

УДК 656.224.072

## Разработка автоматизированного алгоритма для расчета пропускной способности железнодорожной линии

М. А. Марченко<sup>1</sup>, О. Д. Покровская<sup>1</sup>, В. В. Щербаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Российская Федерация, 191023, город Санкт-Петербург, наб. канала Грибоедова, д. 30-32, литер А

**Для цитирования:** Марченко М. А., Покровская О. Д., Щербаков В. В. Разработка автоматизированного алгоритма для расчета пропускной способности железнодорожной линии // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 876–888. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-876-888

### Аннотация

**Цель:** Разработка автоматизированного алгоритма с применением инструментов имитационного моделирования, позволяющего производить расчет наличной пропускной способности железнодорожной линии со смешанным движением. В его основу заложены аналитические формулы. **Результаты:** Алгоритм отличается использованием инструментов имитационного моделирования и учетом коэффициента с одноименным названием. Применение данного программного продукта позволит повысить эффективность и точность расчетов наличной пропускной способности. Полученные в ходе моделирования данные были сопоставлены с данными в расписании, выявлено их расхождение, на основе которых было найдено значение коэффициента имитационного моделирования, интегрированный в существующие формулы. На основе всех вычислений разработан программный алгоритм с последующей его реализацией в программной среде Maple с целью автоматизации вычислений и повышения их эффективности. **Методы:** Использовались имитационное моделирование и метод аналитических сопоставлений. **Практическая значимость:** Повышение точности вычислений значений наличной пропускной способности на сети ОАО «РЖД» и упрощение реализации подобных вычислений. Данный алгоритм в случае его внедрения позволит приблизить рассчитываемые значения к реальным.

**Ключевые слова:** Железнодорожный полигон, аналитические формулы, имитационная модель, программный комплекс, сопоставление результатов, программный код.

### Введение

В настоящее время вопрос автоматизации расчета пропускной способности на железнодорожном транспорте и его оптимизации является одним из наиболее актуальных. При этом в работе

также поставлена задача автоматизации вычислений с целью увеличения скорости производимых вычислений и повышения эффективности самих расчетов. Для выполнения этой цели была произведена разработка кода программного продукта,

позволяющего производить расчет пропускной способности железнодорожного полигона со смешанным движением.

В работе моделируется ситуация движения скоростных поездов и поездов дальнего следования по существующей железнодорожной линии Москва — Санкт-Петербург. Для упрощения разработки расчетных формул рассмотрим движение лишь выше упомянутых категорий поездов, не затрагивая многочисленные пригородные поезда и грузовое движение, которое сохранено на некоторых участках данной линии. В используемых в настоящее время расчетных формулах наличной пропускной способности закладывается временной промежуток на содержание железнодорожной инфраструктуры [1]. В данных формулах не в полной мере заложено время на разгон и замедление поездов, вследствие чего конечные результаты по общеизвестным формулам в значительной степени отличаются от фактически существующих. Это приводит к отклонениям в расчетах пропускной способности и фактической возможности пропуска поездов по конкретной линии или ее участку.

В целях устранения расхождений в данных расчетах была построена имитационная модель железнодорожного полигона. Путем многочисленного моделирования движения поездов, получения времени проследования поездов по железнодорожной линии был выявлен коэффициент имитационного моделирования, являющийся научной новизной, а также предложен программный код для автоматизации вычислений.

### **Анализ теоретического состояния вопроса**

Проблема, подобная освещаемой в данной работе, рассматривалась в статье из второго выпуска 2021 года журнала «Железнодорожный транспорт» специалистами в области научно-исследовательской работы в сфере проблем железнодорожного транспорта С. В. Калининим,

А. Ф. Бородиним, А. Е. Смирновим, Г. Г. Горбуновим, А. Ю. Соколовим, А. П. Козловским и И. Р. Гургенидзе. В статье описаны методы и способы оптимизации использования путевого развития станции с целью пропуска большего количества поездов. рассматривается актуальный вопрос повышения эффективности использования пропускной способности станций с целью повышения станционной пропускной способности. В работе произведена подробная классификация всех имеющихся на сегодняшний день систем интервального регулирования движения поездов. Кроме того, произведен подробный анализ влияния этих систем на станционные и межпоездные интервалы, в том числе в случае проследования поездов станций без остановок. В работе имеется схема имитационной модели, которая имитирует работу железнодорожной станции и позволяет строить графики движения поездов. Серьезным недостатком данной работы следует отметить отсутствие подробного расчета, поскольку формулы способны дать четкую зависимость полученного результата от сторонних факторов [2].

Также известный специалист Ж. Я. Абдуллаев произвел рассмотрение похожей проблемы, которая непосредственно связана с особенностями определения пропускной способности двухпутных участков. В статье подробным образом рассмотрены и описаны классификации способов расчета пропускной способности железнодорожных линий, представлены аналитические формулы определения пропускной способности. В работе был предложен новый способ построения графика движения поездов, в результате чего возросла пропускная способность. Однако в статье отсутствуют результаты имитационного моделирования, которые могли бы подкрепить аналитические расчеты [3].

