

УДК 656.222:004.942

С. В. Карасёв, М. Е. Корягин

Оценка задержек поездов на железнодорожной сети методом моделирования в условиях случайного образования заявок на перевозку

Поступила 14.03.2018
Рецензирование 22.03.2018
Принята к печати 09.04.2018

Предметом исследования является процесс продвижения транспортных единиц на сети железных дорог и возникающие при этом задержки. Существующие решения подобной задачи для железнодорожных перевозок основаны, как правило, на составлении расписаний и построении вариантных графиков движения поездов. Это весьма трудоемкий метод, требующий использования большого объема дополнительных данных, что снижает его эффективность при исследовании вариантов технологии пропуска поездопотоков и развития транспортной инфраструктуры. Цель работы состоит в разработке метода определения величины задержек пропуска поездопотоков при различной величине загрузки инфраструктуры и соотношении различных категорий поездов в потоке. В предлагаемом методе заявки на перевозку формируются на основе моделирования пропуска случайного потока требований. Исследуется влияние пропорции поездов разных скоростных категорий (грузовых и пассажирских) в потоке и уровня загрузки инфраструктуры на задержки поездов. Для расчетов используется метод имитационного моделирования спроса на перевозки и продвижения транспортных единиц по сети. Подтверждается целесообразность разделения (при необходимости обеспечения высокой пропускной способности) потоков с различной скоростью движения за счет специализации отдельных линий сети. Результатом работы являются полученные зависимости величины задержек поездов на транспортной сети от загрузки и соотношения поездов различной скорости (грузовых и пассажирских). Предлагаемый метод направлен на формирование аналитических обобщений для дальнейшей оценки задержек в пропуске поездов по сети. Модели позволяют упростить процедуру расчета и могут использоваться при принятии управленческих решений по совершенствованию инфраструктуры, а также системы организации пропуска поездопотоков.

Ключевые слова: *железнодорожная сеть, пропускная способность, задержки, смешанный поток транспорта, имитационное моделирование.*

С учетом изменения социально-экономического уклада в нашей стране реформирование железнодорожного транспорта имело целью приведение в соответствие с новыми экономическими и иными условиями как структуры, так и технологии работы транспортной системы. Существенно изменились задачи железнодорожного транспорта, которые ранее заключались в безусловном выполнении потребностей народного хозяйства и населения в грузовых и пассажирских перевозках [1]. В новых реалиях, несмотря на сохранение стратегического для государства значения железнодорожного транспорта, на первое место вышли задачи обеспечения его коммерческой эффективности, т. е. сокращения инфраструктурных и операционных издержек и увеличения доходности, в том числе за счет диверсификации видов деятельности, использования принципов клиентоориентированности, разработки новых продуктов, интересующих грузовладельцев.

В этих условиях одним из полезных инструментов, который может использоваться при планировании развития инфраструктуры железных дорог, а также совершенствовании организационно-технологических решений, является использование принципов логистики. В этом случае приоритетными становятся такая организация работы и такой уровень развития транспортной системы, которые обеспечат готовность последней к приему заявки на перевозку, выполнению ее в кратчайший срок и по возможности с минимальными издержками. Для решения этой комплексной задачи представляется возможным рассматривать процесс перевозки (прежде всего, с точки зрения клиента-грузовладельца) как процесс продвижения груза от начального к конечному пункту транспортной сети.

Очевидно, что важнейшим критерием оценки рассматриваемого процесса будет его продолжительность, определяемая в основном конструктивно-техническими и техноло-

гическими особенностями транспортной системы – железнодорожной сети и ее линейных объектов. Если рассматривать процесс продвижения грузопотоков по сети, то ее основными элементами будут являться железнодорожные участки и узлы, которые при дальнейшей детализации будут состоять из железнодорожных станций и разделяющих их перегонов. Скорость продвижения грузопотока будет определяться как наличной пропускной способностью железной дороги и ее элементов, так и организацией пропуска поездопотоков, графиком движения поездов, диспетчерским регулированием.

