

Прогнозирование изменения состояния верхнего строения пути

Точные сведения о состоянии верхнего строения пути необходимы для оптимизации системы его текущего содержания и ремонта. Исследования показывают, что качество пути, измеренное в так называемых показателях ADA, подчиняется экспоненциальной функции. Это подчеркивает важность правильного выбора значений порогового уровня качества пути, определяющего время начала путевых работ с экономической точки зрения (далее — порога начала путевых работ). Можно показать, что определение данного порога исходя из возраста путевой структуры позволяет увеличить срок службы пути и оптимизировать организацию путевого хозяйства. Однако для реализации этого положения специфическая функция ухудшения состояния пути должна быть выражена в математической форме.

Объект исследований

Исследования, выполненные совместно Федеральными железными дорогами Австрии (ÖBB) и Институтом железнодорожного строительства и экономики транспорта Технического университета г. Граца в целях определения технически и экономически оптимизированных базовых стратегий, были дополнены исследованиями изменения геометрических параметров пути (этап № 2 проекта «Стратегия текущего содержания и ремонта верхнего строения пути»).

Результаты этих исследований позволяют точно определить стратегию, которая основана на опыте, но вместе с тем подтверждена функциями качества верхнего строения пути в математических выражениях.

Найденные математические описания изменения состояния верхнего строения пути формируют основу упомянутого выше второго этапа проекта. Это дает возможность прогнозировать поведение верхнего строения пути, а также понять его особенности и прояснить влияние внешних факторов. В связи с этим поставлена задача разработать возможно более автоматизированную, функционирующую в зависимости от фактического состояния и в то же время технически и экономически оптимизированную систему текущего содержания и ремонта верхнего строения пути.

Структура проекта

В ходе разработки прогностической модели выполнены следующие подпроекты:

- формулирование математической функции изменения геометрических параметров пути под воздействием движения поездов от ввода в эксплуатацию до начала первых работ по текущему содержанию и ремонту;
- распространение этой функции на временные интервалы между очередными циклами работ по текущему содержанию и ремонту пути;
- разработка прогностической модели для определения технического срока службы путевой структуры с учетом наиболее важных работ по текущему содержанию и ремонту пути;
- определение порога начала путевых работ, предпочтительного с экономической точки зрения.

Основой для описания геометрических параметров пути послужили показатели ADA железных дорог Австрии, ставшие доступными с конца 1980-х годов. Показатели ADA являются удобным индикатором для оценки уровня плавности хода, отражающего качество и, более того, единообразие геометрических параметров пути. Они используются в Австрии в основном для того, чтобы определять сроки выполнения работ, требуемых для коррекции геометрии пути.

Поэтому проведенные исследования основывались именно на этих показателях оценки. Однако оценка может быть полезной только тогда, когда измеренные значения собираются и обрабатываются одним и тем же способом, обеспечивая тем самым соответствие измеренных значений тем, которые получены в идентичных ситуациях даже по прошествии многих лет. Для достижения целей исследования необходимо, чтобы измерительные системы и процедуры обработки результатов измерений, по которым осуществляется оценка, оставались неизменными в течение длительного времени. Это требование становится тем более важным, когда от исследований ожидают результатов с определенной степенью детализации.

В задачах исследования подразумевается опора на результаты оценки линий с хорошим состоянием основания пути, поскольку системные исследования показали, что неэкономично продолжать эксплуатировать линии со слабым основанием за счет повы-

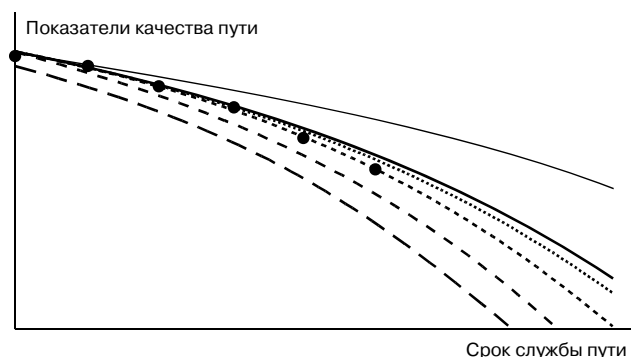


Рис. 1. Основные функции состояния пути

шения интенсивности работ по текущему содержанию и ремонту верхнего строения пути, а также с возможным сокращением срока службы всей путевой структуры.

