УДК 656.212.5:681.3

В. И. БОБРОВСКИЙ, А. В. КУДРЯШОВ (ДИИТ)

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАСФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

Розроблено метод вирішення задачі оптимізації режиму розформування составу, що дозволяє врахувати багаторазові розділення його відчепів.

Разработан метод решения задачи оптимизации режима расформирования состава, позволяющий учесть многократные разделения его отцепов.

A method of solving the optimization problem for the mode of breaking up a train, allowing to take into account multiple divisions of its cuts, is developed.

Выбор режима расформирования составов в значительной степени влияет на качество сортировочного процесса на сортировочных горках. Оптимальное управление роспуском состава предполагает определение таких режимов торможения (РТ) его отцепов, при которых обеспечиваются наилучшие условия их разделения на стрелках, а также выполняются требования прицельного регулирования скорости. Задаче оптимизации режима расформирования составов посвящен целый ряд научных работ [1–4], в которых предложены различные критерии оптимальности и методы ее решения.

Решение задачи оптимизации РТ отцепов состава в нелинейной постановке было получено в [1]. Для решения использовались методы прямого поиска – комплексный метод Бокса и метод случайного поиска. В качестве целевой функции был выбран минимальный интервал δt между отцепами состава на разделительных стрелках

$$f = \min\left\{\delta t_i = t_{oi} + t_{i+1}(q_{i+1}) - \tau_i(q_i)\right\},\quad i = 1,\ldots,n-1, \tag{1}$$

где q_i, q_{i+1} – параметры, характеризующие РТ, соответственно, i-го и (i+1)-го отцепов.

При этом в результате оптимизации находят такой режим расформирования состава $\boldsymbol{q} = \{q_1, q_2, \ldots, q_n\}$, при котором $f \to \max$.

В работе [2] для решения задачи оптимизации РТ отцепов используются градиентные методы (метод Фиакко и Мак-Кормика, а также метод допустимых направлений). В этой связи сформулированная в [1] задача оптимизации была преобразована в гладкую путем введения дополнительной переменной, имеющей смысл нижней границы для всех δt_i (1); последние в этом случае переходят в ограничения.

Основным недостатком методов [1, 2] является то, что в них максимизируется один (минимальный) интервал δt между отцепами всего состава, однако не оптимизируется распределение интервалов в других его частях.

Ликвидировать указанный недостаток позволяет многошаговый двухэтапный метод оптимизации РТ отцепов состава, основанный на идеях динамического программирования [3]. Метод позволяет максимизировать не только минимальный интервал $\delta t_{\min}$, но и ряд других, близких к нему интервалов $\delta t_i > \delta t_{\min}$ за счет выравнивания их величин с интервалами в смежных парах отцепов состава. Поиск оптимального режима расформирования состава осуществляется в два этапа, на первом из которых выполняется условная оптимизация, а на втором – безусловная. Однако данный метод является достаточно громоздким и не всегда обеспечивает необходимую точность решения, поскольку целевая функция в данной задаче является негладкой.

Итерационный метод оптимизации, предложенный в [4], позволяет решить задачу поиска таких РТ, при которых максимизируется не только минимальный интервал в составе, но и интервалы между отцепами в неблагоприятных группах за счет некоторого их уменьшения в соседних более благоприятных группах. Данный метод основан на локальной оптимизации РТ среднего отцепа критической группы из трех смежных отцепов состава. Выбор критической группы на очередной итерации определяется максимальной абсолютной величиной разности интервалов на разделительных стрелках в двух парах смежных отцепов, определяемой для всех групп состава.

Следует отметить, что при оптимизации РТ в [1–4] учитываются интервалы разделения только между смежными отцепами состава. Между тем, как показали исследования [5, 6], при роспуске составов в процессах разделения на стрелках участвуют не только смежные отцепы, но и отцепы, разделенные в составе одним или несколькими другими отцепами (несмежные отцепы). При этом установлено [5], что при определенных РТ интервалы на разделительных стрелках между несмежными отцепами могут оказаться меньше допустимых. Как показали исследования [6], число разделений несмежных отцепов (вторичных разделений) при расформировании достаточно длинных составов может даже превышать число разделений смежных отцепов и поэтому их необходимо учитывать при решении задач, направленных на повышение качества интервального регулирования на горках.