С учетом сложности рассматриваемой транспортной системы и описанных выше факторов, задача оптимизации продвижения грузопотоков при решении ее в масштабах сети и даже отдельного полигона требует использования набора разнообразных научных методов, включающих в себя как аналитические и графоаналитические решения, так и комплексные имитационные модели, экспертные методы [2]. Классическим методом оценки организации движения поездов является построение графика движения поездов или в некоторых случаях составление расписания [3]. Однако расписание непригодно для оценки задержек, а высокая трудоемкость разработки вариантных графиков движения делает использование этого метода неподходящим для решения задач по исследованию задержек. В то же время имеется насущная потребность в получении относительно простых инструментов, позволяющих выполнять укрупненную оценку вариантов развития пропускных способностей элементов железнодорожной сети и способов продвижения грузо- и вагонопотоков при принятии различного рода управленческих решений. При решении задачи в такой постановке полезными могут оказаться достаточно хорошо проработанные решения, созданные для аналогичных или близких по существу процессов, в том числе при оценке транспортных потоков в случае автомобильных перевозок.

Использование метода аналогий позволяет воспользоваться при оценке вариантов организации пропуска поездопотоков опытом описания автомобильного трафика, естественно, с учетом специфики железнодорожных перево-

зок, сложившихся и возможных в перспективе способов организации перевозок и продвижения вагоно- и поездопотоков.

Вот уже больше 80 лет развиваются модели, описывающие автомобильный трафик [4]. Снижение скорости передвижения транспортных единиц, описанное Гриншилдом в 1934 г., зависит от плотности трафика [5]. Причиной является то, что поток транспорта формируют независимые участники дорожного движения, к тому же автомобили вынуждены поддерживать безопасный интервал, который должен возрастать с ростом скорости.

В настоящее время используется множество моделей, описывающих время передвижения, самая простая и часто используемая из которых – BPR-модель [4]. Модель показывает, что с ростом интенсивности движения время передвижения растет по экспоненте. Прямая зависимость скорости движения автомобильного и железнодорожного транспорта от интенсивности движения описана в [6], хотя для железнодорожного транспорта характерны несколько иные принципы формирования транспортного потока.

Собственно, потоком будут являться укрупненные партии груза, образующие повагонные отправки и далее – поезда (частным случаем являются отправительские и ступенчатые маршруты). Моментом начала движения груза по железнодорожной сети будет момент отправления поезда с начальной станции. В этом смысле затраты времени от момента приема груза к перевозке по железной дороге до момента отправления поезда со станции можно считать аналогичными затратам времени от момента приема груза к перевозке автотранспортом до выхода груженого автомобиля на транспортную сеть. В конечном пункте можно установить аналогичное соответствие между автомобильным и железнодорожным транспортом по операциям от момента прибытия транспортной единицы (автомобиля либо поезда) до момента выдачи груза получателю или перегрузки в склад. Таким образом, если вынести за скобки указанные выше операции, сам процесс продвижения транспортной единицы по сети для автомобиля и поезда в первом приближении можно считать аналогичным. Здесь пока не рассматриваются закономерности образова-

ния поезда, обусловленные особенностями поступления грузопотока на станцию отправления, его структурой, накоплением вагонов на состав поезда, и некоторые другие. Они представляют собой самостоятельные вопросы, заслуживающие отдельного рассмотрения. Принятое в данном случае упрощение процесса предполагает рассмотрение транспортной единицы (поезда) в качестве заявки на перевозку, поступающей на транспортную сеть.

Таким образом, возникает гипотеза о том, что при расчете задержек заявок (поездов) в пути следования при определенных допущениях можно использовать формулы из теории автомобильного трафика.

Для простоты рассмотрим ситуацию, при которой заявка на перевозку (т. е. появление транспортной единицы на транспортной сети) возникает случайно [7]. Перевозчики формируют свой спрос независимо друг от друга, при этом неизбежны колебания в объемах перевозок и моментах появления на сети заявок на перевозку. Как известно, сумма независимых потоков приводит к формированию пуассоновского потока заявок на перевозки. То есть необходимо брать во внимание не только срок поставки по железной дороге, но и время, которое теряет производитель между временем возможного отправления груза и фактическим временем отправления. Такой подход важен для составления логистической цепочки, т. е. при выборе оптимального способа перевозки будет учитываться время от производства до получения товара потребителем. Таким образом, более высокая техническая скорость железнодорожного транспорта компенсируется затратами времени на начальном и конечном этапах (от момента предъявления клиентом груза к перевозке до момента по-

ступления заявки (поезда) на транспортную сеть и от прибытия поезда на конечную станцию до выдачи груза), а также задержками поездопотока в пути следования, в том числе на технических станциях [8].

