Применение экономико-математических моделей для совершенствования стратегии развития железнодорожных пассажирских перевозок

Рунова Лидия Павловна
кандидат экономических наук, доцент доцент кафедры экономической кибернетики Южный федеральный университет
Россия, г. Ростов-на-Дону

Чередниченко Александра Александровна
студентка 5 курса специальности "Математические методы в экономике"

Развитие железнодорожной инфраструктуры России может и должно стать мощнейшим двигателем экономического роста, так как на долю железнодорожного транспорта приходится около 43 % грузооборота, а без учёта трубопроводного транспорта – свыше 85 %, и почти 40 % пассажирооборота всей транспортной системы страны.

175 лет назад – мгновение по сравнению с эпохой развития общества – появились железные дороги, которые коренным образом изменили весь строй экономической жизни страны. Это одна из основных логистических цепочек в сфере организации пассажирских перевозок[1].

В настоящее время на железнодорожном транспорте в сфере пассажирских перевозок дальнего следования по-прежнему существует острая необходимость в оптимизации маршрутной сети.

В настоящее время идет процесс интеграции богатого арсенала экономико-математических методов, накопленного как в нашей стране, так и в странах с развитой рыночной экономикой, создание на этой базе эффективных экономико-математических систем анализа и поддержки принятия решений на всех уровнях экономики.

Задача в данной работе заключается в оптимизации маршрутной сети без сокращения пассажиропотоков на существующих маршрутах.

Основным показателем, имеющим место в данной задаче, является пассажиропоток между каждой данной железнодорожной станцией. При этом следует учитывать следующие характеристики пассажиропотока:

a. мощность или напряжённость, то есть количество пассажиров, которое проезжает в определённое время на заданном участке маршрута в одном направлении (любым видом транспорта);

b. объём перевозок пассажиров, то есть количество пассажиров, перевозимых рассматриваемым видом транспорта за определённый промежуток времени (час, сутки, месяц, год).

Характерной особенностью пассажиропотоков является их неравномерность, они изменяются по времени (часам, суткам, дням недели, сезонам года).

В условии задачи в рамках данного исследования был использован упрощенный вариант одного из самых напряженных маршрутов на территории Российской Федерации – Москва-Адлер.

Как и любое другое черноморское направление, маршрут Москва-Адлер наиболее популярен в

летние месяцы и осенний «бархатный сезон», который приходится на вторую половину сентября и начало октября. За этим направлением движения постоянно следит ОАО «РЖД», расписание поездов Москва – Адлер своевременно уточняется и корректируется.

Расстояние между Москвой и Адлером – 1 756 километров. Примерное время в пути составляет 30 часов. Расписание поездов Москва – Адлер базируется на 2 поездах, курсирующих круглый год в ежедневном режиме, а также ряде составов, осуществляющих движение по четным и нечетным дням. В летний сезон расписание поездов по станции Адлер претерпевает серьезные изменения, и количество поездов значительно увеличивается. Ориентировочная стоимость билета в плацкартном вагоне – от 1 600 рублей, а от 3 000 рублей также можно купить билеты в купе.

Время следования фирменных поездов – 24 часа 31 минута.

Задача ставится следующим образом: имеется маршрут следования пассажирских поездов Москва-Адлер, состоящий из 7 станций: Москва – Рязань – Мичуринск – Воронеж – Ростов – Краснодар – Сочи. Между каждыми двумя станциями существует годовой пассажиропоток. Необходимо перевезти все пассажиропотоки таким образом, чтобы совокупные затраты на перевозку были минимальны. Затраты на перевозку представим в виде затрат на использование железнодорожной инфраструктуры и аренды тягового подвижного состава. Необходимо учитывать, что длина платформы на каждой станции позволяет вместить 24 пассажирских вагона. Также необходимо учитывать, что пассажиропоток разделяется на купейный и плацкартный. Вместимость одного купейного вагона – 36 пассажиров, плацкартного – 52 пассажира.

Отобразим все пассажиропотоки на маршруте в виде матрицы корреспонденций (таблица 1).

