

Исследование влияния режимов торможения отцепов на условия их разделения на стрелках

Бобровский В.И., Козаченко Д.Н., Болвановская Т.В. (ДНУЖТ), Украина

На сортировочных станциях Украины в настоящее время функционируют сортировочные горки, в которых управляющим органом являются балочные замедлители, сгруппированные в две или три тормозные позиции. В качестве управляющих параметров на механизированных горках могут быть приняты скорости выхода отцепов из первой (ВТП) и второй (СТП) тормозных позиций, соответственно, v' и v'' . Вектор значений $\mathbf{v}=\{v', v''\}$, характеризующий некоторый режим торможения, можно рассматривать как точку на плоскости; при этом все множество точек $\mathbf{v}$ образует область возможных скоростей Ω выхода отцепа из тормозных позиций спускной части горки. Размер и конфигурация области Ω зависят от ходовых характеристик отцепа, условий скатывания и мощности тормозных позиций.

При расформировании составов на сортировочных горках системой управления роспуском решаются взаимосвязанные и, отчасти, противоречивые задачи: обеспечения допустимых скоростей входа отцепов на тормозные позиции, прицельного и интервального регулирования их скорости.

Введение дополнительных ограничений на вектор $\mathbf{v}$ по скорости входа на замедлители тормозных позиций и по обеспечению докатывания отцепа с допустимой скоростью до точки прицеливания позволяет выделить в Ω подобласть $\Omega_{\text{п}}$. Конфигурация области $\Omega_{\text{п}}$ незначительно зависит от режимов торможения смежных отцепов и поэтому для каждого отцепа состава эта область может быть выделена на предварительном этапе решения задачи определения режимов расформирования состава. Введение дополнительных ограничений по условиям разделения отцепа со смежными отцепами позволяет выделить в Ω подобласть $\Omega_{\text{и}}$. Конфигурация этой области зависит как от режимов торможения рассматриваемого отцепа, так и смежных с ним отцепов. Область допустимых скоростей выхода отцепа из тормозных позиций $\Omega_{\text{д}}$ представляет собой пересечение областей $\Omega_{\text{п}}$ и $\Omega_{\text{и}}$:

$$\Omega_{\text{д}} = \Omega_{\text{п}} \cup \Omega_{\text{и}}.$$

Исследованиям области Ω_{Π} посвящено значительное число научных трудов [1-3]; в то же время задача выделения области Ω_{Π} исследована меньше. Так в [1] выполнены исследования условий разделения отцепов при детерминированной постановке задачи. В частности, разработаны методы выделения области Θ_{Π} которую составляют режимы торможения $\mathbf{v}$, удовлетворяющие условию

$$\min(\delta t_1(\mathbf{v}), \delta t_2(\mathbf{v})) \geq t_{p3}, \quad (1)$$

где $\delta t_1, \delta t_2$ - величины интервалов, соответственно, в первой и второй парах отцепов расчетной группы;

t_{p3} - время, необходимое на изменение состояния разделительного элемента.

В то же время в [4] показано, что при решении большого числа задач, таких как автоматизированное управление расформированием составов на горках, разработка требований к системам автоматизации горочных процессов, обоснование норм содержания путей сортировочных горок и сортировочных парков, необходимо учитывать случайный характер параметров отцепов и условий их скатывания. В этой связи целью данной статьи является поиск области Ω_{Π} при стохастической постановке задачи выбора режимов торможения отцепов и исследование условий разделения в этой области. При этом объектом исследования является процесс разделения на стрелках в группе из трех отцепов.

В указанной постановке оценка условий разделения отцепов выполняется с помощью риска неразделения (запуска) [5]

$$r_3(\mathbf{v}) = p(\delta t_1(\mathbf{v}) < t_{p3})m_2 + p(\delta t_2(\mathbf{v}) < t_{p3})m_3, \quad (2)$$

где $p(\delta t < t_{p3})$ - вероятность того, что величина интервала на разделительном элементе будет меньше, чем t_{p3} ;

m_2, m_3 – соответственно, число вагонов во втором и третьем отцепах расчетной группы.