Недостатком рассмотренных работ [1–4] является и то, что в них при решении задачи оптимизации РТ моделирование торможения отцепов осуществляется при равномерном распределении погашаемой энергетической высоты во всей зоне действия тормозной позиции. Это не вполне соответствует реальному процессу торможения, который может осуществляться лишь в некоторой части указанной зоны, что приводит к изменению времени скатывания отцепов и влияет на рассчитанную величину интервалов на разделительных элементах [7]. Поэтому в данной статье разработана новая методика оптимизации режима расформирования состава, позволяющая учесть многократные разделения его отцепов на стрелках и использующая адекватную модель торможения отцепов.

Все множество разделений отцепов состава может быть представлено верхней треугольной матрицей $\|\sigma\|$ номеров разделительных стрелок [6], строкам и столбцам которой поставлены в соответствие номера путей назначения W_i последовательности n отцепов состава (рис. 1). Элементами σ_{ij} матрицы ($i < j$) являются номера стрелочных позиций, на которых разделяются маршруты i-го и j-го отцепов, следующих, соответственно, на пути W_i и W_j. В каждой строке и в каждом столбце матрицы $\|\sigma\|$ может быть не более N ненулевых элементов $\sigma_{ij} \neq 0$. Методика, позволяющая определить все элементы матрицы номеров стрелок $\|\sigma\|$ для расформируемого состава, приведена в [6].

$$\begin{array}{c|cccccc}
 & W_1 & W_2 & W_3 & \dots & W_{n-1} & W_n \\
\hline
W_1 & 0 & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \dots & \sigma_{1,n-1} & \sigma_{1,n} \\
W_2 & & 0 & \sigma_{23} & \dots & \sigma_{2,n-1} & \sigma_{2,n} \\
W_3 & & & 0 & \dots & \sigma_{3,n-1} & \sigma_{3,n} \\
\dots & & & & \dots & \dots & \dots \\
W_{n-1} & & & & & 0 & \sigma_{n-1,n} \\
W_n & & & & & & 0
\end{array}$$

Рис. 1. Верхняя треугольная матрица номеров разделительных стрелок отцепов состава

Главные диагональные элементы матрицы $\sigma_{ij} = 0$. Элементы диагонали, смежной с главной, $\sigma_{i,i+1} \neq 0$, $i = 1, \dots, n-1$, определяют номера стрелок разделения последовательности смежных отцепов состава. Остальные ненулевые элементы матрицы представляют номера стрелок множества вторичных разделений отцепов данного состава

Задачей оптимизации режима расформирования состава для повышения качества интервального регулирования скорости является максимизация интервалов на стрелках между всеми парами разделяющихся отцепов состава. Поэтому в качестве критерия оптимизации целесообразно использовать вектор интервалов между отцепами состава, построенный с учетом многократных разделений каждого из них.

$$\boldsymbol{\delta t} = (\delta t_1, \delta t_2, \dots, \delta t_c) \to \max \qquad (2)$$

где c – общее число разделений отцепов в составе с учетом вторичных.

Каждый интервал δt_i в (2) можно рассматривать как частный критерий; при этом, исходя из особенностей задачи интервального регулирования, все частные критерии δt_i следует считать равнозначными, поскольку между ними количественно не определяются отношения предпочтения. Кроме того, частные критерии δt_i являются однородными, поскольку они имеют одинаковую размерность.

