

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ОТЦЕПОВ ПРИ РОСПУСКЕ СОСТАВОВ НА ГОРКАХ

Розроблено ітераційний метод оптимізації режимів гальмування відцепів состава на сортувальних гірках, що дозволяє максимізувати інтервали між відчепами на розділових стрілках, виконані дослідження його ефективності.

Разработан итерационный метод оптимизации режимов торможения отцепов состава на сортировочных горках, позволяющий максимизировать интервалы между отцепами на разделительных стрелках, выполнены исследования его эффективности.

The authors have developed an iteration method of optimizing the train cuts braking modes on the sorting humps, which allows maximizing the intervals between the cuts on separating switches, and made a study of its efficiency.

В современных условиях эксплуатации сортировочных горок, характеризующихся снижением объемов переработки вагонов, главной целью оптимизации режимов торможения скатывающихся отцепов становится не повышение скорости роспуска, а обеспечение их надёжного разделения на стрелках. Достижение указанной цели позволит минимизировать объем маневровой работы по ликвидации последствий неразделений отцепов, в результате которых вагоны попадают на пути, не соответствующие их назначению.

Очевидно, что наилучшие условия разделения скатывающихся отцепов на стрелках обеспечиваются при максимальных интервалах между ними. Существующие методы решения данной задачи [1–5] обладают определенными недостатками. Использование в качестве критерия оптимизации минимального интервала между отцепами состава в сочетании с классическими методами оптимизации [2–4] не обеспечивает наилучший выбор остальных интервалов. Устранить указанный недостаток позволяет многошаговый двухэтапный метод оптимизации [5], который достаточно громоздкий и не всегда обеспечивает необходимую точность решения, поскольку целевая функция в данной задаче является негладкой. В статье предлагается итерационный метод оптимизации режимов торможения скатывающихся отцепов, который свободен от указанных недостатков.

Как известно, условия разделения пары отцепов ($i, i+1$) на стрелке δ_i характеризуются величиной интервала δt_i между моментами освобождения изолированного участка стрелки

i -м и занятия его $(i+1)$ -м отцепами, в течение которого этот участок остается свободным

$$\delta t_i(q_i, q_{i+1}, \sigma_i) = t_{0i} + t_{i+1}(q_{i+1}, \sigma_i) - \tau_i(q_i, \sigma_i), \quad (1)$$

где q_i, q_{i+1} – параметры, характеризующие режимы торможения соответственно i -го и $(i+1)$ -го отцепов; t_{0i} – начальный интервал между отцепами на вершине горки; τ_i – время движения i -го отцепа от момента отрыва до момента освобождения изолированного участка разделительной стрелки σ_i ; t_{i+1} – время движения $(i+1)$ -го отцепа от момента отрыва до момента занятия изолированного участка разделительной стрелки σ_i .

Режимы торможения отцепов, изменение которых позволяет регулировать интервалы δt , могут быть представлены парами значений энергетической высоты (h', h''), погашаемой соответственно на первой и второй тормозных позициях спускной части горки. Указанные значения h', h'' для каждого отцепа должны принадлежать области допустимых режимов торможения (ОДР), в которой выполняются все их технические и технологические ограничения. Данная область представляет собой многоугольник, стороны которого соответствуют предельным значениям погашаемой энергетической высоты (h', h'', h''') на трех тормозных позициях горки [6].

Как показали исследования [6], режимы, при которых интервал δt достигает максимума, находятся на границе ОДР. При этом, если

стрелка разделения второй пары отцепов σ_i расположена ближе к вершине горки, чем стрелка разделения первой пары ($\sigma_i < \sigma_{i-1}$), то оптимальный режим находится на верхнем участке границы ОДР; в противном случае ($\sigma_i > \sigma_{i-1}$) оптимальный режим находится на ее нижнем участке.

Следует заметить, что любая точка на верхнем или нижнем участках границы ОДР и, следовательно, соответствующий режим торможения отцепа могут быть однозначно определены параметром $q \in [q_{\min}, q_{\max}]$, который принимает целочисленные значения (0, 1, 2, 3) в узлах ОДР; при этом значение q_{\min} соответствует режиму быстрого (Б), а q_{\max} – режиму медленного скатывания отцепа (М). Указанный параметр используется для представления уравнений границы ОДР в параметрическом виде [6]

$$\left. \begin{aligned} h' &= b_{1j} + k_{1j}q \\ h'' &= b_{2j} + k_{2j}q \end{aligned} \right\}, \quad j = 1, \dots, m, \quad (2)$$

где b, k – коэффициенты; m – число участков границы ОДР.

Значение m зависит от сопротивления движению отцепа (для очень плохих бегунов (ОП) в неблагоприятных условиях $m = 3$, для очень хороших бегунов (ОХ) $m = 6$).

