

УДК 656.212.5:681.3

В. И. БОБРОВСКИЙ<sup>1\*</sup>, И. Я. СКОВРОН<sup>2\*</sup>, А. С. ДОРОШ<sup>3\*</sup>, Е. Б. ДЕМЧЕНКО<sup>4\*</sup>,  
В. В. МАЛАШКИН<sup>5\*</sup>, Т. В. БОЛВАНОВСКАЯ<sup>6\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (068) 444 63 95, эл. почта: 1973bvi@gmail.com, ORCID 0000-0001-8622-2920

<sup>2\*</sup> Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (095) 230 50 34, эл. почта: norvoks@gmail.com, ORCID 0000-0003-0697-2698

<sup>3\*</sup> Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (066) 927 84 62, эл. почта: dorosh.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5393-0004

<sup>4\*</sup> Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (097) 799 16 75, эл. почта: e.b.dmch@gmail.com, ORCID 0000-0003-1411-6744

<sup>5\*</sup> Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (068) 409-61-85, эл. почта: malaxa79@gmail.com, ORCID 0000-0002-5650-1571

<sup>6\*</sup> Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373-15-12, эл. почта: valentinovna.upp@gmail.com, ORCID 0000-0001-6462-8524

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСФОРМИРОВАНИЯ МНОГОГРУППНЫХ СОСТАВОВ НА ДВУСТОРОННЕЙ ГОРКЕ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

**Цель.** Целью работы является улучшение качества процесса расформирования многогруппных составов на горках малой мощности вспомогательного двустороннего сортировочного устройства. **Методика.** Исследование процесса расформирования составов на сортировочной горке выполнялось посредством имитационного моделирования. **Результаты.** Получены результаты исследования условий разделения отцепов расчетной группы на горках малой мощности, оборудованных одной или двумя тормозными позициями. **Научная новизна.** Усовершенствована имитационная модель процесса расформирования составов за счет изменения системы управления движением отцепов, что, в отличие от существующих моделей, позволяет выбрать оптимальный режим торможения отцепов на горках малой мощности. **Практическая значимость.** Разработанная методика поиска оптимальных режимов торможения отцепов на горках малой мощности может применяться при проектировании специализированных сортировочных устройств с целью повышения качества расформирования многогруппных составов.

**Ключевые слова:** двустороннее вспомогательное сортировочное устройство; горка малой мощности; имитационное моделирование; режим торможения.

### Введение

В сложившихся условиях функционирования транспортной системы Украины эффективная организация работы по обслуживанию клиентов любым видом транспорта невозможна без применения наиболее прогрессивных подходов. Анализ комплекса технологических операций по обслуживанию железнодорожным транспортом конечного пользователя позволяет отметить, что к операциям, не связанным непосредственно с движением, но имеющих значительную продолжительность относится, в

частности, операция формирования состава на станции; при формировании многогруппного состава продолжительность этой операции существенно возрастает.

В этой связи интересным представляется исследование вопроса совершенствования процесса формирования многогруппных составов с целью его интенсификации, что неизбежно будет способствовать сокращению совокупной продолжительности логистической цепи поставки грузов клиентам железнодорожного транспорта, тем самым обеспечив ему дополнительное конкурентное преимущество.

## Анализ литературных источников и постановка задачи исследования

Актуальность проблемы интенсификации процесса формирования многогруппных составов вызвала значительное число научных трудов, в которых ее решение предлагалось осуществлять с помощью принципиально различных подходов, но, как правило, за счет улучшения параметров одного или нескольких факторов, влияющих на указанный процесс.

В то же время, совершенствование отдельных сторон проблемы формирования многогруппных составов, как правило, не позволяет получить существенный эффект, так как с этой целью следует искать комплексное решение указанной проблемы. При этом среди вопросов, которые целесообразно решать системно, имеет смысл в первую очередь отметить следующие: совершенствование технологии формирования многогруппных составов, оптимизация параметров используемых с этой целью технических средств, а также совершенствование системы управления маневровыми операциями с указанными составами (при использовании различных сортировочных устройств).

