

УДК 656.01:338.47

Совершенствование аналитического метода расчета наличной пропускной способности с применением имитационного моделирования

М. А. Марченко

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Марченко М. А.* Совершенствование аналитического метода расчета наличной пропускной способности с применением имитационного моделирования // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 194–206. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-194-206

Аннотация

Цель: Разработать способ расчета наличной пропускной способности на железнодорожной линии на основе совершенствования аналитических формул и применения инструментов имитационного моделирования. **Корректировка** математического аппарата и расчет коэффициента имитационного моделирования. **Методы:** Применялись аналитический метод, имитационного и динамического моделирования, математическое моделирование, инструментарий программного комплекса AnyLogic. **Результаты исследования:** Новый способ расчета, позволяющий повысить точность определения пропускной способности железнодорожной линии. В свою очередь, новый способ позволит оптимизировать эксплуатационные расходы на техническое обслуживание и текущий ремонт железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут применяться при аналитике, прогнозировании и моделировании перевозочных процессов в диспетчерских центрах управления перевозками ОАО «РЖД».

Ключевые слова: Железнодорожная линия, наличная пропускная способность, расчетные формулы, имитационная модель, коэффициент имитационного моделирования.

Актуальность данной работы заключается в оптимизации используемых в настоящее время способов расчета наличной пропускной способности на основе аналитических расчетов путем построения имитационной модели в программном комплексе AnyLogic. В работе представлена абстрактная имитационная модель, эмпирическим образом корректирующая существующие формулы расчета наличной пропускной способности.

1. Анализ теоретического состояния вопроса

Подобная проблематика широко рассматривается в зарубежных изданиях. В работе под назва-

нием «Визуальное интерактивное моделирование и имитационное моделирование как поддержка принятия решений в логистических операциях железнодорожного транспорта» специалист в области железнодорожного высокоскоростного движения В. Черич [1] предложил новый способ расчета наличной пропускной способности, апробированный на существующем железнодорожном полигоне в Хорватии. Автор произвел построение имитационной модели, которая демонстрирует работу железнодорожной инфраструктуры по пропуску поездов, с помощью методики, основанной на использовании инструментов имитационного моделирования.

П. П. Бобрик в статье под названием «Интеллектуализация управления движением при транзите на транспорте» [2] произвел комплексный анализ поточности движения различных видов транспорта, в том числе и железнодорожного, по специализированным ниткам графика и скорости разрастания заторов в случае ее снижения. В работе автором предложен новый термин под названием «плотность потока». Автором выявлена и в полной мере описана аналитическая зависимость интенсивности увеличения транспортных заторов, приводящая к снижению эффективности перевозочного процесса и работы железнодорожного транспорта. Работа полезна для настоящего исследования подробным аналитическим описанием поставленных задач и наличием формул разрастания транспортных заторов.

В статье под названием «Особенности определения пропускной способности двухпутных участков» Ж. Я. Абдуллаевым рассмотрена проблема повышения эффективности расчета пропускной способности на железнодорожных линиях и ее дальнейшего повышения. Автором классифицированы все применяемые в настоящий момент методы определения пропускной способности железнодорожных линий, также произведен анализ и усовершенствование аналитических формул расчета наличной пропускной способности с учетом ограничений в виде отсутствия пересечения на графике грузового и высокоскоростного поезда во встречном движении. Научная новизна заключается в предложении автором нового способа прокладки ниток графика с целью увеличения пропускной способности без реконструкционных мероприятий. Недостатком работы является отсутствие исследований с применением инструментов имитационного моделирования, что не позволяет наглядно продемонстрировать движение поездов [3].

Работы по расчету пропускной способности железнодорожных магистралей представлены

в работах [4–8], а также в иностранных литературных источниках [9–15] и в нормативном документе [16].

Следует отметить, что в литературных источниках [17–21] отражена проблематика алгоритмизации и нормирования работы транспортных систем, однако отсутствуют иллюстрации практического применения предложений. В работах [22–24] разработан инструментарий комплексной оценки транспортно-логистических систем, однако в подтверждение верифицируемости предложений не приводится оценка моделирования в реальных условиях. Учитывая перенастройку и переориентацию транспортных потоков [25–28], а также сложности ситуационного управления перевозочным процессом [29–33] в волатильной экономике [34], можно констатировать необходимость гибкого, адаптивного управления процессами перевозок для повышения точности определения пропускной способности железнодорожных линий. Это позволит оптимизировать эксплуатационные расходы на техническое обслуживание и текущий ремонт железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава.

2. Имитационное моделирование движения поездов по железнодорожной линии

Для вычисления данных наличной пропускной способности железнодорожных линий применяют общеизвестную формулу (1) [16]:

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

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

I_p — расчетный межпоездной интервал;

α_n — коэффициент надежности работы инфраструктуры и подвижного состава, принимаем равным 0,96 [16].

Межпоездной интервал, являющийся одним из переменных множителей формулы (1), вычисляются по формуле (2):

$$I_p = \frac{0,5 \cdot L_{п2} + L_{бл1} + L_{бл2} + 0,5 \cdot L_{п1}}{V_{cp} \cdot 16,7} + t_b, \quad (2)$$

где $L_{п1}$, $L_{п2}$ — длина соответственно впереди и позади идущего поезда;

L_b — расстояние которое проходит второй поезд за время, необходимое для восприятия машинистом сигнала ближнего светофора;

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

V_{cp} — средняя скорость следования поездов по блок-участкам;

t_b — время на восприятие изменения показания светофора, принимаем равным 0,05 мин [16].

