

УДК 656.212.5

*В. Я. НЕГРЕЙ, доктор технических наук, С. А. ПОЖИДАЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; Ю. И. ЕФИМЕНКО, доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения, г. Санкт-Петербург*

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЛАЙНОВЫХ МЕТОДОВ

Рассматриваются вопросы автоматизации проектирования продольных профилей спускной части сортировочных горок с использованием методов сплайн-функций и, в частности, кубического сплайна дефекта 1. Применение кубических сплайновых моделей продольных профилей позволяет уже на стадии проектирования прогнозировать образование дефектов на спускной части сортировочных горок в местах сопряжения элементов продольного профиля с большой алгебраической разностью уклонов, а также получить их новые эксплуатационные качества. Появляется возможность в автоматизированном режиме анализировать существующие продольные профили эксплуатируемых сортировочных горок по данным нивелировки и выработать обоснованные рекомендации по совершенствованию их параметров.

**В**ертикальная планировка продольного профиля спускной части сортировочных горок должна обеспечивать их безопасную и надежную работу в процессе эксплуатации с заданными техническими параметрами в течение прогнозируемого срока эксплуатации (для сортировочных станций – 10, для остальных – 5 лет). Технические параметры продольного профиля спускной части сортировочных горок являются важнейшими показателями проектируемого сортировочного устройства, так как от них зависит величина потенциально реализуемой скорости роспуска и перерабатывающая способность горки, скорость скатывания отцепов на участках горки, безопасность роспуска (интервалы следования отцепов на разделительных элементах), динамичность роспуска. К вертикальной планировке продольного профиля выработан ряд нормативных требований [1, 2], которые должны соблюдаться при его проектировании.

Проектирование продольного профиля является многовариантной задачей, поэтому автоматизация расчетов его параметров будет способствовать принятию наиболее эффективного проектного решения. Проектирование вертикальной планировки продольного профиля спускной части сортировочных горок неразрывно связано с расчетом и проектированием других параметров (высота сортировочной горки, мощность тормозных средств, параметры плана головы сортировочного парка), так как они тесно взаимосвязаны.

Вертикальная планировка продольного профиля спускной части горки может рассчитываться аналитическим, графоаналитическим, графиче-

ским (по четырем точкам) или комплексным методами. Первые три метода предполагают раздельное проектирование продольного профиля и расчет высоты сортировочной горки. Комплексный метод обеспечивает одновременный расчет высоты горки и оптимизацию параметров продольного профиля и является на сегодняшний день наиболее прогрессивным.

В [3, 4, 8, 10] констатируется, что в процессе эксплуатации запроектированный по действующим нормам продольный профиль не соответствует современным условиям работы. Профиль горок отклоняется от проектного из-за деформации земляного полотна под воздействием больших динамических нагрузок, ремонтов, естественной среды. На большинстве горок имеются просадки пути в зоне размещения тормозных позиций. Наблюдаются отклонения радиусов вертикальной сопрягающей кривой на вершине горки от проектных на 20–40 %, что ведет к нерасцепу вагонов и нарушению условий безопасности роспуска, в связи с чем периодически необходимо производить проверку продольного профиля и его выправку. Такие явления происходят из-за действия двух основных факторов: 1) недостаточной жесткости земляного полотна сортировочных горок; 2) неплавности продольного профиля, который традиционно конструируется из прямолинейных отрезков, дуг круговых кривых или заменяющих их квадратных парабол, у которых радиус на всем протяжении выпуклой или вогнутой кривой практически постоянен. В этом случае в точках сопряжения элементов профиля радиус вертикальной кривой изменяется скачком. Первый фактор влияет на обра-