Рассмотрим следующий поток. Упорядоченное по возрастанию время возникновения спроса (моменты поступления заявок на транспортную сеть) обозначим как $t_1, t_2, t_3, \dots$.

При этом интервал между этими моментами $t_{i+1} - t_i$ распределен экспоненциально. Обозначим минимальный интервал между поездами τ . Очевидно, что порядок отправления поездов будет таким же, только при определенных условиях могут возникнуть задержки.

Тогда время отправления первого $\tilde{t}_1 = t_1$. Следовательно, время отправления второго поезда

$$\tilde{t}_2 = \begin{cases} t_2, & t_2 > \tilde{t}_1 + \tau, \\ \tilde{t}_1 + \tau, & t_2 \leq \tilde{t}_1 + \tau. \end{cases} \quad (1)$$

То есть если с момента отправления предыдущего поезда прошел интервал больше τ , то при наличии следующего поезда он отправляется, зафиксировав некоторую задержку. Иначе время отправления поезда совпадает со временем возникновения потребности, задержки не происходит.

$$\tilde{t}_i = \begin{cases} t_i, & t_i > \tilde{t}_{i-1} + \tau, \\ \tilde{t}_{i-1} + \tau, & t_i \leq \tilde{t}_{i-1} + \tau. \end{cases} \quad (2)$$

Суммарные задержки поездов составят

$$Z = \sum_i (\tilde{t}_i - t_i). \quad (3)$$

Предельная пропускная способность составит $\lambda_0 = 1/\tau$, при интенсивности движения $\lambda < \lambda_0$.

Пример. При минимальном интервале между поездами по отправлению $\tau = 10$ мин рассмотрим, как определяется время отправления поездов (рис. 1).

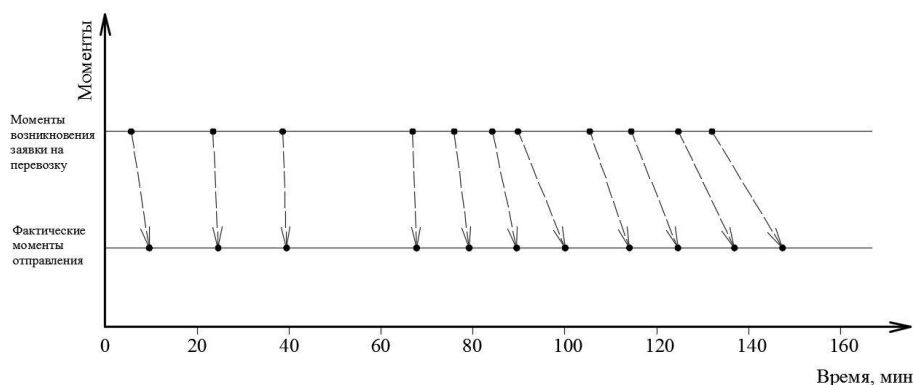


Рис. 1. Определение времени отправления поездов

Длительность задержки, связанная с выделением нитки, в зависимости от загрузки железнодорожной сети λ / λ_0 представлена на рис. 2. То есть при увеличении интенсивности движения поездов при прочих равных условиях время ожидания отправления поезда также увеличивается [7].

Полученный результат (рис. 2) согласуется с формулой Гриншилдса для скорости автомобильного трафика [5]:

$$v = v_0 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_j} \right), \quad (4)$$

где v_0 – скорость свободного движения; ρ – средняя плотность потока транспорта; ρ_j – предельная плотность потока транспорта, когда автомобили стоят плотно друг к другу.

Также отметим совпадение данных рис. 2 с результатами исследований задержек железнодорожного транспорта, описанных в [7, 9, 10].

Решение (1) существует при $\lambda < 6$, т. е. при таких условиях не может быть пропущено больше шести поездов, а при нарушении ограничения очередь растет до бесконечности. Однако, как правило, всплеск спроса на перевозку, который условно можно считать пропорциональным количеству заявок на перевозку и поездов, ограничен по времени, к тому же в таких условиях работниками железнодорожных станций и диспетчерским аппаратом будут реализованы оперативные регулировочные меры по ускорению продвижения поездопотока.

