

## Модель взаимодействия двух типов транспорта в смешанных перевозках

*В.И. Деменский<sup>1</sup>, Х.Р. Агиев<sup>2</sup>, М.Х. Мальсагов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

<sup>2</sup>*Ингушский государственный университет, Назрань*

**Аннотация:** Разработана модель взаимодействия железной дороги и морского порта при наличии управляющего органа. Для предложенной модели описаны функции взаимодействия, найдены аналитические решения для статической модели, а также проведено сравнение скорости работы имитационного моделирования без и с использованием аналитики. Далее рассмотрена динамическая модель и предложен алгоритм поиска равновесия для данной модели. Последующее использование методов параллельного программирования даст возможность в лучшей степени планировать взаимодействие в данной модели.

**Ключевые слова:** математическая модель, имитационное моделирование, равновесие Штакельберга, иерархическая игра, смешанные перевозки, ж/д транспорт, порт.

### Введение

В современном обществе особую роль в функционировании производственных предприятий играет обеспечение своевременных и бесперебойных поставок товаров. Основными видами перевозок являются авиационные, автомобильные, железнодорожные и судоходные. Авиасообщение - наиболее быстрый, но при этом самый дорогостоящий вид доставки, который используется для малого объема груза, либо для доставки в труднопроходимые зоны. Автомобильный транспорт остается самым массовым и доступным видом транспорта, но он также с трудом покрывает большие объемы грузов, вдобавок неэффективен на больших расстояниях. Судоходный транспорт является рекордсменом по максимальному объему перевозок, но необходимость в наличии и проходимости водоемов делает его ограниченным видом транспорта. Железнодорожное сообщение имеет чуть меньшие объемы в сравнении с судами, но при этом более универсально [1,2].

Хоть по объему перевозок на 2023 год по данным Росстата 67% перевозок приходится на автомобили и лишь 17% на железнодорожные

составы, стоит заметить, что при учете пройденного расстояния грузом (тонн-километров) наиболее продуктивным считается железнодорожный транспорт с 46% товарооборота, уступая лишь трубопроводному способу доставки в 47% от общего товарооборота. В отличие от автомобильного транспорта, который является универсальным в разгрузке/погрузке и в дальнейшем использовании, ж/д составы требуют более подробного регулирования взаимодействия для повышения эффективности, как и водные виды транспорта, занимающие третье место по объему перевозок [3].

Разработанная модель призвана улучшить взаимодействие с менее универсальными видами транспорта для повышения их эффективности.

#### **Статическая модель взаимодействия независимых поставщиков**

Целью работы является аналитическое и численное исследование модели стимулирования двух агентов на примере системы железная дорога – морской порт. Модель включает трех игроков:

- 1.) Центр – для данной модели обобщённая структура, включающая в себя ОАО «РЖД» и министерство транспорта РФ.
- 2.) Агент 1 – транспортная компания, выполняющая перевозки на ЖД транспорте.
- 3.) Агент 2 – транспортная компания, выполняющая морские перевозки.

Агент 1 и Агент 2 находятся в подчинении Центра и выбирают свою политику после выбора стратегий Центра. На данный момент в сфере обслуживания ЖД-путей на территории России работает одна вертикально интегрированная государственная компания ОАО «РЖД». Зачастую частные транспортные компании предоставляют свои вагоны для грузоперевозок, стыкуя их с подвижными составами РЖД, курсирующими между станциями. В процессе стыковки взимается плата в зависимости от количества

---

пристыкованных вагонов. В сфере морских грузоперевозок на данном этапе большинство причалов принадлежат государству, в то время как погрузочное оборудование, транспортные корабли, близлежащая территория порта находятся в частной собственности [4,5].

Каждый игрок стремится к максимизации своей прибыли, которая складывается из разности доходов и расходов.

Для центра основными источниками дохода являются:

- 1.) Доход от предоставления стыковочных мест на подвижных составах РЖД.
- 2.) Доход от портовых сборов.

Основными источниками расходов для центра являются:

- 1.) Расходы на содержание подвижных составов и инфраструктуры ЖД дорог.
- 2.) Расходы на содержание портовой инфраструктуры.

Для **Агента 1** основным источником дохода является:

- 1.) Доход от перевозки товаров.

Основными источниками расходов являются:

- 1.) Расходы на аренду сцепки для вагонов.
- 2.) Неустойка по перевозке груза.
- 3.) Расходы на содержание составов.

Для **Агента 2** основным источником дохода является:

- 1.) Доход от перевозки товаров морскими путями.

Основными источниками расходов являются:

- 1.) Расходы на портовые сборы.
- 2.) Неустойка по перевозке груза.
- 3.) Расходы на обслуживание кораблей при перевозке.
- 4.) Расходы на обслуживание погрузочного оборудования.

Условием гомеостаза является положительность суммарного товарооборота системы [6]:  $R(y_1, y_2) = y_1 + y_2 > 0$ .

