УДК 656.212.5

О. И. Таранец, канд. техн. наук
Кафедра «Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте»,
Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
им. акад. В. Лазаряна

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ ОТЦЕПОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ СЛУЧАЙНЫХ ФАКТОРОВ

Статья посвящена методу оптимизации режимов торможения управляемых отцепов в расчетной группе, который, в отличие от существующих, учитывает влияние случайных факторов и позволяет использовать его для оперативного управления процессом скатывания отцепов с горки. Предложен критерий оптимизации режимов торможения отцепов состава в условиях отклонения фактических параметров отцепов от расчетных значений и неточности реализации тормозными позициями заданных режимов торможения. В исследовании используется имитационное моделирование процесса скатывания отцепов с горки. Для оптимизации режимов торможения отцепов применяется итерационный метод. Учет влияния случайных факторов, которые действуют на отцеп в процессе скатывания при оптимизации режимов торможения отцепов, позволяет повысить точность регулирования скорости отцепов. Результаты исследований могут быть использованы при разработке программных средств для технико-экономической оценки конструкций и технического обеспечения сортировочных горок в системах проектирования, а также в автоматизированных системах управления сортировочными станциями.

сортировочная горка; отцеп; режимы торможения; гарантированный интервал; область допустимых режимов торможения

Введение

Важным звеном в работе сортировочных станций, от эффективности функционирования которого существенно зависят эксплуатационные показатели, являются сортировочные горки. Повышение перерабатывающей способности сортировочных горок и качества расформирования возможно за счет интенсификации процесса расформирования составов на базе автоматизации технологических процессов, а также выбора оптимальных режимов роспуска составов [1–4]. Оптимальное управление роспуском требует определения таких режимов торможения отцепов, при которых будут обеспечены лучшие условия их разделения на стрелках и допустимая скорость следования одного отцепа к другому на сортировочных путях. Режимы торможения отдельных отцепов должны обеспечивать максимально возможные интервалы на стрелках для всех неблагоприятных по условиям разделения пар отцепов за счет оптимального их распределения по всему составу [5]. Таким образом, задача определения оптимальных режимов торможения отцепов является достаточно актуальной.

1 История вопроса

Согласно [6], для каждого отцепа существует область допустимых режимов торможения (ОДР), конфигурация и площадь которой определяются параметрами его скатывания. На трехпозиционных горках режим торможения отцепа, который скатывается, можно представить вектором $h = (h', h'', h''')$ энергетических высот, которые погашаются на верхней (ВТП), средней (СТП) и парковой (ПТП) тормозных позициях. При этом из трех указанных компонентов вектора h только два являются независимыми, так как третий может быть определен при условии обеспечения заданной скорости отцепа в точке прицеливания. В связи с этим ОДР Ω может быть представлена выпуклым многоугольником на плоскости $h'0h''$, а произвольный режим $h \in \Omega$ – вектором $h = (h', h'')$.

Ограничения, которые образуют ОДР, определяются тремя группами факторов:

– тормозной мощностью замедлителей тормозных позиций;
– режимом скатывания отцепов на спускной части горки;
– требованиями прицельного регулирования скорости отцепов.

При решении задачи оптимизации режимов торможения отцепов для условий регулируемого скатывания необходимо учитывать установленные ограничения, накладываемые на величину скорости выхода отцепов из тормозных позиций ВТП (v'_{min}, v'_{max}) на СТП (v''_{min}, v''_{max}), где скорость выхода отцепа с ПТП является зависимой от скорости выхода из СТП и должна удовлетворять требованиям прицельного торможения. Вектор значений $v = \{v', v''\}$ можно рассматривать как точку на плоскости, при этом все множество точек v образует область Ω возможных скоростей выхода отцепа из тормозных позиций спускной части горки.

Оптимизированные при таком подходе режимы удовлетворяют существующим технологическим ограничениям, но все же не являются оптимальными. В [7] необходимые интервалы между отцепами определяются с помощью аналитических выражений, в которых учитываются ходовые свойства отцепов и допустимые скорости их движения.

