

В. И. БОБРОВСКИЙ, А. В. КУДРЯШОВ (Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАСФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ НА ГОРКАХ

Приведена методика выбора рациональных режимов торможения отцепов состава, позволяющая учесть их многократные разделения. Данная методика может быть использована для решения задачи оптимизации режимов расформирования составов.

Наведено методику вибору раціональних режимів гальмування відцепів составу, що дозволяє врахувати їх багаторазові розділення. Дана методика може бути використана для вирішення задачі оптимізації режимів розформування составів.

The method of selection of rational modes of inhibition while uncoupling the cars ended, allowing them to take into account multiple divisions. This can be used to solve the problem of optimization of dissolution of compositions.

Выбор режима расформирования составов в значительной степени влияет на качество сортировочного процесса на сортировочных горках. Оптимальное управление роспуском состава предполагает определение таких режимов торможения (РТ) его отцепов, при которых обеспечиваются наилучшие условия их разделения на стрелках, а также выполняются требования прицельного регулирования скорости. Задаче оптимизации режимов расформирования составов посвящен целый ряд научных работ [1-4], в которых предложены различные критерии оптимальности и методы ее решения.

Задача оптимизации РТ отцепов состава в нелинейной постановке была решена в [1]. Для решения задачи используются методы прямого поиска – комплексный метод Бокса и метод случайного поиска. В качестве целевой функции использовался минимальный интервал δt между отцепами состава на разделительных стрелках

$$f = \min \{ \delta t_i = t_{oi} + t_{i+1}(q_{i+1}) - \tau_i(q_i) \},$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (1)$$

где q_i, q_{i+1} – параметры, характеризующие РТ, соответственно, i -го и $(i+1)$ -го отцепов.

При этом в результате оптимизации находят такой режим расформирования состава $q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, при котором $f \rightarrow \max$.

В работе [2] для решения задачи оптимизации РТ отцепов используются градиентные методы (метод Фиакко и Мак-Кормика, а также

метод допустимых направлений). В этой связи сформулированная в [1] задача оптимизации была преобразована в гладкую путем введения дополнительной переменной, имеющей смысл нижней границы для всех δt_i (1); последние в этом случае переходят в ограничения.

Основным недостатком методов [1, 2] является то, что в них максимизируется один (минимальный) интервал δt между отцепами всего состава, однако не оптимизируется распределение интервалов в других его частях.

Ликвидировать указанный недостаток позволяет многошаговый двухэтапный метод оптимизации РТ отцепов состава, основанный на идеях динамического программирования [3]. Метод позволяет максимизировать не только минимальный интервал δt_{\min} , но и ряд других, близких к нему интервалов $\delta t_i > \delta t_{\min}$, за счет выравнивания их величин с интервалами в смежных парах отцепов состава. Поиск оптимального режима расформирования состава осуществляется в два этапа, на первом из которых выполняется условная оптимизация, а на втором – безусловная. Однако данный метод является достаточно громоздким и не всегда обеспечивает необходимую точность решения, поскольку целевая функция в данной задаче является негладкой.

Итерационный метод оптимизации, предложенный в [4], позволяет решить задачу поиска таких РТ, при которых максимизируется не только минимальный интервал в составе, но и интервалы между отцепами в неблагоприятных

группах за счет некоторого их уменьшения в соседних более благоприятных группах. Данный метод основан на локальной оптимизации РТ среднего отцепа критической группы из трех смежных отцепов состава. Выбор критической группы на очередной итерации определяется максимальной абсолютной величиной разности интервалов на разделительных стрелках во второй и в первой парах отцепов этой группы $|f_i(q_i)|$:

$$f(q_i) = \max \left\{ \delta t_i(q_i, q_{i+1}) - \delta t_{i-1}(q_{i-1}, q_i) \right\},$$

$$i = 2, \dots, n-1 \quad (2)$$

На каждом шаге итерации осуществляется поиск оптимального значения q_i^* , при котором меньший из двух интервалов $(\delta t_{i-1}, \delta t_i)$ достигает максимума:

$$\delta t(q_i^*) = \max \min \{ \delta t_{i-1}(q_i^*), \delta t_i(q_i^*) \} \quad (3)$$

Следует отметить, что при оптимизации РТ в [1-4] учитываются интервалы разделения только между смежными отцепами состава. Между тем, как показали исследования [5, 6], при роспуске составов в процессах разделения на стрелках участвуют не только смежные отцепы, но и отцепы, разделенные в составе одним или несколькими другими отцепами (несмежные отцепы). При этом, как показано в [5], при определенных РТ интервалы на разделительных стрелках между несмежными отцепами могут оказаться меньше допустимых. В результате исследований, выполненных в [6], установлено, что число вторичных разделений при расформировании достаточно длинных составов может даже превышать число разделений смежных отцепов и поэтому их необходимо учитывать при решении задач, направленных на повышение качества интервального регулирования на горках.