Вышеприведенную аналитическую формулу предлагается усовершенствовать путем введения предложенного в работе коэффициента имитационного моделирования, который был предложен в данной работе. Его расчет выполняется посредством имитационного моделирования движения поездов по железнодорожной линии с различными скоростями.

Коэффициент имитационного моделирования — это поправочный коэффициент, определяемый экспериментальным путем с помощью имитационного моделирования и вводимый в аналитические формулы расчета.

Межпоездной интервал рассчитываем относительно поезда, время хода которого по участку минимально, в данном случае относительно скоростного.

Построим имитационную модель, симулирующую движение поездов по абстрактной железнодорожной линии, длина которой составляет 1 км. Имитационная модель симулирует движе-

ние двух поездов: скоростного и пассажирского со скоростями соответственно 5 и 2 м/с. Сбор аналитических данных в виде времени их следования от начальной до конечной точки маршрута следования поездов будет осуществляться в гистограмме. Параметры подобраны с точки зрения оптимальной демонстрации влияния разгона и замедления на значение наличной пропускной способности железнодорожной линии. Являются условными величинами, прямо пропорциональными реальным значениям скоростей поездов и представленными в таком виде для удобства демонстрации имитационной модели и способа получения результатов.

Демонстрационная железнодорожная линия состоит из двух железнодорожных путей, по одному из которых осуществляет движение скоростной поезд, а по второму следует пассажирский. Точки зарождения и погашения поездопотоков находятся соответственно в начальной и конечной части железнодорожного пути и не совпадают с крайними точками железнодорожного пути в целях предотвращения программной ошибки в связи с выходом габаритов подвижного состава за габариты пути. На рис. 1 приведена вышеописанная железнодорожная линия.

Поездопотоки появляются в начальной точке движения при помощи блока `trainSource`, после чего поезд следует согласно задаваемым параметрам в блоке `trainMoveTo` до указанной в этом же блоке точки на железнодорожном пути. В конце блочной части модели находится блок `trainDispose`. В имитационной модели также находится блок библиотеки моделирования процессов под названием `timeMeasureStart`, фиксирующий время начала движения поезда из начальной точки, а также блок `timeMeasureEnd`, определяющий момент времени прохода поезда через конечную точку. Информация о времени следования обоих поездов отображается в виде гистограммы. По оси x отображается пройденное

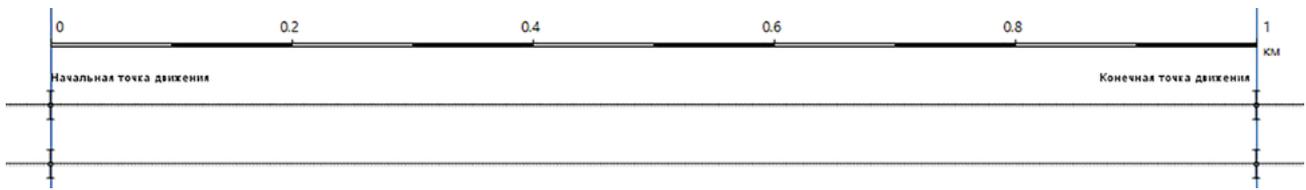


Рис. 1. Имитационная модель железнодорожной линии



Рис. 2. Блочная часть имитационной модели абстрактной экспериментальной железнодорожной линии имитирования движения с ускорением и замедлением



Рис. 3. Железнодорожная линия имитирования движения с постоянной скоростью



Рис. 4. Блочная часть имитационной модели абстрактной экспериментальной железнодорожной линии имитирования движения с постоянной скоростью

время, а по оси y — проценты от количества поездов конкретной категории. Рис. 2 и 3 наглядно демонстрируют структуру блочной схемы имитационной модели.

Далее производим построение имитационной модели, симулирующей движения с постоянной средней скоростью. Длина железнодорожной линии в данном случае составит 2 км, но фиксация времени следования поездов через точку условного начала движения производится с середины линии, что в совокупности также составляет расстояние в 1 км. На рис. 4 показана данная железнодорожная линия.

Блочная структура модели отличается наличием в ней дополнительного блока `trainMoveTo`, который достигается поездом расчетной средней скорости к началу рассчитываемого пути следования, поскольку в блоке зарождения поездопотоков отсутствует возможность ввода нулевой начальной скорости. На рис. 4 продемонстрирована блочная часть данной модели.

После построения блочных частей обеих имитационных моделей необходимо произвести их заполнение. В блоки `trainSource` необходимо ввести данные о времени и скорости хода скоростного поезда: скорость вводим 5 м/с, а параметры