Впервые методика оптимизации режимов торможения была предложена проф. Ю. А. Мухой в [8]. В данной работе была поставлена задача: найти такие режимы торможения γ_i, при которых выполняются условия разделения на стрелках (интервалы $\delta t_i \geq 0$), а время роспуска минимальное. В результате формализации была сформулирована задача оптимизации с линейной целевой функцией и нелинейными ограничениями. Для упрощения решения задачи (приведения ее к задаче линейного программирования – ЛП) предложено выполнять поиск режимов торможения, задаваясь конкретными значениями скорости роспуска v_0. Изменяя значения v_0 с некоторым шагом, можно найти такое решение, при котором скорость v_0 достигает максимального значения. При такой постановке задачи не обеспечивается наилучшее распределение интервалов δt_i между парами смежных отцепов. Недостатком является также линейная аппроксимация зависимости времени скатывания отцепа до точки разделения от режима торможения $t(\gamma)$, аппроксимация эта на самом деле существенно нелинейная.

Для устранения недостатков предложенного метода оптимизации режимов торможения отцепов проф. В. И. Бобровский предлагает многошаговый двухэтапный метод оптимизации [6]. Состав, который расформировывается, можно рассматривать как некоторую физическую систему S, пошагово изменяющую свое состояние в процессе роспуска. Шагом можно считать отрыв и скатывание очередного отцепа. Процесс роспуска управляемый; управление на i-м шаге определяется режимом торможения i-го отцепа на тормозных позициях спускной части горки [8]. Управление роспуском состава с n отцепами можно представить совокупностью шаговых уравнений:

$$U = (U_1, U_2, \ ..., \ U_n). \tag{1}$$

Эффективность управления на всех шагах, кроме первого, можно оценить величиной интервала δt_{i-1} между i-м и (i – 1)-м отцепами на разделительной стрелке:

$$\delta t_{i-1} = t_{0,i-1} + t_i(q_i) - \tau_{i-1}(q_{i-1}), \ i = 2, \ ..., \ n. \tag{2}$$

Для первого шага (отцепа) величина δt не определена из-за отсутствия предыдущего отцепа.

Эффективность управления роспуском всего состава в соответствии с [6] можно оценить по величине минимального интервала между отцепами на разделительных стрелках:

$$\delta T(U) = \min\left\{\delta t_1, \delta t_2, ..., \delta t_{n-1}\right\}. \tag{3}$$

Необходимо определить, каким будет оптимальное управление, при котором минимальный интервал $\delta T\,(U)$ превращается в максимум. Для решения данной задачи разработан метод, в котором использованы идеи динамического программирования (ДП). Особенность метода заключается в том, что в задачах ДП эффективность управления всегда оценивается аддитивным или мультипликативным критериями, определяемыми по показателям эффективности отдельных шагов [6]. В данной задачи эффективность управления роспуском состава предлагается оценивать с помощью максиминного критерия $\delta T = \max\min\left\{\delta t_i\right\}$, $i = 1, ..., n-1$. Использование такого критерия эффективности управления роспуском обеспечивает максимальные интервалы между отцепами на раздельных стрелках и соответственно минимальные вероятности неразделений при заданной скорости роспуска.

Процедура поиска оптимального управления роспуском с помощью данного метода выполняется в два этапа. На первом этапе (условная оптимизация) для каждого отцепа определяется условное оптимальное управление $q_i(\tau_i)$, которое зависит от состояния системы τ перед скатыванием рассматриваемого отцепа, и условный оптимальный интервал $\delta T_i(\tau)$ на всех незаполненных путях, начиная с *i*-го. На втором этапе (безусловная оптимизация) для каждого отцепа определяется безусловное оптимальное управление. Условная оптимизация выполняется по шагам в обратном порядке – от последнего отцепа к первому, безусловная – в прямом порядке.

К.т.н. А.В. Кудряшов в своей работе [9] предлагает следующее усовершенствование метода оптимизации режимов торможения отцепов в условиях действия случайных факторов. В соответствии с принципами системного подхода необходимо рассматривать состав, который расформировывается, как систему взаимосвязанных отцепов. При этом все множество разделений отцепов состава может быть представлено верхней треугольной матрицей $\|\sigma\|$ номеров разделительных стрелок.

Целью оптимизации режима расформирования является повышение качества интервального регулирования скорости отцепов за счет максимизации интервалов на разделительных стрелках между всеми парами отцепов состава:

$$\delta t = (\delta t_1, \delta t_2, ..., \delta t_c) \to \max, \tag{4}$$

где c – общее количество разделений отцепов в составе с учетом повторных.

