

УДК 656.2

*С. В. КАРАСЕВ, Д. А. СИВИЦКИЙ*

*Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
gdsugdsu@yandex.ru*

## **МЕТОД ОЦЕНКИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ПРИ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ**

Предлагается оценивать неравномерность на основе диверсификации основного потока транспортных единиц и определения коэффициентов вариации для разделенных потоков. На примере распределения работы между сортировочными устройствами железнодорожной станции с использованием методов математической статистики и интеллектуального анализа данных получены регрессионные модели для коэффициентов вариации потоков, поступающих на основное и вспомогательное устройства. Результаты могут использоваться для решения вопросов, связанных с расчётом пропускной способности объектов методами теории массового обслуживания или имитационного моделирования, с учётом их специализации и распределения работы.

Специализация систем и объектов железнодорожного транспорта требует создания соответствующих условий, главным из которых является разделение обслуживаемых требований по тому или иному признаку. Такого рода разделение (применительно к транспортному процессу) требует распределения общего входящего потока требований между несколькими обслуживающими устройствами по тому или иному признаку.

Одним из основных признаков, позволяющих отнести объект к специализированным, предлагается считать степень однородности обслуживаемых требований и однотипности выполняемых операций [1, 2]. Специализация позволяет в определенной степени снизить влияние факторов неравномерности [3] за счет того, что специализированный объект или система будет выполнять обработку потока требований более высокой степени однородности.

Уменьшение неравномерности параметров входящего потока будет достигаться за счет разделения требований по отдельным специализированным объектам (обслуживающим каналам), к каждому из которых будет поступать, очевидно, более однородный поток с меньшей неравномерностью и с меньшей же интенсивностью. Неравномерность входящего потока (по интервалам между поступающими на обслуживание требованиями) можно считать величиной, обратной к плотности (интенсивности) входящего потока.

Высокая интенсивность подхода способствует уменьшению интервалов между требованиями во входящем потоке. Снижение интенсивности под-

хода соответствует увеличению интервалов между требованиями, уменьшению загрузки обслуживающего объекта. Аналогичный эффект будет иметь разделение потока между несколькими специализированными обслуживающими объектами.

Функциональную связь между возможностями обслуживающего устройства и структурой выполняемой им работы можно выразить формулой

$$R_0 = f(N, O), \quad (1)$$

где  $N$  – количество транспортных единиц, которые обслуживаются на данном объекте;  $O$  – количество технологических операций, выполняемых с транспортной единицей на объекте.

При ограниченных ресурсных возможностях специализация связана, очевидно, с задачей перераспределения этих ресурсов, т. е. с определением эффективного баланса между разнообразием обслуживаемых требований и разнообразием выполняемых технологических операций при заданном  $R_0$ .

В случае, когда ресурсных возможностей устройства  $R$  оказывается недостаточно, возможны два варианта решений:

- повышение ресурсных возможностей данного устройства до необходимого уровня;
- использование дополнительного обслуживающего устройства, которое может специализироваться на обслуживании части требований  $N$  либо на выполнении части операций  $O$ .

При выходе за ресурсные возможности рассматриваемого устройства специализация может потребовать расширения границ рассматриваемого объекта, с включением в них дополнительных обслуживающих устройств (параллельных технологических линий), участвующих в перераспределении транспортных единиц и (или) операций по их обслуживанию (рисунок 1).

В зависимости от иерархического уровня и типа объекта это могут быть:

- параллельные (дополнительные) ходы на полигоне железных дорог;
- дополнительные главные пути на перегонах железнодорожных линий, а также в железнодорожных узлах (в т. ч. в развязках);
- дополнительные железнодорожные станции в узлах;
- дополнительные парки путей и (или) пути в парках железнодорожных станций;
- вспомогательные сортировочные устройства и т. п. [2].

Таким образом, вопрос оценки влияния неравномерности транспортных потоков при специализации объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта актуален для многих объектов, участвующих в перевозочном процессе.