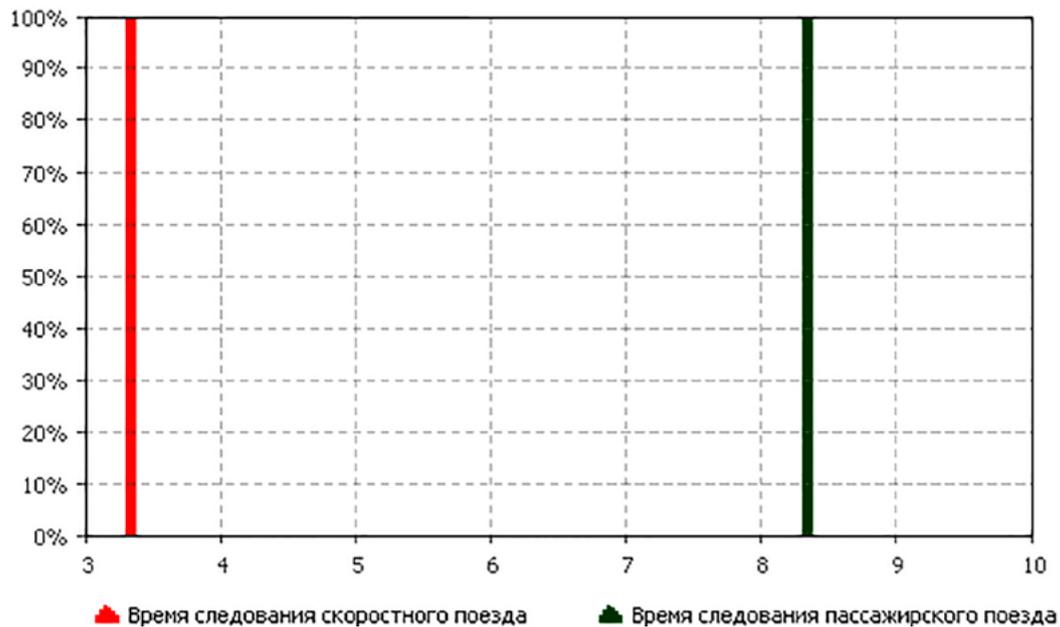


Рис. 5. Результаты имитационного моделирования поездов с постоянной скоростью

увеличения и снижения скорости движения вводим 3 и 2 м/с². Далее заполняем блок trainSource1, куда производим ввод аналогичных параметров, отличающихся лишь по значениям. Так, скорость следования пассажирского поезда устанавливаем в 2 м/с, увеличение скорости движения в 1 м/с² и снижение скорости в 0,5 м/с².

При заполнении блоков trainMoveTo, отвечающих за движение поездов на расчетном участке, в имитационной модели, симулирующих движение поездов с постоянной скоростью, в блоках выбираем пункты соответственно «Разгонять и тормозить до крейсерской скорости», «Продолжать движение с постоянной скоростью», а в имитационной модели, симулирующей движение поездов с разгоном и замедлением, выбираем «Разгонять и тормозить до крейсерской скорости». Значение скорости указываем аналогично предыдущему.

В ходе выполнения исследования проведем два эксперимента, в одном из которых моделируемые поезда следуют с постоянной скоростью на протяжении всего маршрута следования, а во втором поезда с нулевой начальной скорости разгоняются

согласно заданным параметрам до максимальной скорости, а в конечной точке замедляются до полной остановки. Результаты приведены на гистограммах на рис. 5. В представленной работе эксперименты моделируются лишь по одному поезду.

Определяем максимальную скорость движения для поездов с увеличением и уменьшением скорости движения. Общий пройденный путь составляет 1 км согласно исходным данным. Время находим, основываясь на данных гистограммы на рис. 5: время следования по рассматриваемому участку скоростного поезда составляет 3,4 минуты, время хода пассажирского поезда — 8,4 минуты. В табл. 1 приведены вычисления наибольшей скорости.

Вычисления в табл. 1 с целью повышения точности конечного результата и исключения случайных ошибок дублированы в математическом пакете Maple.

Полученные значения вводим в блоки имитационной модели trainSource.

Далее вводим полученные данные по скорости в блоки trainMoveTo.