Управление процессом расформирования состава, которое определяет значение вектора δt и, следовательно, качество интервального регулирования, может быть представлено вектором РТ n отцепов состава:

$$\mathbf{R}=\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_\mathrm{n}\} \qquad (3)$$

При этом, режим торможения отдельного отцепа состава $\mathbf{r}_i$ характеризуется векторами скоростей $\mathbf{U}$ выхода отцепа из ТП и условных координат $\mathbf{x}$ точек начала торможения на ТП [7]:

$$
\begin{aligned}
\mathbf{r}_i &= (\mathbf{U}_i, \mathbf{x}_i) \\
\mathbf{U}_i &= (U_i', U_i''), \quad \mathbf{U}_i \in \Omega_i \\
\mathbf{x}_i &= (x_i', x_i''), \quad x_i' \in [0, 1], \, x'' \in [0, 1],
\end{aligned} \qquad (4)
$$

где U_i', U_i'' – скорости выхода отцепа, соответственно, из ВТП и СТП;

x_i', x_i'' – условные координаты точек начала торможения отцепа на ВТП и СТП.

Такое представление режима $\mathbf{r}_i$ позволяет корректировать выбор зоны торможения отцепа на ТП для поиска наилучших условий его разделения с другими отцепами состава.

Для учета взаимосвязи между интервальным и прицельным регулированием скорости отцепов, а также существующих ограничений скорости их скатывания при выборе режимов торможения $\mathbf{r}_i$ контролируется принадлежность вектора $\mathbf{U}_i$ области Ω_i допустимых скоростей выхода отцепа из ВТП и СТП [8]. Указанные области должны быть определены для каждого отцепа состава и являются ее ограничениями.

В результате решения задачи оптимизации необходимо найти такой режим расформирования состава $\mathbf{R}^*$ (3), при котором вектор интервалов (2) максимален:

$$\boldsymbol{\delta t}_{\max} = \max \{\boldsymbol{\delta t}(\mathbf{R}^*)\}.$$

При этом, как показывает анализ, получить подобное решение не представляется возможным, поскольку интервалы δt_i в (2) не являются независимыми. Действительно, изменение режима торможения некоторого отцепа приводит к изменению значений соответствующего множества интервалов δt_i вектора $\boldsymbol{\delta t}$. При этом изменяются те интервалы, с которыми данный отцеп имеет разделения на стрелках, в т.ч. вторичные. В этой связи очевидна необходимость контроля всех указанных интервалов в процессе решения задачи оптимизации. С этой целью при выборе РТ i-го отцепа необходимо рассматривать кортеж всех отцепов состава, разделяющихся с этим отцепом (рис. 2). В данный кортеж, кроме управляемого i-го отцепа и смежных с ним отцепов с номерами $p_1 = i-1$ и $q_1 = i+1$, необходимо включить все разделяющиеся с i-м отцепы с номерами $p_2, \ldots, p_N$, расположенные в составе до него ($p_N < \ldots < p_1 = i-1$), а также отцепы с номерами $q_2, \ldots, q_N$, расположенные после него ($q_1 = i+1 < \ldots < q_N$); здесь N – число стрелочных позиций на горке.

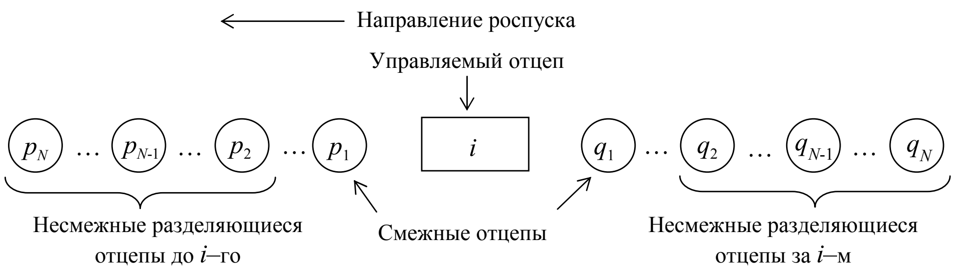

Рис. 2. Схема кортежа управляемого отцепа

Число отцепов в кортеже зависит от комбинации их назначений в составе и от конструкции горочной горловины; максимальное число разделяющихся отцепов, расположенных до и после управляемого отцепа, равняется $2N$.