Работа [4] освещает предпосылки наиболее рационального распределения потоков поездов

всех категорий в железнодорожном узле в Парижском регионе с последующей максимальной оптимизацией. Путем реализации поставленной задачи появится возможность повышения поточности движения поездов в узле, а также наибольшего увеличения пропускной способности. В работе авторами представлена комплексная реорганизация движения поездов на основе удаления поездов из расписания, внесения корректировок в маршруты следования, изменения количества станций. Реорганизация была выполнена путем применения теории графов. При этом в статье не дается полного аналитического описания проблемы, освещаемой в ней. Полное отсутствие применения инструментов имитационного моделирования, которые бы предоставили возможность наглядной верификации результатов, не дает полной наглядности проведения исследований. Теория графов также применима в контексте расчета пропускной способности, однако требует дополнительной верификации имитационными процессами.

В статье [5] на основе железнодорожной линии R106 было проведено исследование, связанное с поиском наиболее оптимальных вариантов увеличения пропускной способности после завершения капитального ремонта. Авторами был предложен способ имитационного моделирования в программной среде OpenTrack с целью наиболее точного определения существующей наличной пропускной способности и поиска вариантов ее увеличения. В работе представлены имитационные модели до начала капитального ремонта на линии и после его окончания. С помощью подбора наиболее оптимальных параметров и с учетом ограничений, связанных с необходимостью соблюдения безопасного движения поездов авторам удалось добиться увеличения пропускной способности в полтора раза относительно первоначального варианта. Путем реализации описанных в работе мер имеется возможность увели-

чить размеры движения в железнодорожном узле в районе Загреба в первую очередь пригородных поездов — в связи с их сегодняшней нехваткой, что будет способствовать экономическому развитию Хорватии.

В ходе изучения обозначенной в работе проблемы был произведен анализ научной литературы на схожую тематику, где были проанализированы работы на тему имитационного моделирования в транспортной сфере и изучена эффективность применения подобных методов в данной отрасли [6–18].

В работе проанализированы аналитические формулы, по которым в настоящее время выполняется расчет наличной пропускной способности. С целью верификации результатов используется имитационная модель.

### **Построение имитационной модели железнодорожного полигона**

Одной из составляющих исследования является имитационная модель, поскольку с ее помощью возможно получить значения времени проследования поездов по железнодорожной линии, более приближенные к реальным. Целесообразно производить имитационное моделирование в программном комплексе AnyLogic, поскольку он достаточно прост в освоении, не требует больших ресурсов производительности ЭВМ и для работы в нем необязательны знания языков программирования [16]. Для выполнения исследований в рамках этой работы используем железнодорожную библиотеку для построения модели железнодорожного полигона при помощи встроенных инструментов «железнодорожный путь» и «точки железнодорожного пути». Построение производим в масштабе относительного расстояния между железнодорожными станциями. Их удаленность друг от друга находим согласно [19]. Схема полигона приведена на рис. 1.

Для того чтобы запустить процесс имитационного моделирования, необходимо построить блочную структуру имитационной модели. Ее построение также производим в железнодорожной библиотеке с использованием блоков `trainSource`, `trainMoveTo`, `trainDispose`. Они моделируют соответственно зарождение имитационного процесса, его перемещение в заданную точку и последующее погашение после достижения цели. Однако с учетом специфики конкретной модели необходимо выполнять перераспределение моделируемых процессов на различные блоки, чтобы каждый конкретный поезд в расписании производил остановку на необходимых станциях в соответствии с расписанием следования. Для реализации этого процесса используем блок `selectOutput` библиотеки моделирования процессов, который устанавливаем между блоком зарождения процессов и блоком их направления следования. В каждом блоке прописываем распределение по условию:

$$\text{entity.size}() = j,$$

где  $j$  — значение от 1 до  $n$ ;

$n$  — количество назначений.

Распределение этих потоков осуществляем вручную, путем ввода в модель переменной `trainSizeWithLoco` с целочисленным значением (`int`) и присвоением каждому поезду в расписании соответствующего целого числа. В процессе моделирования производим изменение значения с клавиатуры в поле `editbox`.

Для того чтобы осуществлять сбор информации о времени следования каждого отдельно взятого поезда по полигону, используем блоки `timeMeasureStart` и `timeMeasureEnd` и гистограмму. Для моделирования остановки на станции используем блок `delay`, в котором устанавливаем значение из расчета 1 минута стоянки = 1 миллисекунда, отталкиваясь от расписания движения поездов [20]. Подобным способом строим все

назначения рассматриваемых поездов различного типа. Блоки соединяем при помощи `connector`.

Таким образом, дополнительно учтенными условиями в имитационной модели является время на разгон и замедление поездов, в то время как в расчетных формулах учитывается среднее значение ходовой скорости.