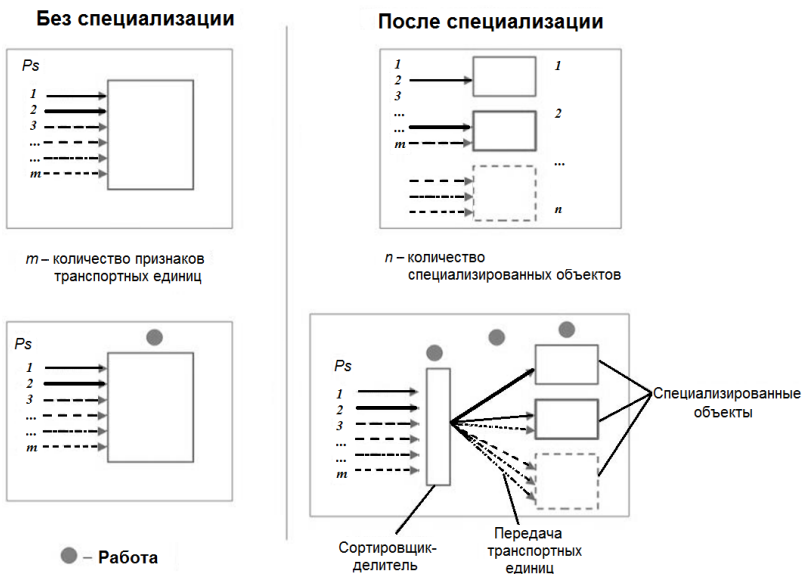


Рисунок 1 – Образование дополнительных обслуживающих объектов и работ при разделении потока по признакам транспортных единиц

В железнодорожных узлах, имеющих в своем составе несколько специализированных железнодорожных станций, возможно разделение обслуживаемых транспортных единиц между станциями (которые в данном случае являются обслуживающими объектами), например, по видам движения (пассажирское, грузовое). На уровне железнодорожных станций разделение транспортных единиц может происходить по специализированным паркам путей. Переработка вагонопотоков (например, транзитных и местных) на уровне станции может разделяться между основным и вспомогательным сортировочным устройствами [4]. На уровне железнодорожного узла возможно разделение сортировочной работы между специализированными сортировочными устройствами, располагающимися на разных станциях.

Специализация объектов в общем случае может приводить к появлению дополнительной работы, а также соответствующих устройств, что связано с обеспечением:

- разделения потоков;
- передачи разделенных потоков между специализированными устройствами.

Разделение потока поступающих требований при специализации обслуживающих устройств с точки зрения неравномерностей может иметь двойкий и разнонаправленный эффект:

– за счет повышения однородности обслуживаемых требований будет уменьшаться неравномерность времени обслуживания;

– из-за разделения потока будет уменьшаться интенсивность потоков на каждое специализированное устройство, что может привести к увеличению неравномерности интервалов между требованиями.

В общем виде специализация подразумевает перераспределение потока требований между каналами обслуживания. Достаточно часто входящий поток разделяется между двумя каналами обслуживания (один из которых будет специализированным), однако их может быть и больше, в зависимости от количества типов требований, по которым производится специализация работы и устройств (см. рисунок 1).

Для количественной оценки изменения неравномерности можно использовать коэффициент вариации для входящего потока (для интервалов между требованиями, поступающими на обслуживание),  $C_v^I$ , и коэффициент вариации времени обслуживания  $C_v^t$ .

Снижение неравномерности входящего потока за счет разделения смешанного потока на отдельные потоки с обеспечением их обслуживания специализированными объектами следует, на наш взгляд, считать одной из основных причин повышения производительности обслуживающей системы в целом. Причем такой положительный эффект будет проявляться не только непосредственно на обслуживаемом объекте, но и далее в пределах всей транспортно-логистической цепи.

Долю потока, которая может быть выделена для обслуживания на специализированной технологической линии, предлагается характеризовать коэффициентом диверсификации  $\alpha_d^i$ , где  $i$  – порядковый номер технологической линии, выделяемой из общей массы обслуживаемых требований.