Состав кортежа i-го отцепа может быть однозначно определен по данным матрицы $\|\sigma\|$ номеров разделительных стрелок отцепов состава (см. рис. 1). При этом номера p_m отцепов, находящихся до i-го отцепа, соответствуют ненулевым значениям σ_{ij}, расположенным в i-м столбце матрицы выше i-го диагонального элемента $\sigma_{ii} = 0$:

$$p_m = \left\{ k \middle| \sigma_{ki} \neq 0, \quad m = 1, \ldots, N, \quad k = i-1, \ldots, 1 \right\}.$$

Номера q_l отцепов, находящиеся за i-м отцепом, соответствуют ненулевым значениям σ_{ij}, расположенным в i-й строке матрицы правее i-го диагонального элемента $\sigma_{ii} = 0$:

$$q_l = \left\{ j \middle| \sigma_{ij} \neq 0, \quad l = 1, \ldots, N, \quad j = i+1, \ldots, n \right\}.$$

Тогда частным критерием оптимальности режима торможения i-го отцепа, определяемым при фиксированных режимах всех разделяющихся с ним отцепов, будет абсолютная величина разности минимальных интервалов с отцепами, расположенными в составе до и после i-го:

$$\Delta t_i(\mathbf{r}_i) = \left| \min\left\{ \delta t_{p_1,i}, \ldots, \delta t_{p_N,i} \right\} - \min\left\{ \delta t_{i,q_1}, \ldots, \delta t_{i,q_N} \right\} \right| \to \\ \to \min. \qquad (5)$$

Интервалы $\delta t_{p,i}$ и $\delta t_{i,q}$ на стрелках $\sigma_{p,i}$ разделения i-го отцепа с отцепами p_m, расположенными до i-го, и, соответственно, на стрелках $\sigma_{i,q}$ разделения i-го с отцепами q_l, расположенными после i-го, определяются как

$$\delta t_{p,i}(\mathbf{r}_i) = t_{0,(p,i)} + t_i(\mathbf{r}_i, \sigma_{p,i}) - \tau_p(\sigma_{p,i});$$
$$\delta t_{i,q}(\mathbf{r}_i) = t_{0,(i,q)} + t_q(\sigma_{i,q}) - \tau_i(\mathbf{r}_i, \sigma_{i,q}),$$

где $t_{0,(p,i)}$, $t_{0,(i,q)}$ – начальные интервалы на вершине горки между i-м отцепом и отцепами p_m и q_l, входящими в кортеж;

$t_i(\mathbf{r}_i, \sigma_{p,i})$, $\tau_i(\mathbf{r}_i, \sigma_{i,q})$ – время скатывания i-го отцепа от момента отрыва до момента, соответственно, занятия изолированного участка (ИЗУ) разделительной стрелки $\sigma_{p,i}$ и освобождения стрелки $\sigma_{i,q}$;

$\tau_p(\sigma_{p,i})$ – время скатывания отцепа p_m от момента отрыва до момента освобождения ИЗУ разделительной стрелки $\sigma_{p,i}$;

$t_q(\sigma_{i,q})$ – то же, отцепа q_l до занятия ИЗУ стрелки $\sigma_{i,q}$.

Величины $t_{0,(p,i)}$ и $t_{0,(i,q)}$ определяются суммированием начальных интервалов между соответствующими смежными отцепами:

$$t_{0,(p,i)} = \sum_{j=p}^{i-1} t_{0,j}, \quad t_{0,(i,q)} = \sum_{j=i}^{q-1} t_{0,j}.$$

Очевидно, что оптимальным при фиксированных режимах скатывания всех отцепов кортежа, кроме управляемого, будет такой режим торможения $\mathbf{r}_i^*$, при котором $\Delta t_i(\mathbf{r}_i^*) = 0$. Действительно, как видно из рис. 3, любое отклонение $\mathbf{r}_i$ от оптимального значения $\mathbf{r}_i^*$ приводит к уменьшению одного из интервалов $\delta t_{p,i}$ или $\delta t_{i,q}$ по сравнению с их максимальными значениями $\delta t_{\max}$ при $\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i^*$.

