



Способ нахождения укрупнённых железных дорог



Виктор ИВНИЦКИЙ

Victor A. IVNITSKY

Method of Finding Solutions to Enlarge Railways

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 12)

Автор обосновывает рациональность укрупнения железных дорог в условиях, когда растёт уровень их технической оснащённости, автоматизации процессов управления и возможностей консолидировать производственные ресурсы, благодаря прогрессирующей транспортно-логистической системе глобализации сетевых технологий. Предлагаемый при этом метод рангового позиционирования дорог, выбора оптимизирующих оценки критериев апробируется на системных и доказуемых примерах.

Ключевые слова: модернизация, научно-технический прогресс, автоматизированные системы управления, укрупнённая железная дорога, методика, подходы.

Ивницкий Виктор Аронович – доктор физико-математических наук, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

Тенденцией реформирования железных дорог в мире [напр., 1] стали различные преобразования на основе стремительно прогрессирующих вычислительных средств и автоматизированных систем [напр., 2], направленные на повышение конкурентоспособности за счёт развития инфраструктуры [3], оптимизацию железнодорожной сети и транспортно-логистических узлов с учетом факторов доступности [4–9]. Для российских железных дорог при этом особую актуальность приобрела проблема реформирования дорог посредством их укрупнения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть имеются N железных дорог и они последовательно пронумерованы от 1 до N . Междорожные корреспонденции описываются усреднённой матрицей $B = ((b_{ij}))$ поездопотоков за сутки, где i – номер дороги отправления, j – номер дороги назначения, b_{ij} – средняя величина поездопотока с дороги отправления i на дорогу назначения j . Ставится задача укрупнения железных дорог для более эффективного управления поездопотоками. Материальной основой перестройки являются: 1) существенное развитие вычислительных средств, используемых на

Данные о смежности железных дорог

1	Октябрьская – Московская – Северная
2	Московская – Октябрьская – Северная – Куйбышевская – Горьковская
3	Горьковская – Московская – Северная – Куйбышевская – Свердловская
4	Северная – Октябрьская – Горьковская – Московская
5	Северо-Кавказская – Юго-Восточная – Приволжская
6	Юго-Восточная – Московская – Приволжская – Куйбышевская
7	Приволжская – Куйбышевская – Северо-Кавказская – Юго-Восточная
8	Куйбышевская – Московская – Юго-Восточная – Приволжская – Южно-Уральская – Горьковская
9	Свердловская – Горьковская – Южно-Уральская – Западно-Сибирская
10	Южно-Уральская – Приволжская – Куйбышевская – Свердловская – Западно-Сибирская
11	Западно-Сибирская – Южно-Уральская – Свердловская – Красноярская
12	Красноярская – Западно-Сибирская – Забайкальская
13	Забайкальская – Красноярская – Восточно-Сибирская
14	Восточно-Сибирская – Забайкальская – Дальневосточная
15	Дальневосточная – Восточно-Сибирская

железнодорожном транспорте, увеличение их количества, чтобы автоматизировать перевозочный процесс; 2) значительный рост автоматизированных систем управления, что позволяет ускорить выполнение операций транспортного обслуживания; 3) укрупнение полигона управления, объединение тем самым под единым началом большого числа объектов.

По большому счёту надо ставить в этом плане цель найти оптимальное число из имеющегося состава. В качестве критерия можно взять, к примеру, минимальный обмен поездами между дорогами или минимальную стоимость перевозки единицы веса груза при разных ограничениях, в том числе ограничении на объём грузовой работы. Но реализовать такой план весьма сложно. Поэтому ограничимся лишь поиском рационального метода нахождения укрупнённых железных дорог (УЖД).

К исходным данным для решения задачи УЖД относится матрица корреспонденций $A = ((a_{ij}))$ (с i -й железной дороги на j -ю, включая и транзитные поездопотоки с дороги отправления на дорогу назначения за сутки). Должны соблюдаться прежде всего три требования:

1. Железные дороги, претендующие считаться укрупнёнными, обязаны иметь общие границы. То есть поезд, проходящий по УЖД, не может даже временно выходить за её границы на другие, ей подобные.

2. Укрупнение железных дорог не должно быть слишком малозначимым, чтобы

эффект от него был не очень заметен, и не может оказаться слишком большим, чтобы грозить потерей управляемости. Иными словами, укрупнение призвано соответствовать прогрессу вычислительных средств и автоматизированных систем, управляющих процессами перевозок, то есть отвечать современному растущему уровню руководства.

3. Все УЖД по своим масштабам не должны резко отличаться друг от друга.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ КОНСТРУКЦИИ

Введём показатель «суммарный обмен поездопотоками внутри одной УЖД». Исходя из его смысла, укрупнённые дороги не должны слишком отличаться друг от друга: максимум показателя по всем УЖД не может превышать его же минимум в 1,5–1,9 раза. Это необходимо, чтобы условные партнёры и конкуренты работали в близких режимах, ибо добиться равенства показателя невозможно, потому что исходные дороги нельзя разрезать на части.

По атласу железных дорог для каждой из 15 (исключаем из рассмотрения Калининградскую железную дорогу) определяем смежные с ней (имеющие общие границы) и записываем эти данные в таблицу 1.

В качестве исходных данных используется междорожная шахматка грузопотоков за 2014 год. Далее сначала располагаем все дороги в порядке уменьшения суммарной погрузки – таблица 2, а потом относительно выгрузки – таблица 3.