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

$$R = \{r_1, r_2, ..., r_n\}. \tag{5}$$

Режим торможения отдельного отцепа состава r_i характеризуется векторами скоростей U выхода отцепов из ТП и условных координат x точек начала торможения на ТП:

$$r_i = (U_i, x_i), \quad U_i = (U_i', U_i''), \quad U_i \in \Omega_i; \tag{6}$$

$$x_i = (x_i', x_i''), \; x_i' \in [0,1], \; x'' \in [0,1],$$

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 позволяет корректировать выбор зоны торможения отцепа на ТП для поиска лучших условий его разделения с другими отцепами состава.

В результате решения задачи оптимизации необходимо найти такой режим расформирования состава R^*, при котором вектор интервалов максимальный:

$$\delta t_{\max} = \max\{\delta t(R^*)\}. \quad (7)$$

В процессе оптимизации состав постепенно разбивается на группы, в которых происходит выравнивание величин смежных интервалов. Такой результат достигается за счет использования резервов интервалов между отцепами состава, находящихся в группах с благоприятными условиями разделения, и перераспределения этих резервов между отцепами состава, находящимися в группах с неблагоприятными условиями разделения. В результате оптимизации устанавливаются такие режимы торможения отцепов состава, при которых обеспечиваются максимально возможные интервалы на разделительных стрелках для всех неблагоприятных по условиям разделения групп отцепов. Границами групп являются отцепы с экстремальными режимами скатывания (быстрый (Б), медленный (М)).

Таким образом, проблема оптимизации режимов торможения в условиях действия случайных факторов является недостаточно решенной и требует дальнейших исследований.

2 Критерий оптимизации в условиях действия случайных факторов

В качестве основного метода, который используется для оптимизации режимов торможения отцепов, выбран итерационный метод [10]. Этот метод позволяет найти в составе, который расформировывают, группы последовательных отцепов, близких по условиям разделения, и установить для них такие режимы торможения, при которых интервалы на разделительных стрелках для всех пар отцепов группы одинаковы. Это достигается путем увеличения минимальных интервалов между отцепами за счет их уменьшения в смежных парах.

Итерационный метод основан на локальной оптимизации режима торможения среднего отцепа критической группы из трех смежных отцепов, обусловленной на каждом шаге итерации. Критической считается группа отцепов, для которой абсолютная величина разности интервалов на разделительных стрелках во второй и в первой парах отцепов $|f_i(q_i)|$ максимальная:

$$f_i(q_i) = \delta t_i(q_i, q_{i+1}) - \delta t_{i-1}(q_{i-1}, q_i), \; i \in [2, n-1]. \quad (8)$$

Оптимальным для среднего отцепа критической группы является тот режим торможения q_i, при котором наименьший из интервалов δt_i, δt_{i+1} достигает максимума:

$$\delta t_i^* = \max_{q_i \in Q_i} \min\left\{\delta t_{i-1}(q_i), \delta t_i(q_i)\right\}. \quad (9)$$

Недостатком этого метода является то, что он не позволяет учесть отклонения фактических параметров отцепов от расчетных значений и неточность реализации заданных режимов торможения на тормозных позициях при выборе оптимальных режимов торможения.

Увеличение интервалов между отцепами необходимо для обеспечения резервов времени для разделительных элементов, которые будут достаточными для разделения отцепов в условиях отклонения фактических параметров отцепов от расчетных значений и неточной реализации тормозными позициями заданных режимов торможения [11, 12]. Величина интервалов для разделительных элементов рассматривается как ограничение и возникает необходимость оценки величины δt_i. При известных параметрах отцепов и точной реализации замедлителями заданных режимов торможения интервал времени между отцепами должен быть достаточным для изменения состояния разделительного элемента $t_{\text{рэ}}$ (перевод стрелки, затормаживания или растормаживание замедлителя):

$$\delta t_{\text{г}} \geq t_{\text{рэ}}. \quad (10)$$

При случайных параметрах отцепов и неточной реализации замедлителями заданных режимов торможения интервал времени между i-м и $(i-1)$-м отцепами $\delta t_{\min,i}$ должен включать дополнительный резерв времени $t_{\text{рез},i}$ для компенсации погрешности в определении моментов освобождения и занятия отцепами разделительных элементов:

$$\delta t_{\min,i} = t_{\text{рэ}} + t_{\text{рез},i}. \quad (11)$$

В стохастических условиях критерий оптимизации можно представить как

$$\delta t_i(r_i, r_{i+1}, \sigma_i) = t_{0i} + t_{i+1}(r_{i+1}, \sigma_i) - \tau_i(r_i, \sigma_i) - q_{x1}(r_{i+1}, \sigma_i) - q_{x2}(r_i, \sigma_i). \quad (12)$$