Для анализа влияния режимов торможения на условия разделения отцепов построены поверхности $r_3(\mathbf{v}) = f(v', v'')$. В рамках вычислительного эксперимента рассмотрена расчетная группа из трех одновагонных отцепов, соответственно, легкой, тяжелой и легкой весовой категории; второй отцеп расчетной группы

является управляемым, а режимы торможения первого и третьего отцепов постоянны. При этом первый отцеп скатывается без торможения на ВТП, а на СТП должна обеспечиваться скорость выхода 6 м/с; третий отцеп скатывается без торможения. Такие режимы торможения крайних отцепов расчетной группы приняты для уменьшения области допустимых режимов торможения среднего отцепа. Фактическая скорость выхода тормозимых отцепов группы из замедлителей рассматривается как нормально распределенная случайная величина со средним квадратическим отклонением 0,2 м/с. Параметры отцепов моделируются как случайные величины, зависящие от их весовой категории [6].

В ходе экспериментов варьировались заданные скорости выхода управляемого отцепа из ВТП и СТП с шагом 0,1 м/с в пределах [4-7,5] м/с. Величина t_{p3} принята равной 1 с, а максимально допустимый риск неразделения - $r_d=0,005$. По результатам экспериментов для каждого значения v' установлена скорость $v''_m(v')$, при которой риск неразделения (2) имеет минимальное значение, а также два значения скоростей – минимальное $v''_n(v')$ и максимальное $v''_b(v')$, при которых риски неразделения достигают предельно допустимых значений r_d . Полученные данные позволяют построить в Ω линию минимальных рисков $\bar{\bar{R}}$, образованную множеством точек $v''_m(v')$, и выделить область Ω_n , состоящую из множества режимов, удовлетворяющих условию $r_3(v) \leq r_d$, $v \in \Omega_n$. При этом, сверху и снизу область Ω_n ограничивается линиями R_n и R_b , образованными, соответственно, множествами точек $v''_n(v')$ и $v''_b(v')$. В качестве примера на рис. 1, а представлены области Ω_n при стрелках разделения $v_1=5$ в первой паре и $v_2=4$ во второй, на рис. 1, б – при стрелках разделения $v_1=4$ и $v_2=5$, а также линии $\bar{\bar{R}}$ для этих условий. Для сравнения на тех же рисунках представлены границы областей Θ_n и линии равных интервалов $\bar{U}$ [1] при скатывании отцепов со средними ходовыми характеристиками в соответствующей весовой категории в условиях точной реализации заданных скоростей выхода из тормозных позиций. Также на рисунках показаны режимы, соответствующие оптимальному решению задачи в детерминированной постановке $u_{\max}$ и стохастической постановке $r_{\min}$. Анализ

Рассмотрим отличия условий разделения отцепов в группе при решении и в детерминированной и стохастической постановках. Для примера на рис. 2, представлен случай, когда первая пара оцепов в группе разделяется на стрелке v_1 , расположенной дальше от вершины горки, чем стрелка v_2 разделения второй пары оцепов; при этом $s_{rx}(v_1) > s_{rx}(v_2)$.

Рассмотрим отличия условий разделения отцепов в группе при решении задачи в детерминированной и стохастической постановках. Для примера на рис. 2, представлен случай, когда первая пара отцепов в группе разделяется на стрелке v_1 , расположенной дальше от вершины горки, чем стрелка v_2 разделения второй пары отцепов; при этом $s_{\text{RX}}(v_1) > s_{\text{RX}}(v_2)$.

