

УДК 004.3.621.372

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-102-109

## Математическая модель состояния сетей и узлов связи в алгебраическом пространстве тензорного поля при их поражении электромагнитным импульсом

А. А. Двилянский, кандидат технических наук, доцент,

Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, г. Орёл, Россия

В. А. Иванов, доктор военных наук, профессор, НТЦ «ОРИОН», Москва, Россия

М. Ю. Рытов, кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

Е. А. Гондаренко, НТЦ «ОРИОН», Москва, Россия

Г. В. Гурьев, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, г. Орёл, Россия

*Предлагается возможность применения тензорного подхода к построению математической модели состояния сетей и узлов связи в алгебраическом пространстве тензорного поля с учетом факторов деструктивного воздействия по ним электромагнитным импульсом (ЭМИ), вызывающим функциональное поражение конструктивных элементов коммуникационного оборудования (маршрутизаторов, средств управления, вычислительной техники и мониторинга) сетей и узлов связи.*

*Для построения указанной математической модели в условиях деструктивного воздействия с учетом положений тензорного анализа сетей введена 2-симплекс-структура на уровне маршрутизаторов: множество замкнутых и незамкнутых путей, соединяющих узлы, с общим количеством  $N$  возможных соединений. Все множество структур рассматривается как частная система координат в  $N$ -мерном пространстве, соответствующая различным способам соединения  $N$  ветвей, с сохранением изначального их числа или переход от одного множества независимых путей к другому в рамках анализируемого пространства без потери качества и характеристик функционирования коммуникационного оборудования сетей и узлов связи. Учитывая размерность, количество исходных данных и многокритериальность, решение задач оптимизации характеристик, свойств и структуры системы связи, подвергающейся деструктивному воздействию, включающей сети и узлы маршрутизации, осуществляется по частям, итерационно и с привлечением специальных методов.*

*В дальнейшем использование этой модели на этапе оптимизации параметров сетей и узлов связи позволит производить их учет в интересах защиты от угроз негативного (деструктивного) воздействия с последующим формированием математических моделей процессов обеспечения функциональной устойчивости сетей и узлов связи критического назначения.*

**Ключевые слова:** сети и узлы связи, тензор, комбинаторная топология, симплекс, комплекс, полиэдральная структура.

### Введение

С учетом факторов воздействия ЭМИ на сети и узлы связи на этапе оптимизации их параметров рассмотрим использование тензорного подхода, что в дальнейшем обеспечит его применение в интересах повышения живучести сетей и узлов связи при их функционировании в условиях деструктивных электромагнитных воздействий, основными целями применения которых являются [1–4]:

– нанесение ущерба отдельным физическим элементам сетей и узлов связи (разрушение сетей электропитания, создание помех, использование специальных программ, стимулирующих вывод из строя аппаратных средств);

– повреждение и/или уничтожение информационных, программных и технических ресурсов объекта воздействия, преодоление систем защиты;

– подавление и/или уничтожение линий связи, искусственная перегрузка узлов коммутации.

Целью представленного исследования является доказательство возможности применения тензорного подхода к построению математической модели состояния сетей и узлов связи в алгебраическом пространстве тензорного поля с учетом факторов поражающего воздействия по ним ЭМИ.

### Основы тензорной теории для построения многомерных полиэдральных сетей

В соответствии с тензорной теорией Крона элементами различных сетей могут быть двумерные поверхности: *нульмерные, одномерные и двумерные* сети, связанные друг с другом в единую структуру, в элементах которой протекают процессы, позволяющие применять одномерные сети (поверхности) для моделирования многомерных систем с различными типами про-

текающих в них процессов [5–7]. Параметры такой сети описываются не во всем непрерывном пространстве, а в отдельных точках – узлах дискретной «решетки», расположенной в пространстве, в результате чего непрерывная структура рассматриваемой физической системы заменяется совокупностью точек, однородно расположенных в пространстве на расстояниях  $\Delta x_{(1)}^\alpha$ ,  $\Delta x_{(2)}^\alpha$ , ...,  $\Delta x_{(k-1)}^\alpha$ ,  $\Delta x_{(k)}^\alpha$ , чему соответствуют независимые  $x_{(1)}^\alpha$ ,  $x_{(2)}^\alpha$ , ...,  $x_{(k)}^\alpha$  и зависимые  $y_\alpha$  переменные, представляющие собой значения уравнений в этих точках, а также последовательность разностей (первых  $\Delta y_\alpha$ , вторых  $\Delta^2 y_\alpha$  и т. д.). Для такой дискретной структуры, как правило, составляют систему алгебраических уравнений (линейных или нелинейных) и решают ее. Однако если имеется совокупность точек, расположенных в пространстве неоднородно, и эти точки представляют собой значения неизвестной функции, обладающей производными более высокого порядка, то для определения этой функции модели в виде одномерной сети уже недостаточно, а восстановление функции вместе с производными высших порядков по экспериментальным

данным возможно в том случае, когда одновременно рассматриваются сети, состоящие из многомерных элементов.

