

В. И. БОБРОВСКИЙ, А. И. КОЛЕСНИК (Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)

УСТРОЙСТВО СОПРЯГАЮЩИХ КРИВЫХ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ ПАРКОВЫХ ЗАМЕДЛИТЕЛЕЙ НА ПРЯМЫХ УЧАСТКАХ СОРТИРОВОЧНЫХ ПУТЕЙ

В данной статье рассмотрен метод определения оптимальных параметров сопрягающих кривых горловой горловины при размещении парковой тормозной позиции на прямом участке пути за основной сопрягающей кривой. Критерием оптимальности является расстояние от пучкового стрелочного перевода до парковой тормозной позиции, которое необходимо минимизировать. Использование предложенного метода при проектировании и реконструкции горок позволит сократить длину горочной горловины и, тем самым, увеличить полезную длину сортировочных путей и повысить эффективность функционирования сортировочных устройств.

Ключевые слова: сортировочная горка, план горочной горловины, сопрягающие кривые, длина горловины, парковая тормозная позиция, оптимизация конструкции горловины.

The method of the determination of the optimal parameters of coupling curves in case allocation of the yard retarder position in the straight track section behind the main coupling curve is given in this article. The criterion of optimality is the minimum of the distance between the wisp switch and yard retarder position. Using this method during design and reconstruction of the sorting humps allows to reduce the length of the neck and thus to increase the length of sorting tracks and to improve the operating benefits of sorting equipments.

Key words: sorting hump, neck, coupling curves, length neck, yard retarder position, neck optimization.

Сортировочная горка представляет собой сложный комплекс различных технических средств, обеспечивающих процесс расформирования составов на станциях. Одним из основных элементов сортировочной горки является путевое развитие, конструктивные параметры которого оказывают существенное влияние на эффективность ее функционирования. Поэтому проектирование плана путевого развития горочной горловины является весьма важной и достаточно сложной задачей, в результате решения которой необходимо обеспечить рациональное размещение стрелочных переводов, тормозных позиций, а также устройств автоматики с учетом действующих нормативов и технических условий. В частности, при проектировании необходимо определить положение и параметры дополнительных кривых на спускной части горки и на сортировочных путях. Параметры соединительных кривых оказывают существенное влияние на качество проекта, поскольку от них зависят как расчет-

ная длина горловины в целом, так и сопротивление движению скатывающихся отцепов.

Принципиальная сложность данной задачи заключается в том, что в горочной горловине располагается множество кривых, углы поворота которых неизвестны, а их значения взаимосвязаны. Поэтому для ее решения приходится принимать значения указанных углов подбором на основе предварительного приближенного решения задачи графическим методом [1].

Для решения данной задачи в [2] был предложен метод расчета параметров всех элементов пучков сортировочных путей, основанный на представлении конструкции стрелочной зоны пучка путей с помощью методов аналитической геометрии. Исследования, выполненные с использованием указанного метода, подтвердили необходимость устройства на сортировочных путях дополнительных соединительных кривых с различными параметрами и направлением поворота.

Использование автоматизированного проектирования и ЭВМ [3, 4] для определения неизвестных параметров кривых на основе интерактивных методов позволяет ускорить проектирование планов горочных горловин, однако при этом проблема поиска рациональных значений совокупности неизвестных углов остается нерешенной.

Методика, позволяющая определить рациональные параметры сопрягающих кривых на путях сортировочного парка, предложена в работах [5, 6]. В этих статьях в качестве критерия оптимальности принято расстояние от пучкового стрелочного перевода до замедлителей парковой тормозной позиции (ПТП), которое необходимо минимизировать. Такой подход позволяет сократить длину горочной горловины и за счет этого увеличить полезную длину сортировочных путей.

Следует заметить, что методика, разработанная в [5, 6], может использоваться для проектирования плана путевого развития горочных горловин в тех случаях, когда замедлители ПТП могут располагаться на криволинейных участках сортировочных путей. В то же время на парковой тормозной позиции могут устанавливаться замедлители, которые по своей конструкции и системе управления не допускают эксплуатацию в кривых. В этом случае ПТП необходимо размещать на прямых участках сортировочных путей; тогда очевидно, что положение ПТП в пучке определяется максимальной координатой конца основной сопрягающей кривой $x_{\text{кк}}^{\text{max}}$ на всех путях данного пучка. Поэтому в данной статье поставлена задача определения такой конструкции участков сопряжения на всех сортировочных путях пучка, которая обеспечит минимальное расстояние от вершины горки до точки возможного размещения ПТП в данном пучке на прямых участках путей.