---

Для первого случая модельные функции имеют вид:

$$H(s_1(t), s_2(t)) = \int_{t=1}^T [A(s_1(t), y_1(t)) + C(s_2(t), y_2(t)) - D_1(s_1(t)) - D_2(s_2(t))], \quad 1 \leq t \leq T;$$

$$s_1^{\min} \leq s_1 \leq s_1^{\max}; \quad s_2^{\min} \leq s_2 \leq s_2^{\max};$$

$$y_1^{\min} \leq y_1 \leq y_1^{\max}; \quad y_2^{\min} \leq y_2 \leq F(y_1);$$

где  $H$  – функция прибыли центра за время  $t$ ;

$s_1(t)$  – управление центра агентом 1 в момент времени  $t$ . Для предложенной модели управлением является цена аренды стыковочного места для клиентов РЖД;

$s_2(t)$  – управление центра агентом 2 в момент времени  $t$ . Для данной модели управлением является размер портового сбора, необходимый для уплаты при перевозке товаров.

$y_1(t)$  – управление агента 1 (Железнодорожная транспортная компания) в момент времени  $t$ . Для данной модели размер продукции, отправляемой со склада компании в порт.

$y_2(t)$  – управление агента 2 (Управление порта) в момент времени  $t$ .

Для данной модели объем продукции, отправляемой в качестве поставки со склада порта.

$A(s_1, y_1)$  – функция дохода центра от аренды стыковочных мест для перевозки грузов агента 1

$C(s_2, y_2)$  – функция дохода центра от портовых сборов при отправке товаров портом;

$D_1(s_1)$  – расходы центра на содержание Ж/Д структуры;

$D_2(s_2)$  – расходы центра на содержание портовой структуры.

Для агента 1 целевая функция принимает вид:

$$c_1(y_1, s_1) = \int_{t=1}^T [T_1(y_1(t)) - A(y_1(t), s_1(t)) - B_1(y_1(t)) - P]$$

$$1 \leq t \leq T; \quad s_1^{min} \leq s_1 \leq s_1^{max}; \quad y_1^{min} \leq y_1 \leq y_1^{max};$$

где:

$T_1(y_1)$  – доход компании от перевозки товара в момент времени  $t$ ;

$A(s_1, y_1)$  – расходы агента 1 на аренду стыковочных мест в момент времени  $t$ ;

$B_1(y_1)$  – неустойка по неотправленным товарам;

$P$  – расходы по амортизации транспортного оборудования.

Для агента 2 целевая функция принимает вид:

$$c_2(y_2, s_2) = \int_{t=1}^T [T_2(y_2(t)) - C(y_2(t), s_2(t)) - B_2(y_2(t)) - Z(y_2(t))]$$

$$1 \leq t \leq T; \quad s_2^{min} \leq s_2 \leq s_2^{max}; \quad y_2^{min} \leq y_2 \leq F(y_1);$$

$T_2(y_2)$  – доход компании от перевозки товара в момент времени  $t$ .

$C(s_2, y_2)$  – расходы агента 2 на оплату портового сбора в момент времени  $t$ .

$B_2(y_2)$  – неустойка по неотправленным товарам.

$Z(y_2)$  – расходы на оснащение кораблей для перевозки груза.

$F(y_1)$  – функция, определяющая влияние действий агента 1 на перевозимый объем товаров.

В результате решения были найдены точки, подозрительные на максимумы функций выигрыша подчиненных игроков [7]. К сожалению, найти оптимальное управление для ведущего игрока не представляется возможным, но благодаря аналитическому решению появилась возможность ускорить имитационное моделирование. Так, для описанной ранее модели с шагом имитации  $\epsilon_{ps} = 1$ , имитация без использования аналитического решения заняла 959451058 шагов, в то время как с использованием аналитического решения, всего лишь 358847 шагов, что более чем в 2000 раз быстрее.

### Динамическая модель

Основная проблема взаимодействия Ж/Д станции с портом – неэффективное использование подвижных составов. Зачастую, вагоны простаивают в ожидании разгрузки или погрузки товара [8]. Для водного транспорта данная проблема не так актуальна, так как основной приоритет разгрузки/погрузки отдается именно ему. В большинстве случаев, в грузовом порту предусмотрена зона перевалки грузов, которую в свою очередь можно использовать для уменьшения простоя подвижных составов. Идея оптимизации взаимодействия в составлении плана-графика поставок таким образом, чтобы зона перевалки использовалась оптимально, а подвоз и погрузка товаров происходила своевременно [9]. В отличие от статического случая, когда выбирается одно оптимальное управление на весь промежуток измерений, в динамической модели агенты могут менять свое управление определенное количество раз. Например, это может быть план-график поставок на день, неделю, месяц или квартал.

