

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАЗДЕЛЕНИЯ ОТЦЕПОВ НА СТРЕЛКАХ

Досліджені залежності інтервалів між відчепами на розділових стрілках від режимів гальмування відчепів состава. Встановлено умови, за яких менший інтервал в групі з трьох відчепів досягає максимуму, та розроблена методика пошуку відповідних режимів гальмування.

Исследованы зависимости интервалов между отцепами на разделительных стрелках от режимов торможения отцепов состава. Установлены условия, при которых меньший интервал в группе из трех отцепов достигает максимума, и разработана методика поиска соответствующих режимов торможения.

The dependence of intervals on the separating switches from cuts braking modes is explored. There were found out the circumstances under which the shortest interval reaches its maximum and this technique is presented.

Сортировочные горки являются одним из основных потребителей энергии на станциях. Поэтому в современных условиях эксплуатации, характеризующихся снижением объемов переработки вагонов, целью оптимизации режимов торможения становится сокращение затрат топлива и электроэнергии на расформирование составов и ликвидацию неразделений отцепов при условии обеспечения требований прицельного регулирования их скорости. Решение указанной задачи может выполняться с помощью итерационного метода [1], основанного на многократном решении задачи оптимизации режимов торможения в отдельных группах отцепов состава. Исследование условий разделения отцепов на стрелках позволит сузить область поиска оптимальных режимов торможения и разработать более эффективные оптимизационные алгоритмы. В этой связи целью данной статьи является поиск функциональной связи между режимами торможения и интервалами на разделительных элементах.

В результате исследований [2] установлено существование области допустимых режимов торможения (ОДР), каждый режим которой $\mathbf{h} = \{h', h''\}$ обеспечивает требования прицельного регулирования, т. е. докатывание отцепа до точки прицеливания с допустимой скоростью. Поэтому для обоснованного выбора оптимального режима торможения отцепа необходимо исследовать характер изменения величины интервалов на разделительных элементах со смежными отцепами в границах ОДР.

Для исследования закономерностей процесса регулирования интервалов между отцепами рассматривается расчетная группа из трех отцепов. При этом интервалы на разделительных элементах определяются с помощью выражений

$$\left. \begin{aligned} \delta t_1(h_2) &= t_{0,1} + t_2(h_2, S_{2,1}) - \tau_1(h_1, s_{1,1}) \\ \delta t_2(h_2) &= t_{0,2} + t_3(h_3, S_{3,2}) - \tau_2(h_2, s_{2,2}), \end{aligned} \right\} (1)$$

где $t_{0,j}$ – начальные интервалы на вершине горки между отцепами j -й пары; S_{ij}, s_{ij} – соответственно, координаты входа и выхода i -го отцепа из изолированного участка (ИЗУ) разделительной стрелки в j -й паре; t_i, τ_i – время скатывания i -го отцепа от момента отрыва, соответственно, до моментов занятия и освобождения ИЗУ разделительной стрелки; h_i – режим торможения i -го отцепа.

Координаты S_{ij} и s_{ij} , в свою очередь, определяются как

$$S_{ij} = s_{n,i}$$

$$S_{ij} = s_{k,j} + l_i,$$

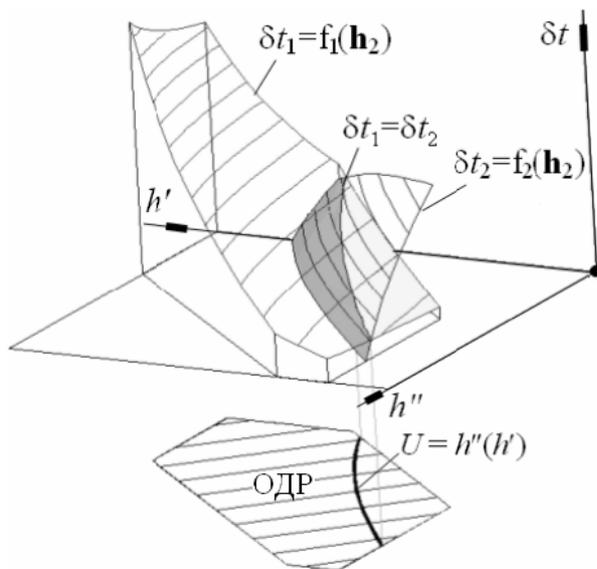
где $s_{n,i}, s_{k,j}$ – соответственно, координаты начала и конца ИЗУ разделительной стрелки j -й пары; l_i – длина базы i -го отцепа по наружным осям.