Таблица 2

Таблица суммарной погрузки по железным дорогам

Номер	Наименование железной дороги	Суммарная погрузка на дороге (число поездов в сутки)
1	Западно-Сибирская (Зсб)	117,1
2	Свердловская (Свр)	68,4
3	Южно-Уральская (Юур)	55,8
4	Октябрьская (Окт)	52,4
5	Куйбышевская (Кбш)	50,7
6	Юго-Восточная (Ювс)	34,2
7	Московская (Мск)	34,1
8	Северная (Сев)	33,1
9	Красноярская (Крс)	31,9
10	Восточно-Сибирская (Всб)	28,93
11	Приволжская (Прв)	28,9
12	Горьковская (Грк)	20
13	Северо-Кавказская (Скв)	16,9
14	Дальневосточная (Двс)	10,1
15	Забайкальская (Заб)	5,6
	Суммарная погрузка на сети	588,13

Таблица 3

Суммарная выгрузка по железным дорогам

Номер	Наименование железной дороги	Суммарная выгрузка на дороге (число поездов в сутки)
1	Октябрьская (Окт)	113,9
2	Московская (Мск)	70,2
3	Северо-Кавказская (Скв)	61,3
4	Дальневосточная (Двс)	60,0
5	Свердловская (Свр)	36,2
6	Юго-Восточная (Ювс)	32,3
7	Южно-Уральская (Юур)	31,6
8	Северная (Сев)	25,4
9	Западно-Сибирская (Зсб)	23,7
10	Горьковская (Грк)	21,4
11	Приволжская (Прв)	16,8
12	Куйбышевская (Кбш)	15,6
13	Забайкальская (Заб)	12,0
14	Восточно-Сибирская (Всб)	10,7
15	Красноярская (Крс)	8,3

АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛИГОНОВ МЕЖДОРОЖНЫХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ

1. Назовём количество поездов в сутки по данным междорожной шахматки поездопотоков. Поездопоток – это вектор, состоящий из трёх компонент: число поездов в сутки, наименование дороги отправления, наименование дороги назначения.

2. Расположим все элементы междорожной шахматки поездопотоков по убыванию числа поездов в сутки. Назовём получивший-

ся ряд последовательностью убывания поездопотоков.

3. Первый шаг – берём максимальный элемент этой последовательности. По строке, которая его содержит, определяем железную дорогу, которая его отправляет (пункт отправления), и по столбцу, в котором он находится, называем дорогу, куда он следует (пункт назначения).

4. По таблице 1 смежности железных дорог и атласу находим кратчайший маршрут следования (в км) от дороги отправления до дороги назначения. Для краткости назовём

его полигоном междорожных корреспонденций поездопотоков, а поток поездов, следующий по этому маршруту, начальным поездопотоком от дороги отправления до дороги назначения.

5. По междорожной шахматке находим поездопотоки, следующие по маршруту начального поездопотока (возможно, частями по промежуточным дорогам). Назовём такие промежуточными поездопотоками.

6. Возможны поездопотоки, которые по кратчайшему пути следуют на дорогу назначения через дорогу отправления. Назовём эти поездопотоки попутными.

7. Беря начальный поездопоток со всеми его промежуточными и попутными вариантами, получаем суммарный поездопоток от дороги отправления до дороги назначения, который можно считать мощностью полигона междорожных корреспонденций.

8. Константируем: выделен полигон междорожных корреспонденций поездопотоков на направлении «дорога отправления — дорога назначения» и определена его мощность для максимального элемента междорожной шахматки поездопотоков.

9. Второй шаг — берём следующий по величине элемент последовательности убывания поездопотоков при условии, что он не входит в полигон, определяемый максимальным элементом междорожной шахматки поездопотоков. Это же условие должно соблюдаться и для всех последующих выбираемых элементов междорожной шахматки. Кроме того, следующий по величине элемент последовательности убывания поездопотоков берётся при условии, что его дорога назначения не является для него смежной.

10. Повторяя для обозначенного элемента пункты 3–6 приведённого алгоритма, находим следующий полигон междорожных корреспонденций поездопотоков на направлении «дорога отправления — дорога назначения» и его мощность и т.д.

11. Располагаем мощности полигонов междорожных корреспонденций поездопотоков на направлении «дорога отправления — дорога назначения» в порядке убывания.

12. Задавая порог мощности, ниже которого учитывать мощности полигонов нецелесообразно, выделяем значимые полигоны междорожных корреспонденций, которые будут далее учитываться при формировании укрупнённых железных дорог.

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ УЖД

1. Сначала рассмотрим случай сети железных дорог, в которой есть ветвь, представляющая собой одну линию, по которой последовательно располагаются железные дороги. На этой линии каждая дорога имеет только две смежные дороги, а именно, дорога, ей предшествующая, и дорога, расположенная после неё. Если эта линия подходит к границе сети, то последняя дорога имеет только предшествующую ей дорогу. Назовём такое расположение дорог линейным. Тогда полигон междорожных корреспонденций поездопотоков для линейного расположения дорог можно выделить в одну или несколько укрупнённых железных дорог. Это зависит от мощности такого полигона. Если мощность соответствует современным автоматизированным системам, управляющим перевозками, и качество потенциальных руководителей удовлетворяет требованиям, предъявляемым к руководителям УЖД, то целесообразно выделить этот полигон в одну укрупнённую железную дорогу. Если же мощность в разы превышает возможности качественного управления, то полигон стоит разделить на несколько УЖД.

2. Перейдём к рассмотрению ветвей сети железных дорог, которые содержат в себе несколько линий. В этом случае анализируем дороги назначения. Если на одну такую крупную дорогу следует значительная часть поездопотоков с разных достаточно крупных железных дорог, но смежных между собой, то они могут войти в состав одной укрупнённой, если та удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ней и её будущему руководителю.

