

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ОПТИМАЛЬНЫХ ПЛАНОВ ВОЗВРАТА ПОРОЖНИХ ВАГОНОВ С УЧЕТОМ ВАРИАЦИЙ СУТОЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

У статті досліджено стійкість оптимальних планів повернення порожніх вагонів. Для стохастичної моделі планування методом статистичних досліджень отримано оцінку чутливостей планів до змін даних.

В статье исследована устойчивость оптимальных планов возврата порожних вагонов. Для стохастической модели планирования методом статистических испытаний получены оценки чувствительности планов к изменениям исходных данных.

The problem of stability of optimum plans of empty cars return is investigated in the article. For stochastic planning model, using the statistic test method the values of plans sensitiveness to changes of input data are obtained.

### ВВЕДЕНИЕ

Эффективное управление грузовыми железнодорожными перевозками основано на их планировании и техническом нормировании. Главной задачей технического нормирования является предупреждение затруднений в ходе выполнения плана перевозок [1]. В зависимости от объемов предстоящих перевозок для каждого железнодорожного подразделения технические нормы регламентируют его работу в количественных и качественных показателях при обеспечении установленного уровня использования технических средств и др. Технические нормы (ТН) рассчитываются ежемесячно. Их расчеты ведутся на основе плана перевозок, плана формирования и графика движения поездов, а также технологических процессов работы объектов железнодорожного транспорта. ТН выражается системой показателей: суточных количественных показателей, качественных показателей, показателей обеспечения плана перевозок, расчетных показателей.

Одним из основных нормируемых показателей является план передачи порожних вагонов по регулировочному заданию. Обеспечение грузовых перевозок порожними вагонами – важная задача организации эффективного перевозочного процесса. Ее решение выполняется на основе оптимизационных моделей и методов планирования в условиях [2, 3] значительной неопределенности, связанной с суточной неравномерностью грузовых перевозок. На практике расчет месячного регулировочного задания, его планирование ведется для каждого рода вагонов отдельно в предположении постоянных суточных заданий на перевозку. Это

условие для различных железнодорожных полигонов, как правило, не выполняется.

Исследование устойчивости плана регулирования порожних вагонов в условиях суточной неравномерности заданий, а также его эффективности является актуальной задачей, которая решается в настоящей работе.

### ЗАДАЧА ПЛАНИРОВАНИЯ ВОЗВРАТА ПОРОЖНИХ ВАГОНОВ

Кратко остановимся на действующей технологии планирования возврата порожних вагонов. В конце каждого месяца управления дорог на основе развернутых планов перевозок и специальных указаний Укрзализныци (УЗ) разрабатывают вагонопотоки на предстоящий месяц, отдельно по каждому роду подвижного состава. Планы дорог служат для разработки сводного плана перевозок УЗ – «шахматки». На основе этих данных составляется междорожная ведомость вагонопотоков, а также устанавливают корреспонденции грузевых вагонопотоков между пунктами дорог. Ведомости корреспонденции вагонопотоков составляются один раз на месяц и корректируются, если общее отклонение объемов перевозок от плана составляет более 5...7% [1].

Для анализа влияния суточной неравномерности на свойства оптимального плана регулирования порожних вагонов (количество передаваемых вагонов) рассмотрим реальную схему межгосударственных грузовых перевозок, рис. 1. Здесь представлена схема задачи оптимального регулирования порожняка на полигоне, состоящем из 5 государств и 6 межгосударственных пунктов, когда происходит передача вагонопотоков в размере 2520 единиц («кры-

тые» вагоны). Для оптимального расчета суточных показателей учитывается количество передаваемых вагонов, ведомость маршрутов межгосударственной корреспонденции, а также стоимостные показатели, выраженные в километрах или денежных единицах.

