



# Что необходимо для выполнения графика



Дмитрий ЛЕВИН  
Dmitry Yu. LEVIN

Аунг Хейн Зо  
Aung Hein Zaw



Вадим ШМАЛЬ  
Vadim N. SHMAL

*Левин Дмитрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).  
Аунг Хейн Зо – аспирант МИИТ.  
Шмаль Вадим Николаевич – кандидат технических наук, доцент МИИТ.*

**Анализ выполнения графиков движения поездов, общие закономерности в организации планирования и расчетах интенсивности поездопотоков. Учитываемые факторы на разветвленных перегонах. Средства регулирования перенасыщенности участками железнодорожных участков и создания условий для оптимизации заданного порядка грузовых и пассажирских перевозок. Поскольку авторами ставится задача доказать приоритет выполнения, а не разработки графика движения поездов, именно этому подчинена представленная в статье система расчетов и математических заключений. Дороги получают средство регулирования, приведения в соответствие планируемых размеров движения поездов и пропускной способности участков, создания оптимальных условий для выполнения существующих графиков.**

*Ключевые слова:* железная дорога, график движения поездов, оптимизация, распределение поездопотоков, максимально допустимое число поездов на участке, регулирование насыщения участков поездами, часовые пояса, сменно-суточное планирование.

**П**равила технической эксплуатации железных дорог (далее – ПТЭ) четко формулируют: «Основной организацией движения поездов является график движения, который объединяет деятельность всех подразделений и выражает заданный объем эксплуатационной работы железных дорог. График движения поездов – непреложный закон» [1].

Увы, с соблюдением графика на отечественных железных дорогах не все благополучно. Отчетные данные показывают достаточно высокий уровень выполнения графика движения пассажирских (98–99%) и грузовых (88–92%) поездов, но фактически он значительно ниже.

Такой уровень выполнения графика движения не является особенностью только российских железных дорог. Например, на германских железных дорогах, которые отличаются хорошей технологической дисциплиной и пунктуальным отношением к расписанию, точность прибытия и отправления всех видов пассажирских поездов составляет 90%, а для курсирующих в рамках согласованных расписаний – 93%. Треть по-

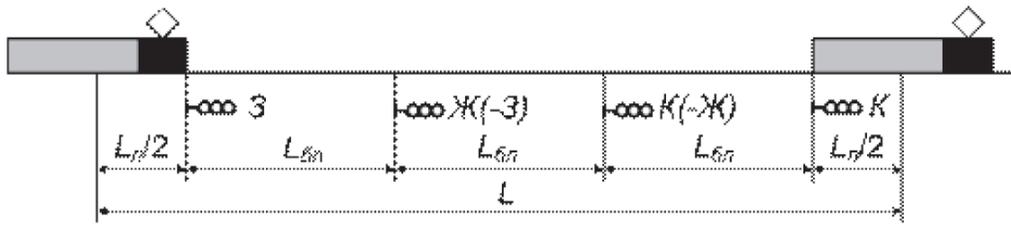


Рис. 1. Минимальный межпоездной интервал при трехзначной автоблокировке.

ездов дальнего следования опаздывает на 4 и более минуты, каждый седьмой поезд – более чем на 10 минут. Из-за опозданий каждый четвертый поезд, связанный с согласованным расписанием транспорта, не смог доставить пассажиров к месту пересадки вовремя [2].

Проблема соблюдения графика движения поездов характерна для железных дорог разных стран мира. Суть ее в том, что недостаточно разработать график, надо еще создать и поддерживать оптимальные условия для его выполнения [3]. Именно разработке графика движения посвящено, как правило, большинство публикаций, а вот исследований по поводу его выполнения почти нет.

### I.

В соответствии с инструкцией по расчету наличной пропускной способности железных дорог, утвержденной ОАО «РЖД» 10.11.2010 года, максимальные размеры движения поездов на двухпутных участках определяются по формуле

$$n = \frac{(1440 - t_{\text{техн}}) \alpha_n}{I}, \quad (1)$$

где  $n$  – наличная пропускная способ-

ность двухпутных участков;  $t_{\text{техн}}$  – продолжительность суточного бюджета времени, выделяемого для производства плановых ремонтно-строительных работ, мин;  $\alpha_n$  – коэффициент, учитывающий надежность работы технических средств (инфраструктуры и подвижного состава);  $I$  – расчетный межпоездной интервал, мин.

Интервал между поездами зависит от так называемого расчетного расстояния, которым должны быть разграничены поезда на перегоне, скорости поездов, а при электрической тяге и от мощности устройств электроснабжения. Расчетное расстояние определяется минимально необходимым числом блок-участков и длиной поездов. При этом длина каждого блок-участка не может быть меньше тормозного пути поезда в заданных условиях профиля пути и скорости следования поезда.