3. Укрупнённая железная дорога может иметь поездопотоки не только на одну, но и на несколько дорог назначения.

4. Ни одна из рассматриваемых железных дорог не может входить в состав двух и более укрупнённых железных дорог.

5. Пункт 4 требует тщательного рассмотрения, так как здесь возможны разные варианты вхождения железной дороги в состав той или иной укрупнённой железной дороги.

6. Наиболее подходящим вариантом вхождения железной дороги в состав укрупнённой является тот вариант, при котором максимизируется суммарное количество внутренних поездопотоков, входящих в каждую укрупнённую железную дорогу.





ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ПОЛИГОНОВ

1. Составим перечень элементов в железнодорожной шахматке поездопотоков по убыванию их величин: Зсб→Двс = 30, Зсб→Окт = 27, Свр→Окт = 21,7, Сев→Окт = 18,6, Зсб→Мск = 18,3, Юур→Свр = 17,8, Прв→Скв = 14,2, Окт→Сев = 13,2, Зсб→Ювс = 12,6, Кбш→Скв = 11,4, Ювс→Мск = 11,4, Юур→Кбш = 10,6, Кбш→Окт = 10,4, Мск→Окт = 9,6, Ювс→Скв = 9,1, Зсб→Юур = 8,9, Грк→Окт = 8,4. Здесь цифра указывает, сколько в этом направлении ежедневно в среднем уходит поездов.

2. Найдём максимальный элемент в железнодорожной шахматке поездопотоков. В соответствии с пунктом 3 алгоритма им является поездопоток Зсб→Двс. Начальный поездопоток на направлении – 30 поездов в сутки. Промежуточные поездопотоки составляют $26,6 + 10,9 = 37,5$ поездов, попутные со всех дорог, кроме Зсб, Крс, Всб, Заб, следуют на Двс через Зсб, и они набирают 13,9 поездов в сутки. Тогда мощность поездопотока Зсб→Двс: $30 + 37,5 + 13,9 = 81,4$ состава в сутки.

3. Следующий по убыванию элемент в железнодорожной шахматке поездопотоков – 27 поездов в сутки. В соответствии с пунктом 3 алгоритма – это Зсб→Окт. Промежуточные поездопотоки: Юур→Окт – 4,7; Свр→Окт – 21,7; Грк→Окт – 8,4; Сев→Окт – 18,6; Зсб→Грк – 1,5; Зсб→Сев – 2,3; Юур→Грк – 4,1; Юур→Сев – 1,2; Свр→Грк – 5; Свр→Сев – 2,3. Суммарный промежуточный поездопоток – 70 поездов в сутки. Попутный поездопоток – 2,6. И тогда мощность поездопотока Крс, Зсб, Юур, Свр→Грк, Сев, Окт будет составлять $27 + 70 + 2,6 = 99,6$ поездов в сутки.

4. В соответствии с п. 9 алгоритма выделения полигонов железнодорожных корреспонденций поездопотоки Свр→Окт (21,7), Грк→Окт (8,4), Сев→Окт (18,6) уже нельзя использовать. Следующий по убыванию элемент – 18,3 поездов в сутки. В соответствии с пунктом 3 алгоритма – это Зсб→Мск. Промежуточные поездопотоки: Юур→Мск = 3,6, Свр→Мск = 6,0, Юур→Кбш = 10,6, Кбш→Мск = 3,5. В сумме имеем 23,7. Попутные поездопотоки: Крс, Всб, Заб, Двс→Мск = 5,3. Тогда мощность поездопотока Зсб→Мск: $18,3 + 23,7 + 5,3 = 47,3$ поездов в сутки.

5. Следующие элементы по убыванию Юур→Свр = 17,8, Прв→Скв = 14,2, Окт→Сев = 13,2 нельзя использовать в силу п. 9 алгоритма выделения полигонов. Остаётся брать элемент Зсб→Ювс. Начальный поездопоток здесь 12,6. Промежуточный суммарный: $1,8 + 1,3 + 2,3 = 5,4$. Попутный суммарный: 0,3. Мощность поездопотока Зсб→Ювс составляет 18,3. Далее, поскольку Ювс, Прв Скв смежные между собой, целесообразно рассматривать суммарный поток с Зсб на полигон Ювс, Прв и Скв. Тогда остаётся найти мощности поездопотоков Зсб→Скв и Зсб→Прв и прибавить их к мощности поездопотока Зсб→Ювс. В итоге получаем: $18,3 + 30,7 + 6,9 = 55,9$.

6. Следующие элементы по убыванию: Кбш→Скв = 11,4 уже использовался в п. 5; Ювс→Мск = 11,4 входит в поток Юг→Мск, который равен 18,5, т.е. слишком мал по сравнению с другими поездопотоками; Юур→Кбш = 10,6 есть в полигоне п. 4. Тогда на очереди Кбш→Окт. Он входит в полигон (Юг–Северо-Запад): Скв, Прв, Ювс, Мск, Кбш→Окт, Сев. Сначала рассмотрим суммарный поездопоток Скв, Прв, Ювс, Мск, Кбш→Окт: $9,6 + 10,4 + 07 + 2,8 + 5,4 = 28,9$. Затем Скв, Прв, Ювс, Мск, Кбш→Сев: $1,6 + 0,4 + 1,8 + 0,7 + 1,3 = 5,8$. Суммарный поездопоток равен 34,7.

7. Фиксируемые поездопотоки между тремя смежными дорогами Скв, Прв, Ювс (полигон Юг) составляют 36,8 поездов/сутки. Через полигон проходит также часть железнодорожного поездопотока полигона Юг–Центр (Скв, Прв→Сев, Окт) и полигона Восток–Юго-Запад (Крс, Зсб, Юур→Скв, Ювс). Всего железнодорожных корреспонденций 72,6 поездов/сутки.