ТАБЛИЦА 1. Расчет ходовой скорости

Расчетная формула	Скоростной поезд	Пассажирский поезд
$v_{cp} = \frac{S_{общ}}{t_{общ}}, \text{ м/с}$	$v_{cp} = \frac{1000}{204} = 4,9 \text{ м/с}$	$v_{cp} = \frac{1000}{504} = 1,98 \text{ м/с}$
$t_{уск. cp} = \frac{v_{cp}}{a}, \text{ с}$	$t_{уск. cp} = \frac{4,9}{3} = 1,63 \text{ с}$	$t_{уск. cp} = \frac{1,98}{1} = 1,98 \text{ с}$
$t_{зам. cp} = \frac{v_{cp}}{b}, \text{ с}$	$t_{зам. cp} = \frac{4,9}{2} = 2,45 \text{ с}$	$t_{зам. cp} = \frac{1,98}{0,5} = 3,97 \text{ с}$
$t_{cp} = t_{общ} - t_{уск. cp} - t_{зам. cp}, \text{ с}$	$t_{cp} = 204 - 1,63 - 2,45 = 199,91 \text{ с}$	$t_{cp} = 504 - 1,98 - 3,97 = 498,05 \text{ с}$
$S_{уск. cp} = \frac{a \cdot t_{уск. cp}^2}{2}, \text{ м}$	$S_{уск. cp} = \frac{3 \cdot 1,63^2}{2} = 4 \text{ м}$	$S_{уск. cp} = \frac{1 \cdot 1,98^2}{2} = 1,97 \text{ м}$
$S_{зам. cp} = \frac{b \cdot t_{зам. cp}^2}{2}, \text{ м}$	$S_{зам. cp} = \frac{2 \cdot 2,45^2}{2} = 6 \text{ м}$	$S_{зам. cp} = \frac{0,5 \cdot 3,97^2}{2} = 3,94 \text{ м}$
$S_{cp} = v_{cp} \cdot t_{cp}, \text{ м}$	$S_{cp} = 4,9 \cdot 199,91 = 979,98 \text{ м}$	$S_{cp} = 1,98 \cdot 498,05 = 988,19 \text{ м}$
$S_{расч} = S_{уск. cp} + S_{cp} + S_{зам. cp}$	$S_{расч} = 4 + 979,98 + 6 = 989,99 \text{ м}$	$S_{расч} = 1,97 + 988,19 + 3,94 = 994,09 \text{ м}$
$K_{погр} = \left(1 - \frac{S_{расч}}{S_{общ}}\right)$	$K_{погр} = \left(1 - \frac{989,99}{1000}\right) = 0,1$	$K_{погр} = \left(1 - \frac{994,09}{1000}\right) = 0,006$
$K_{разг} = \frac{K_{погр} \cdot b}{(a+b)}$	$K_{разг} = \frac{0,1 \cdot 2}{(3+2)} = 0,002$	$K_{разг} = \frac{0,006 \cdot 0,5}{(1+0,5)} = 0,001$
$K_{зам} = \frac{K_{погр} \cdot a}{(a+b)}$	$K_{зам} = \frac{0,1 \cdot 3}{(3+2)} = 0,003$	$K_{зам} = \frac{0,006 \cdot 1}{(1+0,5)} = 0,002$
$K_{расст. разг} = \frac{S_{расч}}{S_{общ}} + K_{разг}$	$K_{расст. разг} = \frac{989,99}{1000} + 0,002 = 0,006$	$K_{расст. разг} = \frac{994,09}{1000} + 0,001 = 0,003$
$K_{расст. пост} = \frac{S_{расч}}{S_{общ}} - \frac{K_{погр}}{2}$	$K_{расст. пост} = \frac{989,99}{1000} - \frac{0,1}{2} = 0,985$	$K_{расст. пост} = \frac{989,99}{1000} - \frac{0,006}{2} = 0,991$
$K_{расст. зам} = \frac{S_{расч}}{S_{общ}} + K_{зам}$	$K_{расст. зам} = \frac{989,99}{1000} + 0,003 = 0,009$	$K_{расст. зам} = \frac{994,09}{1000} + 0,002 = 0,006$
$S_{разг} = S_{общ} \cdot K_{расст. разг}, \text{ м}$	$S_{разг} = 1000 \cdot 0,006 = 6,05 \text{ м}$	$S_{разг} = 1000 \cdot 0,003 = 2,96 \text{ м}$
$S_{cp} = S_{общ} \cdot K_{расст. пост}, \text{ м}$	$S_{cp} = 1000 \cdot 0,985 = 984,88 \text{ м}$	$S_{cp} = 1000 \cdot 0,991 = 991,11 \text{ м}$
$S_{зам} = S_{общ} \cdot K_{расст. зам}$	$S_{зам} = 1000 \cdot 0,009 = 9,07 \text{ м}$	$S_{зам} = 1000 \cdot 0,006 = 5,93 \text{ м}$
$V_{max} = a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_{разг}}{a}}, \text{ м/с}$	$V_{max} = 3 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 6,05}{3}} = 6,02 \text{ м/с}$	$V_{max} = 1 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2,96}{1}} = 2,43 \text{ м/с}$