Так, при выделении потока составов на специализированное сортировочное устройство [5, 6] (рисунок 2) их доля будет обозначаться как  $\alpha_d^1$ , а оставшаяся часть потока, направляемая на основное устройство –  $\alpha_d^0$ . Коэффициент диверсификации, по нашему мнению, является важной характеристикой, которая может использоваться для определения эффективности специализации.



Рисунок 2 – Разделение входящего потока между сортировочными устройствами

Обобщенная модель выделения специализированных технологических линий и соответствующих им транспортных потоков представлена на рисунке 3.

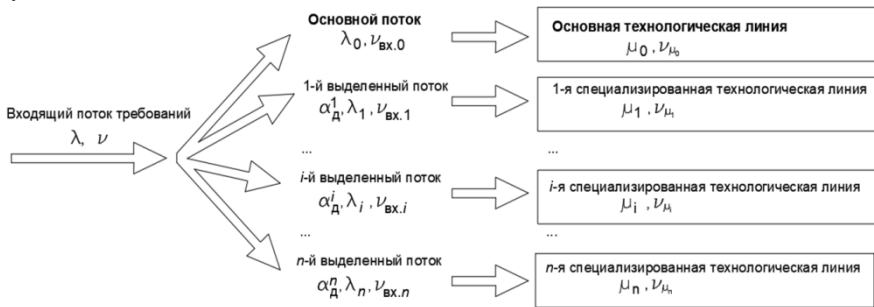


Рисунок 3 – Диверсификация потока требований

Первоначальный входящий в систему (под системой в данном случае подразумевается совокупность всех, в т. ч. специализированных, каналов обслуживания) поток требований можно охарактеризовать двумя параметрами: интенсивностью поступления  $\lambda$  и коэффициентом вариации  $\nu_{вх}$ , указывающим на то, насколько неравномерно поступают требования (т. е. насколько сильно отличаются друг от друга интервалы времени между ними).

После диверсификации выделяется основной поток с измененными параметрами интенсивности и неравномерности  $\lambda_0$  и  $\nu_{вх.0}$ , а также заданное количество потоков, направленных на специализированные технологические линии (параметры  $\lambda_{0i}$  и  $\nu_{вх.i}$ ).

Обслуживание до диверсификации также выполняется на одной универсальной технологической линии с параметрами интенсивности обслуживания  $\mu$  и коэффициентом вариации времени обслуживания  $\nu_{\mu}$ , а после – на основной технологической линии (параметры  $\mu_0$  и  $\nu_{\mu_0}$ ) и на специализированных (параметры  $\mu_i$  и  $\nu_{\mu_i}$ ). Перечисленные выше параметры являются определяющими с точки зрения показателей эффективности работы системы.

В связи с этим можно предположить, что интенсивность поступления требований на технологическую линию и интенсивность обслуживания требований определяют загрузку технологической линии, а коэффициент вариации оказывает влияние на параметры очереди и длительности нахождения в ней. Так, можно ожидать, что при диверсификации потока неравномерность поступления требований на различные технологические линии (т. е. неравномерность в разделенных потоках) увеличится, а неравномерность обслуживания, наоборот, снизится за счет выполнения более однородной работы с более узкой номенклатурой требований на каждой из технологических линий. При этом изменение коэффициентов вариации будет

одновременно связано с изначальной интенсивностью поступления требований в систему в общем потоке, коэффициентами вариации и коэффициентами диверсификации.

Наиболее распространенным вариантом является выделение одной специализированной технологической линии, т. е. специализация определённого вида работы из общей массы поступающих требований (основная технологическая линия и одна специализированная). Соответственно, далее решается задача определения коэффициентов вариации входящего потока  $V_{вх0}, V_{вх1}, V_{ц0}, V_{ц1}$ .