8. В среднем поездопотоки между тремя смежными дорогами Зсб, Юур, Свр составляют 43 поездов/сутки. Через полигон также следуют корреспонденции направлений: В–СЗ (Крс, Зсб→Окт, Зсб→Грк, Зсб→Сев, Юур→Грк, Юур→Сев) = 38,7; В–Ц (Крс, Зсб→Мск, Кбш) = 51,2, В–ЮЗ (Крс, Зсб→Прв, Скв, Ювс) = 39,5. Всего железнодорожных корреспонденций – 129,4 поездов/сутки.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА УЖД

1. Объединяем два поездопотока: 1) восток (В) на северо-запад (СЗ) европейской

части России – Крс, Зсб, Юур, Свр→Грк, Сев, Окт; 2) восток (В) в центр (Ц) европейской части России – Крс, Зсб, Юур, Свр, Кбш→Мск. Это целесообразно потому, что исходные дороги почти те же самые, только из второго поездопотока добавляется Кбш. Ещё изменение: в конечные дороги из второго поездопотока добавляется Мск. Оба варианта достаточно естественные. Тем более, что поток с Зсб на Окт немного проходит и по Мск. В этом плане Мск всё-таки связана с Грк, Сев, Окт, в том числе она граничит со всеми тремя дорогами.

Объединённый поездопоток из исходных дорог Крс, Зсб, Юур, Свр, Кбш на конечные дороги будет иметь мощность 97,8 для первого поездопотока и 36,7 для второго (общая мощность составляет $134,5+62,2$ (внутренний поездопоток между Зсб, Юур, Свр, Кбш) = 196,7). К преимуществу такого подхода относится то обстоятельство, что в результате можно сформировать две сильные укрупнённые дороги: первая состоит из исходных дорог Зсб, Юур, Свр, Кбш, а вторая – из конечных дорог Мск, Грк, Сев, Окт. Вместе они будут обслуживать самый крупный поездопоток на территории Российской Федерации. Внутренний обмен поездопотоками для первой составляет 66,4, для второй – 44,0.

2. Следующий по мощности полигон Зсб→Двс: $31,4 + 35,5 + 3,9 = 70,8$ поездов в сутки (Зсб, Крс, Всб, Заб, Двс). Так как Зсб уже попала в первую укрупнённую, то она удаляется, и третья укрупнённая железная дорога получает себе Крс, Всб, Заб, Двс. Её внутренний обмен поездопотоками 40,8 поездов в сутки, а общий – 111,6.

3. Ещё один полигон – Зсб, Свр, Юур, Кбш→Прв, Скв, Ювс – имеет мощность поездопотока $18,3 + 30,7 + 6,9 = 55,9$. Четвёртую укрупнённую железную дорогу формируем в составе Прв, Скв, Ювс. Междорожные корреспонденции внутри неё – 36,8 поездов в сутки. В сумме получаем 92,7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен рациональный метод решения важной в настоящее время проблемы – укрупнения железных дорог, ко-

торое необходимо производить в связи: а) с существенным развитием как вычислительных средств, используемых на железнодорожном транспорте, так и увеличением их количества; б) со значительным ростом доли автоматизированных систем, управляющих процессами перевозок; в) с укрупнением полигонов управления, совершенствованием ресурсной базы производства.

Метод нахождения рациональных форм организации транспортных структур основан на использовании матрицы междорожных поездопотоков, алгоритмов выделения полигонов корреспонденций, дающих возможность обоснованно выбирать варианты укрупнённых железных дорог.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рачек С. В. Зарубежный опыт реформирования железных дорог // Известия Уральского государственного экономического университета. – 2013. – № 6. – С. 62–66.
2. Wenzel, B. Digitale Planungsprozesse für die Bahnausrüstungstechnik – Barrieren und Ansätze. *Signal + Draht*, 2016, 108, № 7–8, pp. 6–10.
3. Smith, K., Vosman, Q. SŽDC delivers big improvements to Czech network. *International Railway Journal*, published September 07, 2015 [Электронный ресурс]: <https://www.railjournal.com/index.php/europe/szdcdelivers-big-improvements-to-czech-network.html>. Доступ 04.08.2017.
4. Jiao Jingjuan, Wang Jiaoe, Jin Fengjun, Dunford, M. Impacts on accessibility of China's present and future HSR network. *Journal of Transport Geography*, Vol. 40, October 2014, pp. 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.07.004>.
5. Qi Yuanjing, Jin Fengjun, Liu Tao, Jiao Jingjuan. Implementation methods and economic impacts of national node strategies. *Journal of Geographical Sciences* [Acta Geographica Sinica], 2016, Vol. 71 (12), pp. 2103–2118. DOI: 10.11821/dlxb201612003.
6. Jin Fengjun, Jiao Jingjuan, Qi Yuanjing, Yang Yu. Evolution and geographic effects of high-speed rail in East Asia: An accessibility approach. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, Vol. 27, Issue 5, pp. 515–532. <https://doi.org/10.1007/s11442-017-1390-8>.
7. Rotoli, F., Malavasi, G., Ricci, S. Complex railway systems: capacity and utilization of interconnected networks. *European Transport Research Review*, 2016, Vol. 8, 8: 29. DOI 10.1007/s12544-016-0216-6.
8. Rotoli, F., Ricci, S., Navajas Cawood, E., Malavasi, G. Capacity versus punctuality assessment procedures and accessibility measures for rail networks. *Ingegneria Ferroviaria*, 2015, Iss. 12, pp.1011–1040.
9. Ricci, S., Luptak, V., Chovancová, M. Baseline Model to Increase Railway Infrastructure Capacity on a Single-Track Section: a Case Study. *Scientific Journal on Transport and Logistics*, Vol. 8, Iss. 2, pp. 69–80, ISSN (Online) 2336–3037, DOI: <https://doi.org/10.1515/logi-2017-0018>.