Известно, что существенное улучшение показателей процесса формирования может быть достигнуто за счет выбора рациональной технологии формирования. Этому вопросу посвящено множество публикаций ученых разных стран мира [1-5]. В случае когда полученного эффекта недостаточно дополнительный эффект можно получить путем совершенствования технических средств формирования, а также применения горочных сортировочных устройств [6-9].

Как было отмечено в [8] в ряде случаев имеет смысл для подборки местных вагонов использовать двустороннее вспомогательное сортировочное устройство (ДВСУ), представляющее собой горку малой мощности, расположенную между двумя группировочными парками ГрП1 и ГрП2, и имеющую параметры профиля, позволяющие вести роспуск составов как в направлении парка ГрП1 так и парка ГрП2.

Схематически продольный профиль двух ГММ указанного ДВСУ, расположенного между группировочными парками ГрП1 и ГрП2 приведен в [8] и показан на рис. 1.

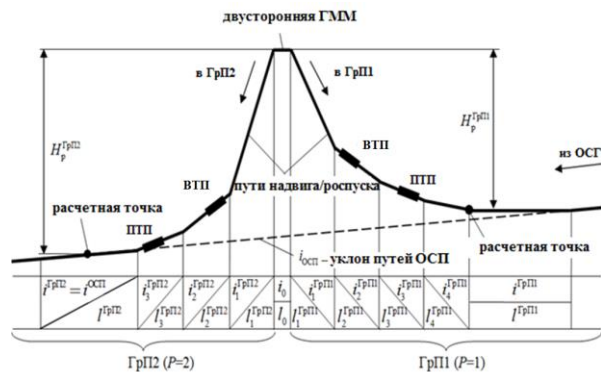


Рис. 1. Схематическое изображение продольного профиля двух ГММ ДВСУ между ГрП1 и ГрП2

Несмотря на то, что вопросы, связанные с совершенствованием системы управления маневровыми операциями с составами в научных публикациях представлены достаточно широко [9-15], однако применительно к ГММ, а тем более к упомянутому ДВСУ, данный вопрос не решался.

В [16] авторами была выполнена оптимизация профиля двух ГММ предложенного ДВСУ методом Бокса-Уилсона, а также выполнены базовые исследования процесса расформирования многогруппных составов на горках малой мощности.

Таким образом, в данной статье поставлена задача поиска рациональных режимов торможения отцепов при расформировании многогруппных составов на горках малой мощности ДВСУ, оборудованных одной или двумя тормозными позициями.

### Цель

Целью работы является улучшение качества работы процесса расформирования многогруппных составов на горках малой мощности двустороннего вспомогательного сортировочного устройства.

### Методика

С целью исследования процесса формирования многогруппных составов на двусторонней горке малой мощности с использованием методики, рекомендаций и выводов, изложенных в [9-15], была разработана имитационная модель процесса расформирования составов. В модели основным элементом является скатывание отцепов состава, расформируемого с горки. Одним из основных элементов управляемого скатывания отцепов из горки является их торможения замедлителями. В разработанной имитационной модели регулирования скорости

скатывания отцепов осуществляется путем выбора необходимой погашаемой энергетической высоты, а их торможение осуществляется равномерно по всей зоне действия замедлителей тормозной позиции.

Целью торможения является регулирование скорости скатывающихся отцепов. Различают два вида регулирования:

– интервальное регулирование, которое необходимо для обеспечения интервалов между отцепами на разделительных элементах (стрелках, замедлителях);

– прицельное регулирование, которое осуществляется для обеспечения докатывания отцепов к вагонам на сортировочных путях с допустимой скоростью.

Интервальное регулирование осуществляется верхней тормозной позицией (ВТП); прицельное регулирование осуществляется парковой тормозной позицией (ПТП) (см. рис. 1).

Основным элементом имитационной модели сортировочного процесса является модель скатывания отдельных отцепов с горки, которая позволяет определить скорость и время их скатывания на основе решения дифференциального уравнения их движения [9].