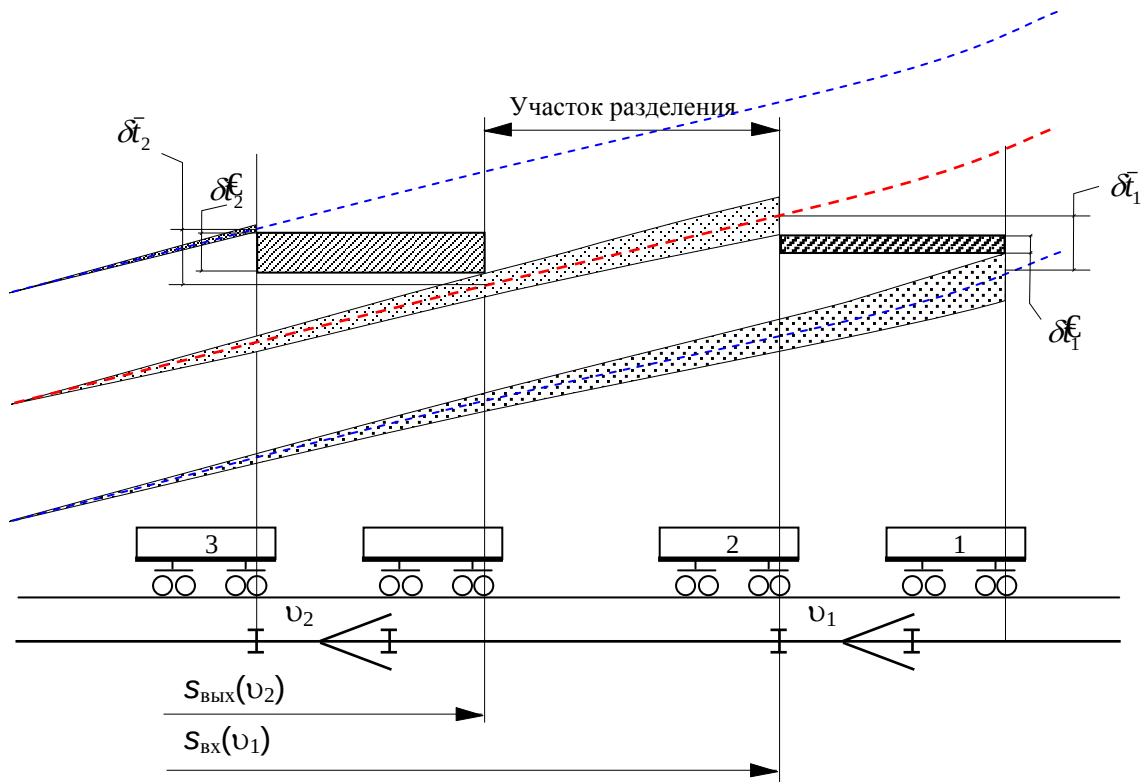


Рис. 2 – Разделение отцепов на стрелках при $s_{вх}(v_1) > s_{вх}(v_2)$

Скорости выхода из тормозных позиций среднего отцепа выбраны из условия равенства интервалов на разделительных элементах; указанные интервалы получены для отцепов расчетной группы со средними ходовыми характеристиками при точной реализации заданных скоростей выхода из тормозных позиций. Ввиду того, что реальные ходовые характеристики отцепов являются случайными величинами, а тормозные позиции реализуют заданные скорости выхода с некоторой погрешностью, то фактические величины интервалов на разделительных стрелках δt также являются случайными. Пример гистограммы распределения случайной величины δt представлен на рис. 3, а. Статистическая обработка результатов моделирования процесса разделения отцепов показала, что нет оснований отвергать гипотезу о нормальном распределении случайной величины δt .

В результате исследований установлено, что величина среднего квадратического отклонения интервала на разделительных элементах $\sigma_{\delta t}$ возрастает по мере их удаления от вершины горки (см. рис. 3, б).