Минимально нужное число блок-участков, составляющих расчетное расстояние, устанавливается при условии, что впередиидущий поезд не должен оказывать влияния на следование сзадиидущего, то есть после проследования поездом светофора с зеленым показани-

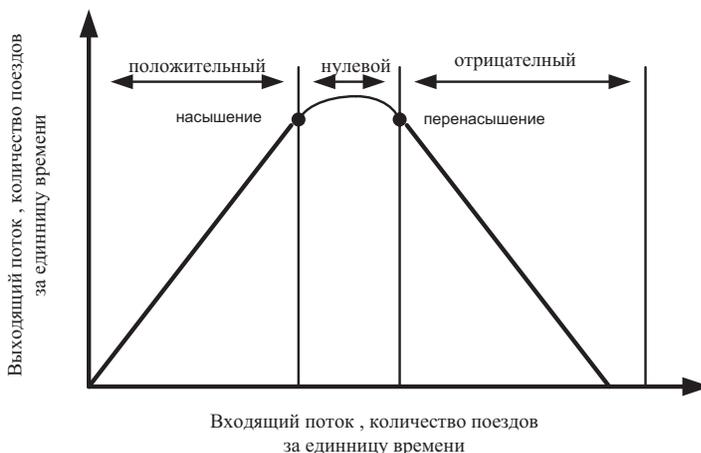


Рис. 2. Реакция участка на изменение интенсивности потока поездов.



Рис. 3. Зависимость доли ( $p$ ) блок-участков, пройденных поездами на зеленый (1), желтый (2) и красный (3) сигналы светофоров, от уровня заполнения участка поездами ( $\gamma$ ).

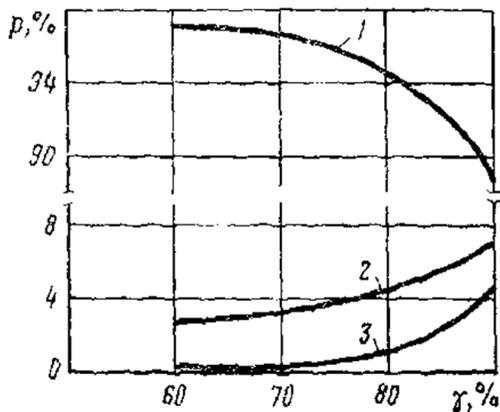
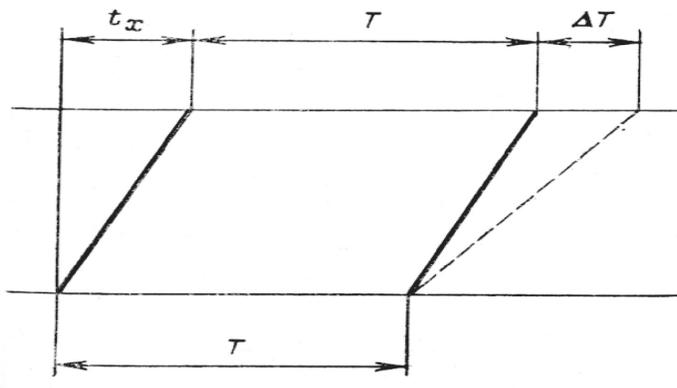


Рис. 4. Фрагмент графика движения поездов.



ем следующий светофор также должен гореть зеленым огнем. Для этого при трехзначной автоблокировке последовательно идущие поезда должны быть

разграничены не менее тремя блок-участками (рис. 1).

