

Обоснование рациональных конструктивных и технологических параметров вариантов организации многогруппной сортировки на основе имитационного моделирования

С. В. КАРАСЁВ, Д. А. СИВИЦКИЙ

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, 630049, Россия

Аннотация. В статье рассматривается проблема оптимизации конструкции и технологии работы сортировочного комплекса, специализированного для многогруппной подборки вагонов. Предложен комплексный подход, основанный на формировании и последующей технико-экономической оценке вариантов сочетаний конструкции, технического оснащения и технологии работы, так называемых конструктивно-технологических вариантов. Для определения рационального конструктивно-технологического варианта организации многогруппной сортировки предложено использовать имитационное моделирование. Результаты расчетов по модели показывают, что выбор конструктивно-технологического варианта существенно зависит от интенсивности поступления требований, а также структуры вагонопотока.

Ключевые слова: многогруппная сортировка; специализированное сортировочное устройство; имитационное моделирование; система массового обслуживания; способы сортировки

Введение. Изменение экономических отношений, структуры вагонного парка привели к увеличению количества назначений вагонов [1]. В условиях нехватки сортировочных путей для накопления групп вагонов и роста загрузки сортировочных станций на большинстве из них практически отсутствует возможность выполнения многогруппной подборки вагонов. Отсутствие такой работы приводит к увеличению затрат на станциях общего и необщего пользования по причине выполнения сортировочной работы с подборкой вагонов по группам в условиях недостаточного технического оснащения. Задача оптимизации затрат может быть решена за счет использования эффективной технологии многогруппной сортировки, а также высокопроизводительных сортировочных устройств [2, 3].

В работе рассматриваются следующие способы сортировки: комбинаторный, степенной, ступенчатый дублирующий, ступенчатый максимальный [4, 5]. Каждый из способов интенсивной подборки вагонов в зависимости от схемы сортировки требует определенного путевого развития [6]. Организуя работу с использованием этих способов, необходимо одновременно рассматривать и конструкцию, и технологию,

т.е. конструктивно-технологические варианты (КТВ). Каждый такой вариант будет характеризоваться определенным уровнем перерабатывающей способности $N_{\text{пер}}$, а также приведенными затратами $S_{\text{пр}}$. Следовательно, возникает задача выбора варианта, который бы удовлетворял потребному уровню перерабатывающей способности, а также был рационален с точки зрения приведенных затрат.

Решение этой задачи требует создания соответствующих методов расчета показателей процесса многогруппной сортировки. Поскольку в составе исходных данных будет использоваться ряд величин, являющихся случайными (в частности, параметры, характеризующие перерабатываемый вагонопоток), целесообразно использовать имитационное моделирование многогруппной сортировки. В качестве основного варианта технологии сортировки рассматривается высокопроизводительная горочная технология; объектом исследования является горка малой мощности, проектируемая при объеме переработки более 250 вагонов в сутки [7]. Исходя из возможности подборки вагонов на большое число групп на ограниченном числе путей (не более 5–6), горка имеет 1 путь надвига и 1 спускной путь.

Имитационная модель работы специализированного сортировочного устройства. Работа специализированного сортировочного устройства может рассматриваться с точки зрения теории массового обслуживания [8]. Под системой массового обслуживания в данном случае подразумевается специализированное сортировочное устройство, занимающееся обслуживанием требований (т.е. подборкой вагонов). Требования — составы, поступающие на сортировочное устройство для подборки.

Мощность любого технического устройства должна соответствовать нагрузке на него. Рассматривая специализированное сортировочное устройство, это можно интерпретировать так: наличная перерабатывающая способность должна быть не менее потребной, а также учитывать неравномерность поступления требований. В первую очередь это необходимо

для того, чтобы избежать появления очередей, т.е. требований, ожидающих освобождения обслуживающего устройства [9].

Однако возможность использования классических методов теории массового обслуживания ограничена: для достоверного определения длины очереди необходимо знать тип распределения интервалов времени поступления заявок (входящего потока), а также времени обслуживания. Ограничение связано, в частности, с тем, что в систему (на сортировочное устройство) могут поступать требования не только случайно, но и упорядочено. Важность этого ограничения обусловлена большой погрешностью расчетов аналитическими методами теории массового обслуживания, когда типы распределений потоков не являются простейшими [10].