В формализованном виде данную задачу оптимизации можно представить как

$$x_{\text{кк}}^{\text{max}} = \max(x_{\text{кк}1}, x_{\text{кк}2}, \dots, x_{\text{кк}i}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $x_{\text{кк}i}$ – координата конца основной сопрягающей кривой на i -м сортировочном пути пучка; n – число путей в пучке.

Для решения поставленной задачи разработан метод, который позволяет минимизировать значение координаты $x_{\text{кк}}^{\text{max}}$ и, тем самым, сократить длину маршрута скатывания от ВГ до РТ, увеличить полезную длину сортировочных путей, а также уменьшить потребную высоту гор-

ки. Данный метод обеспечивает нахождение рациональных параметров участков соединительных путей рассматриваемого пучка (длины вставок и углы поворота кривых).

Для решения данной задачи на трассе каждого сортировочного пути пучка рассматривается участок между центром последнего стрелочного перевода $x_{\text{стр}}$ и концом основной сопрягающей кривой $x_{\text{кк}i}$ (рис. 1).

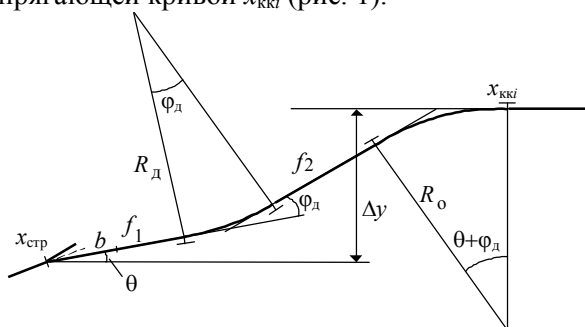


Рис. 1. Схема размещения сопрягающих кривых на сортировочном пути

Как видно из рисунка, план участка сопряжения можно представить нелинейным уравнением

$$\Delta y = (b + f_1) \sin \theta + R_d \cos \theta - R_d \cos(\theta + \varphi_d) + f_2 \sin(\theta + \varphi_d) + R_o - R_o \cos(\theta + \varphi_d) \quad (2)$$

где Δy – разность ординат сортировочного пути и центра стрелочного перевода;

θ – начальный угол наклона сортировочного пути;

f_1 – прямая вставка между торцом крестовины стрелочного перевода и началом дополнительной сопрягающей кривой;

f_2 – прямая вставка между концом дополнительной и началом основной сопрягающих кривых.

φ_d – угол поворота дополнительной сопрягающей кривой;

R_o, R_d – радиусы, соответственно, основной и дополнительной сопрягающих кривых.

Как показывает анализ, на сортировочном пути уменьшение координаты конца основной сопрягающей кривой $x_{\text{кк}i}$ может быть достигнуто за счет устройства дополнительной обратной сопрягающей кривой (см. рис. 1); при этом величина $x_{\text{кк}i}$ зависит от конструктивных параметров соединения

$$\Delta x = (b + f_1) \cos \theta - R_d \sin \theta + R_d \sin(\theta + \varphi_d) + f_2 \cos(\theta + \varphi_d) + R_o \sin(\theta + \varphi_d) \quad (3)$$

где Δx – разность координат сортировочного пути и центра стрелочного перевода $\Delta x = x_{\text{кк}i} - x_{\text{стр}}$.

Для уменьшения величины $x_{\text{ккк}}$ целесообразно не устраивать вставку между торцом крестовины стрелочного перевода и дополнительной сопрягающей кривой; поэтому в дальнейшем принято $f_1=0$ и для упрощения рассматриваемых

выражений данная величина в них не включалась.