Оптимальными являются такие режимы торможения n отцепов состава q_i , при которых интервалы δt_i , $i = 1, \dots, n-1$ (1) достигают максимума, обеспечивая тем самым максимальную надёжность разделения отцепов на стрелках. Поэтому целевая функция в задаче оптимизации режимов торможения представляет собой вектор из $(n-1)$ компонентов:

$$\delta T(q) = [\delta t_1(q_1, q_2), \delta t_2(q_2, q_3), \dots, \delta t_{n-1}(q_{n-1}, q_n)]. \quad (3)$$

При этом желательно установить такие значения режимов q в допустимой области ($q \in Q$), при которых все интервалы δt_i достигают максимума. Очевидно, что получить такое решение невозможно, поскольку увеличение некоторого интервала δt_i приведёт к соответствующему уменьшению интервала δt_{i+1} в следующей паре отцепов. Поэтому обычно осуществляют поиск компромиссного решения, при котором максимизируется минимальный интервал δt_i в составе [1–5]:

$$\delta T^*(q) = \max_{q \in Q} \min [\delta t_1(q_1, q_2), \delta t_2(q_2, q_3), \dots, \delta t_{n-1}(q_{n-1}, q_n)], \quad \delta t_i \geq 1, 0c. \quad (4)$$

Решение данной задачи с использованием традиционных методов оптимизации не является наилучшим, поскольку часть найденных при этом интервалов оказывается равной минимальному интервалу δT^* , тогда как их можно увеличить за счет некоторого уменьшения других интервалов большей величины в смежных парах отцепов [5]. Для устранения указанного недостатка необходимо рассматривать расформируемый состав как единую систему взаимосвязанных отцепов. 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.

Отцепы состава существенно различаются по параметрам – длине, весу, сопротивлению, дальности пробега в парк и др. Случайное размещение в составе отцепов с различными параметрами приводит к образованию групп отцепов, отличающихся условиями разделения на стрелках. В благоприятных группах (как правило, это группы длинных отцепов) на вершине горки между отцепами образуются достаточно большие интервалы, которые сохраняются до разделительных элементов и обеспечивают надёжное разделение таких отцепов. Напротив, в неблагоприятных группах (группы одиночных отцепов) интервалы между отцепами на вершине горки минимальны, что может в дальнейшем привести к их неразделению на стрелках в случае неправильного выбора режима торможения. Поэтому 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 более благоприятных группах.

Решение задачи оптимизации режимов интервального регулирования скорости отцепов в такой постановке возможно при использовании предлагаемого итерационного метода. Метод позволяет найти в расформируемом составе группы последовательных отцепов, близкие по условиям разделения, и установить для них такие режимы торможения, при которых интервалы на разделительных стрелках для всех пар отцепов группы одинаковы.

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

Критической считается группа отцепов, для которой абсолютная величина разности интервалов на разделительных стрелках во второй и в первой парах отцепов $|f_i(q_i)|$ максимальна:

$$f_i(q_i) = \delta t_i(q_i, q_{i+1}) - \delta t_{i-1}(q_{i-1}, q_i), \quad i \in [2, n-1]. \quad (5)$$

Учитывая локальный характер оптимизации, интервалы δt_{i-1} , δt_i (1) 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:

$$\left. \begin{aligned} \delta t_{i-1}(q_i) &= t_{0,i-1} + t_i(q_i, \sigma_{i-1}) - \tau_{i-1}(\sigma_{i-1}), \\ \delta t_i(q_i) &= t_{0,i} + t_{i+1}(\sigma_i) - \tau_i(q_i, \sigma_i). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

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

$$f_i(q_i) > 0, \quad \text{то } q_i < q_{i,\max} \quad (7)$$

или

$$f_i(q_i) < 0, \quad \text{то } q_i > q_{i,\min}. \quad (8)$$

Если же ни одно из этих условий не выполняется, то это означает, что для i -го отцепа установлен один из двух предельных режимов торможения, который не может быть изменен и, следовательно, группу не следует рассматривать как критическую. Так, если $f_i(q_i) > 0$, т. е. $\delta t_i > \delta t_{i-1}$, а $q_i = q_{i,\max}$, то это означает, что впереди i -го отцепа расположена группа с неблагоприятными условиями разделения, а за ним – с благоприятными. Установленный при этом для i -го отцепа режим медленного скатывания $q_{i,\max}$ обеспечивает максимально возможные интервалы в группе отцепов впереди него за счет сокращения интервалов в следующей за этим отцепом благоприятной группе.

Напротив, если $f_i(q_i) < 0$, т. е. $\delta t_i < \delta t_{i-1}$, то для i -го отцепа устанавливается режим быстрого скатывания ($q_i = q_{i,\min}$), который позволяет максимизировать интервалы в группе за этим отцепом за счет их уменьшения в предыдущей благоприятной группе.