На рис. 2 представлена блочная часть имитационной модели полигона.

### Математический инструментарий расчета

Общеизвестная аналитическая формула расчета наличной пропускной способности, которая используется в настоящее время [1]:

$$N_{\text{нал}} = \frac{(1440 - t_{\text{техн}})}{I_p} \cdot \alpha_n, \quad (1)$$

где  $t_{\text{техн}}$  — бюджет времени на содержание и ремонт инфраструктуры;

$I_p$  — расчетный межпоездной интервал;

$\alpha_n$  — коэффициент надежности работы инфраструктуры и подвижного состава, принимаем равным 0,96 [2].

Межпоездной интервал формулы (1) определяем по формуле 2: [1]

$$I_p = \frac{0,5 \cdot L_{i2} + L_{\text{бл1}} + L_{\text{бл2}} + 0,5 \cdot L_{i1} + t_{\text{в}}}{V_{\text{ср}} \cdot 16,7}, \quad (2)$$

где  $L_{i1}$ ,  $L_{i2}$  — длина соответственно впереди и позади идущего поезда;

$L_{\text{в}}$  — расстояние, которое проходит второй поезд за время, необходимое для восприятия машинистом сигнала ближнего светофора;

$L_{\text{бл1}}$ ,  $L_{\text{бл2}}$  — длина соответственно первого и второго по счету блок-участков относительно впереди идущего поезда;

$V_{\text{ср}}$  — средняя скорость следования поездов по блок-участкам;

$t_{\text{в}}$  — время на восприятие изменения показания светофора, принимаем равным 0,05 мин.



```

restart :
r := 116 :
t := 1.08 :
Km := ceil( ( r * 1000 * t * 60 / ( r / 36.366 * t * 1000 ) );
V := Float( round( Float( evalf( ( r * 1000 / t * 3600 ), 2 ) ), -2 );
Vm := round( V * Km );
Vu := 3 * Km;
Vt := 2 * Km;

```

*Km := 2182*  
*V := 42.95*  
*Vm := 93717*  
*Vu := 6546*  
*Vt := 4364*

Рис. 3. Расчет модельной скорости в программном пакете Maple

Находим величину расчетного межпоездного интервала  $I_p$ , опираясь на имитационную модель. Она находится в зависимости от показателя средней скорости следования поездов. В качестве исходных данных используем существующее расписание движения поездов [20].

Ориентируясь на расписание следования поездов по рассматриваемой железнодорожной линии, определяем маршрутную скорость поезда на отдельных участках полигона по формуле:

$$V_m = \frac{L_{\text{пол}} \cdot 1000}{t_m \cdot 3600}, \quad (3)$$

где  $L_{\text{пол}}$  — длина железнодорожного полигона Москва — Санкт-Петербург, принимаемая равной 645,5 км;

$t_m$  — время следования по маршруту,

В работе было введен термин коэффициента модельной скорости. Он используется для пересчета фактической скорости в значения, которые будут введены в блоки имитационной модели. Различие этих значений является следствием построения имитационной модели в сокращен-

ном масштабе. Формула коэффициента имеет следующий вид:

$$K_{\text{vm}} = \frac{L_{\text{пол}} \cdot 1000 \cdot t_m \cdot 60}{\frac{L_{\text{пол}}}{36,366} \cdot t_m \cdot 3600}, \quad (4)$$

$$K_{\text{vm}} = \frac{645,5 \cdot 1000 \cdot 3,5 \cdot 60}{\frac{645,5}{36,366} \cdot 3,5 \cdot 1000} = 2181,97 = 2182.$$

Ниже представлено аналитическое вычисление значения маршрутной скорости одного из высокоскоростных поездов «Сапсан», следующего по маршруту Москва — Санкт-Петербург под номером 752а.

$$V_m = \frac{645,5 \cdot 1000}{3,5 \cdot 3600} = 51,23 \text{ м/с};$$

$$V_{\text{мм}} = 51,23 \cdot 2182 = 111\,784 \text{ м/с}.$$

Скорости увеличения и уменьшения скорости перед стоянками у «Сапсана» составляют соответственно 3 и 2 м/с<sup>2</sup>. У поездов дальнего следо-

