

УДК 656.225.073

Д. Н. КОЗАЧЕНКО^{1*}, В. И. БОБРОВСКИЙ^{2*}, С. В. ГРЕВЦОВ^{3*}

^{1*} Научно-исследовательская часть, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта kozachenko@upr.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*} Каф. «Станции и узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (066) 444 63 95, эл. почта 1973bvi@gmail.com, ORCID 0000-0001-8622-2920

^{3*} Львовский колледж транспортной инфраструктуры Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Снопковская, 47, г. Львов, 79011, тел. +38 (032) 27614 90, эл. почта Grevtsov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2925-4293

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОРТИРОВОЧНЫХ ПУТЕЙ МЕЖДУ РЕГУЛИРОВЩИКАМИ СКОРОСТИ ВАГОНОВ

Цель. Целью данной работы является повышение эффективности сортировочного процесса на сортировочных горках с немеханизированными парковыми тормозными позициями путем оптимизации распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов. **Методика.** Исследования выполнены с использованием методов моделирования горочных процессов и метода ветвей и границ. **Результаты.** На железных дорогах Украины 87 % сортировочных горок имеют немеханизированные тормозные позиции. Характерной особенностью работы таких горок является появление дополнительных требований к интервальному регулированию скорости скатывания отцепов для обеспечения возможности их последовательного торможения регулировщиком, который обслуживает несколько сортировочных путей. В этой связи актуальной является задача поиска такого распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов, которое обеспечивает минимальную продолжительность отпуска. В общем случае число возможных вариантов решения данной задачи является ограниченным, но может быть весьма большим. Поэтому исследование посвящено поиску правил, которые позволяют исключать из анализа заведомо нерациональные варианты. **Научная новизна.** В результате выполненных исследований разработан формальный метод оптимизации распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов. **Практическая значимость.** Результаты выполненных исследований могут быть использованы в оперативной работе железнодорожных станций для решения задачи автоматизированной выдачи рекомендаций по организации отпуска на немеханизированных сортировочных горках, а также при решении задач нормирования числа регулировщиков скорости вагонов на них.

Ключевые слова: сортировочная горка; немеханизированная тормозная позиция; регулировщик скорости вагонов; сортировочный процесс; расформирование составов, оптимизация.

Введение

Основным средством расформирования формирования составов на железных дорогах являются сортировочные горки. Качество их работы во многом определяет как себестоимость перевозочного процесса, так и его безопасность, сохранность подвижного состава и перевозимых грузов. В этой связи исследования, направленные на совершенствование методов управления выпуском составов, являются актуальными для железнодорожного транспорта Украины. Необходимо отметить, что современные методы исследования сортировочного процесса ориентированы на сортировочные горки с механизированными и автоматизированными тормозными позициями. В то же время на железнодорожных станциях Украины эксплуатируется 117 сортировочных горок, из

которых только 31 имеет механизированные тормозные позиции. На 15 механизированных сортировочных горках замедлители установлены как на спускной части, так и на сортировочных путях; на остальных 16 сортировочных горках парковые тормозные позиции не механизированы. Таким образом, для 87 % сортировочных горок актуальной является задача организации их работы в условиях башмачного торможения. Более того, в условиях износа и частичной неисправности тормозных замедлителей дополнительное башмачное торможение интенсивно применяется и на сортировочных горках, у которых механизированы все тормозные позиции. Основным преимуществом использования тормозных башмаков для регулирования скорости скатывания отцепов являются относительно низкие капитальные затраты и эксплуатационные расходы, а также возмож-

ность гибко регулировать последние в зависимости от объемов работы. Недостатки башмачного торможения связаны с нахождением людей в опасной зоне и возможностью повреждения вагонов при движении «юзом». Поэтому методы выбора параметров процесса расформирования составов на сортировочных горках с немеханизированными тормозными позициями должны учитывать особенности их работы.

Анализ литературных источников и постановка проблемы

Сортировочная горка представляет собой сложный инфраструктурный и технологический комплекс, при эксплуатации которого взаимодействуют железнодорожный путь, системы автоматики, телемеханики и связи, маневровые локомотивы, вагоны, грузы, производственный персонал, что повышает сложность проблемы обеспечения безопасности расформирования составов грузовых поездов. Безопасность и качество сортировочного процесса определяются как конструкцией и техническим оснащением сортировочных горок, так и качеством управленческих решений относительно режимов отпуска.

При исследованиях горочных процессов скатывание отцепов с горки рассматривается как управляемый процесс их движения по наклонной плоскости. При этом, процесс скатывания отцепа может быть описан дифференциальным уравнением движения, независимой переменной в котором является путь [1]

$$ds = \frac{v dv}{g'(i(s) - w_r - w_{sc}(s, v) - w_{ew}(v) - b_r(s))}, \quad (1)$$

где g' – ускорение силы тяжести с учетом инерции вращающихся масс, m/c^2 .

s – расстояние от вершины горки до первой оси скатывающегося отцепа, м;

v – скорость движения отцепа, м/с;

$i(s)$ – приведенный уклон под отцепом, %;

w_r – основное удельное сопротивление движению, Н/кН;

w_{sc} – удельное сопротивление движению от стрелок и кривых, Н/кН;

w_{ew} – удельное сопротивление движению от среды и ветра, Н/кН;

b_r – удельное тормозное сопротивление вагонных замедлителей, Н/кН.