Оптимальным для среднего отцепа критической группы является такой режим торможения q_i^* , при котором меньший из двух интервалов δt_{i-1} , δt_i (6) достигнет максимума

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

Поиск оптимального режима q_i^* осуществляется, как было отмечено выше, на границе Q_i ОДР i -го отцепа ($q_i^* \in Q_i$). Для этого необходимо

найти в интервале $[q_{i,\min}, q_{i,\max}]$ точку q_i^* , в которой негладкая функция $F_i = \min \{ \delta t_{i-1}, \delta t_i \}$ достигает максимума (рис. 1, а). При этом с точки зрения реализации алгоритма решения целесообразно перейти к эквивалентной задаче поиска нуля функции $f_i(q_i)$ (5), показанной на рис. 1 пунктиром. Учитывая, что функция $f_i(q_i)$ имеет разрывы первой производной в узлах ОДР, первоначально необходимо локализовать отрезок границы ОДР между двумя смежными узлами, на котором функция $f_i(q_i)$ принимает нулевое значение и меняет знак. С этой целью необходимо найти такое целочисленное значение q_i' , при котором $f_i(q_i') f_i(q_i' + 1) < 0$. В дальнейшем в интервале $[q_i', q_i' + 1]$, в котором $f_i(q)$ является гладкой функцией, необходимо найти отрезок $[a, b]$, удовлетворяющий условиям:

$$f_i(a) f_i(b) < 0, \quad |a - b| < \varepsilon_q, \quad (10)$$

где ε_q – допустимая погрешность решения.

В качестве окончательной оценки оптимального решения q_i^* можно принять середину отрезка $[a, b]$, т. е. $q_i^* = (a + b)/2$. Если же функция $f_i(q)$ не имеет нуля в интервале $[q_{i,\min}, q_{i,\max}]$ (см. рис. 1, б, в), то в этом случае в качестве оптимального режима q_i^* принимается соответствующее граничное значение при $f_i(q_{i,\min}) > 0$ и $f_i(q_{i,\max}) > 0$, для среднего отцепа устанавливается режим медленного скатывания $q_i^* = q_{i,\max}$ (см. рис. 1, б), а при $f_i(q_{i,\min}) < 0$ и $f_i(q_{i,\max}) < 0$ – режим быстрого скатывания $q_i^* = q_{i,\min}$ (см. рис. 1, в).

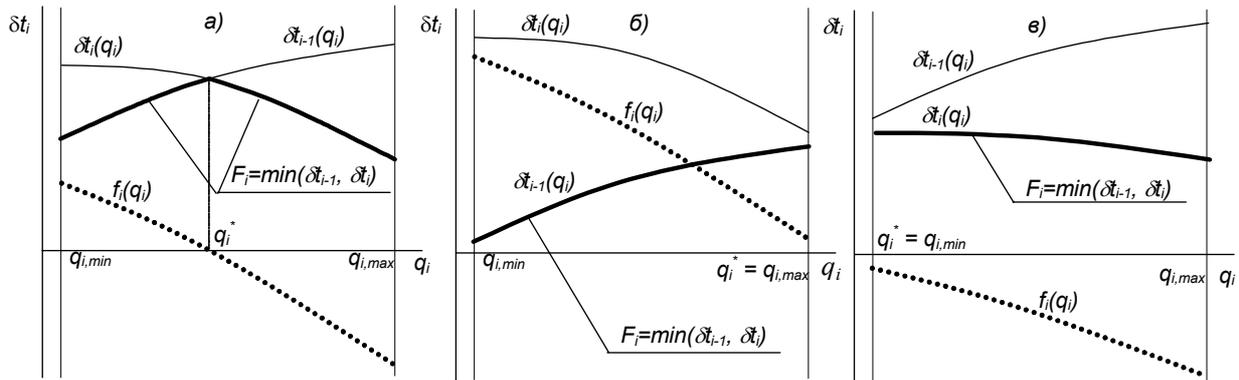


Рис. 1. Графическое решение задачи оптимизации режима торможения среднего отцеп критической группы

Для поиска нуля функции $f_i(q_i)$ в интервале $[q'_i, q'_i + 1]$ первоначально были использованы традиционные методы (деления пополам, золотого сечения, линейной интерполяции). Однако метод линейной интерполяции оказался недостаточно надёжным, а другие методы не обеспечивали необходимого быстродействия. Поэтому, принимая во внимание особенности целевой функции, был разработан регуляризованный метод поиска нуля функции $f_i(q_i)$ [7], являющийся комбинацией методов деления пополам и линейной интерполяции. Сущность метода заключается в следующем. На некотором этапе поиска по двум лучшим точкам q_1, q_2 , найденным на предыдущих этапах, строится линейная аппроксимирующая функция, которая принимает нулевое значение в точке u :