Таблица 1 – Матрица корреспонденций на маршруте Москва – Адлер

Пункт отправления	Москва	Рязань	Мичуринск	Воронеж	Ростов	Краснодар	Сочи	Суммарное количество пассажиров по станции отправления на маршруте
Москва		141 082	60 543	208 007	232 922	82 038	281 990	1 006 582
Рязань	128 104		17426	17 426	12 156	6 042	32 994	214 148
Мичуринск	177 068	7302		24 948	5 878	3 080	10 179	228 455
Воронеж	546 988	17 251	20 808		48 640	28 529	106 638	768 854
Ростов	308 500	11 845	5 894	47161		55 960	373 127	802 487
Краснодар	1 160 660	6 382	3 293	27 894	59 910		357 599	1 615 738

Сочи	350 224	33 775	11 611	103 354	359 831	356 313		1 215 108
Суммарный пассажиропоток по станции прибытия на маршруте	2 671 544	217 637	119 575	428 790	719 337	531 962	1 162 527	

Введем обозначения:

1. d_{ij} – пассажиропоток между станциями i и j (человек в год) d_{ij}^1 , - пассажиропоток в купейных вагонах между станциями i и j, d_{ij}^2 - пассажиропоток в плацкартных вагонах между станциями i и j.
2. Понятно, что $d_{ij}=d_{ij}^1+d_{ij}^2$;
3. r_{ij} – расстояние между станциями i и j;
4. Затраты (использование инфраструктуры и аренда тягового подвижного состава), где c_1 – плата за пробег одного купейного вагона на 1 км инфраструктуры, c_2 - плата за пробег одного плацкартного вагона на 1 км инфраструктуры, c - плата за использование одного локомотива на 1 км пути.

Требуется: найти годовой план перевозок по маршруту 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 - 7, обеспечивающий годовую перевозку указанных пассажиропотоков между станциями маршрута и минимизирующий общие затраты.

1. Обозначим план перевозок $X=\{x_{ij}^1, x_{ij}^2, x\}$, где x_{ij}^1 – количество купейных вагонов между станциями i и j (вагоны в год), x_{ij}^2 – количество плацкартных вагонов между станциями i и j (вагоны в год), x – количество локомотивов (поездов, штук) по маршруту 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 в год.
2. Обозначим: $C = c*r_{17}$ – затраты на один локомотив по маршруту.
3. Тогда затраты на инфраструктуру по плану перевозок X равны:

$c_1*[r_{12}*(x_{12}^1 + x_{17}^1) + r_{13}*(x_{13}^1+ x_{17}^1) +\ldots+ r_{67}*(x_{67}^1+ x_{17}^1)] + c_2*[r_{12}*(x_{12}^2 + x_{17}^2) + r_{13}*(x_{13}^2+ x_{17}^2) +\ldots+ r_{67}*(x_{67}^2+ x_{17}^2)]$.

1. Общие затраты C(X) по плану перевозок X равны:

$C(X)=C*x+ c_1*[r_{12}*(x_{12}^1 + x_{17}^1) + r_{13}*(x_{13}^1+ x_{17}^1) +\ldots+ r_{67}*(x_{67}^1+ x_{17}^1)] + c_2*[r_{12}*(x_{12}^2 + x_{17}^2) + r_{13}*(x_{13}^2+ x_{17}^2) +\ldots+ r_{67}*(x_{67}^2+ x_{17}^2)]$.

В итоге получаем математическую задачу:

min C(X) при ограничениях на пассажиропотоки:

$$\begin{cases} 3\,6*x_{17}^1 \geq d_{17}^1,\ 52*x_{17}^2 \geq d_{17}^2\ ; \\ 36*(x_{12}^1 + x_{17}^1) \geq d_{12}^1+d_{17}^1,\ 52*(x_{12}^2 + x_{17}^2) \geq d_{12}^2+d_{17}^2; \end{cases}$$

$36*(x_{13}^1 + x_{17}^1) \geq d_{13}^1+d_{17}^1,\ 52*(x_{13}^2 + x_{17}^2) \geq d_{13}^2+d_{17}^2;$