Координаты автора: **Ивницкий В. А.** – ivnitsky.viktor@vniizht.ru.

Статья поступила в редакцию 11.04.2017, принята к публикации 04.12.2017.





METHOD OF FINDING SOLUTIONS TO ENLARGE RAILWAYS

Ivnitsky, Victor A., Russian University of Transport, Moscow, Russia.

ABSTRACT

The author justifies the rationality of changing of the existing Russian network of interconnected railways [branches of JSC Russian Railways – *ed. note*] by enlarging certain of them under conditions when the level of their technical equipment, automation of management

processes and possibilities to consolidate production resources are growing thanks to the advancement of transport and logistics system of globalization of network technologies. The proposed method of rank positioning of railways, selection of optimizing criteria evaluation is tested on systemic and provable examples.

Keywords: modernization, scientific and technical progress, automated control systems, enlarged railway, methodology, approaches.

Background. The trend of reforming the railways in the world [e.g., 1] has been implemented in numerous changes based on rapidly progressing computing facilities and automated systems [e.g., 2], focused on enhancement of competitiveness by developing infrastructure [e.g., 3], optimizing railway network and capacity, and transportation logistics nodes with the account for accessibility [e.g., 4–9]. For Russian railways, the problem of reforming railway network, by means of their enlargement has become in the opinion of the author topical.

Objective. The objective of the author is to consider a method of finding solutions of a problem of possible enlargement of some interconnected railways.

Methods. The author uses general scientific and engineering methods, comparative analysis, evaluation approach, mathematical apparatus.

Results.

Problem formulation

Let there be N railways and they are sequentially numbered from 1 to N . Inter-railway correspondence is described by the average matrix $B = ((b_{ij}))$ of train flows per day, where i is the departure railway number, j is the destination railway number, b_{ij} is the average

value of train flows from the departure railway i to the destination railway j . The task is to enlarge the railways for more efficient management of train flows. The material basis of reorganization is: 1) significant development of computing facilities used in railway transport, an increase in their number to automate the transportation process; 2) significant growth of automated control systems, which allows to accelerate implementation of transport services; 3) enlargement of the management polygon, thereby unifying a large number of objects under a unified control.

By and large, it is necessary to set a goal in this plan to find the optimal number from the existing composition. As a criterion, it is possible to take, for example, the minimum exchange of trains between railways or the minimum cost of transporting a unit of cargo weight under various restrictions, including a restriction on the amount of freight work. But it is very difficult to implement such a plan. Therefore, we shall confine ourselves to a search for a rational method for finding enlarged railways (ER).

The matrix of correspondence $A = ((a_{ij}))$ (from the i -th railway to the j -th, including the transit train flows from the departure railway to the destination railway per day), corresponds to the initial data for the solution of ER problem. First of all, three requirements must be observed:

1. That is, a train passing through ER cannot even temporarily go beyond its borders to other similar ER.

2. The enlargement of railways should not be too small, so that the effect from it is not very noticeable, and it cannot be too large to threaten the loss of controllability. In other words, the enlargement is intended to correspond to the progress of computing facilities and automated systems that control the transportation processes, that is, to meet the modern growing level of management.

3. All ER by their scale value should not differ sharply from each other.

Information for design

We introduce the indicator «total exchange of train flows within one ER». Proceeding from its meaning, the enlarged railways should not be too different from each other: the maximum of the indicator for all ER cannot exceed its minimum by 1,5–1,9 times. It is necessary that conditional partners and competitors work under more or less similar modes, because it is impossible to achieve the equality of the indicator, because the original railways cannot be cut into parts.

Using the railway atlas for each of the existing fifteen railways (in the research we don't consider the Kaliningrad railway which is not directly interconnected with the network of other branches of the JSC Russian Railways) we determine those adjacent to it (having common boundaries) and write these data in Table 1.

Table 1

Data on contiguity of railways

1	October – Moscow – North
2	Moscow – October – North – Kuibyshev – Gorky
3	Gorky – Moscow – North – Kuibyshev – Sverdlovsk
4	North – October – Gorky – Moscow
5	North-Caucasian – South-East – Privolzhskaya
6	South-East – Moscow – Privolzhskaya – Kuibyshev
7	Privolzhskaya – Kuibyshev – North-Caucasian – South-East
8	Kuibyshev – Moscow – South-East – Privolzhskaya – South Ural – Gorky
9	Sverdlovsk – Gorky – South Ural – West Siberian
10	South Ural – Privolzhskaya – Kuibyshev – Sverdlovsk – West Siberian
11	West Siberian – South Ural – Sverdlovsk – Krasnoyarsk
12	Krasnoyarsk – West Siberian – Zabaikalskaya
13	Zabaikalskaya – Krasnoyarsk – East Siberian
14	East Siberian – Zabaikalskaya – Far East
15	Far East – East Siberian

Table 2

Table of total loading by railways

Number	Name of railway	Total loading on the railway (number of trains per day)
1	West-Siberian (Zsb)	117,1
2	Sverdlovsk (Svr)	68,4
3	South Urals (Yuur)	55,8
4	October (Oct)	52,4
5	Kuibyshev (Kbsh)	50,7
6	South-East (Yuvs)	34,2
7	Moscow (Msc)	34,1
8	North (Sev)	33,1
9	Krasnoyarsk (Krs)	31,9
10	East Siberian (Vsb)	28,93
11	Privolzhskaya (Prv)	28,9
12	Gorky (Grk)	20
13	North-Caucasian (Skv)	16,9
14	Far East (Dvs)	10,1
15	Zabaikalskaya (Zab)	5,6
	Total loading on the network	588,13