зование дефектов продольного профиля на этапе эксплуатации сортировочных горок. Уменьшить его воздействие можно путем разработки жестких конструкций земляного полотна (имеется опыт эксплуатации таких горок на железных дорогах Европейского Союза) вплоть до сборки сортировочных горок на специальных заводах, как отмечается в [8]. Влияние второго фактора можно уменьшить на этапе проектирования продольного профиля сортировочных горок. При этом новые возможности предоставляет сплайновый метод анализа и проектирования продольного профиля спускной части горки на основе кубического сплайна дефекта 1 с ограничениями. Данный метод помогает выявить и устранить ранее отмеченные недостатки сортировочных горок и достигать гладкого сопряжения одновременно всех элементов продольного профиля за счет использования нелокальных свойств кубической сплайн-функции. В то же время применение сплайнового метода возможно только в автоматизированном режиме, так как значительно увеличивается трудоемкость выполняемых расчетов.

*Критерием применения сплайнового метода является лучшее приближение сплайн-функциями реального продольного профиля, имеющего нелинейный характер, обеспечение более высокой точности расчетов при определении основных параметров сортировочной горки. Кроме того, сплайновые методы позволяют анализировать продольные профили эксплуатируемых сортировочных горок и своевременно определять потребность в их реконструкции и ремонте. Такой анализ невозможно выполнить традиционными методами в силу нелинейного характера отклонений параметров продольных профилей от их проектных значений.*

Процесс анализа и проектирования продольного профиля спускной части сортировочных горок с использованием сплайновых моделей в автоматизированном режиме разбивается на несколько этапов.

1 На *первом* этапе на основе развернутого плана трудного пути горочной горловины сортировочного парка выполняется проектирование и построение линейного продольного профиля спускной части горки. Участки разбиения продольного профиля, уклоны и длины элементов устанавливаются в соответствии с нормативными требованиями [2] в зависимости от числа тормозных позиций. Значительные аналитические возможности открываются при использовании для автоматизированных рас-

четов данных по существующим продольным профилям горок.

2 На *втором* этапе выполняется сплайновый анализ продольного профиля. Для этого полученный продольный профиль спускной части сортировочной горки аппроксимируется кубическим сплайном дефекта 1. Дефект сплайна характеризует степень его гладкости. Так, для применяемой сплайн-функции возможно вычисление двух непрерывных производных (степень сплайна 3 минус дефект 1), что является достаточным для определения уклонов элементов и радиуса кривизны в любой точке профиля. Узловыми точками кубической сплайновой модели являются точки тангенсов вертикальных круговых кривых, получаемых при сопряжении двух смежных участков. Данные точки являются обязательными для включения в сплайновую модель, так как в этих точках условие гладкости нарушается. Обязательными узловыми точками являются и точки, полученные в результате сгущения сетки узлов на участках размещения тормозных средств. Дополнительной узловой точкой является тангенс вертикальной кривой на горбе горке со стороны надвижной части. Вообще сопряжение надвижной и спускной частей профиля на горбе горки является сложной задачей, так как здесь возникают наибольшие погрешности, что требует отдельного рассмотрения этой проблемы.

Сплайновая модель в таком виде по своей сущности является теоретически гладкой. На следующем примере показано, как выявляются элементы продольного профиля, сопряжение которых весьма затруднительно и может привести в процессе эксплуатации к образованию ям или волн. Как правило, такие деформации продольного профиля образуются в местах сопряжения тормозных и смежных с ними участков, скоростных элементов головного участка профиля.

Так, на рисунке 1 представлен графоаналитический расчет сортировочной горки станции Минск-Сортировочный по существующему продольному профилю (до переустройства) и сплайновый анализ, выполненный в автоматизированном режиме. Сплайновая кубическая модель построена на основе реальных данных существующего продольного профиля исследуемой горки.

Результаты сплайновой аппроксимации показали, что помимо прочих недостатков конструкции данной сортировочной горки, на продольном профиле ее спускной части в зоне сопряжения участков первой и второй тормозных позиций об-

разуется явно выраженная яма. Таким образом, гладкость сопряжения этих участков теоретически обеспечить нельзя, что подтверждается результатами нивелирной съемки продольного профиля эксплуатируемой горки.