Решение указанного уравнения выполняется численными методами [2, 3].

Управление скоростью скатывания отцепов достигается за счет воздействия на вагоны тор-

мозных средств (вагонных замедлителей или тормозных башмаков) и создания ими дополнительной силы сопротивления b_r . При этом управляемыми параметрами являются скорости выхода отцепов из тормозных позиций. Режимы торможения отцепов должны обеспечивать допустимые скорости входа отцепов на следующие тормозные позиции, а также подхода отцепов к вагонам на сортировочных путях. При последовательном скатывании отцепов состава между ними должны обеспечиваться достаточные временные интервалы для перевода стрелок и направления отцепов по своим маршрутам движения, а также для срабатывания замедлителей. Сложность решения задачи управления скоростью скатывания отцепов связана с тем, что параметры внешней среды, параметры отцепов и фактические скорости выхода отцепов из тормозных позиций подвержены влиянию значительного числа случайных факторов и представляют собой случайные величины. Одним из путей преодоления данной проблемы в настоящее время является автоматизация сортировочного процесса на базе внедрения на сортировочных горках системы разнообразных датчиков, позволяющих уменьшить неопределенность задачи, и автоматически управляемых вагонных замедлителей, позволяющих реализовывать заданные скорости выхода отцепов из тормозных позиций с достаточно высокой точностью [4-7].

Проблемой внедрения таких систем на сортировочных горках Украины является высокая стоимость их сооружения и эксплуатации. В то же время, исследования, выполненные в [8], показывают, что требования к технической оснащенности сортировочных горок существенно зависят от размеров перерабатываемого вагонопотока. При этом в условиях значительных колебаний объемов сортировочной работы во многих случаях освоение пиковых нагрузок целесообразно выполнять за счет введения дополнительных горочных локомотивов и штата регулировщиков скорости вагонов, а не путем автоматизации горочных комплексов, средства которых не будут востребованы в периоды уменьшения объемов работы. В этой связи на значительном числе железнодорожных станций как Украины, так и зарубежных железных дорог, сохраняется башмачное торможение. Преимуществом такого вида торможения, по сравнению с механизированным, является возможность гибкого реагирования на изменение объемов переработки вагонов путем изменения штата регулировщиков их скорости. Эксплу-

Нормативы численности регулировщиков скорости вагонов, выполняющих операции по торможению вагонов

Численность регулировщиков скорости вагонов	Количество сортировочных путей
1-2	До 6
2-3	6-10
4-5	10-16
5-6	16-21
6-7	21-27

тация сортировочных горок с немеханизированными тормозными позициями порождает класс специфических задач оптимизации управления роспуском составов, связанных с организацией безопасной работы регулировщиков скорости движения вагонов.

Выбор скорости выхода отцепов из тормозных позиций на автоматизированных горках осуществляется с использованием различных алгоритмов, примеры которых представлены в [9, 10]. В то же время, управление скоростью скатывания вагонов на немеханизированных горках выполняется регулировщиками скорости вагонов и имеет существенные отличия от автоматизированных горок. Во-первых, в условиях когда один регулировщик обслуживает несколько сортировочных путей должны быть обеспечены безопасные условия его перехода после торможения одного отцепа к другому; этот процесс в последующем будем называть разделением отцепов на башмачной тормозной позиции. Во-вторых, сортировочные горки с немеханизированными тормозными позициями не оборудуются датчиками для определения ходовых характеристик отцепов. В-третьих, торможение вагонов выполняется тормозными башмаками, сопротивление движению которых существенно зависит от нагрузки на ось отцепа и коэффициента трения тормозных башмаков о рельс и сложно прогнозируется. В-четвертых, управление скоростью движения вагонов выполняется регулировщиками скорости, работающими непосредственно на сортировочных путях. Поэтому количество управляющих команд, поступающих регулировщику в процессе роспуска, должно быть минимизировано из соображений безопасности. В связи с указанными особенностями немеханизированных горок основная часть решений должна приниматься на этапе планирования роспуска с учетом возможных погрешностей реализации. Принципы выбора режимов торможения отцепов на горках с немеханизированными тормозными позициями представлены в [11].

Исследования, выполненные в [12] показывают, что число регулировщиков скорости вагонов, работающих на башмачных тормозных позициях, оказывает существенное влияние на перерабатывающую способность горок. Нормативы численности регулировщиков скорости вагонов, выполняющих операции по торможению вагонов, которые рекомендованы в [13], приведены в табл. 1.

Необходимо отметить, что условия регулирования скорости движения отцепов каждого состава существенно отличаются в зависимости от характеристик вагонов и степени заполнения сортировочных путей. В связи с этим, в соответствии с «Инструкцией регулировщика скорости вагонов» [14] перед роспуском старший регулировщик скорости вагонов расставляет регулировщиков по сортировочным путям с учетом объема и ритма их работы, степени заполнения сортировочных путей и погодных условий. В настоящее время данная задача решается на основании опыта старших регулировщиков скорости вагонов. Автоматизация решения данной задачи позволит обеспечить повышение скорости расформирования составов при безусловном выполнении требований безопасности роспуска.

Цель

Целью работы является повышение эффективности сортировочного процесса на сортировочных горках с немеханизированными парковыми тормозными позициями за счет оптимизации распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов.