Для определения характеристик технологии многогруппной сортировки и параметров специализированного сортировочного устройства предлагается использовать имитационное моделирование. Модель реализуется в форме блочно-модульной структуры. Программные блоки распределения вагонов по путям и определения технологического горочного интервала (ТГИ) разработаны ранее [11, 12]. Эти блоки являются основной частью имитации процесса подборки вагонов и позволяют определить основные эксплуатационные показатели работы по КТВ. Блоки интегрированы в общую модель системы массового обслуживания. Исходными данными, определяющими параметры работы системы, будут являться:

1) *Входящий поток*. Входящий поток требований характеризуется интенсивностью λ (заявок/ч), коэффициентом неравномерности ν , типом распределения и средним интервалом поступления заявок. Помимо этого, важной характеристикой входящего потока является структура перерабатываемого вагонопотока: количество групп, количество отцепов и их масса.

2) *Параметры системы*. Временем обслуживания требования будет являться ТГИ ($t_{\text{ги}}^i$), ч. При этом ТГИ (величина, соответствующая интенсивности времени обслуживания $t_{\text{обсл}}$) будет зависеть от параметров вагонопотока [12], а также от конструктивно-технологических параметров процесса. Схематически работа системы представлена на рис. 1.

Разработан программный блок имитационного моделирования работы системы массового обслуживания. Исходные данные в блоке представлены следующим образом:

1) Данные, поступающие из других блоков [11, 12] (структура вагонопотока, схемы сортировки и др. описаны выше).

2) $t_{\text{проб}}(i)$ — массив, содержащий в себе времена поступления требований в систему. i — порядковый номер требования; $i1$ — количество прибывающих

составов за сутки; intens — интервалы времени между требованиями.

3) sposob — переменная, содержащая номер метода сортировки: 1 — комбинаторный метод; 2 — степенной метод; 3 — ступенчатый дублирующий метод; 4 — ступенчатый максимальный метод.

4) nprl — количество группировочных путей, используемых при определенном методе сортировки.

Алгоритм имитационной модели представлен на рис. 2. Один цикл моделирования (прогон модели) соответствует одним суткам.

Результатом имитации являются следующие массивы данных: $\text{toz}(\text{sposob}, \text{nprl}, i1)$ — время ожидания обслуживания каждым требованием (далее — $t_{\text{ож}}^i$); $\text{tgi}(\text{sposob}, \text{nprl}, i1)$ — время обслуживания каждого требования (далее — $t_{\text{ги}}^i$) и другие данные, используемые при расчете показателей. Помимо этого, рассчитывается $L_{\text{пол}}$ — суммарная полезная длина группировочных путей по рассматриваемому КТВ.

Методика определения приведенных затрат и выбора рационального КТВ организации многогруппной сортировки. Разработанная имитационная модель позволяет определять показатели работы системы по различным КТВ. Общее число возможных КТВ — 16 (4 метода сортировки, 2–5 группировочных путей). Каждый из них в зависимости от характеристик поступающего вагонопотока будет характеризоваться различными показателями. При низкой интенсивности поступления требований наиболее рациональным может оказаться вариант с меньшими капиталовложениями и высокими эксплуатационными расходами, при высокой интенсивности — с высокими капитальными вложениями и низкими эксплуатационными расходами.

Для определения сравнительной эффективности проектных и технологических решений КТВ предлагается сравнивать по сумме годовых приведенных капитальных вложений и эксплуатационных расходов [13]:

$$S_{\text{пр}} = E_{\text{н}} K + \Theta, \quad (1)$$

где K — капитальные затраты на строительство сортировочного устройства; Θ — эксплуатационные расходы; $E_{\text{н}}$ — нормативный коэффициент эффективности.