Моделирование движения поездов двух типов

Как было отмечено выше, одной из важных проблем является случайное формирование спроса на перевозку или, другими словами, при ограниченной наличной пропуск-

ной способности железных дорог спрос должен подстраиваться под возможности железной дороги, что противоречит клиентоориентированному принципу постоянной готовности транспортной инфраструктуры к приему заявки на перевозку.

Однако эти потери не являются единственными. Скорость продвижения поездов различной категории по транспортной сети не одинакова. Например, пассажирские и грузовые поезда имеют разные времена хода по перегонам и участкам, обусловленные их техническими характеристиками и организацией пропуска поездов. В этом случае, для того чтобы выдержать интервал движения по участку сети между поездами разного типа, необходимо или снизить скорость (в данном случае у пассажирского поезда), задержать отправление пассажирского поезда, задержать отправление грузового поезда, чтобы пропустить пассажирский, или прибегнуть к более радикальному подходу – унифицировать скорость. В любом случае у какого-то из поездов будет потеря времени.

Ряд исследователей рассматривают вопрос влияния пропорции двух видов поездов на задержки на узловых станциях. Результатом исследований является утверждение того, что больше всего проблем возникает при одинаковой доле поездов каждого типа.

В данной работе также оценим влияние доли пассажирских поездов в общем трафике на величину задержки пропуска поездопотоков, для этого введем следующие параметры модели:

λ_1 – интенсивность движения пассажирских поездов, поездов в час;

λ_2 – интенсивность движения грузовых поездов, поездов в час;

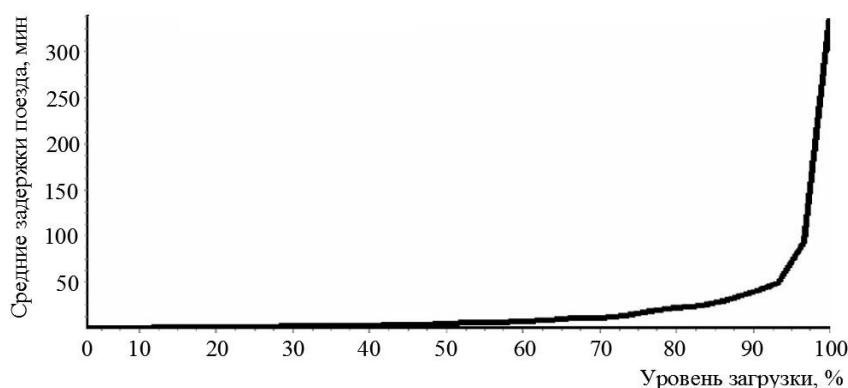


Рис. 2. Задержки поездов одного типа в зависимости от уровня загрузки железнодорожной сети

$v_1 = 120$ км/ч – скорость движения пассажирских поездов;

$v_2 = 80$ км/ч – скорость движения грузовых поездов;

N – количество участков на транспортной сети, по которым рассматривается движение поездов;

L – длина каждого участка, км.

Время передвижения по участку сети пассажирского или грузового поезда составит

$$\Delta t_i = \frac{L}{v_i}. \quad (5)$$

Рассмотрим время передвижения в зависимости от интенсивности движения поездов и доли пассажирских поездов в потоке:

$$\delta = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (6)$$

а также от уровня загрузки железной дороги:

$$\Delta = (\lambda_1 + \lambda_2) \tau. \quad (7)$$

Далее рассматривается организация движения поездов по участку транспортной сети по двум вариантам:

1) порядок отправления поездов не меняется, т. е. ни один поезд не обгоняет другой;

2) существуют приоритетные поезда (в данном случае пассажирские), если движение грузового поезда на участке приведет к задержкам пассажирского поезда, то грузовой поезд выйдет позднее пассажирского (при этом он может помешать другому пассажирскому поезду и задержка грузового поезда еще возрастет).

На рис. 3 представлена упрощенная схема алгоритма определения порядка пропуска по участкам транспортной сети поездов двух типов (грузовых, пассажирских). Отметим, что два определенных выше варианта отличаются только пунктом «распределение времени отправления поездов до следующей станции».

В результате моделирования при количестве проходимых поездами участков сети $N = 5$ и длине каждого участка $L = 100$ км получены графики, представленные на рис. 4.