При этом если рассматриваются две системы независимых переменных  $x_{(1)}^\alpha$  и  $x_{(2)}^\alpha$ , то две точки могут определять расстояние (ветвь), а три точки – площадь, но объемы определить не представляется возможным. В данном случае в дополнение к ветвям рассматриваются ограниченные этими ветвями плоскости и образуемые ими структуры. Сами плоскости ограничивают объемы и рассматриваются как структуры, составленные из этих объемов. При трех независимых переменных  $x_{(1)}^\alpha$ ,  $x_{(2)}^\alpha$  и  $x_{(3)}^\alpha$  можно ввести линии, плоскости (треугольники) и кубы (тетраэдры, полиэдры) при помощи трех или четырех соседних точек (рис. 1).

Если же даны  $k$  независимых переменных  $x_{(i)}^\alpha$  и по каждому измерению имеется  $n$  значений, то они будут рассматриваться как  $n$  к в пространстве  $k$  измерений, в котором можно определить многомерные элементы вплоть до  $k$  мерных и рассматривать образуемые ими структуры многомерных сетей.

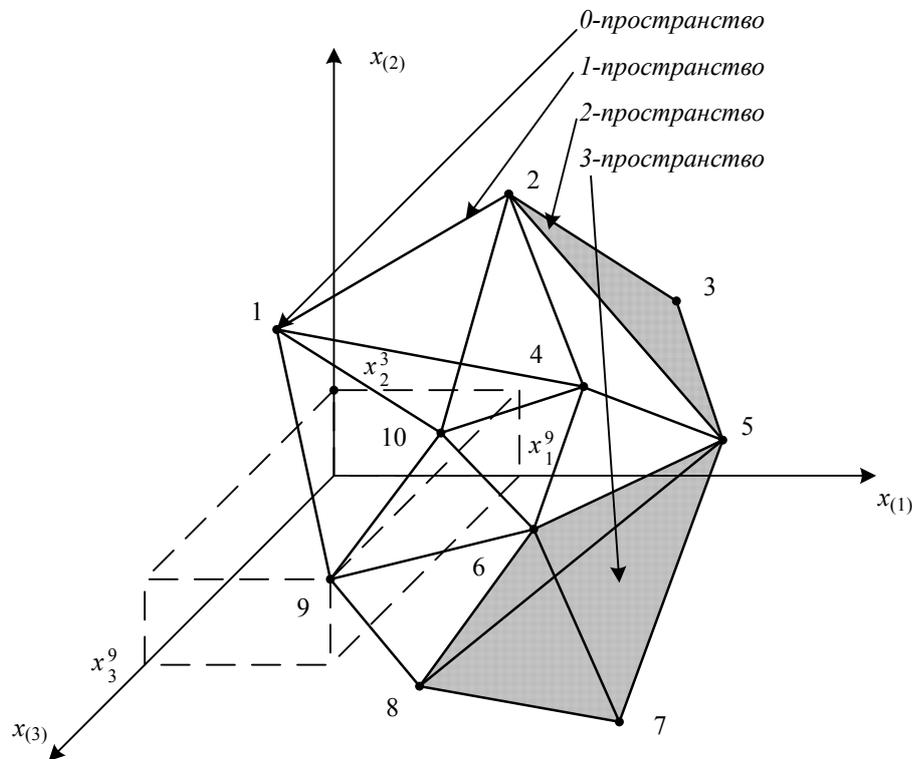


Рис. 1. Полиэдральная структура для десяти экспериментальных точек ( $n = 10$ ) в пространстве трех независимых переменных ( $k = 3$ )

Fig. 1. Poliedral frame for ten experimental points ( $n = 10$ ) in space of three explanatory variables ( $k = 3$ )

Система отсчета для плоскостей (каждая точка соединяется с соседними точками, до которых имеется кратчайшее расстояние) строится с помощью совокупностей трех точек (треугольников), охватывающих минимальные площади и заполняющих собой пространство. Полученная линейная система отсчета охватывает полное  $k$ -мерное пространство. Затем  $k$ -мерное пространство заполняется тетраэдрами, имеющих минимальные объемы, и т. д.