Методика

Исследование работы сортировочной горки выполняется на основе имитационного моделирования процесса скатывания отцепов, в основу которого положено численное решение уравнения (1). Методика выбора режимов торможения отцепов при фиксированном распределении сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов приведена в [11].

В данном исследовании принято, что назначение регулировщиков на сортировочные пути выполняется до начала роспуска состава и не изменяется в его процессе. При этом i -й регулировщик обслуживает x_i последовательных путей сортировочного парка. Целью решения задачи является минимизация времени расфор-

мирования состава T_p , что обеспечивает максимальную перерабатывающую способность горки

$$T_p = \sum_{s=1}^S T_{p,s}(v_{p,s}, \mathbf{V}) + (S-1)t_{\text{пер}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $T_{p,s}(v_{p,s}, \mathbf{V})$ – продолжительность роспуска вагонов s -й группы отцепов в зависимости от скорости ее роспуска $v_{p,s}$ и режимов торможения отцепов \mathbf{V} ;

S – число групп отцепов в реформируемом составе между которыми необходимо предусматривать перерывы для обеспечения требований разделения отцепов на башмачных тормозных позициях;

$t_{\text{пер}}$ – продолжительность перерыва в роспуске.

Указанная задача имеет следующие ограничения:

$$\begin{cases} v_{\min} \leq v_{p,s} \leq v_{\max} \\ \delta t_{kjh}(v_{p,s}, \mathbf{V}) \geq t_{\text{pe},h} \\ \mathbf{v}_j \in \Omega_{n,j}(v_{p,s}) \\ 0 \leq x_i \leq x_{\max}, i = 1..k \\ \sum_{i=1}^k x_i = N \\ kx_{\max} \geq N \end{cases} \quad (3)$$

где v_{\min}, v_{\max} – допустимые минимальная и максимальная скорости роспуска;

$t_{\text{pe},h}$ – минимальный интервал времени между скатывающимися отцепами, необходимый для из разделения на h -м разделительном элементе;

δt_{kjh} – разделительный интервал между k -м и j -м отцепами на h -м разделительном элементе;

\mathbf{v}_j – режим торможения j -го отцепа;

$\Omega_{n,j}$ – область допустимых режимов торможения j -го отцепа;

x_{\max} – максимальное число путей, которое может обслуживать один регулировщик скорости вагонов;

k, N – соответственно, число регулировщиков и путей в сортировочном парке.

Учитывая, что при обслуживании одного сортировочного пути одним регулировщиком скорости вагонов достигается минимум вероятности неразделения отцепов, поступающих в обслуживание на башмачные тормозные позиции, то при $k \geq N$ задача имеет тривиальное

решение – на каждый путь должен быть назначен один регулировщик, при этом часть регулировщиков может быть не задействована. В случае если $kx_{\max} = N$ решение задачи также тривиально, так как каждый регулировщик должен обслуживать максимально-возможное количество сортировочных путей.

Если $k < N < kx_{\max}$, то необходимо оценивать влияние распределения регулировщиков по сортировочным путям на условия расформирования составов. При этом должно соблюдаться условие $1 \leq x_i \leq x_{\max}$ так, как оставлять незадействованными часть регулировщиков скорости вагонов в этих условиях является нерациональным. Учитывая ограниченное число вариантов распределения, задача может быть решена путем их полного перебора. Однако, число анализируемых вариантов может быть уменьшено с использованием направленного перебора вариантов.

При последовательном назначении регулировщиков скорости вагонов на сортировочные пути количество путей x_i , которое может обслуживать i -й регулировщик с учетом ограничений (3) определяется условием

$$N - (k-i)x_{\max} - n_{i-1} \leq x_i \leq N - k + i - n_{i-1},$$

где n_{i-1} , – общее количество путей, которые обслуживают предшествующие $i-1$ регулировщики скорости.

В качестве примера рассмотрим распределение путей между $k = 3$ регулировщиками скорости вагонов в случае, если каждый регулировщик может обслуживать не более $x_{\max} = 4$ путей при роспуске состава, состоящего из 22 вагонов, объединенных в 15 отцепов, параметры которого представлены в табл. 2, на пути одного пучка сортировочного парка из $N = 8$ путей, схема горловины которого представлена на рис. 1. Различные варианты распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости движения вагонов определяют расчетные группы отцепов, которые разделяются на башмачных тормозных позициях. Все возможные варианты разделения отцепов на парковых башмачных тормозных позициях для рассматриваемого примера сведены в матрицу и приведены в табл. 3.

В общем, число возможных вариантов распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов существенно зависит от числа путей в парке.

На рис. 2. представлены зависимости между числом путей N и числом возможных вариантов их распределения R между регулировщика-

ми скорости вагонов в случае, когда число регулировщиков соответствует нормам, приведенным в табл. 1.