Но в соответствии с формулой (1) ошибочно распространено мнение, что

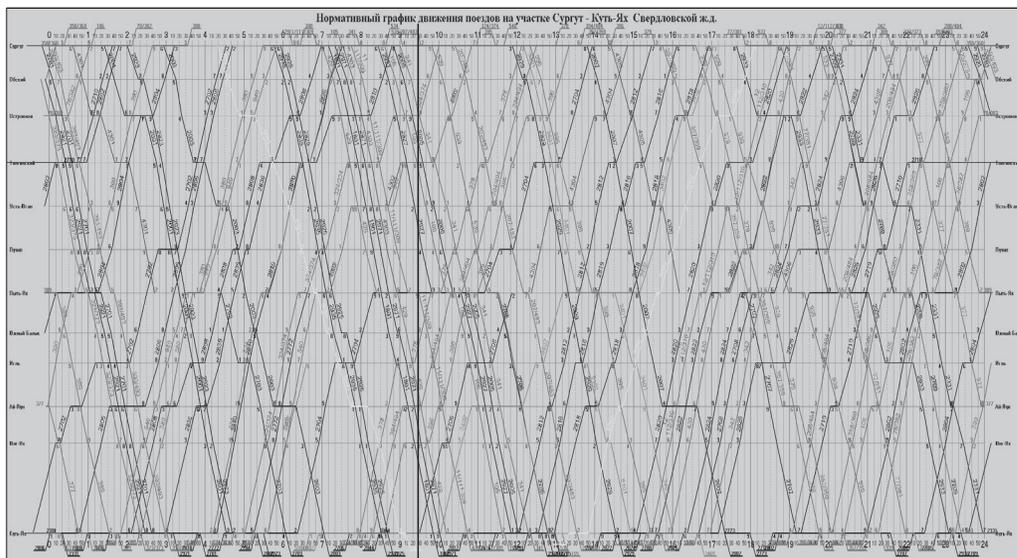


Рис. 5. Максимальный график движения поездов с вертикальным разрезом.

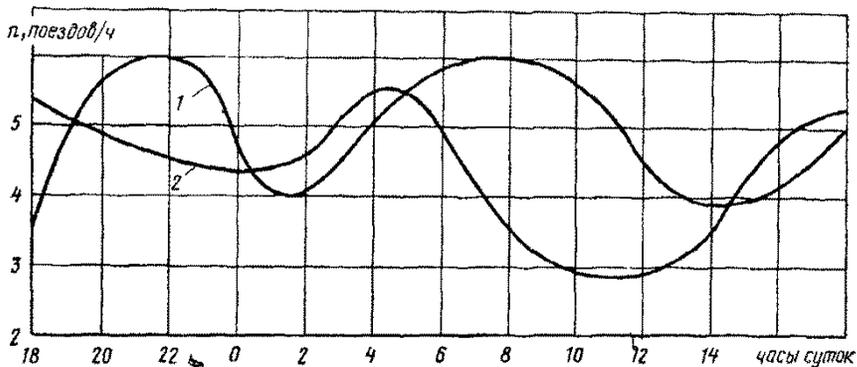


Рис. 6. Изменение интенсивности движения поездов в течение суток: графиковой (1) и фактической (2).

чем больше поездов отправлено на перегон, тем больше будут размеры движения, т. е. с уменьшением межпоездного интервала ( $I$ ) возрастает использование пропускной способности. Однако практика и исследования [3] показали, что интервал между поездами не может быть уменьшен до сколь угодно малой величины. Кроме того, при уменьшении межпоездного интервала увеличивается разрыв между фактической и теоретической пропускной способностью.

Об ошибочности распространенного мнения свидетельствует изменение реакции участка на различные размеры движения поездов. Эта реакция прослеживается через взаимосвязь интенсивностей входящего потока поездов и выходящего с участка транзитного потока. Полученная зависимость интенсивностей входящего и выходящего потоков приведена на рис. 2 [3].

Начальный участок этой зависимости может быть аппроксимирован линейной функцией и соответствует положительной реакции участка на возрастание интенсивности входящего потока поездов, то есть любое увеличение входящего потока приводит к возрастанию выходящего. Участок сохраняет положительную реакцию до тех пор, пока не будет достигнуто состояние насыщения поездами. После этого дальнейшее увеличение интенсивности входящего потока практически не приводит к возрастанию выходящего. При достижении состояния перенасыщения любое увели-

чение интенсивности входящего потока поездов сокращает размер выходящего потока.

Последнее обстоятельство имеет место в тех случаях, когда с ростом числа поездов на участке быстро увеличивается плотность их размещения, следование на зеленое показание светофора все чаще сменяется на желтое и красное (рис. 3). В среднем скорость движения поездов на желтый сигнал на 30%, а на красный — на 60% ниже, чем на зеленое показание светофора. В результате из-за увеличения времени хода  $t_x$  поезда, отправленные на участок (рис. 4), за период  $T$  не успевают прибыть на конечный пункт за расчетный срок. Это имеет большое практическое и теоретическое значение.

На рис. 2 показано, что увеличение числа поездов на участке сверх максимального графика не только не способствует увеличению размеров движения, но и не позволяет выполнить нормативы графика, ухудшает использование пропускной способности участка.

## II.

Максимальные размеры движения могут быть достигнуты регулированием насыщения участков поездами, которое заключается в недопущении нахождения там большего их числа, чем максимально одновременно допускается. Максимальное число поездов, одновременно могущее быть на участке, определяется вертикальным разрезом максимального