3 На *третьем* этапе производится собственно проектирование сплайнового продольного профиля спускной части сортировочных горок.

Для получения профильных отметок продольного профиля, необходимых в автоматизированных расчетах при построении кривых энергетических высот, кривых скорости и времени движения отцепов, проверки динамических качеств профиля используется функция  $S_{3,1}(H_S)$ , как функция продольного профиля. При этом энергетическая высота  $H_S$ , соответствующая потенциальной энергии от-

цепа в любой точке профиля относительно расчетной точки, определяется по кубическому сплайну по известной длине пройденного пути  $L_S$  на основе сплайнового выражения

$$S(H_S; L_S) = f_i(1-t)^2(1+2t) + f_{i+1}t^2(3-2t) + m_i h_i t(1+t)^2 - m_{i+1} h_i t^2(1-t).$$

Скоростная энергетическая высота  $h_v$ , соответствующая кинетической энергии отцепов в любой точке определяется по формуле

$$h_v = H_r + h_0 - h_w - S(H_S, L_S),$$

где  $H_r$  – высота горки, м;  $h_0$  – энергетическая высота, соответствующая скорости роспуска отцепов на горке;  $h_w$  – энергетическая высота, потерянная при преодолении всех сил сопротивления на пути  $L_S$ .

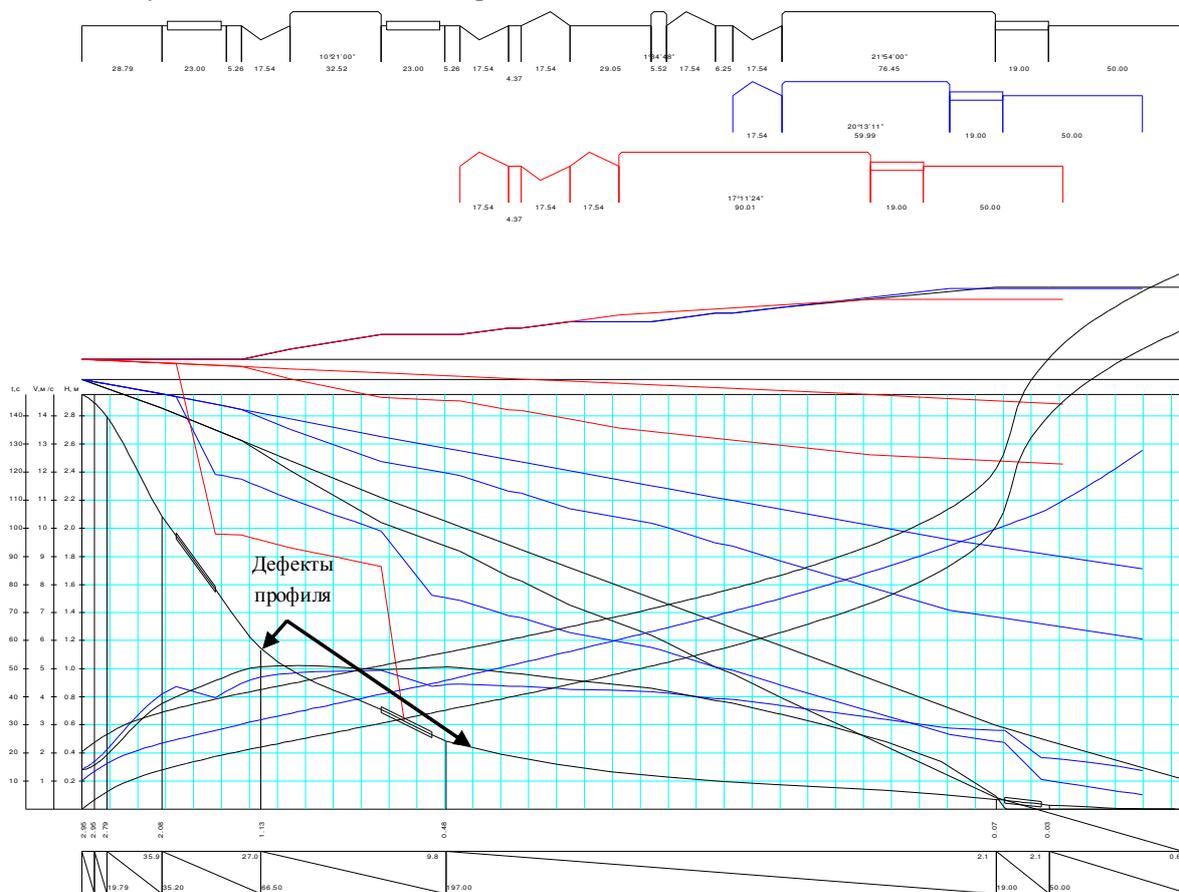


Рисунок 1 – Графоаналитический расчет существующей сортировочной горки станции Минск-Сортировочный и ее сплайновый анализ