Таблица 2

Параметры расформируемого состава

№ отц	№ ваг	Тип	Весовая категория	$l_{прц}, м$	Путь назначения	№ отц	№ ваг	Тип	Весовая категория	$l_{прц}, м$	Путь назначения
1	1	ПЛ	42	412	14	7	12	ЦС	77	422	13
2	2	ПВ	71	467	11	8	13	ПВ	85	437	14
	3	ПВ	71			9	14	ПЛ	79	504	16
	4	ПВ	71			15	ПЛ	79			
3	5	ЦС	22	486	17	10	16	ПВ	30	474	17
	6	ЦС	22			11	17	ЦС	80	787	13
4	7	КР	54	504	11	12	18	ПВ	58	1085	12
	8	КР	54			19	ПВ	58			
5	9	ЦС	80	787	13	13	20	ПЛ	80	669	15
6	10	КР	65	492	18	14	21	ПВ	70	462	17
	11	КР	65			15	22	ПВ	78	1070	12

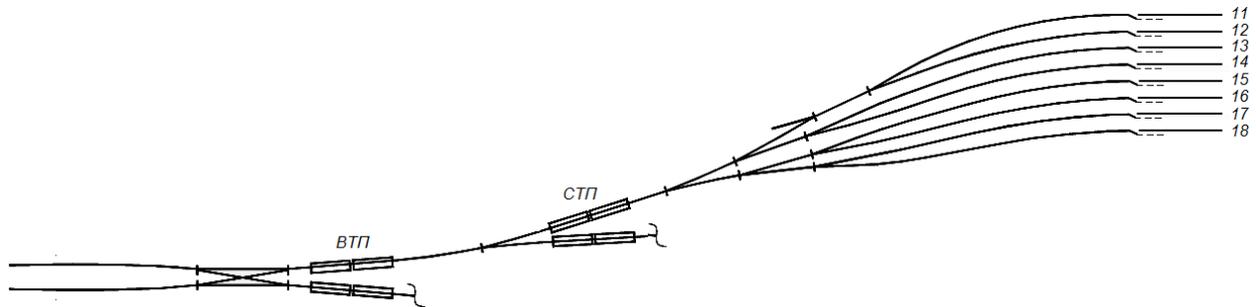


Рис. 2. Схема горочной горловины

Таблица 3

Возможные варианты разделения отцепов на парковых башмачных тормозных позициях

Вариант	Число путей			Номера отцепов															Число разделений	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
	Пути назначения отцепов															Z ₁	Z ₂			
	14	11	17	11	13	18	13	14	16	17	14	12	15	17	12					
x ₁	x ₂	x ₃	Номера регулировщиков, выполняющих торможение отцепов															Z ₁	Z ₂	
1	4	3	1	1	1	2	1	1	3	1	1	2	2	1	1	2	2	1	6	
2	4	2	2	1	1	3	1	1	3	1	1	2	3	1	1	2	3	1	4	
3	4	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	3	1	1	2	3	1	5	
4	3	4	1	2	1	2	1	1	3	1	2	2	2	2	1	2	2	1	5	
5	3	3	2	2	1	3	1	1	3	1	2	2	3	2	1	2	3	1	2	4
6	3	2	3	2	1	3	1	1	3	1	2	3	3	2	1	2	3	1	2	3
7	3	1	4	2	1	3	1	1	3	1	2	3	3	2	1	3	3	1	3	
8	2	4	2	2	1	3	1	2	3	2	2	2	3	2	1	2	3	1	2	4
9	2	3	3	2	1	3	1	2	3	2	2	3	3	2	1	2	3	1	2	3
10	2	2	4	2	1	3	1	2	3	2	2	3	3	2	1	3	3	1	3	
11	1	4	3	2	1	3	1	2	3	2	2	3	3	2	2	2	3	2	4	
12	1	3	4	2	1	3	1	2	3	2	2	3	3	2	2	3	3	2	4	

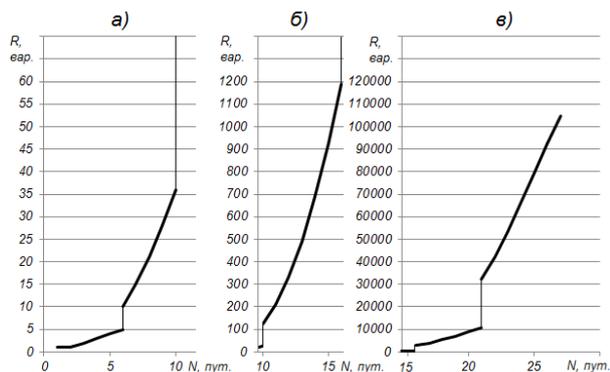


Рис. 2. Зависимость между числом путей N и числом возможных вариантов их распределения R между регулировщиками скорости вагонов:
 а) $N = 1..10$; б) $N = 10..15$; в) $N = 15..27$

Учитывая, что определение времени роспуска составов выполняется вероятностными методами на основании многократных вычислительных экспериментов, то возникает задача сокращения числа рассматриваемых вариантов за счет отсева нерациональных. С этой целью в качестве математического метода решения задачи может быть использован метод ветвей и границ, который заключается в нахождении верхней границы решения T_v , соответствующей известному распределению сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов, которое удовлетворяет ограничениям (3) с наименьшей продолжительностью роспуска, и нижней границы решения T_n , соответствующей известной оценке продолжительности роспуска состава такой, что заведомо не превышает фактическую продолжительность роспуска.

Анализ множества возможных сочетаний пар отцепов, разделяющихся на башмачных тормозных позициях, представленных в табл. 4, показывает, что для большого количества вариантов имеют место повторы разделительных групп, анализ которых позволяет сократить объем вычислительной работы при поиске оптимального варианта.

Необходимо отметить, что поступление на сортировочные пути, обслуживаемые одним регулировщиком, последовательно скатывающихся отцепов, как правило, ухудшает условия их разделения; напротив, увеличение количества отцепов, следующих на сортировочные пути, обслуживаемые другими регулировщиками, между разделяющимися отцепами, приводит к улучшению условий для выполнения требований интервального регулирования скорости движения отцепов.

