз. сб. науч. тр. / Новосибирский ин-т инженеров ж.-д. транспорта; под ред. Н. И. Карпущенко. Новосибирск: НИИЖТ, 1989. 80 с.

8. Лысюк В. С., Каменский В. Б., Башкатова Л. В. Надежность железнодорожного пути / под ред. В. С. Лысюка. М.: Транспорт, 2001. 286 с.

9. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22 декабря 2017 г. № 2706/р. URL: http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=713998#IO4D9lSTIWx6Fon4 (дата обращения: 15.08.2021 г.).

10. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 560 с.

11. Ромен Ю. С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее. Методы расчета и испытаний. М.: ВМГ-Принт, 2014. 210 с.

12. Ададуров А. С., Тюпин С. В., Лапин А. М. Техническая диагностика колесных пар: современные методы и средства выявления дефектов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2013. № 4 (24). С. 32–35.

13. Сивицкий Д. А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения (Вестник СГУПС). 2021. № 2 (57). С. 33–41. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_57_33.

14. Программный комплекс «взаимодействие экипажа и пути 2.0»: св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ 2020618358 Рос. Федерация / М. А. Хлудеев [и др.]; заявитель АО «ВНИИЖТ». № 2020617354; заявл. 15.07.2020; опубл. 24.07.2020.

15. Языков В. Н. Численное моделирование динамики поезда в режиме реального времени // Вестник Брянского государственного технического университета (Вестник БГТУ). 2015. № 2 (46). С. 123.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СУСЛОВ Олег Александрович,
д-р техн. наук, технический эксперт, НИАЦ, АО «ВНИИЖТ»

ФЕДОРОВА Вероника Игоревна,
канд. техн. наук, начальник отдела, НИАЦ, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 01.09.2021 г., принята к публикации 23.09.2021 г.

Для цитирования: Суслов О. А., Федорова В. И. Перспективные подходы к прогнозному моделированию деградационных процессов элементов верхнего строения пути и их применение при создании цифровых двойников // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 5. С. 251–259. DOI: https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259.

Prospective approaches to predictive modeling of degradation processes of track superstructure elements and its application in creating digital twins

O. A. SYSLOV, V. I. FEDOROVA

Scientific Information and Analytical Center of the Joint Stock Company Railway Research Institute (NIAC JSC "VNIIZHT"), St. Petersburg, 196128, Russia

Abstract. It's impossible to use digital technologies without using the amount of information coming from various systems designed to manage the transportation process and plan its work, taking into account modern economic requirements and resource

© АО «ВНИИЖТ», 2021

constraints. Digital twins are currently the most promising tool for solving the problems of managing technically rich multi-level assets, which include railway transport. The track facilities are one of the most expensive assets, and the issues of organizing the management of the maintenance of the railway track are very acute, since they are directly related to the safety of train traffic, therefore, the development of a digital twin of the railway track is a priority task for track science. A digital twin of a railway track should contain elements of BigData technology in the form of arrays of diagnostic data coming online from mobile and stationary diagnostic tools, an array of passport data about the track device, as well as a set of models that can convert this data into matrices "state—action", suitable for making organizational and technical decisions on the management of the track complex, starting from the level of linear enterprises and ending with network tasks. The article presents models that can be taken as a foundation for building digital twins of a railway track. The results of verification and approbation of the proposed models in the "Neyroekspert-Put'" software package are also presented.

Keywords: digital twin; railway track; track superstructure; railway track degradation forecasting

DOI: https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259

REFERENCES

1. Gulyy I. M. *Podkhod k ekonomicheskoy otsenke investitsionnykh proektov razvitiya zheleznodorozhnoy infrastruktury* [Approach to the economic assessment of investment projects for the development of railway infrastructure]. Transport of the Russian Federation, 2021, no. 1–2 (92–93), pp. 12–14.

2. Rozenberg I. N., Shabel'nikov A. N., Ol'geyzer I. A. *Razrabotka platformy tsifrovykh dvoynikov infrastrukturnykh ob"ektov* [Development of a platform for digital twins of infrastructure facilities]. Zheleznodorozhnyy transport, 2019, no. 9, pp. 26–29.

3. Kupriyanovskiy V. P., Alen'kov V. V., Klimov A. A., Sokolov I. A., Zazhigalkin A. V. *Tsifrovaya zheleznaya doroga — ERTMS, BIM, GIS, PLM i tsifrovye dvoyniki* [Digital railway — ERTMS, BIM, GIS, PLM and digital twins]. Modern Information Technologies and IT-education, 2017, Vol. 13, no. 3, pp. 129–166.