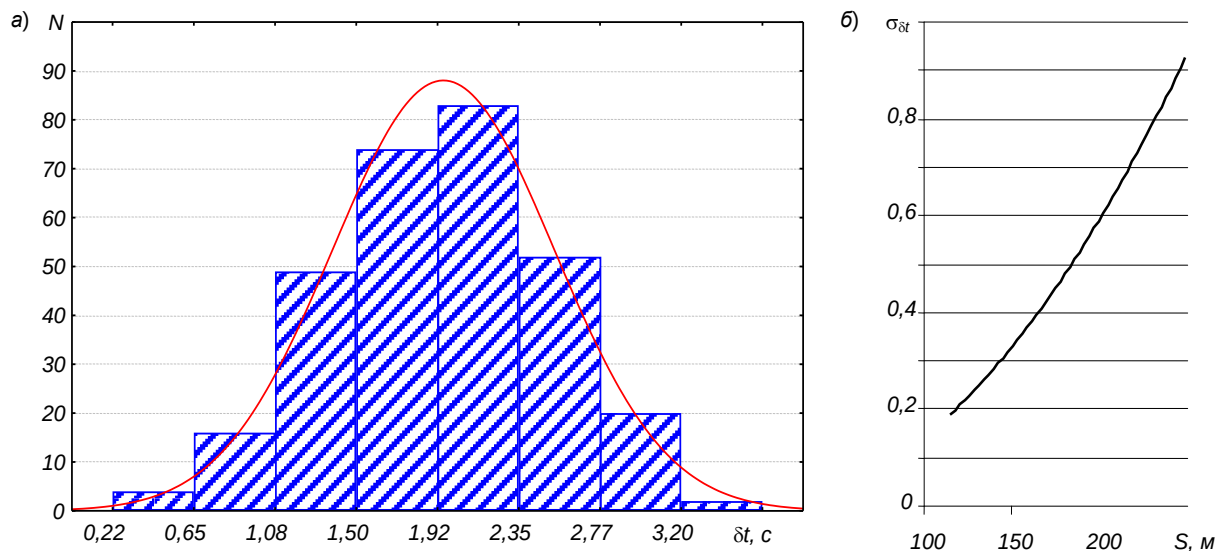


Рис. 3 – Характеристики случайной величины интервала Δt : *a* – гистограмма распределения случайной величины Δt ; *б* – зависимость среднего квадратического отклонения случайной величины Δt от расстояния скатывания $\sigma_{\Delta t}=f(s)$

Учитывая нормальный закон распределения случайной величины Δt , выражение (2) для расчетной группы из одновагонных отцепов может быть представлено в виде:

$$r_3 = r_1 + r_2 = \Phi\left(\frac{t_{\text{пз}} - \bar{\alpha}_1}{\sigma_{\alpha,1}}\right) + \Phi\left(\frac{t_{\text{пз}} - \bar{\alpha}_2}{\sigma_{\alpha,2}}\right) \quad (3)$$

При этом, если $\sigma_{\Delta t,1} \neq \sigma_{\Delta t,2}$, а $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_2$, то в соответствии с (2) риски неразделения отцепов в первой r_1 и второй r_2 парах будут различаться. Эти различия дают потенциальную возможность снижения общего риска неразделения в группе за счет изменения режимов торможения среднего отцепа.

Ввиду того, что существует прямая зависимость между точностью реализации тормозными позициями заданных скоростей выхода отцепов и величинами $\sigma_{\Delta t,1}$ и $\sigma_{\Delta t,2}$, риск неразделения отцепов зависит от среднего квадратического отклонения скорости выхода отцепов из тормозных позиций. Иллюстрация этой зависимости представлена на рис. 4.

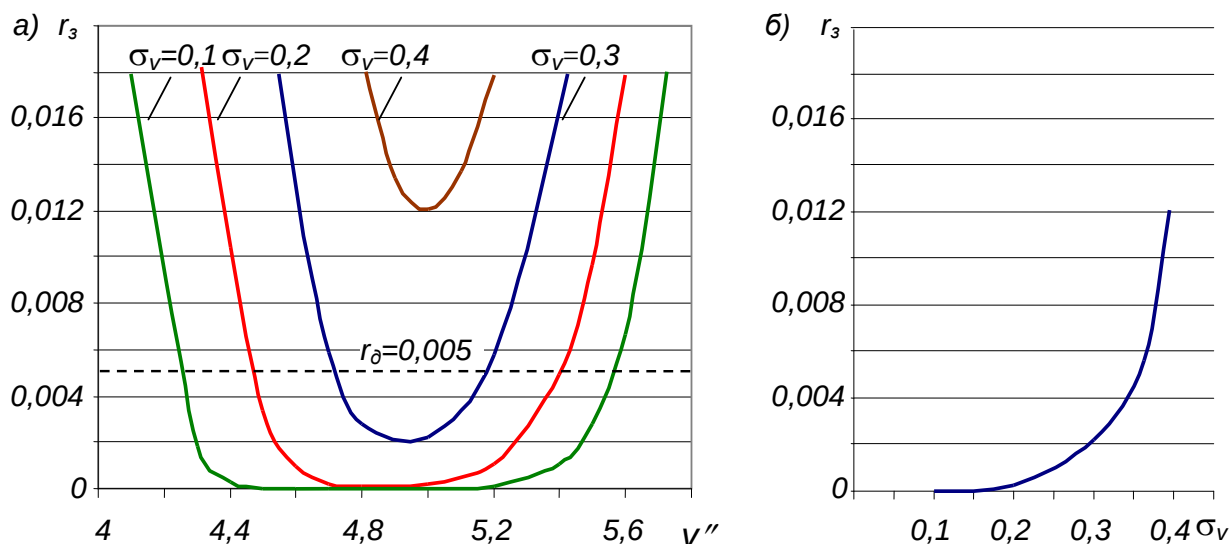


Рис. 4 – Зависимость рисков неразделения от заданной скорости выхода из СТП при разной точности реализации заданной скорости выхода отцепов из тормозных позиций: *а* – зависимость риска неразделения от скорости выхода отцепа из СТП; *б* – зависимость минимального риска неразделения от точности реализации СТП заданных скоростей выхода отцепов

