

Формальная постановка задачи обеспечения безопасности транспортного комплекса

А. Б. Стиславский, В. Н. Цыгичко

В соответствии с законом «О транспортной безопасности» система обеспечения безопасности транспортного комплекса предназначена для решения трех основных задач:

- определение критически важных объектов транспортной инфраструктуры (КВО ТИ), разрушение или нарушение нормального функционирования которых, ведет к серьезным экономическим, социальным и политическим последствиям, ставит под угрозу жизнедеятельность государства и его обороноспособность;
- определение требований по защите КВО ТИ и мер по реализации этих требований, минимизирующих риски нарушения транспортной безопасности с учетом допустимой стоимости защиты;
- мониторинг состояния транспортной безопасности путем контроля выполнения требований по обеспечению безопасности на объектах транспортной инфраструктуры.

Другими словами, нужно определить, что и как защищать в транспортном комплексе исходя из финансовых и ресурсных возможностей страны. Очевидно, что решение этих задач должно основываться на анализе возможного нарушения нормального функционирования единой транспортной системы (ЕТС) страны и видов транспорта при реализации потенциальных угроз террористического, криминального или иного характера на объектах транспортной инфраструктуры.

Для качественного предметного анализа функционирования ЕТС и ее составляющих в условиях возможного поражения объектов транспортной инфраструктуры и корректной формальной постановки задачи обеспечения транспортной безопасности, прежде всего, необходимо разработать формально-теоретическое представление процесса функционирования ЕТС и видов транспорта.

Назовем формально-теоретическое описание объекта нашего исследования **концептуальной моделью** функционирования ЕТС в условиях возможного поражения объектов транспортной инфраструктуры (далее концептуальная модель ЕТС).

Концептуальная модель ЕТС предназначена для содержательного и формального исследования процессов функционирования транспортной системы и должна служить основой для построения системы методик и моделей системы обеспечения транспортной безопасности.

В концептуальной модели вводится иерархия описания процесса функционирования ЕТС, в соответствии с которой будут выбраны языки ее описания; осуществляется перевод содержательного описания элементов ЕТС и внешних связей системы в конкретные параметры ЕТС и ее элементов. Выбор параметров производится сначала для ЕТС, осуществляющей весь процесс перевозок, затем для видов транспорта и их элементов. Окончательный этап построения концептуальной модели заключается в отображении процесса функционирования ЕТС в терминах выбранных языков.

Представим инфраструктуру ЕТС в виде иерархической организационной системы, включающей относительно самостоятельные подсистемы — виды транспорта, которые взаимодействуют между собой в процессе осуществления смешанных перевозок. Руководство ЕТС осуществляется трехуровневой системой управления (рис. 1). Высшим управляющим органом является Министерство транспорта. Второй уровень управления составляют транспортные агентства, третий уровень включает региональные управления видами транспорта.

Исполнительными органами ЕТС являются транспортные средства и все объекты транспортной инфраструктуры, обеспечивающие перевозочный процесс в каждом виде транспорта.

ЕТС подвергается влиянию внешней среды, под которой будем понимать террористические, криминальные, техногенные и природные воздействия на элементы транспортной системы. Для формализации процессов функционирования ЕТС воспользуемся подходом к построению формальных схем эволюции социально-экономических объектов, предложенным В. Н. Цыгичко в работах [2] и [3].

Для формального представления системы обозначим условные порядковые номера элементов транспортной системы символом i .

На рис. 1 прямоугольниками обозначены координирующие элементы, треугольниками — управляющие, кружками — исполнительные элементы транспортной инфраструктуры. В ЕТС и в каждом виде транспорта будем различать ряд подсистем, в их числе подсистемы управле-