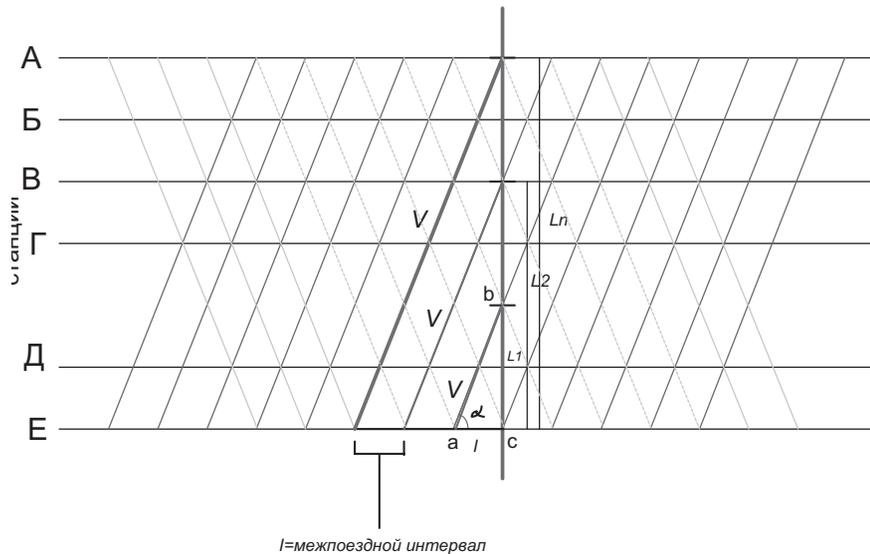


Рис. 7. Фрагмент графика движения четных поездов и тригонометрия вертикального разреза.

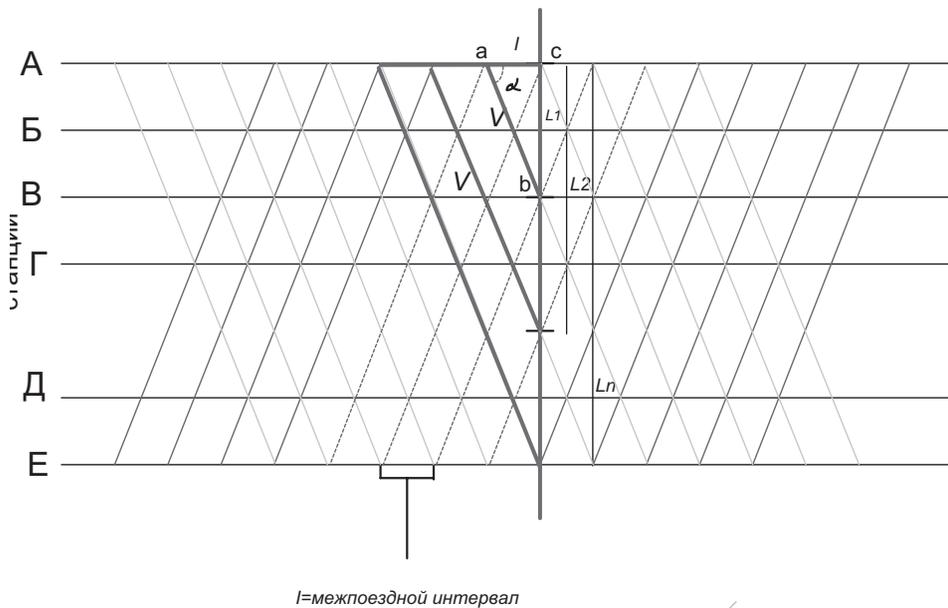


Рис. 8. Фрагмент графика движения нечетных поездов и тригонометрия вертикального разреза.

графика движения. Таковым называется график, в котором нитки поездов проложены с минимальными интервалами. На рис. 5 вертикальный разрез пересекает 10 ниток графика, то есть на этом участке одновременно должно находиться не более 10 поездов.

Но независимо от грузонапряженности для всех участков характерна внутрисуточная неравномерность движения поездов. При разработке графиков ста-

раются это учитывать. Однако вот как выглядит внутрисуточная неравномерность на одном из участков (рис. 6). В период с 18 до 22 ч, после окончания отчетных суток, в графике проложено около 17% ниток, в действительности же отправлено 10–12% поездов суточного количества. Затем реализуемые размеры движения близки к графиковым. К 6 ч утра (время оперативной отчетности) фактические размеры движения превы-