Вторым фактором, влияющим на условия разделения, является длина участка разделения, которая зависит от расположения разделительных стрелок отцепов группы. Большая длина участка разделения, с одной стороны, обеспечивает значительную величину математического ожидания интервалов на разделительных стрелках, а с другой - вызывает большую разницу между величинами $\sigma_{\delta t,1}$ и $\sigma_{\delta t,2}$. Эти факторы могут быть использованы для перераспределения рисков между парами отцепов расчетной группы и снижения общего риска неразделения.

Третьим фактором, влияющим на условия разделения, является средние квадратические отклонения продолжительностей скатывания крайних отцепов расчетной группы, соответственно, за первую и до второй разделительных стрелок. Указанные величины зависят как от расстояния скатывания, так и от параметров отцепов и скоростей их выхода из тормозных позиций.

Принципиально возможны два способа уменьшения риска неразделения отцепов. Так, уменьшение риска в первой паре отцепов может быть достигнуто за счет увеличения математического ожидания величины интервала δt_1 , т.е. за счет уменьшения скорости движения управляемого (второго) отцепа. Последствием

этого действия является уменьшение математического ожидания величины разделительного интервала δt_2 во второй паре отцепов и увеличение среднего квадратического отклонения величины интервалов в обеих парах. Другим способом уменьшения риска неразделения является уменьшение среднего квадратического отклонения величины интервалов между отцепами, что достигается за счет увеличения скорости движения управляемого отцепа. В результате этого действия уменьшается математическое ожидание величины интервала в первой паре отцепов и увеличивается во второй.

Ввиду того, что на риск неразделения отцепов влияют разные факторы, то улучшение условий разделения в каждом конкретном случае может достигаться как при увеличении, так и при уменьшении скоростей выхода управляемого отцепа из тормозных позиций. В этой связи для определения области допустимых скоростей выхода отцепов из тормозных позиций Ω_d может быть использован следующий алгоритм:

Шаг 1: В области возможных скоростей Ω выделяется область Ω_Π и выполняется построение линии равных интервалов $\bar{U}$ [1];

Шаг 2: в качестве начальных точек поиска принимаются точки $\mathbf{u}_1$ и $\mathbf{u}_2$ пересечения линии равных интервалов $\bar{U}$ и границы области Ω_Π (см. рис. 5, а и б), либо угловая точка границы Ω_Π с максимальным значением критерия $\min(\delta t_1, \delta t_2)$, если линия $\bar{U}$ не имеет общих точек с областью Ω_Π (при этом $\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_2$, см. рис. 5, в);

Шаг 3: на границе Ω_Π в окрестностях точек $\mathbf{u}_1$ и $\mathbf{u}_2$ методами прямого поиска устанавливаются, соответственно, точки $\mathbf{v}_{m1}$ и $\mathbf{v}_{m2}$, в которых риски (2) достигают минимальных значений, а также точки $\mathbf{v}_{n1}$, $\mathbf{v}_{b1}$, $\mathbf{v}_{n2}$, и $\mathbf{v}_{b2}$ в которых риски имеют предельно допустимые значения r_d ;

Шаг 4: если $r_3(\mathbf{v}_{m1}) > r_d$ и $r_3(\mathbf{v}_{m2}) > r_d$, то при заданных режимах торможения крайних отцепов группы достичь требуемой вероятности разделения отцепов на стрелках невозможно и работа алгоритма прекращается;

Шаг 5: если $r_3(\mathbf{v}_{m1}) < r_d$ и $r_3(\mathbf{v}_{m2}) < r_d$, то линии R_Π и R_Π не имеют пересечения между собой в пределах области Ω_Π . Для построения линий R_Π и R_Π определяются

режимы $v_{H3}'' \left(\frac{v_{H1}' + v_{H2}'}{2} \right)$ и $v_{B3}'' \left(\frac{v_{B1}' + v_{B2}'}{2} \right)$, для которых $r_3(v_{H3})=r_d$ и $r_3(v_{B3})=r_d$. Границы области Ω_{II} получают в результате аппроксимации точек v_{H1} , v_{H2} , v_{H3} и v_{B1} , v_{B2} , v_{B3} полиномами второго порядка (см. рис. 5, а, в).

