



Структурные уровни межрегиональных транспортных систем



Игорь ТАРАРЫЧКИН

Igor A. TARARYCHKIN

Разработаны метод определения структурных уровней межрегиональных транспортных систем, алгоритмы и количественные критерии, позволяющие устанавливать состав и число структурных уровней. Показано, что в общем случае межрегиональная транспортная система может иметь три уровня (местный, региональный и межрегиональный), а оптимизацию ее функционирования следует осуществлять последовательно на каждом из них с учетом предлагаемого математического инструментария.

Ключевые слова: транспорт, система, элементы, структура, межрегиональный уровень, кластеры, структурный анализ, метод, оптимизация.

Тарарычкин Игорь Александрович – доктор технических наук, доцент кафедры «Транспортные системы» Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, Луганск, Украина.

Формирование транспортных систем, их развитие, обновление инфраструктуры и организация оптимального функционирования представляют собой совокупность проблем, актуальность которых тесно связана с экономическим развитием регионов и территорий [1–3].

Для выполнения грузовых перевозок между близлежащими предприятиями, находящимися в рамках производственных отношений и образующих отдельные кластеры, создается транспортная сеть местного уровня. На региональном уровне узлы отдельных кластеров соединяются путями сообщений с образованием единой транспортной сети, обеспечивающей взаимодействие различных хозяйствующих субъектов. Кроме того, необходимость транзита грузов приводит к формированию транспортных коридоров с преимущественно сквозными грузопотоками, для прохождения которых должны быть предусмотрены соответствующие условия [4].

Отсюда следствие: межрегиональные транспортные системы могут иметь сложную многоуровневую структуру, а оптимизацию функционирования таких систем

предполагается выполнять отдельно на каждом из рассматриваемых уровней [5,6].

Это означает, что процедуре оптимизации функционирования должен предшествовать этап определения числа уровней системы и выявления принадлежности её отдельных элементов к местному, региональному или межрегиональному уровням.

Однако в научных источниках такого рода данные не приводятся, что затрудняет проведение структурного анализа и решения задач искомой оптимизации. Нужна разработка метода определения состава и количества структурных уровней межрегиональных транспортных систем.

ЭЛЕМЕНТЫ И УРОВНИ

Возьмем фрагмент межрегиональной транспортной системы, показанный на рис. 1. Элементами представленной структуры являются пути сообщения, используемые для доставки грузов и объединенные в общую сеть при помощи совокупности транспортных узлов.

В общем случае элементы системы можно разделить на отдельные группы с учетом той роли, которую они выполняют в транспортном процессе.

Это могут быть: местный уровень, определяемый набором элементов, обеспечивающих функционирование отдельных кластеров как совокупности взаимосвязанных предприятий и производств на соответствующей территории; региональный — определяемый совокупностью транспортных путей, соединяющих узлы отдельных кластеров в единую транспортную сеть; межрегиональный — в виде набора участков межрегиональной трассы, функционирование которой связано с прохождением транзитных транспортных потоков.

При этом каждый из действующих участков транспортной сети, являясь элементом межрегиональной системы, характеризуется:

- принадлежностью к одному из трех обозначенных уровней;
- длиной (фактическим расстоянием между определяющими его положение транспортными узлами);
- величиной грузового потока, представляющего собой общий объем грузовых перевозок за анализируемый период времени на рассматриваемом участке в обоих направлениях.

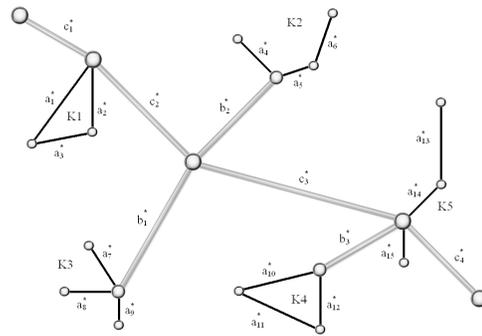


Рис. 1. Фрагмент межрегиональной транспортной системы, объединяющей производственные кластеры K1, K2, ... K5.

Pic. 1. Fragment of an interregional transport system, uniting productive clusters K1, K2, ... K5.