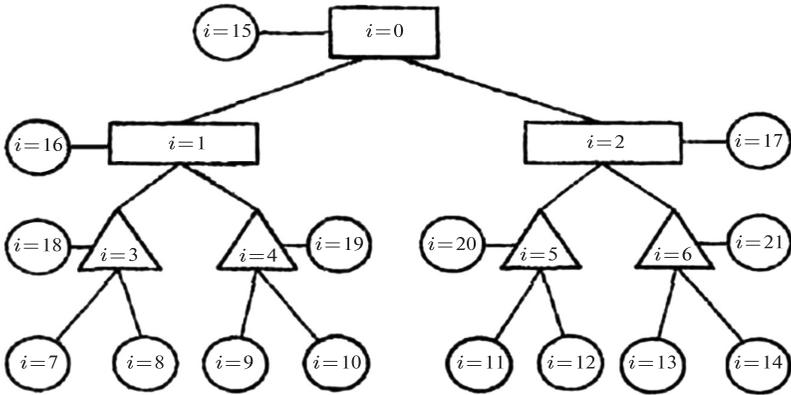


Рис. 1. Организационная структура ЕТС

ния, перевозок, связи, снабжения и т. д., которые, в свою очередь, могут рассматриваться как иерархические.

При рассмотрении свойств элементов транспортной системы в том или ином формально-теоретическом аспекте приходится обращаться к их внутреннему строению. Для этого необходимо вводить дополнительный уровень описания элементов. Это описание также должно отражать иерархическую структуру элементов, так как строится на тех же принципах, что и описание организаций.

Описание состояния системы на каждом из принятых уровней анализа — это некоторая совокупность иерархических структур. Каждая такая структура, описывающая тот или иной аспект строения или функционирования системы, является взаимнооднозначным отображением других структур этой совокупности. Можно сказать, что процесс функционирования ЕТС последовательно отображается на область параметров каждой структуры, которой описывается та или иная подсистема организации. Например, структура управления, перевозок, снабжения и другие отражают организацию в терминах этих подсистем.

Обозначим через $i = 1 - I$, номера элементов транспортной системы, где I — число элементов (рис. 1). Отношение двух любых элементов ЕТС определим вектором бинарных отношений $r_{i\mu}$, где $\mu = \overline{1, I}$ и $\mu \neq i$.

Вектор $r_{i\mu}$ — ноль-единичный вектор-столбец указывает на наличие или отсутствие связей, учитываемых при анализе между каждым i и всеми $\mu \in I$. Все многообразие связей, присущих ЕТС удобно представить связями по информации $r_{i\mu}^I$, управлению $r_{i\mu}^U$, материальному

обмену с помощью транспортных средств $r_{i\mu}^M$ (транспортная связь), финансовому обмену $r_{i\mu}^F$ и социальному влиянию $r_{i\mu}^C$.

$$r_{i\mu} = \begin{pmatrix} r_{i\mu}^I \\ r_{i\mu}^U \\ r_{i\mu}^M \\ r_{i\mu}^F \\ r_{i\mu}^C \end{pmatrix}.$$

При необходимости более подробного анализа каждая составляющая вектора $r_{i\mu}$ в свою очередь может быть представлена соответствующим вектором, отражающим структуру информационных, управленческих и других связей. Количество элементов и связей определяется уровнем анализа транспортной системы. Связи элемента μ с элементом i определяются вектором $r_{\mu i}$, который можно интерпретировать как вектор обратных связей по отношению к $r_{i\mu}$. Например, передача информации вышестоящим звеном управления нижестоящим трактуется как прямая связь, а передача информации снизу вверх по иерархии управления — как обратная. Множество $r_{i\mu}$ и $r_{\mu i}$ для всех элементов ЕТС определяет ее структурное состояние на выбранном уровне анализа. Это множество образует многомерный массив, размерность которого определяется числом элементов и числом составляющих вектора $r_{i\mu}$. Назовем этот многомерный массив матрицей структурного состояния ЕТС — S .

$$S = \begin{pmatrix} 0 & r_{12} & \dots & r_{1\mu} & \dots & r_{1l} \\ \vdots & 0 & & & & \\ r_{i1} & & 0 & & & \\ \vdots & & & 0 & & \\ r_{\mu 1} & & & & 0 & \\ \dots & \dots & r_{i\mu} & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}. \tag{1}$$

Здесь строка фиксирует наличие, если $r_{i\mu} = 1$, или отсутствие, если $r_{i\mu} = 0$, каких-либо прямых связей i -го элемента с другими элементами системы, а столбец — наличие при $r_{i\mu} = 1$ или отсутствие при $r_{i\mu} = 0$ обратных (по отношению к i -му элементу) связей элементов системы с элементом i . Матрица S описывает совокупность всех рассматриваемых структур ЕТС. Любая структура может быть выделена из S с помощью задания соответствующих компонент бинарных отношений. Например, система управления определяется подматрицей бинарных отношений $r_{i\mu}^U$, а система финансирования — подматрицей $r_{i\mu}^F$ и т. д. Для иерархических структур, например структуры управления, подматрица $r_{i\mu}^U$ отражает иерархию соподчинения элементов системы.

