

УДК 656.212.5

Козаченко Д.М., к.т.н., доцент (ДНУЖТ)

**КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ
ОТЦЕПОВ РАСЧЕТНОЙ ГРУППЫ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ
СЛУЧАЙНЫХ ФАКТОРОВ**

Введение. Основным средством, обеспечивающим повышение безопасности расформирования поездов, улучшение условий труда и уменьшение эксплуатационных расходов на переработку вагонопотоков на сортировочных станциях является автоматизация расформирования составов на сортировочных горках. При этом, главным направлением повышения качества сортировочного процесса является разработка новых алгоритмов для автоматизации управления роспуском составов. Решение этой задачи дает возможность улучшить качество сортировочного процесса за счет совершенствования программного обеспечения, а не за счет усложнения технических средств, что позволяет сократить стоимость систем управления роспуском.

Постановка задачи. Показатели работы горки существенно зависят от выбора режимов роспуска составов. Оптимальное управление роспуском требует определения таких режимов торможения отцепов, при которых обеспечиваются наилучшие условия их разделения на стрелках, а также выполняются требования прицельного регулирования скорости.

При решении задачи оптимизации режимов торможения отцепов состава в качестве элементарной расчетной группы обычно рассматривается группа из трех отцепов с управляемым средним отцепом. Величины интервалов на разделительных элементах в расчетной группе могут быть определены по формуле

$$\begin{aligned}\delta t_1(q_2) &= t_{1,2} + t_2(q_2, s_1) - \tau_1(s_1), \\ \delta t_2(q_2) &= t_{2,3} + t_3(s_2) - \tau_2(q_2, s_2),\end{aligned}\tag{1}$$

где $t_{1,2}, t_{2,3}$ – начальные интервалы на вершине горки, соответственно в первой и второй парах элементарной группы;

$t(s)$ – время скатывания отцепа от момента отрыва до момента занятия изолированного участка (ИЗУ) разделительной стрелки s ;

$\tau(s)$ – то же, до момента освобождения ИЗУ разделительной стрелки s .

Решение задачи оптимизации режимов торможения среднего (управляемого отцепа) в расчетной группе из трех отцепов представлено в [1]. В данной работе обоснованы условия распределения работы по торможению отцепов между первой (ВТП) и второй (СТП) тормозными позициями. На основании результатов имитационного моделирования и аналитических исследований в данной работе доказано, что оптимальный режим торможения однозначно зависит от соотношения координат занятия $s_{\text{ВХ}}(\sigma_1)$ и освобождения $s_{\text{ВЫХ}}(\sigma_2)$ управляемым отцепом изолированных участков (ИЗУ) стрелок разделения σ_1 и σ_2 , соответственно, с предыдущим и с последующим отцепами. В качестве критерия оптимальности в данной работе используется критерий Вейбула

$$\min \{ \delta t_1, \delta t_2 \} \rightarrow \max,$$

где $\square t_1, \square t_2$ – интервалы на разделительных элементах соответственно в первой и второй парах отцепов.

При этом, если выполняется условие $s_{\text{ВХ}}(\sigma_1) < s_{\text{ВЫХ}}(\sigma_2)$ то оптимальным является медленный режим торможения, когда требования интервального регулирования скорости скатывания отцепов обеспечиваются ВТП, а СТП используется только в случае недостатка мощности ВТП. Напротив, при выполнении условия $s_{\text{ВХ}}(\sigma_1) > s_{\text{ВЫХ}}(\sigma_2)$ интервальное торможение отцепов осуществляется преимущественно за

счет СТП. Необходимо отметить, что обоснование выбора режимов торможения в [1] выполнено для условий, когда ходовые характеристики отцепов известны до начала скатывания, а тормозные позиции точно реализуют заданные режимы торможения. С другой стороны, опыт практической эксплуатации сортировочных горок и результаты имитационных экспериментов [2] показывают, что в условиях действия случайных факторов увеличение расстояния неуправляемого скатывания отцепов приводят к нелинейному росту среднего квадратического отклонения продолжительности скатывания отцепов до характерных точек стрелочной зоны, что увеличивает риск их неразделения на стрелках. В данной статье приведены результаты исследования закономерностей между режимами торможения и условиями разделения отцепов в элементарной расчетной группе из трех отцепов.