Очевидно, что с позиций интервального регулирования наилучшим для среднего отцепа расчетной группы является такой режим торможения, при котором меньший из двух интервалов в группе (1) обращается в максимум, т. е. $\min\{\delta t_1, \delta t_2\} \rightarrow \max$. Учитывая, что увеличение степени торможения среднего отцепа h_2 ведет к увеличению интервала δt_1 и, соответственно, к уменьшению δt_2 , указанное условие равносильно условию $\delta t_1 = \delta t_2 = \overline{\delta t} \rightarrow \max$ [2]. Таким образом, возникает задача поиска в ОДР области таких режимов торможения h_2 , при которых выполняется равенство $\delta t_1 = \delta t_2$.

Рассмотрим случай, когда режимы торможения 1-го и 3-го отцепов h_1, h_3 фиксированы; тогда величины τ_1, τ_3 в (1) являются постоянными. Интервалы t_{01} и t_{02} также являются постоянными, так как в данной задаче рассматривается роспуск с постоянной скоростью. В этих условиях интервалы δt_1 и δt_2 изменяются только при варьировании режима торможения 2-го отцепа h_2 .

На рис. 1, а приведены зависимости указанных интервалов от режима h_2 на стрелках разделения $\sigma_1=3$ и $\sigma_2=5$ в расчетной группе отцепов ОП-ОХ-ОП. Как видно из данного рисунка, множества интервалов δt_1 и δt_2 образуют нелинейные поля $\delta t_1 = f_1(h_2)$ и $\delta t_2 = f_2(h_2)$; при этом условию $\delta t_1 = \delta t_2$ соответствует линия их пересечения. Для решения задачи оптимизации интервалов между отцепами на разделительных элементах необходимо исследовать характер изменения величины $\overline{\delta t}$ в ОДР и установить режимы, при которых эта величина максимальна. Для поиска таких режимов погашаемая энергетическая высота на одной из тормозных позиций фиксируется, а на другой устанавливается из условия равенства интервалов $\delta t_1 = \delta t_2$. Полученные таким образом пары значений (h', h'') позволяют построить линию $U = h''(h')$, все точки которой определяют режимы торможения h_2 среднего отцепа, обеспечивающие равенство интервалов $\delta t_1(h_2) = \delta t_2(h_2)$ на стрелках его разделения σ_1 и σ_2 со смежными отцепами.

а)



Указанная линия представляет собой проекцию на плоскость $h'O'h''$ линии пересечения полей интервалов $\delta t_1(h_2)$ и $\delta t_2(h_2)$ (см. рис. 1, б).

В результате выполненных имитационных экспериментов установлено, что величина $\overline{\delta t}$ монотонно возрастает вдоль линии $U = h''(h')$ и достигает максимума на границе ОДР; при этом направление роста зависит от положения стрелок разделения отцепов 1-й и 2-й пар.

Для анализа установленной зависимости рассмотрим сумму интервалов δt_1 и δt_2 (1):

$$\sum \delta t_{12}(h_2) = t_{0,1} + t_{0,2} - \tau_1(h_1, s_{1,1}) + t_3(h_3, S_{3,2}) + t_2(h_2, S_{2,1}) - \tau_2(h_2, s_{2,2}).$$

Как было отмечено выше, при фиксированных режимах торможения первого h_1 и третьего h_3 отцепов расчетной группы первые четыре слагаемых в данном выражении постоянны; тогда

$$\sum \delta t_{12}(h_2) = C + t_2(h_2, S_{2,1}) - \tau_2(h_2, s_{2,2}), \quad (2)$$

где $C = t_{0,1} + t_{0,2} - \tau_1(h_1, s_{1,1}) + t_3(h_3, S_{3,2})$ – постоянная величина.