Результаты

Анализ показателей качества подтверждает теоретический подход Риссбергера (Riessberger), согласно которому темп ухудшения состояния пути по геометрическим параметрам непосредственно зависит от состояния пути в данное время. Это означает, что деградация «хорошего» пути происходит медленно, а «плохого» пути — быстро. Исходя из этого временная прогрессия снижения качества пути выражается экспоненциальной функцией

$$dQ/dt = bQ; Q_{(t)} = Q_0 e^{bt},$$

где Q_0 — исходное качество пути, соответствующее достигнутому в ходе его укладки; b — темп ухудшения состояния пути по геометрическим параметрам.

Исходное качество пути понимается здесь, аналогично всем другим показателям ADA, как результат оценки состояния пути после первоначальной осад-

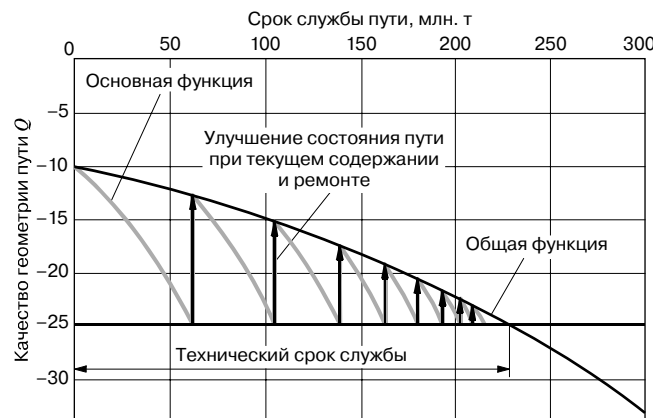


Рис. 2. Общая функция состояния пути

ки земляного полотна, чем объясняется системное отличие данного случая от иной общеизвестной ситуации «бассейна с двумя трубами», принимаемой при описании качественного поведения технических систем. Показатели ADA и соответствующие качеству значения в приведенной формуле, как правило, меньше 0. Значение качества, равное 0, соответствует теоретически абсолютно бездефектному пути. Далее эта качественная функция рассматривается как основная (рис. 1).

Работы по текущему содержанию и ремонту пути выполняются, когда достигается определенный пороговый уровень качества его состояния, который считается неприемлемым по любой из причин. По завершении этих работ состояние пути по геометрическим параметрам улучшается. Вместе с тем анализ полученных в ходе измерений данных показывает, что никакие работы по текущему содержанию и ремонту пути не могут вернуть его в исходное состояние, соответствующее показателю качества Q_0 , но все же могут в некоторой степени приблизить его к исходному состоянию.

График основной функции качества отражает особую важность исходного состояния пути по геометрическим параметрам для поведения пути в течение всего срока службы и подтверждает, что экономически оправданная оптимизация системы его текущего содержания и ремонта возможна только с учетом всех затрат жизненного цикла (LCC), включая капитальные вложения, от которых зависит исходное состояние, и текущие расходы в процессе эксплуатации.

После того как работы по текущему содержанию и ремонту пути выполнены, опять начинается снижение качества состояния пути по геометрическим параметрам под воздействием движения поездов. Это означает, что общая функция (рис. 2) складывается из последовательного ряда основных функций ухудшения и улучшения. Вместе с тем эта функция также подчиняется экспоненциальному закону $Q_G = Q_0 e^{bt}$. Таким образом, состояние пути по геометрическим параметрам относительно общей функции не может быть качественно измерено на пути, так как фактически связано только с показателями качества, полученными непосредственно после работ по текущему содержанию и ремонту (как и после первоначальной осадки основания).

Этим технический срок службы определяется как заверченный, когда осадка основания пути после работ по текущему содержанию и ремонту полностью компенсирует улучшение, достигнутое в результате этих работ. На практике это означает, что путь уже больше не может быть приведен в стабильное состояние, которое соответствовало бы показателю качества, превышающему пороговый уровень. Здесь под техническим сроком службы подразумевается

максимальный срок, который можно обеспечить для определенного уровня качества и который ни в коем случае не может соответствовать заданному при строительстве. Более короткий срок службы, который зависит от экономических факторов и именуется экономическим сроком службы, получается по результатам расчетов экономической эффективности, в процессе которых определяется оптимальное время замены путевой структуры (время реинвестирования).