С учетом указанных структурных особенностей для обозначения элементов транспортной сети на местном уровне используются символы a_i^* ($i=1, 2, \dots, N_A$), региональном — b_i^* ($i=1, 2, \dots, N_B$), межрегиональном — c_i^* ($i=1, 2, \dots, N_C$). Совокупность всех элементов a_i^* образует множество A^* , характеризующее местный уровень системы, совокупность элементов b_i^* представляет собой множество B^* , представляющее региональный уровень, а элементов c_i^* — соответственно множество C^* и межрегиональный уровень (рис. 1).

Поскольку каждый из элементов множеств характеризуется длиной l и величиной наблюдаемого грузопотока q , то перечисленные характеристики следует рассматривать как координаты этих элементов на плоскости $q|l$.

Тогда структура межрегиональной транспортной сети может быть описана набором элементов (точек на плоскости):

$$\begin{cases} a_i^*(l_i^{A^*}, q_i^{A^*}) & (i=1, 2, \dots, N_A) \\ b_i^*(l_i^{B^*}, q_i^{B^*}) & (i=1, 2, \dots, N_B) \\ c_i^*(l_i^{C^*}, q_i^{C^*}) & (i=1, 2, \dots, N_C), \end{cases}$$

где $N_A+N_B+N_C$ — общее число элементов системы и суммарное количество всех транспортных путей.

Тогда для фрагмента межрегиональной транспортной системы, показанного на рис. 1, общее число транспортных путей: $N_A+N_B+N_C = 32$ (таблица 1).

Данные таблицы 1 использовались при построении совокупности точек, принадлежащих множествам A^* , B^* и C^* в системе координат $q|l$ (рис. 2). Из рисунка следует,





Рис. 2. Представление множества элементов транспортной системы в виде групп точек на плоскости qO_l .

Рис. 2. Representation of a set of transport system's elements as group of points on the plane qO_l .

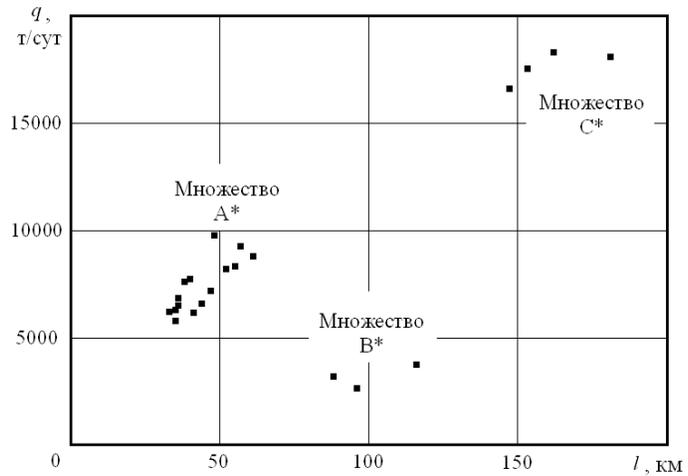
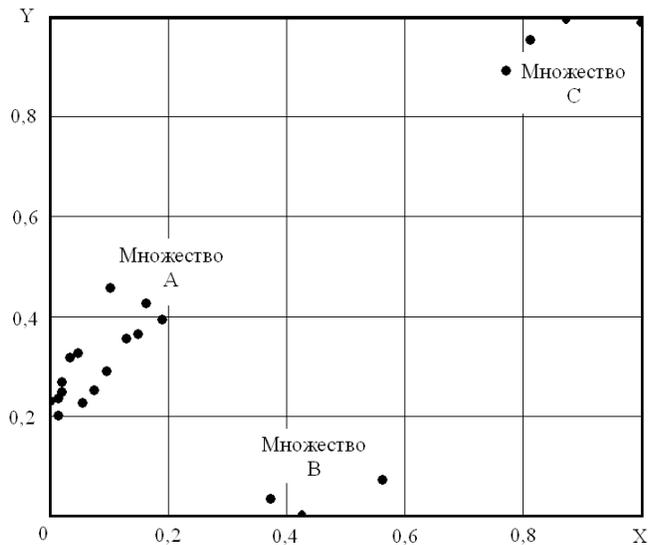


Рис. 3. Представление множества элементов транспортной системы в виде групп точек на плоскости YOX .

Рис. 3. Representation of a set of transport system's elements as group of points on the plane YOX .



что анализируемый фрагмент располагает тремя группами близлежащих точек, подтверждающих наличие у системы трех структурных уровней.

Однако в общем случае для определения количества структурных уровней и последующего принятия решений, связанных с оптимизацией функционирования транспортной системы, одних графических построений недостаточно.