Следовательно, сумма интервалов $\sum \delta t_{12}(h_2)$ будет зависеть только от времени Δt проследования средним отцепом участка разделения со смежными отцепами (см. рис. 2):

$$\Delta t = t_2(h_2, S_{2,1}) - \tau_2(h_2, s_{2,2}). \quad (3)$$

б)

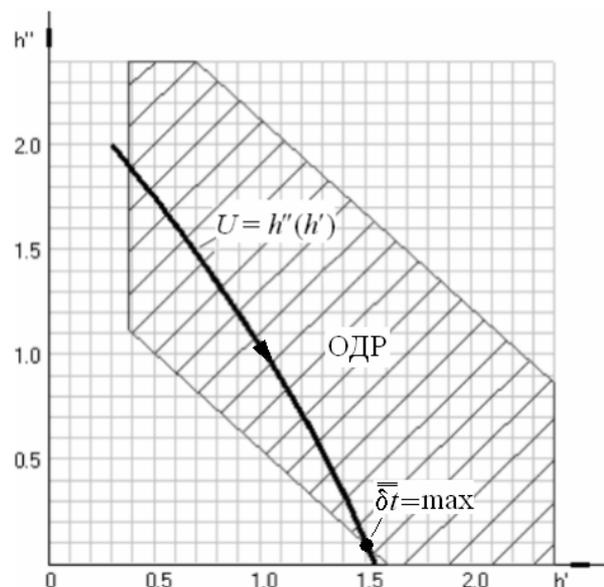


Рис. 1. Зависимости величины интервалов δt от режимов торможения: а – поля интервалов $\delta t_1(h_2)$ и $\delta t_2(h_2)$; б – линия равных интервалов $U = h''(h')$ на плоскости $h'O'h''$

Абсолютная величина указанной разности $|\Delta t|$ представляет собой время занятия средним отцепом участка разделения отцепов группы, ограниченного точками его входа на ИЗУ стрелки σ_1 и выхода из ИЗУ стрелки σ_2 (см. рис. 2). При этом величина $|\Delta t|$ зависит от длины участка разделения l_p и от режима торможения h_2 ; знак Δt определяется взаимным расположением стрелок σ_1 и σ_2 на плане станции ($\Delta t > 0$, если $S_{2,1} > S_{2,2}$, – см. рис. 3).

Как видно из рис. 2, уменьшение времени прохождения отцепом участка разделения с Δt до Δt^* приводит к увеличению интервалов δt_1 и δt_2 на величину $(\Delta t - \Delta t^*)/2$; при этом величины $|\Delta t|$ и $|\Delta t^*|$ обратно пропорциональны соответствующим средним скоростям отцепа \bar{V} и \bar{V}^* на участке разделения $[S_{2,1}, S_{2,2}]$:

$$|\Delta t| = \frac{|s_{2,2} - S_{2,1}|}{\bar{V}}, \quad |\Delta t^*| = \frac{|s_{2,2} - S_{2,1}|}{\bar{V}^*} \quad (4)$$

Следовательно, для достижения желаемого результата (увеличения интервалов δt_1 и δt_2 при сохранении их равенства) необходимо увеличить среднюю скорость отцепа с \bar{V} до \bar{V}^* на

участке $[S_{2,1}, S_{2,2}]$, соответственно уменьшив ее на начальном участке скатывания (до точки $S_{2,1}$), чтобы увеличить время $t_2(S_{2,1})$; график скорости отцепа при указанном режиме показан на рис. 2 пунктиром. Такой режим движения может быть достигнут при увеличении торможения отцепа на ВТП с одновременным уменьшением его на СТП, что соответствует движению вниз вдоль линии $U = h''(h')$ (см. рис. 1, б). Учитывая монотонность роста величины $\bar{\delta t}$, максимальный интервал в этом случае достигается в точке пересечения линии равных интервалов $U = h''(h')$ с нижним участком границы ОДР.