Для ранее описанной модели были введены переменные состояния  $x_1$  – количество недоставленного груза конечному потребителю и  $x_2$  – объем груза, находящегося на перевалочном складе порта и доступный к отправке с

---

причала. Данные переменные зависят от управления игроков и записываются рекуррентно:

$$x_1(t) = x_1(t - 1) + y_1^{max}(t) - y_2(t)$$

$$x_2(t) = x_2(t - 1) + y_1(t) - y_2(t - 1)$$

Аналитическое решение здесь затруднительно, что ограничивает скорость работы программы и оставляет возможность лишь имитационного решения. Увеличение количества прогнозируемых временных периодов увеличивают число итераций в геометрической прогрессии. Однако, предложен алгоритм поиска равновесий Штакельберга для произвольного количества временных промежутков [10]. Примером работы данного алгоритма является план-график на 4 условных временных промежутка:

Переменная	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$
$s_1$	25	0	0	0
$s_2$	0	50	50	50
$y_1$	750	750	750	750
$y_2$	0	1000	1000	1000

### Заключение

В результате исследования предложена модель взаимодействия двух типов транспорта в смешанных перевозках. Для решения задач в реальном времени с высокой точностью и без учета планирования на временном промежутке предложена статическая модель и ее решение. Для решения задач с временным планированием разработана динамическая модель, которая в большей степени приближена к реальным условиям, но не имеет

такой оперативности. С целью улучшения работы программы предлагается использовать метод качественно репрезентативных сценариев имитационного моделирования, а также параллельного программирования. Данные алгоритмы использованы для написания программы в среде GUI. В результате ее работы разрабатывается план-график для каждого элемента системы, что может быть использовано в качестве рекомендаций для увеличения эффективности транспортировки.

### Литература

1. Миротин Л.Б. «Управление грузовыми потоками в транспортно-логистических системах». Москва. «Горячая линия – Телеком». 2014. 706 с.
2. Балалаев А. С., Королищук Е. В. «Основы Логистики». Хабаровск. ДВГУПС. 2012. 130 с.
3. Официальная транспортная статистика. Росстат. [rosstat.gov.ru/statistics/transport](http://rosstat.gov.ru/statistics/transport).
4. Балалаев А. С. «Методология транспортно-логистического взаимодействия при мультимодальных перевозках». Хабаровск. ДВГУПС. 2010. 48 с.
5. Губко М.В., Новиков Д.А. «Теория игр в управлении организационными системами». Москва. 2005. 69 с.
6. Пасечная Е.В. «Основы Проектирования Инфраструктуры Мультимодальных Перевозок». Ростов-на-Дону. ФГБОУ ВО РГУПС. 2016. 44 с.
7. Ugol'nitskii G.A. Game-theoretical study of some hierarchical control methods. J. of Computer and Systems Science International. 2002. Pp.321 - 328.
8. Ougolnitsky G.A., Usov A.B. «Computer Simulations as a Solution Method for Differential Games». «Computer Simulations: Advances in Research and Applications». New York. Nova Science Publishers. 2018. Pp. 63-106.



9. Коновалов В.Л., «Организация Работы Грузовой Станции». Москва. 2017. 95 с.
10. Балалаев А.С., Король Р.Г. «Терминально-Логистические Комплексы». Хабаровск. ДВГУПС. 2016. 148 с.

### References

1. Mirotin L.B. Upravlenie gruzovymi potokami v transportno-logisticheskikh sistemah. [Cargo flow management in transport and logistics systems]. Moskva. «Gorjachaja linija – Telekom». 2014. 706 p.
  2. Balalaev A. S., Korolishhuk E. V. «Osnovy Logistiki» [Basics of Logistics]. Habarovsk. DVGUPS. 2012. 130 p.
  3. Oficial'naja transportnaja statistika Rosstat [Official transport statistics Rosstat]. rosstat.gov.ru/statistics/transport.
  4. Balalaev A. S. Metodologija transportno-logisticheskogo vzaimodejstvija pri mul'timodal'nyh perevozkah. [Methodology of transport and logistics interaction in multimodal transportation]. Habarovsk. DVGUPS. 2010. 48 p.
  5. Gubko M.V., Novikov D.A. Teorija igr v upravlenii organizacionnymi sistemami. [Game theory in the management of organizational systems]. Moskva. 2005. 69 p.
  6. Pasechnaja E.V. Osnovy Proektirovanija Infrastruktury Mul'timodal'nyh Perevozok. [Fundamentals Of Multimodal Transportation Infrastructure Design]. Rostov-na-Donu. FGBOU VO RGUPS. 2016. 44 p.
  7. Ugol'nitskii G.A. Game-theoretical study of some hierarchical control methods. J. of Computer and Systems Science International. 2002. Pp. 321 - 328.
  8. Ougolnitsky G.A., Usov A.B. Computer Simulations as a Solution Method for Differential Games. Computer Simulations: Advances in Research and Applications. New York. Nova Science Publishers. 2018. Pp.63-106.
  9. Konovalov м, Organizacija Raboty Gruzovoj Stancii» [Organization Of The Cargo Station Operation]. Moskva. 2017. 95 p.
-



10. Balalaev A.S., Korol' R.G. Terminal'no-Logisticheskie Kompleksy [Terminal And Logistics Complexes]. Habarovsk. DVGUPS. 2016. 148 p.