Недостатком рассмотренных работ [1-4] является и то, что в них при решении задачи оптимизации РТ моделирование торможения отцепов осуществляется при равномерном распределении погашаемой энергетической высоты во всей зоне действия тормозной позиции. Это не вполне соответствует реальному процессу торможения и приводит к изменению времени скатывания отцепов, что может влиять на рассчитанную величину интервалов на разделительных элементах [7].

Поэтому в данной статье рассмотрены возможные пути совершенствования методики оптимизации режима расформирования состава, позволяющие учесть условия разделения несмежных отцепов и использующие более адекватную модель торможения отцепов. Базовым элементом данной задачи является выбор рационального режима торможения некоторого отцепа состава, который осуществляется на очередном шаге итерационного процесса оптимизации [4]. Режим торможения i -го отцепа должен обеспечивать выполнение условия

$$\min(\delta t_{i-1}, \delta t_i) \rightarrow \max \quad (4)$$

При этом, как было указано выше, необходимо учитывать многократные разделения i -го отцепа с другими отцепами состава. С этой целью соответствующие интервалы данного отцепа с несмежными отцепами состава следует учитывать в ограничениях задачи

$$\min(\delta t_{i-1}, \delta t_i) \leq \min \{ \delta T_i \} \quad (5)$$

где δT_i — вектор интервалов между управляемым i -м и несмежными с ним отцепами.

Для учета противоречий между прицельным и интервальным регулированием в качестве ограничений используются допустимые скорости выхода отцепа из тормозных позиций спускной части горки:

$$\begin{aligned} U'_{\min} &\leq U'_i \leq U'_{\max} \\ U''_{\min} &\leq U''_i \leq U''_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая, что U'_{\min} и U'_{\max} , а также U''_{\min} и U''_{\max} имеют достаточно сложную взаимосвязь, поэтому ограничения (6) удобнее представить областью допустимых скоростей выхода (ОДС) [8] отцепа из верхней и средней тормозных позиций.

Для учета вторичных разделений необходимо на каждой итерации рассматривать уже не группу из трех смежных отцепов $(i-1, i, i+1)$, а кортеж всех отцепов состава, разделяющихся с i -м (см. рис. 1). В него кроме управляемого i -го отцепа и смежных с ним $i-1$ -го и $i+1$ -го отцепов необходимо включить отцепы с номерами p_1, p_2, \dots, p_{N-1} , которые расположены в составе до i -го отцепа ($p_{N-1} < \dots < p_2 < p_1 < i-1$), а также отцепы с номерами r_1, r_2, \dots, r_{N-1} расположенные после i -го ($i+1 < r_1 < r_2 < \dots < r_{N-1}$); здесь N — число стрелочных позиций на горке. При этом указанные отцепы включаются в кортеж, если они

имеют разделение на стрелках с управляемым отцепом.

Число отцепов в кортеже зависит от комбинации их назначений в составе и от конструк-

ции горочной горловины; максимальное число разделяющихся отцепов, расположенных до и после управляемого отцепа, равняется $2N$.

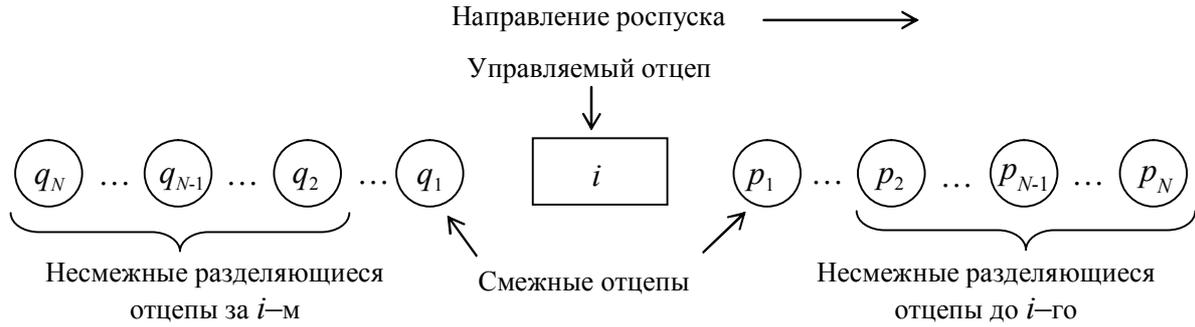


Рис. 1. Схема кортежа управляемого отцепа

Кортеж каждого отцепа состава определяется с помощью верхней треугольной матрицы номеров разделительных стрелок [6], строкам и столбцам которой поставлены в соответствие номера путей назначения последовательности отцепов состава (см. рис. 2). Элементами матрицы σ_{ij} , $i < j$ являются номера стрелочных позиций, на которых разделяются маршруты i -го и j -го отцепов, следующих, соответственно, на пути W_i, W_j ; элементы $\sigma_{ij} = 0$ для всех $i = j$.