Модель скатывания содержит описание маршрута скатывания и осевую модель отцепа [9, 10]. При этом маршрут скатывания разбит на элементы, границами которых являются характерные точки плана путевого развития: вершина горки, границы стрелочных переводов, кривых, тормозных замедлителей и изолированных участков. Продольный профиль маршрута представлен с помощью кубического сплайна.

Процесс скатывания отцепа описывается дифференциальным уравнением  $v' = f(s, v)$ , для решения которого используется метод Рунге-Кутты IV порядка с постоянным шагом  $\Delta s$ . При этом на каждом шаге  $\Delta s$  моделирование перемещения отцепа выполняется с помощью дифференциального уравнения первого порядка, в котором независимой переменной является путь:

$$v' = \frac{dv}{ds} = \frac{g'(i - w_0 - w_{св} - w_{ск} - w_T) \cdot 10^{-3}}{v}, v > 0,$$

где  $w_0$  – основное удельное сопротивление движению отцепа, кгс/тс;

$w_{св}$  – дополнительное удельное сопротивление движению от воздушной среды, кгс/тс;

$w_{ск}$  – дополнительное удельное сопротивление движению, возникающее при прохождении стрелок и кривых;

$v$  – скорость отцепа, м/с;

$g'$  – ускорение свободного падения с учетом инерции вращающихся частей вагона, м/с<sup>2</sup>.

На отдельных шагах величина интегрирования  $\Delta s$  может корректироваться таким образом, чтобы обеспечить непрерывность всех сил, действующих на отцеп в пределах шага.

Мгновенное значение уклона, по которому движется центр тяжести отцепа, когда его первая ось находится в точке  $s$ , определяется как

$$i(s) = \frac{1}{Q_{отц}} \sum_{j=1}^{m_{отц}} \frac{Q_{Bj}}{n_{Bj}} \sum_{r=1}^{n_{Bj}} i(s_{rj})$$

где  $m_{отц}$  – число вагонов в отцепе;

$Q_{Bj}$ ,  $n_{Bj}$  – соответственно, вес и число осей вагона;

$Q_{отц}$  – вес отцепа;

$s_{rj}$  – координата точки, в которой находится  $r$ -я ось  $j$ -го вагона;

$i(s_{rj})$  – значение уклона, на котором находится  $r$ -я ось  $j$ -го вагона.

Уклон  $i(s_{rj})$  представляет собой первую производную отметки профиля горки  $h(s_{rj})$ , описанную кубическим сплайном

$$i(s_{rj}) = C_{2k} + 2C_{3k}(s_{rj} - s_k) + 3C_{4k}(s_{rj} - s_k)^2$$

где  $C_{2k}, C_{3k}, C_{4k}$  – коэффициенты сплайна;

$s_k$  – узел сплайна ( $s_k < s_r < s_{k+1}$ ).

Расчет удельных сил сопротивления от стрелок и кривых  $w_{ск}$  выполняется по формуле:

$$w_{ск}(v) = C_{св.ск} v^2,$$

где  $C_{св.ск}$  – средневзвешенный коэффициент сопротивления стрелок и кривых.

Значение величины  $C_{св.ск}$  определяется на каждом шаге моделирования

$$C_{св.ск} = \sum_{j=1}^{m_{отц}} q_{Bj} \sum_{i=\alpha_j}^{\omega_j} C_{скi}$$

Значение  $C_{скi}$  для отдельной оси отцепа зависит от ее положения  $s_{rj}$  на пути скатывания

и определяется как

$$C_{ски} = \frac{0,56\theta_n + 0,23\varphi_n}{l_{ски}},$$

если  $s_{ij} \in [s_{ски}, s_{ски} + l_{ски}]$ , иначе  $C_{ски} = 0$ .

Здесь  $\theta_n$  – тип  $n$ -го элемента  $\theta_n = 0$  – кривая;  $\theta_n = 1$  – стрелка);

$\varphi_n$  – угол поворота кривой  $n$ -го элемента, градусы;

$s_{ски}, l_{ски}$  – соответственно, координата начала и длина  $n$ -го элемента, м.

Для расчета  $C_{СК}$  в модели горки содержится информация о размещении и параметрах стрелок и кривых на путях скатывания.