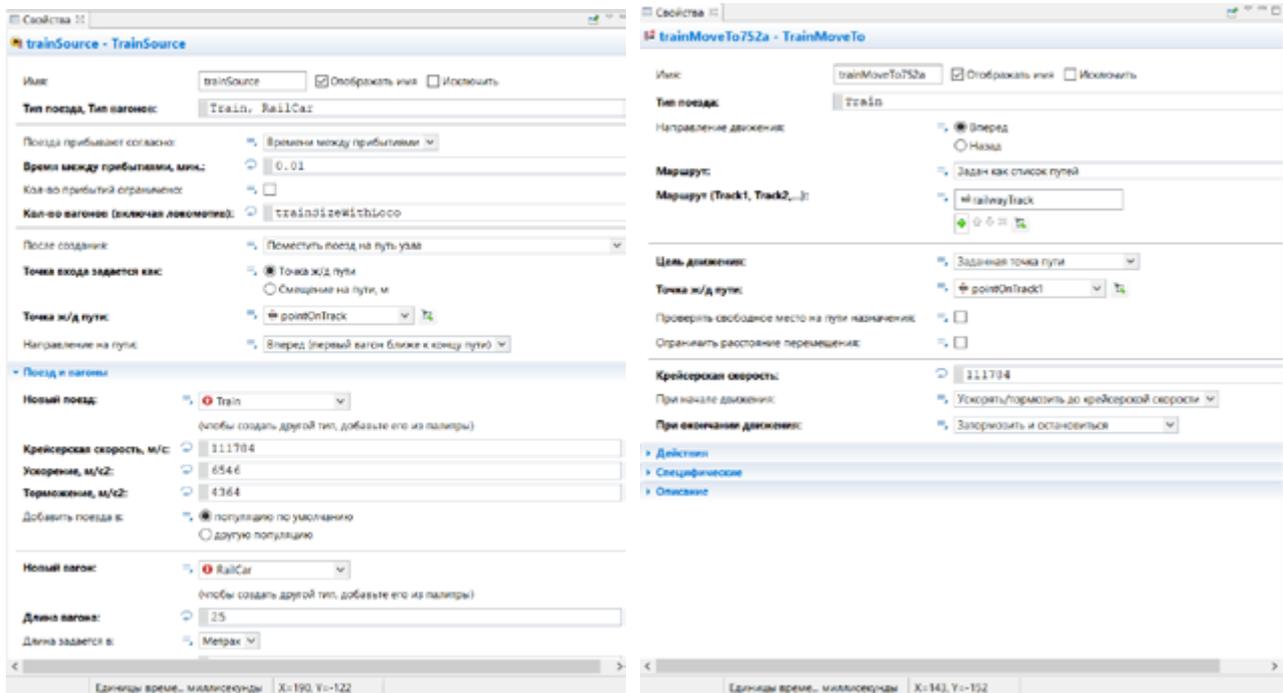


Рис. 4. Ввод найденных значений в блоки имитационной модели

вания эти значения составляют  $1 \text{ м/с}^2$ ,  $0,5 \text{ м/с}^2$ . Выполняем их пересчет для последующего ввода в имитационную модель:

$$V_{\text{ускм}} = 3 \cdot 2182 = 6546 \text{ м/с}^2;$$

$$V_{\text{замм}} = 2 \cdot 2182 = 4364 \text{ м/с}^2.$$

Вышеописанные вычисления целесообразно автоматизировать. Ниже на рис. 3 приведен расчет модельной скорости в программном пакете Maple.

Вписываем полученные величины в блоки имитационной модели trainSource и trainMoveTo. Процесс ввода представлен на рис. 4.

Далее процессом имитации движения поездов на гистограмме отображаются времена проследования поездов по линии.

Определяем время проследования каждого из поездов и сопоставляем его с фактическим временем по расписанию. Результаты представлены в табл. 1 и 2.

В виду того, что значения, полученные в процессе имитационного моделирования, отличаются от представленных в расписании движения поездов, находим отклонения по модулю. Они представлены в табл. 2.

Определим среднее отклонение имитационных значений от фактических по формуле:

$$G_v = \sqrt{\frac{X^2}{n(n-1)}}, \quad (5)$$

где  $X$  — сумма всех отклонений по двум направлениям;

$n$  — количество поездов всех категорий в двух направлениях.

Подставив значения в формулу, получим следующий результат:

$$G_v = \sqrt{\frac{381,6^2}{51 \cdot (51-1)}} = 7,56 \text{ мин.}$$

Находим погрешность, которая была выявлена в результате имитационного моделирования относительно реального расписания:

ТАБЛИЦА 1. Результаты сопоставления времен следования поездов согласно имитационной модели и реальных времен хода из Москвы в Санкт-Петербург

№ поезда	Фактическое время	Имитационное время	Отклонение
Москва (Ленинградская) — Санкт-Петербург (Главный)			
752а	210,00	210,67	0,67
756а	235,00	215,65	19,35
758а	244,00	260,00	16,00
760*р	245,00	239,13	5,87
770а	244,00	241,30	2,70
738а	244,00	248,70	4,70
714й	308,00	325,26	17,26
726ч	419,00	431,03	12,03
772а	225,00	221,74	3,26
776а	225,00	240,00	15,00
778а	255,00	234,78	20,22
786а	228,00	226,09	1,91
030у	598,00	580,91	17,09
020у	519,00	520,83	1,83
016а	512,00	502,40	9,60
082в	512,00	503,20	8,80
090ж	569,00	590,00	21,00
172с	579,00	600,95	21,95
160в	437,00	434,67	2,33
136с	571,00	572,73	1,73
120в	520,00	525,83	5,83
132г	559,00	564,35	5,35
028а	490,00	486,92	3,08
006а	477,00	470,37	6,63
054ч	536,00	531,67	4,33
050ч	641,00	660,00	19,00
002а	480,00	488,46	8,46