Решение такой задачи связано с необходимостью создания количественных критериев и соответствующих расчетных алгоритмов, позволяющих отказаться от визуальной оценки взаимного расположения на плоскости элементов множеств A^* , B^* и C^* . Разработку критериев следует выполнять после преобразования исход-

ных данных, основанных на использовании величин q [т/сут] и l [км] с указанной размерностью к безразмерным характеристикам. Для этого координаты элементов, принадлежащих множеству A^* , следует преобразовать:

$$\begin{cases} x_i^A = \frac{l_i^{A^*} - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}} \\ y_i^A = \frac{q_i^{A^*} - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \end{cases}$$

Аналогичным образом преобразуются координаты элементов множества B^* :

$$\begin{cases} x_i^B = \frac{l_i^{B^*} - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}} \\ y_i^B = \frac{q_i^{B^*} - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \end{cases}$$

Таблица 1 / Table 1

Характеристика элементов межрегиональной транспортной системы
 Characteristics of interregional transport system's elements

Обозначение множества и его элементов Notion of a set and its elements	Уровень системы и порядковый номер элемента, i Level of a system and index number of an element, i	Длина, км Length, km	Величина общего грузопотока, т/сут Volume of a general freight flow, t/day
A^*	местный/local	$l_i^{A^*}$	$q_i^{A^*}$
a_1^*	1	35	5800
a_2^*	2	41	6200
a_3^*	3	44	6600
a_4^*	4	52	8200
a_5^*	5	38	7620
a_6^*	6	33	6250
a_7^*	7	57	9300
a_8^*	8	61	8800
a_9^*	9	48	9800
a_{10}^*	10	55	8350
a_{11}^*	11	47	7200
a_{12}^*	12	36	6850
a_{13}^*	13	40	7760
a_{14}^*	14	36	6535
a_{15}^*	15	35	6325
B^*	региональный/regional	$l_i^{B^*}$	$q_i^{B^*}$
b_1^*	1	88	3200
b_2^*	2	96	2650
b_3^*	3	116	3780
C^*	межрегиональный/ interregional	$l_i^{C^*}$	$q_i^{C^*}$
c_1^*	1	147	16600
c_2^*	2	162	18300
c_3^*	3	181	18100
c_4^*	4	153	17550

Соответственно для элементов множества C^* :

$$\begin{cases} x_i^C = \frac{l_i^{C^*} - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}} \\ y_i^C = \frac{q_i^{C^*} - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}}, \end{cases}$$

где l_{\max} – наибольшая длина транспортного участка среди всех элементов, принадлежащих множествам A^* , B^* и C^* ;

l_{\min} – наименьшая длина транспортного участка;

q_{\max} – максимальная величина общего грузопотока среди всех элементов, принадлежащих множествам A^* , B^* и C^* ;

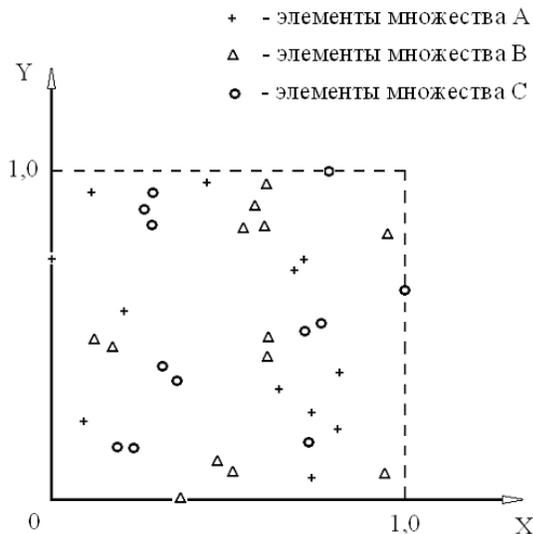
q_{\min} – минимальная величина грузопотока.

Для представленных в таблице 1 данных значения указанных характеристик следу-



Рис. 4. Перекрывающиеся множества элементов транспортной системы на плоскости YOX.

Pic. 4. Overlapping sets of transport system's elements on the plane YOX.



ющие: $l_{\min} = 33$ [км], $l_{\max} = 181$ [км], $q_{\min} = 2650$ [т/сут], $q_{\max} = 18300$ [т/сут].