Противоположный вариант взаимного размещения разделительных стрелок характеризуется условием $S_{2,1} > S_{2,2}$. В соответствии с (2), для увеличения интервалов δt_1 и δt_2 в этом случае необходимо так тормозить средний отцеп, чтобы разность Δt (3) была максимальной. Анализ рис. 3 показывает, что величина Δt будет возрастать при уменьшении средней скорости отцепа \bar{V} на участке разделения $[S_{2,2}, S_{2,1}]$.

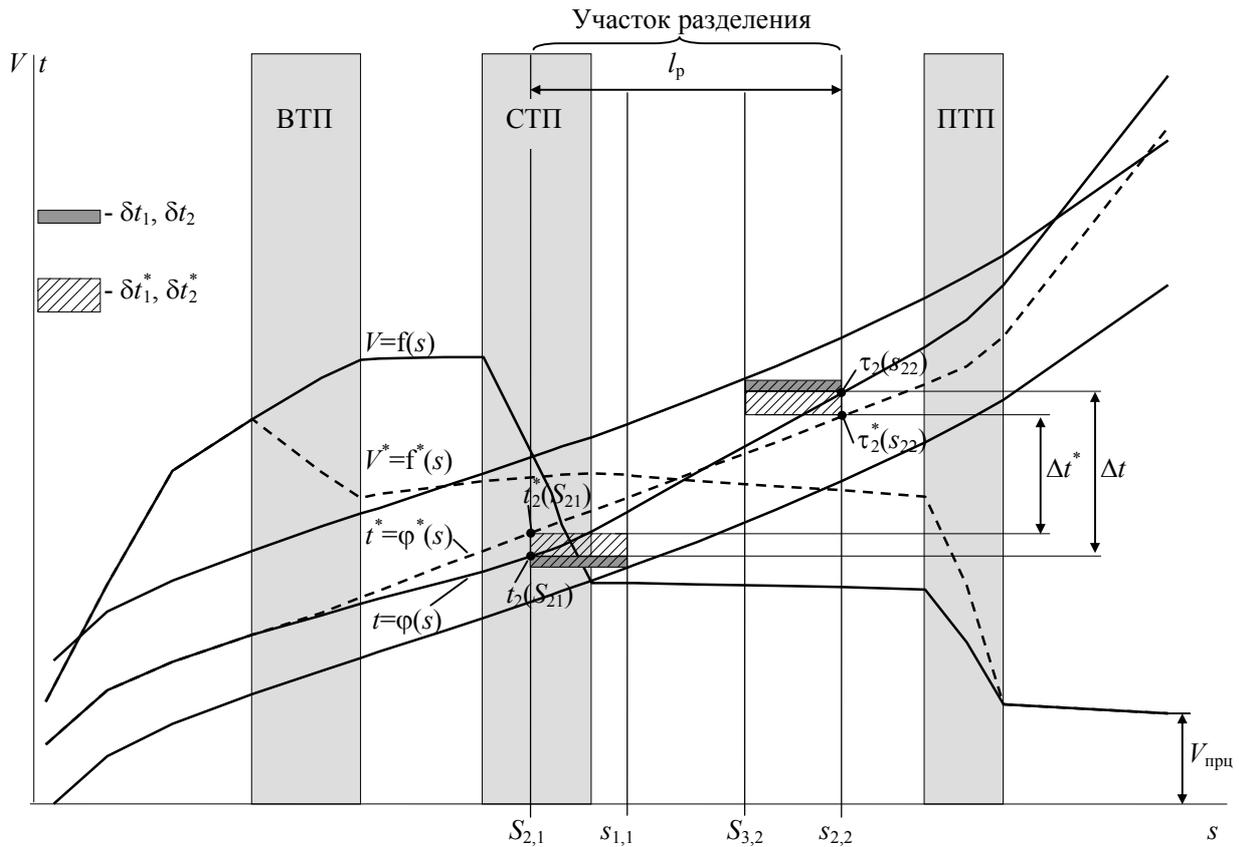


Рис 2. Влияние режимов торможения среднего отцепа на величину интервалов δt_1 и δt_2 на разделительных стрелках при $S_{2,1} < S_{2,2}$