	W_1	W_2	W_3	...	W_{n-1}	W_n
W_1	0	σ_{12}	σ_{13}	...	$\sigma_{1,n-1}$	$\sigma_{1,n}$
W_2		0	σ_{23}	...	$\sigma_{2,n-1}$	$\sigma_{2,n}$
W_3			0	...	$\sigma_{3,n-1}$	$\sigma_{3,n}$
...			
W_{n-1}					0	$\sigma_{n-1,n}$
W_n						0

Рис. 2. Верхняя треугольная матрица номеров разделительных стрелок отцепов состава

Разделение отцепов на стрелке σ_{ij} имеет место ($\sigma_{ij} \neq 0$), если при роспуске состава с момента освобождения этой стрелки i -м отцепом до момента занятия её j -м отцепом по ней не проследует никакой другой отцеп с номером k , $i < k < j$. Это означает, что у i -го отцепа на каждой стрелочной позиции σ по маршруту скатывания ($\sigma = 1, 2, \dots, N$) может быть не более одного разделения с одним из последующих отцепов состава. При этом для отцепов с номерами $i < i+1 < k_1 < k_2 < \dots < k_{N-1}$ номера стрелок разделения также возрастают

$\sigma_{i,i+1} < \sigma_{i,k_1} < \sigma_{i,k_2} < \dots < \sigma_{i,N-1}$. Поэтому, если в строках матрицы $\|\sigma\|$ элемент $\sigma_{i,k} \leq \sigma_{i,j}$, $k > j$, то принимается $\sigma_{i,k} = 0$. Это означает, что k -й отцеп не может разделяться с i -м на стрелке $\sigma_{i,k}$, так как между ними данную стрелку проследует один или несколько других отцепов с номерами из интервала $[i+1, k-1]$

Если несмежные i -й и j -й отцепы ($i < j - 1$) следуют на один и тот же путь ($W_i = W_j$), то у них не может быть разделения на какой-либо стрелке и поэтому в данном случае также $\sigma_{ij} = 0$. Кроме того, при этом j -й отцеп блокирует все возможные последующие разделения j -го отцепа с отцепами, имеющими номера больше j ; в этом случае $\sigma_{ik} = 0$ для всех $k > j$.

Таким образом, в каждой строке и в каждом столбце матрицы $\|\sigma\|$ может быть не более N ненулевых элементов $\sigma_{ij} \neq 0$. Ненулевые элементы i -й строки и j -го столбца определяют номера разделительных стрелок всех отцепов, входящих в кортеж i -го отцепа

В [6] была разработана методика, позволяющая определить все элементы матрицы номеров стрелок $\|\sigma\|$ (рис. 2) для каждого конкретного состава, расформируемого на горке с любой конструкцией стрелочной горловины с помощью булевых функций:

$$\sigma_{ij} = \varphi(\zeta_i, \zeta_j)$$

где ζ_i, ζ_j – коды путей назначения i -го и j -го отцепов

Код каждого сортировочного пути ζ формируется таким образом, чтобы по нему можно было определить положение стрелок в маршруте на данный путь. Указанный код в двоичной форме состоит из N разрядов по числу стрелочных позиций на горке.

Анализ матрицы позволяет установить кортеж для каждого управляемого отцепов состава, а также номера стрелок его разделения со всеми отцепами кортежа. Для примера на рис. 3 представлена верхняя треугольная матрица номеров разделительных стрелок отцепов состава из 10 отцепов, расформируемого на симметричной горке с $N=5$ стрелочными позициями.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
W_i	16	8	12	1	3	16	10	11	8	3
1	16	0	2	3	2	2	0	3	3	2
2	8	-	0	2	3	3	2	2	2	0
3	12	-	-	0	2	2	3	4	5	2
4	1	-	-	-	0	4	2	2	2	3
5	3	-	-	-	-	0	2	2	2	3
6	16	-	-	-	-	-	0	3	3	2
7	10	-	-	-	-	-	-	0	4	2
8	11	-	-	-	-	-	-	-	0	2
9	8	-	-	-	-	-	-	-	-	0
10	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Рис. 3. Верхняя треугольная матрица номеров разделительных стрелок отцепов состава из 10 отцепов

На рис. 3 выделены элементы матрицы, которые отображают все имеющиеся разделения в данном составе. В матрице i -я строка и i -й столбец определяют кортеж i -го (управляемого) отцепов. Например в кортеж 3-го отцепов входят отцепов с номерами 1, 2, 4, 6, 7, 8 (выделены стрелками). При этом отцепов 1 и 2 расположены до управляемого 3-го отцепов и разделяются с ним соответственно на 3-й и 2-й стрелках, а отцепов 4, 6, 7 и 8 расположены после 3-го и имеют с ним разделения соответственно на 2-й, 3-й, 4-й и 5-й стрелках; кортеж 3-го отцепов приведен на рис. 4.