$$u = q_2 - \frac{q_2 - q_1}{f(q_2) - f(q_1)} f(q_2). \quad (11)$$

Полученная точка используется для построения следующего приближения, если она принадлежит текущему интервалу неопределённости $u \in [q_a, q_b]$ и при этом

$$|u - q_1| < \frac{q_a + q_b}{2}. \quad (12)$$

Если эти условия не выполняются, то на данном этапе точка u заменяется серединой интервала неопределённости

$$u = (q_a, q_b)/2.$$

После выбора точки u осуществляется корректирование границ интервала неопределённости и списка лучших точек. Поиск продолжается, пока

$$|f(u)| > \varepsilon_{\text{кр}},$$

где $\varepsilon_{\text{кр}}$ – точность выравнивания интервалов в критической группе отцепов. Указанный метод позволил более чем в три раза сократить число итераций при поиске нуля функции $f(q)$ и за счет этого существенно ускорить процесс оптимизации режимов торможения.

Разработанный алгоритм поиска нуля функции $f(q)$ был реализован с использованием численных методов представления функций $t(q, \sigma)$ и $\tau(q, \sigma)$, входящих в (6) и в целевую функцию (9). С этой целью для каждого отцепов состава должна быть задана таблица значений t и τ , найденных для различных режимов торможения q , которые расположены в узловых и промежуточных точках границы ОДР (раздельно для ее верхнего и нижнего участка). Указанные значения t и τ находят предварительно для всех разделительных стрелок горки σ с помощью имитационного моделирования скатывания отцепов. В процессе итераций для нахождения значений времени t и τ при произвольных режимах торможения q используются интерполяционные многочлены Ньютона, которые строятся отдельно для каждого отрезка ОДР, где производные функций $t(q)$ и $\tau(q)$ остаются непрерывными.

Таким образом, с помощью разработанной методики на очередном шаге итерации оптимизируется режим торможения одного отцепов состава (среднего отцепов критической группы). В результате корректируются интервалы на стрелках разделения этого отцепов с двумя смежными отцепами. После этого осуществляется переход к следующему шагу итерации, на котором выбирается новая критическая группа и т. д. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие

$$\max |f_i(q_i)| < \varepsilon, \quad i = 2, \dots, n-1. \quad (13)$$

Далее рассмотрен пример оптимизации режимов торможения для состава из 25 отцепов, данные о котором приведены в табл. 1. Перед началом оптимизации для каждого отцепа был установлен начальный режим торможения, определяемый значением q_{oi} , при этом для отцепов с четными номерами в качестве начальных были приняты соответствующие максимальные ($q_{oi} = q_{i,max}$),

а с нечетными – минимальные ($q_{oi} = q_{i,min}$) значения параметра q . Интервалы δt_i на разделительных стрелках, образующиеся при таких режимах торможения, показаны на рис. 2 сплошной линией. Как видно, указанные интервалы имеют значительный разброс и в отдельных случаях их значения недопустимы ($\delta t_i < 1$ с).

Таблица 1

Результаты оптимизации режимов торможения отцепов состава

Номер отцепа	Длина отцепа l , м	Основное сопротивление w_o , Н/кН	Номер стрелки разделения σ	Начальный интервал t_o , с	Режим торможения				Интервал на стрелке разделения δt , с
					q_{min}	q_{max}	q_0	q^*	
1	29,46	2,20	3	19,74	0	3	0	0(Б)	14,556
2	41,76	2,10	2	23,11	0	2	0	0,750	14,558
3	12,02	3,90	2	11,74	0	1	1	0(Б)	14,222
4	77,82	1,05	3	44,83	0	2	0	1,725	14,232
5	13,92	4,50	2	9,21	1	2	2	1(Б)	8,238
6	29,46	1,10	2	20,09	0	2	0	1,953	8,224
7	41,76	1,44	4	26,74	0	2	2	2(М)	13,816
8	48,08	1,24	2	30,20	0	3	0	2,937	13,822
9	48,08	1,44	2	25,88	0	2	2	1,042	13,810
10	13,92	2,00	3	14,33	0	2	0	1,580	13,798
11	72,12	1,39	2	38,93	0	3	3	2,741	13,815
12	13,92	0,50	2	9,84	0	2	0	0(Б)	8,286
13	13,92	3,50	3	9,73	0	1	1	0,722	8,262
14	29,24	1,25	2	17,49	1	3	1	2,717	8,249
15	13,92	4,00	2	14,30	0	1	1	1(М)	18,172
16	91,74	1,32	3	50,53	0	2	0	1,337	18,190
17	13,92	1,00	2	14,69	1	3	3	2,540	18,191
18	94,54	1,29	4	53,27	0	2	0	1,554	18,182
19	13,92	1,50	2	8,65	1	2	2	1(Б)	7,324
20	14,73	1,40	2	11,18	0	2	0	1,399	7,306
21	27,84	0,83	2	16,04	0	2	2	1,639	7,312
22	13,92	3,00	5	8,50	0	2	0	1,955	7,324
23	13,92	2,50	2	12,91	1	2	2	1,909	7,346
24	55,68	1,28	4	30,90	0	2	0	1,975	7,370
25	14,62	3,60	–	–	0	3	3	3(М)	–