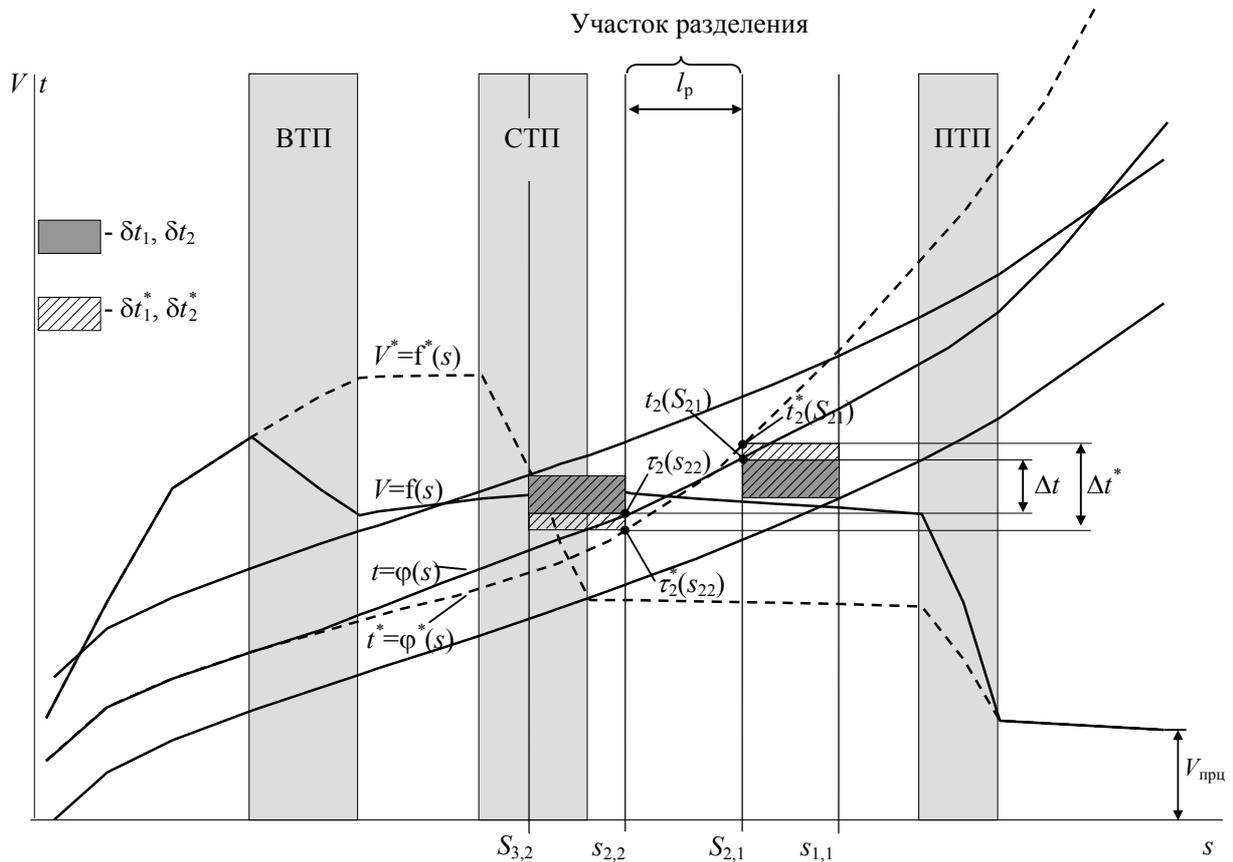


Рис 3. Влияние режимов торможения среднего отцепа на величину интервалов на разделительных стрелках при $s_{2,1} > s_{2,2}$

При этом для увеличения обеих интервалов δt_1 и δt_2 и сохранения, в то же время, их равенства необходимо одновременно с увеличением времени Δt до Δt^* уменьшить время движения отцепа на начальном участке $\tau_2(s_{2,2})$.