Шаг 6: если $r_3(v_{M1}) < r_d$ и $r_3(v_{M2}) > r_d$ или $r_3(v_{M1}) > r_d$ и $r_3(v_{M2}) < r_d$, то линии R_H и R_B имеют пересечение между собой в пределах области Ω_{II} . Поиск точки пересечения v_d линий R_H и R_B производится вдоль линии $\bar{R}$. Дальнейший порядок действий аналогичен описанным на шаге 5 (см. рис. 5, б).

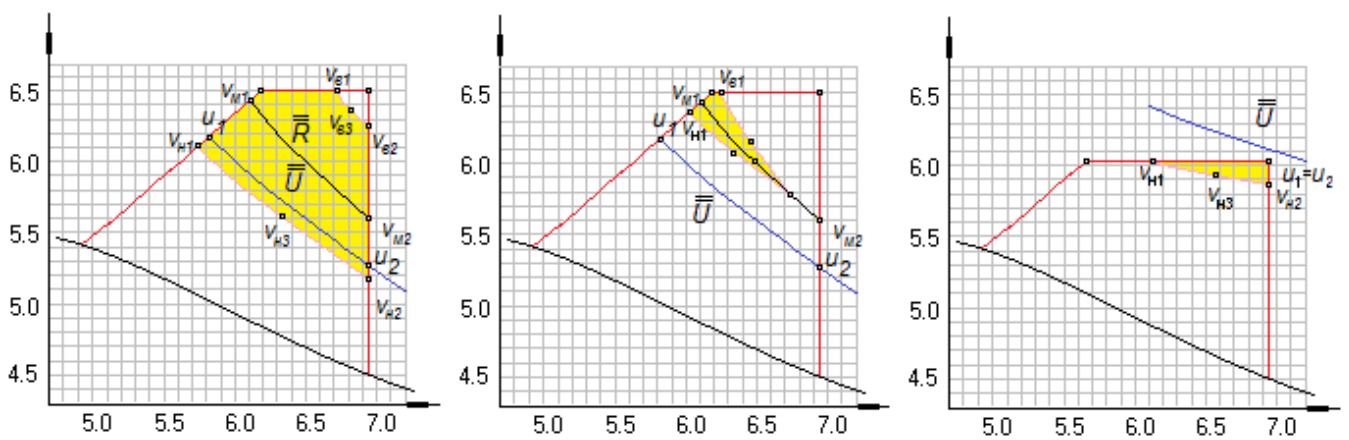


Рис. 5 – Выделение области допустимых режимов торможения отцепов: а – область Ω_{II} имеет четыре точки пересечения с линиями R_H и R_B ; б – линии R_H и R_B имеют пересечение между собой в области Ω_{II} ; область Ω_{II} имеет пересечение только с линией R_H .

Сравнение условий разделения отцепов при режимах, полученных в результате решения задачи в детерминированной и стохастической постановках, приведено в табл. 1.

Таблица 1. – Сравнение условий разделения отцепов при решении задачи выбора режимов в детерминированной и стохастической постановке