При рассмотрении реального объекта, на котором предполагается выделение какой-либо специализированной технологической линии, решение задачи определения коэффициентов вариации после диверсификации сводится к статистическому анализу информации о поступлении требований в систему с выделением потока, который необходимо специализировать. Исходя из этого формируются выборки с временами (моментами) поступления: а) на основную технологическую линию; б) на специализированную. Далее известными методами [7] определяются числовые характеристики этих выборок, в т. ч. рассчитываются коэффициенты вариации.

Однако такой «статистический» подход не позволяет выполнить расчет при отсутствии достоверной статистики, например, на этапе проектирования нового объекта, а также при необходимости исследования оптимальных границ диверсификации потока. В связи с этим актуальной является задача разработки математической модели, которая позволит рассчитать новые коэффициенты вариации  $v_{вх0}, v_{вх1}$  с учетом диверсификации потоков при разделении системы на основной и вспомогательный канал обслуживания. В качестве требований, поступающих в систему, могут рассматриваться поезда, составы, вагоны (в зависимости от вида системы и характера ее работы).

На коэффициенты вариации  $v_{вх0}, v_{вх1}$  оказывает влияние, в первую очередь, неравномерность исходного (смешанного) потока, характеризующаяся коэффициентом вариации  $v_{вх}$ . В свою очередь коэффициент вариации связан с интенсивностью входящего потока  $\lambda$ .

При увеличении загрузки любого устройства неравномерность будет снижаться за счет уплотнения потока (интервалов). В этом разница между работой в условиях высокой и низкой загрузки.

Помимо этого, существенное влияние на неравномерность оказывает коэффициент диверсификации  $\alpha_{д}^1$ , определяющий долю специализируемого потока: чем он ниже, тем, очевидно, слабее изменится неравномерность потока, поступающего на основную технологическую линию.

Для разработки математической модели определения коэффициентов вариации  $v_{вх0}, v_{вх1}$  необходим значительный объем исходных данных, обеспечивающих варьирование перечисленных выше факторов (признаков)

$v_{вх}$ ,  $\lambda$  и  $\alpha_d^1$ . При этом для каждой из комбинации этих факторов должны быть определены  $v_{вх0}$ ,  $v_{вх1}$ , которые будут являться откликами модели.

Изменение неравномерности при разделении потоков в случае специализации устройств исследовалось на основе выполнения вариантных расчетов. На первом этапе произведена генерация исходных данных для формирования модели расчета с определением следующих показателей.

1 Интенсивность поступления поездов в систему  $\lambda$  (например, поездов в расформирование в парк приема сортировочной станции).

С точки зрения математической модели, интенсивность – это удобная характеристика, однако для оценки неравномерности до и после диверсификации в первую очередь необходима генерация интервалов времени между поездами  $I_i$ . Интервалы времени генерировались методом Монте-Карло по показательному закону с минимальным значением интервала  $I_{min} = 6$  мин. Каждому интервалу соответствует прибывающий поезд. Средний интервал между поездами  $I_{cp} \in [6; 60]$  и изменяется с шагом в 1 минуту. Соответственно, для каждого  $I_{cp}$  рассчитывалась  $\lambda = 1 / I_{cp}$ .

2 Коэффициент диверсификации  $\alpha_d^1$ , который фиксировался последовательно в диапазоне  $\alpha_d^1 \in [0,01; 0,5]$  с шагом 0,01.

Коэффициент вариации  $v_{вх}$  определялся по интервалам времени  $I_i$ . На основании сгенерированных данных определялось выборочное среднее  $\bar{I}_v$  и соответствующее ему выборочное среднее квадратическое отклонение  $\sigma_v(I)$ , в результате чего рассчитывается  $v_{вх} = \sigma_v(I) / \bar{I}_v$ .