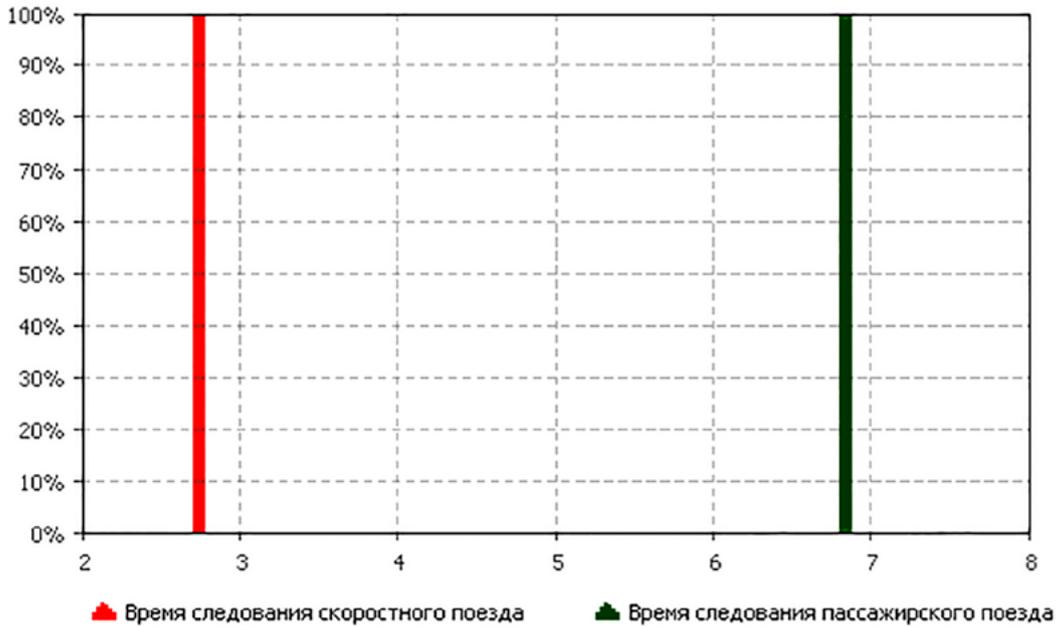


Рис. 6. Результаты имитационного моделирования поездов с разгоном и торможением

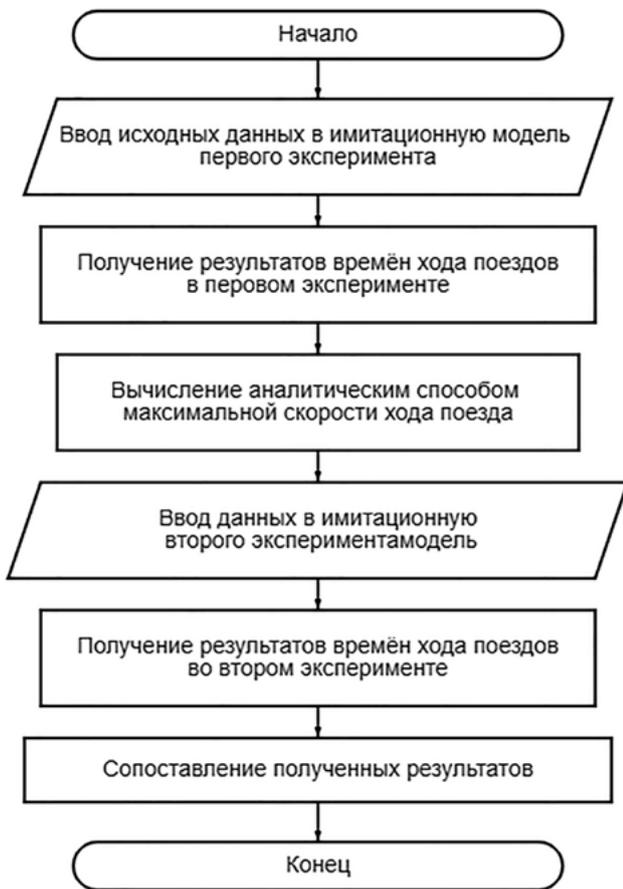


Рис. 7. Блок-схема алгоритма расчета коэффициента имитационного моделирования

ТАБЛИЦА 2. Результаты следования поездов с постоянной скоростью и с ускорением и замедлением

	С постоянной скоростью	С ускорением и замедлением
Скоростной	3,33	2,73
Пассажирский	8,35	6,83

Результаты имитационного моделирования движения поездов с разгоном и торможением отражены на диаграмме, приведенной на рис. 6.

Алгоритм описанных выше действий представлен в виде блок-схемы на рис. 7.

Всю полученную информацию указываем в табл. 2.

Полученные данные демонстрируют, что время в пути каждого поезда изменилось по сравнению с первоначальным на 82 %. Это связано с изменением характера учтенных параметров следования поездов по железнодорожной линии.

Формула расчета межпоездного интервала с учетом коэффициента имитационного моделирования будет выглядеть следующим образом:

$$I_p = \left(\frac{0,5 \cdot L_{п2} + L_{бл1} + L_{бл2} + 0,5 \cdot L_{п1}}{V_{cp} \cdot 16,7 \cdot K_{им}} + t_b \right). \quad (3)$$

С учетом рассчитанного коэффициента формула примет следующий вид:

$$I_p = \left(\frac{0,5 \cdot L_{п2} + L_{бл1} + L_{бл2} + 0,5 \cdot L_{п1}}{V_{cp} \cdot 16,7 \cdot 0,82} + t_b \right). \quad (4)$$

Итоговая формула расчета пропускной способности будет иметь следующий вид:

$$N_{нал} = \frac{(1440 - t_{техн})}{I_p = \left(\frac{0,5 \cdot L_{п2} + L_{бл1} + L_{бл2} + 0,5 \cdot L_{п1}}{V_{cp} \cdot 16,7 \cdot 0,82} + t_b \right)} \cdot \alpha_n. \quad (5)$$

Полученная формула (5) в большей степени учитывает характер движения поездов на железнодорожной линии. С помощью представленной в работе имитационной модели возможно смоделировать движения поездов с различной скоростью, параметрами разгона и замедления, а также при необходимости добавить промежуточные остановки. При этом при отсутствии остановок соотношение результатов времени проследования поездом железнодорожной линии с учетом разгона и замедления по предложенной методике и по расчету лишь участковой скорости, фактически представляющей собой среднюю скорость хода поезда по участку, остается неизменным. Данная методика повышает точность производимых вычислений и позволяет организовать комплексный подход к оценке эксплуатационных расходов на содержание железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава.

Библиографический список

1. Čerić V. Visual interactive modeling and simulation as a decision support in railway transport logistic operations / V. Čerić // *Mathematics and Computers in Simulation*. — 1997. — Vol. 44. — Iss. 3. — Pp. 251–261.

2. Бобрик П. П. Интеллектуализация управления движением при транзите на транспорте / П. П. Бобрик // *Технологии построения когнитивных транспортных систем: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. — СПб., 2021.

3. Абдуллаев Ж. Я. Особенности определения пропускной способности двухпутных участков / Ж. Я. Абдуллаев // *Изв. Петерб. ун-та путей сообщения*. — СПб.: ПГУПС, 2019. — Вып. 3.

4. Покровская О. Д. Международная логистика Транссибирской магистрали: использование транзитного потенциала России / О. Д. Покровская, В. М. Самуйлов // *Инновационный транспорт*. — 2016. — № 3(21). — С. 3–7.

5. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // *Мир транспорта*. — 2018. — Т. 16. — № 1(74). — С. 152–163.

6. Покровская О. Д. Формирование терминальной сети региона для организации перевозок грузов: научная монография / О. Д. Покровская. М.: ТрансЛит, 2012. — 189 с.

7. Покровская О. Д. Логистическая классность железнодорожных станций / О. Д. Покровская // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. — 2018. — № 2(38). — С. 68–76.

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. Altazin E. A multi-objective optimization-simulation approach for real time rescheduling in dense railway systems / E. Altazin, S. Dauzère-Pérès, F. Ramond et al. // *European Journal of Operational Research*. — 2020. — Vol. 286. — Iss. 2. — Pp. 662–672.

10. Kianinejadshah A. Comparative Application of Analytical and Simulation Methods for the Combined Railway Nodes-Lines Capacity Assessment / A. Kianinejadshah, S. Ricci // *Transportation Research Procedia*. — 2021. — Vol. 55. — Pp. 103–109.

11. Ljubaj I. Possibility of Increasing the Railway Capacity of the R106 Regional Line by Using a Simulation

- Tool / I. Ljubaj, M. Mikulčić, T. J. Mlinarić // *Transportation Research Procedia*. — 2020. — Vol. 44. — Pp. 137–144.
12. Zhang X. Integrating capacity analysis with high-speed railway timetabling: A minimum cycle time calculation model with flexible overtaking constraints and intelligent enumeration / X. Zhang, L. Nie // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — 2016. — Vol. 68. — Pp. 509–531.
13. Cheng C. H. A simulation study of tenability for passengers in a railway tunnel with arson fire / C. H. Cheng, C. L. Chow, W. K. Chow // *Tunnelling and Underground Space Technology*. — 2021. — Vol. 108.
14. Bulíček J. Operational Reliability of a Periodic Railway Line / J. Bulíček, P. Drdla, J. Matuška // *Transportation Research Procedia*. — 2021. — Vol. 53. — Pp. 106–113.
15. Högdahl J. A combined simulation-optimization approach for minimizing travel time and delays in railway timetables / J. Högdahl, M. Bohlin, O. Fröidh // *Transportation Research. Part B: Methodological*. — 2019. — Vol. 126. — Pp. 192–212.
16. Инструкция по расчету наличной пропускной способности. — Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 16 ноября 2010 г. № 128. — М.: ОАО «РЖД», 2011. — 305 с.
17. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // *Мир транспорта*. — 2018. — Т. 16. — № 1(74). — С. 152–163.
18. Pokrovskaya O. Assessment of Transport and Storage Systems / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — 2020. — Vol. 1115. — Pp. 570–577.
19. Pokrovskaya O. Procedure and algorithmization of calculation of terminal network parameters / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko, E. Khramtsova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry. — INTERAGROMASH 2019*. — 2019. — P. 012198.
20. Покровская О. Д. Инструментарий логистического нормирования для проведения аудита транспортно-складских систем / О. Д. Покровская, Т. С. Титова // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2019. — Т. 16. — № 2. — С. 175–190.
21. Pokrovskaya O. Formation of logistics facilities in transport corridors / O. Pokrovskaya, S. Orekhov, N. Kapustina et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. “VIII International Scientific Conference Transport of Siberia — 2020”*. — 2020. — Vol. 8. — P. 012032.
22. Покровская О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская // *Бюллетень результатов научных исследований*. — 2022. — № 1. — С. 80–94.
23. Покровская О. Д. «Сбитый прицел» клиентоориентированности / О. Д. Покровская // *РЖД-Партнер*. — 2016.
24. Покровская О. Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем / О. Д. Покровская // *Железнодорожный транспорт*. — 2019. — № 7. — С. 26–32.
25. Дроздова М. А. Международные санкции как средства регулирования мировой экономики / М. А. Дроздова // *Инновационные подходы развития экономики и управления в XXI веке: сборник трудов III Национальной научно-практической конференции*. — Федеральное агентство железнодорожного транспорта, ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. — С. 113–116.
26. Дроздова М. А. Цифровая экономика и инфляция в период пандемии / М. А. Дроздова, Л. А. Кравченко, Д. А. Панков // *Инновационные подходы развития экономики и управления в XXI веке: сборник трудов III Национальной научно-практической конференции*. — ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. — С. 11–14.
27. Дроздова М. А. Цифровизация отрасли железнодорожных перевозок: проблемы и успехи / М. А. Дроздова, Е. А. Фурсова // *III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов*. — 2021. — С. 119–121.
28. Дроздова М. А. Антиглобализм в контексте современного международного экономико-правового дискурса / М. А. Дроздова, Л. А. Кравченко // *Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева*. — 2020. — Т. 1. — № 3(96). — С. 247–253.

29. Куренков П. В. Финансово-экономическое решение проблемы пригородных перевозок / П. В. Куренков, С. П. Вакуленко // Экономика железных дорог. — 2012. — № 12. — С. 96.

30. Сафронова А. А. Формирование системы финансового менеджмента: теория, опыт, проблемы, перспективы: коллективная монография / А. А. Сафронова, Е. Н. Рудакова, П. В. Куренков и др. — М., 2018. — 228 с.

31. Баритко А. Л. Организация и технология внешне-торговых перевозок / А. Л. Баритко, П. В. Куренков // Железнодорожный транспорт. — 1998. — № 8.