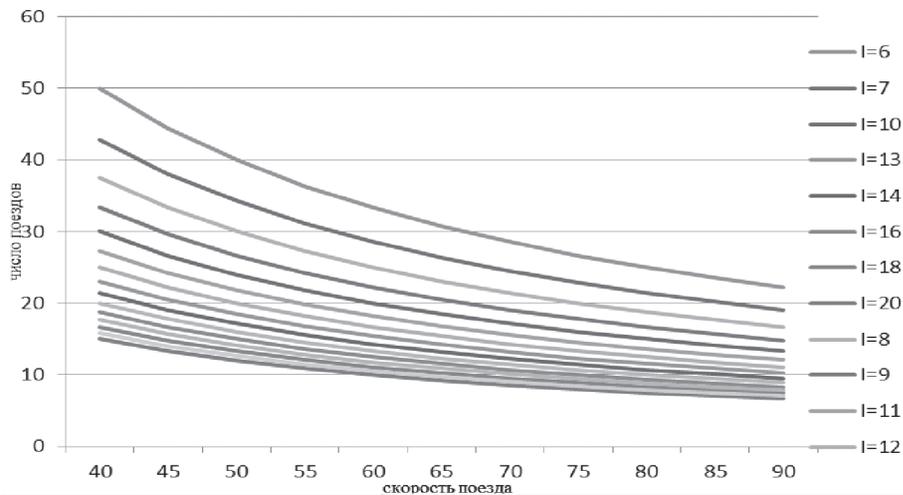


Рис. 9. Влияние скорости движения ( $V$ ) и межпоездного интервала ( $l$ ) на максимальное число поездов, которые одновременно могут находиться на участке ( $N$ ).

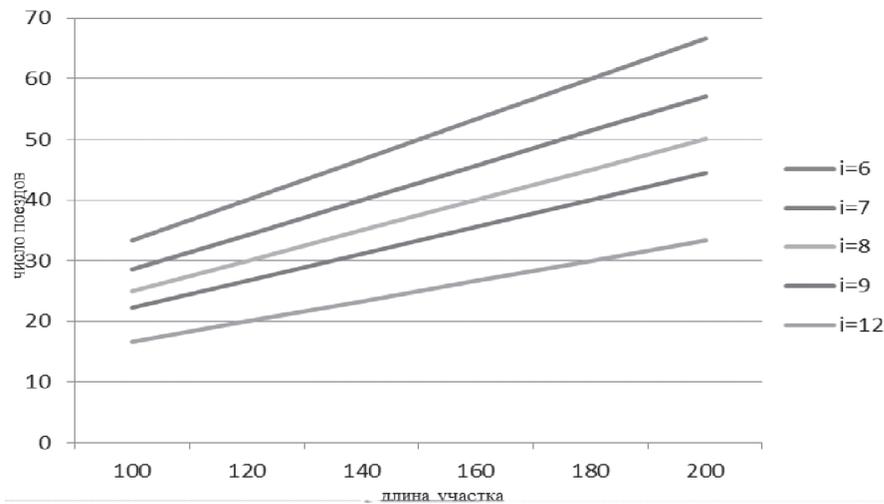


Рис. 10. Зависимость максимального числа поездов, которые одновременно могут находиться на участке, ( $N$ ) от длины участка ( $L$ ).

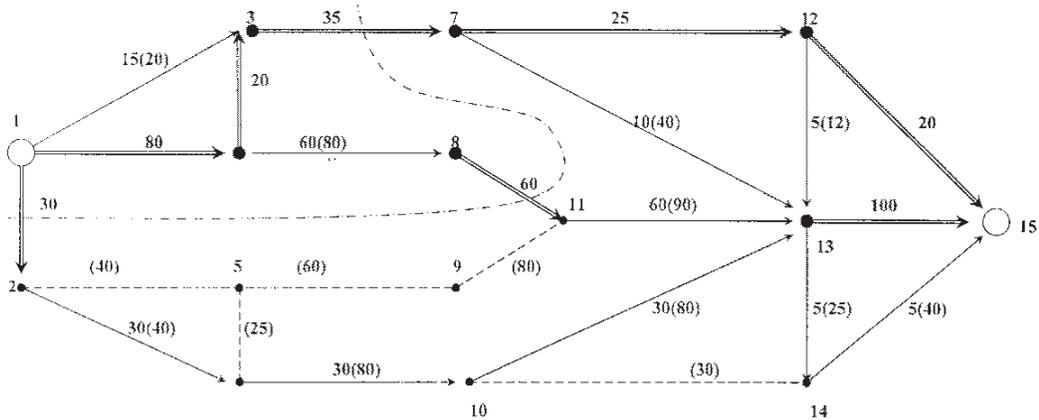


Рис. 11. Граф разветвленного полигона железной дороги.



