УДК 623.4.083

МЕХАНИЗМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ КОРПОРАЦИИ

В.В. Цыганов
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: bbc@ipu.ru

Ключевые слова: транспорт, организация, управление, механизм, функционирование, дорога, интенсивность движения, провозная способность.

Аннотация: Рассмотрена иерархическая организационная система, на нижнем уровне которой находится производитель продукции, ее перевозчик и потребители, а на верхнем – управляющий орган. Определен механизм функционирования транспортной корпорации в этой организационной системе. Рассмотрены решения игры корпорации с органом управления. Поставлена задача синтеза механизма функционирования, оптимизирующего провозную способность дороги. Найдены достаточные условия оптимальности и определена провозная способность однополосной кольцевой дороги. Полученные результаты использованы для определения провозной способности железной дороги**.**

1. Введение

Функционирование эффективных транспортных систем основано на оптимальной организации и управлении потоками. Например, в работе [1] развита эргодическая теория транспортных потоков. В работе [2] разработаны подходы к моделированию потоков на основе исследования операций. С другой стороны, крупные производственно-транспортные системы объединяют многих участников – от водителей транспортных средств (ТС), транспортных предприятий и корпораций до грузовладельцев, потребителей и властей. При управлении такими системами необходимо учитывать человеческий фактор, активность их элементов [3,4]. В работе [5] рассмотрены дорожные игры, связанные с наличием у водителей ТС собственных целей, не обязательно совпадающих с целью нанявшего их транспортного предприятия. Исходя из стационарного решения дорожной игры на кольцевой однополосной дороге длиной L, определяется интенсивность движения по ней (см. формулу (14) в работе [5]):

(1) $$J(n)=\begin{cases} nV/L, & if\ \ n<L/[(V+rkg)^2/2kg+l] \\ n\{[2kg(L/n-1)]^{1/2}-rkg\}/L, & if\ n\ge L/[(V+rkg)^2/2kg+l] \end{cases},$$

где n – число ТС, r – время реакции водителя ТС, k – коэффициент трения колес ТС о дорогу, l – длина ТС, V – максимально допустимая скорость, g – ускорение свободного падения. Основываясь на этом подходе, рассмотрим иерархическую производственно-транспортную систему, включающую центр управления и транспортную корпорацию.

2. Транспортная система и корпорация

2.1. Модель производственно-транспортной системы

Рассмотрим двухуровневую модель производственно-транспортной системы, на нижнем уровне которой находится производитель, перевозчик и потребители продукции, а на верхнем – управляющий орган (Центр). При этом единственный производитель продукции расположен в некоторой точке кольцевой дороги. Потребители же продукции находятся в диаметрально противоположной точке этой дороги. Перевозчиком является транспортная корпорация – организация, владеющая транспортной инфраструктурой и ТС. Пример – модель экспортных поставок угля из места его добычи и погрузки – Кузбасса на Дальний Восток, в порт Советская Гавань. При этом цикл обращения грузовых поездов по Байкало-Амурской магистрали (БАМ) начинается и завершается в Кузбассе. В качестве производителя-грузовладельца рассматривается объединение поставщиков угля из Кузбасса, а в качестве перевозчика – транспортная корпорация ОАО «РЖД», владеющая инфраструктурой, локомотивами и грузовыми вагонами.

Будем считать, что существует стабильный потребительский спрос на вышеуказанную продукцию. Соответственно, имеется постоянный спрос C на перевозки в единицу времени (например, в сутки), выраженный в весовых показателях (например, в тоннах). В соответствии с монопольным статусом, перевозчик обязан полностью удовлетворять спрос C. Например, в соответствии с действующими на железной дороге правилами антимонопольного регулирования, ОАО «РЖД» не вправе отказать в перевозке груза. Поскольку перевозчик обязан полностью удовлетворить спрос C, объем перевозки в единицу времени также должен быть равен C.