32. Быкадоров С. А. Анализ методов определения себестоимости грузовых перевозок / С. А. Быкадоров, П. В. Куренков, А. В. Серкова и др. // Вестник транспорта. — 2014. — № 3. — С. 30–41.

33. Мохонько В. П. Ситуационное управление перевозочным процессом / В. П. Мохонько, В. С. Исаков,

П. В. Куренков // Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник. — 2004. — № 11. — С. 14.

34. 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.

Дата поступления: 24.12.2022

Решение о публикации: 20.01.2023

Контактная информация:

МАРЧЕНКО Максим Александрович — аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой»; maks.marchenko1998@mail.ru

Improvement of Analytical Method for Calculating Actual Throughput with Simulation Modeling Application

M. A. Marchenko

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Marchenko M. A. Improvement of Analytical Method for Calculating Actual Throughput with Simulation Modeling Application // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 194–206. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-194-206

Summary

Purpose: To develop method for calculating actual capacity on railway line on the basis of the improvement of analytical formulas and the use of simulation tools. Correction of mathematical apparatus and calculation of simulation modeling coefficient. **Methods:** Analytical method, simulation and dynamic modeling, mathematical modeling, AnyLogic Software Package tools were applied. **Research results:** New calculation approach that allows to raise railway line throughput precision. In its turn, the new approach will allow to optimize operating costs for the maintenance and current repair of railway infrastructure and rolling stock. **Practical significance:** The results obtained can be used in the analytics, prediction and modeling of transportation processes in the dispatch centers of JSC “Russian Railways” transportation management.

Keywords: Railway line, actual capacity, calculation formulas, simulation model, simulation coefficient.

References

1. Čerić V. Visual interactive modeling and simulation as a decision support in railway transport logistic operations. *Mathematics and Computers in Simulation*. 1997, vol. 44, Iss. 3, pp. 251–261.
2. Bobrik P. P. *Intellektualizatsiya upravleniya dvizheniem pri tranzite na transporte. Tekhnologii postroeniya kognitivnykh transportnykh sistem: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Intelligentization of traffic control in transit on transport. Technologies for building cognitive transport systems: materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. St. Petersburg, 2021. (In Russian)
3. Abdullaev Zh. Ya. Osobennosti 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, vol. 3. (In Russian)
4. Pokrovskaya O. D., Samuylov V. M. *Mezhdunarodnaya logistika Transsibirskoy magistrali: ispol'zovanie tranzitnogo potentsiala Rossii* [International logistics of the Trans-Siberian Railway: the use of the transit potential of Russia]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2016, Iss. 3(21), pp. 3–7. (In Russian)
5. Pokrovskaya O. D. O terminologii ob'ektov terminal'no-skladskoy infrastruktury [On the terminology of objects of terminal and warehouse infrastructure]. *Mir transporta* [World of transport]. 2018, vol. 16, Iss. 1(74), pp. 152–163. (In Russian)
6. Pokrovskaya O. D. *Formirovanie terminal'noy seti regiona dlya organizatsii perevozok gruzov: nauchnaya monografiya* [Formation of the terminal network of the region for the organization of cargo transportation: scientific monograph]. Moscow: TransLit Publ., 2012, 189 p. (In Russian)
7. Pokrovskaya O. D. Logisticheskaya klassnost' zheleznodorozhnykh stantsiy [Logistic class of railway stations]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Communications]. 2018, Iss. 2(38), pp. 68–76. (In Russian)
8. Pokrovskaya O. D. Sostoyanie transportno-logisticheskoy infrastruktury dlya ugol'nykh perevozok v Rossii [The state of transport and logistics infrastructure for coal transportation in Russia]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport]. 2015, Iss. 1(15), pp. 13–23. (In Russian)
9. Altazin E., Dautère-Pères S., Ramond F. et al. A multi-objective optimization-simulation approach for real time rescheduling in dense railway systems. *European Journal of Operational Research*. 2020, vol. 286, Iss. 2, pp. 662–672.
10. Kianinejadoshah A., Ricci S. Comparative Application of Analytical and Simulation Methods for the Combined Railway Nodes-Lines Capacity Assessment. *Transportation Research Procedia*. 2021, vol. 55, pp. 103–109.
11. Ljubaj I., Mikulčić M., Mlinarić T. J. Possibility of Increasing the Railway Capacity of the R106 Regional Line by Using a Simulation Tool. *Transportation Research Procedia*. 2020, vol. 44, pp. 137–144.
12. Zhang X., Nie L. Integrating capacity analysis with high-speed railway timetabling: A minimum cycle time calculation model with flexible overtaking constraints and intelligent enumeration. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016, vol. 68, pp. 509–531.
13. Cheng C. H., Chow C. L., Chow W. K. A simulation study of tenability for passengers in a railway tunnel with arson fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 108.
14. Bulíčka J., Drdla P., Matuška J. Operational Reliability of a Periodic Railway Line. *Transportation Research Procedia*. 2021, vol. 53, pp. 106–113.
15. Högdahl J., Bohlin M., Fröidh O. A combined simulation-optimization approach for minimizing travel time and delays in railway timetables. *Transportation Research. Part B: Methodological*. 2019, vol. 126, pp. 192–212.
16. *Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti. Utv. Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 16 noyabrya 2010 g. № 128* [Instructions for calculating the available throughput. Approved. Order of Russian Railways

OJSC dated November 16, 2010 № 128]. Moscow: OAO “RZhD” Publ., 2011, 305 p. (In Russian)

17. Pokrovskaya O. D. O terminologii ob’ektov terminal’no-skladskoy infrastruktury [On the terminology of objects of terminal and warehouse infrastructure]. *Mir transporta* [World of transport]. 2018, vol. 16, Iss. 1(74), pp. 152–163. (In Russian)

18. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Assessment of Transport and Storage Systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, vol. 1115, pp. 570–577.