Размеры вагонопотоков, объемы погрузки и выгрузки в каждые сутки могут существенно отклоняться от среднесуточных значений, положенных в основу технического нормирования, рис. 2. Данные рис. 2 иллюстрируют реализованные перевозки на полигоне Приднепровской железной дороги за август месяц 2007 года. Такие отклонения возникают вследствие объективно существующей на железнодорожном транспорте неравномерности перевозочно-

го процесса, из-за сверхплановых заданий и др. Здесь математическое ожидание числа вагонов составляет 79.53, дисперсия 632.05, среднее квадратическое отклонение – 25.14, коэффициент вариации – 0.32. Таким образом, на практике реализовать равномерный план перевозки, а значит и возврата порожних вагонов, не удастся. Оценим перевозки рис. 2 с точки зрения выполнения общего задания на перевозку, начиная с начала месяца, рис. 3. На рис. 3 изображен график отношения выполненного объема перевозки к планируемому при равномерных отправлениях. Как видно, показатель выполненного объема перевозок приближается к значению 1 – выполненного месячного плана.

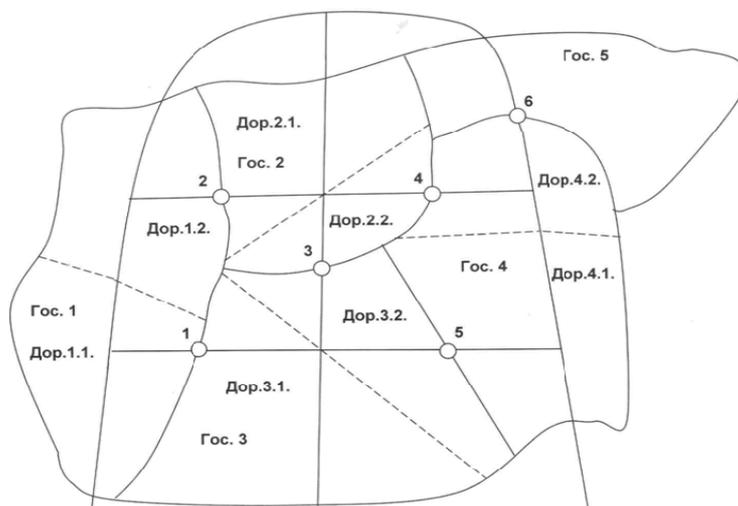


Рис. 1. Схема межгосударственной сети дорог

### ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОПТИМАЛЬНЫХ ПЛАНОВ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Для анализа устойчивости планов регулирования возврата порожних вагонов были использованы данные межгосударственного сообщения, рис. 1, табл. 1. При планировании исполь-

зовалась модель транспортной задачи (1) – (2) [3, 4], устойчивость проверялась методом статистических испытаний [2]. При этом варьировались отправления со станций с разбросом данных в пределах от –7 % до +7 % от исходного задания, табл. 1.