Пары отцепов, разделяющиеся на башмачных парковых тормозных позициях

Сочетания	Варианты												v_{max} , м/с	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1-2	х	х	х	х	х									0,91
1-3	х	х	х	х	х									1,7
1-5	х	х	х	х	х			2	2	2	2	2	2	1,7
1-8	х	х	х	х	х	2	2	2	2	2	2	2	2	1,7
2-4	х	х	х	х	х	1	х	х	1	х	х	х	х	1,7
3-6	х	х	х	х	х	3	х	х	3	х	х	х	х	1,7
3-8	х	х	х	х	х	2	х	х	х	х	х	х	х	1,7
3-9	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	1,7
4-5	х	х	х	х	х	1	х	х	х	х	х	х	х	0,81
4-12	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	1,7
5-7	х	х	х	х	х	1	х	2	2	2	2	2	2	1,7
6-9	х	х	х	х	х	3	х	х	х	х	х	х	х	1,7
6-10	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	1,7
7-8	1	1	1	х	х	х	х	2	2	2	2	2	2	<0,8
7-12	х	х	х	х	х	1	х	х	х	х	х	х	х	1,7
8-9	х	х	х	х	х	2	2	х	2	х	х	х	х	1,07
8-11	х	х	х	х	х	2	2	х	2	2	2	2	2	1,7
9-10	2	х	3	2	х	3	3	х	3	3	3	3	3	<0,8
9-11	х	х	х	х	х	2	х	2	х	х	х	х	х	<0,8
9-13	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	1,7
10-11	х	х	х	х	х	2	х	х	х	х	х	х	х	0,8
10-13	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	1,7
10-14	х	х	х	х	х	3	х	х	х	х	х	х	х	1,7
11-12	1	1	1	х	х	х	х	х	х	х	х	2	2	<0,8
11-13	х	х	х	х	х	2	2	2	х	х	х	х	х	1,7
12-13	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	2	х	<0,8
12-15	х	х	х	х	х	1	х	х	х	х	х	х	х	1,7
13-14	2	х	х	х	х	2	х	3	х	х	3	х	3	<0,8
13-15	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	2	х	1,7

В этой связи при выборе начального распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов целесообразно выбрать вариант с наименьшим числом разделительных групп из последовательных отцепов Z_1 (см. табл. 3). При наличии нескольких вариантов с равным числом таких разделений выбор лучшего варианта среди них выполняется по количеству разделений групп с одним промежуточным отцепом Z_2 и т.д. Так в примере, представленном в табл. 3, в качестве начального целесообразно выбрать вариант 6, когда первый регулировщик обслуживает 3 пути, второй – 2 и третий – 3. При этом, имеет место два случая разделения смежных отцепов и три случая, когда между разделяющимися отцепами есть только один дополнительный отцеп. Оптимальная продолжительность роспуска состава при фиксированном распределении сортировочных путей между регулировщиками может

быть установлена в соответствии с алгоритмом, приведенным в [11] и составляет $T_b = 227,2$ с. При этом возникает необходимость деления состава на три группы отцепов с перерывами после 4-го и 9-го отцепов. Скорость роспуска третьей группы составляет 1,54 м/с ввиду ограничения по условиям разделения отцепов на башмачной тормозной позиции в паре 11-13 и на третьем стрелочном переводе по маршруту скатывания в паре 13-14.

Продолжительность роспуска групп, условия разделения в которых являются аналогичными продолжительности роспуска групп в составе, который использовался для расчета верхней границы, принимается равной рассчитанному ранее значению. При этом условия разделения в данных группах далее могут не контролироваться. Так в рассматриваемом примере дублируются условия разделения в группах с 1-го по 9-й отцеп в вариантах 6 и 7, а также 10-15 в вариантах 6 и 9. Пары, которые исключаются из рассмотрения по разным причинам вычеркиваются в табл. 4.

Как отмечалось выше одним из основных факторов, от которого зависит возможность успешного разделения отцепов, является величина интервала между отцепами на вершине горки. При этом, возможны такие сочетания пар отцепов, которые не будут разделяться на башмачных тормозных позициях ни при каких возможных режимах торможения отцепов, а также сочетания отцепов в парах, между которыми будут настолько большие начальные интервалы, что они будут разделяться при любых рациональных режимах торможения. Предельными режимами торможения отцепа являются быстрый и медленный режимы скатывания [15].

Наилучшие условия для разделения группы отцепов, скатывающихся на пути, которые обслуживаются одним регулировщиком, имеют место в том случае, когда первый отцеп пары скатывается в быстром режиме, а второй в медленном. Необходимо отметить, что в случае, если допустимая скорость роспуска v_p каждой последовательно скатывающейся пары отцепов в таких группах меньше v_{min} , то в роспуске должен быть сделан перерыв, наличие которого не зависит от номеров регулировщиков, выполняющих торможение. Ячейки, соответствующие парам отцепов между которыми должен быть предусмотрен обязательный перерыв выделены в табл. 4 цветом. В случае, если между двумя отцепами в роспуске предусматривается перерыв, то из рассмотрения должны быть ис-

ключены более длинные разделительные пары для других регулировщиков, перекрывающие данную пару. Так в парах 7-8, 9-10, 11-12, 13-14 разделение не может быть обеспечено даже в благоприятных условиях, поэтому для всех вариантов, в которых они присутствуют, в роспуске должны быть предусмотрены перерывы. Учитывая, что для варианта 1 при скатывании отцепов 13 и 14 между ними должен быть предусмотрен перерыв, то проверку условий разделения отцепов пары 12-15 можно не выполнять.