Критерий оптимизации режима торможения среднего отцепа в расчетной группе. При расформировании составов в условиях действия случайных факторов имеют место неразделения отцепов на стрелках, что связано с возможностью нарушения безопасности движения из-за соударения вагонов на повышенных скоростях и дополнительной маневровой работой по перестановке вагонов на пути назначения. Т.е. принятие решения по выбору режима торможения связано с риском неразделения отцепов. Полная ликвидация указанных рисков теоретически возможна, однако связана либо со значительным падением перерабатывающей способности горки, либо с неоправданным удорожанием систем управления роспуском. В этой связи риски допускаются уже на стадии проектирования сортировочных горок [3]. С другой стороны, для создания эффективных систем управления роспуском составов риски неразделения отцепов должны быть оценены с помощью количественных характеристик и ограничены на допустимом уровне.

Оценка риска неразделения отцепов может быть выполнена по его среднему значению с помощью критерия Байеса-Лапласа:

$$r = \sum_{i=1}^k p_{c,i} a_{c,i} \rightarrow \min, \sum_{i=1}^k p_{c,i} = 1, \quad (2)$$

где p_c – вероятность нахождения системы в некотором состоянии;
 a_c – количественная оценка нахождения системы в некотором состоянии.

В задаче управления роспуском выражение (2) может быть сведено к виду

$$r(\mathbf{q}) = p'_p \cdot 0 + p'_1 C_2 + p'_2 C_3 + \dots + p'_{n-1} C_n + p'_{1,2} C_{2,3} + p'_{1,3} C_{2,4} + p'_{n-2,n-1} C_{n-1,n} + \dots, \quad (3)$$

где p_p – вероятность того, что разделения произойдут во всех парах отцепов;

p'_1, p'_2, p'_{n-1} – вероятности того, что неразделения произойдут соответственно, только в первой, только во второй, только в $n-1$ парах отцепов;

$p'_{1,2}, p'_{1,3}, p'_{n-2,n-1}$ – вероятности того, что неразделения произойдут соответственно, одновременно только в первой и второй парах, только в первой и третьей парах, только в $n-2$ и $n-1$ парах отцепов;

C – дополнительные расходы, связанные с неразделением отцепов.

Примем, что расходы C линейно зависят от числа вагонов, проследовавших в результате роспуска на пути не соответствующие их назначению. В этом случае для группы из трех выражение (3) будет выглядеть как

$$r(\mathbf{q}) = cp'_1 m_2 + cp'_2 m_3 + cp'_{1,2} (m_2 + m_3) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где c – расходы, связанные с ликвидацией последствий следования вагона не по назначению;

m_2, m_3 – соответственно число вагонов во втором и третьем отцепках.

Результаты вычислительных экспериментов показали, что при случайных параметрах отцепов расчетной группы и неточной реализации режимов их торможения связь между величиной интервалов в первой и второй парах отцепов является слабой (рисунок 1). Поэтому для группы из трех отцепов справедливы выражения

$$p'_1 = p_1 - p_1 p_2, \quad p'_2 = p_2 - p_1 p_2, \quad p'_{1,2} = p_1 p_2,$$

где p_1, p_2 – вероятность неразделения отцепов соответственно в первой и второй парах.

Таким образом, выражение (4) может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} r(\mathbf{q}) &= c \left((p_1 - p_1 p_2) m_2 + (p_2 - p_1 p_2) m_3 + p_1 p_2 (m_2 + m_3) \right) = \\ &= c (p_1 m_2 + p_2 m_3) \rightarrow \min. \end{aligned}$$

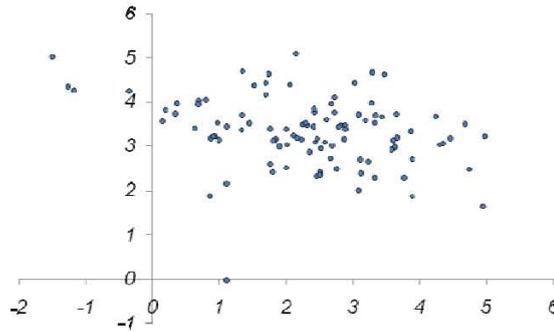


Рисунок 1. – Поле точек, характеризующее связь между интервалами в первой и второй парах расчетной группы отцепов

Постоянный элемент c может быть исключен из оптимизационного выражения так, как его значение не влияет на выбор режимов торможения.

В целом для состава из n отцепов оценка риска может осуществляться с помощью выражения

$$r(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^{n-1} p_i m_{i+1} \rightarrow \min,$$

где p_i – вероятность неразделения отцепов в i -й паре.

