

УДК 629.3.066:623.61

doi: 10.53816/20753608\_2025\_2\_73

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ  
СЕТЕВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТЬЮ  
СВЯЗИ ВЫСОКОДИНАМИЧНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ  
СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**ANALYTICAL MODEL OF NETWORK TECHNOLOGICAL CONTROL SYSTEM  
OF TRANSPORT COMMUNICATION NETWORK OF HIGHLY DYNAMIC  
COMMUNICATION SYSTEM FOR SPECIAL PURPOSE**

*По представлению чл.-корр. РАН А.В. Шеверева*

*А.Г. Сызранцев*

*Московский технический университет связи и информатики*

*A.G. Syzransev*

Аналитическая модель системы сетевого технологического управления транспортной сетью связи представлена как подсистема высокодинамичной системы связи в виде множества величин, описывающих входные воздействия, воздействия внешней среды и совокупность внутренних характеристик. Функционирование системы описано как последовательная смена состояний сети связи. Многоуровневость системы управления отражена в иерархических матрицах связности.

**Ключевые слова:** системы сетевого технологического управления, транспортная сеть связи; высокодинамичная система связи, пункт управления связью, теория управления, теория связи, общая теория систем, модель, структура, матрица связности, разделимый граф.

The analytical model of the network technological control system of the transport communication network is presented as a subsystem of a highly dynamic communication system in the form of a set of values describing input effects, external environment effects and a set of internal characteristics. The functioning of the system is described as a sequential change of the communication network states. The multi-level nature of the control system is reflected in hierarchical connectivity matrices.

**Keywords:** network technological control systems, transport communication network, highly dynamic communication system, communication control point, control theory, communication theory, general systems theory, model, structure, connectivity matrix, separable graph.

При построении математических моделей принято руководствоваться следующими принципами [1–9]:

- соответствия модели целям исследования;
- соответствия сложности модели точности результатов исследования;
- экономичности модели;

- соразмерности;
- модульности построения; открытости;
- удобства пользования;
- адекватности и адаптивности.

Систему сетевого технологического управления (ССТУ) транспортной сетью связи (ТСС) высокодинамичной системы связи (ВдСС)

создаваемой группировки специального назначения (ГрСН) как сложную систему можно представить в виде множества величин, описывающих следующие подмножества [3, 7, 8, 16]:

1. Совокупность входных воздействий (нагрузка, создаваемая должностными лицами по оперативному управлению связью)

$$\lambda_i \in \Lambda, \quad i = \overline{1, k},$$

где  $k$  — количество видов задач по связи (изменение структуры системы связи, изменение информационных направлений, проключение новых связей, раскоммутация ненужных связей и др.);

$\lambda_i$  — нагрузка создаваемая  $i$ -м видом задачи по связи;

$\Lambda$  — общая входная нагрузка создаваемая  $k$  видами задач по связи;

2. Совокупность воздействий внешней среды, выражающихся в различных видах поражающего воздействия на элементы ССТУ ТСС (огневого, радиоэлектронного, информационного, техногенного и др.)

$$v_l \in V, \quad l = \overline{1, u},$$

где  $u$  — количество типов воздействия, оказывающих влияние на элементы ССТУ ТСС;

$v_l$  — определенный вид воздействия;

$V$  — общее множество возможных видов воздействия;

3. Совокупность внутренних характеристик, описывающих определенные показатели (параметры) свойств типов воздействия, может быть представлена функционалом ( $H$ )

$$H = \{H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6, H_7\},$$

где  $H_1$  — показатель готовности к функционированию (выполнения основной задачи);

$H_2$  — показатель мобильности ССТУ ТСС;

$H_3$  — показатель пропускной способности линий связи ССТУ ТСС;

$H_4$  — показатель разведывательной защищенности ССТУ ТСС;

$H_5$  — показатель устойчивости функционирования ССТУ ТСС с требуемым качеством;

$H_6$  — показатель доступности ресурса ССТУ ТСС для использования должностными лицами этой системы управления;

$H_7$  — показатель управляемости (оперативности выполнения функций управления связью и получения ответов на них) ССТУ ТСС.