Полученная многомерная структура называется *полиэдр*, а понятия и соотношения, которые возникают при построении таких структур, с математической точки зрения описываются средствами комбинаторной топологии, основы которой как самостоятельной математической науки были заложены А. Пуанкаре в конце XIX века. Для прикладных задач наиболее удобную форму этим методам придал О. Веблен, на работы которого опирался Г. Крон, разработавший и обосновавший применение *диакоптики* для расчета по частям сложных систем, представленных такими моделями [8].

Основными понятиями в комбинаторной топологии являются *симплекс*, *комплекс* и *полиэдр*: точки, концы *одномерного симплекса* (или *1-симплекса*) определяются как *0-симплексы*, часть плоскости, ограниченная *1-симплексами*, опреде-

ляется как *2-симплекс*, объем – как *3-симплекс* и т. д. Все симплексы рассматриваются как пространство соответствующей размерности (рис. 1). Совокупность симплексов вместе с их границами, т. е. симплексами меньших размерностей, образует комплекс. Таким образом, сегмент – *1-симплекс* вместе с концами *0-симплексами* образует *1-комплекс*. Тетраэдр представляет собой *3-комплекс*, состоящий из одного *3-симплекса*, четырех *2-симплексов* (треугольников), шести *1-симплексов* (отрезков) и четырех *0-симплексов* (точек). Вся совокупность точек, принадлежащих симплексам комплекса, называется *полиэдром*. По-разному разбивая один и тот же *полиэдр* на *симплексы*, получим разные *комплексы*. *Полиэдральная сеть* проявляет способности к синергетике и возможности построения на их основе нейроподобных сетей, проявляющих свойства самоадаптации к внешним воздействиям.

Для понимания процесса построения математической модели состояния сетей и узлов связи в алгебраическом пространстве тензорного поля в условиях деструктивных воздействий ЭМИ в качестве примера возьмем фрактально-иерархическую модель взаимодействий рисками в критической информационной инфраструктуре в контексте кибербезопасности (рис. 2) [9], к которой также применимо *полиэдральное представление*.

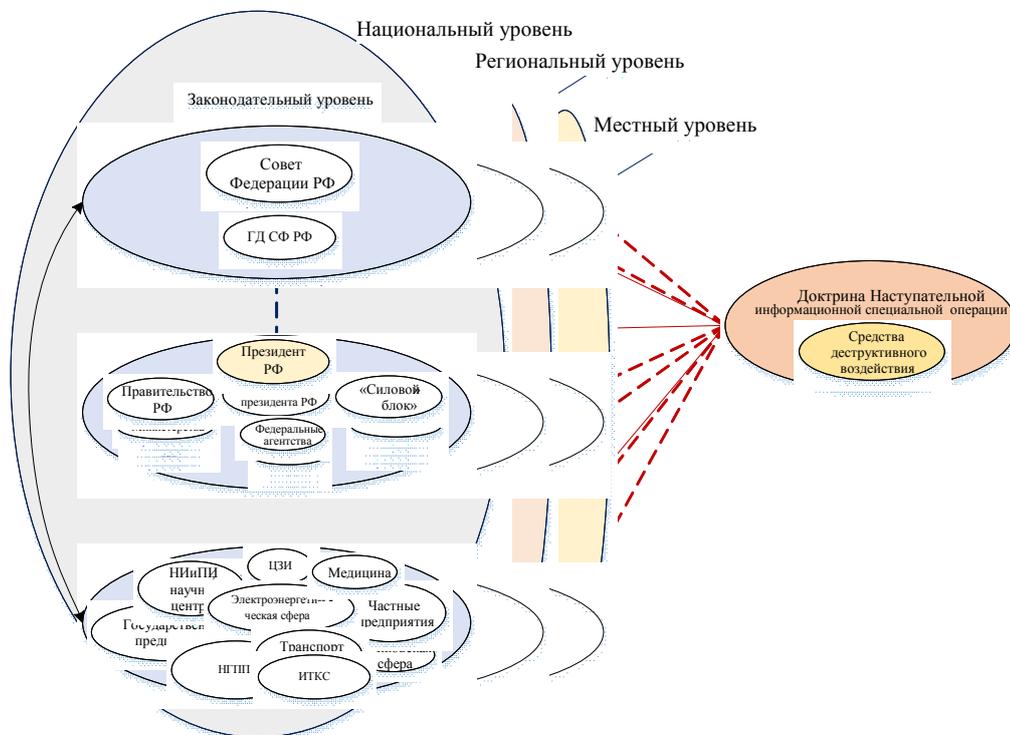


Рис. 2. Фрактально-иерархическая модель взаимодействий рисками в критической информационной инфраструктуре в контексте кибербезопасности