Table 3

Total unloading by railways

Number	Name of railway	Total unloading on the railway (number of trains per day)
1	October (Oct)	113,9
2	Moscow (Msc)	70,2
3	North-Caucasian (Skv)	61,3
4	Far East (Dvs)	60,0
5	Sverdlovsk (Svr)	36,2
6	South-East (Yuvs)	32,3
7	South Urals (Yuur)	31,6
8	North (Sev)	25,4
9	West-Siberian (Zsb)	23,7
10	Gorky (Grk)	21,4
11	Privolzhskaya (Prv)	16,8
12	Kuibyshev (Kbsh)	15,6
13	Zabaikalskaya (Zab)	12,0
14	East Siberian (Vsb)	10,7
15	Krasnoyarsk (Krs)	8,3

The source data used are inter-railway cross reference chart of train traffic (trains/day) for 2014. Then we first place all the railways in order of decreasing the total loading – Table 2, and then regarding unloading – Table 3.

Algorithm for allocation of polygons for inter-railway correspondence

1. We will name the number of trains per day according to the data of the inter-railway cross reference chart of train traffic. Train flow is a vector consisting of three components: the number of trains per day, the name of the departure railway, the name of the destination railway.

2. We arrange all the elements of inter-railway cross reference chart of train traffic in descending

numbers of trains per day. We call the resulting series a sequence of decreasing train flows.

3. The first step is to take the maximum element of this sequence. On the line that contains it, we determine the railway that sends it (the point of departure), and by the column in which it is located, we name the railway where it goes (destination).

4. From Table 1 of contiguity of railways and the atlas, we find the shortest route (in km) from the departure railway to the destination railway. For brevity, let's call it the polygon of inter-railway correspondence of train traffic, and the flow of trains following this route, the initial train flow from the departure railway to the destination railway.



5. From inter-railway cross reference chart, we find trains that follow the route of the initial train flow (possibly by parts along intermediate roads). We call them intermediate train flows.

6. There are possible train flows that follow the shortest path to the destination railway through the departure railway. Let's call them passing train flows.

7. Taking the initial train traffic flow with all its intermediate and passing variants, we get the total train flow from the departure railway to the destination railway, which can be considered the capacity of the polygon of inter-railway correspondence.

8. We declare that a polygon of inter-railway correspondence of train traffic on the direction «departure railway – destination railway» is allocated and its capacity is determined for the maximum element of inter-railway cross reference chart of train traffic.

9. The second step is to take the next largest element of the sequence of decreasing train traffic, provided that it does not enter the polygon determined by the maximum element of the inter-railway cross reference chart of train traffic. The same condition must be observed for all subsequent selectable elements of the inter-railway cross reference chart. In addition, the next largest element of the sequence of decreasing traffic is taken, provided that its destination railway is not adjacent to it.

10. Repeating points 3–6 of the algorithm for the indicated element, we find the next polygon of inter-railway correspondence of train traffic on the direction «departure railway–destination railway» and its capacity, etc.

11. We place capacities of polygons of inter-railway correspondence of train traffic on the direction «departure railway–destination railway» in descending order.

12. Setting the capacity threshold below which it is not appropriate to take into account the capacities of the polygons, we single out the significant polygons of inter-railway correspondence, which will be further taken into account when forming enlarged railways.

Algorithm for ER formation

1. Let's first consider the case of a network of railways, in which there is a branch, which is a single line along which the railways are located sequentially. On this line, each railway has only two adjacent railways, namely, the railway ahead of it, and the railway located after it. If this line approaches the boundary of the network, then the last railway has only the railway that precedes it. Let's call this arrangement of railways linear. Then the polygon of inter-railways correspondence of train traffic for linear location of railways can be identified in one or several enlarged railways. It depends on the capacity of such a polygon. If the capacity corresponds to modern automated systems, controlling transportation, and the quality of potential managers meets the requirements imposed on the managers of ER, it is advisable to single out this polygon in one enlarged railway. If the capacity is several times greater than the possibility of quality management, then the polygon should be divided into several ER.

2. Let's pass to consideration of branches of a network of railways which contain several lines. In this case, we analyze the destination railways. If one such large railway is loaded with a significant part of the train traffic from different sufficiently large railways, and each of them is adjacent to each other,

they can be included in one enlarged railway if it satisfies the requirements imposed on it and its future manager.

3. An enlarged railway can have train flows directed not to a single but to several destination railways.

4. The railway cannot be part of two or more enlarged railways.

5. Point 4 requires careful consideration, since there are different ways in which the railroad can enter the structure of a particular enlarged railway.

6. The most suitable option for the railroad to enter the enlarged one is the option in which the total number of domestic train flows entering each enlarged railway is maximized.

Application of the polygon algorithm

1. We will compile a list of elements in the inter-railway cross reference chart of train traffic in descending order of its value: $Zsb \rightarrow Dvs = 30$, $Zsb \rightarrow Oct = 27$, $Svr \rightarrow Oct = 21,7$, $Sev \rightarrow Oct = 18,6$, $Zsb \rightarrow Msc = 18,3$, $Yuur \rightarrow Svr = 17,8$, $Prv \rightarrow Skv = 14,2$, $Oct \rightarrow Sev = 13,2$, $Zsb \rightarrow Yuvs = 12,6$, $Kbsh \rightarrow Skv = 11,4$, $Yuvs \rightarrow Msc = 11,4$, $Yuur \rightarrow Kbsh = 10,6$, $Kbsh \rightarrow Oct = 10,4$, $Msc \rightarrow Oct = 9,6$, $Yuvs \rightarrow Skv = 9,1$, $Zsb \rightarrow Yuur = 8,9$, $Grk \rightarrow Oct = 8,4$. Here the figure indicates how many trains depart daily on average in this direction.