Для критической группы отцепов абсолютная величина разности интервалов на разделительных стрелках во второй и в первой парах отцепов $\left|f_i(q_i)\right|$ максимальная, в результате получим:

$$f_i(q_i) = \delta t_i(r_i, r_{i+1}) - \delta t_i(r_{i-1}, r_i) - q_{x1}\sigma_{i-1} - q_{x2}\sigma_i, \in [2, n-1]. \quad (13)$$

Исследования показали, что на разделительных элементах от вершины горки до ПТП и от ПТП к точке прицеливания интервалы между отцепами значительно отличаются друг от друга.

Установлено, что величина интервала между отцепами на разделительном элементе является случайной величиной, которая имеет нормальный закон распределения. На рис. 1 приведен график распределения случайной величины интервала между отцепами.

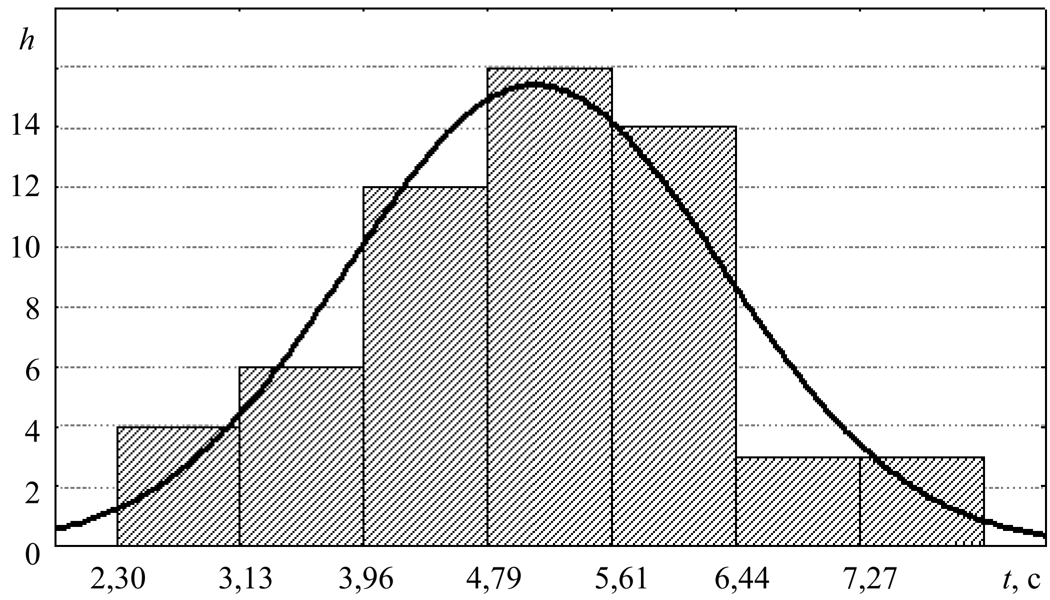

Рис. 1. Гистограмма распределения случайной величины интервала между отцепами

Случайная величина гарантированного интервала между отцепами является также случайной величиной с нормальным законом распределения и задается функцией Лапласа:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2e^2}}, \tag{14}$$

где μ, σ – параметры распределения.

Величины интервалов между отцепами являются зависимыми случайными величинами, поэтому для нахождения параметров случайной величины гарантированного интервала используем методы теории вероятностей [13]:

$$M(\delta t_i + \delta t_{i+1}) = M[\delta t_i] + M[\delta t_{i+1}];$$

$$M[\delta t_i] + M[\delta t_{i+1}] = M[\delta t_\text{г}]; \tag{15}$$

$$\sigma[\delta t_i + \delta t_{i+1}] = \sqrt{D[\delta t_i + \delta t_{i+1}]} = \sigma[\delta t_\text{г}]. \tag{16}$$

Подставив известные значения, получим

$$M[\delta t_\text{г}] = 6{,}835 + 1{,}277 = 8{,}112 \text{ с};$$

$$\sigma[\delta t_{\text{г}}] = \sqrt{0,271 + 1,277} = 1,244 \text{ с.}$$

Если принять вероятность попадания случайной величины гарантированного интервала в некоторый отрезок $\delta t_{\text{г}}^{\min} \le \delta t_{\text{г}} \le \delta t_{\text{г}}^{\max}$, т. е. $\rho(\delta t_{\text{г}}^{\min} < \delta t_{\text{г}} < \delta t_{\text{г}}^{\max}) =$ = 0,005, получим

$$\rho(\delta t_{\text{г}}^{\min} < \delta t_{\text{г}} < \delta t_{\text{г}}^{\max}) = \int_{\delta t_{\text{г}}^{\min}}^{\delta t_{\text{г}}^{\max}} f(\delta t_{\text{г}}) = F(\delta t_{\text{г}}^{\max}) - F(\delta t_{\text{г}}^{\min}). \quad (17)$$