ТАБЛИЦА 2. Результаты сопоставления времен следования поездов согласно имитационной модели и реальных времен хода из Санкт-Петербурга в Москву

№ поезда	Фактическое время	Имитационное время	Отклонение
Санкт-Петербург (Главный) — Москва (Ленинградская)			
711а	330,00	325,64	4,36
751а	210,00	210,85	0,85
755а	243,00	240,40	2,60
757а	242,00	238,18	3,82
759а	238,00	233,82	4,18
761а	235,00	233,45	1,55
767а	240,00	235,27	4,73
769а	240,00	238,18	1,82
737в	347,00	349,19	2,19
771а	235,00	230,91	4,09
773а	235,00	230,54	4,46
725ч	402,00	412,90	10,90
777а	235,00	234,18	0,82
119а	580,00	580,00	0,00
159а	492,00	501,60	9,60
171а	667,00	673,68	6,68
145а	624,00	614,29	9,71
049а	536,00	539,17	3,17
081а	511,00	497,69	13,31
029у	544,00	536,80	7,20
027а	494,00	502,40	8,40
015а	516,00	510,40	5,60
053ч	505,00	504,80	0,20
001а	480,00	495,38	15,38

Данной погрешности присваиваем термин «Коэффициент имитационного моделирования». Подставляем его в формулу (2), и она приобретает следующий вид:

$$K_{\text{им}} = \frac{G_v \cdot n}{\sum t_{\text{сл}}}, \quad (6)$$

где  $t_{\text{сл}}$  — время следования одного поезда по расписанию.

$$K_{\text{им}} = 1 - \left( \frac{7,56 \cdot 51}{20 \cdot 463} \right) = 0,981.$$

$$I_p = \frac{0,5 \cdot L_{r2} + L_{\text{бл1}} + L_{\text{бл2}} + 0,5 \cdot L_{r1}}{V_{\text{сп}} \cdot 16,7 \cdot K_{\text{им}}} + t_{\text{в}}. \quad (7)$$

Среднюю скорость движения поездов найдем путем деления суммарного расстояния, пройденного всеми рассматриваемыми поездами за сутки, на суммарное время, затраченное ими на преодоление этого расстояния:

$$V_{\text{cp}} = \frac{\sum S_{\text{cl}}}{\sum t_{\text{cl}}};$$

$$V_{\text{cp}} = \frac{645,5 \cdot 51 \cdot 60}{20\,463} = 96,53 \text{ км/ч};$$

$$I_p = \frac{0,5 \cdot 250 + 3900 + 3900 + 0,5 \cdot 250}{96,53 \cdot 16,7 \cdot 0,98} + 0,05 = 5,15 \text{ мин};$$

$$N_{\text{нал}} = \frac{(1440 - 240)}{5,15} \cdot 0,96 = 223,69.$$

Блок-схема алгоритма программы приведена в следующем виде (рис. 5).

Часть кода в программном пакете Maple представлен на рис. 6:

В качестве локальных исходных данных используем сумму всех отклонений во времени следования поездов от времени их расписания, а также количество всех рассматриваемых поездов в обоих направлениях. Вычисляем  $G$  — среднеквадратическое отклонение времени следования, после чего производим вычисление коэффициента имитационного моделирования и последовательный расчет соответственно средней скорости следования всех рассматриваемых поездов  $v$ , межпоездного интервала  $I_a$  и наличной пропускной способности  $N$ . Это может быть использовано в развитии методологии, изложенной, например, в работах [21, 22].

### Заключение

В процесс выполнения данной работы был разработан автоматизированный алгоритм расчета наличной пропускной способности с использованием имитационной модели движения поездов по существующей железнодорожной линии Москва — Санкт-Петербург с реализацией расчетов в программном пакете Maple. В ходе работы был произведен анализ использую-



Рис. 5. Блок-схема алгоритма

```

X := 381.6 :
n := 51 :
G := Float( round( Float( evalf( sqrt( X^2 / (n-1) ), 2 ), -2 ), -2 );
Kim := Float( round( Float( evalf( 1 - G*51 / 20463 ), 3 ), -3 );
v := Float( round( Float( evalf( (645.5*51) / 20463 / 60 ), 2 ), -2 );
Ia := Float( round( Float( evalf( (0.5*250 + 3900 + 3900 + 0.5*250) / v 16.7 0.98 + 0.05 ), 2 ), -2 );
N := Float( round( Float( evalf( (1440 - 240) / Ia * 0.96 ), 2 ), -2 );

```

G := 7.56  
Kim := 0.981  
v := 96.53  
Ia := 5.15  
N := 223 69

Рис. 6. Программный код алгоритма

щихся в настоящее время аналитических формул для расчета наличной пропускной способности, произведено построение имитационной модели, которая производит симуляцию движения поездов по железнодорожной линии со смешанным движением.