Показано, что темп ухудшения состояния пути b меняется после каждого цикла работ по текущему содержанию и ремонту. Существуют два пороговых значения этого показателя. Одно теоретическое пороговое значение основано на предположении, что после работ по текущему содержанию и ремонту пути он будет вести себя так же, как и до этих работ, и на том же уровне качества. Этот случай описывается как длительное текущее содержание и ремонт. Имеется в виду, что путь становится более «молодым» на время t_v (время «омолаживания»), «забывает» часть своей истории, а темп деградации b основной функции будет оставаться постоянным в течение всего срока службы. Исходя из этого так называемое продолжительное текущее содержание и ремонт представляют собой случай, который не может иметь место в реальной практике, потому что даже при максимально высоком качестве путевых работ некоторые виды износа (головки рельсов, балласта) не могут быть обратимыми.

Другой экстремальный случай, описываемый как краткосрочное текущее содержание и ремонт, происходит из предположения, что после работ по текущему содержанию и ремонту путь ведет себя так же, как и до того, но только на более высоком уровне качества.

Этот случай эквивалентен вертикальному смещению основной функции и поэтому предусматривает прогрессирующий рост темпа деградации b . Краткосрочное текущее содержание и ремонт находят приближенное применение в реальной практике, когда, например, выполняется подбивка шпал в местах с заиленным балластом: быстрое повторное заиление балласта, происходящее еще быстрее, чем первоначальное, представляет общеизвестное для каждого инженера-путейца явление. В действительности темп ухудшения состояния пути находится где-то между двумя этими теоретическими предельными значениями: чем выше качество работ по текущему содержанию и ремонту пути (особенно когда технически правильные работы направлены на устранение причин нарушения геометрии пути), тем больше темп деградации будет приближаться к тому, что соответствует продолжительному текущему содержанию и ремонту, но не сможет вплотную приблизиться к нему (рис. 3).

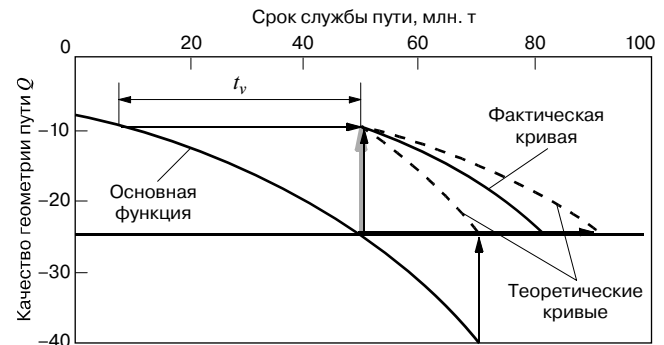


Рис. 3. Изменения темпа ухудшения состояния пути

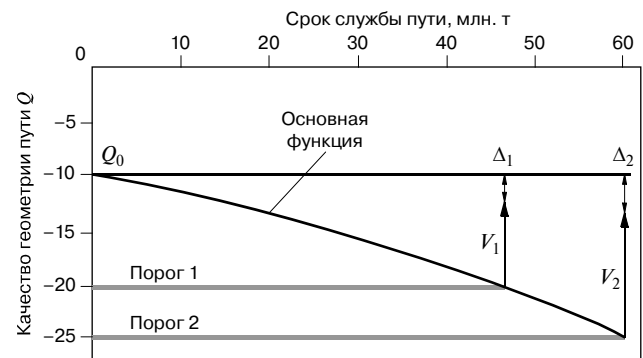


Рис. 4. Пределы улучшения состояния пути

Анализ показателей ADA, выполненный ÖBB, подтверждает эту теоретическую связь: кривая фактического качества состояния пути по геометрическим параметрам расположена между кривыми, соответствующими теоретическим пороговым значениям.

Результаты исследования позволяют сформулировать теорию, что темп ухудшения состояния пути b возрастает, также подчиняясь экспоненциальной функции. Однако проверка этой теории требует более широкого и детального анализа. В любом случае ясно, что состояние пути по геометрическим параметрам не может определяться только показателями качества. Более того, помимо определения фактического состояния пути, всегда необходимо указывать ожидаемый темп его ухудшения.

Дальнейшие теоретические соображения относятся к улучшению состояния пути по геометрическим параметрам (рис. 4), обеспечиваемому в ходе работ по текущему содержанию и ремонту.