Как видно из (3), величина Δx зависит от длины вставки f_2 , которая может быть определена из (2) как

$$f_2 = \frac{\Delta y_i - b \sin \theta - R_d \cos \theta + R_d \cos(\theta + \varphi_d) - R_o + R_o \cos(\theta + \varphi_d)}{\sin(\theta + \varphi_d)} \quad (4)$$

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо найти такое значение угла φ_d , при котором величина Δx (3) достигает минимума. С этой целью необходимо предварительно установить характер изменения функции $\Delta x = f(\varphi_d)$ в интервале $\varphi_d = [0, \varphi_d^{\max}]$. Очевидно,

что с увеличением угла φ_d увеличиваются длины сопрягающих кривых, однако при этом одновременно уменьшается длина вставки f_2 . Поэтому для исследования поведения функции $\Delta x = f(\varphi_d)$ была найдена ее производная $f'(\varphi_d)$:

$$\Delta x' = \frac{R_o + R_d \cos \theta + b \sin \theta - \Delta y - (R_d + R_o) \cos(\theta + \varphi_d)}{\sin^2(\theta + \varphi_d)} \quad (5)$$

Для анализа значения $\Delta x'$ данное выражение представим в виде

$$\Delta x' = \frac{b \sin \theta + R_d (\cos \theta - \cos(\theta + \varphi_d)) + R_o (1 - \cos(\theta + \varphi_d)) - \Delta y}{\sin^2(\theta + \varphi_d)} \quad (6)$$

Первые три слагаемые в числителе (6) представляют собой проекции на вертикальную ось, соответственно, трех элементов участка сопряжения (рис. 2).

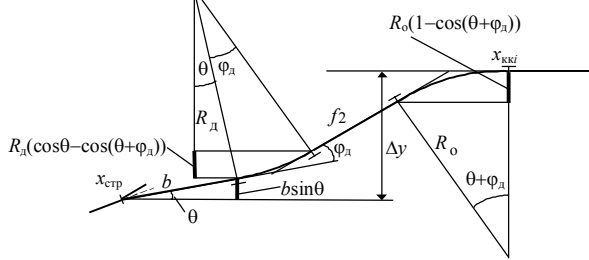


Рис. 2. Анализ элементов участка сопряжения кривых

Как видно из рисунка, указанные три слагаемые в сумме не превышают величины Δy , если угол φ_d находится в интервале $[0, \varphi_d^{\max}]$. Таким образом, числитель выражения (6), и, соответственно, производная $\Delta x'$ в данном интервале неположительные, а значит функция $\Delta x = f(\varphi_d)$ убывает и принимает минимальное значение при $\varphi_d = \varphi_d^{\max}$.

Для примера на рис. 3 приведены графики зависимости рассматриваемых величин от величины угла φ_d , полученные при таких данных: $\Delta y=15$ м, $b=10,56$ м, $\theta=0,2$ рад, $R_d=200$ м, $R_o=200$ м.

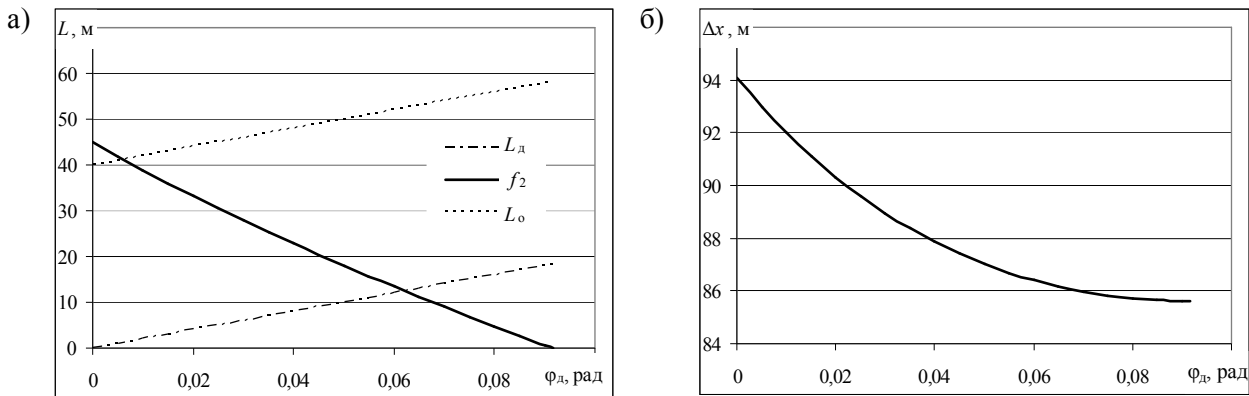


Рис. 3. Графики зависимости параметров участка сопряжения на сортировочном пути от величины угла φ_d : а) длины дополнительной L_d и основной L_o кривых, а также длина вставки f_2 ; б) разность координат Δx