При моделировании ССТУ ТСС входные воздействия, воздействия внешней среды и внутренние параметры системы являются независимыми переменными, которые в векторной форме имеют вид (соответственно):

$$\bar{\lambda}(\mathbf{t}) = (\bar{\lambda}_1(\mathbf{t}), \bar{\lambda}_2(\mathbf{t}), \dots, \bar{\lambda}_k(\mathbf{t}))^T;$$

$$\bar{v}(\mathbf{t}) = (\bar{v}_1(\mathbf{t}), \bar{v}_2(\mathbf{t}), \dots, \bar{v}_u(\mathbf{t}))^T;$$

$$\bar{H}(\mathbf{t}) = \{\bar{H}(\mathbf{t})_1, \bar{H}(\mathbf{t})_2, \bar{H}(\mathbf{t})_3, \bar{H}(\mathbf{t})_4, \bar{H}(\mathbf{t})_5, \bar{H}(\mathbf{t})_6, \bar{H}(\mathbf{t})_7\},$$

а выходные характеристики являются зависимыми переменными и в векторной форме имеют вид

$$\bar{Y}(\mathbf{t}) = (\bar{y}_1(\mathbf{t}), \bar{y}_2(\mathbf{t}), \dots, \bar{y}_k(\mathbf{t}))^T,$$

где  $\bar{Y}(\mathbf{t})$  — общая исполненная нагрузка  $k$  видов задач по связи;

$\bar{y}_l(\mathbf{t})$  — исполненная нагрузка  $k$ -го вида задач по связи на определенном направлении.

Процесс функционирования ССТУ ТСС описывается во времени оператором  $F_S$ , который в общем случае преобразует независимые переменные в зависимые в соответствии с соотношением

$$\bar{y}(t) = F_S(\bar{\lambda}, \bar{v}, \bar{H}, t).$$

Это соотношение может быть получено через свойства ССТУ ТСС, в конкретные моменты времени, называемые состояниями.

Рассмотрим два варианта состояния ССТУ ТСС высокочастотной системы связи создаваемой ГрСН.

1.  $O_{cc}$  — состояние, определяемое парой значений — пропускной способностью ССТУ и структурой ТСС;  $O_{cc}(t) = \{\bar{y}(t), h(t)\}$ .

2.  $S$  — состояние, определяемое, как набор состояний всех элементов ССТУ ТСС;

$$S_{icc} = \delta_{1cc}, \delta_{2cc}, \delta_{3cc}, \dots, \delta_{scc} = 1,$$

где  $\delta_{scc} = 1$ , если элемент сети исправен;

$\delta_{scc} = 0$ , если элемент сети неисправен.

Если рассматривать процесс функционирования ССТУ ТСС ВдСС как последовательную смену состояний  $O_{CC}(t_1), O_{CC}(t_2), O_{CC}(t_3), \dots, O_{CC}(t_j)$ , то они могут быть интерпретированы как координаты точки в  $n$ -мерном фазовом пространстве. Причем каждой реализации процесса будет соответствовать некоторая фазовая траектория. Совокупность всех возможных значений состояний  $O_{CC}(t_j)$  называется пространством состояния объекта моделирования  $X$ , причем  $O_{CC}(t_j) \in X$  [2, 5–10]. Состояние ССТУ ТСС в момент времени  $t \leq t^* \leq T$  полностью определяется начальными условиями  $O_{CC}(t_0) = \{\bar{y}(t_0), h(t_0)\}$ , входными воздействиями  $\Lambda(t_0, \dots, t^*)$ , воздействиями внешней среды  $V(t_0, \dots, t^*)$ , которые имели место за данный промежуток времени, с помощью двух уравнений:

$$O_{CC}(t^*) = O(O_{CC}(t_0), \Lambda(t_0, \dots, t^*), V(t_0, \dots, t^*));$$

$$\bar{y}(t^*) = F(O_{CC}(t^*), t^*).$$

Таким образом,

$$\bar{y}(t^*) = F(O(O_{CC}(t_0), \Lambda(t_0, \dots, t^*), V(t_0, \dots, t^*)), t^*).$$

Итак, под аналитической моделью ССТУ ТСС ВдСС создаваемой ГрСН будем понимать конечное подмножество переменных  $\{\bar{\lambda}(t), \bar{v}(t), \bar{h}(t)\}$  вместе с математическими связями между ними и характеристиками  $\bar{y}(t)$ .

Входящие в ССТУ ТСС высокочастотной системы связи потоки сообщений по каждому виду задачи по связи, передаваемые с определенными приоритетами, образуют суммарный поток сообщений, поэтому в качестве меры пропускной способности целесообразно использовать величину, равную отношению объема нагрузки, обслуженной системой полностью и с требуемым качеством за единичный интервал времени, определяемую следующим соотношением

$$H_3 = \frac{\sum_1^k (y_k(t))}{1 \text{ час}}.$$

На основе анализа и обобщения содержания [1–5, 8–15] можно использовать допущение о том, что входящий поток задач по связи, поступающий в ССТУ ТСС, является пуассоновским

поток, в котором вероятность поступления в промежуток времени  $t$  ровно  $\mathfrak{R}$  задач по связи задается формулой Пуассона

$$P_{\mathfrak{R}}(t) = \frac{(\lambda_i t)^{\mathfrak{R}}}{\mathfrak{R}!} a^{0-\lambda_i t},$$

где  $\lambda_i > 0$  — плотность потока  $i$ -го вида задач по связи за продолжительность  $t$ ;

$\mathfrak{R}$  — количество задач по связи;

$P_{\mathfrak{R}}(t)$  — вероятность наступления этого события.