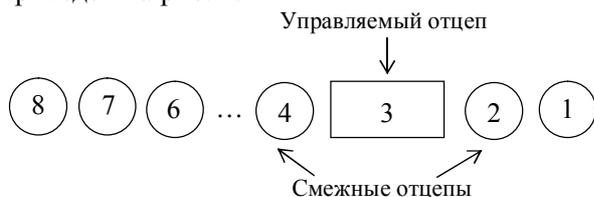


Рис. 4. Схема кортежа 3-го отцепов

Оптимизацию РТ управляемого i -го отцепов в кортеже осуществляют с использованием частного критерия (4) с последующим контролем остальных интервалов. При этом, если условие (5) выполняется, то оптимизация РТ управляемого отцепов прекращается. В противном случае, корректирование РТ управляемого отцепов продолжается таким образом, чтобы обеспечить выполнение условия (5).

Для поиска оптимальных параметров РТ управляемого отцепов в группе из трех отцепов целесообразно использовать методику [9], позволяющую обеспечить наилучшие условия разделения обеих пар отцепов группы (4). В данной методике учитывается, что при торможении на отцеп действует сила, удельная величина которой пропорциональна номинальной мощности замедлителя при выбранной ступени торможения. Одним из параметров, определяющим РТ отцепов, является вектор $U=(U', U'')$ скоростей выхода из верхней и средней тормозных позиций; допустимые значения скоростей U' и U'' для каждого отцепов принадлежат ОДС. Торможение отцепов осуществляется в ограниченной зоне, определяемой вектором $x=(x', x'')$ условных координат точек начала торможения ($x' \in [0, 1], x'' \in [0, 1]$).

На базе предложенной методики выбора РТ управляемого отцепов было разработано программное обеспечение, позволяющее решить задачу оптимизации режима интервального регулирования для расформируемых составов; решение задачи осуществляется с использованием имитационного моделирования процесса роспуска.

Выполненный анализ результатов оптимизации режимов торможения отцепов показал достаточную эффективность данной методики, которая может быть рекомендована для расчета скоростей выхода отцепов из тормозных позиций при создании автоматизированной системы управления роспуском составов на горках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобровский, В. И. Поиск оптимальных режимов торможения на проектируемых сортировочных горках [Текст] / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1999. – №5. – С. 50 - 54.
2. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках [Текст] / В. И. Бобровский // Транспорт: 36. науч. прачь. – Днепропетровск: Арт-Пресс, 2000. – С. 43 - 47.

3. Бобровский, В. И. Многошаговый двухэтапный метод оптимизации режимов роспуска составов на горках [Текст] / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2004. – №2. – С. 8-14.

4. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов регулирования скорости отцепов при роспуске составов на горках [Текст] / В. И. Бобровский, Н. В. Рогов // Вісник ДПТУ, Вип. 4. – Д.: ДПТ, 2004. – С. 174-182.

5. Бобровский, В. И. Вероятностные характеристики разделений отцепов состава на стрелках [Текст] / В. И. Бобровский, А. В. Кудряшов, Ю. В. Чибисов // Вісник ДПТУ, Вип. 18. – Д.: ДПТ, 2007. – С. 146-150.

6. Бобровский, В. И. Статистический анализ числа разделений отцепов на стрелках при расформировании составов [Текст] / В. И. Бобровский, А. В.

Кудряшов, Л. О. Ефимова // Вісник ДПТУ, Вип. 20 – Д.: ДПТ, 2008. – С. 13-19.

7. Бобровский, В. И. Вплив режимів гальмування на тривалість скочування відцепів з гірки [Текст] / В. И. Бобровский, А. В. Кудряшов, Л. О. Єльнікова // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 102. – С. 147-156.

8. Бобровский, В. И. Ограничения режимов торможения отцепов на сортировочных горках [Текст] / В. И. Бобровский, Р. В. Вернигора, А. В. Кудряшов, Л. О. Ельнікова // Вісник ДПТУ, Вип. 27 – Д.: ДПТ, 2009. – С. 30-35.

9. Кудряшов, А. В. Определение рациональных режимов скатывания отцепов с сортировочных горок [Текст] / А. В. Кудряшов // Вісник ДПТУ, Вип. 28– Д.: ДПТ, 2009. – С.149-154 с

Поступила в редколлегию 8.02.2011.

Принята к печати 15.02.2011.