Распределение поездопотоков на разветвленном полигоне

Размеры потоков поездов/сут	Дополнительные пути следования потоков	Лимитирующие участки	Увеличение пути следования по сравнению с кратчайшим, км
61–90	1–2–5–9–11–13–15	1–2, 11–13	95
91–110	1–3–7–12–15	1–3, 12–15	170
111–115	1–4–3–7–12–13–15	7–12	230
116–120	1–4–3–7–13–15	13–15	250
121–125	1–4–3–7–13–14–15	3–7	310

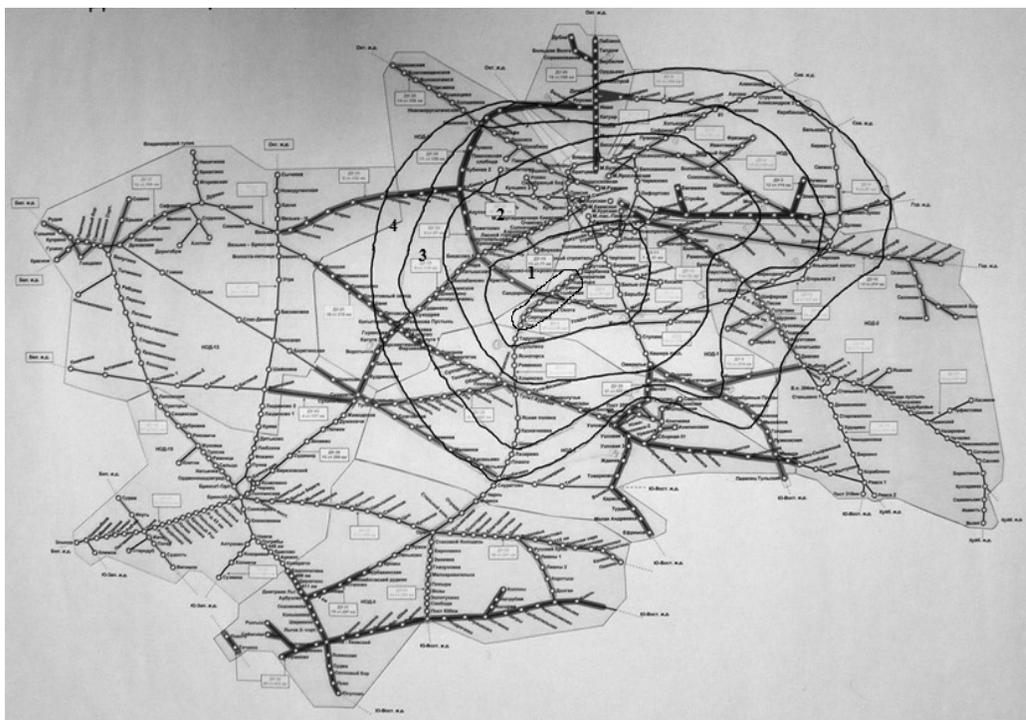


Рис. 12. Часовые пояса на подходе к участку Ока – Силикатная Московской железной дороги.

шают графиковые на 5–8%. В период с 6 до 14 ч фактическое количество грузовых поездов значительно меньше, чем предусматривает график. Перед отчетным часом, в период с 14 до 18 ч, фактическое их количество резко возрастает и превышает графиковые размеры. Это объясняется общепринятым желанием сократить рабочий парк вагонов, сдать в конце отчетных суток на соседние дороги как можно больше поездов.

В связи с неравномерностью прокладки ниток в графике движения поездов в течение суток, различной долей пассажирских и грузовых поездов в часовых периодах и для учета влияния других факторов целесообразно вывести анали-

тическое выражение для определения максимального числа поездов, которое одновременно может находиться на участке.

Рассмотрим вариант участка при параллельном двухпутном графике. На рис. 7 в прямоугольном треугольнике  $abc$  наклон гипотенузы  $ab$  (нитка графика) характеризует скорость движения поездов и определяет острый угол  $\alpha$ . Катет  $ac$  соответствует межпоездному интервалу. Катет  $bc$  – доля вертикального разреза, приходящаяся на один поезд ( $L_1$ ). Тригонометрическая функция острого угла  $\alpha$  отношения противолежащего катета  $bc$  к прилежащему  $ac$  соответствует тангенсу  $tg \alpha$ . Решение прямо-

Таблица 2

Фрагмент графика поездопотоков

Участки	18	19	20	21	22	23	24
Александров – Орехово-Зуево	2/1	2/2	2/3	3/2	1/2	2/1	
Орехово-Зуево – Куровская	1/1	3/1	2/3	4/2	1/3	2/2	
Куровская – Черусти	3/5	4/2	2/1	2/3	1/4	5/2	
Куровская – Воскресенск	2/1	1/1	3/1	2/4	2/2	1/2	
Воскресенск – Рыбное	2/3	3/1	1/4	2/1	3/2	1/2	
Воскресенск – Бекасово	4/5	3/6	7/4	4/6	7/5	6/4	

угольного треугольника  $abc$  в железнодорожных обозначениях:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{L_1}{I} = V_x,$$

$$\text{или } L_1 = I \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

$$L_2 = 2I \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

...

$$L_n = n'' I \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

$$n'' = \frac{L_n}{I \cdot \operatorname{tg} \alpha}$$

$$\text{или } n'' = \frac{L_n}{I \cdot V_x},$$

где  $n''$  – максимальное количество поездов для четного направления;  $L_n$  – длина участка (вертикальный разрез);  $I$  – минимальный межпоездной интервал;  $V_x$  – ходовая скорость поездов.