Если же функция $\Delta t_i(\mathbf{r}_i)$ не имеет нулевого значения в интервале [$\mathbf{r}_{i,\min}$, $\mathbf{r}_{i,\max}$] (рис. 3, *б*, *в*), то в этом случае в качестве оптимального РТ $\mathbf{r}_i^*$ принимается соответствующее граничное значение $\mathbf{r}_i$, при котором $\Delta t_i(\mathbf{r}_i)$ минимально. Так, если в области изменения $\mathbf{r}_i$ функция $\Delta t_i(\mathbf{r}_i)$ убывает (рис. 3, *б*), то в качестве оптимального для i-го отцепа устанавливается медленный режим $\mathbf{r}_i^* = \mathbf{r}_{i,\max}$; если же функция $\Delta t_i(\mathbf{r}_i)$ возрастает (рис. 3, *в*), то оптимальным для i-го отцепа является быстрый режим $\mathbf{r}_i^* = \mathbf{r}_{i,\min}$.

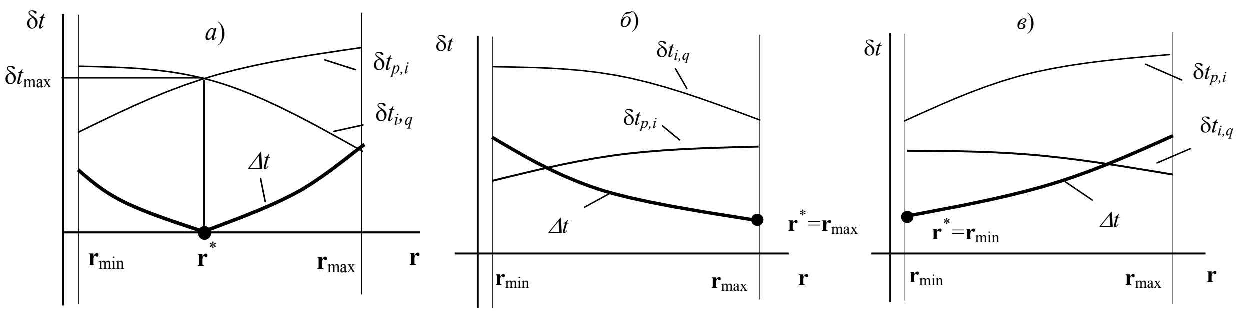

Рис. 3. Оптимизация режима торможения управляемого отцепа при использовании частного критерия Δt

Используя приведенный частный критерий Δt_i для отдельных отцепов, целевую функцию для оптимизации режима расформирования состава можно представить как

$$\Delta \mathbf{T} = \{\Delta t_2, \Delta t_3, \ldots, \Delta t_{n-1}\} \to \min. \qquad (6)$$

В данном векторе все компоненты Δt_i связаны с соответствующими отцепами $\overline{2, n-1}$ и упорядочены по их расположению в составе. При этом первый отцеп не входит в (6), поскольку в составе отсутствуют разделяющиеся с ним предшествующие отцепы. Поэтому для создания наилучших условий разделения всем последующим отцепам первому отцепу устанавливается быстрый режим скатывания $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_{1,\min}$. По той же причине в (6) не включен последний отцеп, который не имеет следующих за ним разделяющихся отцепов; для этого отцепа установлен медленный режим $\mathbf{r}_n = \mathbf{r}_{n,\max}$.