Fig. 2. Fractals-hierarchical model of interactions by scratches in to critical information infrastructure in a cybersecurity context

**Математическая модель состояния сетей и узлов связи на основе их представления в виде полиэдральной структуры в условиях деструктивных воздействий по ним электромагнитным импульсом**

В рамках математического моделирования состояния сетей и узлов связи в условиях деструктивных воздействий рассмотрим *2-симплекс-структуру* на уровне маршрутизаторов: множество замкнутых и незамкнутых путей, соединяющих ее узлы, представляет собой сеть  $S = (N, E)$ , где  $N = \{n_i, i = \overline{1, k}\}$  – множество *нуль-мерных симплексов* – узлов сети (маршрутизаторов) (рис. 3), а  $E = \{e_i = (i, j); i, j = \overline{1, k}; i \neq j\}$  – множество *одномерных комплексов* – ребер, где каждый из них  $e_i = (i, j)$  является моделью канала связи (КС) между  $i$ -м и  $j$ -м взаимодействующими маршрутизаторами.

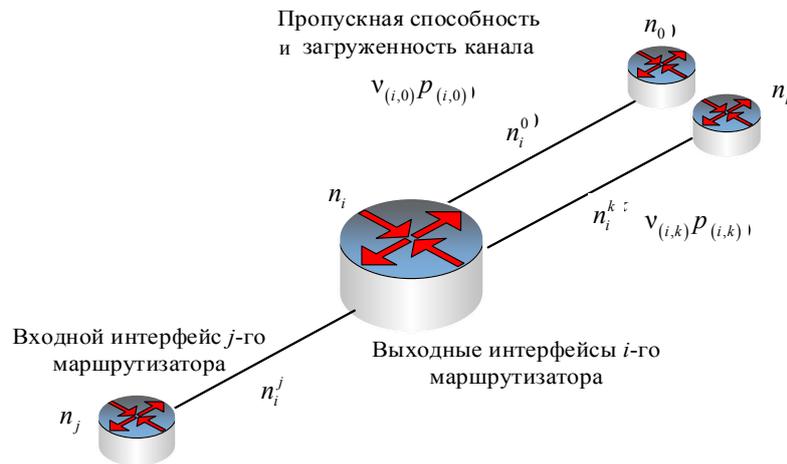


Рис. 3. Представление взаимодействия маршрутизаторов в виде 2-симплекс-структуры

Fig. 3. Representation of interaction of routers in a kind Frame 2-simplex

В соответствии с основополагающими принципами сетевых технологий один интерфейс соответствует не более чем одному соединению. Таким образом,  $n_i^j = \{0, 1\}; j = \overline{1, k}; i \neq j\}$ , где 0 соответствует отсутствию соединения, а 1 – его наличию.

Для описания взаимодействия между узлами (маршрутизаторами) введем несколько показателей:

1. *Пороговое значение воздействия* для канала связи (КС) может быть представлено в виде квадратной матрицы с размерностью, равной количеству маршрутизаторов в сети, представляющей собой матрицу инцидентности со значениями, равными максимально возможному воздействию:

Каждый узел – это маршрутизатор, имеющий несколько интерфейсов и, соответственно, соединений с соседними маршрутизаторами.

Общее множество возможных соединений в рассматриваемой сети равно  $N$ . Таким образом, все множество структур рассматривается как частная система координат в  $N$ -мерном пространстве, соответствующая различным способам соединения  $N$  ветвей с сохранением изначального их числа или переход от одного множества независимых путей к другому в рамках анализируемого пространства [10–15].

У каждого КС имеется несколько характеристик, одна из них – это пороговое значение какого-либо вида воздействия  $V_{(i,j)}$ . Под воздействием будем понимать любое явление, вызывающее изменение характеристик КС, в том числе деструктивное воздействие ЭМИ.

$$V = \begin{bmatrix} v_{(0,0)} & \dots & v_{(0,k-1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ v_{(k-1,0)} & \dots & v_{(k-1,k-1)} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Для каждой отдельно взятой ТКС данная величина является постоянной.