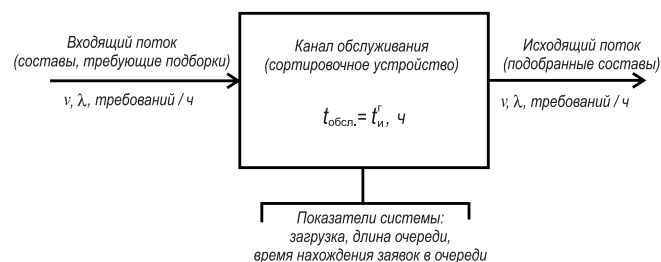


Рис. 1. Схема системы массового обслуживания
Fig. 1. Scheme of the mass service

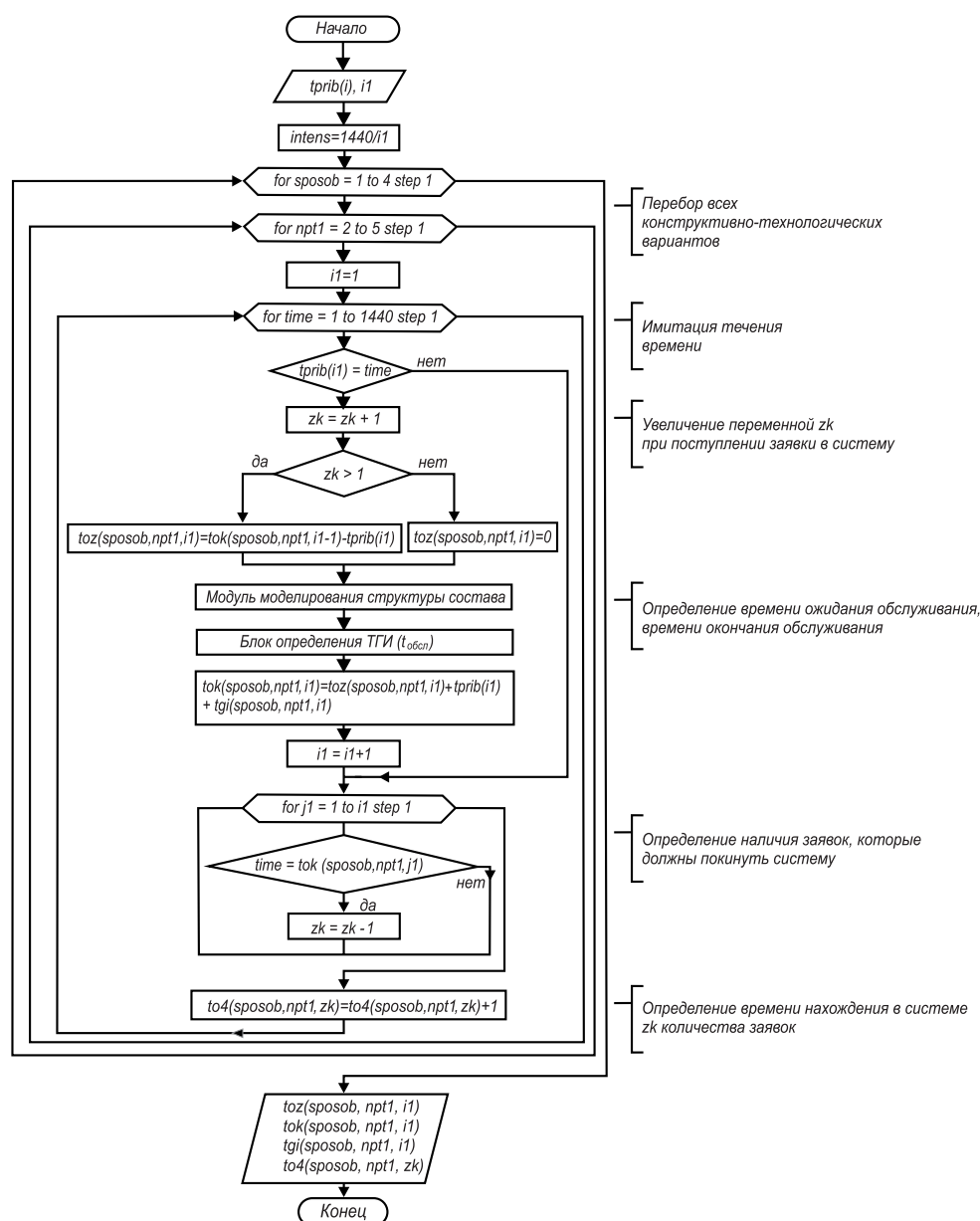


Рис. 2. Блок-схема процесса имитации работы системы массового обслуживания
Fig. 2. Process chart of simulating the work of the mass service

Капитальные затраты с учетом различий в конструкции и техническом оснащении специализированного сортировочного устройства укрупненно можно определить по формуле:

$$K = K_{\text{стр}} + K_{\text{тс}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{стр}}$ — капитальные затраты на путевое развитие сортировочного устройства; $K_{\text{тс}}$ — капитальные вложения в технические устройства (вагонные замедлители и др.).