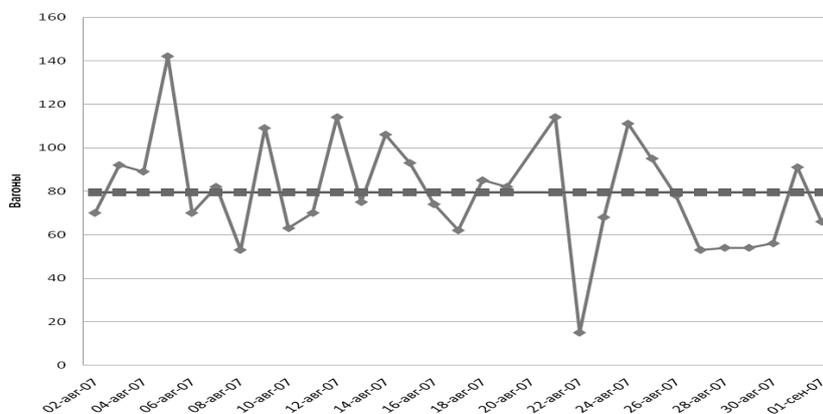


Рис 2. Объемы погрузки крытых вагонов за месяц

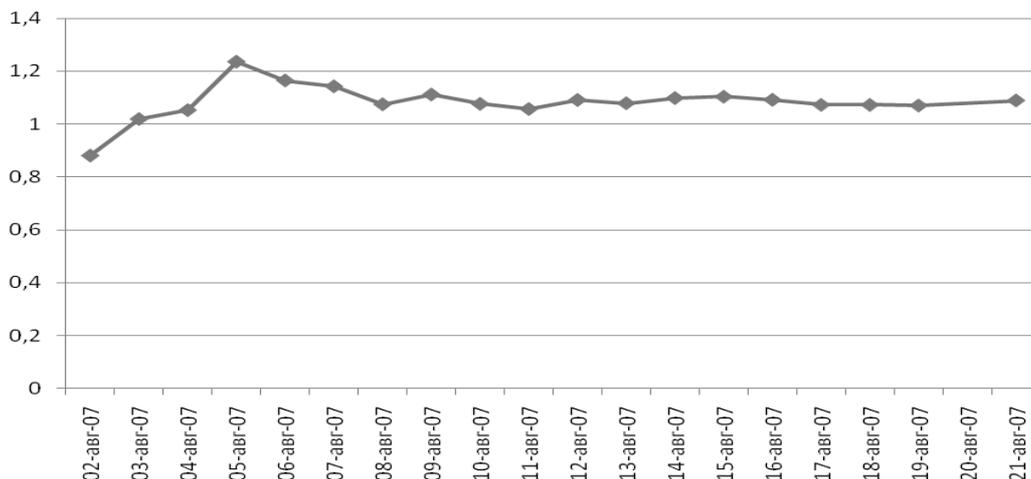


Рис. 3. Динамика использования вагонов

Таблица 1

План погрузки вагонов по межгосударственным стыковым пунктам

на \ с	1	2	3	4	5	6	Итого
1	210	0	50	0	90	80	430
2	0	200	100	60	0	50	410
3	20	100	240	40	50	20	470
4	0	80	70	170	0	120	440
5	40	0	20	0	250	60	370
6	30	50	30	60	70	160	400
Итого	300	430	510	330	460	490	2520
Баланс	-130	20	40	-110	90	90	

В табл. 1 на пересечении строки и столбца указано количество вагонов, передаваемых по межгосударственному стыку. Суммы по строкам и столбцам дают общее количество вагонов, проходящих по межгосударственным стыкам. Общее число вагонов на сети определяет сумма всех отправленных вагонов. Баланс определяется как разница между погрузкой и выгрузкой, со знаком «-» избыток вагонов, «+» недостаток в вагонах. Для анализа устойчивости планов рассматривалась закрытая модель задачи.

Решение задачи оптимального регулирования сводится к решению транспортной задачи (1) с ограничениями (2). Результаты решения задачи регулирования (1), (2) приведены в табл. 2.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} X_{ij} \rightarrow \min. \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = A_i, i = 1, \dots, n; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = B_j, j = 1, \dots, m;$$

$$X_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m.$$

Здесь  $C_{ij}$  – расстояние от « $i$ » до « $j$ » станции,  $X_{ij}$  – количество передаваемых вагонов,  $A_i$  – погрузка станции « $i$ »,  $B_j$  – потребность станции « $j$ ».

Таблица 2

## Матрица регулирования для исходной задачи

на с \	1	2	3	4	5	6	Итого
1	0	0	40	0	90	0	<b>130</b>
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	20	0	0	0	90	<b>110</b>
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
Итого	0	<b>20</b>	<b>40</b>	0	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>240</b>

Значение целевой функции основной задачи регулирования (1), (2) – 124500.

Анализ устойчивости регулировочного плана, полученного в результате решения задачи (1) – (2), был проведен методом стохастических испытаний с использованием математической модели планирования вида (3)

$$\begin{aligned}
 & M\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} X_{ij}\right) \rightarrow \min; \\
 & D_{\xi}(A_i, B_i X_{ij}) = 0; \\
 & D_{\xi} \in D_{A,B}; \\
 & A_{\xi} \otimes B_{\xi} \subseteq A_{\xi} \in A_D; \\
 & R\left(\sum A_{\xi} - \sum B_{\xi}\right) \leq \varepsilon_{\xi}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Здесь  $M(*)$  – знак математического ожидания целевой функции;  $D_{\xi}(*)$  – система ограничений, сформированных на основе допустимых случайных вариаций заданий на отправление вагонов; оператор  $R(*)$  – обеспечивает получение закрытой модели транспортной задачи с учетом допустимой точности. Стохастический метод планирования состоит в многократном расчете оптимальных планов согласно (3), с дальнейшим осреднением полученных результатов, относительно искомым регулировочных значений  $X_{ij}$ .