Отметим, что использование процедуры замены переменных приводит к тому, что все элементы новых множеств А, В и С располагаются в пределах квадрата со стороной, равной единице. Так, на рис. 3 показано расположение элементов множеств А, В и С в системе координат YOX для преобразованной системы исходных данных. Видно, что взаимное расположение элементов оказывается аналогичным расположению элементов исходных множеств А*, В* и С* на плоскости q0l.

Можно в итоге заключить, что процедура преобразования переменных упрощает процедуру оценки взаимного положения множеств, характеризующих структуру транспортной системы. При этом исходным неперекрывающимся множествам А*, В* и С* будут соответствовать и перекрывающиеся множества А, В, С в новой системе координат YOX.

Если же исходные множества «перекрываются», то в системе координат YOX соответствующие элементы будут располагаться так, как это показано на рис. 4, и визуально разделить их на отдельные множества А, В, С со своими границами невозможно. В этом случае анализируемая транспортная система является одноуровневой, а оптимизация ее функционирования должна производиться иначе, чем для многоуровневых систем.

То есть процедура структурного анализа и определения количества уровней транспортной системы связана с необходимостью оценки взаимного расположения элементов множеств А, В и С в системе координат YOX с учетом возможности их частичного или полного «перекрывания».

В общем случае межрегиональная транспортная система может включать три уровня, каждый из которых характеризуется совокупностью близлежащих точек на плоскости YOX, образующих отдельные множества. Структуру сети следует рассматривать как многоуровневую, если анализируемые множества не перекрываются, а количество структурных уровней системы будет определяться числом таких множеств.

Таким образом, оценка взаимного расположения отдельных множеств, характеризующих структуру транспортной системы, служит важным этапом анализа, результаты которого определяют суть последующих действий, связанных с оптимизацией её функционирования.

В соответствии с существующими представлениями мерой близости отдельных взятых элементов множества является расстояние между ними, которое в зависимости от характера решаемой задачи определяется различным образом [7].

Поскольку в дальнейшем возникает потребность в оценке взаимного расположения как отдельных элементов множества, так и различных множеств, представля-

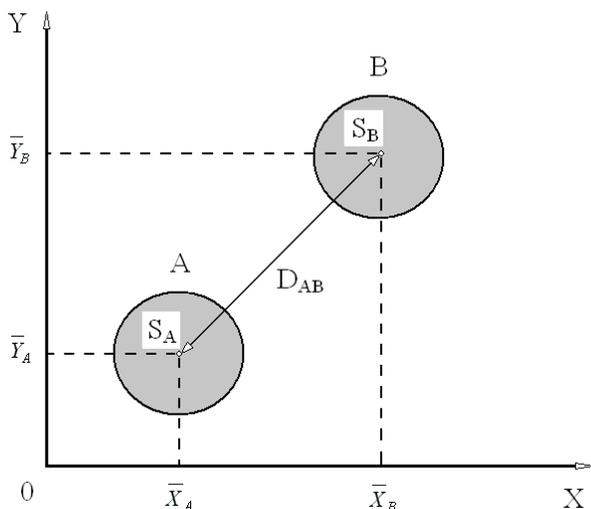


Рис. 5. Схема определения расстояния между множествами A и B.

Pic. 5. Scheme of distance determination between sets A and B.

ющих собой совокупность однородных объектов, отражающих тот или иной структурный уровень, то все эти задачи должны быть рассмотрены и решены последовательно.

МНОЖЕСТВО И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Беря множество элементов как совокупность конечного числа точек на плоскости, отметим, что выбор метрики или меры, позволяющей оценивать их близость, становится обязательным этапом проведения структурного анализа [7].

Далее близость элементов $a_i(x_i^A, y_i^A)$ и $a_j(x_j^A, y_j^A)$, принадлежащих множеству A, оценивается при помощи евклидова расстояния, определяемого на плоскости YOX следующим образом:

$$d_{i,j}^A = \sqrt{(x_i^A - x_j^A)^2 + (y_i^A - y_j^A)^2}.$$

В этом случае понятие близости отдельных элементов совпадает с их геометрической близостью на плоскости YOX, а характеристикой такого множества, состоящего из N_A элементов, является максимальное расстояние D_A между его точками:

$$D_A = \text{diam } A = \sup_{x, y \in A} d(x, y).$$

Таким образом, в дальнейшем под диаметром множества понимается верхняя грань расстояний между парами его точек [8]. Это означает, что множество элементов a_i ($i=1, 2, \dots, N_A$) на плоскости может быть

«накрыто» кругом с диаметром D_A . Однако центр такого круга не оказывается центром всего множества. Связано это с тем, что при наличии нескольких элементов с расстоянием между ними, равным D_A , у множества возникает несколько центров. Поэтому в общем случае множество элементов на плоскости центра не имеет.