Для расчета  $w_{св}$  в модели отцепа содержатся данные о весе и типе каждого вагона, а в таблицах нормативно-справочной информации хранятся данные для определения значения коэффициентов воздушного сопротивления  $C_x$ ,  $C_{xx}$  на каждом шаге  $\Delta s$ . Полученные выражения используются для имитационного моделирования скатывания отцепов с горки. При этом весь путь отцепа разбивается на довольно маленькие интервалы  $\Delta s$ . Как начальная рассматривается точка отрыва  $S_0$  отцепа от состава ( $S_j = S_0$ ); при этом скорость отцепа в этот момент равняется скорости надвига состава ( $V_j = V_0$ ), а время  $T_j = 0$ .

На двухпозиционной горке режим торможения скатывающегося отцепа может быть представлен значениями энергетических высот ( $h', h''$ ), погашаемыми как на верхней тормозной позиции (ВТП) так и на парковой тормозной позиции (ПТП). При этом с двух указанных величин только одна ( $h'$ ) является независимой, в то время как величина  $h''$  определяется из условия обеспечения заданной скорости отцепа в точке прицеливания (см. рис. 2).

Режим торможения отцепа имеет ограничения, которые определяются тремя группами факторов:

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

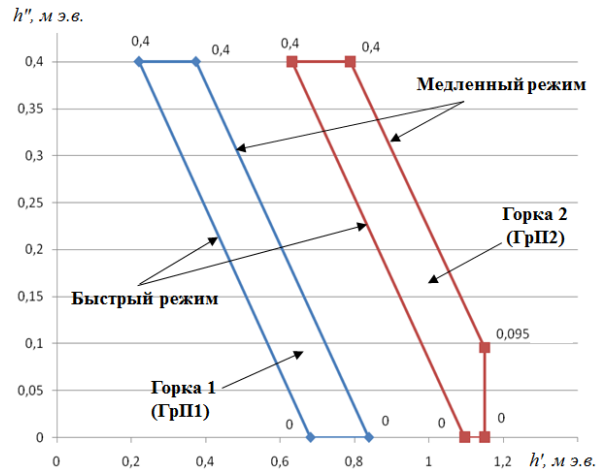


Рис. 2. ОДР торможения отцепов для двух ГММ ДВСУ

Множество допустимых режимов торможения скатывающегося отцепа может быть представлено многоугольником на плоскости  $h', h''$  (область допустимых режимов (ОДР) торможения). При этом любая точка ОДР  $\mathbf{h} = \{h', h''\}$  определяет режим торможения, которое обеспечивает движение отцепа с допустимой скоростью на спускной части горки, а также его докатывание к точке прицеливания с безопасной скоростью.

На рис. 2 указаны ограничения режимов торможения для хорошего бегуна, скатывающегося в зимних условиях (X) для двух горок ДВСУ, каждая из которых оборудована двумя тормозными позициями. Принято, что ВТП оснащена 1хКНП-5, а ПТП – 2хРНЗ-2м.

Ограничения ОДР определяются минимальной  $u'_{\min}$  и максимальной  $u'_{\max}$  скоростями выхода отцепа с ВТП, при которых выполняются условия прицельного регулирования. При этом минимальная скорость должна обеспечивать его докатывание к точке прицеливания со скоростью  $V_{п} = 0$  без торможения на ПТП ( $h'' = 0$ ). При максимальной скорости полностью используется мощность ПТП ( $h'' = H''$ ), а скорость отцепа в точке прицеливания равняется допустимой ( $V_{п} = V_{пд}$ ).

Ограничения по тормозной мощности тормозных позиций можно представить как:

$$\begin{cases} 0 \leq h' \leq H', \\ 0 \leq h'' \leq H''. \end{cases}$$

где  $H', H''$  – суммарная номинальная тормозная мощность ВТП и ПТП.