Для транспортной системы важной характеристикой является пространственное положение элементов и их взаимное расположение, т. е. топология системы. Каждый элемент и сама система располагаются на некоторой ограниченной площади, величина и конфигурация которой может существенно влиять на состояние системы. В других случаях может иметь место обратное отношение, т. к. топология системы определяется ее свойствами и состоянием.

Пусть q_i — граница площади, занимаемой элементом, определяется географическими координатами φ, λ , тогда $q_i = q_i(\varphi_i, \lambda_i)$. В частном случае элемент может быть задан точкой $q_i = \{\varphi_i, \lambda_i\}$, например, транспортное средство или элементы инфраструктуры. Параметр q_i определяет географическое положение и конфигурацию i -го элемента в пространстве. На уровне рассмотрения внутреннего строения элемента пространственное положение его составных частей может быть представлено аналогично. Взаимное пространственное расположение элементов i и μ определяется вектором $q_{i\mu}$, составляющими которого являются расстояние между элементами и ориентация элемента i относительно элемента μ :

$$q_{i\mu} = q_{i\mu}(q_i, q_\mu).$$

Совокупностью пространственного расположения элементов q_i и их взаимного положения $q_{i\mu}$ полностью определяется топология сис-

темы. Она может быть представлена матрицей пространственного состояния системы Q .

$$Q = \begin{vmatrix} q_1 & \cdots & q_{1I} \\ \vdots & & \\ q_i & \cdots & q_i \\ \vdots & & \\ q_{1I} & \cdots & q_i \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Матрицы структурного состояния S и пространственного состояния Q описывают транспортные сети видов транспорта и инфраструктуру транспортной системы в целом.

Важнейшей характеристикой ЕТС является внутреннее состояние ее элементов. Под внутренним состоянием i -го элемента будем понимать вектор P_i , определенный на области возможных значений параметров описания состояния этого элемента на выбранном уровне анализа. Матрица внутреннего состояния элементов системы определяется вектор-столбцом:

$$P = \begin{vmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_I \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Внутреннее состояние объекта P_i определяется назначением элемента и перечнем его функциональных характеристик. В общем случае описание внутреннего состояния элемента инфраструктуры каждого вида транспорта включает:

- структуру и нормативные характеристики транспортных средств (грузоподъемность, скорость движения и т. д.);
- нормативы функционирования объектов инфраструктуры (пропускные способности, цикл функционирования, нормативы обслуживания, погрузки и выгрузки, контроля пассажиров и грузов и т. п.);
- количество и структура ресурсов, обеспечивающих функционирование объектов инфраструктуры и транспортных средств;
- зависимость, характеризующая изменение функциональных возможностей объекта инфраструктуры от степени поражения его элементов;

- время и стоимость восстановления объектов транспортной инфраструктуры и другие показатели, отражающие функциональные возможности объекта.

Одним из параметров состояния является характеристика естественной среды, в которой действуют объекты инфраструктуры и транспортные средства ЕТС. По аналогии с предыдущим параметром вектор состояния среды W , в котором действует элемент i , запишется:

$$W = \begin{pmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_i \\ \vdots \\ W_l \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где W — матрица состояния естественной среды.

Поскольку ЕТС, как любая социально-экономическая система, является частью более широкой системы, то последняя постоянно оказывает воздействие (целенаправленное или нецеленаправленное) на транспортную систему. Например, изменение государством политики в сфере обеспечения транспортной безопасности может существенно изменить характеристики внутреннего состояния объектов инфраструктуры и управление процессами обеспечения безопасности. Примером нецеленаправленного воздействия может служить влияние на ЕТС и отдельные виды транспорта конъюнктуры на рынке фрахта. Это воздействие можно учитывать несколькими способами. Во-первых, представить ЕТС как подсистему более широкой системы. Тогда с помощью матрицы структурного состояния S можно зафиксировать все существенные для анализа связи в явной форме, т. е. между элементами более широкой системы и ЕТС. В этом случае для более широкой системы должны быть определены S , Q , P и W . Здесь может быть отражено и обратное влияние деятельности транспортной системы на внешнюю среду.