Полученные в ходе моделирования данные были сопоставлены с данными в расписании, выявлены их расхождения, на основе которых было найдено значение коэффициента имитационного моделирования, интегрированного в существующие формулы.

На основе сопоставлений данных, полученных по аналитическим формулам и посредством имитационного моделирования, разработан программный алгоритм с последующей его реализацией в программной среде Maple с целью автоматизации вычислений и повышения их эффективности. Данный алгоритм в случае его внедрения на сети ОАО «РЖД» позволит повысить эффективность расчетов наличной пропускной способности и приблизить рассчитываемые значения к реальным.

## Библиографический список

1. Инструкция по расчету наличной пропускной способности. — Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 16 ноября 2010 г. № 128. — М.: ОАО «РЖД», 2011. — 305 с.
2. Бородин А. Ф. Использование пропускной способности станций при интервальном регулировании движения поездов / А. Ф. Бородин, Г. Г. Горбунов, А. Ю. Соколов и др. // Железнодорожный транспорт. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Вып. 2. — С. 29–36.
3. Абдуллаев Ж. Я. Особенности определения пропускной способности двухпутных участков / Ж. Я. Абдуллаев // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2019. — Вып. 3. — С. 361–369.
4. Estelle Altazin, Stéphane Dauzère-Pérès, François Ramond, Sabine Tréfond. A multi-objective optimization-simulation approach for real time rescheduling in dense railway systems. — Leeds, UK: European Journal of Operational Research. — Vol. 286. — Iss. 2, 2020. — Pp. 662–672.
5. Ivica Ljubaj, Matea Mikulčić, Tomislav Josip Mlinarić. Possibility of Increasing the Railway Capacity of the R106 Regional Line by Using a Simulation Tool. — Rome, Italy: Transportation Research Procedia. — 2020. — Vol. 44. — Pp. 137–144.

6. Угрюмов А. К. Вопросы организации движения на двухпутных участках / А. К. Угрюмов // Вопросы эксплуатации железных дорог СССР: Труды ЛИЖТ. — Л.: Трансжелдориздат, 1960. — Вып. 170.
7. Зуев Г. А. Интервального регулирования движения поездов на станции / Г. А. Зуев, А. Г. Савицкий // Железнодорожный транспорт. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Вып. 5. — С. 26–32.
8. Покровская О. Д. Состояние транспортно-логистической инфраструктуры для угольных перевозок в России / О. Д. Покровская // Инновационный транспорт. — 2015. — № 1(15). — С. 13–23.
9. Pokrovskaya O. Evolutionary-Functional Approach to Transport Hubs Classification / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — 2020. — Vol. 982. — Pp. 356–365.
10. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // Мир транспорта. — 2018. — Т. 16. — № 1(74). — С. 152–163.
11. Куренков П. В. Механизмы государственного регулирования развития транспортной системы региона / П. В. Куренков, Ю. В. Веселова // Транспорт: наука, техника, управление: сборник «Отечественная история». — 2006. — № 7. — С. 8–12.
12. Куренков П. В. План мероприятий (дорожная карта) по реализации программы организации контейнерных перевозок на пространстве 1520 / П. В. Куренков, А. В. Астафьев // Транспорт: наука, техника, управление: сборник «Российская история». — 2015. — № 11. — С. 84–92.
13. Chislov O. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation / O. Chislov, V. Bogachev, A. Kravets et al. // *Transport problems*. — Katowice: Silesian University of Technology, 2021. — Iss. 2. — Pp. 153–165.
14. Bakyt G. Simulation of dynamic processes of interaction of car and railway track during train passage of curved sections of the track / G. Bakyt, S. Abdullayev, N. Suleyeva et al. // *Transport problems*. — Katowice: Silesian University of Technology, 2020. — Iss. 2. — Pp. 59–70.
15. Oziomek Ja. Improvement of regularity of urban public transport lines by means of intervals synchronization / Ja. Oziomek, A. Rogowski // *Transport problems*. — Katowice: Silesian University of Technology, 2018. — Iss. 4. — Pp. 91–102.
16. Мохонько В. П. Проблемы создания ситуационно-аналитической системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // Бюллетень транспортной информации. — 2004. — № 9. — С. 22–27.
17. Мохонько В. П. Ситуационное управление перевозочным процессом / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // Транспорт: наука, техника, управление: сб. ОИ / ВИНТИ. — 2004. — № 11. — С. 14.
18. Вакуленко С. П. Финансово-экономическое решение проблемы пригородных перевозок / С. П. Вакуленко, П. В. Куренков // Экономика железных дорог. — 2012. — № 12. — С. 96–99.
19. Тарифное руководство № 4. Книги 1, 2 и 3. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2002.
20. Официальный сайт ОАО «РЖД». — URL: <https://pass.rzd.ru/> (дата обращения: 28.11.2021).
21. Персианов В. А. Проект «Городские железные дороги России» / В. А. Персианов, П. В. Метелкин, Л. С. Федоров и др. // Вестник транспорта. — 2014. — № 5. — С. 2–10.
22. Баритко А. Л. Организация и технология внешне-торговых перевозок / А. Л. Баритко, П. В. Куренков // Железнодорожный транспорт. — 1998. — № 8.