Аналогично решается эта задача при определении максимального числа нечетных поездов, которые одновременно могут находиться на участке при параллельном двухпутном графике (рис. 8).

$$n' = \frac{L_n}{I \cdot V_x},$$

где  $n'$  – максимальное число поездов, которые одновременно могут находиться на участке в нечетном направлении.

Затем сложим максимальное число поездов в четном и нечетном направлениях и получим формулу максимального числа поездов, которые одновременно могут быть на участке при параллельном двухпутном графике:

$$N = 2 \left[ \frac{L}{I \cdot V_x} \right],$$

где  $N$  – максимальное число поездов, которые одновременно могут находиться

на участке;  $L$  – длина участка (вертикальный разрез);  $I$  – минимальный межпоездной интервал;  $V_x$  – ходовая скорость поездов.

### III.

Исследование факторов, влияющих на максимальное число поездов, которые одновременно могут находиться на участке, показало, что при повышении скорости движения поездов и увеличении межпоездных интервалов уменьшается максимально допустимое число поездов на участке (рис. 9).

Максимальное число поездов, могущих одновременно быть на учитываемом отрезке пути, возрастает прямо пропорционально длине участка (рис. 10).

Для недопущения перенасыщения участков поездами, то есть превышения максимально возможного числа поездов, необходимо регулировать насыщение участков. Эта задача должна решаться на стадиях сменно-суточного и текущего планирования поездной работы.

При сменно-суточном планировании эксплуатационной работы важно не допустить приема с соседних дорог больше поездов, чем допускает пропускная способность участков. Для этого представим схему дороги в виде графа (рис. 11), на котором станции показаны вершинами, а участки – ребрами с соответствующей пропускной способностью. Выделим важнейшие междорожные стыки приема и сдачи поездов и одну из вершин назовем источником (1), а другую – стоком (15). Железные дороги имеют более двух стыковых пунктов с соседними дорогами. Чтобы использовать существующие алгоритмы решения задач о потоках в сетях, несколько источников и стоков представим одним дополни-





тельным (фиктивным) источником и одним дополнительным (фиктивным) стоком. При этом добавляются новые ориентированные ребра, ведущие из дополнительного источника во все существующие источники, а также ориентированные ребра, ведущие из каждого стока в дополнительный сток и имеющие бесконечно большие пропускные способности.

Возьмем разветвленную сеть железной дороги, изображенную на рис. 11, на которой пронумерованы станции и указана пропускная способность участков. Двойной линией выделены участки с максимальным использованием пропускной способности, одной линией — участки с резервом пропускной способности и пунктирной линией — участки, не используемые для пропуска транзитного потока поездов.

Максимальная величина потока на полигоне железной дороги, изображенной сетью, ограничена наличной пропускной способностью входящих в разрез (штрихпунктирная линия) участков (между станциями 1 и 15) и равна:

$$n = n_{1-2} + n_{3-7} + n_{8-11} = 30 + 35 + 60 = 125 \text{ (поездов).}$$

Таким образом, согласованный между железными дорогами прием поездов на стадии сменно-суточного плана не должен превышать 125 поездов.

По кратчайшему пути между станциями 1 и 15 (рис. 11) максимально может быть пропущен поток 60 поездов/сутки. В оперативных условиях при временном возрастании потока или уменьшения пропускной способности участков весь заданный поток не может быть пропущен по кратчайшему пути. И тогда возникает вопрос о нахождении промежуточной величины заданного потока между общим максимальным потоком и следующим только по кратчайшему пути.

#### IV.

Максимальный поток был определен ранее — 125 поездов/сутки. Дополнительные пути следования между станциями 1 и 15 для пропуска потока свыше 60 поездов/сутки приведены в таблице

1. Дополнительный поток по кружному пути увеличивает общий поток между заданными станциями до загрузки лимитирующих участков, равной их пропускной способности. После этого среди оставшихся путей следования находится кратчайший, и так до тех пор, пока между заданными станциями будут использованы все пути и достигнут общий максимальный поток. Надо при этом отметить, что под кратчайшим понимается экономически эффективный путь.

Таблица 1 может заблаговременно строиться для полигонов дорог и сети и использоваться в оперативном планировании и управлении поездной работой.

При сменно-суточном планировании с помощью такой таблицы можно проверить:

— не превышает ли заявленная соседними дорогами сдача поездов максимального потока; при превышении часть поездов должна сдаваться по другим междорожным стыкам;

— не превышает ли заявленная соседними дорогами сдача поездов пропускной способности кратчайшего направления; при превышении выбираются кружные пути направления поездов.