Результаты расчета математического ожидания передаваемых по стыковым пунктам вагонов для 10 и 20 и 100 решений приведены в табл. 3...5. Для формирования и решения задач (3) использовались случайные величины отправок вагонов в текущий период, распределенные по усеченному нормальному закону.

Табл. 3...5 свидетельствуют о достаточной эффективности основной детерминированной модели планирования (1) – (2) при используемых данных. Это заключение в конкретных случаях необходимо проверять средствами сто-

хастической модели планирования (3). Вместе с тем расчеты показали, что существуют полигоны, для которых небольшие изменения количества отправляемых вагонов существенным образом влияет на структуры плана и значения целевой функции.

Таблица 3

## План регулирования по 10 испытаниям

с на \	1	2	3	4	5	6	Итого
1	0	<b>5,2</b>	<b>33,6</b>	0	<b>91,8</b>	0	<b>130,6</b>
2	0	0	<b>0,1</b>	0	0	0	<b>0,1</b>
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	<b>16,1</b>	<b>5,4</b>	0	0	<b>88,1</b>	<b>109,6</b>
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
Итого	0	<b>21,3</b>	<b>39,1</b>	0	<b>91,8</b>	<b>88,1</b>	<b>240,3</b>

Таблица 4

## План регулирования по 20 испытаниям

с на \	1	2	3	4	5	6	Итого
1	0	<b>3,95</b>	<b>38,8</b>	0	<b>93,25</b>	0	<b>136</b>
2	0	0	<b>0,05</b>	0	0	0	<b>0,05</b>
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	<b>16</b>	<b>5,35</b>	0	0	<b>96</b>	<b>117,35</b>
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
Итого	0	<b>19,95</b>	<b>44,2</b>	0	<b>93,25</b>	<b>96</b>	<b>253,4</b>

Таблица 5

## План регулирования по 100 испытаниям

с на \	1	2	3	4	5	6	Итого
1	0	<b>3,1</b>	<b>36,8</b>	0	<b>88,94</b>	0	<b>128,84</b>
2	0	0	<b>0,04</b>	0	0	0	<b>0,04</b>
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	<b>16,06</b>	<b>3,83</b>	0	0	<b>90,24</b>	<b>110,13</b>
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
Итого	0	<b>19,16</b>	<b>40,67</b>	0	<b>88,94</b>	<b>90,24</b>	<b>239,01</b>

**ДВОЙСТВЕННАЯ ЗАДАЧА И ОЦЕНКА  
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ  
РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ПЛАНОВ**

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Y_i + Y_j) \leq X_{ij}. \quad (5)$$

Для определения пунктов, для которых вариации исходных данных существенно влияют на решения, была использована модель двойственной задачи линейного программирования [7], позволяющая оценить чувствительности решений к вариациям ограничений задачи (1), (2).

Математическая модель двойственной задачи в нашем случае имеет вид:

$$\sum_{i=1}^n Y_i A_i + \sum_{i=n+1}^{m+n} Y_j B_{j-n} \rightarrow \max. \quad (4)$$

Здесь  $Y_i$  – цена погрузки на « $i$ » станции;  $Y_j$  – цена выгрузки на « $j$ » станции;  $X_{ij}$  – количество вагонов, передаваемых с « $i$ » на « $j$ » станцию;  $A_i$  – погрузка « $i$ » станции;  $B_{j-n}$  – потребность « $j$ » станции.

Результаты решения задачи (4) – (5) позволили выделить межгосударственные стыковые пункты, наиболее влияющие на регулировочный план. В табл. 6 представлен план погрузки, в табл. 7 – возврата порожних вагонов, которые были использованы для исследования чувствительности.

Таблица 6

**Исходный план погрузки крытых вагонов**

с \ на	1	2	3	4	5	6	Итого
1	220	0	50	0	96	81	447
2	0	190	100	60	0	50	400
3	21	99	238	37	47	19	461
4	0	86	71	168	0	123	448
5	43	0	21	0	242	56	362
6	28	51	30	61	73	155	398
Итого	312	426	510	326	458	484	2516
Баланс	-135	26	49	-122	96	86	

Из решения задачи (3) для табл. 6 следует, что изменение количества вагонов из пункта 4 на 5 существенным образом влияет на план

возврата. Решение этой задачи представлено в табл. 8 и 9.