… … … … … … … … …

$36*(x_{67}^1 + x_{17}^1) \geq d_{67}^1+d_{17}^1,\ 52*(x_{67}^2 + x_{17}^2) \geq d_{67}^2+d_{17}^2.$

и ограничениях на длину платформы:

$$\begin{cases} x_{12}^1 + x_{12}^2 + x_{13}^1 + x_{13}^2 + x_{14}^1 + x_{14}^2 + x_{15}^1 + x_{15}^2 + x_{16}^1 + x_{16}^2 + x_{17}^1 + x_{17}^2 \leq 24x; \\ x_{23}^1 + x_{23}^2 + x_{24}^1 + x_{24}^2 + x_{25}^1 + x_{25}^2 + x_{26}^1 + x_{26}^2 + x_{27}^1 + x_{27}^2 + x_{17}^1 + x_{17}^2 \leq 24x; \\ x_{34}^1 + x_{34}^2 + x_{35}^1 + x_{35}^2 + x_{36}^1 + x_{36}^2 + x_{37}^1 + x_{37}^2 + x_{17}^1 + x_{17}^2 \leq 24x; \end{cases}$$

$x_{45}^1 + x_{45}^2 + x_{46}^1 + x_{46}^2 + x_{47}^1 + x_{47}^2 + x_{17}^1 + x_{17}^2 \leq 24x;$

$x_{56}^1 + x_{56}^2 + x_{57}^1 + x_{57}^2 + x_{17}^1 + x_{17}^2 \leq 24x;$

$x_{67}^1 + x_{67}^2\ x_{17}^1 + x_{17}^2 \leq 24x;$

где x_{ij}^k>=0, x_{ij}^k – целые.

Заметим, что здесь: $(x_{12}^1+ x_{17}^1)/x+ (x_{12}^2+ x_{17}^2)/x$ – структура купейных и пассажирских вагонов одного поезда на перегоне между станциями 1 и 2, а $(x_{13}1+ x_{17}^1)/x+ (x_{13}^2+ x_{17}^2)/x$ - структура купейных и пассажирских вагонов одного поезда на перегоне между станциями 1 и 3 и т.д.

Информационной системой для расчета задачи послужило приложение Microsoft Office Excel 2007 и его модуль SOLVER.

Плата за пробег одного купейного вагона на 1 км инфраструктуры c_1 = 781,5 руб.

Плата за пробег одного плацкартного вагона на 1 км инфраструктуры c_2 = 834,1руб.

Плата за использование одного локомотива на 1 км пути c = 33,5руб.

Затраты на один локомотив по маршруту C = c * r_{17} = 33,5 * 1363,1 = 45663,9 руб.

Тогда формальная постановка данной задачи имеет вид:

$C(X) = 45663{,}9x + 781{,}5(184{,}4(x_{12}^1 + x_{17}^1) + 369{,}4(x_{13}^1 + x_{17}^1) + 466{,}1(x_{14}^1 + x_{17}^1) + 961{,}4(x_{15}^1 + x_{17}^1) + \ldots + 149{,}5(x_{56}^1 + x_{17}^1) + 404{,}2(x_{57}^1 + x_{17}^1) + 172(x_{67}^1 + x_{17}^1)) + 834{,}1(184{,}4(x_{12}^2 + x_{17}^2) + 369{,}4(x_{13}^2 + x_{17}^2) + 466{,}1(x_{14}^2 + x_{17}^2) + 961{,}4(x_{15}^2 + x_{17}^2) + \ldots + 149{,}5(x_{56}^2 + x_{17}^2) + 404{,}2(x_{57}^2 +$

$x_{17}^2) + 172(x_{67}^2 + x_{17}^2)) \to \min$

$$\begin{cases} 3\ 6 * x_{17}^1 \geq 131003; \\ 52 * x_{17}^2 \geq 150987; \\ 36 * (x_{12}^1 + x_{17}^1) \geq 191542; \\ 52 * (x_{12}^2 + x_{17}^2) \geq 231530; \end{cases}$$