Уклоны элементов профиля подбираются в соответствии с рекомендациями, полученными на втором этапе. Теория сплайн-функций позволяет контролировать значения уклонов и радиусов кривизны в любой точке профиля [5, 9]. Применяя численное дифференцирование сплайн-функций, вычисляют производные кубического сплайна (до третьего порядка включительно):

$$S'(H_S, L_S) = 6t(1-t) \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} + (1-4t+3t^2)m_i - (2t-3t^2)m_{i+1};$$

$$S''(H_S, L_S) = \frac{1}{h_i} \left[ 6(1-2t) \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} - (4-6t)m_i - (2-6t)m_{i+1} \right];$$

$$S'''(H_S, L_S) = \frac{6}{h_i^2} \left( m_{i+1} + m_i - 2 \frac{f_{i+1} - f_i}{h_i} \right)$$

при  $t = (L_S - L_i) / h_i$  и  $h_i = (L_{i+1} - L_i)$ .

Вычислив значения первой и второй производных, можно определить уклон касательной к проектной линии (уклон элемента) в любой точке  $(H_S, L_S)$  продольного профиля и радиус кривизны

$r(L_S)$  по формулам

$$i(L_S) = S'(H_S, L_S);$$

$$r(L_S) = \frac{\sqrt{(1 + S'(H_S, L_S)^2)^3}}{|S''(H_S, L_S)|}.$$

Сплайновый продольный профиль спускной части сортировочной горки станции Минск-Сортировочный, запроектированный с учетом рекомендаций второго этапа, представлен на рисунке 2.

Предполагается, что содержание сплайнового профиля будет незначительно отличаться от содержания профиля, запроектированного обычным образом. Для контроля над состоянием такого профиля достаточно иметь постоянно закрепленные реперные точки. Регулировка отметок головки рельса на спускной части горки в пределах 0,05–0,08 м может производиться с использованием рельсовых карточек.