Таким образом, при условии $s_{2,1} > s_{2,2}$ следует использовать режим, противоположный рассмотренному первому случаю ($s_{2,1} < s_{2,2}$), – минимальное торможение среднего отцепа на ВТП с одновременным увеличением его на СТП; максимальный интервал в этом случае достигается в точке пересечения линии равных интервалов $U = h''(h')$ с верхним участком границы ОДР.

В соответствии с (3) величина $|\Delta t|$ также существенно зависит от длины участка разделения $l_p = |s_{2,2} - s_{2,1}|$. В этой связи при малых значениях l_p изменение режимов торможения вдоль линии $U = h''(h')$ (см. рис. 1, б) практически не оказывает влияния на величину интервалов δt_1 и δt_2 , что было подтверждено результатами имитационных экспериментов.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что при выборе оптимального режима торможения отцепа необходимо учитывать соотношение координат точек занятия $s_{2,1}$ и осво-

бождения $s_{2,2}$ этим отцепом ИЗУ стрелок разделения σ_1 и σ_2 , соответственно, с предыдущим и последующим отцепами. Данный вывод является более общим, чем тот, который основан на анализе номеров стрелок разделения σ_1, σ_2 [2], поскольку позволяет при выборе оптимального режима торможения учесть расстояние между стрелками и длину тормозимого отцепа.

Учитывая, что при оптимизации режимов торможения отцепов состава режимы торможения 1-го и 3-го отцепов h_1 и h_3 в каждой расчетной группе не являются фиксированными [1], необходимо оценить их влияние на величину интервалов на разделительных стрелках. Изменение режимов торможения крайних отцепов $h_1 \rightarrow h_1^*$ и $h_3 \rightarrow h_3^*$ вызывает соответствующие изменения времени движения первого отцепа за разделительную стрелку σ_1 на величину Δ_1 и третьего отцепа до разделительной стрелки σ_2 на величину Δ_2 :

$$\left. \begin{aligned} \tau_1(h_1^*) &= \tau_1(h_1) + 1, \\ \tau_3(h_3^*) &= \tau_3(h_3) + 2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Подставляя выражения (5) в (1), получим

$$t_1^*(h_2) = \delta t_1(h_2) - \Delta_1,$$

$$t_2^*(h_2) = \delta t_2(h_2) + \Delta_2.$$

Таким образом, изменение режимов торможения 1-го и 3-го отцепов приводит к параллельному смещению вдоль оси δt (см. рис. 1, а) всех точек соответствующих им полей $\delta t_1(h_2)$ и $\delta t_2(h_2)$ на величину $\pm\Delta$. Для иллюстрации на рис. 4 приведены примеры сечений вертикальной плоскостью, параллельной $h_2'0\delta t$ (см. рис. 1, а), полей интервалов $\delta t_1(h_2)$ и $\delta t_2(h_2)$ при изменении режимов торможения $h_1 \rightarrow h_1^*$, $h_1^* \rightarrow h_1$ и $h_3 \rightarrow h_3^*$, $h_3^* \rightarrow h_3$. Смещение полей $\delta t_1(h_2)$ и $\delta t_2(h_2)$, вызванное изменением режимов h_1 и h_2 , при $\Delta_1 \neq \Delta_2$ приводит к изменению положения точки их пересечения $A \rightarrow A^*$ в выбранной секущей плоскости (см. рис. 4, а). Это означает, что при неизменном режиме торможения среднего отцепа h_2 и новых режимах h_1^* и h_3^* равенства интервалов δt_1 и δt_2 не будет. Следствием этого является смещение в ОДР линии равных интервалов $U = h''(h')$, которая является проекцией линии пересечения полей $\delta t_1(h_2)$ и $\delta t_2(h_2)$ на плоскость $h'0h''$. Для примера, на рис. 5 показано положение линий равных интервалов в группе ОП-ОХ-ОП при различных режимах торможения крайних отцепов, указанных в таблице.