Как видно из приведенных данных, функции $L_d(\varphi_d)$ и $L_o(\varphi_d)$, а также $f_2(\varphi_d)$ достаточно

близки к линейной (рис.3, а). При этом интенсивность уменьшения длины вставки f_2 существ-

венно выше, чем интенсивности увеличения длин кривых L_d и L_o с ростом величины угла φ_d . В результате этого общая длина участка сопряжения и, соответственно, разность координат Δx уменьшается (рис.3, б); следует отметить, что зависимость $\Delta x(\varphi_d)$ существенно нелинейная и асимптотически приближается к своему минимальному значению, когда угол φ_d достигает максимума и, соответственно, становится равной нулю. Указанное обстоятельство необходимо учитывать при выборе рациональной конструкции пучков путей.

Как следует из выражения (3), на величину Δx оказывают влияние радиусы основной и дополнительной кривых R_o, R_d . Для анализа этого влияния на рис. 4 приведены графики зависимости величины Δx от радиуса R_o , полученные при указанных выше данных; расчеты выполнены при величине вставки $f_2 = 0$ и соответствующем максимальном значении угла $\varphi_d = \varphi_d^{\max}$.

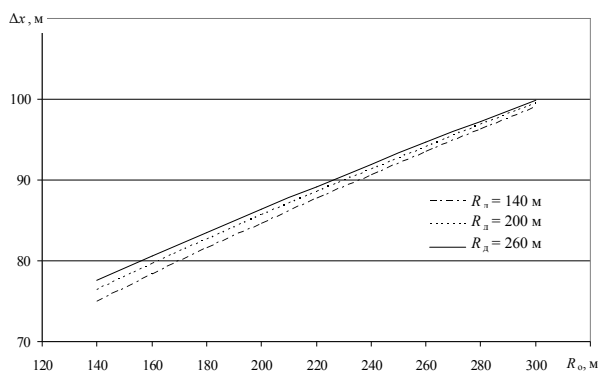


Рис. 4. Графики зависимости величины Δx от радиуса основной кривой $\Delta x=f(R_o)$ при различных значениях радиуса дополнительной кривой R_d

Как видно из приведенного рисунка, уменьшение радиуса основной кривой R_o позволяет существенно сократить величину Δx и, соответственно, уменьшить координату x_{kki} ; в то же время величина радиуса дополнительной кривой R_d влияет на величину Δx незначительно, особенно при больших радиусах основной кривой R_o . Указанные результаты необходимо учитывать при выборе рациональной конструкции участков сопряжения на сортировочных путях пучков горочной горловины.

Таким образом, выполненные исследования показали, что при любых значениях θ и Δy координата x_{kki} имеет минимальную величину при наименьших допустимых радиусах кривых R_o, R_d и отсутствии вставок ($f_1 = 0, f_2 = 0$); при этом величина угла поворота дополнительной кривой φ_d является максимальной (рис. 5).

Тогда для получения рациональной конструкции соединения путей в пучке предварительно необходимо на каждом сортировочном пути найти максимальный угол φ_d^{\max} дополнительной сопрягающей кривой. Указанный угол может быть найден из выражения (2) при значениях $f_1 = 0, f_2 = 0$:

$$\varphi_{di}^{\max} = \arccos\left(\frac{b \sin \theta + R_d \cos \theta + R_o - \Delta y}{R_d + R_o}\right) - \theta \quad (7)$$

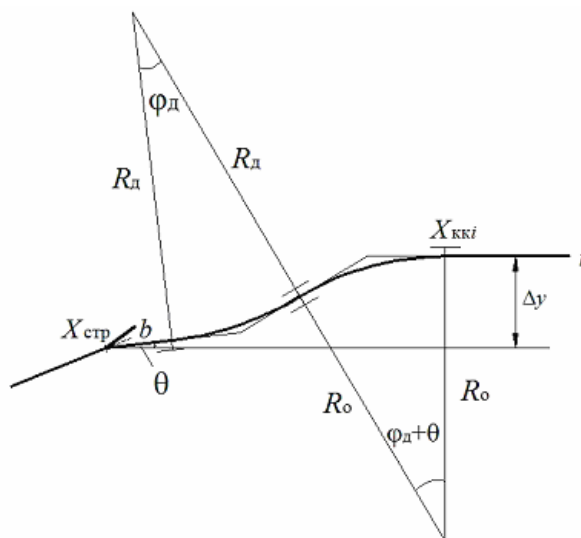


Рис. 5. Схема участка сопряжения при максимальной величине угла поворота дополнительной кривой φ_d .