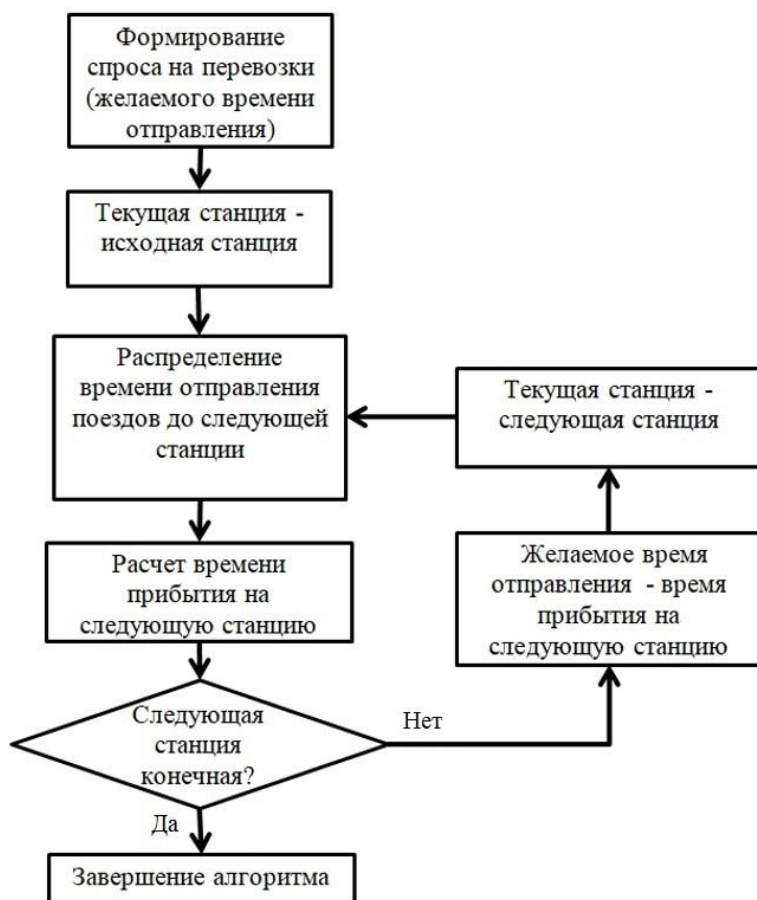


Рис. 3. Алгоритм определения порядка пропуска по участкам транспортной сети поездов двух типов