Дата поступления: 20.07.2022

Решение о публикации: 04.09.2022

#### Контактная информация:

МАРЧЕНКО Максим Александрович — аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой»; [maks.marchenko1998@mail.ru](mailto:maks.marchenko1998@mail.ru)

ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна — д-р техн. наук, проф., и.о. зав. кафедрой «Управление эксплуатационной работой»; [insight1986@inbox.ru](mailto:insight1986@inbox.ru)

ЩЕРБАКОВ Владимир Васильевич — д-р экон. наук, проф., зав. кафедрой «Логистика и управление цепями поставок»; [shefainn@yandex.ru](mailto:shefainn@yandex.ru)

## Development of Automated Algorithm for Railway Line Capacity Calculation

M. A. Marchenko<sup>1</sup>, O. D. Pokrovskaya<sup>1</sup>, V. V. Shcherbakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., 9, St. Petersburg, 190031, Russian Federation

<sup>2</sup>St. Petersburg State University of Economics, 30-32 letter A, nab. Griboyedov Canal, St. Petersburg, 191023, Russian Federation.

**For citation:** Marchenko M. A., Pokrovskaya O. D., Shcherbakov V. V. Development of Automated Algorithm for Railway Line Capacity Calculation // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 876–888. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-876-888

### Summary

**Purpose:** To develop an automated algorithm using simulation modeling tools that allows calculating actual capacity of railway line with mixed traffic. Analytical formulas underlie the algorithm. **Results:** The algorithm features the use of simulation modeling tools and taking into account of the same name coefficient. The application of the given software product will allow to raise the efficiency and accuracy of actual capacity calculation accuracy. The data, obtained during the simulation, were compared to the data in the timetable, their discrepancy was revealed which basis on, simulation modeling value, integrated into existing formulas, was found. Based on all calculations, software algorithm has been developed with its subsequent implementation in Maple software environment in order to automate calculations and increase their efficiency. **Methods:** Simulation modeling and analytical comparison method were used. **Practical significance:** Improving the accuracy of calculations of the values of available capacity on the network of JSC “Russian Railways” and simplifying the implementation of such calculations. This algorithm, if implemented, would bring the calculated values closer to the real ones.

**Keywords:** Railway polygon, analytical formulas, simulation model, software package, comparison of results, program code.

### References

1. *Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti*. — *Utv. Rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 16.11.2010 g. № 128* [Instructions for calculating the available throughput. — Approved. Order of Russian Railways OJSC dated November 16, 2010 No. 128]. Moscow: “RZhD” Publ., 2011. 305 p. (In Russian)

2. Borodin A. F., Gorbunov G. G., Sokolov A. Yu., Smirnov A. E., Gurgunidze I. R., Kalinin S. V., Kozlovskiy A. P. Ispol’zovanie propusknoy sposobnosti stantsiy pri interval’nom regulirovanii dvizheniya poezdov [The use of the capacity of stations in the interval regulation of train traffic]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, I. 2, pp. 29–36. (In Russian)

3. Abdullaev Zh. Ya. Osobennostey opredeleniya propusknoy sposobnosti dvukhputnykh uchastkov [Features of determining the capacity of double-track sections]. *Izv. Peterb. un-ta putey soobshcheniya* [Izv. Petersburg.

University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2019, I. 3, pp. 361–369. (In Russian)

4. Estelle Altazin, Stéphane Dauzère-Pérès, François Ramond, Sabine Tréfond. A multi-objective optimization-simulation approach for real time rescheduling in dense railway systems. Leeds, UK: European Journal of Operational Research. 2020, vol. 286, I. 2, pp. 662–672.

5. Ivica Ljubaj, Matea Mikulčić, Tomislav Josip Mlinarić. Possibility of Increasing the Railway Capacity of the R106 Regional Line by Using a Simulation Tool. Rome, Italy: Transportation Research Procedia, 2020, vol. 44, pp. 137–144.