$36 * (x_{13}^1 + x_{17}^1) \geq 156329;$

$52 * (x_{13}^2 + x_{17}^2) \geq 186204;$

… … … …

$36 * (x_{67}^1 + x_{17}^1) \geq 272970;$

$52 * (x_{67}^2 + x_{17}^2) \geq 366619;$

$$\begin{cases} x_{12}^1 + x_{12}^2 + x_{13}^1 + x_{13}^2 + x_{14}^1 + x_{14}^2 + x_{15}^1 + x_{15}^2 + x_{16}^1 + x_{16}^2 + x_{17}^1 + x_{17}^2 \leq 24x; \\ x_{23}^1 + x_{23}^2 + x_{24}^1 + x_{24}^2 + x_{25}^1 + x_{25}^2 + x_{26}^1 + x_{26}^2 + x_{27}^1 + x_{27}^2 + x_{17}^1 + x_{17}^2 \leq 24x; \\ x_{34}^1 + x_{34}^2 + x_{35}^1 + x_{35}^2 + x_{36}^1 + x_{36}^2 + x_{37}^1 + x_{37}^2 + x_{17}^1 + x_{17}^2 \leq 24x; \end{cases}$$

$x_{45}^1 + x_{45}^2 + x_{46}^1 + x_{46}^2 + x_{47}^1 + x_{47}^2 + x_{17}^1 + x_{17}^2 \leq 24x;$

$x_{56}^1 + x_{56}^2 + x_{57}^1 + x_{57}^2 + x_{17}^1 + x_{17}^2 \leq 24x;$

$x_{67}^1 + x_{67}^2\ x_{17}^1 + x_{17}^2 \leq 24x;$

$x_{ij}^k \geq 0.$

Далее введем исходные данные в Microsoft Excel. Для этого создадим экранную форму:

Переменные задачи – количество поездов (локомотивов) и плацкартных и купейных вагонов - соответствуют ячейкам (B4:AR4).

Целевая функция, обозначающая общие затраты C(X) по плану перевозок X, соответствует ячейке (AS6). Экранная форма для решения в MS Excel представлена на рисунках 1-4.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		Поезда	Вагоны купейные 12	Вагоны плацкартные 12	Вагоны купейные 13	Вагоны плацкартные 13	Вагоны купейные 14	Вагоны плацкартные 14
3		x	x121	x122	x131	x132	x141	x142
4	Количество, шт							
5	Ограничение снизу	0	0	0	0	0	0	0
6	Удельные затраты, руб	45663,9	144108,6	153808	288686,1	308116,54	364257,2	388777
7	Структура одного состава		#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!

Рисунок 1 – Экранная форма исходных данных

	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1												Перем
2	Вагоны купейные 15	Вагоны плацкартные 15	Вагоны купейные 16	Вагоны плацкартные 16	Вагоны купейные 17	Вагоны плацкартные 17	Вагоны купейные 23	Вагоны плацкартные 23	Вагоны купейные 24	Вагоны плацкартные 24	Вагоны купейные 25	Вагоны плацкарт ные 25
3	x151	x152	x161	x162	x171	x172	x231	x232	x241	x242	x251	x252
4												
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	751334,1	801903,7	935768,1	998751,3	9770538	10428171	154648,9	165068	256566,5	273835	643174,5	686464,3
7	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!

Рисунок 2 – Экранная форма исходных данных

	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF
1	енные											
2	Вагоны купейные 26	Вагоны плацкартные 26	Вагоны купейные 27	Вагоны плацкартные 27	Вагоны купейные 34	Вагоны плацкартные 34	Вагоны купейные 35	Вагоны плацкартные 35	Вагоны купейные 36	Вагоны плацкартные 36	Вагоны купейные 37	Вагоны плацкарт ные 37
3	x261	x262	x271	x272	x341	x342	x351	x352	x361	x362	x371	x372
4												
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	834094,9	890234,9	959056,8	1023608	126212,3	134707,2	495783,6	529153	689283	735676,2	810962,6	865545,6
7	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!