Экономические цели элементов транспортной системы связаны с получением прибыли. При удовлетворении спроса на продукцию C, производитель получает доход от ее продажи потребителям: $P = pC,$ где p – цена единицы продукции для потребителей. Производитель, нуждающийся в услугах перевозчика для доставки продукции потребителю, выступает в роли грузовладельца. Прибыль грузовладельца равна разнице между доходом (P) и стоимостью перевозки (D), зависящей от объема, расстояния и тарифа. Например, если спрос на перевозки C выражается в тоннах в сутки, а расстояние – в км, то стоимость перевозки от производителя к потребителю, находящемуся в диаметрально противоположной точке кольцевой дороги, равна $D = dCL/2,$ где d – тариф за перевозку 1 тонны груза на 1 км. Соответственно, при доставке товара потребителям, грузовладелец получает прибыль, равную разнице между доходом (P) и транспортными издержками D: $Z = pC - D = C(p - dL/2)$. Часть этой прибыли (b) он выплачивает Центру в виде налога. При этом перевозчик получает доход, равный разнице между стоимостью перевозки D и ее себестоимостью E. Соответственно, его прибыль после налогообложения по ставке b равна $Q = (1-b)(D-E) = (1-b)(dCL/2 - E)$. При этом Центр получает налоги T по ставке b от прибыли грузовладельца Z и перевозчика Q: $T = b(P+Q) = b[C(p - dL/2) - E)$.

2.2. Механизмы функционирования транспортной корпорации

Рассмотрим двухуровневую организационную систему, на нижнем уровне которой находится перевозчик, а на верхнем – Центр. Состояние перевозчика описывается j показателями $y = (y_1,...,y_j) \in Y \subset R_+^j$, где Y – выпуклое замкнутое множество возможных состояний перевозчика в положительном ортанте R_+^j.

2.2.1. Порядок функционирования системы. Вначале Центр устанавливает механизм функционирования транспортной корпорации (кратко – механизм) $\Sigma = (I, x, f)$, включающий институциональную процедуру *I*, план *x* и процедуру стимулирования *f*. Институциональная процедура *I* регламентирует количественные и качественные параметры подвижного состава перевозчика (такие как число ТС *n*), или разрешает их изменение. План *x* – желательное для Центра состояние перевозчика, характеризуемое *j* показателями $x = (x_1, ..., x_j) \in Y \subset R_+^j$. Процедура стимулирования перевозчика

(2) $$f(x, y) = q(y) - h(x, y),$$

где $q(y)$ – функция поощрения, являющаяся непрерывной функцией *y*, $h(x, y)$ – функция штрафов за отклонение состояния *y* от плана *x*. Пример процедуры поощрения перевозчика: $q(y) = Q = (1-b)(dCL/2 - E)$.

Далее, зная механизм $\Sigma = (I, x, f)$, перевозчик выбирает состояние y^*, при котором его целевая функция, определяемая согласно (2), максимальна. Таким образом, в процессе функционирования системы возникает игра перевозчика с Центром. Множество решений этой игры $R(\Sigma) = Arg \max_{y \in Y} f(x, y)$ – это множество состояний, при которых достигается максимум целевой функции перевозчика $f(x, y)$. Перевозчик выбирает оптимальное состояние y^* из этого множества:

(3) $$y^* \in R(\Sigma) = Arg \max_{y \in Y} f(x, y).$$

Пусть $A(y)$ – целевая функция Центра, непрерывная по *y*, например,

(4) $$A(y) = T = b[C(p - dL/2) - E).$$

Критерий эффективности механизма $\Sigma = (I, x, f)$ – гарантированная величина целевой функции Центра $\min_{y \in R(\Sigma)} A(y)$, определяемая на множестве решений игры $R(\Sigma)$. Задача Центра состоит в выборе механизма $\Sigma = (I, x, f)$, при котором этот критерий максимален. Формально, задача оптимального синтеза механизма $\Sigma = (I, x, f)$ имеет вид:

(5) $$\min_{y \in R(\Sigma)} A(y) \xrightarrow[\Sigma \in G]{} \max,$$

где *G* – множество допустимых механизмов.