Максимальная скорость выхода отцепа с ВТП  $u'_{\max}$  и, соответственно, минимальная погашаемая высота  $h'_{\min}$  определяется из условия обеспечения допустимой скорости  $v_d$  входа этого отцепа на ПТП:

$$h'_{\min} = \min \{ h' \mid v''(h') \leq v_d'' \}.$$

Минимальная скорость выхода с ВТП  $u'_{\min} = 0$ , однако, для того, чтобы торможения не привело к остановке отцепа на позиции, принята  $u'_{\min} = 0,05$  м/с; при этом максимальная погашаемая высота  $h'_{\max}$  определяется как:

$$h'_{\max} = \max \{ h' \mid u'(h') > u'_{\min} \}.$$

Режимы торможения отцепов на ВТП и ПТП определяются требованиями прицельного регулирования скорости. Для их выполнения необходимо, чтобы все режимы, принадлежащие ОДР ( $h \in \Omega$ ), обеспечивали докатывание отцепа к точке прицеливания  $s_{\Pi}$  с допустимой скоростью  $v_d$  ( $0 \leq v_d \leq v_{\text{ПД}}$ ); при этом торможения на ПТП должно выполняться в рамках ее номинальной мощности ( $0 \leq h'' \leq H''$ ). Указанные ограничения определяются минимальной  $u''_{\text{пр.мин}}$  и максимальной  $u''_{\text{пр.мак}}$  скоростями выхода отцепа с ПТП, которые выполняют условия прицельного регулирования. При этом минимальная скорость  $u''_{\text{пр.мин}}$  должна обеспечивать его докатывание к расчетной точке со скоростью  $v_d$ . Максимальная скорость  $u''_{\text{пр.мак}}$  отвечает такому режиму скатывания, при котором скорость отцепа в расчетной точке равняется допустимой ( $v_{\Pi} = v_{\text{ПД}}$ ). Допустимые режимы торможения, которые обеспечивают соответственно, максимальную  $u''_{\text{пр.мак}}$  и минимальную  $u''_{\text{пр.мин}}$  скорости выхода отцепа из ПТП, можно записать как:

$$h''_{\text{пр.мин}} = \{ h'' \mid v_{\Pi} = v_{\text{ПД}} \},$$

$$h''_{\text{пр.мак}} = \{ h'' \mid v_{\Pi} = 0 \}.$$

Интересным представляется исследование влияния режимов торможения отцепа на скорость и время его скатывания с горки. Так, в ОДР существуют два предельных режима – быстрый (Б) и медленный (М); соответствующие графики скорости скатывания бегуна X

при этих режимах приведены на рис. 3.

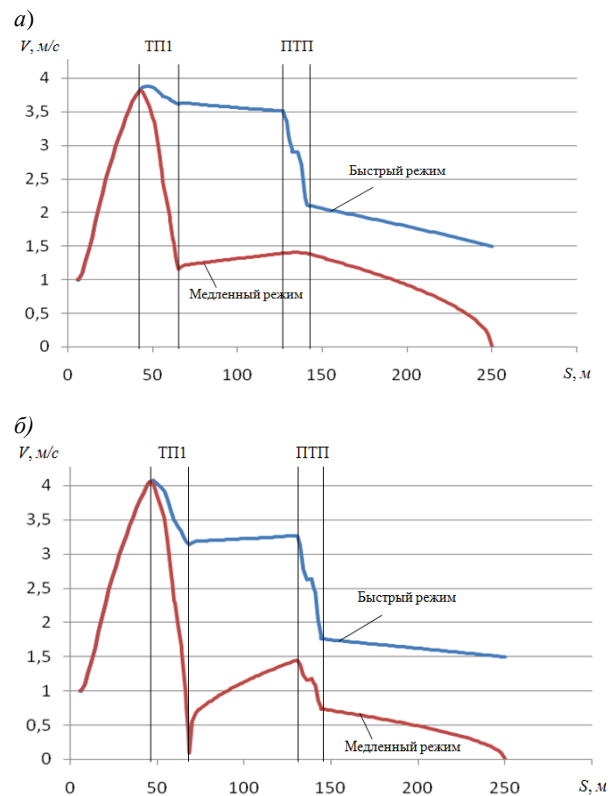


Рис. 3. Графики скорости скатывания бегуна X:  
а) скатывание с горки в ГрП1,  
б) скатывание с горки в ГрП2

Как видим из рис. 3, при быстром режиме, скорость отцепа между тормозными позициями максимальная, а при медленном режиме (М) – минимальная.