Для целей нашего исследования удобнее для каждого i -го объекта транспортной системы задать вектор Γ_i , составляющие которого γ_i характеризуют террористические, криминальные и другие негативные воздействия на этот объект. Совокупность векторов для всех объектов транспортной системы представим матрицей Γ внешних воздействий:

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \Gamma_1 \\ \vdots \\ \Gamma_i \\ \vdots \\ \Gamma_l \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Переменные S , Q , P , W и Γ образуют фазовое пространство состояний транспортной системы. Точку в этом пространстве $H = \{S, Q, P, W, \Gamma\}$ назовем состоянием ЕТС.

$$H = \begin{pmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_i \\ \vdots \\ h_l \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где h_i — состояние элемента i .

Компонентами вектора h_i являются: вектор связи объекта r_i с другими элементами транспортной системы, вектор пространственного положения объекта Q_i , вектор его внутреннего состояния P_i , вектор состояния среды, в которой существует элемент W_i , и вектор внешнего воздействия Γ_i :

$$h_i = \{r_i, Q_i, W_i, P_i, \Gamma_i\}, \quad (7)$$

где r_i — i -я строка (прямые связи) и i -й столбец (обратные связи) матрицы $S(1)$.

Если i -й объект не имеет прямых связей по управлению с другими объектами системы, т. е. r_{im}^U , то этот объект является исполнительным.

Выражение (6) представляет собой формальный способ описания состояния транспортной системы на произвольный момент времени для любого уровня в принятой иерархии описаний. Понятие «состояние» определяет ЕТС через ее функционально-организационную структуру, пространственное положение, внутреннее состояние элементов, состояние среды и характер внешнего воздействия. При необходимости можно

ввести дополнительные координаты в фазовое пространство состояний транспортной системы. Однако для целей нашего исследования введенных показателей вполне достаточно для формальной интерпретации состояния ЕТС.

Процесс функционирования ЕТС можно представить через эволюцию ее состояния $H = \{S, Q, P, W, \Gamma\}$ во времени. В качестве математической схемы для описания ее динамики примем дискретный метод.

Формально-теоретическое описание процессов в ЕТС дискретной математической схемой представляет собой некоторую временную последовательность состояний системы, определяемую положением точки H в фазовом пространстве параметров состояния $H(0)$.

$$\begin{aligned} H(0), \Phi_1 : \{H(0)\} &\rightarrow H(1), \Phi_2 : \{H(1), H(0)\} \rightarrow H(2), \dots, \\ \Phi_n : \{H(n-1), H(n-2), \dots, H(n-k)\} &\rightarrow H(n), \dots, \\ \Phi_N : \{H(N-1), (N-2), \dots, H(N-k)\} &\rightarrow H(N), \end{aligned} \quad (8)$$

где n — номер шага процесса; N — число шагов, определяющее рассматриваемую продолжительность функционирования транспортной системы; k — число шагов, на которых проявляются последствия прошлой деятельности системы.

Для систем без последствия, состояние которых в каждый момент зависит только от состояния на предыдущем шаге функционирования, уравнение траектории точки H во времени имеет вид:

$$\begin{aligned} H(0), \Phi_1 : \{H(0)\} &\rightarrow H(1), \Phi_2 : \{H(1)\} \rightarrow H(2), \dots, \\ \Phi_n : \{H(n-1)\} &\rightarrow H(n), \dots, \Phi_N : \{H(N-1)\} \rightarrow H(N). \end{aligned}$$

Операторы преобразования Φ_n в общем случае зависят от номера Φ шага процесса функционирования ЕТС, однако для решаемых в нашем исследовании задач этой зависимостью можно пренебречь. Для простоты изложения будем полагать, что оператор Φ не зависит от времени.

Назовем $\Phi : \{H(n)\}$ для всех $n \in N$ процессом функционирования транспортной системы. Предполагается, что величина временного шага дискретной схемы описания динамики транспортного процесса задано меньше продолжительности самого короткого процесса в ЕТС и позволяет с необходимой подробностью описывать функционирование любого объекта транспортной системы.