Для каждой комбинации факторов ( $\lambda$  и  $\alpha_d^1$ ) сгенерирована выборка, содержащая 1000 поездов. Для каждого поезда в соответствии с  $\alpha_d^1$  определяется номер технологической линии, на которую поезд должен поступить (0 или 1), после чего выделяются две отдельные выборки, на основании которых определены коэффициенты вариации  $v_{вх0}$ ,  $v_{вх1}$  аналогично коэффициенту вариации  $v_{вх}$ . Фрагмент результатов генерации исходных данных и расчета коэффициентов вариации  $v_{вх0}$  и  $v_{вх1}$  представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования

Номер	Признак			Отклики	
	$I_{cp}$	$\alpha_d^1$	$v_{вх}$	$v_{вх0}$	$v_{вх1}$
	6	0,01	0,165	0,194	0,654
...	...	...	...	...	...
	15	0,15	0,652	0,682	0,952
...	...	...	...	...	...
	26	0,35	0,854	0,898	0,984

На основании данных, представленных в таблице 1, разработано несколько вариантов моделей расчета коэффициентов вариации: линейная модель, модель случайной регрессии лесов (машинное обучение) [8], модель

CatBoost (обучение методом градиентного спуска) [9]. Оценка моделей производится на основании метрики средней абсолютной ошибки (MAPE) в процентах:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - \bar{y}_i|}{y_i} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $y_i$  и  $\bar{y}_i$  – фактическое и прогнозное значения отклика;  $N$  – размерность выборки. Полученные значения  $MAPE$  представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения средней абсолютной ошибки в процентах для различных типов моделей

Моделируемая величина	В процентах		
	Линейная регрессия	Случайная регрессия лесов	CatBoost
$v_{вх0}$	3,88	2,66	2,57
$v_{вх1}$	6,49	6,39	6,38

Модели машинного обучения показывают несколько лучший результат, однако при этом более сложны в использовании. Линейная регрессия [10] показывает приемлемый результат – для коэффициента  $v_{вх0}$  средняя абсолютная ошибка составила 3,88 %, а для  $v_{вх1}$  – 6,49 %.

С точки зрения коэффициента вариации такое отклонение является приемлемым и не окажет существенного влияния на итоговый результат, например, при определении показателей эффективности работы систем, обслуживаемых в качестве систем массового обслуживания.

Полученные регрессионные модели для коэффициентов вариации потоков, разделенных в результате специализации устройств, представлены в формулах (2), (3):

$$v_{вх0} = 0,22964694\alpha_d^1 + 0,00063228\frac{1}{\lambda} + 0,57222175v_{вх} + 0,321; \quad (2)$$

$$v_{вх1} = -0,0946123\alpha_d^1 + 0,00041853\frac{1}{\lambda} + 0,15450007v_{вх} + 0,828. \quad (3)$$

Полученные регрессионные зависимости для оценки неравномерности входящего потока с учетом его разделения по обслуживающим устройствам могут быть использованы для определения эффективности выделения специализированных технологических линий с использованием формул теории массового обслуживания [11] для расчета длины очереди и времени ожидания обслуживания для различных вариантов параметров входящего потока и времени обслуживания. В частности, для Пуассоновского входящего потока и произвольного распределения времени обслуживания (одноканальные системы, например, основная и вспомогательная сортировочные горки) можно использовать формулы Полячека – Хинчина:



$$L_{\text{оч}} = \frac{\rho^2(1 + v_{\text{об}}^2)}{2(1 - \rho)}, \quad (4)$$

$$W_{\text{оч}} = \frac{\rho^2(1 + v_{\text{об}}^2)}{2\lambda(1 - \rho)}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – приведенная интенсивность;  $L_{\text{оч}}$  – среднее количество заявок (транспортных единиц), находящихся в очереди;  $W_{\text{оч}}$  – среднее время нахождения заявки в очереди (время ожидания обслуживания).

Коэффициентом вариации  $v_{\text{об}}$  является результат расчета по формуле (2) или (3).

Важно отметить, что регрессионные зависимости (2) и (3) могут использоваться при оценке эффективности специализации различных объектов транспортной инфраструктуры в том случае, если они соответствуют условиям получения регрессионных моделей:

- интервал поступления транспортных единиц  $I_{\text{ср}} \in [6; 60]$  мин;
- коэффициент диверсификации  $\alpha_{\text{д}}^1 \in [0,01; 0,5]$ .