Тем не менее, при решении задач, связанных, например, с определением центра тяжести системы точек на плоскости, в качестве центра множества выступает центр тяжести [9], то есть точка S_A на плоскости с координатами:

$$\bar{x}_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} x_i^A}{N_A}; \quad \bar{y}_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} y_i^A}{N_A}.$$

В целом характеристики множества обладают следующими свойствами:

1. При большом числе элементов (несколько десятков и более) присоединение к множеству нескольких точек в пределах окружности диаметром D_A с центром в точке S_A не приводит к заметному изменению положения центра (свойство устойчивости положения центроида).

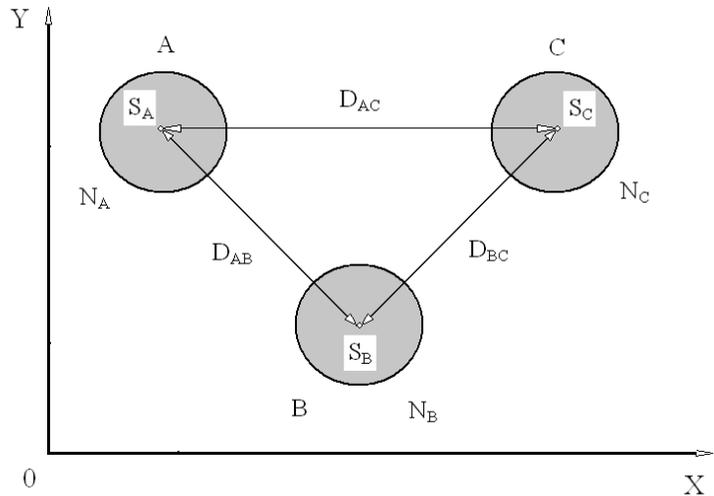
2. Изменение диаметра множества не происходит, если значения координат каждого из его элементов увеличить (уменьшить) на одно и то же число (свойство независимости диаметра от положения начала координат).

3. Добавление в состав множества нового элемента приводит к увеличению его



Рис. 6. Взаимное расположение множеств A, B, C и схема определения расстояний между ними.

Fig. 6. Mutual arrangement of sets A, B, C and scheme of distance determination.



диаметра только в том случае, если при этом происходит увеличение наибольшего расстояния между элементами.

Перечисленные свойства позволяют рассматривать D_A , x_A и y_A как характеристики, пригодные для описания групповых свойств элементов, составляющих множество A.

ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ МНОЖЕСТВ

Понятие расстояния между группами однородных объектов обычно используется при разработке процедуры их классификации и связано с оценкой взаимного расположения на плоскости множеств различной природы. При этом мерой близости отдельных множеств может служить расстояние, определяемое по принципу «ближнего соседа», с использованием потенциальных функций и т. п.

Поскольку центр отдельного множества определяется положением центра тяжести на плоскости $Y0X$, то расстояние между множествами A и B, которые содержат соответственно N_A и N_B элементов, определяется как евклидово между центроидами S_A и S_B (рис. 5):

$$D_{AB} = \sqrt{(\bar{x}_A - \bar{x}_B)^2 + (\bar{y}_A - \bar{y}_B)^2} = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^{N_A} x_i^A}{N_A} - \frac{\sum_{i=1}^{N_B} x_i^B}{N_B} \right]^2 + \left[\frac{\sum_{i=1}^{N_A} y_i^A}{N_A} - \frac{\sum_{i=1}^{N_B} y_i^B}{N_B} \right]^2} \quad (1)$$

Если множества A и B характеризуются значениями диаметров D_A и D_B , то в дальнейшем такие множества оцениваются как неперекрывающиеся при выполнении неравенства

$$D_{AB} < \frac{D_A}{2} + \frac{D_B}{2}.$$

После преобразований это условие формулируется так:

$$\eta_{AB} = 1 - \frac{D_A + D_B}{2D_{AB}} > 0.$$

В данном случае критерий η_{AB} следует воспринимать как показатель парной близости множеств A и B. Он принимает положительные значения тогда, когда множества удалены на плоскости $Y0X$ и «смешивания» их элементов не происходит. В противном случае $\eta \leq 0$. При этом постепенное взаимное удаление неперекрывающихся множеств A и B будет сопровождаться и непрерывным ростом положительных значений η_{AB} .