2. We will find the maximum element in the inter-railway cross chart of train traffic. In accordance with point 3 of the algorithm, it is the train flow $Zsb \rightarrow Dvs$. The initial train traffic on the direction is 30 trains per day. Intermediate train traffic is $26,6 + 10,9 = 37,5$ trains. Passing train flow from all the railways except for Zsb , Krs , Vsb , Zab , follow to Dvs through Zsb , and they comprise 13,9 trains per day. Then the capacity of the train flow $Zsb \rightarrow Dvs$: $30 + 37,5 + 13,9 = 81,4$ trains per day.

3. The next descending element in the inter-railway cross chart of train traffic is 27 trains per day. In accordance with point 3 of the algorithm – this is $Zsb \rightarrow Oct$. Intermediate train traffic flows: $Yuur \rightarrow Oct = 4,7$; $Svr \rightarrow Oct = 21,7$; $Grk \rightarrow Oct = 8,4$; $Sev \rightarrow Oct = 18,6$; $Zsb \rightarrow Grk = 1,5$; $Zsb \rightarrow Sev = 2,3$; $Yuur \rightarrow Grk = 4,1$; $Yuur \rightarrow Sev = 1,2$; $Svr \rightarrow Grk = 5$; $Svr \rightarrow Sev = 2,3$. The total intermediate train traffic is 70 trains per day. Passing train traffic – 2,6. And then the capacity of the train flow Krs , Zsb , $Yuur$, $Svr \rightarrow Grk$, Sev , Oct is $27 + 70 + 2,6 = 99,6$ trains per day.

4. In accordance with point 9 of the algorithm for allocating polygons for inter-railway correspondence, the train flows $Svr \rightarrow Oct (21,7)$, $Grk \rightarrow Oct (8,4)$, $Sev \rightarrow Oct (18,6)$ can no longer be used. The next descending element is 18,3 trains per day. In accordance with point 3 of the algorithm – this is $Zsb \rightarrow Msc$. Intermediate train flows: $Yuur \rightarrow Msc = 3,6$, $Svr \rightarrow Msc = 6,0$, $Yuur \rightarrow Kbsh = 10,6$, $Kbsh \rightarrow Msc = 3,5$. In total we have 23,7. Passing train flows: Krs , Vsb , Zab , $Dvs \rightarrow Msc = 5,3$. Then the capacity of the train flow $Zsb \rightarrow Msc$: $18,3 + 23,7 + 5,3 = 47,3$ trains per day.

5. The following elements in descending order $Yuur \rightarrow Svr = 17,8$, $Prv \rightarrow Skv = 14,2$, $Oct \rightarrow Sev = 13,2$ cannot be used by virtue of point 9 of the polygon allocation algorithm. It remains to take the element $Zsb \rightarrow Yuvs$. The initial train flow is 12,6. Intermediate total train flow: $1,8 + 1,3 + 2,3 = 5,4$. Passing total train flow: 0,3. The capacity of the train flow $Zsb \rightarrow Yuvs$ is 18,3. Further, since $Yuvs$, Prv , Skv are adjacent to each other, it is advisable to consider the total flow from Zsb to the polygon of $Yuvs$, Prv and Skv . Then it remains to find the capacity of train

flows $Zsb \rightarrow Skv$ and $Zsb \rightarrow Prv$ and add them to the capacity of the train flow $Zsb \rightarrow Yuvs$. As a result, we get: $18,3 + 30,7 + 6,9 = 55,9$.

6. The following elements in descending order: $Kbsh \rightarrow Skv = 11,4$ have already been used in point 5; $Yuvs \rightarrow Msc = 11,4$ enters the flow $South \rightarrow Msc$, which is equal to 18,5, i.e. is too small compared to other train flows; $Yuur \rightarrow Kbsh = 10,6$ in the polygon of point 4. Then $Kbsh \rightarrow Oct$ is included in the polygon (South–North–West): $Skv, Prv, Yuvs, Msc, Kbsh \rightarrow Oct, Sev$. First, let's consider the total train flow $Skv, Prv, Yuvs, Msc, Kbsh \rightarrow Oct: 9,6 + 10,4 + 0,7 + 2,8 + 5,4 = 28,9$. Then $Skv, Prv, Yuvs, Msc, Kbsh \rightarrow Sev: 1,6 + 0,4 + 1,8 + 0,7 + 1,3 = 5,8$. The total train flow is 34,7.

7. Inter-railway train traffic between three adjacent roads $Skv, Prv, Yuvs$ (polygon South) is 36,8 trains/day. A part of the inter-railway train flow of South–Center polygon ($Skv, Prv \rightarrow Sev, Oct$) and East–South–West polygon ($Krs, Zsb, Yuur \rightarrow Skv, Yuvs$) passes through the polygon. Total inter-railway correspondence is 72,6 trains/day.

8. Average inter-railway train traffic between three adjacent roads $Zsb, Yuur, Svr$ is 43 trains/day. The polygon also accumulates correspondences of the directions: East–North–West ($Krs, Zsb \rightarrow Oct, Zsb \rightarrow Grk, Zsb \rightarrow Sev, Yuur \rightarrow Grk, Yuur \rightarrow Sev$) = 38,7; East–Center ($Krs, Zsb \rightarrow Msc, Kbsh$) = 51,2, East–South–West ($Krs, Zsb \rightarrow Prv, Skv, Yuvs$) = 39,5. Total inter-railway correspondence is 129,4 trains/day.