6. Ugryumov A. K. Voprosy organizatsii dvizheniya na dvukhputnykh uchastkakh [Issues of organization of traffic on double-track sections]. *Voprosy ekspluatatsii zheleznikh dorog SSSR : Trudy LIZhT* [Questions of exploitation of railways of the USSR: Proceedings of LIZhT]. Leningrad: Transzheldorizdat Publ., 1960, I. 170. (In Russian)

7. Zuev G. A., Savitskiy A. G. Interval’nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na stantsii [Interval regulation of train

traffic at the station]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, I. 5, pp. 26–32. (In Russian)

8. Pokrovskaya O. D. Sostoyanie transportno-logisticheskoy infrastruktury dlya ugol'nykh perevozok v Rossii [State of transport and logistics infrastructure for coal transportation in Russia]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2015, I. 1 (15), pp. 13–23. (In Russian)

9. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Evolutionary-functional approach to transport hubs classification. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, vol. 982, pp. 356–365.

10. Pokrovskaya O. D. O terminologii ob"ektov terminal'no-skladskoy infrastruktury [About terminology of objects of terminal and warehouse infrastructure]. *Mir transporta* [World of transport]. 2018, vol. 16, I. 1 (74), pp. 152–163. (In Russian)

11. Kurenkov P. V., Veselova Yu. V. Mekhanizmy gosudarstvennogo regulirovaniya razvitiya transportnoy sistemy regiona [Mechanisms of state regulation of the development of the transport system of the region]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: SB. Otechestvennaya istoriya* [Transport: science, technology, management: SB. National history]. 2006, I. 7, pp. 8–12. (In Russian)

12. Kurenkov P. V., Astaf'ev A. V. Plan meropriyatiy (dorozhnaya karta) po realizatsii programmy organizatsii kontreylernykh perevozok na prostranstve 1520 [Action plan (road map) for the implementation of the program for the organization of piggyback transportation in the area 1520]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: SB. Rossiyskaya istoriya* [Transport: science, technology, management: SB. National history]. 2015, I. 11, pp. 84–92. (In Russian)

13. Chislov O., Bogachev V., Kravets A., Bogachev T., Zadorozhnyy V., Bakalov M. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation. *Transport problems*. Katowice: Silesian University of Technology, 2021, I. 2, pp. 153–165.

14. Bakyt G., Abdullayev S., Suleyeva N., Yelshibekov A., Seidemetova Zh., Sadvakassova Zh. Simulation of dynamic processes of interaction of car and railway track during train passage of curved sections of the track. *Transport problems*. Katowice: Silesian University of Technology, 2020, I. 2, pp. 59–70.

15. Oziomek Ja., Rogowski A. Improvement of regularity of urban public transport lines by means of intervals synchronization. *Transport problems*. Katowice: Silesian University of Technology, 2018, I. 4, pp. 91–102.

16. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. Problemy sozdaniya situatsionno-analiticheskoy sistemy upravleniya perevoznym protsessom na zheleznodorozhnom transporte [Problems of creating a situational-analytical system for managing the transportation process in railway transport]. *Byulleten' transportnoy informatsii* [Bulletin of transport information]. 2004, I. 9, pp. 22–27. (In Russian)

17. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. Situatsionnoe upravlenie perevoznym protsessom [Situational management of the transportation process]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: sb. OI. VINITI* [Transport: science, technology, management: Sat. OI. VINITI]. 2004, I. 11, p. 14. (In Russian)

18. Vakulenko S. P., Kurenkov P. V. Finansovo-ekonomicheskoe reshenie problemy prigorodnykh perevozok [Financial and economic solution to the problem of suburban transportation]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Railway economics]. 2012, I. 12, pp. 96–99. (In Russian)

19. *Tarifnoe rukovodstvo № 4. Knigi 1, 2 i 3* [Tariff guide No. 4. Books 1, 2 and 3]. Moscow: IKTs "Akademkniga" Publ., 2002. (In Russian)

20. *Ofitsial'nyy sayt OAO "RZhd"* [Official website of Russian Railways]. Available at: <https://pass.rzd.ru/> (accessed: November 28, 2021).

21. Persianov V. A., Metelkin P. V., Fedorov L. S., Kurenkov P. V., Bednyakova E. B., Sysoeva E. A., Proshkina E. S., Kravchenko M. V., Zavarzaeva N. V., Ignatova Ya. S., Dranchenko Yu. M. PROEKT "Gorodskie zheleznye dorogi Rossii" [Project "urban railways of Russia"]. *Vestnik transporta* [Bulletin of transport]. 2014, I. 5, pp. 2–10. (In Russian)

22. Baritko A. L., Kurenkov P. V. Organizatsiya i tekhnologiya vneshnetorgovykh perevozok [Organization and technology of foreign trade transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 1998, I. 8. (In Russian)

Received: July 20, 2022

Accepted: September 04, 2022

#### Author's information:

Maxim A. MARCHENKO — Postgraduate Student, "Operational Work Management" Department; maks.marchenko1998@mail.ru

Oksana D. POKROVSKAYA — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Acting Head of "Operational Work Management" Department; insight1986@inbox.ru

Vladimir V. SHCHERBAKOV — Dr. Sci. in Economics, Professor, Head of "Logistics and Supply Chain Management" Department; shefainn@yandex.ru