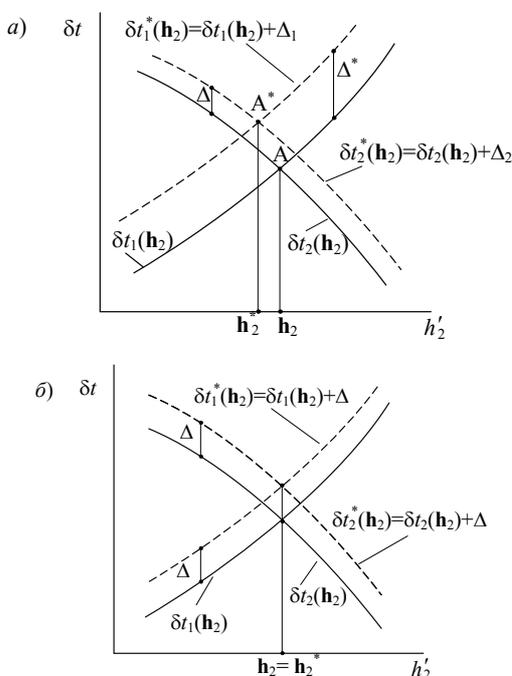


Рис. 4. Смещение полей интервалов $\delta t_1(h)$ и $\delta t_2(h)$ среднего отцепа при изменении режимов торможения крайних отцепов $h_1 \rightarrow h_1^*$, $h_1^* < h_1$ и $h_3 \rightarrow h_3^*$, $h_3^* > h_3$:
а - $\Delta_1 \neq \Delta_2$; б - $\Delta_1 = \Delta_2$

Режимы торможения крайних отцепов расчетной группы

№ лин ии	Отцеп 1			Отцеп 3		
	h_1 , м.ЭН.В		$\tau_1(h_1, \sigma_1)$, с	h_3 , м.ЭН.В		$t_3(h_3, \sigma_2)$, с
	h'	h''		h'	h''	
1	0	0	39,39	0	0	49,08
2	0	0	39,39	0,36	0	51,75
3	0,36	0	41,04	0,36	0	51,75

Важным частным случаем является такое изменение режимов торможения крайних отцепов, при котором форма линии пересечения полей $\delta t_1(h_2)$ и $\delta t_2(h_2)$ не изменяется вследствие равенства $\Delta_1 = \Delta_2$, а, следовательно, не изменяется и положение линии $U = h''(h')$ в ОДР (см. рис. 4, б). Величина указанных изменений может быть установлена из следующих соображений. Допустим, существует определенный режим торможения \bar{h}_2 , который при заданных режимах торможения крайних отцепов h_1 и h_3 обеспечивает равенство интервалов $\delta t_1 = \delta t_2$. В соответствии с (1) это условие можно представить как

$$t_{0,1} + t_2(\bar{h}_2, S_{2,1}) - \tau_1(h_1, s_{1,1}) = t_{0,2} + t_3(h_3, S_{3,2}) - \tau_2(h_2, s_{2,2}),$$

или после преобразования

$$\tau_1(h_1, s_{1,1}) + t_3(h_3, S_{3,2}) = t_{0,1} - t_{0,2} + t_2(h_2, S_{2,1}) + \tau_2(h_2, s_{2,2}). \quad (6)$$

Обозначим правую часть этого выражения как

$$Z(\bar{h}_2) = t_{0,1} - t_{0,2} + t_2(\bar{h}_2, S_{2,1}) + \tau_2(\bar{h}_2, s_{2,2}). \quad (7)$$

Очевидно, что величина $Z(\bar{h}_2)$ не зависит от режимов торможения крайних отцепов, поэтому, в соответствии с (6), любые изменения режимов h_1 и h_3 , при которых выполняется условие

$$\tau_1(h_1, S_{2,1}) + t_3(h_3, s_{2,2}) = Z(\bar{h}_2). \quad (8)$$

повлекут за собой только изменения значений интервалов $\delta t_1(\bar{h}_2)$ и $\delta t_2(\bar{h}_2)$, но при этом их равенство будет сохраняться.