Нормальную функцию обычно обозначают $\Phi(t)$, её значение приведено в [13–15]:

$$t = \frac{\delta t_{\text{г}} - M[\delta t_{\text{г}}]}{\sigma[\delta t_{\text{г}}]}. \quad (18)$$

Поскольку случайная величина интервала между отцепами имеет нормальный закон распределения, величина гарантированного интервала между отцепами является также нормально распределенной случайной величиной с параметрами:

$$M[\delta t_i] + M[\delta t_{i+1}] = M[\delta t_{\text{г}}]; \quad (19)$$

$$\sigma[\delta t_i + \delta t_{i+1}] = \sqrt{D[\delta t_i + \delta t_{i+1}]} = \sigma[\delta t_{\text{г}}]. \quad (20)$$

На рис. 2 приведены результаты оптимизации режимов торможения с помощью итерационного метода при известных характеристиках отцепов (рис. 2, *а*) и при случайных (рис. 2, *б*).

Заключение

Основным недостатком существующих методов оптимизации режимов торможения отцепов является то, что они не позволяют учитывать отклонения фактических параметров отцепов от расчетных значений и неточности реализации на тормозных позициях заданных режимов торможения.

Исследования показали, что учет влияния случайных факторов, которые действуют на отцеп в процессе скатывания при оптимизации режимов торможения отцепов, позволяет повысить точность регулирования скорости между отцепами.

Применение предложенного критерия оптимизации режимов торможения отцепов обеспечивает уменьшение вероятности неразделений отцепов с 0,005 до 0,002.