Годовые эксплуатационные расходы:

$$\Theta_{\text{сут}} = 365 \cdot (\Theta_{\text{л-ч}} + \Theta_{\text{в-ч}} + \Theta_{\text{зан}}) + \Theta_{\text{тс}}, \quad (3)$$

где $\Theta_{\text{л-ч}}$, $\Theta_{\text{в-ч}}$, $\Theta_{\text{зан}}$ — среднесуточные эксплуатационные расходы, связанные соответственно с затратами

локомотиво-часов, вагоно-часов (при необходимости их учета); с занятием станционных путей в процессе сортировки; $\Theta_{\text{тс}}$ — годовые эксплуатационные затраты на текущее содержание постоянных устройств.

Расчет приведенных расходов по КТВ реализован в виде отдельного блока модели. Итогом работы имитационной модели является расчет показателей работы системы массового обслуживания по всем КТВ и определение приведенных затрат.

Существенное влияние на величину ТГИ, а также на капиталовложения и эксплуатационные расходы будет оказывать конструкция и техническое оснащение сортировочного устройства. Конструктивные параметры сортировочной горки (продольный профиль горки,

план путей, вариант механизации и автоматизации сортировочного процесса) определяются на основе действующих требований [7] и не зависят от технологии многогруппной сортировки вагонов. Капиталовложения в сооружение сортировочной горки определяются на основе стандартного сметного расчета.

В то же время непосредственно связаны с технологией многогруппной сортировки конструктивные параметры группировочного парка, такие как количество и вместимость группировочных путей. При использовании различных способов сортировки за счет отличий в последовательности распределения вагонов по путям необходимая вместимость группировочных путей будет различной. Таким образом, при переработке одинакового вагонопотока с использованием разных способов сортировки капиталовложения могут различаться даже при одинаковом количестве задействованных группировочных путей из-за изменения их необходимой и достаточной вместимости. Под достаточной в данном случае понимается вместимость группировочных путей, гарантирующая размещение на каждом пути того количества вагонов, которое может на нем оказаться в течение всего процесса многогруппной сортировки с учетом схемы сортировки и структуры перерабатываемого вагонопотока. Величина достаточной вместимости каждого группировочного пути определялась статистически на основе многократного моделирования процесса многогруппной сортировки.

Помимо конструктивных параметров и способа сортировки, существенное влияние на величину горочного технологического интервала, капитальные вложения и эксплуатационные расходы оказывает и структура перерабатываемого вагонопотока, в том числе мощность отдельных назначений (групп), их положение в сортируемых составах. Вопрос изучения такого влияния является предметом самостоятельного исследования и должен найти отражение в дальнейших работах.

Рассмотрим результаты расчета показателей процесса многогруппной сортировки с использованием имитационной модели со следующими исходными данными:

1) Интенсивность поступления составов $\lambda = 10$ сост./сут. Интервалы поступления составов моделируются по закону распределения Эрланга 4-го порядка, имеющему коэффициент вариации 0,5, значение которого указывает на наличие некоторой упорядоченности интервалов поступления составов на сортировочное устройство для многогруппной сортировки. При рассмотрении конкретного объекта модель позволяет задавать входящий поток в виде произвольного расписания, соответствующего графику поступления исходных составов на сортировочное устройство.

2) Структура вагонопотока: количество групп $n_{гр} = 13$, средняя длина отцепы — 2, средняя масса ваго-

на — 60 т (среднее квадратическое отклонение массы вагона — 10 т).

Результаты расчета по каждому КТВ представлены в табл. 1.

Важно заметить, что полученные результаты во многом зависят от «заполненности» схемы сортировки, т. е. от отношения фактического количества подбираемых групп к теоретически возможному по конкретной схеме сортировки. Так, например, степенной метод позволяет подбирать 9 групп на трех путях, 16 групп на четырех путях. Соответственно, при подборке 13 групп на четырех путях «заполненность» схемы сортировки невысока, что негативно сказывается на производительности работы относительно других схем.

Как видно из табл. 1, наиболее рациональным оказался вариант работы по комбинаторному способу с использованием 4-х путей. Конкурирующий с ним вариант сортировки по степенному способу на 4-х путях оказался более рационален с точки зрения путевого развития (меньшая потребная суммарная длина путей), однако, в связи с меньшей перерабатывающей способностью, по критерию приведенных затрат он оказался менее эффективен.