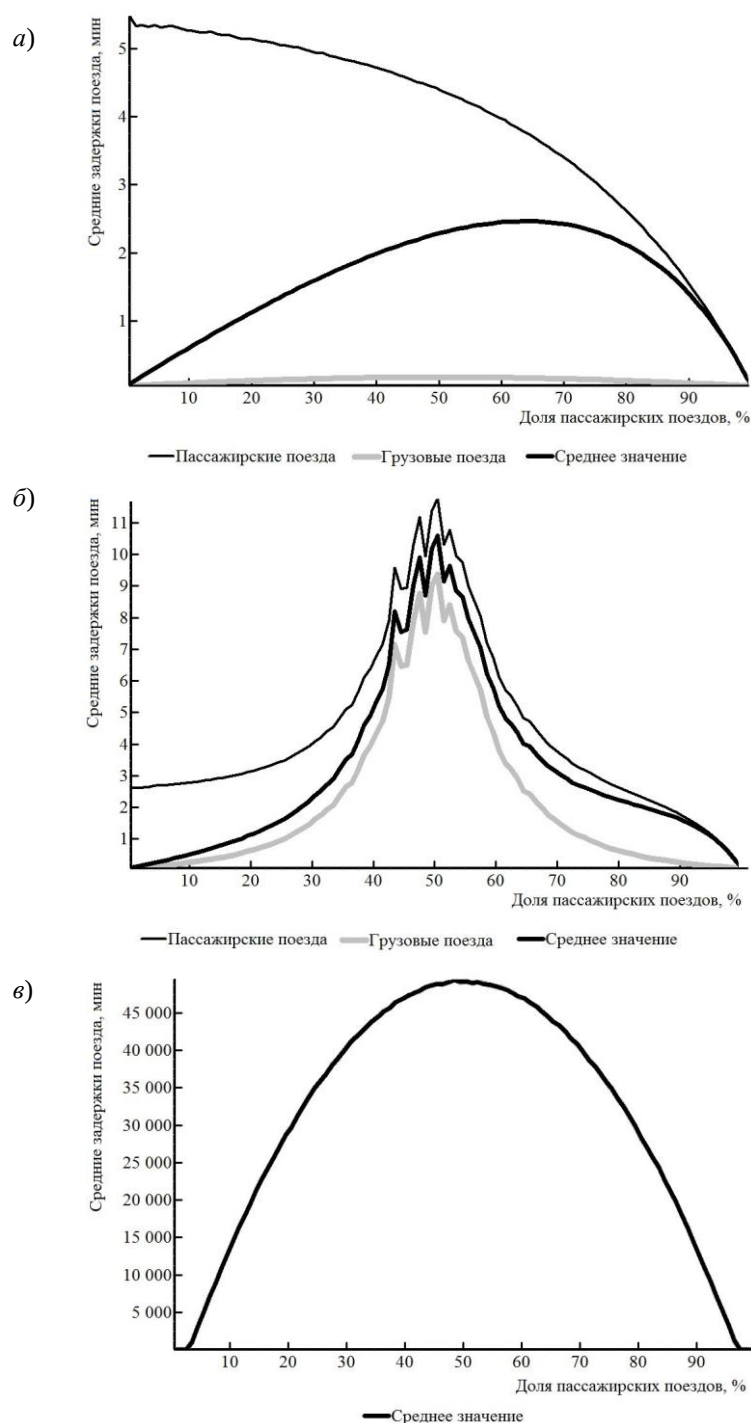


Рис. 4. Задержки поездов при движении без приоритетов при уровне загрузки железной дороги 20 % (а), 50 % (б), 90 % (в)

Отметим (см. рис. 4), что в любом случае при отсутствии приоритетов простои пассажирских поездов выше, так как они вынуждены выдерживать интервалы с грузовыми поездами. Такая ситуация соответствует использованию параллельного графика движения поездов. При этом минимальные суммарные задержки продвижения потока заявок наблюдаются при движении поездов одного типа (доля

пассажирских поездов 0 – только грузовые и 100 % – только пассажирские), а наибольшие задержки возникают при доле пассажирских поездов около 50 %. Однако результаты зависят от общей интенсивности движения. При небольшой интенсивности движения (20 %) практически нет простоев у грузовых поездов. Простои же пассажирских поездов снижаются при росте их доли, т. е. перед одним пассажир-

ским поездом все чаще оказывается другой, поэтому задержек становится все меньше за счет образования пакетов из пассажирских поездов. При загрузке 50 % простои грузового транспорта хоть и ниже, но показывают одинаковую тенденцию с пассажирским, а при загрузке 90 % все поезда ожидаемо имеют весьма значительные задержки [11, 12].

Для приоритетного движения пассажирских поездов (рис. 5) картина несколько отличается. В этом случае грузовые поезда имеют большие задержки, чем пассажирские. Также наилучшие результаты достигаются при движении поездов преимущественно одного типа, а наихудшие – при равной доле поездов каждого типа. Однако суммарные задержки продвиге-