Нижняя граница продолжительности роспуска состава для каждого r -го варианта может быть установлена по формуле

$$T_H^r = \sum_{s=1}^{S^*} T_{p,s}^{opt}(\mathbf{v}_{p,s}^*) + (S^* - 1)t_{пер},$$

где S^* – количество групп, образованных из-за обязательных перерывов в роспуске;

$\mathbf{v}_{p,s}^*$ – максимально допустимые скорости

роспуска для отдельных пар отцепов в группе;

$T_{p,s}^{opt}(\mathbf{v}_{p,s}^*)$ – минимальная продолжительность

роспуска группы отцепов в зависимости от множества ограничений для отдельных пар.

Определение величины $T_{p,s}^{opt}(\mathbf{v}_{p,s}^*)$ производится с помощью методики, представленной в [11]. В качестве примера рассмотрим расчет величины T_H для варианта 7. Роспуск групп отцепов 10-13 и 14-15 может выполняться со скоростью не более 1,7 м/с; при этом затраты времени будут составлять не менее 41,2 и 16,6 с соответственно. Роспуск группы отцепов 1-9 может выполняться без перерыва в роспуске со скоростью не более 0,81 м/с из-за ограничения в паре 4-5 (см. табл. 4), при этом продолжительность роспуска будет составлять не менее 259,3 с; в качестве альтернативы после 4-го отцепа может быть предусмотрен перерыв, что позволит распускать отцепы со скоростью 1,7 м/с, при этом продолжительность роспуска с учетом перерывов будет составлять 143,5 с. Общая продолжительность роспуска состава при реализации 7-го варианта с учетом перерывов будет составлять не менее $T_H^7 = 241,3$ с, что превышает установленную ранее верхнюю границу решения $T_b = 227,2$ с. В этой связи в дальнейшем вариант 7 может не рассматриваться. По аналогичным соображениям из рассмотрения могут быть исключены также варианты 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12.

Наихудшие условия разделения отцепов на

башмачных тормозных позициях возникают при максимально-допустимой скорости роспуска в случаях скатывания первого отцепа пары с минимальной и второго - с максимальной рациональной скоростью движения по спускной части горки. Рациональная скорость движения для первого отцепа пары выбирается из следующих соображений:

– первый отцеп группы – быстрый режим скатывания (Б);

– отцеп из последовательности отцепов, скатывающихся на пути, которые обслуживаются разными регулировщиками скорости вагонов, начиная от первого до текущего – быстрый режим скатывания с учетом ограничений, выдвигаемых требованиями интервального регулирования скорости на стрелках и замедлителях с предшествующими отцепами (П);

– прочие отцепы – медленный режим скатывания (М).

Рациональные скорости движения второго отцепа пары выбираются из следующих соображений:

– последний отцеп группы – медленный режим скатывания (М);

– отцеп из последовательности отцепов, скатывающихся на пути, которые обслуживаются разными регулировщиками скорости вагонов, начиная от текущего до последнего – медленный режим скатывания с учетом ограничений, выдвигаемых требованиями интервального регулирования скорости на стрелках и замедлителях с последующими отцепами (С);

– прочие отцепы – быстрый режим скатывания (Б).

Если в процессе анализа условий разделения отцепов состава установлено, что для некоторой пары разделение происходит даже в наихудших условиях, то такая пара может быть исключена из рассмотрения.

В табл. 5 представлены результаты анализа условий разделения отцепов для варианта 9. В соответствии с данными табл. 5 из рассмотрения можно исключить контроль условий разделения в парах 1-5 и 3-6.

Для дальнейшего сравнения необходимо циклически повторять поиск в варианте с наименьшим значением T_n^r самой короткой последовательности разделяющихся отцепов, расчета для нее допустимой скорости роспуска в благоприятных условиях, пересчета значения T_n и отбрасывания нерациональных вариантов.

Оставшимся вариантом распределения сортировочных путей между регулировщиками является вариант 9. В качестве расчетного соче-

тания отцепов принято разделение отцепов в паре 2-4 на башмачной тормозной позиции и паре 4-5 на 4-й разделительной стрелке по маршруту скатывания. Допустимая скорость роспуска при этом составляет 1,26. В этих условиях нижняя граница продолжительности роспуска состава по варианту 9 будет составлять $T_n^9 = 227,2$ с, что равно верхней границе решения.