Для расчетной группы из трех одновагонных отцепов в качестве критерия оптимизации режима торможения управляемого отцепов расчетной группы может быть принято выражение

$$r_3 = p(\delta t_1 < t_{\text{пэ}}) + p(\delta t_2 < t_{\text{пэ}}) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Из выражения (1) следует, что неразделение отцепов происходит при выполнении одного из условий

$$\begin{aligned} t_{\text{пэ}} &> t_{1,2} + t_2(\mathbf{v}, \mathbf{s}_1) - \tau_1(\mathbf{s}_1), \\ t_{\text{пэ}} &> t_{2,3} + t_3(\mathbf{s}_2) - \tau_2(\mathbf{v}, \mathbf{s}_2). \end{aligned} \quad (6)$$

Ввиду малости средних квадратических отклонений величин начальных интервалов на вершине горки они могут быть представлены математическими ожиданиями. В этом случае выражение (4) сведено к виду

$$\begin{aligned} t_{1,2} - t_{\text{пэ}} &< \tau_1(\mathbf{s}_1) - t_2(\mathbf{v}, \mathbf{s}_1), \\ t_{2,3} - t_{\text{пэ}} &< \tau_2(\mathbf{v}, \mathbf{s}_2) - t_3(\mathbf{s}_2). \end{aligned}$$

Учитывая, что случайные величины \square_i и t_{i+1} являются независимыми, то случайная величина $d_i = \square_i - t_{i+1}$ имеет математическое ожидание $M_{d_i} = M_{\square_i} - M_{t_{i+1}}$ и дисперсию $D_{d_i} = D_{\square_i} + D_{t_{i+1}}$ (здесь M_{\square} , M_t – математическое ожидание времени движения отцепов до момента освобождения и занятия разделительных элементов; D_{\square} , D_t – дисперсия времени движения отцепов до момента освобождения и занятия разделительных элементов).

Гистограмма и функция плотности распределения случайной величины d_i представлены на рисунке 2.

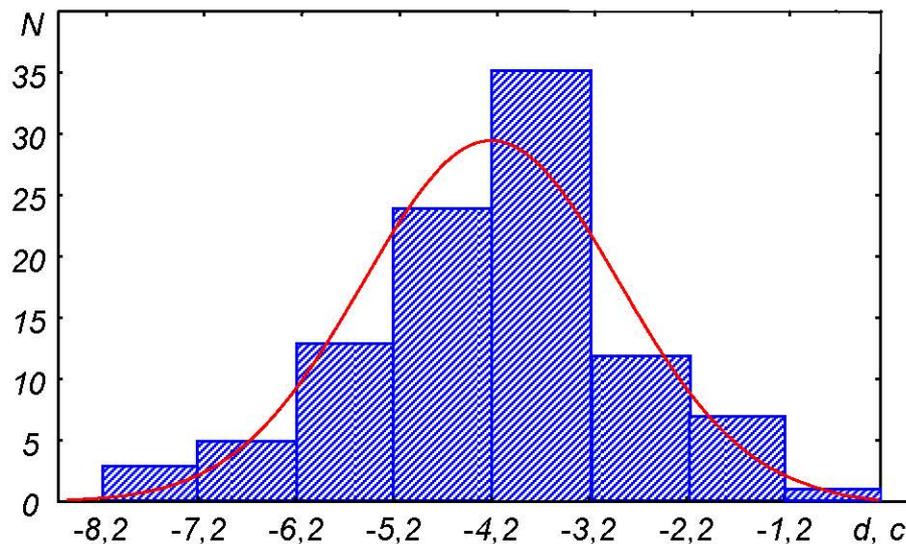


Рисунок 2. – Гистограмма и функция плотности распределения случайной величины d_i

Статистическая обработка результатов имитационного моделирования показала, что нет оснований отвергать гипотезу о нормальном распределении величины d_i . В этой связи, риск неразделения отцепов в расчетной группе, при управляемом среднем отцепе, может быть оценен с помощью выражения

$$r_3(q_2) = \Phi\left(\frac{t_{1,2} - t_{\text{пэ}} - M_{\tau,1} + M_{t,2}(q_2)}{\sqrt{D_{\tau,1} + D_{t,2}(q_2)}}\right) + \Phi\left(\frac{t_{2,3} - t_{\text{пэ}} - M_{\tau,1}(q_2) + M_{t,3}}{\sqrt{D_{\tau,1}(q_2)}}\right),$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа.