Application of ER algorithm

1. We combine two train flows: 1) east to the north-west of the European part of Russia – $Krs, Zsb, Yuur, Svr \rightarrow Grk, Sev, Oct$; 2) east to the center of the European part of Russia – $Krs, Zsb, Yuur, Svr, Kbsh \rightarrow Msc$. This is advisable because the original railways are almost the same, only to the second train flow a $Kbsh$ flow is added. Another change: final ER should include Msc from the second train flow. Both options are quite natural. Moreover, the flow from Zsb to Oct passes to some extent through Msc . In this regard, Msc is still connected with Grk, Sev, Oct , including the border with all three railways.

The combined train traffic from the original railways $Krs, Zsb, Yuur, Svr, Kbsh$ to the final railways will have a capacity of 97,8 for the first train flow and 36,7 for the second one (the total capacity is $134,5 + 62,2$ (internal train flow between $Zsb, Yuur, Svr, Kbsh$) = 196,7). The advantage of this approach is that, as a result, two strong, enlarged railways can be formed: the first consists of the original railways $Zsb, Yuur, Svr, Kbsh$, and the second – from the final railways Msc, Grk, Sev, Oct . Together they will serve the largest train flow on the territory of the Russian Federation. The internal exchange of train flows for the first is 66,4 for the second – 44,0.

2. The next polygon by its capacity is $Zsb \rightarrow Dvs: 31,4 + 35,5 + 3,9 = 70,8$ trains per day (Zsb, Krs, Vsb, Zab, Dvs). Since Zsb has already entered the first enlarged one, it is removed, and the third enlarged railway gets for itself Krs, Vsb, Zab, Dvs . Its internal exchange of train flows is 40,8 trains per day, and the total – 111,6.

3. Another polygon – $Zsb, Svr, Yuur, Kbsh \rightarrow Prv, Skv, Yuvs$ – has a train traffic capacity of $18,3 + 30,7 +$

$6,9 = 55,9$. The fourth enlarged railway is formed in the composition of $Prv, Skv, Yuvs$. Inter-railway correspondences inside it are 36,8 trains per day.

Conclusion. A rational method is proposed for solving the important problem which is the enlargement of the operation range of railways, which must be carried out in connection with: a) the significant development of both the computing facilities used in railway transport and the increase in their number; b) the significant increase in the share of automated systems that manage the transportation processes; c) the enlargement of the management polygons, the improvement of the resource base of production.

The method of finding rational forms of organization of transport structures is based on the use of the matrix of inter-railway train flows, algorithms for allocation of correspondence polygons, which make it possible to choose the variants of configuration of enlarged railways reasonably.

REFERENCES

1. Rachek, S. V. Foreign experience of railroad reforming [Zarubezhnyj opyt reformirovaniya zheleznih dorog]. *Izvestija Ural'skogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*, 2013, Iss. 6, pp. 62–66.
2. Wenzel, B. Digitale Planungsprozesse für die Bahnausrüstungstechnik – Barrieren und Ansätze. *Signal + Draht*, 2016, 108, № 7–8, pp. 6–10.
3. Smith, K., Vosman, Q. ŠZDC delivers big improvements to Czech network. *International Railway Journal*, published September 07, 2015 [Electronic source]: <https://www.railjournal.com/index.php/europe/szdcdelivers-big-improvements-to-czech-network.html>. Last accessed 04.08.2017.
4. Jiao Jinguan, Wang Jiaoe, Jin Fengjun, Dunford, M. Impacts on accessibility of China's present and future HSR network. *Journal of Transport Geography*, Vol. 40, October 2014, pp. 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.07.004>.
5. Qi Yuanjing, Jin Fengjun, Liu Tao, Jiao Jinguan. Implementation methods and economic impacts of national node strategies. *Journal of Geographical Sciences* [Acta Geographica Sinica], 2016, Vol. 71 (12), pp. 2103–2118. DOI: 10.11821/dlxb201612003.
6. Jin Fengjun, Jiao Jinguan, Qi Yuanjing, Yang Yu. Evolution and geographic effects of high-speed rail in East Asia: An accessibility approach. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, Vol. 27, Issue 5, pp. 515–532. <https://doi.org/10.1007/s11442-017-1390-8>.
7. Rotoli, F., Malavasi, G., Ricci, S. Complex railway systems: capacity and utilization of interconnected networks. *European Transport Research Review*, 2016, Vol. 8, 8: 29. DOI 10.1007/s12544-016-0216-6.
8. Rotoli, F., Ricci, S., Navajas Cawood, E., Malavasi, G. Capacity versus punctuality assessment procedures and accessibility measures for rail networks. *Ingegneria Ferroviaria*, 2015, Iss. 12, pp. 1011–1040.
9. Ricci, S., Luptak, V., Chovancová, M. Baseline Model to Increase Railway Infrastructure Capacity on a Single-Track Section: a Case Study. *Scientific Journal on Transport and Logistics*, Vol. 8, Iss. 2, pp. 69–80, ISSN (Online) 2336–3037, DOI: <https://doi.org/10.1515/logi-2017-0018>.

Information about the author:

Ivnitsky, Victor A. – D.Sc. (Physics and Mathematics), D.Sc. (Eng), professor of the department of Automated control systems of Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, ivnitsky.viktor@vniizht.ru.

Article received 11.04.2017, accepted 04.12.2017.