19. Pokrovskaya O., Fedorenko R., Khramtsova E. Procedure and algorithmization of calculation of terminal network parameters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry. INTERAGROMASH 2019. 2019, p. 012198.

20. Pokrovskaya O. D., Titova T. S. Instrumentariy logisticheskogo normirovaniya dlya provedeniya audita transportno-skladskikh sistem [Logistics rationing tools for auditing transport and storage systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2019, vol. 16, Iss. 2, pp. 175–190. (In Russian)

21. Pokrovskaya O., Orekhov S., Kapustina N. et al. Formation of logistics facilities in transport corridors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Ser. “VIII International Scientific Conference Transport of Siberia 2020”. 2020, vol. 8, p. 012032.

22. Pokrovskaya O. D. Logisticheskie transportnye sistemy Rossii v usloviyakh novykh sanktsiy [Logistic transport systems in Russia under new sanctions]. *Byulleten’ rezul’tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, Iss. 1, pp. 80–94. (In Russian)

23. Pokrovskaya O. D. “Sbityy pritsel” klientoorientirovannosti [“Shot down sight” of customer orientation]. *RZhD-Partner* [RZD-Partner]. 2016. (In Russian)

24. Pokrovskaya O. D. Kompleksnaya otsenka transportno-skladskikh sistem [Comprehensive assessment of transport and storage systems]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2019, Iss. 7, pp. 26–32. (In Russian)

25. Drozdova M. A. *Mezhdunarodnye sanktsii kak sredstva regulirovaniya mirovoy ekonomiki. Innovatsionnye podkhody razvitiya ekonomiki i upravleniya v XXI veke: sbornik trudov III Natsional’noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [International sanctions as a means of regulating the world economy. Innovative approaches to the development of economics and management in the XXI century: Proceedings of the III National Scientific and Practical Conference]. Federal’noe agentstvo zheleznodorozhnogo transporta, FGBOU VO PGUPS [Federal Agency for Railway Transport, FGBOU VO PGUPS]. 2020, pp. 113–116. (In Russian)

26. Drozdova M. A., Kravchenko L. A., Pankov D. A. *Tsifrovaya ekonomika i inflyatsiya v period pandemii. Innovatsionnye podkhody razvitiya ekonomiki i upravleniya v XXI veke: sbornik trudov III Natsional’noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Digital economy and inflation during a pandemic. Innovative approaches to the development of economics and management in the XXI century: a collection of proceedings of the III National Scientific and practical conference]. FGBOU VO PGUPS Publ., 2020, pp. 11–14. (In Russian)

27. Drozdova M. A., Fursova E. A. *Tsifrovizatsiya otrasli zheleznodorozhnykh perezovok: problemy i uspekhi. III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov* [Digitalization of the railway transportation industry: problems and successes. III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings]. 2021, pp. 119–121. (In Russian)

28. Drozdova M. A., Kravchenko L. A. Antiglobalizm v kontekste sovremennogo mezhdunarodnogo ekonomiko-pravovogo diskursa [Antiglobalism in the context of modern international economic and legal discourse]. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V. N. Tatishcheva* [Bulletin of the Volga University. V. N. Tatishcheva]. 2020, vol. 1, Iss. 3(96), pp. 247–253. (In Russian)

29. Kurenkov P. V., Vakulenko S. P. Finansovo-ekonomicheskoe reshenie problemy prigorodnykh perezovok [Financial and economic solution to the problem of suburban transportation]. *Ekonomika zheleznikh dorog* [Economics of Railways]. 2012, Iss. 12, p. 96. (In Russian)

30. Safronova A. A., Rudakova E. N., Kurenkov P. V. et al. *Formirovanie sistemy finansovogo menedzhmenta: teoriya, opyt, problemy, perspektivy: kollektivnaya monografiya* [Formation of the financial management system: theory, experience, problems, prospects: collective monograph]. Moscow, 2018, 228 p. (In Russian)
31. Baritko A. L., Kurenkov P. V. Organizatsiya i tekhnologiya vneshnetorgovykh perevozok [Organization and technology of foreign trade transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 1998, Iss. 8. (In Russian)
32. Bykadorov S. A., Kurenkov P. V., Serkova A. V. et al. Analiz metodov opredeleniya sebestoimosti gruzovykh perevozok [Analysis of methods for determining the cost of freight transportation]. *Vestnik transporta* [Transport Bulletin]. 2014, Iss. 3, pp. 30–41. (In Russian)
33. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. Situatsionnoe upravlenie perevozochnym protsessom [Situational management of the transportation process]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management: scientific information collection]. 2004, Iss. 11, p. 14. (In Russian)
34. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. Problemy sozdaniya situatsionno-analiticheskoy sistemy upravleniya perevozochnym 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, Iss. 9, p. 22. (In Russian)

Received: December 24, 2022

Accepted: January 20, 2023

Author's information:

Maxim A. MARCHENKO — Postgraduate Student of the Department “Operational Work Management”; maks.marchenko1998@mail.ru