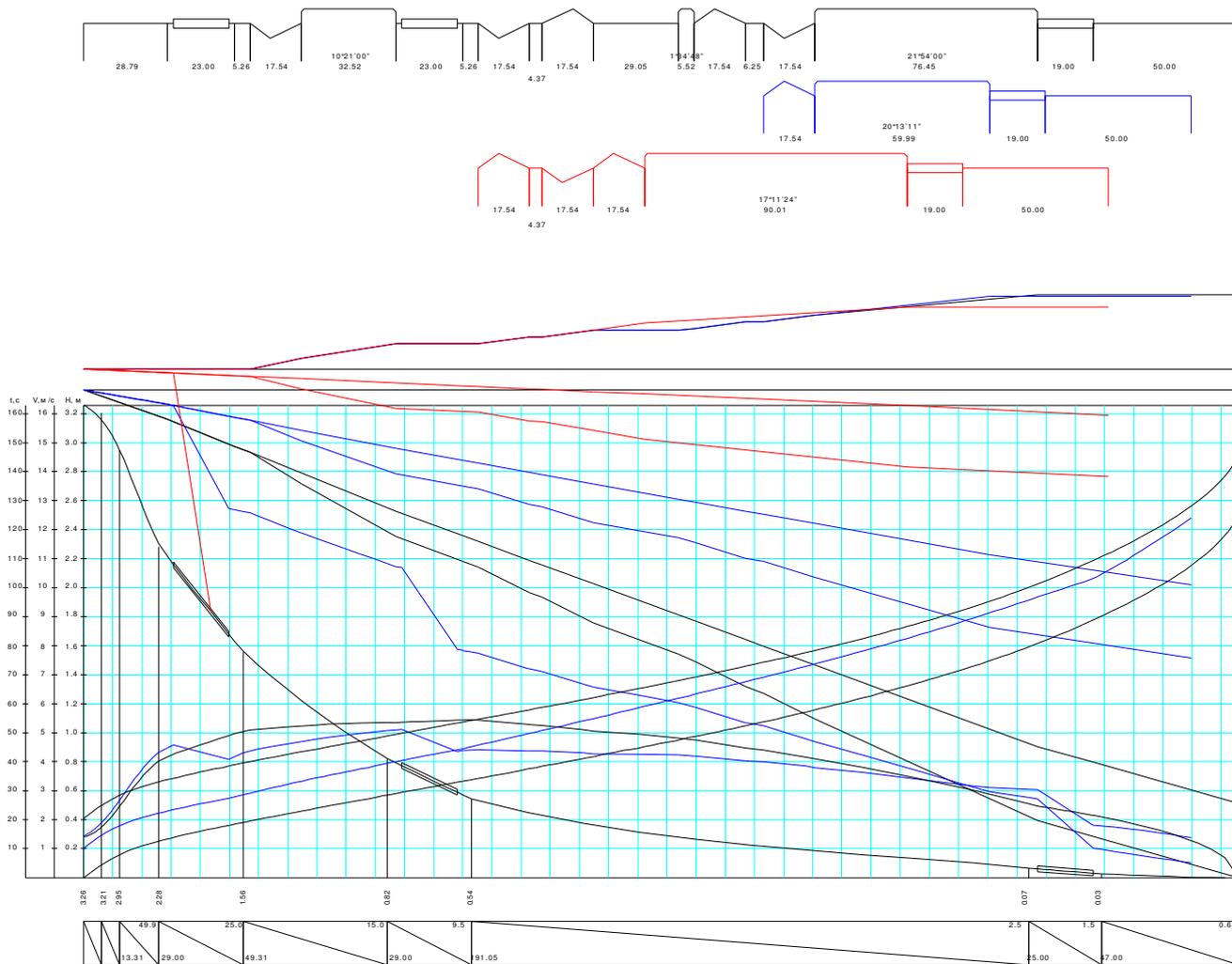


Рисунок 2 – Гладкосопряженный сплайновый продольный профиль сортировочной горки станции Минск-Сортировочный

Предполагается, что содержание сплайнового профиля будет незначительно отличаться от содержания профиля, запроектированного обычным образом. Для контроля над состоянием такого профиля достаточно иметь постоянно закрепленные реперные точки. Регулировка отметок головки рельса на спускной части горки в пределах 0,05–0,08 м может производиться с использованием рельсовых карточек.

В соответствии с [6, п. 4.15; 7], допускается

располагать стрелочные переводы в пределах вертикальных кривых радиусом 5000 м. Расчеты показали, что в пределах стрелочной зоны радиусы кривизны сплайновой модели составляют 5000 м и выше (данный элемент имеет наиболее пологий уклон). На головном же участке, где применяются вертикальные радиусы 250 м, точки перелома профиля выбираются таким образом, чтобы острия и крестовины стрелочных переводов располагались вне вертикальных сопрягающих кривых.