2.2.2. Правильные механизмы. Поскольку Центр заинтересован в удовлетворении спроса на перевозки, будем полагать, что множество *G* состоит из механизмов, обеспечивающих баланс спроса и предложения транспортных услуг (кратко – правильных механизмов). Рассмотрим решения задач синтеза (5) на множестве правильных механизмов при полной информированности Центра обо всех параметрах модели. В соответствии с вышесказанным, решение (5) будем искать на множестве *G* правильных механизмов, обеспечивающих удовлетворение спроса на перевозки. Формально, механизм $\Sigma = (I, x, f)$ – правильный, если:

(6) $$C = mJ(n).$$

3. Оптимизация числа транспортных средств

Рассмотрим механизм $\Sigma_n = (I_n, x, f)$, включающий институциональную процедуру I_n, допускающую изменение числа ТС. Состояние перевозчика определяется числом

ТС n: $y \equiv n, n \in N \subset R^1_+$. Тогда, согласно (3) и (4), $f(x,y) = f(x,n)$ и $A(y) = A(n)$. Рассмотрим сильные штрафы за отклонение состояния y от плана x:

(7) $$H(x,y) = \begin{cases} 0, \ if \ \ y = x \\ \infty, if \ \ y \neq x \end{cases}.$$

Процедуру стимулирования (2) с сильными штрафами (7) будем обозначать $F(x,y)$:

(8) $$F(x,y) = q(y) - H(x,y).$$

3.1. Оптимальный баланс спроса и предложения

Будем говорить, что имеет место оптимальный баланс спроса и предложения, если

(9) $$C = mJ(\hat{n}),$$

(10) $$\hat{n} = \begin{cases} L/[(V + rkg)^2 / 2kg + l], \ if \ \ (V + rkg)^2 < 2kg\,l \\ \qquad L/w, \qquad\qquad if \ \ (V + rkg)^2 \geq 2kg\,l \end{cases},$$

(11) $$w = (2l + r^2kg)[1 + r/(2l/kg + r^2)^{1/2}.$$

Теорема 1. *Для оптимальности механизма* $\Sigma_n = (I_n, x, F)$, *при оптимальном балансе спроса и предложения, достаточно* $x = \hat{n}$.

Доказательство теоремы 1. Нетрудно показать, что определяемая согласно (1) $J(n)$ – непрерывная вогнутая функция n, имеющая единственный максимум. При этом оптимальное число ТС, при котором $J(n)$ максимальна, определяется согласно (10) и (11). Далее, по условию теоремы (9), выполняется $C = mJ(\hat{n})$. Но при механизме $\Sigma_n = (I_n, x, F)$, по определению, $y \equiv n$. Полагая $x = \hat{n}$, из (2), (7) и (8) получаем, что множество $R(\Sigma)$ состоит из единственной точки $\hat{n}$. Поэтому, согласно (3), $y^* = \hat{n}$, и выполняется (6). Но тогда механизм $\Sigma_n = (I_n, x, F)$ – правильный. Кроме того, в силу единственности y^* и непрерывности $A(y)$, механизм $\Sigma_n = (I_n, x, F)$ является решением задачи (5). Теорема 1 доказана.

3.2. Достаточная провозная способность

Величина $mJ(\hat{n})$, равная суммарной грузоподъемности оптимального числа ТС $\hat{n}$, определяемого согласно (10) и (11), называется провозной способностью. При

(12) $$C < mJ(\hat{n})$$

спрос меньше провозной способности (например, в силу его малости, или большой пропускной способности и грузоподъемности ТС). Предположим, что функция поощрения $q(y) = Q = (1-b)(dCL/2 - E)$. При этом себестоимость перевозки E включает расходы на амортизацию ТС и дорожной инфраструктуры, которые растут с увеличением числа ТС на дороге. В связи с этим, предполагается, что $E = E(n)$ является строго монотонно возрастающей функцией числа ТС на дороге [4]:

(13) $$E = E(n) \uparrow n.$$

Теорема 2. *Предположим, что выполняется (4), (12), (13), и* $J^{-1}(c)$ *– функция, обратная* $J(n)$ *на сегменте* $[0, \hat{n}]$. *Тогда механизм* $\Sigma_n = (I_n, x, F)$ *– оптимальный, если*

(14) $$x = J^{-1}(C/m).$$

Доказательство теоремы 2. Согласно (10) и (11), $J(n)$ – непрерывная вогнутая функция n с единственным максимумом

$$(15) \qquad J(\hat{n}) = \begin{cases} V/[(V+rkg)^2/2kg+l], & if \ (V+rkg)^2 < 2kgl \\ \{[2kg(w-1)]^{1/2} - rkg\}/w, if \ (V+rkg)^2 \geq 2kgl \end{cases},$$