Для оперативного планирования подхода поездов к каждому участку целесообразно на прилегающих участках строить часовые пояса (рис. 12), время хода поездов по которым составляет 1 час. Дислокация поездов в том или ином часовом поясе определяет время хода до рассматриваемого участка и прогноз поступления. Например, все поезда, находящиеся в четвертом часовом поясе, определяют прогноз подхода поездов к участку Ока — Силикатная через 4 часа. Такой прогноз позволяет дорожному диспетчеру предвидеть насыщение участков поездами, заблаговременно принимать регулировочные меры и перейти к управлению поездопотоками (число поездов за 1 час). Тогда на графике исполненного движения целесообразно на горизонтальной оси (координаты времени) наносить не 10-минутные интервалы (столбцы), а часовые, в которых дробью записывать число поездов в четном и нечетном направлениях (таблица 2). По вертикали

наносятся участки, входящие в дорожный диспетчерский круг.

В отличие от существующих графиков исполненного движения, на которых фиксируются прошедшие события, в предлагаемый график вносятся прогнозные поездопотоки. Дорожный диспетчер получает возможность заблаговременно сравнивать прогнозные размеры движения с максимально допустимым числом поездов, которые одновременно могут находиться на участке. При прогнозе перенасыщения участка поездами диспетчер успевает не допустить этого. Чем больше глубина прогноза, тем эффективнее можно управлять поездопотоками.

Чтобы не допустить перенасыщения участков поездами, лучше всего при планировании состава образования на сорти-

ровочных станциях (еще до прибытия туда вагонов) заблаговременно сопоставлять предстоящее число формируемых составов и возможности пропуска их на каждом направлении. Помимо прочего, это позволит при возникновении заторов оперативно ликвидировать их.

*Главное же — дороги получают средство регулирования, приведения в соответствие планируемых размеров движения поездов и пропускной способности участков, создания оптимальных условий для выполнения существующих графиков.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. — М.: ТрансинфоЛТД, 2011.
2. Deutsche Bahn. Fernzüge rollen dem Fahrplan hinterher// Stern, 24 Januar 2008.
3. Левин Д. Ю. Оптимизация потоков поездов. — М.: Транспорт, 1988. — 175 с. ●

## WHAT IS NECESSARY TO RESPECT THE SCHEDULE?

**Levin, Dmitry Yu.** — Ph.D. (Tech), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

**Aung Hein Zaw** — Ph.D. student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Myanmar.

**Shmal, Vadim N.** — Ph.D. (Tech), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

*The problem of respect of the train schedules is important for railways of different countries. It is insufficient to compose the schedule, it is necessary to create and to maintain the optimum conditions for it should be respected. Analysis of fulfillment of schedules and of some mathematical applications used for traffic control and planning shows that there are some less known regular occurrences, useful to plan and assess the density of train flows. For instance there is a widely spread opinion, based on standard equation, that if more trains pass by a given leg then the volume of traffic is bigger. Or less is the interval between the trains, more is traffic capacity use ratio. Practices and researches show meanwhile that the interval*

*between the trains can't be reduced to arbitrarily small value. Besides, while the inter-train interval reduces, the gap between the actual and idealized traffic capacity grows. The study defines factors to be considered while creating conditions for schedule respect at the branched track divisions. Some tools to control super-density of trains at the track divisions and to optimize the regulations in effect on the freight and passenger traffic are proposed. The whole system of proposed equations and algorithms is aimed at respecting of schedules rather than on scheduling itself.*

*The tools are proposed to adjust and to make conform to each other the planned volumes of traffic and the traffic capacity of the legs.*

**Key words:** railway, traffic schedule, optimization, distribution of train flows, acceptable number of trains, control of train density, time zone, planning by 24 hours and by teams.

## REFERENCES

1. Regulations of technical maintenance of the railways of Russian Federation [*Pravila tehnicheckoy ekspluatatsii zheleznyh dorog Rossiyskoy Federatsii*]. Moscow, Transinfo ltd., 2011.

2. Deutsche Bahn. Fernzüge rollen dem Fahrplan hinterher. Stern, 24 Januar 2008.

3. Levin, D. Yu. Optimization of Train Flows [Levin, D. Yu. Optimizatsiya potokov poezdov]. Moscow, Transport publ., 1988. 175 pp.

Координаты авторов (contact information): Левин Д. Ю. (Levin, D. Yu.) – levindu@yandex.ru, Аунг Хейн ЗО (Aung Hein Zaw) – aunghein Zaw46@gmail.com, Шмель В. Н. (Shmal, Vadim N.) – vadim@Shmal.tk  
Статья поступила в редакцию / received 05.06.2012  
Принята к публикации / accepted 03.09.2012