Как показывает анализ, предложенный векторный критерий (6) является более предпочтительным для решения поставленной задачи, чем рассмотренный ранее (2). Действительно, вектор $\Delta\mathbf{T}$ (6) имеет однозначную связь с вектором РТ отцепов состава $\mathbf{R}$ (3), поскольку каждому управляемому параметру $\mathbf{r}_i \in \mathbf{R}$ (режим торможения i-го отцепа) соответствует компонента Δt_i вектора $\Delta\mathbf{T}$. Наличие подобной связи существенно упрощает определение РТ для управляемого отцепа, и поэтому задача выбора режима расформирования состава была формализована как задача оптимизации с векторным критерием $\Delta\mathbf{T}$ (6).

В настоящее время существует достаточно большое число методов решения задач векторной оптимизации, выбор которых существенно зависит от особенностей задачи. При разработке методов решения многокритериальных задач возникают проблемы, связанные с выбором принципа оптимальности, определяющего свойства оптимального решения и его преимущества перед остальными допустимыми решениями.

В рассматриваемой задаче оптимизации режима расформирования состава оптимальным решением является такая совокупность РТ его отцепов (вектор $\mathbf{R}^*$), при которой общий ресурс времени для разделения отцепов на стрелках максимален и наилучшим образом распределен между всеми парами отцепов состава. При этом наилучшим является такое распределение ресурса, при котором в неблагоприятных по условиям разделения группах отцепов состава интервалы между ними максимизированы за счет некоторого уменьшения интервалов в благоприятных группах.

Для решения векторных задач оптимизации достаточно широко используют методы, в которых частные критерии должны быть упорядочены по важности [9]. При этом, отношение предпочтения между критериями устанавливается до начала оптимизации и в процессе решения не изменяется.

В то же время в данной задаче частные критерии Δt_i целевой функции $\Delta\mathbf{T}$ (6) имеют переменный приоритет, т.к. на каждом этапе оптимизации целесообразно отдавать предпочтение критерию Δt_i максимальной величины. Действительно, оптимизация РТ i-го управляемого отцепа позволит минимизировать наибольшую разность Δt_i интервалов на стрелках между разделяющимися отцепами всего состава, что существенно ускорит процесс решения задачи. Таким образом, необходимо в процессе решения задачи минимизации вектора $\Delta\mathbf{T}$ корректировать степень важности всех входящих в него частных критериев Δt_i.

В общем виде метод решения задачи оптимизации режима расформирования состава можно представить в виде следующей итеративной схемы.

Шаг 1. Упорядочить частные критерии Δt_i вектора $\Delta\mathbf{T}$ по убыванию. В полученном векторе $\Delta\mathbf{T}'$ все частные критерии $\Delta t_{z_j}^{(j)}$ строго ранжированы по важности:

$$\Delta\mathbf{T}' = \left\{\Delta t_{z_j}^{(j)}\right\}, \quad \overline{j = 1, n-2},$$
$$\Delta t_{z_1}^{(1)} > \Delta t_{z_2}^{(2)} > \ldots > \Delta t_{z_j}^{(j)} > \ldots > \Delta t_{z_{n-2}}^{(n-2)}.$$

где z_j – номер отцепа, у которого разность минимальных интервалов $\Delta t_{z_j}^{(j)}$ (5) имеет j-й ранг ($z_j \in [2, n-1]$).

Шаг 2. Выбрать отцеп z_j для оптимизации РТ. Номер отцепа z_j определяется по частному критерию $\Delta t_{z_j}^{(j)}$, имеющему максимальный ранг. Оптимизация РТ отцепа z_j возможна в том случае, если для выбранных в (5) минимальных интервалов $\delta t_{p,i}$ и $\delta t_{i,q}$, $i=z_j$, выполняется условие:

$$(\delta t_{p,i} < \delta t_{i,q} \wedge \mathbf{r}_i < \mathbf{r}_{i,\max}) \vee (\delta t_{p,i} > \delta t_{i,q} \wedge \mathbf{r}_i > \mathbf{r}_{i,\min})\ . \ (7)$$

Если данное условие не выполняется, то это означает, что для отцепа z_j установлен один из двух предельных режимов торможения (см. рис. 3, *б*, *в*), который не может быть изменен. В этом случае осуществляется переход к следующему по рангу частному критерию $\Delta t_{z_{j+1}}^{(j+1)}$ и выполняется проверка условия (7) для отцепа z_{j+1}.