Рассмотрим случай, когда на плоскости $Y0X$ (рис. 6) расположено три множества A, B и C с количеством элементов N_A , N_B , N_C и диаметрами D_A , D_B , D_C соответственно.

Расстояние между множествами A и B фиксируется по формуле (1). Аналогичным образом находятся и расстояния между множествами B и C, а также A и C.

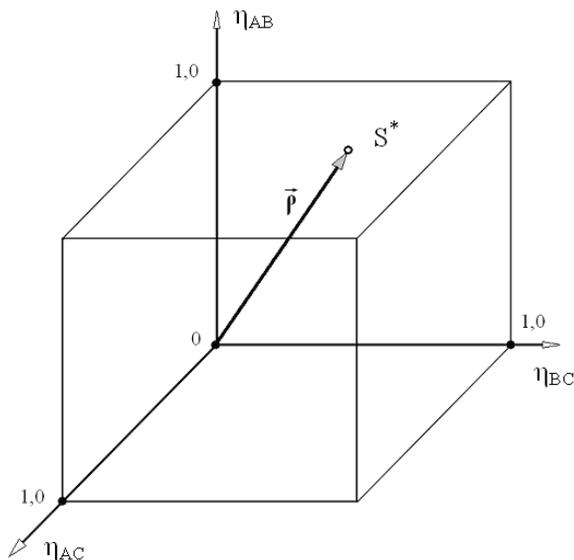


Рис. 7. Положение радиус-вектора $\vec{\rho}$ в системе координат $\eta_{AB}, \eta_{AC}, \eta_{BC}$.

Pic. 7. Location of radius-vector $\vec{\rho}$ in coordinate system $\eta_{AB}, \eta_{AC}, \eta_{BC}$.

Показатели парной близости перечисленных множеств определяются так:

$$\begin{cases} \eta_{AB} = 1 - \frac{D_A + D_B}{2 \cdot D_{AB}} \\ \eta_{AC} = 1 - \frac{D_A + D_C}{2 \cdot D_{AC}} \\ \eta_{BC} = 1 - \frac{D_B + D_C}{2 \cdot D_{BC}} \end{cases}$$

Анализируемые множества А, В и С не будут перекрываться при выполнении условия:

$$\begin{cases} \eta_{AB} > 0 \\ \eta_{AC} > 0 \\ \eta_{BC} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Отметим, что с практической точки зрения такая ситуация представляет наибольший интерес, поскольку именно в этом варианте анализируемая система имеет три структурных уровня (местный, региональный и межрегиональный).

Предположим, система является трехуровневой, и условие (2) выполняется. Поскольку максимально возможное значение парного показателя близости равно единице, то в системе прямоугольных координат $(\eta_{AB}, \eta_{AC}, \eta_{BC})$ область изменения положения радиус-вектора $\vec{\rho}$ будет находиться внутри пространства, ограниченного единичным кубом (рис. 7).

Максимально возможной величины модуль радиус-вектора $\vec{\rho}$ достигает тогда,

когда точка S^* , характеризующая взаимное расположение множеств (рис. 7), совпадает с вершиной куба, наиболее удаленной от начала координат: $|\vec{\rho}|_{\max} = \sqrt{3}$.

Такое положение радиус-вектора соответствует случаю наибольшего удаления всех рассматриваемых множеств друг от друга. И здесь для оценки взаимной близости трех анализируемых множеств следует применить обобщенный показатель θ :

$$\theta = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\eta_{AB}^2 + \eta_{AC}^2 + \eta_{BC}^2}.$$

Использование нормировочного множителя $1/\sqrt{3}$ приводит к тому, что обобщенный показатель близости может изменяться в диапазоне значений $0 \leq \theta \leq 1$.

Следовательно, можно заключить, что разработанный обобщенный показатель близости нескольких неперекрывающихся множеств основан на учете парных показателей близости отдельных множеств и равен их среднему квадратическому значению.

Примем во внимание, что значение $\theta = 0$ отвечает случаю предельного сближения всех множеств без их взаимного перекрытия. Значению $\theta = 1$ соответствует случай взаимного удаления множеств на предельно возможное расстояние. При этом по мере взаимного удаления множеств на плоскости YOX будет происходить и непрерывный рост соответствующих значений θ .