Таблица 5

Анализ условий разделения отцепов в неблагоприятных условиях

Сочетания	Режим	Пояснение	p_n
1-5	ББ	Пара состоит из отцепа 1, который является первым отцепом группы и отцепа 5, находящегося в середине состава режим торможения которого ограничен отцепом 7	0
2-4	ПБ	Пара состоит из отцепов 2 и 4, которые находятся в середине состава. Отцеп 2 является первым отцепом, следующим в обслуживании к регулировщику 1; предшествующий отцепу 2 отцеп 1 движется в быстром режиме. За отцепом 4 находятся отцепы 5 и 7, следующие к регулировщику 2.	0,054
3-6	ПС	Пара состоит из отцепов 3 и 8, находящихся в середине состава, которые являются первым и последним отцепами, следующими в обслуживании к регулировщику 3. Перед и после пары 3-8 отцепы следуют в обслуживании к разным регулировщикам	0
5-7	ММ	Пара состоит из отцепа 5, который находится в середине состава, и отцепа 7, который является последним отцепом группы. Перед отцепом 5 следуют отцепы 2 и 4 в обслуживании к регулировщику 1.	0,041

Таким образом, оптимальный вариант распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов является вариант 6, предполагающий обслуживание 3-х путей регулировщиком 1, 2-х путей регулировщиком 2 и 3-х путей регулировщиком 3. Продолжительность роспуска состава при этом бу-

дет составлять 227,2 с. Для сравнения худшим вариантом распределения является вариант 1, при котором продолжительность роспуска будет составлять 301,2 с.

Результаты

Выполненные исследования позволяют предложить следующий алгоритм для оптимизации распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов:

Шаг 1. Разработать варианты распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов.

Шаг 2. Выбрать вариант начального распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов и на основании моделирования роспуска состава установить верхнюю границу решения T_b .

Шаг 3. Принять в качестве расчетных сочетаний пары последовательных отцепов и установить допустимые скорости роспуска для них в благоприятных условиях.

Шаг 4. Если в процессе анализа остался только один вариант распределения сортировочных путей между регулировщиками, то конец решения. Оставшийся вариант является оптимальным.

Шаг 6. Выполнить деление состава на группы, между которыми необходимо выполнять перерывы в роспуске.

Шаг 7. Установить условия разделения отцепов при неблагоприятном сочетании факторов. В случаях, если неразделение отцепов в данных условиях не происходит исключить указанные пары из рассмотрения.

Шаг 8. Продолжительность роспуска групп, для которых выполнено моделирование роспуска принять равным установленному значению. Для тех групп, моделирование роспуска которых не выполнялось, установить минимально возможную продолжительность роспуска на основании сведений о максимальной скорости роспуска отдельных сочетаний вагонов.

Шаг 9. Для оставшихся в рассмотрении вариантов распределения сортировочных путей между регулировщиками установить нижнюю границу решения T_n^r .

Шаг 10. Исключить из рассмотрения варианты такие, что $T_n^r > T_b$.

Шаг 11. Для варианта с наименьшим значением T_n^r найти самую короткую последовательность разделяющихся отцепов с неизвестной допустимой скоростью роспуска и устано-

вить ее на основе моделирования.

Шаг 12. Если для какого-то варианта r выполнена оценка всех разделительных интервалов и $T_n^r < T_b$, то исключить из рассмотрения вариант, использующийся для расчета T_b . Принять $T_b = T_n^r$.

Шаг 13. Перейти на шаг 4.

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна работы состоит в том, что в результате выполненных исследований разработан формальный метод оптимизации распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов, что позволяет обеспечить минимальную продолжительность роспуска составов при условии соблюдения требований безопасности сортировочного процесса.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы в оперативной работе железнодорожных станций для решения задачи автоматизированной выдачи рекомендаций по организации роспуска на немеханизированных сортировочных горках, а также при решении задач нормирования числа регулировщиков скорости вагонов на них.

Выводы

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Условия роспуска составов на сортировочных горках с бащмачными парковыми тормозными позициями существенно зависят от распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов.

2. В процессе исследований разработан метод поиска оптимального распределения сортировочных путей между регулировщиками скорости вагонов, который основывается на оценке продолжительности роспуска составов на основании анализа условий разделения в отдельных расчетных группах отцепов и отбрасывания нерациональных вариантов на основании метода ветвей и границ, что позволяет повысить скорость поиска оптимального решения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bobrovskiy, V. Probabilistic Approach for the Determination of Cuts Permissible Braking Modes on the Gravity Humps / V. Bobrovskiy, D. Kozachenko, A. Dorosh, E. Demchenko, T. Bolvanovska, A. Kolesnik // Transport problems. – 2016. – Vol. 11, is. 1.

- P.147-155. – doi : 10.20858/tp.2016.11.1.14.

2. Prokop, J. Simulation of Hump Performance in Railroad Classification Yard. / J. Prokop, Sh. Myojin // Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University. – 1993. – Vo1. 27. – No. 2. – P. 59-71.

3. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Н. П. Божко [и др.]. – Днепропетровск: Изд-во Маковецкий, 2012. – 236 с.

4. Zarecky, S. The newest trends in marshalling yards automation / S. Zarecky, J. Grun, J. Zilka // Transport Problems. – 2008. – Tom 3. – Vol. 4. – Part 1. – P. 87-95.

5. Zhang, C. Analysis of Hump Automation in China / C. Zhang, Y. Wei, G. Xiao, Z. Wang, J. Fu // Proceeding of Second International Conference on Transportation and Traffic Studies. – 2000. – P. 285-290. – doi: 10.1061/40503(277)45.

6. Шабельников, А. Н. Управление тормозными средствами сортировочных горок: повышение качества и эффективности / А. Н. Шабельников, И. А. Ольгейзер, С. А. Рогов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – №2. – С. 74-79.

7. Шиш, В.О. Автоматизація та механізація технологічних процесів на сортувальних станціях [Текст] / В.О. Шиш // Залізничний транспорт України. – 2011. – № 3. – С. 44-47.