Процедура выбора начинается с отцепа z_1 и продолжается до тех пор, пока для очередного отцепа z_j не будет выполнено условие (7).

В случае, если условие (7) не выполняется и для отцепа z_{n-2}, то это означает, что все отцепы состава имеют экстремальные режимы скатывания, которые не могут быть изменены, поэтому оптимизация режима расформирования данного состава прекращается.

Шаг 3. Выполнить проверку величины частного критерия $\Delta t_{z_j}^{(j)}$ для выбранного отцепа z_j. Если $\Delta t_{z_j}^{(j)} < \varepsilon$, то оптимизация режима расформирования данного состава прекращается. При этом необходимая точность определения режима расформирования ε определяется целью решения задачи и должна быть задана до его начала.

Шаг 4. Выполнить оптимизацию РТ выбранного отцепа z_j для обеспечения минимума частного критерия $\Delta t_{z_j}^{(j)}$.

Шаг 5. Рассчитать новые значения частных критериев Δt_i вектора $\Delta\mathbf{T}$ и выполнить переход к шагу 1.

На базе предложенного метода было разработано программное обеспечение, позволяющее решить задачу оптимизации режима интервального регулирования скатывающихся отцепов для расформируемого состава. Решение задачи осуществляется с использованием имитационного моделирования процесса роспуска составов. В указанной модели для каждого отцепа осуществляется выбор области допустимых скоростей выхода из ТП. При выборе оптимального режима торможения предусмотрена возможность варьирования зон торможения отцепов на тормозных позициях спускной части горки [7].

Выполненный анализ результатов оптимизации режимов расформирования группы составов показал достаточно высокую эффективность разработанного метода, который, таким образом, может быть рекомендован для расчета скоростей выхода отцепов из тормозных позиций при создании автоматизированной системы управления роспуском составов на горках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобровский, В. И. Поиск оптимальных режимов торможения на проектируемых сортировочных горках [Текст] / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1999. – №5. – С. 50-54.
2. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках [Текст] / В. И. Бобровский // Транспорт: Зб. наук. пр. – Д.: Арт-Пресс, 2000. – С. 43-47.
3. Бобровский, В. И. Многошаговый двухэтапный метод оптимизации режимов роспуска составов на горках [Текст] / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2004. – № 2. – С. 8-14.
4. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов регулирования скорости отцепов при роспуске составов на горках [Текст] / В. И. Бобровский, Н. В. Рогов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2004. – Вип. 4. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2004. – С. 174-182.
5. Бобровский, В. И. Вероятностные характеристики разделений отцепов состава на стрелках [Текст] / В. И. Бобровский, А. В. Кудряшов, Ю. В. Чибисов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 18. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 146-150.
6. Бобровский, В. И. Статистический анализ числа разделений отцепов на стрелках при расформировании составов [Текст] / В. И. Бобровский, А. В. Кудряшов, Л. О. Ефимова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 20. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 13-19.
7. Бобровский, В. И. Вплив режимів гальмування на тривалість скочування відчепів з гірки [Текст] / В. И. Бобровский, А. В. Кудряшов, Л. О. Єльникова // Зб. наук. праць. – Х.: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 102. – С. 147-156.
8. Бобровский, В. И. Ограничения режимов торможения отцепов на сортировочных горках [Текст] / В. И. Бобровский, Р. В. Вернигора, А. В. Кудряшов, Л. О. Ельникова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 27. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 30-35.
9. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход [Текст] / В. Д. Ногин. – М.: Физматлит, 2002. – 144 с.

Поступила в редколлегию 12.04.2010.
Принята к печати 15.04.2010.