4. Shevchenko D. V. *Metodologiya postroeniya tsifrovykh dvoynikov na zheleznodorozhnom transporte* [Methodology for constructing digital twins in railway transport]. VNIIZHT Scientific Journal, 2021, Vol. 80, no. 2, pp. 91–99. DOI: https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99.

5. Kogan A. Ya., Abdurashitov A.Yu. *Prognozirovanie otkazov rel'sov po defektam kontaktno-ustalostnogo proiskhozhdeniya* [Prediction of rail failures based on defects of contact-fatigue origin]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2014, no. 4, pp. 3–7.

6. Karpushchenko N. I. *Nadezhnost' svyazey rel'sov s osnovaniem* [Reliability of connections between rails and base]. Moscow, Transport Publ., 1986, 150 p.

7. Karpushchenko N. I. *Povyshenie nadezhnosti i effektivnosti raboty zheleznodorozhnogo puti v usloviyakh rosta osevykh nagruzok podvizhnogo sostava. Mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Improving the reliability and efficiency of the railway track in conditions of increasing axle loads of rolling stock. Interuniversity collection of scientific papers]. Novosibirsk, NIIZhT Publ., 1989, 80 p.

8. Lysyuk V. S., Kamenskiy V. B., Bashkatova L. V. *Nadezhnost' zheleznodorozhnogo puti* [Reliability of the railway track]. Moscow, Transport Publ., 2001, 286 p.

9. *Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track under the conditions of ensuring reliability.* Approved by order of JSC Russian Railways dated December 22, 2017 No. 2706/r. URL: http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=713998#IO4D9lSTIWx6Fon4 (retrieved on 15.08.2021) (in Russ.).

10. Verigo M. F., Kogan A. Ya. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava* [Interaction of track and rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1986. 560 p.

11. Romen Yu. S. *Dinamika zheleznodorozhnogo ekipazha v rel'sovoy kolee. Metody rascheta i ispytaniy* [Dynamics of a railway carriage in a rail track. Calculation and test methods]. Moscow, VMG-Print Publ., 2014, 210 p.

12. Adadurov A. S., Tyupin S. V., Lapin A. M. *Tekhnicheskaya diagnostika kolesnykh par: sovremennye metody i sredstva vyyavleniya defektov* [Technical diagnostics of wheelsets: modern methods and means of detecting defects]. Vestnik Instituta problem estestvennykh monopoliy: Tekhnika zheleznykh dorog, 2013, no. 4 (24), pp. 32–35.

13. Sivitskiy D. A. *Analiz opyta i perspektiv primeneniya iskusstvennykh neyronnykh setey na zheleznodorozhnom transporte* [Analysis of the experience and prospects of using artificial neural networks in railway transport]. The Siberian Transport University Bulletin, 2021, no. 2 (57), pp. 33–41. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_57_33.

14. Khludeev M. A., Vasil'yev S. L., Gonik M. M., Mikhaylov S. V., Khomyakov S. V., Yaroshchuk D. I., Kogan A. Ya. *Programmnyy kompleks "vzaimodeystvie ekipazha i puti 2.0"* [Software complex "Carriage and track interaction 2.0"]. Sv-vo o gos. registratsii programmy dlya EVM No. 2020618358 Ros. Federatsiya; opubl. 24.07.2020 [Certificate of state registration of the computer program No. 2020618358 Russian Federation; publ. 24.07.2020] (in Russ.).

15. Yazykov V. N. *Chislennoe modelirovanie dinamiki poezda v rezhime real'nogo vremeni* [Numerical simulation of train dynamics in real time]. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2015, no. 2 (46), p. 123.

ABOUT THE AUTHORS

Oleg A. SUSLOV,
Dr. Sci. (Eng.), Technical Expert, NIAC, JSC "VNIIZHT"

Veronika I. FEDOROVA,
Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department, NIAC, JSC "VNIIZHT"

E-mail: Suslov.Oleg@vniizht.ru (O. A. Suslov)

Received 01.09.2021
Accepted 23.09.2021

For citation: Syslov O. A., Fedorova V. I. Prospective approaches to predictive modeling of degradation processes of track superstructure elements and its application in creating digital twins // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (5): 251–259 (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-251-259.

© АО «ВНИИЖТ», 2021