В качестве примера выполнен поиск оптимального режима торможения среднего отцепа в расчетной группе из трех одновагонных

отцепов. Разделительным элементом в первой паре является 5-я стрелка, а во второй - 4-я. Средним (управляемым) отцепом в группе является отцеп тяжелой весовой категории. Крайними отцепами в группе являются отцепы легкой весовой категории, которые скатываются без торможения на первой тормозной позиции, а на второй тормозной позиции тормозятся из условия выхода первого отцепа со скоростью 5 м/с и третьего со скоростью 6 м/с. Среднее квадратическое отклонение скорости выхода отцепов из тормозных позиций принято равным 0,3 м/с. Зависимости между скоростью выхода среднего отцепа из СТП и вероятностью их неразделения на стрелках представлена на рисунке 3.

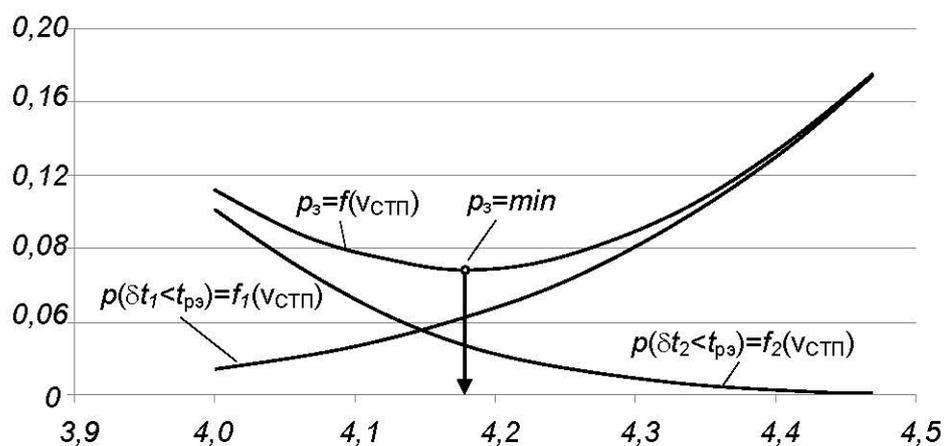


Рисунок 3. – Оптимизация режима торможения в расчетной группе из трех отцепов

Минимальное значение вероятности неразделения отцепов расчетной группы определено методами прямого поиска и составляет $p_c=0,069935$. Указанное значение достигается при задаваемой скорости выхода отцепов из СТП 4,18 м/с. Дальнейшее уменьшение вероятности неразделения отцепов требует изменения режимов торможения крайних отцепов расчетной группы.

Риск неразделения отцепов при расформировании состава из n отцепов может быть оценен с помощью аддитивного выражения

$$r(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^{n-1} \Phi \left(\frac{t_{i,i+1} - t_{p3} - M_{\tau,i}(q_i) + M_{t,i+1}(q_{i+1})}{\sqrt{D_{\tau,i}(q_i) + D_{t,i+1}(q_{i+1})}} \right) m_{i+1}. \quad (7)$$

В зависимости от условий задачи выражение (7) может

рассматриваться и как целевая функция и как ограничение.

Выводы. Процесс разделения отцепов на разделительных элементах во время расформирования составов является вероятностным. При этом, величина среднего квадратического отклонения и, соответственно, дисперсии времени движения отцепов по спускной части горки существенно зависит от расстояния их неуправляемого скатывания, режимов торможения и ходовых характеристик отцепов. В этой связи, при анализе условий разделения отцепов необходимо учитывать не только математическое ожидание, но и дисперсию случайных величин времени движения отцепов до момента освобождения и занятия разделительных элементов. В качестве критерия для оценки режимов интервального торможения отцепов предложено использовать оценку риска их неразделения на разделительных элементах. Представлены зависимости между риском неразделения отцепов и режимами их торможения. Использование результатов исследования позволит повысить качество алгоритмов по управлению тормозными позициями автоматизированных горок.

Список литературы

1. Бобровский В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках: Монография / [Бобровский В.И., Козаченко Д.Н., Божко Н.П., Рогов Н.В., Березовый Н. И., Кудряшов А.В.] – Д.: Изд-во Маковецкий, 2010. – 260 с.
2. Козаченко Д.М. Моделирование работы сортувальної гірки в умовах невизначеності параметрів відцепів та характеристик навколишнього середовища / Козаченко Д.М., Березовий М.І., Таранець О.І. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 16. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. унт-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007. –С. 73-76.
3. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР. ВСН 207-89. – М.: Транспорт, 1992. – 104 с.