В процессе оптимизации происходит корректирование режимов торможения в критических группах с целью выравнивания интервалов δt в смежных парах отцепов. Так, на первой итерации в качестве критической была выбрана группа, включающая 18-й, 19-й и 20-й отцепы, в которой разность смежных интервалов оказалась максимальной: $\delta t_{18} = 47,53$ с, $\delta t_{19} = -3,24$ с и $|f(q_i)| = 50,77$ с.

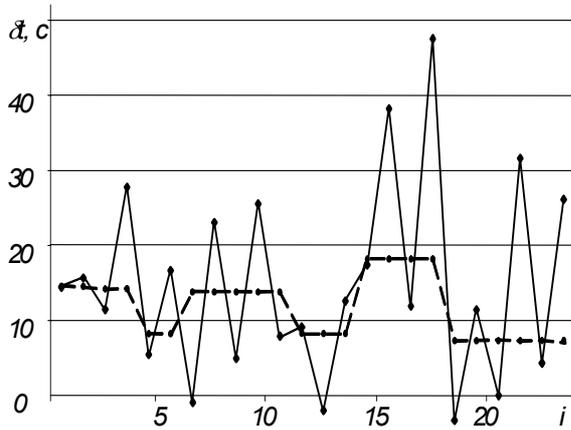


Рис. 2. Интервалы между отцепами состава

В результате оптимизации для среднего 19-го отцепа был установлен режим быстрого скатывания ($q_{19} = 1$), после чего интервалы в группе изменились: $\delta t_{18} = 31,3$ с, $\delta t_{19} = 5,7$ с. В данном случае равенство интервалов не было достигнуто, поскольку для 19-го отцепа значение $q_{19} = 1$ является минимальным.

Для иллюстрации характера итерационного процесса для данного состава на рис. 3 приведен график изменения абсолютной величины функции $f(q)$ для критических групп отцепов по мере увеличения номера итерации v . Как видно из приведенного ри-

сунка, на первых 20 шагах значение $|f(q)|$ резко падает от 50,77 до 3,31 с. При этом уже на этих шагах определяются отцепы, разделяющие состав на группы с близкими интервалами δt , и для них устанавливаются соответствующие предельные режимы торможения q_i (минимальные или максимальные). В результате выбора таких режимов происходит перераспределение интервалов δt в указанных группах (увеличение в группах с малыми значениями δt за счет некоторого уменьшения больших интервалов).

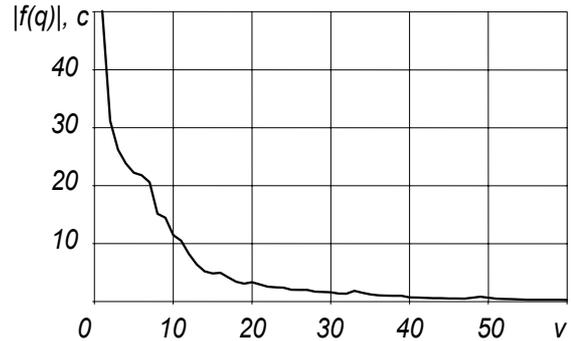


Рис. 3. График изменения функции $|f(q)|$ при увеличении номера итерации v

На последующих итерациях (после 20-й) происходит окончательное выравнивание интервалов δt во всех образовавшихся группах отцепов с одинаковыми условиями разделения. При этом на этих шагах величина разности $|f(q)|$ незначительна и медленно убывает по мере приближения к завершению оптимизации. Для примера на рис. 4 показан процесс выравнивания интервалов в группе отцепов 12...15. В этой группе первоначально интервалы существенно различались: $\delta t_{12} = 9,12$ с, $\delta t_{13} = -1,90$ с, $\delta t_{14} = 12,56$ с.