Рисунок 3 – Экранная форма исходных данных

	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS
1													
2	Вагоны купейные 45	Вагоны плацкартные 45	Вагоны купейные 46	Вагоны плацкартные 46	Вагоны купейные 47	Вагоны плацкартные 47	Вагоны купейные 56	Вагоны плацкартные 56	Вагоны купейные 57	Вагоны плацкартные 57	Вагоны купейные 67	Вагоны плацкартные 67	
3	x451	x452	x461	x462	x471	x472	x561	x562	x571	x572	x671	x672	
4													
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Общие затраты на перевозку пассажиров, руб/год
6	388874,4	415048,2	577997,4	616900,4	704444,1	751857,7	194984,3	208107,9	315882,3	337143,2	134418	143465,2	0
7	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	

Рисунок 4 – Экранная форма исходных данных

Дальнейшие действия будем производить в окне "Поиск решения", показанном на рисунке 5.

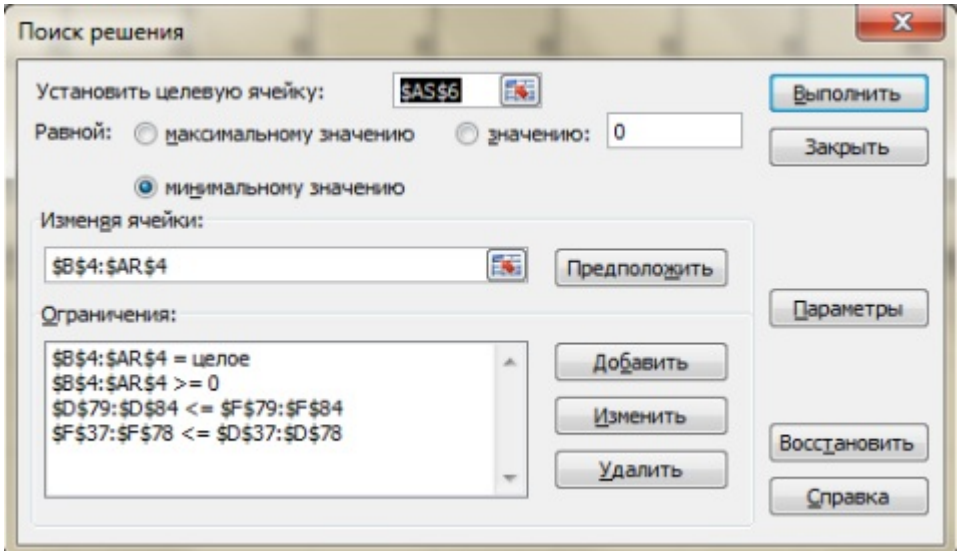

Рисунок 5 – «Поиск решения»

Исследования с помощью данной модели показали, что оптимальное количество поездов в год по маршруту «Москва – Адлер» составляет 853 поезда. При этом видна структура одного состава, показывающая оптимальное количество вагонов, необходимое для перевозки всего пассажиропотока для каждой станции. На основании этого можно сделать выводы о рациональности перевозки пассажиров, то есть увидеть, какое количество вагонов едут пустыми или, наоборот, сколько вагонов нам не хватает, также построить оптимальный маршрут и при этом минимизировать все затраты.

Итогом решения поставленной задачи является:

a. количество вагонов, необходимое для перевозки всех пассажиропотоков между каждыми станциями, а так же общее число локомотивов;

b. затраты на перевозку всех пассажиропотоков, а также суммарные затраты;

c. оптимальная структура одного поезда на маршруте.

Полученная информация является необходимой для составления бюджета затрат на перевозку пассажиров, а также выплат собственнику инфраструктуры и тягового подвижного состава. Также эти данные необходимо использовать при формировании графика движения

поездов, они могут служить основой для работы составителей поездов в компаниях-перевозчиках.

Наибольший эффект решение данной задачи получается в рамках расчета субсидий и составления государственных заказов на перевозку, что способствует экономии бюджетный средств, а так же совершенствованию механизма государственного регулирования в Российской Федерации.

Успешная реализация данного проекта станет значительным конкурентным преимуществом для железнодорожных компаний-перевозчиков в борьбе с другими видами транспорта за завоевание доли рынка, а сотрудничество с государством сделает железнодорожную отрасль более развитой и недискриминационной.

1 Набиуллина, Э. Плацдарм для роста / Э. Набиуллина // Пульт управления – 2011. – №4,. – с. 6–9.