Стрелки разде- ления	Детерминированная постановка задачи					Стохастическая постановка задачи					$\frac{r_d}{r_c}$
	Скорость выхода, м/с		Средний интервал, с		Риск неразде- ления, r_d	Скорость выхода, м/с		Средний интервал, с		Риск неразде- ления, r_c	
	ВТП	СТП	1-2	2-3		ВТП	СТП	1-2	2-3		
2-2	5,6	-	4,63	4,63	0	5,6	-	4,63	4,63	0*	-
2-3	5,9	6,3	4,40	4,40	0	5,9	6,3	4,40	4,40	0*	-
2-4	6,0	6,3	4,36	4,36	0	6,0	6,3	4,36	4,36	0*	-
2-5	6,0	6,4	4,34	4,34	0,000003	6,3	6,4	4,17	4,94	0*	∞
3-2	6,1	3,2	5,25	5,25	0	6,1	3,2	5,25	5,25	0*	-
3-3	6,0	6,3	4,58	4,58	0	6,0	6,3	4,58	4,58	0*	-
3-4	6,0	6,4	4,50	4,50	0,000003	6,3	6,4	4,03	4,89	0*	∞
3-5	6,1	6,4	4,46	4,46	0,0022	6,6	6,5	3,47	5,72	0,0000002	11000
4-2	7,0	3,2	6,56	6,22	0	7,0	3,2	6,56	6,22	0*	-
4-3	7,0	4,4	4,46	4,46	0	7,0	4,4	4,46	4,46	0*	-
4-4	6,0	6,3	4,30	4,30	0,000003	6,1	6,4	3,96	4,65	0,0000006	5
4-5	6,0	6,3	4,22	4,22	0,0025	6,3	6,5	3,52	5,20	0,00003	83
5-2	7,0	3,2	13,3	6,22	0	7,0	3,2	13,3	6,22	0*	-
5-3	7,0	4,9	5,05	5,05	0,00007	7	4,2	7,53	4,25	0*	∞
5-4	7,0	5,1	4,30	4,30	0,0008	7,0	4,8	5,30	3,55	0,00007	11
5-5	5,9	6,2	3,63	3,63	0,10	6,1	6,3	3	4,3	0,03	3,3

*Указан один из множества возможных режимов.

Анализ полученных результатов показывает, что при разделении отцепов расформируемого состава на стрелках 2-2, 2-3, 2-4, 3-2, 3-3, 4-2, 4-3, 5-2 могут быть образованы значительные резервы времени, которые практически исключают возможность неразделений. Избыточные интервалы времени на этих стрелках могут быть уменьшены для увеличения резервов времени в других группах без ухудшения условий разделения в данной группе.

Условия разделения отцепов на стрелках 2-5, 3-4, 3-5, 4-5, 5-3, 5-4 могут быть существенно улучшены при учете случайных условий процесса скатывания путем изменения режимов торможения.

Возможности улучшения условий разделения в случаях, когда и первая и вторая пара отцепов разделяются на одной и той же стрелке, находящейся на значительном расстоянии от тормозной позиции (4-4 и 5-5) существенно ограничены. Причиной этого является незначительная длина участка разделения. Улучшение условий разделения в этих парах может быть достигнуто путем корректирования режимов торможения крайних отцепов расчетной группы, в

первую очередь за счет уменьшения избыточных интервалов между отцепами других групп.

Таким образом, в результате выполненных исследований установлены новые зависимости между техническими параметрами сортировочной горки, характеристиками отцепов, условиями их скатывания и режимами торможения с одной стороны и условиями разделения отцепов на стрелках с другой. Это позволяет решать задачу управления скоростью скатывания отцепов в стохастической постановке. Предложенные методы могут быть использованы как в автоматизированных системах управления расформирования составов, так и в системах автоматизированного проектирования сортировочных горок для получения технико-эксплуатационной оценки конкурирующих вариантов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобровский В.И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках / В.И. Бобровский, Д.Н. Козаченко, Н.П. Божко, Н.В. Рогов, Н.И. Березовый, А.В. Кудряшов // Монография, Дн-ск: Изд-во Маковецкий, 2010, с. 260
2. Бобровский В.И., Рогов Н.В. Оптимизация режимов регулирования скорости отцепов при роспуске составов на горках // Вісник ДПТ. – Вип. 4. – Д.: ДПТ, 2004. – с. 174-182
3. Бобровский В.И. Ограничения режимов торможения отцепов на сортировочных горках / В.И. Бобровский, Р.В. Вернигора, А.В. Кудряшов, Л.О. Ельникова // Вісник ДПТ. – Вип. 27. – Д.: ДПТ, 2009. – с. 30-35
4. Козаченко Д.М. Дослідження ефективності заходів автоматизації управління швидкістю скочування відцепів на сортувальних гірках // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – №5(147), частина 2. – с.276-284
5. Козаченко Д.Н. Критерий оптимизации режимов торможения отцепов расчетной группы в условиях действия случайных факторов // Сборник научных трудов ДонИЖТ. – Вып. 23. – Д.:ДонИЖТ, 2010. – с.14-21
6. Козаченко Д.М. Моделювання роботи сортувальної гірки в умовах невизначеності параметрів відцепів та характеристик навколишнього середовища / Д.М. Козаченко, М.І. Березовий, О.І. Таранець // Вісник ДПТ. – Вип. 16. – Д.: ДПТ, 2007. – с. 73-76