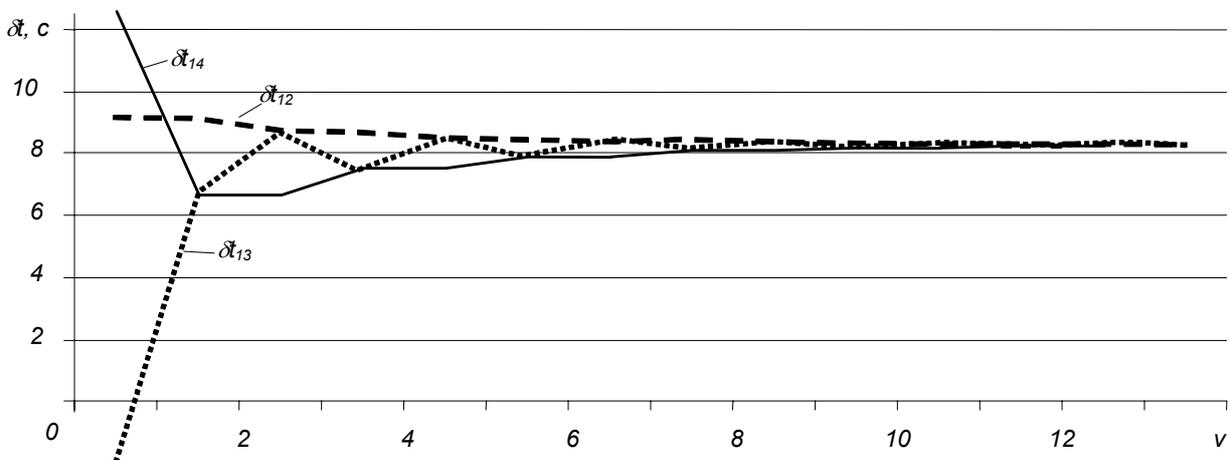


Рис. 4. Итерационный процесс выравнивания интервалов в группе отцепов 12...15

В процессе итераций происходит перераспределение интервалов в данной группе, так что к концу решения они становятся практически одинаковыми и равными 8,3 с (табл. 1), при этом изменения величин δt_i зачастую имеют сложный колебательный характер (см. рис. 4). Поэтому для окончательного выравнивания интервалов требуется, как правило, достаточно большое число итераций, которое зависит от заданной точности решения. Например, при $\varepsilon = 0,025$ с для выравнивания интервалов между отцепами группы 15...19 потребовалось 29 итераций (16-й отцеп – 11, 17-й – 12 и 18-й – 6 итераций), при этом общее число итераций для оптимизации режимов данного состава $N = 119$.

Окончательное распределение интервалов δt в рассматриваемом составе по завершении оптимизации показано на рис. 2 пунктирной линией. Оптимальные значения параметра q_i^* , характеризующие режимы торможения отцепов указанного состава и соответствующие интервалы δt_i на разделительных стрелках, приведены в табл. 1. Анализ полученных значений параметра q_i^* показывает, что в составе для ряда отцепов установлены предельные (максимальные для отцепов 7, 15 и минимальные для отцепов 3, 5, 12 и 19) значения q_i^* (выделены в табл. 1 штриховкой). Эти значения обеспечивают для данных отцепов соответственно режимы медленного (М) или быстрого (Б) скатывания. Указанные отцепы делят состав на группы с различными условиями скатывания (благоприятные и неблагоприятные группы), при этом в каждой такой группе эти условия (интервалы δt) одинаковы.

Предельные режимы торможения всегда устанавливаются для первого и для последнего отцепов состава. При этом для перво-

го отцепа принято $q_1 = q_{1,\min}$ (Б), а для последнего $-q_n = q_{n,\max}$ (М), что позволяет обеспечить наилучшие условия разделения соответственно первой и последней пар отцепов в составе.

В результате оптимизации рассматриваемый состав оказался разделенным на 7 групп (1-3-5-7-12-15-19-25), для каждой из которых установлено некоторое значение интервала δt , одинаковое для всех пар отцепов группы (14.6, 14.2, 8.2, 13.8, 8.3, 18.2 и 7.3 с).

Как показал анализ результатов оптимизации большого числа составов, возможны 4 варианта взаимного расположения отцепов с предельными режимами торможения q_{\min} и q_{\max} (Б-М, М-Б, Б-Б и М-М). Как видно из рис. 5, а-г, такие отцепы делят состав на части с одинаковыми условиями разделения ($\delta t_i = \delta t_{i+1} = \dots = \delta t_{i+k-1}$). В случае Б-М (см. рис. 5, а) эти условия неблагоприятны ($\delta t_i < \delta t_{i-1}$, $\delta t_{i+k-1} < \delta t_{i+k}$), в случае М-Б (см. рис. 5, б) – условия благоприятны ($\delta t_i > \delta t_{i-1}$, $\delta t_{i+k-1} > \delta t_{i+k}$), а в случаях Б-Б (см. рис. 5, в) и М-М (рис. 5, г) – условия промежуточные. В случае режимов Б-Б интервалы при переходе от группы к группе уменьшаются ($\delta t_{i-1} > \delta t_i$, $\delta t_{i+k-1} > \delta t_{i+k}$), а при режимах М-М – увеличиваются ($\delta t_{i-1} < \delta t_i$, $\delta t_{i+k-1} < \delta t_{i+k}$). Очевидно, что выбор для указанных отцепов предельных режимов Б и М позволяет максимально увеличить интервалы δt в неблагоприятных группах за счет их сокращения в смежных благоприятных группах. Для остальных отцепов каждой такой части состава оптимальные значения параметра q_i^* устанавливаются из условия обеспечения равных интервалов δt и, следовательно, условий разделения для всех пар отцепов группы.