Учитывая пуассоновский характер потока можно принять

$$\bar{y}(t^*) = \bar{x}(t)(1 - P_I(\bar{x}(t))),$$

где  $P_I$  — вероятность потери нагрузки.

При выходе из строя элементов ССТУ ТСС вследствие внешнего воздействия происходит деградация сети двух видов [13, 14, 17, 18].

1. Деградация по пропускной способности, состоящая в наступлении события:  $Y = \{y(t) \leq y^*\}$ , где  $y(t)$ ,  $y^*$  — текущее и требуемое значение по величине исполненной нагрузки соответственно.

2. Структурная деградация, которая приводит к наступлению события  $H = \{h(t) \leq h^*\}$ , где  $h(t)$ ,  $h^*$  — соответственно текущее и требуемое состояние параметров ССТУ ТСС, выражающиеся в совокупности каналов управления поддерживаемых направлений связи на определенных информационных направлениях.

При отображении структуры ССТУ ТСС создаваемой ГрСН аналитической моделью примем отображение ее в виде графа  $G(A, B)$ , где  $A$  — множество вершин графа, включающее в себя подмножество элементов сети, а  $B$  подмножество дуг. При этом,  $A^0 = \{a_d^*\}$ ,  $d = 1, s^0$  — множество элементов ССТУ ТСС, а  $B^0 = \{b_{dd}^0\}$  — подмножество дуг (линий связи), соединяющих эти элементы  $\{b_{dd}^0\}$ .

Каждый элемент сети связи описывается характеристиками устойчивости (надежности: коэффициентом готовности  $K_r$ ; живучести: вероятностью выживания элемента  $P_b$ ; помехоустойчивости: коэффициентом исправного действия по помехоустойчивости  $K_{ид}$ ), пропускными возможностями  $Y_{ин}$ ,  $Y_{лс}$ , стоимости  $C_{ССТУ ТСС}$  (объемом ресурса ССТУ ТСС, затрачиваемого на его построение).

Каждому ребру припишем следующий набор морфологических характеристик:  $Y_i$  — пропускная способность по совокупности  $k$  видов задач по связи;  $L$  — модифицированная протяженность линии, зависящая от количества переприемов;  $C_{\text{ЛС}}$  — стоимость линии связи.

Система СТУ ТСС высокодинамичной системы связи создаваемой ГрСН является многоуровневой иерархической системой. При этом для описания и анализа структуры ССТУ ТСС предлагается использовать иерархические матрицы связности. Их использование обусловлено требованием системы управления по обеспечению обмена информацией на несколько ступеней вниз.

Обозначим через  $\|A\| = [a_{CS}]$  матрицу связности определенного уровня управления группировкой, если существует дуга из вершины  $C$  в  $S$ ;  $a_{CS} = 0$ , в противном случае. Матрица  $\|A\|$  симметрична относительно главной диагонали и ее элементами могут быть числа, которые характеризуют показатели свойств линий связи ССТУ ТСС, необходимых для проведения анализа (пропускной способности, устойчивости, стоимости и т. д.).

Для отображения связей между элементами соседних уровней представим прямоугольные матрицы  $\|A^{j+1}\| = [a_{CS}^{j+1}]$  связей с вышестоящим уровнем управления и  $\|A^{j-1}\| = [a_{CS}^{j-1}]$  связей с нижестоящим уровнем управления, для обозначения связей на несколько инстанций вниз или вверх введем дополнительные матрицы  $\|A^j\| = [a_{CS}^j]$ , где  $j$  — соответствующий уровень иерархии.

Кроме иерархических матриц связности для описания структуры ССТУ ТСС создаваемой группировки используется предложенный в [2–6, 7, 9, 13] способ описания структурных параметров графа системы (диаметра  $D$ , числа ребер  $R$ , среднего реберного расстояния  $\pi$  между вершинами (протяженность маршрута)) в виде функций числа вершин  $S$  и степени вершин  $j$ . Данный способ может быть применен для построения модели крупномасштабной, организованной по иерархическому принципу ССТУ ТСС высокодинамичной системы связи создаваемой группировки специального назначения.