Таким образом, свойства трехуровневых межрегиональных транспортных систем в наибольшей степени проявятся именно в тех ситуациях, когда неперекрывающиеся множества в достаточной степени удалены друг от друга, а величина обобщенного показателя близости находится в интервале значений $0,5 < \theta < 1,0$.

ВЫВОДЫ

Предложен метод структурного анализа и определения числа структурных уровней межрегиональных транспортных систем, основанный на разделении множества их элементов на отдельные группы и с учетом отведенной им роли в транспортном процессе. Показано, что в общем случае межрегиональная транспортная система может иметь три уровня, а оптимизацию ее функционирования следует осуществлять последовательно на каждом из предусмотренных структурных уровней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бенсон Д., Уайтхед Дж. Транспорт и доставка грузов: Пер. с англ. – М.: Транспорт, 1990. – 279 с.
2. Внешнеторговые транспортные операции и логистика / Под ред. Д. С. Николаева. – М.: Анкил, 1998. – 318 с.
3. Миротин Л. Б. Логистика: управление в грузовых транспортно-логистических системах. – М.: Юристъ, 2002. – 414 с.
4. Троицкая Н. А. Транспортные коридоры России для международного сообщения. – М.: АСМАП, 2000. – 174 с.
5. Милославская С. В., Плужников К. И. Мультимодальные и интермодальные перевозки. – М.: РосКонсульт, 2001. – 368 с.
6. Назаренко В. М., Назаренко К. С. Транспортное обеспечение внешнеэкономической деятельности. – М.: Центр экономики и маркетинга, 2000. – 512 с.
7. Айвазян С. А., Бухштабер В. М. и др. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / Под ред. С. А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
8. Мишина А. М., Орлов В. Б. Толковый математический словарь. Основные термины. – М.: Русский язык, 1989. – 244 с.
9. Мантуров О. В., Солнцев Ю. К., Соркин Ю. И., Федин Н. Г. Толковый словарь математических терминов. – М.: Просвещение, 1965. – 540 с. ●

STRUCTURAL LEVELS OF INTERREGIONAL TRANSPORT SYSTEMS

Tararychkin, Igor A. – Ph.D. (Tech.), associate professor of the department of transport systems of East Ukrainian National University named after V. Dahl, Lugansk, Ukraine.

ABSTRACT

A method for determining structural levels of interregional transport systems, algorithms and quantitative criteria to establish the composition and number of structural levels have been developed. It is shown that, in general, interregional transport system can have three levels (local, regional and interregional), and optimization of its operation should be carried out sequentially at each of these levels, taking into account proposed mathematical tools.

This means that the operation of the optimization procedure must be preceded by the step of determining the number of levels of the system and identifying belonging of individual components to local, regional or interregional levels.

However, such data are not provided in scientific sources, making it difficult to conduct structural analysis and solution of task of necessary optimization. There is a need for development of a method for determining the composition and quantity of structural levels of interregional transport systems.

ENGLISH SUMMARY

Background.

Formation of transport systems, their development, infrastructure renewal and organization of optimal functioning are a set of tasks, the importance of which is closely linked with the economic development of regions and territories [1–3].

For cargo transportation between neighboring enterprises that are in productive relations and forming separate clusters, transport network of the local level is created. At the regional level centers of individual clusters are connected with means of communication with formation of a unified transport network that supports the interaction of different entities. In addition, the need for transit of goods leads to the formation of transport corridors with predominantly through freight traffic, for which appropriate conditions must be provided [4].

Hence there is a corollary: interregional transport systems may have a complex multilevel structure, and it is proposed to carry out the optimization of such systems' functioning separately at each level [5, 6].

Objective.

The objective of the article is the study of interregional transport networks as multilevel systems and introduction of an appropriate method for its structural analysis.

Methods.

The author uses analysis and mathematical method.

Results.

Elements and levels

A fragment of interregional transport system (shown in Pic. 1.) is taken for an analysis. Components of this structure are means of communication, which are used for freight delivery and united in a general network with the help of transport junctions.

Generally, the elements of the system can be divided into separate groups based on the role they play in the transport process.

They can be: local level, defined by the set of elements for the operation of individual clusters as a set of interrelated enterprises and industries in the relevant territory; regional – defined by the set of transport routes connecting the centers of individual clusters in a single transport network; interregional –