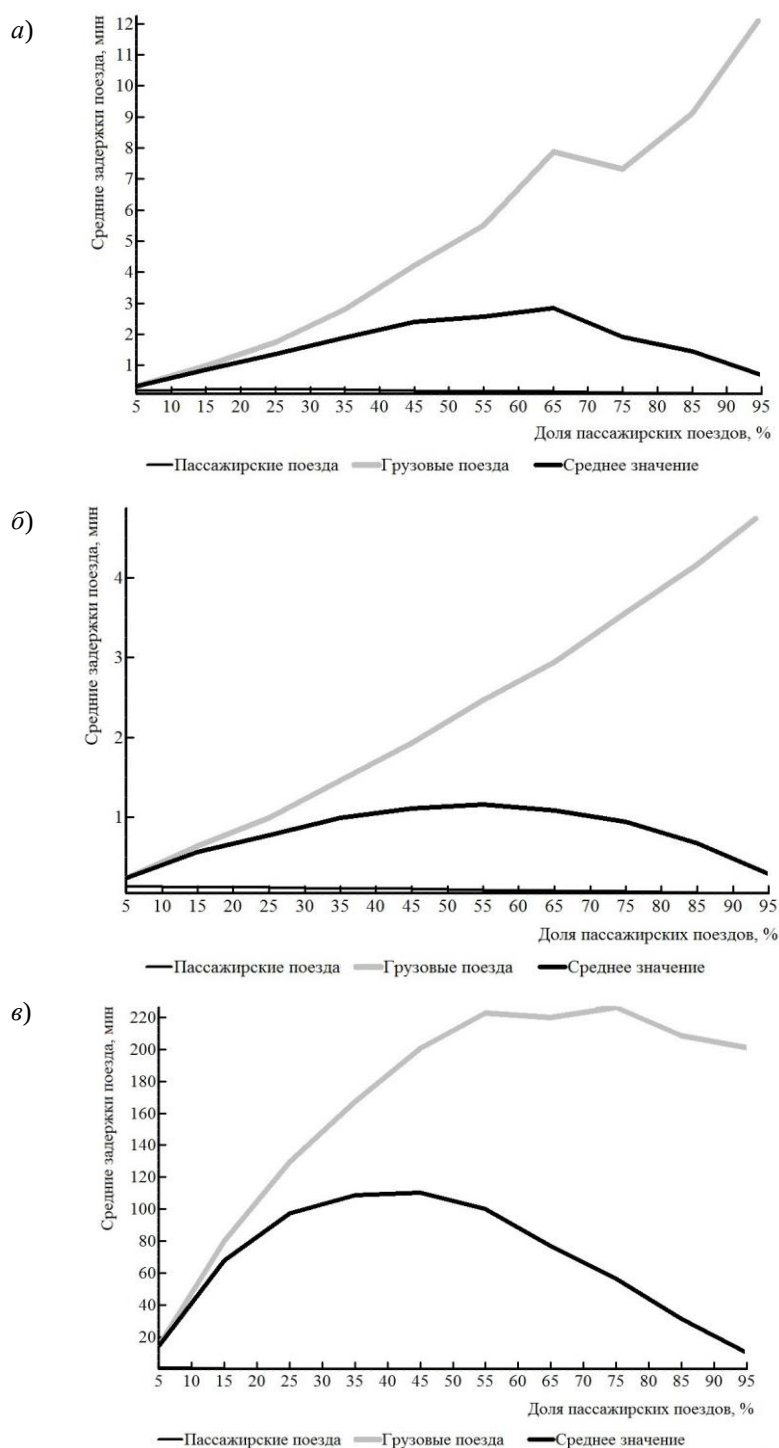


Рис. 5. Задержки поездов при движении с приоритетом при уровне загрузки транспортной сети 20 % (а), 50 % (б), 90 % (в)

ния транспортных единиц оказываются значительно ниже (в 2 раза при загрузке 20 и 50 % и в 200 раз при 90 %). При этом даже при 90%-й загрузке простои пассажирских поездов близки к нулю, поскольку происходит их группировка в результате смещения моментов отправления. В целом результаты исследований согласуются с работами [13, 14].

Одним из вариантов увеличения пропускной способности транспортной сети является выравнивание скоростей движения всех поездов (в нашем случае до 80 км/ч) с переходом к параллельному типу графика движения. Однако при этом, как правило, не учитываются потери времени в пути для поездов, которые могут пропускаться с большей скоростью, поэтому принятие такого решения требует всесторонней технико-экономической оценки с учетом возможных дополнительных задержек в пути следования всех поездов и их приоритета.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в идеальном случае для каждого типа поездов должна быть построена своя специализированная линия, что обеспечит возможность построения параллельного графика с максимальной пропускной способностью. Однако в условиях ограниченного спроса на железнодорожные перевозки, особенно пассажирские скоростные, который далеко не все-

гда может обеспечить достаточное заполнение графика и использование наличной пропускной способности специализированных для пассажирского движения линий, вероятнее всего, существующая технология пропуска смешанных поездопотоков сохранится.

Заключение

Настоящая работа направлена на разработку новых подходов к оценке времени пропуска поездов по полигонам железнодорожной сети с учетом изменяющегося спроса на грузовые и пассажирские перевозки, случайного характера поступления на сеть заявок на перевозку. Одним из важных результатов этих исследований в перспективе может стать получение достаточно простых обобщенных зависимостей, которые позволят давать оценку способности железной дороги освоить дополнительные объемы перевозок. Главной особенностью такого подхода является отказ от необходимости составления графика движения поездов, что уменьшит трудоемкость решения указанной задачи, повысит вариативность и в конечном счете позволит улучшить качество принимаемых управленческих решений при обосновании условий пропуска поездопотоков и соответствующего развития железнодорожной инфраструктуры.