8. Болвановська, Т. В. Розрахунок переробної спроможності сортувальних комплексів / Т. В. Болвановська // Транспортні системи та технології перевезень – 2014. – Вип. 8. – С. 27-34. – doi: 10.15802/tstt2014/38080.

9. Yao, J. Study on Neural Network Based Space-interval Speed-control Model / J. Yao, X. Li, H. Liu// China Railway Science. – 2001. – № 02. – P. 127-133.

10. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов регулирования скорости отцепов при роспуске составов на горках / В. И. Бобровский, Н. В. Рогов // Наука та прогрес транспорту. – 2004. – Вип. 4. – С. 174-182.

11. Козаченко, Д. Н. Управление роспуском составов на сортировочных горках с немеханизованными парковыми тормозными позициями /Д. Н. Козаченко, С. В. Гревцов, Т. В. Болвановская // Вісник НТУ «ХП». – 2017. – № 19(1241). – С. 72-80.

12. Козаченко, Д. М. Дослідження впливу технічного стану гальмових уповільнювачів на переробну спроможність сортувальних гірок / Д. М. Козаченко, С. В. Гревцов, Т. В. Болвановська // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 4 (64). – С. 37- 46. – doi: 10.15802/stp2016/77878.

13. Король, В.А. Пособие работникам сортировочных горок / В. А. Король, Л. Б. Тишков, Л. М. Хохлова, В. П. Шейкин. – Москва : Транспорт, 1988. – 221 с.

14. Інструкція регулювальника швидкості руху вагонів. ЦД-0065: затв. Наказ Укрзалізниці від 06.11.2006 № 396-Ц, – Київ, 2006.

15. Бобровский, В. И. Анализ эффективности режимов торможения отцепов на сортировочных горках / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Н. В. Рогов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 11. – 2006. – С. 103-111.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Огарем А. Н. (Украина); д.физ.-мат.н., проф. Гаврилюком В.И. (Украина)

Поступила в редколлегию: 14.05.2017

Принята к печати: 16.05.2017.

Д. М. КОЗАЧЕНКО, В. І. БОБРОВСЬКИЙ, С. В. ГРЕВЦОВ

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛУ СОРТУВАЛЬНИХ КОЛІЙ МІЖ РЕГУЛЮВАЛЬНИКАМИ ШВИДКОСТІ ВАГОНІВ

Мета. Метою даної роботи є підвищення ефективності сортувального процесу на сортувальних гірках з немеханізованими парковими гальмівними позиціями шляхом оптимізації розподілу сортувальних колій між регулювальниками швидкості вагонів. **Методика.** Дослідження виконані з використанням методів моделювання гіркових процесів і методу гілок та меж. **Результати.** На залізницях України 87% сортувальних гірок мають немеханізовані гальмівні позиції. Характерною особливістю роботи таких гірок є поява додаткових вимог до інтервального регулювання швидкості скочування відцепів для забезпечення можливості їх послідовного гальмування регулювальником, який обслуговує декілька сортувальних колій. У зв'язку з цим актуальною є задача пошуку такого розподілу сортувальних колій між регулювальниками швидкості вагонів, яке забезпечує мінімальну тривалість розпуску. У загальному випадку число можливих варіантів вирішення даного завдання є обмеженим, але може бути дуже великим. Тому дослідження присвячено пошуку правил, які дозволяють виключати з аналізу свідомо нераціональні варіанти. **Наукова новизна.** В результаті виконаних досліджень розроблено формальний метод оптимізації розподілу сортувальних колій між регулювальниками швидкості вагонів. **Практична значимість.** Результати виконаних досліджень можуть бути використані в оперативній роботі залізничних станцій для вирішення завдання автоматизованої видачі рекомендацій по організації розпуску на немеханізованих сортувальних гірках, а також при вирішенні задач нормування числа регулювальників швидкості вагонів на них.

Ключові слова: сортувальна гірка; немеханізованими гальмівна позиція; регулювальник швидкості вагонів; сортувальний процес; розформування составів, оптимізація.

OPTIMIZING CLASSIFICATION TRACKS ALLOCATION BETWEEN YARDMEN

Purpose The purpose of this work is to increase the efficiency of the humping on sorting humps with non-mechanized retarding positions by optimizing the allocation of classification tracks between yardmen. **Methodology.** The research was carried out using the methods of simulation of hump operation and the method of branches and boundaries. **Findings.** On the Ukrainian railways 87 % of sorting humps have non-mechanized retarding positions. A characteristic feature of the work of such humps is the emergence of additional requirements for interval regulation of the speed of cut rolling to ensure the possibility of their sequential braking by the yardman, which serves several classification tracks. In this regard, the problem of finding such allocation of classification tracks between yardmen, which ensures a minimum breaking-up time, is important. In general, the number of possible solutions to this problem is limited, but it can be very large. Therefore, the study is devoted to the search for rules that make it possible to exclude deliberately irrational variants from the analysis. **Originality.** As a result of the studies carried out, a formal method for optimizing the classification tracks allocation between yardmen has been developed. **Practical value.** The results of the research can be used in the operational work of railway stations to solve the problem of automated issuance of recommendations on the organization of breaking-up process on non-mechanized sorting humps, as well as when solving problems of rationing the number of yardmen on them.

Keywords: sorting hump; non-mechanized retarding position; yardman; humping; braking-up of train; optimization.