причем $J(0) = 0$ и $J(L/(r^2kg/2+l)] = 0$. Поэтому, при условии (12), существуют два числа n_1 и n_2, такие что $n_1 < \hat{n} < n_2$, при которых выполняется (6). Следовательно, правильность механизма $\Sigma_n = (I_n, x, F)$ обеспечивается при $y \in Y^c = \{n_1, n_2\}$. В силу (4) и (13), $A(y)$ – строго монотонно убывающая функция *n*, так что $A(n_1) > A(n_2)$. Следовательно, для оптимальности механизма $\Sigma_n = (I_n, x, F)$ необходимо и достаточно $y^* = n_1$. Докажем это равенство. В соответствии с (10), (11) и (15), $J(n)$ строго монотонно возрастает по *n* при $0 \leq n < \hat{n}$, причем $0 \leq J(n) < J(\hat{n})$. Следовательно, существует обратная функция $n = J^{-1}(c)$, строго монотонно возрастающая по *c* при $0 \leq c < J(\hat{n})$, причем $0 \leq n < \hat{n}$. Тогда, в силу (12), существует единственное число $n_1 = J^{-1}(C/m)$, $n_1 \leq \hat{n}$, при котором выполняется (6). Но, по условию теоремы, $x = J^{-1}(C/m)$, так что $x = n_1$. При этом, в силу (2), (3) и (7), $y^* = n_1$. Теорема 2 доказана.

3.3. Провозная способность железной дороги

Используя теоремы 1,2, можно определить оптимальную провозную способность железной дороги, например, БАМ. Для простоты будем считать время реакции машинистов $r = 1$ сек. Для перевозки грузов по железной дороге ОАО «РЖД» использует, в основном, поезда, составленные из 71 условных вагонов, каждый из которых имеет длину 14 м [4]. Поэтому стандартная длина грузового поезда – 1050 м. Далее, коэффициент трения скольжения колес о рельсы (*k*) при торможении меняется от 0,08 до 0,14 [6]. Тогда, полагая среднее значение коэффициента трения $k = 0{,}11$ и $l = 1050$, имеем: $2kgl = 2376$, $rkg = 1{,}08$. Далее, скорость движения грузовых поездов на БАМ, в основном, ограничена 60 км/час из-за сложных климато-геграфических условий. Тогда, полагая $V = 60$, имеем $(V+rkg)^2 = 315$. Следовательно, $(V+rkg)^2 << 2kgl$. По теореме 1, план равен оптимальному числу поездов: $x = \hat{n} = L/[(V+rkg)^2/2kg+l] = 360L_{tkm}$, где $L_{tkm} = 10^{-6}L$ – длина железной дороги в тыс. км. Нетрудно получить, что оптимальная интенсивность движения $J(x) = 186$ поездов в сутки. Отсюда, при средней грузоподъемности поезда 3 тыс. тонн (*m*=3), провозная способность равна $365mJ(x) = 204$ млн тонн в год. На практике, провозная способность БАМ в 2020 г. прогнозируется на уровне всего 50 млн. тонн. Причина столь низкой провозной способности в том, что скорость передвижения поездов на БАМ ограничена, т.к. около 600 км ее составляют однопутные перегоны, оборудованные разъездами для встречных поездов. Таким образом, теоретически провозную способность БАМ общей длиной 4300 км можно увеличить в 4 раза за счет строительства только 600 км вторых железнодорожных путей. Эта идея была использована в процессе разработки проекта модернизации БАМ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (17-20-05216).

Список литературы

1. Gray L., Griffeath D. The Ergodic Theory of Traffic Jams // Journal of Statistical Physics. 2001. Vol. 105. P. 418-430.

2. Nagel K., Wagner P., Woesler R. Still flowing: Approaches to traffic flow and traffic jam modeling // Operations Research. 2003. Vol. 51. P. 681-710.
3. Бурков В.Н., Кондратьев В.В. Механизмы функционирования организационных систем. М.: Наука, 1981. 394 с.
4. Большие транспортные системы: теория, методология, разработка и экспертиза / Под ред. Цыганова В.В. СПб.: ИПТ РАН, 2016. 216 с.
5. Tsyganov V. Drivers' Games and Road Carrying Capacity // Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies. Moscow, Russia, 2017. IPU RAN, 2017. P. 239-243.
6. http://pomogala.ru/tormoza/tormoza_2.html