Целенаправленное поведение системы реализуется иерархической системой управления, структура которой определяется бинарными от-

ношениями по управлению, $\|r_{i\mu}^U\|$ являющимися подматрицами матрицы структурного состояния системы S . Траектория состояния системы $H(n)$ есть функция управления $H(n) = H\{U(n)\}$. На любом n -м шаге процесса целенаправленное поведение системы определяется вектором управления:

$$U = |U_i|, \quad (9)$$

где U_i — значение управляющего параметра, определяющего тот или иной характер функционирования i -го объекта ЕТС.

Динамика транспортной системы определяется функционированием объектов инфраструктуры и транспортных средств и их взаимодействием в этом процессе согласно управлениям, которые формируются подсистемами управления. В результате функционирования и взаимного воздействия объектов ЕТС друг на друга они меняют свое внутреннее состояние, положение в пространстве, изменяются их структурные связи, социальная и природная среда и во многих случаях внешние воздействия.

Поскольку параметры состояния и управления транспортной системы S, Q, P, W, Γ и U — взаимозависимые функции, то для дискретного описания процесса изменения состояния системы $H(n)$ необходимо определить последовательность изменения этих составляющих на каждом n -м шаге. В соответствии с содержанием процессов функционирования ЕТС последовательность изменения составляющих состояния системы $H(n)$, т. е. структура оператора Φ , может быть представлена в следующем виде.

На каждом $(n+1)$ -м шаге процесса в соответствии с состоянием транспортной системы, сложившимся на предыдущем шаге $H(n)$, и вектором управлений $U(n)$ элементы системы воздействуют друг на друга согласно их функциональному назначению, в результате чего меняется их внутреннее состояние, т. е. формируется вектор внутреннего состояния системы $P(n+1)$ на $(n+1)$ шаге.

Новое внутреннее состояние системы $P(n+1)$ совместно с параметрами $Q(n), S(n), W(n), \Gamma(n)$ и $U(n)$ определяет новое пространственное состояние системы $Q(n+1)$. Изменение пространственного положения транспортных средств влечет за собой изменение состояния среды, в которой они действуют, $W(n+1)$.

Внутреннее состояние объектов, их взаимное положение и условия существования определяют новое состояние связей системы $S(n+1)$.

На каждом шаге функционирования транспортной системы ее объекты могут подвергаться внешним воздействиям — $\Gamma(n+1)$.

В такой последовательности формируется состояние ЕТС и ее подсистем и элементов на $(n+1)$ -м шаге процесса $H(n+1)$, относительно которого отыскивается управление системой $U(n+1)$, определяющее эволюцию системы на следующем $(n+2)$ -м шаге.

Представим процесс $\Phi: \{H(N)\} \rightarrow H(n+1)$ изменения состояния и управления системы на $(n+1)$ -шаге рядом последовательных отображений:

$$\begin{aligned} \bar{P} &: \{P(n), S(n), Q(n), W(n), \Gamma(n), U(n)\} \rightarrow P(n+1); \\ \bar{Q} &: \{P(n+1), S(n), Q(n), W(n), \Gamma(n), U(n)\} \rightarrow Q(n+1); \\ \bar{W} &: \{P(n+1), S(n), Q(n+1), W(n), \Gamma(n), U(n)\} \rightarrow W(n+1); \\ \bar{S} &: \{P(n+1), S(n), Q(n+1), W(n+1), \Gamma(n), U(n)\} \rightarrow S(n+1); \\ \bar{\Gamma} &: \{P(n+1), S(n+1), Q(n+1), W(n+1), \Gamma(n), U(n)\} \rightarrow \Gamma(n+1); \\ \bar{U} &: \{P(n+1), S(n+1), Q(n+1), W(n+1), \Gamma(n+1), U(n)\} \rightarrow U(n+1), \end{aligned} \quad (10)$$

т. е. оператор Φ есть последовательность операторов $\bar{P}, \bar{Q}, \bar{W}, \bar{S}, \bar{\Gamma}, \bar{U}$. Выражение (10) описывает динамику системы на $(n+1)$ -м шаге без учета последствия, которое может быть учтено путем добавления в это выражение параметров состояний системы, сложившихся на каких-либо прошлых шагах и продолжающих оказывать влияние на текущее состояние системы (см. 8).