Результаты применения сплайнового метода анализа и проектирования продольного профиля спускной части сортировочных горок показали, что предлагаемый подход позволяет получить параметры проектов с новыми эксплуатационными качествами и обеспечивает:

1 Эффективную автоматизацию расчетов параметров сортировочных горок благодаря возможностям математического аппарата сплайн-функций.

2 Гладкость сопряжения одновременно всех элементов продольного профиля сортировочных горок за счет использования нелокальных свойств кубических сплайн-функций, в то время как при выполнении требований [2] гладко могут быть сопряжены лишь два смежных элемента профиля.

3 Повышенную плавность продольного профиля, получаемую путем применения элементов с кривизной переменного радиуса, что улучшает его эксплуатационные характеристики; позволяет контролировать расчетные значения уклонов и радиусы кривизны в точках сплайновой модели на соответствие нормативным значениям.

4 Повышенную безопасность роспуска, так как позволяет более точно производить расчеты параметров сортировочных горок и характеристики реального процесса роспуска на горках, в том числе интервалов следования отцепов в их неблагоприятных сочетаниях.

5 Экономия эксплуатационных расходов.

Выполненные исследования также указывают на назревшую необходимость корректировки и дополнений требований Правил и норм проектирования [2].

#### Список литературы

- 1 Инструкция по проектированию станций и узлов на железных дорогах Союза ССР: ВСН 56–78. – М. : Транспорт, 1978. – 173 с.
- 2 Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР: ВСН 207–89/МПС. – М. : Транспорт, 1992. – 104 с.
- 3 **Мацкель, С. С.** Расчет элементов станций на ЭВМ / С. С. Мацкель. – М. : Транспорт, 1980. – 176 с.
- 4 **Правдин, Н. В.** Проектирование железнодорожных станций и узлов. Ч. I. – 2-е изд., перераб. и доп. / Н. В. Правдин, Т. С. Банек, В. Я. Негрей. – Мн. : Выш. шк., 1984. – 288 с.
- 5 **Завьялов, Ю. С.** Методы сплайн-функции / Ю. С. Завьялов, Б. И. Квасов, В. Л. Мирошниченко. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
- 6 Система нормативных документов Министерства путей сообщения РФ. Правила и технические нормы проектирования станций и узлов на железных дорогах колеи 1520 мм / МПС РФ. – М. : Техинформ, 2001. – 255 с.
- 7 Железнодорожные станции и узлы : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. М. Акулиничев [и др.] : под ред. В. М. Акулиничева. – М.: Транспорт, 1992. – 480 с.
- 8 Железнодорожные станции и узлы : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. Г. Шубко [и др.]; под ред В. Г. Шубко и Н. В. Правдина. – М.: УМК МПС России, 2002. – 368 с.
- 9 **Завьялов, Ю. С.** Сплайны в инженерной геометрии / Ю. С. Завьялов, В. А. Леус, В. А. Скороспелов. – М. : Машиностроение, 1985. – 224 с.
- 10 **Луговцов, М. Н.** Проектирование сортировочных горок : пособие / М. Н. Луговцов, В. Я. Негрей. – Гомель : БелГУТ, 2005. – 170 с.

Получено 04.10.2006

**V. Y. Negrey, S. A. Pozhidayev, Y. I. Yefimenko.** Automation of designing the longitudinal profile of hump yards with application of spline methods

Some issues of the automation int designing the longitudinal profile of the down grade part of a hump yard with application of spline methods and in particular the cubic spline of Defect 1 are examined. It is shown that the application of cubic spline models of longitudinal profiles even in the stage of designing enables forecasting formation of defects on the down grade part of hump yards in the places where longitudinal profile elements with a great algebraic difference mate. It also enables obtaining their new service performance. It becomes possible to analyze the existing longitudinal profiles of operating hump yards basing on their leveling data and to work out well-founded recommendations to improve their parameters.