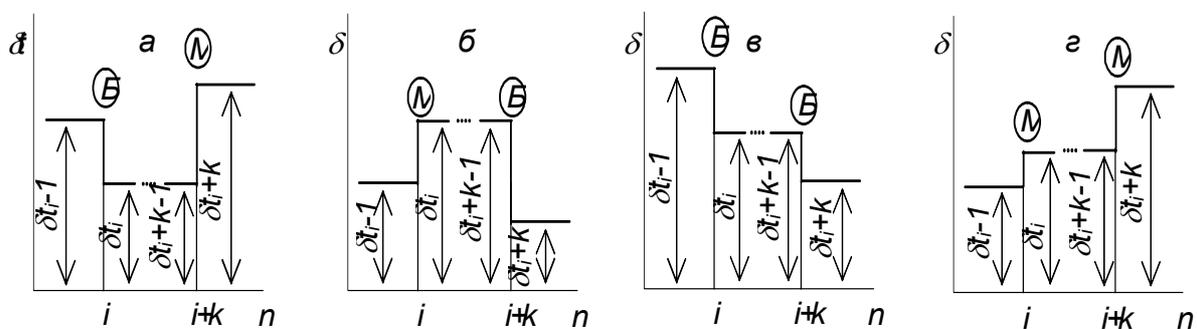


Рис. 5. Схемы взаимного расположения в составе отцепов с предельными режимами торможения

В результате исследований установлено, что основное влияние на величину установленного интервала δt_i в паре отцепов $(i, i+1)$ оказывает начальный интервал t_{0i} между ними на вершине горки, который определяется, главным образом, длиной первого отцепа в паре l_{0i} :

$$t_{0i} = \frac{l_{0i} - s_{0i} + s_{0,i+1}}{V_0}, \quad (14)$$

где s_{0i} , $s_{0,i+1}$ – координаты точек отрыва соответственно i -го и $(i+1)$ -го отцепов; V_0 – скорость роспуска состава.

Начальные интервалы $t_{0i} < 10$ с (табл. 1), которые образуются при наличии в составе двух и более коротких смежных отцепов, приводят к образованию групп, неблагоприятных по условиям разделения (отцепы 5...7 – интервалы $\delta t = 8,2$ с; отцепы 12...15 – $\delta t = 8,3$ с; отцепы 19...25 – $\delta t = 7,3$ с).

Соппротивление движению отцепов w_0 на величину интервалов δt влияет неоднозначно. Так, в парах отцепов, ходовые качества которых существенно различаются (сочетание П-Х – пары 5-6 и 13-14; сочетание Х-П – пары 12-13, 14-15, 21-22, 24-25), интервалы минимальны, а указанные пары находятся в неблагоприятных группах. В то же время в парах 3-4 (П-Х) и 4-5 (Х-П) интервалы δt достаточно велики (14,2 с), а сами пары относятся к благоприятным группам.

Эффективность разработанного метода оптимизации определяется числом итераций N , необходимых для поиска оптимальных режимов торможения отцепов состава. Для исследования влияния различных факторов на число итераций, была выполнена оптимизация режимов торможения отцепов 102 составов, в которых номера разделительных стрелок были получены с помощью статистического моделирования. При этом для каждого состава использовались различные методы выбора начальных значений компонент вектора режимов торможения отцепов q_0 (1 – минимальные значения, 2 – максимальные, 3 – средние, 4 – случайные, 5, 6 – чередующиеся минимальные и максимальные значения, 7 – расчетные значения), определяемые с помощью предварительно полученной линейной статистической модели

$$q_{0i} = f(X),$$

где X – вектор параметров, определяющих q_0 . В результате установлено, что число итераций

для отдельных составов колеблется в широких пределах для всех методов. В табл. 2 для каждого из методов приведены статистические параметры распределения случайного числа итераций N , необходимого для оптимизации режимов торможения отцепов состава при точности выравнивания интервалов $\varepsilon = 0,025$ с, а также частота P появления составов, для которых данный метод обеспечивал минимальное число итераций.

Таблица 2

Анализ числа итераций при различных методах определения начальных значений q_0

Метод	N_{\min}	N_{\max}	$N_{\text{ср}}$	σ_N	P
1	67	301	143,7	42,9	0,00
2	89	275	146,5	38,9	0,04
3	67	289	127,4	40,1	0,08
4	66	265	127,9	34,5	0,09
5	46	292	124,9	39,1	0,15
6	49	232	121,9	35,7	0,24
7	62	241	115,4	34,1	0,40

Одним из основных факторов, определяющих разброс числа итераций в интервале $[N_{\min}, N_{\max}]$, является вектор номеров разделительных стрелок отцепов состава.