Данные, представленные в табл. 1, характеризуют основные результаты, которые могут быть получены при помощи предлагаемого метода обоснования рациональных конструктивных и технологических параметров вариантов организации многогруппной сортировки, основанного на имитационном моделировании процесса подборки вагонов. Модель может использоваться для решения как прямой (выбор экономически эффективного способа многогруппной сортировки при известных параметрах существующего сортировочного устройства), так и обратной (определение рациональных параметров проектируемого группировочного парка при заданном варианте технологии многогруппной сортировки) задач. При этом критерием решения обратной задачи, помимо приведенных затрат [14], может являться эксплуатационная надежность группировочного парка, под которой в данном случае понимается вероятность непревышения наличной вместимости задействованных группировочных путей, определяемая статистическим методом на основе моделирования сортировки потока составов за длительный период. Описанные возможности модели реализованы в виде программного продукта «МГС-Аналитика» [15].

Помимо решения обозначенных выше практических задач, модель может быть использована для обоснования сферы применения способов сортировки в зависимости от числа сортируемых групп и объемов переработки. Наиболее значимыми характеристиками при этом будут являться ТГИ и суммарная полезная длина группировочных путей (СПД).

Для достоверного определения статистических характеристик процесса многогруппной сортировки

Таблица 1

Результаты расчета по модели показателей КТВ многогруппной сортировки. Пример для подборки вагонов на 13 групп при интенсивности 10 составов в сутки

Table 1

Results of calculation by the model of the multigroup shunting.
Example for the selection of cars for 13 groups at an intensity of 10 trains per day

Метод сортировки	Кол-во путей	Суммарное ТГИ $\sum_{i=1}^{13} t_{ги}^i$	Кол-во заявок в системе zk	Простой в ожидании обслуживания, мин $\sum_{i=1}^{13} t_{ож}^i$	Вагоно-часы, сут	Локомотиво-часы, сут	Среднее число требований	Эксплуатационные расходы (Э, тыс. руб./год)	Суммарная полезная длина путей, км	Капитальные вложения К, тыс. руб.	Приведенные расходы, $S_{пр}$, тыс. руб. в год	$\Psi_{лок}$	$N_{пер}$, ваг./сут	$\Psi_{сист}$	Максимальное число требований в системе	ТГИ (математическое ожидание), мин
1	2	1156	1,0	293	1715	19,3	0,2	15640	1,635	27083	18349	0,80	884	0,80	2	116
1	3	933	0,7	87	1207	15,5	0,1	13297	2,145	37206	17017	0,65	1096	0,65	2	93
1	4	797	0,6	28	977	13,3	0,0	11889	1,965	40196	15908	0,55	1282	0,55	2	80
1	5	878	0,6	55	1104	14,6	0,0	13357	2,265	48426	18199	0,61	1164	0,61	2	88
2 ¹	2	0	0,0	0	0	0,0	0,0	0	0,000	0	0	0,00	0	0,00	0	0
2	3	0	0,0	0	0	0,0	0,0	0	0,000	0	0	0,00	0	0,00	0	0
2	4	964	0,7	88	1245	16,1	0,1	13837	1,440	34452	17282	0,67	1060	0,67	2	96
2	5	958	0,7	79	1227	16,0	0,1	14087	1,365	38579	17945	0,67	1067	0,67	2	96
3	2	0	0,1	0	0	0,0	0,0	0	0,000	0	0	0,00	0	0,00	0	0
3	3	0	0,1	0	0	0,0	0,0	0	0,000	0	0	0,00	0	0,00	0	0
3	4	925	0,7	59	1165	15,4	0,0	13442	1,770	38062	17249	0,64	1105	0,64	2	93
3	5	838	0,6	29	1025	14,0	0,0	12657	1,650	41697	16826	0,58	1221	0,58	2	84
4	2	0	0,1	0	0	0,0	0,0	0	0,000	0	0	0,00	0	0,00	0	0
4	3	962	0,7	96	1252	16,0	0,1	13688	2,220	38026	17491	0,67	1063	0,67	2	96
4	4	918	0,7	69	1168	15,3	0,0	13320	1,665	36913	17012	0,64	1114	0,64	2	92
4	5	0	0,1	0	0	0,0	0,0	0	0,000	0	0	0,00	0	0,00	0	0

¹ Нули в некоторых строках означают, что данное количество групп не может быть подобрано с помощью такого КТВ.

необходимо исходить из размера доверительного интервала: среднее значение исследуемых выборок таких случайных величин, как ТГИ и СПД, не должно отличаться более чем на 1 мин и 1 вагон от соответствующих математических ожиданий. Определен необходимый объем экспериментов (выборки) [16] для исследования каждого из 16-ти КТВ – 259 составов в каждой серии. Результаты моделирования и выбора рационального КТВ для различного числа групп и интенсивности поступления составов на сортировочное устройство приведены в табл. 2. КТВ представлен в виде двух символов: первый указывает на способ сортировки (К — комбинаторный, С — степенной, М — ступенчатый максимальный), второй — на количество используемых группировочных путей. В ситуациях, когда несколько КТВ близки друг к другу по приведенным затратам, в ячейках таблицы указывается несколько вариантов.