Всем объектам транспортной системы свойственно поступательно-циклическое функционирование, предполагающее последовательное прохождение ряда состояний, составляющих цикл, и попадание к концу цикла в новое исходное состояние. Например, циклы функционирования транспортных средств всех видов или циклы функционирования объектов инфраструктуры, таких как аэропорты, железнодорожные узлы и т. п. Состояние транспортной системы во многом определяется фазой цикла, в которой находится вся система или ее подсистемы и объекты. Фаза цикла определяется существом протекающих в нем процессов, состоянием объектов и управлениями. Временная структура функционирования системы может быть представлена последова-

тельностью в соответствии с выбранным шагом дискретного описания системы матрицей циклического состояния:

$$\Delta = \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_i \\ \vdots \\ \delta_I \end{pmatrix},$$

где δ_i — фаза цикла i -го элемента.

Оператор формирования цикла Δ запишется:

$$\bar{\Delta} = \{P(n+1), S(n+1), Q(n+1), W(n+1), \Gamma(n+1), U(n), \Delta(n)\} \rightarrow \Delta(n+1). \quad (11)$$

Введение параметра цикличности позволяет отразить в формальном описании временные закономерности функционирования объектов транспортной системы в зависимости от состояния системы и управлений.

Система отображений (10), дополненная уравнением (11), может интерпретироваться как общий вид формальной схемы функционирования транспортной системы или в нашей терминологии **концептуальной моделью** ЕТС.

Составляющие P_i оператора \bar{P} , реализующие процессы функционирования и взаимодействия в каждом i -м объекте транспортной системы на $(n+1)$ -м шаге, могут быть представлены уравнениями:

$$P_i(n+1) = P_i\{P_i(n), f_{\mu i}, [P_i(n), P_\mu(n), q_{\mu i}, r_{\mu i}, (n), W_\mu(n), W_i(n), \Gamma_\mu(n), U_{\mu i}(n)], f_{\mu i}, [P_i(n), P_\mu(n), q_{i\mu}, r_{i\mu}, (n), W_\mu(n), W_i(n), \Gamma_{\mu i}(n), U_{i\mu}(n)], W_i(n), \Gamma_i(n), \delta_i(n), U_i(n), \}, \quad (12)$$

где $U_{\mu i}(n) \subset U_\mu(n)$ и $U_{i\mu}(n) \subset U_i(n)$ для всех $\mu \in I, \mu \neq i$.

Здесь внутреннее состояние i -го объекта на $(n+1)$ -м шаге процесса определяется его внутренним состоянием на предыдущем шаге $P_i(n)$, параметром цикличности $\delta_i(n)$, состоянием среды его существования $W_i(n)$, внешним воздействием $\Gamma_i(n)$, управлением $U_i(n)$, а также результатами взаимодействия с другими объектами системы, реа-

лизуемыми функциями $f_{\mu i}$ и $f_{i\mu}$, где $f_{\mu i}$ — функция воздействия объекта μ на i , а $f_{i\mu}$ — функция воздействия объекта i на μ .

В общем случае взаимодействие рассматривается как явление, составляющее процесс, отдельный от внутреннего функционирования объектов, например, управляющее воздействие на исполнительный элемент со стороны координирующего. Это зависит от состояния взаимодействующих элементов, их взаимного расположения в пространстве, состояния связей между ними, состояния среды, в которой они действуют, внешних воздействий и управлений, направляющих их деятельность. Соответствующие зависимости могут быть составлены и для других параметров, описывающих состояние элементов системы $q_i, S_i, W_i, \Gamma_i, \delta_i$ и U_i .

Представленная концептуальная модель ЕТС позволяет интерпретировать и анализировать в своих терминах любые процессы, происходящие в транспортной системе, что дает возможность разработать наиболее общую формальную постановку задачи обеспечения безопасности транспортного комплекса.

Обеспечить надежную защиту всего транспортного комплекса невозможно и поэтому первым этапом построения системы обеспечения транспортной безопасности является идентификация КВО ТИ, выведение из строя которых существенно понижает функциональные возможности транспорта. Для решения этой задачи в качестве обобщенного показателя функциональных возможностей ЕТС и ее составляющих примем «потенциал» P , под которым будем понимать максимально возможный среднесуточный темп доставки пассажиров и грузов к месту назначения, определяемый пропускными способностями объектов инфраструктуры и количеством транспортных средств.