Очевидно, что выбор режима торможения значительно влияет на скорость и продолжительность скатывания отцепа (см. рис. 3), исходя из этого, интервалы между отцепами также изменяются. Поэтому при расформировании состава необходимо для каждого отцепа выбрать в ОДР (рис. 2) такой режим торможения, при котором обеспечиваются наилучшие условия его разделения на стрелках со смежными отцепами.

Задачей интервального регулирования скорости отцепов является обеспечение их надежного разделения на стрелках. С этой целью необходимо выбирать такие режимы торможения отцепов, при которых обеспечиваются достаточные интервалы между ними для перевода разделительных стрелок. Для решения данной задачи необходимо предварительно исследовать влияние режимов торможения отцепов на условия их разделения на стрелках.

Условия разделения отцепов можно характеризовать величиной интервала  $\delta t$  между

ними на стрелке:

$$\delta t_1 = t_{01} + t_2^{\sigma_1} - \tau_1^{\sigma_1},$$

где  $t_0$  – начальный интервал между отцепами на вершине горки, с;

$\tau_1^{\sigma}$  – время движения 1-го отцепа от момента отрыва от состава к моменту освобождения изолированного участка стрелки  $\sigma$ , с;

$t_2^{\sigma}$  – время движения 2-го отцепа от момента отрыва от состава к моменту занятия изолированного участка стрелки  $\sigma$ , с.

Изменяя режим торможения 2-го отцепа, можно изменять время и условия его разделения с 1-м отцепом.

Условия разделения пары отцепов 1-2 тем лучше, чем больше интервал  $\delta t_1$  между ними на стрелке. Действительно, чем больше интервал  $\delta t_1$ , тем больше гарантия успешного разделения пары отцепов при случайных отклонениях реализованного режима торможения от рассчитанного. Поэтому в паре отцепов наилучшим для 2-го отцепа будет максимальное торможение, при котором интервал  $\delta t_1$  максимальный.

При исследованиях влияния режимов торможения отцепов на условия их разделения на стрелках, как правило, рассматривают группу из 3-х отцепов. В группе интервал между 2-м и 3-м отцепами определяется аналогично интервалу  $\delta t_1$ .

Очевидно, что в группе из 3-х отцепов увеличение торможения 2-го отцепа приведет к улучшению условий разделения отцепов 1-2. Однако при этом увеличится время, которое приведет к уменьшению  $\delta t_2$ , что ухудшит условия разделения отцепов 2-3. Поэтому обычно режим торможения отцепа выбирают с учетом его разделения с обоими соседними отцепами. При этом возникает задача выбора оптимального режима торможения среднего отцепа в группе из трех смежных отцепов.

Наилучшим при интервальном регулировании считается такой режим торможения среднего отцепа в группе, при которой интервалы со смежными отцепами на разделительных стрелках максимальные. Условие оптимальности режима торможения среднего отцепа можно записать как

$$\min\{\delta t_1, \delta t_2\} \rightarrow \max, h_2 = \{h', h''\} \in \Omega \text{ (ОДР)}$$

Отцепы состава существенным образом различаются параметрами – длине, весу, сопро-

тивлению, дальности пробега в парк и др. Случайное размещение в составе отцепов с разными параметрами приводит к образованию групп отцепов, которые отличаются условиями разделения на стрелках. В благоприятных группах (как правило, это группы длинных отцепов) на вершине горки между отцепами получаются довольно большие интервалы, которые сохраняются к разделительным элементам и обеспечивают надежное разделение таких отцепов. В неблагоприятных группах (группы одиночных отцепов) интервалы между отцепами на вершине горки минимальные, что может в дальнейшем привести к их неразделению на стрелках в случае неправильного выбора режима торможения.

В этой связи, при оптимизации режимов торможения отцепов необходимо установить указанные группы в составе и определить такие режимы торможения, которые максимизируют интервалы между отцепами на стрелках в неблагоприятных группах за счет некоторого их уменьшения в соседних благоприятных группах.