Библиографический список

1. О научной платформе стратегии развития железнодорожного транспорта в России до 2050 года / Б. М. Лапидус, А. С. Мишарин, Н. А. Махутов и др. // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2017. № 2. С. 1–20.
2. Козлов П. А., Колокольников В. С., Сорокин В. И. Совместное использование аналитических методов и имитационных моделей // Транспорт Урала. 2016. № 3 (50). С. 3–8.
3. Теория расписаний. Задачи железнодорожного планирования / А. А. Лазарев, Е. Г. Мусатова, Е. Р. Гафarov, А. Г. Кварацхелия. М. : ИПУ РАН, 2012. 92 с.
4. Kerner B. S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory. Berlin ; N. Y. : Springer, 2009. 265 p.
5. Greenshields B. D. A Study of Traffic Capacity // Highway Research Board Proceedings. 1935. Vol. 14. P. 448–477.
6. Measuring the Impact of Additional Rail Traffic Using Highway & Railroad Metrics / S. L. Sogin, C. P. L. Barkan, Y. C. Lai, M. R. Saat // Proceedings of the 2012 Joint Rail Conference. Philadelphia, 2012. P. 475–484.
7. Левин Д. Ю. Очереди на железной дороге // Мир транспорта. 2014. № 2. С. 132–141.
8. Дмитренко А. В. Принципы развития сети железных дорог на перспективу // Вестник транспорта. 2010. № 10. С. 27–32.
9. An assessment of railway capacity / M. Abril, F. Barber, L. Ingolotti, M. A. Salido, P. Tormos, M. H. Dingler, Y. C. Lai, C. P. L. Barkan, A. Lova // Transportation Research. Part E. Logistics and Transportation Review. 2008. Vol. 44 (5). P. 774–806.
10. Sogin S., Barkan C. P. L., Saat M. R. Simulating the effects of higher speed passenger trains in single track freight networks // Proceedings of the Winter Simulation Conference. Arizona, 2011. Vol. 16. P. 3684–3692.

11. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. М., 2011. 290 с.
12. Левин Д. Ю., Павлов В. Л. Расчет и использование пропускной способности железных дорог. М., 2011. 364 с.
13. Dinger M. H., Lai Y. C., Barkan C. P. L. Effect of train type heterogeneity on single-track heavy haul railway line capacity // Journal of Rail and Rapid Transit. 2014. Vol. 228 (8). P. 845–856.
14. Dinger M. H., Lai Y. C., Barkan C. P. L. Impact of Train Type Heterogeneity on Single-Track Railway Capacity // Transportation Research Record. 2009. № 2117. P. 41–49.

S. V. Karasev, M. E. Koryagin

Assessment of Train Delays on the Railway Network by Modeling on the Conditions of Stochastic Train Flow

Abstract. The subject of the research is delays in the process of moving transport units on the railway network. Existing solutions to similar problems for rail transportation is generally based on the scheduling and construction of variant graphs of trains. The task of scheduling is a complex task that requires a large amount of additional data. However, the main problem is the computational complexity of the problem, which does not allow finding the optimal solution of practical problems. Therefore, it is necessary to use approximate methods to calculate the variants of the technology of passing train flows and the development of transport infrastructure. The aim of this research is to develop a method of determining the volume of delays of skipping train flows in the case of varying traffic and the ratio of different categories of trains in the flow. A method is proposed to study delays in the promotion of the railway transport network. Applications for transportation are formed on the basis of simulation passes random flow requirements. The influence of the proportion of trains of different speed categories (freight and passenger) in the flow and the level of traffic on train delays is investigated. The method of simulation modeling of demand for transportation and promotion of transport units on the network is used for calculations. The expediency of separation, if it is necessary to provide high throughput, flows with different speeds due to the specialization of individual lines of the network is confirmed. The result of the work is the dependence of the value of train delays in the transport network on the load and the ratio of trains of different speeds (freight and passenger). The proposed method is aimed at the formation of analytical expressions for further evaluation of delays in the passage of trains on the network. The models will simplify the calculation procedure and can be used in making decisions to improve the railway infrastructure, as well as the system of organization of train traffic.

Key words: railway network; capacity; delays; mixed traffic flow; simulation.

Карасёв Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» СГУПС. E-mail: gdsu@rambler.ru

Корягин Марк Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Высшая математика» СГУПС. E-mail: math@stu.ru