Анализ показал, что первоначальное качество Q_0 никогда не может быть достигнуто вновь ($\Delta_i > 0$). Состояние пути по геометрическим параметрам можно довести (например, сокращением интервалов между работами по текущему содержанию и ремонту) до более высокого уровня, чем перед предыдущим циклом, но никогда до более высокого, чем Q_0 . Соответственно, при начале работ на пути с более высоким уровнем качества степень улучшения меньше, чем

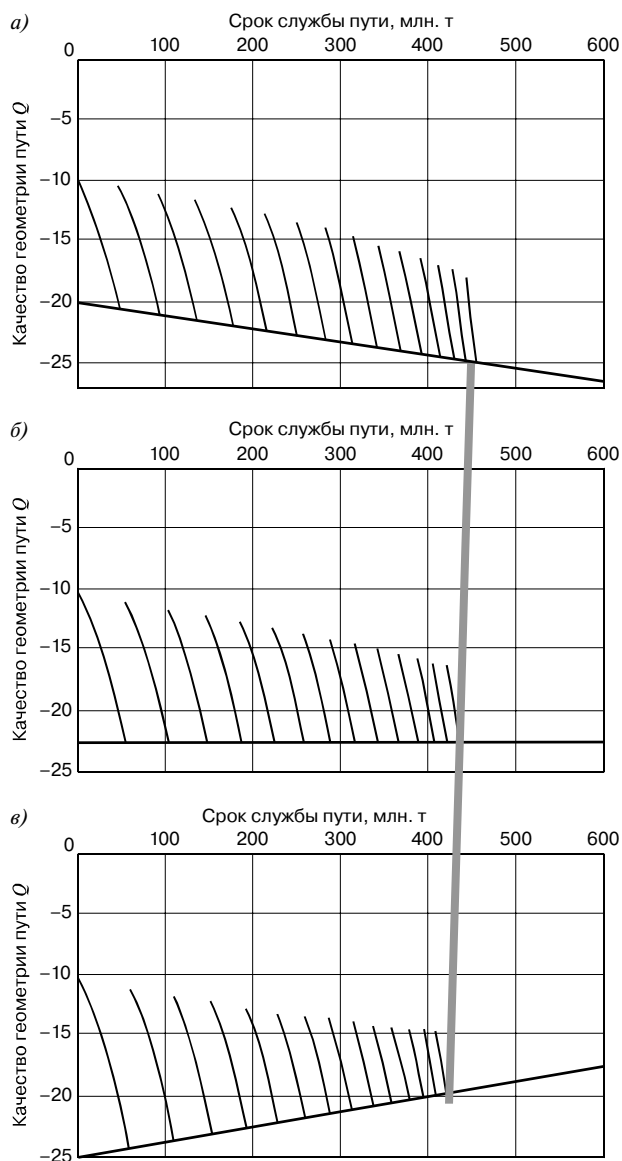


Рис. 5. Различные пороговые уровни качества для начала путевых работ

при начале работ на пути с более низким уровнем качества ($V_1 < V_2$). С другой стороны, при начале путевых работ при более высоком уровне качества приблизиться к исходному уровню качества Q_0 легче, чем при более позднем начале работ ($\Delta_1 < \Delta_2$).

Все эти корреляции выполняются общей функцией $Q_G = Q_0 e^{at}$. На этом основании построена прогностическая модель, которая в 2004 г. калибровалась на разных участках сети ÖBB и которая, как полагают, позволит не только назначать срок начала очередного цикла работ по текущему содержанию и ремонту пути, но и определять ожидаемый срок его службы.

Эти прогнозы основаны на указанных выше общеупотребимых взаимоотношениях, но подлежат выверке в соответствии с особыми условиями конкретной линии, сети железных дорог и интенсив-

ности грузового движения. Таким образом, функциональные взаимосвязи принимаются на основе теоретических заключений, но определение базовой функции осуществляется на основе конкретных результатов измерений. Отсюда специфическая качественная функция выводится из второго измерения: первое измерение определяет исходное качество Q_0 , второе позволяет установить темп ухудшения состояния пути b .

В то же время, однако, независимо от особых условий конкретной линии можно сделать общие заключения относительно порогового уровня качества состояния пути для начала работ по его текущему содержанию и ремонту. В принципе, этот пороговый уровень может иметь постоянное значение в течение всего срока службы пути («устойчивый» порог, рис. 5, б), но можно также допустить его изменение по мере истечения времени эксплуатации. При этом пороговый уровень начала очередного цикла путевых работ, который снижается в соответствии со сроком службы, местоположением кривой качества и именуется «конформным» порогом (рис. 5, а), столь же возможен, как и пороговый уровень противоположного характера, именуемый «обратным» порогом (рис. 5, в).