Решение задачи оптимизации режимов интервального регулирования скорости отцепов в такой постановке возможно при использовании предложенного итерационного метода. Метод разрешает найти в расформировываемом составе 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 одинаковые.

Итерационный метод основан на локальной оптимизации режима торможения среднего отцепа критической группы из трех смежных отцепов, которая определяется на каждом шаге итерации.

Критической считается группа отцепов, для которой абсолютная величина разницы интервалов на разделительных стрелках во второй и в первой парах отцепов максимальная:

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

Учитывая локальный характер оптимизации, интервалы  $\delta t_{i-1}$ ,  $\delta t_i$ , соответственно, между отцепами первой и второй пар критической группы рассматриваются как функции режима торможения  $i$ -го отцепа  $q_i$  при фиксированных режимах  $(i-1)$ -го и  $(i+1)$ -го отцепов:

$$\begin{cases} \delta t_{i-1}(q_i) = t_{0,i-1} + t_i(q_i, \sigma_{i-1}) - \tau_{i-1}(\sigma_{i-1}) \\ \delta t_i(q_i) = t_{0,i} + t_{i+1}(\sigma_i) - \tau_i(q_i, \sigma_i) \end{cases}$$

При этом для избранной критической группы должно выполняться одно из двух условий:

если  $f_i(q_i) > 0$ , то  $q_i < q_{i,\max}$ ,

или

если  $f_i(q_i) < 0$ , то  $q_i > q_{i,\min}$ .

Если же ни одно из этих условий не выполняется, то это значит, что для  $i$ -го отцепта установлен один из двух предельных режимов торможения, который не может быть изменен.

### Научная новизна и практическая значимость

Выполненные исследования позволяют сделать вывод о том, что предложенная методика поиска оптимальных режимов торможения отцепов на горках малой мощности может применяться при проектировании специализированных сортировочных устройств с целью повышения качества расформирования многогруппных составов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Месарош Пал. Способы многогруппной сортировки вагонов на вытяжках / Месарош Пал // Железнодорожный транспорт. – 1963. – № 11. – С. 85-88.
2. Тишкин, Е. М. Интенсификация местной работы / Е. М. Тишкин, В. М. Макаров, В. С. Климанов // Железнодорожный транспорт. – 1986. – № 3. – С. 54-58.
3. Макаров, В. М. Оптимизация формирования многогруппных поездов и развоза местного груза / В. М. Макаров, В. В. Олейников // Тр. ВНИИУП МПС России. – 2002. – № 1. – С. 99-109.
4. Бобровский, В. И., Сковрон И. Я. Совершенствование технологии формирования многогруппных составов / В. И. Бобровский, И. Я. Сковрон // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 19. – С. 88-93.
5. Jacob, R. Multistage methods for freight train / Rico Jacob, Peter Martoon, Jens Maue, Marc Nunkesser // 7th Workshop on algorithmic approaches for transportation modeling, optimization and systems. – 2007. – P. 158-174.
6. Григорьев, В. В. К вопросу применения вспомогательных сортировочных устройств в железнодорожных узлах / В. В. Григорьев // Вопросы рационализации железнодорожных перевозок. – Свердловск : УЭМИИТ, 1983. – С. 19-24.
7. Карасёв, С. В. Выбор рациональной конструкции группировочного парка с учетом различной вместимости путей / С. В. Карасёв, В. М. Богомолов, А. И. Сулимко // Актуальные направления

научных исследований: от теории к практике : VIII Міжнародна науково-технічна конференція. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – Т. 2. – С. 44-48. – ISSN 2412-0510.

8. Бобровский, В. И. Двустороннее сортировочное устройство для интенсификации процесса формирования многогруппных составов / В. И. Бобровский, И. Я. Сковрон // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – Вып. 2(23). – С. 7-12.

9. Бобровский, В. И. Математическая модель для оптимизации интервального регулирования скорости отцепов на горках / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2003. – № 3. – С. 3-8.

10. Бобровский, В. И. Итерационный метод оптимизации режимов торможения отцепов состава / В. И. Бобровский, Н. В. Рогов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2003. – № 5. – С. 4-5.

11. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов расформирования составов на сортировочных горках / В. И. Бобровский, А. В. Кудряшов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 32. – С. 224-229.

12. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках : монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Н. П. Божко, Н. В. Рогов, Н. И. Березовый, А. В. Кудряшов. – Днепропетровск : Изд-во Маковецкий, 2010. – 260 с.

13. Козаченко, Д. М. Ефективні режими гальмування відцепів на сортувальних гірках / Д. Н. Козаченко // Транспортні системи та технології перевезень. – 2011. – Вип. 2. – С. 55-59.

14. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов расчетной группы состава / В. И. Бобровский, А. С. Дорош // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – Вип. 1(43). – С. 104-112. – doi: 10.15802/stp2013/9582.

15. Бобровский, В. И. Дослідження впливу параметрів керування уповільнювачами на точність гальмування відцепів / В. И. Бобровский, А. С. Дорош // Транспортні системи та технології перевезень. – 2013. – Вип. 6. – С. 10-14.

16. Бобровский, В. И. Оптимизация параметров профиля двустороннего сортировочного устройства для формирования многогруппных составов / В. И. Бобровский, И. Я. Сковрон // Транспортні системи і технології перевезень. ». – 2017. – Вип. 14. – С. 5-13. – doi: 10.15802/tstt2017/123144.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Огарем А. Н. (Украина)*

Поступила в редколлегию 18.11.2018.

Принята к печати 20.11.2018.

В. І. БОБРОВСЬКИЙ, І. Я. СКОВРОН, А. С. ДОРОШ, Є. Б. ДЕМЧЕНКО,  
В. В. МАЛАШКІН, Т. В. БОЛВАНОВСЬКА

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗФОРМУВАННЯ БАГАТОГРУПНИХ СОСТАВІВ НА ДВОСТОРОННІЙ ГІРЦІ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

**Мета.** Метою роботи є покращення якості процесу розформування багатогрупних составів на гірках малої потужності допоміжного двостороннього сортувального пристрою. **Методика.** Дослідження процесу розформування составів на сортувальній гірці виконувалося за допомогою імітаційного моделювання. **Результати.** Отримано результати дослідження умов поділу відцепів розрахункової групи на гірках малої потужності, обладнаних однією або двома гальмівними позиціями. **Наукова новизна.** Удосконалено імітаційну модель процесу розформування составів за рахунок зміни системи управління рухом відцепів, що, на відміну від існуючих моделей, дозволяє вибрати оптимальний режим гальмування відцепів на гірках малої потужності. **Практична значимість.** Розроблена методика пошуку оптимальних режимів гальмування відцепів на гірках малої потужності може бути використана при проектуванні спеціалізованих сортувальних пристроїв з метою підвищення якості розформування багатогрупних составів.

*Ключові слова:* двосторонній допоміжний сортувальний пристрій; гірка малої потужності; імітаційне моделювання; режим гальмування.

V. BOBROVSKY, I. SKOVRON, A. DOROSH, Ye. DEMCHENKO,  
V. MALASHKIN, T. BOLVANOVSKA

## SIMULATION MODELING OF THE PROCESS OF DISBANDING MULTIGROUP COMPOSITIONS ON A DOUBLE-SIDED LOW POWER HUMPS

**Goal.** The work purpose is to improve the quality of the multi-group trains breaking-up process on a low-power hump of the auxiliary two-sided sorting device. **Method.** The train breaking-up process researching was carried out by means of simulation modeling. **Results.** The study results of the cuts separation conditions of the designed group on the low-power hump, which has one or two retardation positions are obtained. **Scientific novelty.** The simulation model of the train breaking-up process was improved by changing the system of the cuts movement controlling, which, unlike the existing models, allows to select the cuts optimal braking mode on the low-power hump. **Practical significance.** The developed method of searching for the cuts optimal braking modes on low-power hump can be used for designing specialized sorting devices in order to improve the quality of the multi-group trains breaking-up.

*Keywords:* double-sided auxiliary sorting device; low power hump; simulation modeling; braking mode.