Таблица 7

**План возврата порожних вагонов для табл. 6**

с \ на	1	2	3	4	5	6	Итого
1	0	0	<b>39</b>	0	<b>96</b>	0	<b>135</b>
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	<b>26</b>	<b>10</b>	0	0	<b>86</b>	<b>122</b>
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
Итого	0	<b>26</b>	<b>49</b>	0	<b>96</b>	<b>86</b>	<b>257</b>

Значение целевой функции 136950.

Результаты оптимального планирования на основе модели (3), представленные в табл. 8 и

табл. 9, дают основания для утверждения, что вариации данных для полигонов с наибольшими коэффициентами чувствительности, соглас-

но (4) – (5), существенно изменяют план регулирования порожняка, что необходимо учитывать при разработке и реализации месячных планов. В нашем случае при изменении заданий на перевозку на незначительную величину,

составляющую в рамках общей погрузки около 0,25 %, произошло изменение плана регулирования передачи вагонов до 15...20 % по отдельным пунктам, отклонение целевой функции около 7 %.

Таблица 8

**Измененный план погрузки крытых вагонов**

с \ на	1	2	3	4	5	6	Итого
1	220	0	50	0	96	81	447
2	0	190	100	60	0	50	400
3	21	99	238	37	47	19	461
4	0	86	71	168	<b>10</b>	123	448
5	43	0	21	0	242	56	362
6	28	51	30	61	73	155	398
Итого	312	426	510	326	458	484	2526
Баланс	-135	26	49	-122	96	86	

Таблица 9

**План возврата порожних вагонов для табл. 8**

с \ на	1	2	3	4	5	6	Итого
1	0	0	<b>29</b>	0	<b>106</b>	0	<b>135</b>
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	<b>26</b>	<b>20</b>	0	0	<b>86</b>	<b>132</b>
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
Итого	0	<b>26</b>	<b>49</b>	0	<b>106</b>	<b>86</b>	<b>267</b>

Значение целевой функции 145950.

### ВЫВОДЫ

В работе выполнены исследования устойчивости планов регулировки порожних вагонов в условиях суточной неравномерности заданий. На основе данных о грузовых перевозках в межгосударственном сообщении реализован метод оптимального планирования с использованием стохастической модели. Решена двойственная задача по оценке коэффициентов чувствительности, с помощью которой определены пункты, наиболее влияющие на план регулирования. Показана возможность получения неустойчивости оптимальных решений. Статистические испытания в целом свидетельствуют о достаточной эффективности детерминированной модели планирования, однако, это заключение необходимо проверять средствами

стохастического моделирования в конкретных случаях.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методика технического нормирования установления норм по передаче порожних вагонов инвентарного парка и собственных вагонов [Текст]. – М., 2005. – 34 с.
2. Томашевский, В. М. Моделирование систем [Текст] / В. М. Томашевский. – К.: Видавнична група ВНУ, 2005. – 352 с.
3. Нестеров, Е. П. Транспортные задачи линейного программирования [Текст] / Е. П. Нестеров. – М.: Транспорт, 1971. – С. 226.
4. Тишкин, Е. М. Автоматизация управления вагонным парком [Текст] / Е. М. Тишкин. – М.: Интекст, 2000. – С. 224.
5. Рыбакова, Т. И. Информационная технология расчета технических норм эксплуатационной работы железной дороги [Текст] / Т. И. Рыбакова // Труды ВНИАС. – 2005. – Вып. 1. – С. 200-204.
6. Тишкин, Е. М. Информационно-управляющие технологии эксплуатации вагонного парка [Текст] / Е. М. Тишкин // Тр. ВНИАС. – 2005. – Вып. 4. – С. 186.
7. Карандаев, И. С. Решение двойственных задач в оптимальном планировании [Текст] / И. С. Карандаев. – М.: Статистика, 1976. – С. 87.
8. Кудрявцев, В. А. Управление движением на железнодорожном транспорте [Текст]: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. А. Кудрявцев. – М.: Маршрут, 2003. – 200 с.

Поступила в редколлегию 08.07.2008.