Чтобы избежать трудностей, связанных с векторной оценкой количества разнородных грузов и пассажиров, введем условный обобщенный скалярный показатель величины доставленных грузов и пассажиров через их «стоимость», что позволит корректно (в рамках нашей теоретической схемы) сформулировать задачи обеспечения транспортной безопасности. Понятие «потенциал» распространяется как на ЕТС в целом, так и на виды транспорта, отдельные транспортные направления и объекты транспортной инфраструктуры. Для решения проблемы обеспечения транспортной безопасности от террористических и криминальных угроз можно принять допущение, что потенциал ЕТС $P_{ЕТС}$ исчисляется как сумма потенциалов видов транспорта P_{em}^{μ} , а потенциа-

лы видов транспорта, как сумма потенциалов объектов их транспортной инфраструктуры Π_{em}^i , где μ — номер вида транспорта, а $i\mu$ — номер объекта в μ -м виде транспорта.

$$\Pi_{ETC} = \sum_1^M \Pi_{em}^\mu = \sum_1^M \sum_1^I \Pi_{em}^{i\mu}. \quad (13)$$

Это допущение вытекает из предположения о том, что в результате террористических актов и других неблагоприятных воздействий на транспортную систему в каждый момент времени выводится из строя только один объект транспортной инфраструктуры и в этом случае потенциалы объектов можно считать независимыми друг от друга.

Поскольку потенциалы ЕТС и ее составляющих являются функциями их состояний на каждый момент времени n , то в терминах концептуальной модели (10), (11) и (12) мы можем написать

$$\begin{aligned} \Pi_{ETC}(n) &= f\{H_{em}^\mu(n)\} \\ \Pi_{em}(n) &= f_{em}^\mu\{h^{i\mu}(n)\} \\ \Pi_{i\mu}(n) &= f^{i\mu}(h^{i\mu}(n)). \end{aligned} \quad (14)$$

Для всех $\mu \in \{1, M\}$ и $i\mu \in \{1, I_\mu\}$, где $\{H_{em}^\mu(n)\}$ и $\{h^{i\mu}(n)\}$ — множество состояний всех видов транспорта и объектов каждого вида транспорта.

В соответствии с целями настоящего исследования интерес представляет только функция изменения величины потенциала от прекращения функционирования того или иного объекта транспортной инфраструктуры в результате реализации террористического акта, техногенной или природной катастрофы. В терминах нашего формализма это означает изменение матрицы структурного состояния, в результате прерывания транспортных связей объекта с другими объектами, т. е. $r_{i\mu}^M = 0$. Изменение матрицы S в соответствии с (10), (11) и (12) влечет за собой изменение внутреннего состояния i -го объекта h_i , состояния вида транспорта H_{em} и состояния ЕТС целом H_{ETC} , а потенциал объекта, до его восстановления, становится нулевым. В результате потенциалы высшего порядка уменьшаются на величину $\Delta\Pi_{i\mu} = \Delta\Pi_{i\mu}(n)T + C_{восст.}$ по-

терянного объектом потенциала, где T — время (в шагах), в течение которого объект не функционирует.

По существу, $\Delta\Pi_{i\mu}$ — это выраженный в стоимостной форме ущерб, понесенный транспортной системой в результате прекращения функционирования объекта и затраты средств на его восстановление $C_{восст}$.

Предположим, что существует такое минимальное (допустимое) значение потерянного объектом потенциала $\Delta\Pi_{i\mu доп}$, при достижении которого потенциалы высшего порядка существенно изменяются и этот объект должен быть отнесен к КВО ТИ, т. е. требует защиты. Тогда формальная постановка задачи идентификации объектов, нуждающихся в защите, может быть сформулирована так.

Определить множество объектов транспортной системы

$$\{i^* \mu^*\} \in \{i\mu\},$$

для которых при $r_{i\mu}^M = 0$ выполняется условие:

$$\Delta\Pi_{i\mu} \geq \Delta\Pi_{i\mu доп}. \quad (15)$$

Теперь сформулируем постановки задач обеспечения безопасности КВО ТИ.