Курсивом выделены КТВ, которые имеют незначительное преимущество при наличии нескольких

конкурирующих вариантов. При изменении функции распределения номеров групп в составе, а также структуры отцепопотока, для некоторых комбинаций числа групп и интенсивности поступления составов требуется уточняющий расчет по модели.

Основываясь на полученных результатах, можно сделать следующие выводы относительно сферы рационального применения способов многогруппной сортировки:

1) Степенной метод сортировки вагонов наиболее эффективен при большой «заполненности» схемы сортировки, т. е. при подборке 4, 9, 16, 25 групп. Помимо этого, степенной способ позволяет достигнуть наименьшей потребной суммарной полезной длины группировочных путей и, соответственно, сокращает капитальные вложения в инфраструктуру. При этом метод уступает другим в перерабатывающей способности.

2) Комбинаторный метод достаточно универсален за счет большого количества схем сортировки.

За счет выбора соответствующей схемы можно обеспечить лучшую степень ее заполнения. Однако комбинаторный метод, обеспечивая большую перерабатывающую способность, требует большей полезной длины группировочных путей. В связи с этим он оказывается эффективнее при больших объемах переработки.

3) Ступенчатый метод сортировки является «промежуточным» как по потребной суммарной полезной длине, так и по перерабатывающей способности. Более эффективен при большой неравномерности структуры вагонопотока (числе групп, длине отцепов и т.д.). Помимо этого, как и степенной метод, наибольшую эффективность демонстрирует при большой «заполненности» схемы сортировки.

Заключение. В работе получены следующие результаты:

1) Разработана имитационная модель работы специализированного сортировочного устройства для многогруппной сортировки, представленная в виде системы массового обслуживания, позволяющая определить длину очереди, время ожидания обслуживания, перерабатывающую способность и другие эксплуатационные показатели.

2) Описана методика сравнения КТВ работы специализированного сортировочного устройства по критерию приведенных затрат. Определены основные измерители, включаемые в расчет приведенных затрат.

3) Реализовано сравнение КТВ процесса многогруппной сортировки вагонов по критерию приведенных затрат. Определены границы технико-экономической эффективности применения различных способов сортировки в зависимости от интенсивности поступления составов для подборки и количество подбираемых групп.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бородин А. Ф. Схема размещения и развития сортировочных станций ОАО «РЖД» до 2015 года // Железнодорожный транспорт. 2008. № 1. С. 48–54.
- Уманский В. И., Макаров В. М., Долганюк С. И. Управление местной работой в интеллектуальных станционных системах // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 5. С. 16–21.
- Карасёв С. В., Сивицкий Д. А. Разработка сортировочных комплексов, специализированных для многогруппной сортировки вагонов, на основе имитационного моделирования // Техника. Технологии. Инженерия. 2016. № 1. С. 51–54.
- Тишкин Е. М. Метод комбинаторной сортировки вагонов — основа интенсивной технологии местной работы // Вестник ВНИИЖТ. 1987. № 2. С. 16–19.
- Месарош Пал. Способы многогруппной сортировки вагонов на вытяжках // Железнодорожный транспорт. 1963. № 11. С. 85–88.
- Сивицкий Д. А. Анализ отечественного и зарубежного опыта разработки и использования моделей технологии много-

Таблица 2
Рациональные КТВ для различных объемов сортировочной работы и числа подбираемых групп

Table 2
Rational CTVs for different levels of shunting work and the number of selected groups

$n_{гр}$	Интенсивность поступления составов, сост./сут				
	1–3	4–6	7–9	10–12	13–15
≤ 4	C2	C2	C2	C2	C2
5	K2	K2	K2	K2	K2
6–7	K2	K2	K3, M3	K3, M3	K3, M3
8	K2	K2	K2	K3	K3
9	C3, K2	C3	C3	C3	C3, K3, M3
10–13	K2	K2, K3	K3, K4	K3, K4	K4
14–15	K2	K3, M3	K3, M3	K4	K4
16	C4, M3, K3	C4, M3, K3	M3, K3, C4	M3, K3, C4	M3, K3, C4
17–24	K2	K3	K3	K3	K3
25	C5	C5, K4, M4	K4, C5, M4	K4, C5, M4	K4

группной сортировки вагонов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2016. № 1. С. 106–116.

7. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм: утв. МПС РФ 10.10.2003. М.: Техинформ, 2003. 168 с.

8. Акулиничев В. М., Кудрявцев В. А., Корешков А. Н. Математические методы в эксплуатации железных дорог: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта. М.: Транспорт, 1981. 223 с.

9. Левин Д. Ю. Очереди на железной дороге // Мир транспорта. 2014. № 2. С. 132–141.

10. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1988. 208 с.

11. Сивицкий Д. А. Разработка программного модуля распределения вагонов по сортировочным путям в процессе многогруппной сортировки // Вестник СГУПС. 2016. № 3. С. 13–18.

12. Сивицкий Д. А. Моделирование работы специализированного сортировочного устройства и определение горочного технологического интервала // Транспорт Урала. 2016. № 3. С. 100–105.

13. Издержки и себестоимость железнодорожных перевозок: учеб. пособие / Н. Г. Смехова [и др.]. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. 472 с.

14. Методические указания по сравнению вариантов проектных решений железнодорожных линий, узлов и станций / под ред. А. М. Козлова, К. К. Таля. М.: ВПТИТрансстрой, 1988. 235 с.

15. Сивицкий Д. А. МГС-Аналитика // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов наука и образование. 2016. № 12. С. 18–19.

16. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука: пер. с англ. М.: МИР, 1978. 420 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КАРАСЁВ Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Железнодорожные станции и узлы», СГУПС

СИВИЦКИЙ Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры «Железнодорожные станции и узлы», СГУПС

Статья поступила в редакцию 02.12.2016 г., актуализирована 18.02.2017 г., принята к публикации 28.02.2017 г.

Feasibility of rational constructive and technological parameters of organization options of multigroup shunting on the basis of simulation modeling

S. V. KARASEV, D. A. SIVITSKIY

Siberian State Transport University (SGUPS), Novosibirsk, 630049, Russia

Abstract. The article deals with the problem of optimizing the design and technology of the shunting complex, specialized for a multigroup selection of cars. The study offers a comprehensive approach based on the formation and subsequent technical and economic evaluation of options for combinations of design, technical equipment and technology work, the so-called constructive-technological variants. The resulted annual expenses, and also a necessary level of handling ability are accepted as the basic criteria of a choice of a constructive-technological variant.

To determine the rational constructive-technological variant of organizing multigroup shunting, it is suggested to use simulation modeling. The model is presented in the form of a queuing system. The service refers to a selection of cars in groups, and the requirements refers to handled trains. The simulation model is developed on the basis of block-modular architecture. The structure of the train (the number of groups, the length of the cuts and its mass) and the intervals between incoming requirements are given randomly in the form of distribution laws. The result of the work of the model is the determination of indicators of constructive and technological variants for organizing multigroup shunting, such as a hump technological interval, idle in service waiting and queue length, available processing ability.

The article describes the methodology for calculating the reported costs, which includes the annual capital investments, as well as operating annual costs. In terms of operating costs, the costs associated with the current maintenance of permanent devices, as well as locomotive-hours, car-hours (for operator companies) and the cost of occupying one kilometer of station tracks are taken into account. The developed model is used for technical and economic comparison based on the minimum of the reduced costs of 16 construction and technological variants for organizing a multi-group selection of cars that differ in the shunting method (degree, combinatorial, stepped maximum and duplicating) and the number of grouping tracks (from 2 to 5). The comparison takes into account the change in the design parameters of the grouping yard, associated with a different number and the required capacity of the tracks.

The results of calculations, based on the model, showed that the choice of the design and technological variant depends significantly on the intensity of the receipt of requirements, as well as the structure of the car flow. At a lower intensity, greater efficiency (reduction of the given costs) demonstrates degree-based method, and with greater intensity – combinatorial.