После нахождения максимальных углов дополнительных сопрягающих кривых, необходимо для каждого сортировочного пути пучка найти, соответственно, минимальное значение координаты x_{kki} конца основной сопрягающей кривой, после чего определить путь с максимальной величиной x_{kk}^{\max} . При этом величина x_{kki} определяется в соответствии с (3) как:

$$x_{kki} = x_{стрj} + b \cos \theta + R_d \sin(\theta + \varphi_d) - R_d \sin \theta + R_o \sin(\theta + \varphi_d) \quad (8)$$

где $x_{стрj}$ – координата центра перевода последней разделительной стрелки.

Сортировочный путь, на котором координата конца основной сопрягающей кривой является максимальной в пучке ($x_{kki} = x_{kk}^{\max}$), назван ограничивающим. После определения ограничивающего пути на остальных путях пучка выполняется уменьшение абсолютной величины угла дополнительной кривой так, чтобы не нарушалось условие $x_{kki} \leq x_{kk}^{\max}$. При этом, соответствующее значение угла φ_{di} для некоторого

пути может быть определено из системы уравнений, полученной с использованием выраже-

$$\begin{cases} \Delta y_i = b \sin \theta + R_d \cos \theta - R_d \cos(\theta + \varphi_d) + f_2 \sin(\theta + \varphi_d) + R_o - R_o \cos(\theta + \varphi_d); \\ \Delta x_i = b \cos \theta + R_d \sin(\theta + \varphi_d) - R_d \sin \theta + f_2 \cos(\theta + \varphi_d) + R_o \sin(\theta + \varphi_d). \end{cases} \quad (9)$$

где Δx_i – максимально допустимое расстояние от центра последнего разделительного стрелочного перевода до конца основной сопря-

ний (2), (3):

гающей кривой ($\Delta x_i = x_{\text{кк}}^{\text{max}} - x_{\text{стр}}$).

Из первого уравнения системы (9) можно найти длину вставки f_2 :

$$f_2 = \frac{\Delta y_i - b \sin \theta - R_d \cos \theta + R_d \cos(\theta + \varphi_d) - R_o + R_o \cos(\theta + \varphi_d)}{\sin(\theta + \varphi_d)} \quad (10)$$

После подстановки значения f_2 (10) во второе уравнение системы (9) и выполнения необходимых преобразований может быть получено

$$(\Delta x_i - b \cos \theta + R_d \sin \theta) \sin(\theta + \varphi_d) + (b \sin \theta + R_d \cos \theta + R_o - \Delta y_i) \cos(\theta + \varphi_d) = R_d + R_o \quad (11)$$

Разделив обе части равенства (11) на $(\Delta x_i - b \cos \theta + R_d \sin \theta)$ получим

$$\sin(\theta + \varphi_d) + \frac{(b \sin \theta + R_d \cos \theta + R_o - \Delta y_i) \cos(\theta + \varphi_d)}{(\Delta x_i - b \cos \theta + R_d \sin \theta)} = \frac{R_d + R_o}{(\Delta x_i - b \cos \theta + R_d \sin \theta)} \quad (12)$$

Для решения данного уравнения целесообразно ввести вспомогательный угол ξ (рис. 6), полагая, что

$$\frac{(b \sin \theta + R_d \cos \theta + R_o - \Delta y_i)}{(\Delta x_i - b \cos \theta + R_d \sin \theta)} = \text{tg} \xi \quad (13)$$

выражение, позволяющее найти соответствующую величину угла φ_{di} :

лено в виде:

$$\begin{aligned} \sin(\theta + \varphi_d) + \frac{\sin \xi}{\cos \xi} \cos(\theta + \varphi_d) &= \\ &= \frac{R_d + R_o}{\Delta x_i - b \cos \theta + R_d \sin \theta} \end{aligned} \quad (14)$$