Пусть имеется некоторый ограниченный ресурс $C_{пред}$, который может быть выделен на обеспечение безопасности μ -го вида транспорта и известны зависимости вероятности $P_{i\mu}$ поражения i -го объекта от величины ресурса, выделенного на его защиту $C_{i\mu}$.

$$P_{i\mu} = P_{i\mu}(C_{i\mu}). \quad (16)$$

Естественно предположить, что величина ожидаемого ущерба i -му объекту μ -го вида транспорта $\Delta\Pi_{i\mu}^o$ обратно пропорциональна величине ресурса, затраченного на его защиту $C_{i\mu}$.

$$\Delta\Pi_{i\mu}^o = \Delta\Pi_{i\mu} \cdot P_{i\mu}(C_{i\mu}). \quad (17)$$

Тогда **первая постановка** задачи обеспечения транспортной безопасности может быть сформулирована так.

Найти такое распределение $\{C_{i\mu}\}$ ресурса $C_{пред}$, выделенного на защиту КВО ТИ между объектами μ -го вида транспорта так, чтобы минимизировать потерю его потенциала $\Delta\Pi_{\mu}^o$.

$$opt_C \{C_{i\mu}\} = \min_C \sum_{i\mu=1}^{I\mu} \Delta\Pi_{i\mu} P(C_{i\mu}) = \min_C \Delta\Pi_{\mu}^o. \quad (18)$$

Задача распределения ресурсов, выделенных ЕТС для обеспечения транспортной безопасности, между видами транспорта может быть представлена формулой (19):

$$opt_C \{C_{i\mu}\} = \min_C \sum_{\mu=1}^M \sum_{i\mu=1}^{I\mu} \Delta\Pi_{i\mu} P(C_{i\mu}). \quad (19)$$

Решение этой задачи позволяет сформулировать требования по защите объектов транспортной инфраструктуры в соответствии с выделяемыми ресурсами.

Вторая постановка задачи обеспечения транспортной безопасности. Пусть для каждого i -го объекта μ -го вида транспорта заданы допустимые величины ожидаемой потери потенциала (допустимые величины ожидаемого ущерба) $\Delta\Pi_{i\mu доп}^o$. Известны также функции $C_{i\mu} = C_{i\mu}(P_{i\mu})$, обратные функциям $P_{i\mu} = P_{i\mu}(C_{i\mu})$ (16). Требуется определить минимальное количество ресурсов, необходимых для обеспечения заданного уровня защиты объектов. В соответствии с (13) формальная постановка этой задачи может быть представлена выражением (20).

$$\min C_{\mu} = \sum_{i\mu=1}^{I\mu} \frac{\Delta\Pi_{i\mu}^o}{\Delta\Pi_{i\mu доп}^o} C_{i\mu}(P_{i\mu}). \quad (20)$$

Разработанная концептуальная модель ЕТС представляет собой формализованную теорию функционирования транспортной системы и позволяет интерпретировать и исследовать все протекающие в ней

процессы в условиях возможных террористических и других негативных воздействий на объекты транспортной инфраструктуры.

Общие формальные постановки задач обеспечения транспортной безопасности (18), (19), (20) позволяют с единых теоретических позиций, представленных в концептуальной модели ЕТС, разрабатывать прикладные задачи обеспечения безопасности транспортного комплекса и его составляющих. Практическая реализация предложенной теоретической концепции предполагает разработку методологии, форм детального представления и методов расчета параметров $\Delta\Pi_{i\mu}$, $\Delta\Pi_{i\mu}^o$, $C_{пред}$, $C_{i\mu} = C_{i\mu}(P_{i\mu})$, $P_{i\mu} = P_{i\mu}(C_{i\mu})$, $\{C_{i\mu}\}$, определяющих требования к составу, структуре и архитектуре автоматизированной системы обеспечения безопасности ЕТС на основе категорирования объектов транспортной инфраструктуры по степени их потенциальной опасности.

Литература

1. Кононов А. А., Стиславский А. Б., Цыгичко В. Н. Управление рисками нарушения транспортной безопасности. М.: АС-Траст, 2008. 210 с.
2. Цыгичко В. Н. Прогнозирование социально-экономических процессов / Предисл. Д. М. Гвишиани. 2-е изд. перераб. и доп. М.: КомКнига/URSS, 2007. 240 с.
3. Цыгичко В. Н. Руководителю о принятии решений. 2-е изд., испр. и доп. М.: ИНФРА-М, 1996. 272 с.