Получаемые таким образом показатели, характеризующие очередь, могут напрямую использоваться для экспресс-оценки (в т. ч. экономической) эффективности специализации объектов инфраструктуры, участвующих в перевозочном процессе.

Следует заметить, что предложенные зависимости используются тогда, когда технологические линии (в частности, основное и вспомогательное сортировочные устройства) непосредственно примыкают к общему накопителю или предшествующему каналу обслуживания (например, по рисунку 2 – это парк приема). В противном случае, когда после разделения основного потока для поступления на вспомогательный канал обслуживания (например, вспомогательное сортировочное устройство) транспортные единицы требуется передавать с выполнением дополнительной технологической операции (например, перестановки в другой район станции маневровым порядком), необходимо учитывать возможное изменение интервалов в потоке, поступающем на вспомогательный канал, из-за влияния этой операции. Такая ситуация характерна для вариантов удаленного расположения вспомогательного сортировочного устройства на сортировочных станциях: со стороны парка отправления, между парком отправления и сортировочным и т. п. Для основного канала обслуживания (устройства) по-прежнему можно использовать выражение (2).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Карасев, С. В. К вопросу расчета экономической эффективности специализации транспортных объектов, участвующих в перевозочном процессе / С. В. Карасев // Транспорт и логистика: актуальные проблемы стратегического развития и оперативного управления : VI междунар. науч.-практ. конф., Ростов н/Д. – 2022. – С. 74–77.

2 Карасев, С. В. Методологические аспекты оценки эффективности специализации объектов железнодорожного транспорта в перевозочном процессе / С. В. Карасев // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2022. – № 10. – С. 7–16.

3 Казаков, А. Л. Моделирование входящего транспортного потока на грузовую станцию с учетом его суточной неравномерности / А. Л. Казаков, А. М. Маслов // Транспорт Урала. – 2008. – № 2 (17). – С. 65–71.

4 Сивицкий, Д. А. Методика проектирования специализированных сортировочных устройств для многогруппной сортировки / Д. А. Сивицкий // Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – 2018. – С. 52–57.

5 Sivitsky, D. A. Methodology for selecting the multistage methods of train classification and design parameters of specialized shunting facilities based on modeling / D. A. Sivitsky, S. V. Karasev, D. V. Osipov // Transportation Research Procedia : 12th International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability, TITDS 2021. – 2022. – P. 323–332.

6 Карасев, С. В. Обоснование рациональных конструктивных и технологических параметров вариантов организации многогруппной сортировки на основе имитационного моделирования / С. В. Карасев, Д. А. Сивицкий // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76, № 2. – С. 94–100.

7 Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 8-е изд. – М. : Высш. шк., 2002. – 479 с.

8 Hastie, T. Random Forests. Chapter 15 / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman // The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. – 2nd ed. – Springer-Verlag, 2009. – 746 p.

9 Нестеров, Ю. Е. Методы выпуклой оптимизации / Ю. Е. Нестеров. – М. : Изд-во МЦНМО, 2010. – 281 с.

10 Соколов, Г. А. Введение в регрессионный анализ и планирование регрессионных экспериментов в экономике / Г. А. Соколов. – М. : ИНФРА-М, 2017. – 109 с.

11 Гнеденко, Б. В. Введение в теорию массового обслуживания / Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко. – М. : Наука, 2017. – 432 с.

S. V. KARASEV, D. A. SIVITSKY

## **METHOD OF ASSESSING UNEVEN TRAFFIC FLOWS IN SPECIALIZATION OF RAILWAY STATIONS**

The article proposes to estimate the unevenness based on the diversification of the main flow of transport units and the determination of the coefficients of variation for divided flows. Using the example of the distribution of work between the sorting devices of the railway station using methods of mathematical statistics and data mining, regression models were obtained for the coefficients of variation of flows entering the main and auxiliary devices. The results can be used to solve issues related to calculating the throughput of objects using mass service theory or simulation modeling, taking into account their specialization and distribution of work.

Получено 01.12.2022