Таким образом, в соответствии с (7) для любой точки ОДР h_2 может быть получено значение $Z(h_2)$, которое однозначно соответствует определенной линии $U = h''(h')$ на плоскости

$h_1 \neq h_2$. При этом, как следует из (8), существует бесчисленное множество комбинаций режимов (h_1, h_3) , при которых режимы h_2 на указанной линии U обеспечат равенство интервалов δt_1 и δt_2 .

Полученные результаты позволяют ускорить поиск оптимального режима торможения в расчетной группе отцепов при использовании итерационного метода оптимизации [1]. С этой целью на предварительном этапе для среднего отцепа группы выполняется построение нижнего или верхнего участков границы ОДР, для каждого из n узлов которого в соответствии с выражением (7) определяется величина Z_k , $k = 1 \dots n$ (см. рис 5). В процессе оптимизации после моделирования скатывания 1-го и 3-го отцепов расчетной группы при текущих значениях h_1 и h_3 осуществляется поиск отрезка границы ОДР, узловые точки которого в соответствии с (8) удовлетворяют условию

$$Z_k \leq \tau_1(h_1, \sigma_1) + t_3(h_3, \sigma_2) \leq Z_{k+1}, \quad k = 1 \dots n - 1.$$

Далее в пределах этого участка выполняется поиск такого режима h_2 , при котором $\delta t_1(h_2) = \delta t_2(h_2)$. Найденный режим h_2 обеспечивает максимальный разделительный интервал на стрелках в расчетной группе отцепов.

Таким образом, выполненные исследования позволяют при определении режимов торможения отцепов состава перейти от нелинейной негладкой задачи оптимизации с двумя переменными к задаче одномерного поиска на линейном участке границы ОДР, что существенно повышает эффективность итерационного метода.

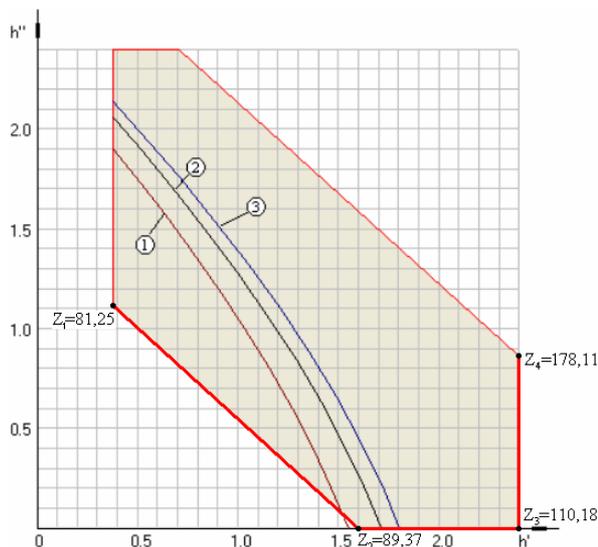


Рис. 5. Положения линии $U = h''(h')$ в ОДР среднего отцепа при изменении режимов торможения крайних отцепов расчетной группы

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобровский В. И., Рогов Н. В. Оптимизация режимов регулирования скорости отцепов при роспуске составов на горках // Вісник ДПТУ, Вип. 4. – Д.: ДПТ, 2004. – С. 174–182.
2. Бобровский В. И., Козаченко Д. Н. Математическая модель для оптимизации интервального регулирования скорости отцепов на горках // Інформаційно – керуючі системи на залізничному транспорті. – 2003. – № 3. – С. 3–8.

Поступила в редколлегию 12.09.2006.