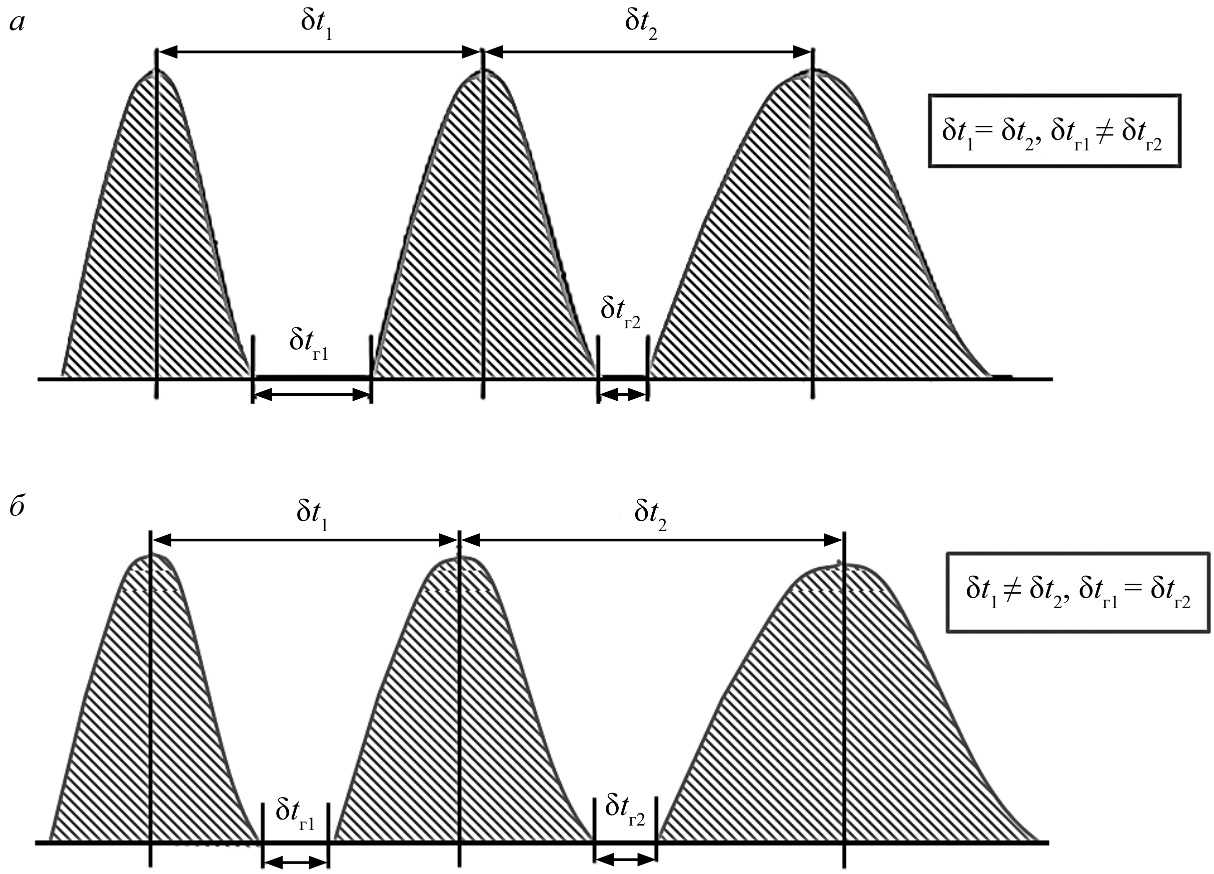

Рис. 2. Результаты оптимизации режимов торможения отцепов:
а – решение задачи в детерминированной постановке;
б – решение задачи в стохастической постановке

Библиографический список

1. George W., Zeranski R. Untersuchung am Ablaufberg mittels EDV in der Ingenieurausbildung an der IngST Gotha, Eisenbahnpraxis, 1985, 29, no 1, S. 24–25.
2. Joule Speed Control Systems for Marshalling Yards. – URL : www.argent.co.za.
3. Peschel M. Modernization of Marshalling Yard Antwerp-North, Rail Engineering International, 1988, № 1, pp. 6–9.
4. Kube K. Modernization of Marshalling Yards in North America, Progressive Railroading, 2002, no 7, pp. 50–52.
5. Пособие по применению правил и норм проектирования сортировочных устройств / Ю. А. Муха, Л. Б. Тишков, В. П. Шейкин и др. – Москва : Транспорт, 1994. – 220 с.
6. Бобровский В. И. Теоретические основы совершенствования конструкции и технологии работы железнодорожных станций : дис. д-ра техн. наук : 05.22.20 / В. И. Бобровский. – Днепропетровск, 2002. – 534 с.
7. Пилипченко П. А. Моделирование на ЭЦВМ роспуска составов на сортировочной горке / П. А. Пилипченко // Вопросы механизации и автоматизации сортировоч-

ного процесса на станциях : тр. ДИИТа. – Вып. 125/7. – Днепропетровск, 1971. – С. 33–42.
8. Муха Ю. А. Оптимизация режимов торможения скатывающихся отцепов при расформировании составов на сортировочной горке / Ю. А. Муха // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях : тр. ДИИТа. – Вып. 181/10. – Днепропетровск, 1976. – С. 17–23.
9. Кудряшов А. В. Определение рациональных режимов скатывания отцепов с сортировочных горок / А. В. Кудряшов // Вісник ДІІТу. – Вип. 28. – Днепропетровск : ДІІТ, 2009. – С. 149–154.
10. Бобровский В. И. Анализ эффективности режимов торможения отцепов на сортировочных горках / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Н. В. Рогов // Вісник ДІІТ. – Вип. 11. – Днепропетровск : ДІІТ, 2006. – С. 103–111.
11. Бобровский В. И. Вероятностные характеристики разделений отцепов состава на стрелках / В. И. Бобровский, А. В. Кудряшов, Ю. В. Чибисов // Вісник ДІІТу. – Вип. 18. – Днепропетровск : ДІІТ, 2007. – С. 146–150.
12. Козаченко Д. М. Моделювання роботи сортувальної гірки в умовах невизначеності параметрів відчепів та характеристик навколишнього середовища / Д. М. Козаченко, М. І.Березовий, О. І.Таранець // Вісник Дніпр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 16. – С. 73–76.
13. Справочник по математике [Справочник по математике научных работников и инженеров] / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1974. – 832 с.
14. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений / А. К. Митропольский. – Москва : Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1971. – 576 с.
15. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества / Р. Шторм ; под ред. Н. С. Райбмана. – Москва : Мир, 1970. – 368 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. С. Марковым
Поступила в редакцию 13.10.2014
Контактная информация: taranetsolga@rambler.ru