Умножив обе части уравнения (14) на $\cos \varphi_d$, получим

$$\begin{aligned} \cos \xi \cdot \sin(\theta + \varphi_d) + \sin \xi \cdot \cos(\theta + \varphi_d) &= \\ = \frac{(R_d + R_o) \cos \xi}{\Delta x_i - b \cos \theta + R_d \sin \theta} \end{aligned} \quad (15)$$

откуда минимально допустимая величина угла φ_{di} равна

$$\varphi_d = \arcsin \left(\frac{(R_d + R_o) \cos \xi}{\Delta x_i - b \cos \theta + R_d \sin \theta} \right) - (\theta + \xi) \quad (16)$$

В заключение следует отметить, что на тех путях пучка, на которых величина угла поворота дополнительной кривой $\varphi_{di} = 0$ и при этом выполняется условие $x_{\text{кк}i} \leq x_{\text{кк}}^{\text{max}}$, целесообразно увеличивать значение радиуса R_o ; это позволит улучшить условия скатывания отцепов на такие пути.

Таким образом, предложенная методика позволяет сократить длину горочной горловины и за счет этого повысить качество конструкции

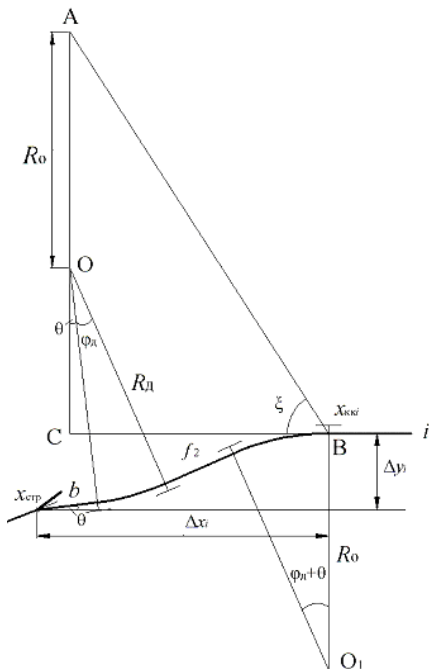


Рис. 6. Схема определения минимально допустимого угла φ_{di}

Тогда уравнение (11) может быть представ

сортировочной горки. Как показала проверка, использование данной методики позволяет сократить длину горочной горловины на 20–30 м. В результате увеличивается полезная длина путей сортировочного парка, уменьшается расчетная высота горки, а также снижаются эксплуатационные расходы на расформирование составов, и, таким образом, повышается качество проектирования сортировочных горок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бузанов, С. П. Проектирование механизированных и автоматизированных сортировочных устройств [Текст] / С. П. Бузанов, А. М. Карпов, М. А. Рыцарев. – М.: Транспорт, 1965. – 232 с.

2. Бобровский, В. И. Автоматизация проектирования стрелочных горловин сортировочных парков [Текст] / В. И. Бобровский // Совершенствование технических устройств и технологии управления процессом расформирования составов на сортировочных горках: Межвуз. сб. научн. тр. – Д.: ДИИТ, 1986. – С. 42–49.

3. Чернов, В. Н. Автоматизация масштабного проектирования и расчета сортировочных горок [Текст] / В. Н. Чернов // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ., 2004, №4. – С. 83–87.

4. Бобровский, В. И. Модели, методы и алгоритмы автоматизированного проектирования железнодорожных станций [Текст]: монография // В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин. – Д.: Изд-во Маковецкий, 2010. – 156 с.

5. Бобровский, В. И. Совершенствование конструкции плана путевого развития горочных горловин [Текст] / В. И. Бобровский, А. И. Колесник, А. С. Дорош // Транспортні системи та технології перевезень: Зб. наук. праць Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 1 – Д.: ДПТ, 2011. – С. 27-33.

6. Бобровский, В. И. Оптимизация параметров элементов плана сортировочных путей [Текст] / В.И. Бобровский, А.И. Колесник, А.С. Дорош // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 38 – Д.: ДПТ, 2011. – С. 35-40.

Поступила в редколлегию 01.10.2013.

Принята к печати 05.10.2013.