Для повышения эффективности разработанного метода и минимизации необходимого числа итераций N был выполнен анализ влияния на итерационный процесс различных факторов при разных методах выбора начальных значений q_{0i} . Оказалось, что для всех методов величина N экспоненциально уменьшается по мере возрастания ε , лучшим оказался метод, где в качестве q_{0i} выбираются их средние значения. Установлено, что для практических целей достаточна точность выравнивания интервалов $\varepsilon = 1$ с, что позволит резко уменьшить необходимое число итераций (до 3–4 на один отцеп). Одновременно с этим, чтобы исключить возможность уменьшения величины минимального интервала между отцепами для отдельных составов, был усовершенствован критерий завершения итераций по составу (13). В результате исследований оказалось, что рациональным является сочетание высокой точности выравнивания интервалов ($\varepsilon = 0,025$ с) с ограничением каждого интервала δt_i величиной δT_{\min} , уста-

навливаемой индивидуально для каждого состава как:

$$\delta T_{\min} = \min \{ \max \delta t_1, \max \delta t_2, \dots, \max \delta t_{n-1} \} - \Delta, \\ \max \delta t_i = t_i (q_{i,\min}, q_{i+1,\max}). \quad (15)$$

Величина Δ определяет допустимый диапазон отклонения найденных в результате оптимизации интервалов δt_i от их наилучших (максимальных) значений и соответствующее число итераций N .

Для оценки эффективности предложенного критерия (15) была выполнена оптимизация тех же 102 составов при различных значениях Δ и методах выбора q_{0i} . На рис. 6 показаны полученные зависимости числа итераций и минимального на всей совокупности составов интервала δt_{\min}^* от величины Δ . Оказалось, что с ростом Δ интервал δt_{\min}^* уменьшается весьма незначительно (до 8 %), в то время как необходимое число итераций уменьшается в 8 раз. Выбор допустимой величины Δ может осуществляться на основе полученных зависимостей (см. рис. 6), исходя из требований конкретной задачи.

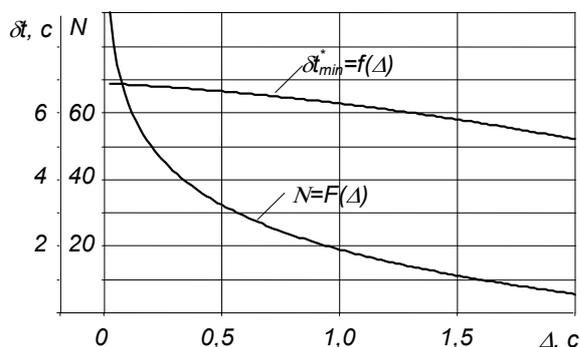


Рис. 6. Зависимости результатов оптимизации δt_{\min}^* и N от допустимой величины уменьшения минимального интервала между отцепами

Таким образом, выполненные исследования позволили установить основной принцип выбора оптимального режима роспуска состава, заключающийся в том, чтобы обеспечить наилучшие условия разделения на стрелках отцепов всех неблагоприятных групп состава. Разработанный итерационный метод оптимизации позволяет установить указанные группы в составе и определить для всех его отцепов такие режимы торможения, при которых в этих груп-

пах интервалы на разделительных стрелках максимальны.

Исследования механизма итерационного процесса позволили установить рациональный критерий окончания оптимизации и наилучший метод выбора начальных режимов торможения отцепов. Полученные при этом зависимости могут быть использованы для выбора компромисса между точностью решения и необходимым числом итераций в соответствии с условиями конкретной задачи.

Модель процесса расформирования составов, построенная на основе итерационного метода, может быть использована для совершенствования конструкции сортировочных горок и технологии роспуска составов; она может также оказаться полезной при создании систем автоматизации сортировочного процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Божко Н. П. Методика определения режимов торможения отцепов при анализе конструкций сортировочных горок // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях: Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 229/15. – Д.: ДИИТ, 1983. – С. 30–36.
2. Муха Ю. А. Автоматизация и механизация переработки вагонов на станциях / Ю. А. Муха, И. В. Харланович, В. П. Шейкин и др. – М.: Транспорт, 1985. – 248 с.
3. Бобровский В. И. Поиск оптимальных режимов торможения на проектируемых сортировочных горках // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1999. – № 5. – С. 50–54.
4. Бобровский В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках / Транспорт: 36. науч. прачь. – Д.: Арт-Пресс, 2000. – С. 43–47.
5. Бобровский В. И. Многошаговый двухэтапный метод оптимизации режимов роспуска составов на горках // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2004. – № 2. – С. 8–14.
6. Бобровский В. И. Математическая модель для оптимизации интервального регулирования скорости отцепов на горках / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2003. – № 3. – С. 3–8.
7. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. – М.: Мир, 1985. – 509 с.

Поступила в редколлегию 15.04.04.