Применение конформного порога ведет к примерному равенству интервалов между циклами работ по текущему содержанию и ремонту пути, а в случае выбора порога, параллельного кривой общей качественной функции геометрии пути, можно обеспечить истинное равенство этих интервалов. При применении устойчивого порога интервалы между очередными циклами путевых работ должны сокращаться по мере старения пути. В то же время выбор обратного порога позволяет удлинить эти интервалы для относительно нового пути, хотя и они также постепенно сокращаются.

Использование прогностической модели дает возможность наглядно показать фактическое состояние пути по геометрическим параметрам на конкретной железнодорожной линии.

Если на одном и том же участке установлено несколько пороговых уровней качества для начала работ по текущему содержанию и ремонту пути, это неизбежно вызовет разную продолжительность срока его службы. Когда принят конформный порог, срок службы наибольший, когда обратный — наименьший (при условии, что обеспечено хорошее состояние основания пути).

При рассмотрении экономического срока службы пути сначала в упрощенной форме подразумевается, что требуемые интервалы между операциями по подбивке шпал не превышают года (также при условии хорошего состояния основания пути).

В этих условиях разные ситуации рассматриваются и сравниваются с экономической точки зрения на

основе затрат жизненного цикла с применением динамических методов. При всех уровнях детализации исследований можно сделать вывод, что конформный порог начала работ по текущему содержанию и ремонту пути всегда соответствует наиболее экономически эффективной стратегии и, наоборот, обратный порог всегда дает наиболее неэффективные результаты.

Все это наглядно показывает существенное влияние порогового уровня качества состояния пути для начала путевых работ на экономическую эффективность системы текущего содержания и ремонта пути, а именно в двух аспектах: во-первых, важен тип порога, во-вторых, это влияние может оцениваться в общих чертах, т. е. независимо от особых условий конкретной линии. Однако пороговый уровень как таковой (интервал между Q_0 и порогом) имеет решающее значение для любой стратегии текущего содержания и ремонта пути, но в количественном выражении это зависит от состояния сети и характера движения.

Перспективы

В настоящее время порог начала работ по текущему содержанию и ремонту пути определяется исходя из накопленного опыта его технической экс-

плуатации. Этому принципу следовали при разработке проекта «Стратегии текущего содержания и ремонта верхнего строения пути». Здесь, как и в других вопросах, касающихся путевого хозяйства, возможна дальнейшая экономическая оптимизация. Однако окончательная «настройка» возможна только с применением математического моделирования поведения пути с точки зрения его геометрических параметров.

Благодаря новым возможностям, открывшимся с появлением путеинспекционных вагонов с автоматической регистрацией и обработкой результатов измерений множества параметров, и путем сопоставления данных, полученных разными способами, состояние пути по геометрическим параметрам может быть описано в своем развитии во времени в соответствии с требованиями прогностической модели. С 2002 г. существует постоянно пополняющаяся база данных, по которой можно судить о качественных функциях верхнего строения пути и которую можно использовать для параметрического анализа. С того же времени в рамках проекта «Стратегии текущего содержания и ремонта верхнего строения пути» ведутся необходимые для этого исследования.

P. Veit. Glasers Annalen. Special Edition: Strategy of Track Maintenance, 2005, p. 33 – 37.

Сравнение затрат жизненного цикла обычных и термоупрочненных рельсов

Результаты исследований и испытаний, выполненных Федеральными железными дорогами Германии (DBAG) и компанией VoestAlpine Schienen (Австрия), показали, что рельсы с термоупрочненной (закаленной) головкой имеют более высокую сопротивляемость изнашиванию и повреждаемости по контактно-усталостным дефектам, чем обычные. В ходе дальнейших исследований сравнивались затраты жизненного цикла рельсов двух указанных типов.

Повышению сопротивляемости рельсов как изнашиванию, так и возникновению дефектов контактно-усталостного происхождения уделяется большое внимание при разработке рельсовой стали новых марок.

Наносимый железным дорогам ущерб, связанный с быстрым износом и повреждаемостью рельсов, весьма значителен и выражается в увеличении расходов на текущее содержание и ремонт пути и в сокращении срока службы элементов верхнего строения пути. Поэтому изготовители рельсов и специалисты служб путевого хозяйства стремятся минимизировать этот ущерб.

Опыт многих железных дорог, освещенный, в частности, на последней, 8-й конференции Международной ассоциации тяжеловесного движения, состоявшейся в Рио-де-Жанейро в июне 2005 г., показывает, что рельсы из стали более жестких марок имеют меньшую склонность к изнашиванию и возникновению дефектов, в том числе в виде волнообразного износа. Это также подтверждают многочисленные теоретические исследования.