Keywords: multigroup sorting; specialized shunting device; simulation modeling; congestion queuing system; shunting methods

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-2-94-100>

REFERENCES

1. Borodin A. F. *Skhema razmeshcheniya i razvitiya sortirovochnykh stantsiy OAO "RZhD" do 2015 goda* [Scheme of location and development of marshalling yards of JSC "Russian Railways" until 2015]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport], 2008, no. 1, pp. 48–54.
2. Umanskiy V. I., Makarov V. M., Dolganyuk S. I. *Upravlenie mestnoy rabotoy v intellektual'nykh stantsionnykh sistemakh* [Managing local work in intelligent station systems]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2013, no. 5, pp. 16–21.
3. Karasev S. V., Sivitskiy D. A. *Razrabotka sortirovochnykh kompleksov, spetsializirovannykh dlya mnogogruppyonoy sortirovki vagonov, na osnove imitatsionnogo modelirovaniya* [Development of shunting complexes, specialized for multigroup shunting of wagons, based on simulation modeling]. *Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya* [Equipment. Technologies. Engineering], 2016, no. 1, pp. 51–54.
4. Tishkin E. M. *Metod kombinatornoy sortirovki vagonov – osnova intensivnoy tekhnologii mestnoy raboty* [The method of combinatorial shunting of wagons is the basis of intensive technology of local work]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 1987, no. 2, pp. 16–19.

5. Mesarosh Pal. *Sposoby mnogogruppyonoy sortirovki vagonov na vytyazhkakh* [Ways of multigroup shunting of cars on extracts]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport], 1963, no. 11, pp. 85–88.

6. Sivitskiy D. A. *Analiz otechestvennogo i zarubezhnogo opyta razrabotki i ispol'zovaniya modeley tekhnologii mnogogruppyonoy sortirovki vagonov* [Analysis of domestic and foreign experience in the development and use of models of multigroup shunting of cars]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Railway Transport], 2016, no. 1, pp. 106–116.

7. *Rules and norms for the design of sorting devices on railways of gauge 1520 mm*. Approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation on 10.10.2003. Moscow, Tekhninform Publ., 2003, 168 p. (in Russ.).

8. Akulinichev V. M., Kudryavtsev V. A., Koreshev A. N. *Matematicheskie metody v ekspluatatsii zheleznnykh dorog: ucheb. posobie dlya vuzov zh.-d. transporta* [Mathematical methods in the operation of railways: Textbook. Manual for high schools of transport]. Moscow, Transport Publ., 1981, 223 p.

9. Levin D. Yu. *Ocheredi na zheleznnoy doroge* [Queues on the railways]. *Mir transporta* [World of transport], 2014, no. 2, pp. 132–141.

10. Venttsel' E. S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations Research: Tasks, Principles, Methodology]. Moscow, Nauka Publ., Gl. red. fiz.-mat. lit. [Main edition of physical and mathematical literature], 1988, 208 p.

11. Sivitskiy D. A. *Razrabotka programmnogo modulya raspredeleniya vagonov po sortirovochnym putyam v protsesse mnogogruppyonoy sortirovki* [Development of a software module for the distribution of wagons on shunting routes in the process of multigroup shunting]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2016, no. 3, pp. 13–18.

12. Sivitskiy D. A. *Modelirovanie raboty spetsializirovannogo sortirovochnogo ustroystva i opredelenie gorozhnogo tekhnologicheskogo intervala* [Simulation of the work of a specialized shunting device and determination of a mountain technological interval]. *Transport Urala* [Ural's transport], 2016, no. 3, pp. 100–105.

13. Smekhova N. G., Kozhevnikov Yu. N. *Izderzhki i sebestoimost' zheleznodorozhnykh perevozok: ucheb. posobie* [Expenses and prime costs of rail transportation: a manual]. Moscow, FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [FGBOU "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport"], 2015, 472 p.

14. Kozlov A. M., Tal' K. K. *Metodicheskie ukazaniya po sravneniyu variantov proektnykh resheniy zheleznodorozhnykh liniy, uzlov i stantsiy* [Methodological guidelines for comparing design options for railway lines, junctions and stations]. Moscow, VPTI Transstroy Publ., 1988, 235 p.

15. Sivitskiy D. A. *MGS-Analitika* [MGS-Analytics]. *Khroniki ob"edinennogo fonda elektronnykh resursov nauka i obrazovanie* [Chronicles of the united fund of electronic resources of science and education], 2016, no. 12, pp. 18–19.

16. Shannon R. *Imitatsionnoye modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka: per. s angl.* [Simulation of systems is an art and a science: transl. from engl.]. Moscow, MIR Publ., 1978, 420 p.

ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. KARASEV,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department
"Railway stations and junctions", SGUPS

Dmitriy A. SIVITSKIY,
Post-graduate student of the Department
"Railway stations and junctions", SGUPS

Received 02.12.2016

Revised 18.02.2017

Accepted 28.02.2017

■ E-mail: gdsu@rambler.ru (S. V. Karasev)