В этом случае топология иерархической сети описывается контурно  $R$ -разделимым графом с простым подчинением, позволяющим

представить иерархическую структуру композицией подграфов межступенчатых сетей

$$W_{r,r+l}, r = \overline{1, R-1},$$

где  $l$  — число подуровней, с которыми связан данный подуровень и подсетей отдельных ступеней иерархии  $J_j, j = \overline{1, R}$ , которые могут в свою очередь распадаться на зональные подсистемы.

Как отмечено в [15], такая специфика структурных связей обладает свойством топологической рекуррентности, позволяющим по известным индуктивным правилам вычислять характеристики  $(r+1)$ -й ступени из характеристик предыдущих ступеней.

Спектр возможных структур построения ограничивается некоторым набором базовых структур, включающих радиальную сеть, кратчайшую связывающую сеть, кольцевую структуру, решетчатую структуру и равномерно  $k$ -связную сеть ( $0 \leq k \leq n-1, k \neq 1$ ). Согласно определению контурно  $R$ -разделимого графа для подсетей отдельных ступеней иерархии возможен любой из выше перечисленных способов организации.

Вершина  $r$ -й ступени иерархии имеет  $k_r$  ближайших соседей в данной подсети  $r$ -й ступени иерархии. Помимо этого, рассматриваемая вершина соединена еще с  $n_{r-1}$  вершинами нижележащей ступени и, возможно, с несколькими вершинами на несколько инстанций вниз, а также одной или несколькими вершинами  $(r+1)$ -й ступени иерархии управления. При этом должна быть обеспечена  $k$ -связность иерархической структуры не только наличием  $k$ -непересекающихся по вершинам путей внутри данной подсети, но и не менее чем  $k$ -точками привязки вершин данной подсети к узлу связи подсети вышестоящей ступени иерархии.

Таково основное содержание аналитической (математической) модели ССТУ ТСС высокодинамичной системы связи создаваемой группировки (оперативного объединения) специального назначения.

#### Список источников

1. Ермишян А.Г. Теоретические основы построения систем военной связи в объединениях и соединениях: учебник. Ч. 1. Методологические основы построения организационно-технических систем военной связи. СПб.: ВАС, 2005. 740 с.

2. Черушева Т.В., Зверовщикова Н.В. Динамические системы: учеб. пособие. Пенза: Изд-во ПГУ, 2020. 294 с.
3. Лившиц А.П., Мальц Э.А. Статистическое моделирование систем массового обслуживания. М.: Сов. Радио, 1978. 248 с.
4. Величко В.В., Субботин Е.А., Шувалов В.П., Ярославцев А.Ф. Телекоммуникационные системы и сети; под ред. В.П. Шувалова. Том 3. М.: Горячая линия Телеком, 2005. 711 с.
5. Жданов А.А. Общая теория систем. Анализ и дополнения. М.: Лаборатория знаний, 2024. 192 с.
6. Пылькин А.Н., Филатов И.Ю., Орехов В.В. Теория систем и системный анализ: учебник. М.: КУРС, 2025. 192 с.
7. Бушуев С.Н., Осадчий А.С., Фролов В.М. Теоретические основы создания информационно-технических систем. СПб.: ВАС, 1998. 392 с.
8. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Построение систем интегрального обслуживания. Л.: Машиностроение, 1990. 332 с.
9. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ: учеб. пособие. К.: МАУП, 2003. 368 с.
10. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. М.: Высшая школа, 1985. 271 с.
11. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. М.: Финансы и статистика, 2003. 368 с.
12. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Сов. Радио, 1972. 552 с.
13. Филин Б.П. Методы анализа структурной надежности сетей связи. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.
14. Дудник Б.Я., Овчаренко В.Ф., Орлов В.К. и др. Надежность и живучесть систем связи. М.: Радио и связь, 1984. 216 с.
15. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных; Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 544 с.
16. Сызранцев Г.В., Сазыкин А.М., Алёшин О.В. Технологические основы построения автоматических систем управления связью высокодинамичных систем управления // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. № 3 (113). С. 116–126.
17. Сызранцев Г.В., Иншин Г.В., Безуглый А.В. Технические решения по автоматизации процессов сетевого технологического управления системой (сетью) связи // Техника средств связи. 2018. № 2 (142). С. 210–213.
18. Иншин Г.В., Безуглый А.В., Даниленко А.Н. и др. Модель функционирования автоматической системы сетевого технологического управления первичной сетью связи специального назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2013. № 11–12 (65–66). С. 90–95.