2. Показатель *величины воздействия* – матрица  $D$ , физический смысл каждого элемента  $d_{(i,j)}$  которой заключается в величине воздействия на КС между  $i$ -м и  $j$ -м маршрутизаторами, которое заключается в изменении характеристик КС:

$$D = \begin{bmatrix} d_{(0,0)} & \dots & d_{(0,k-1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ d_{(k-1,0)} & \dots & d_{(k-1,k-1)} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

3. Коэффициент воздействия на КС – число, во сколько раз величина воздействия превосходит пороговое значение. Он также может быть представлен в виде матрицы:

$$\Lambda = \frac{D}{V} = \begin{bmatrix} \lambda_{(0,0)} & \dots & \lambda_{(0,k-1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{(k-1,0)} & \dots & \lambda_{(k-1,k-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d_{(0,0)}}{v_{(0,0)}} & \dots & \frac{d_{(0,k-1)}}{v_{(0,k-1)}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{d_{(k-1,0)}}{v_{(k-1,0)}} & \dots & \frac{d_{(k-1,k-1)}}{v_{(k-1,k-1)}} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Другим важным показателем ТКС является задержка, возникающая при передаче пакета, который часто используется в качестве исходных данных для работы алгоритмов выбора оптимального пути в протоколах маршрутизации (алгоритм Дейкстры, алгоритм Беллмана – Форда и др.) [16] и представленный в виде матрицы:

$$L = \begin{bmatrix} l_{(0,0)} & \dots & l_{(0,k-1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ l_{(k-1,0)} & \dots & l_{(k-1,k-1)} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Также стоит учесть, что каждый КС обладает задержкой вследствие его физической природы, то есть начальным значением  $L_0$  и добавленным значением  $\Delta L$ , которое возникает вследствие воздействия на канал связи. Следовательно,  $L = L_0 + \Delta L$ :

$$L = L_0 + \Delta L = \begin{bmatrix} l_{0(0,0)} + \Delta l_{(0,0)} & \dots & l_{0(0,k-1)} + \Delta l_{(0,k-1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ l_{0(k-1,0)} + \Delta l_{(k-1,0)} & \dots & l_{0(k-1,k-1)} + \Delta l_{(k-1,k-1)} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

При рассмотрении данных показателей стоит учитывать асимметричность КС в ТКС. В большинстве случаев информация передается в дуплексном режиме, поэтому любой КС стоит считать направленным, а следовательно, матрицы будут иметь квадратный вид без симметрии относительно главной диагонали.

Матрица  $D$  является производной величиной, зависящей от таблицы маршрутизации и балансировки нагрузки в сети. Таким образом,

изменение данной величины влияет на нагрузку КС. Исходным значением в данном случае будет величина потока пакетов из определенного узла (истока) или нескольких узлов в узел назначения (сток). Сумма потоков из истоков должна быть равна потоку, приходящему в сток, в то же время пути прохождения трафика могут изменяться во времени в зависимости от нагрузки на КС.

В общем случае взаимозависимость между описанными показателями можно представить в виде полиэдральной схемы в трехмерной системе координат (рис. 4), где показатели зависят друг от друга:

– зависимость  $L$  от  $\Lambda$ : увеличение воздействия на КС приводит к увеличению числа ошибок при передаче пакетов и требует дополнительных операций по их переспросу, что увеличивает величину задержки;

– зависимость  $\Lambda$  от  $D$ : изменение воздействия на сети и узлы связи, косвенно приводящее к изменениям в процессах маршрутизации трафика;

– зависимость  $L$  от  $D$ : для минимизации величины задержки от источника до получателя используются алгоритмы поиска минимального пути в графе, такие как алгоритм Дейкстры и Беллмана – Форда, что позволяет описывать различные процессы, происходящие в сложных гетерогенных системах, примером которой является полиэдральная сеть, построенная на основе 2-симплекс-структуры, представленная на рис. 5.

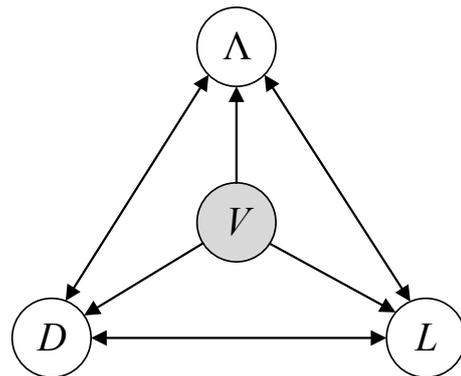


Рис. 4. Взаимозависимость между показателями в виде полиэдральной схемы в трехмерной системе координат

Fig. 4. Mutuality between indexes in a kind Poliedr schemas in a tridimensional frame of axes

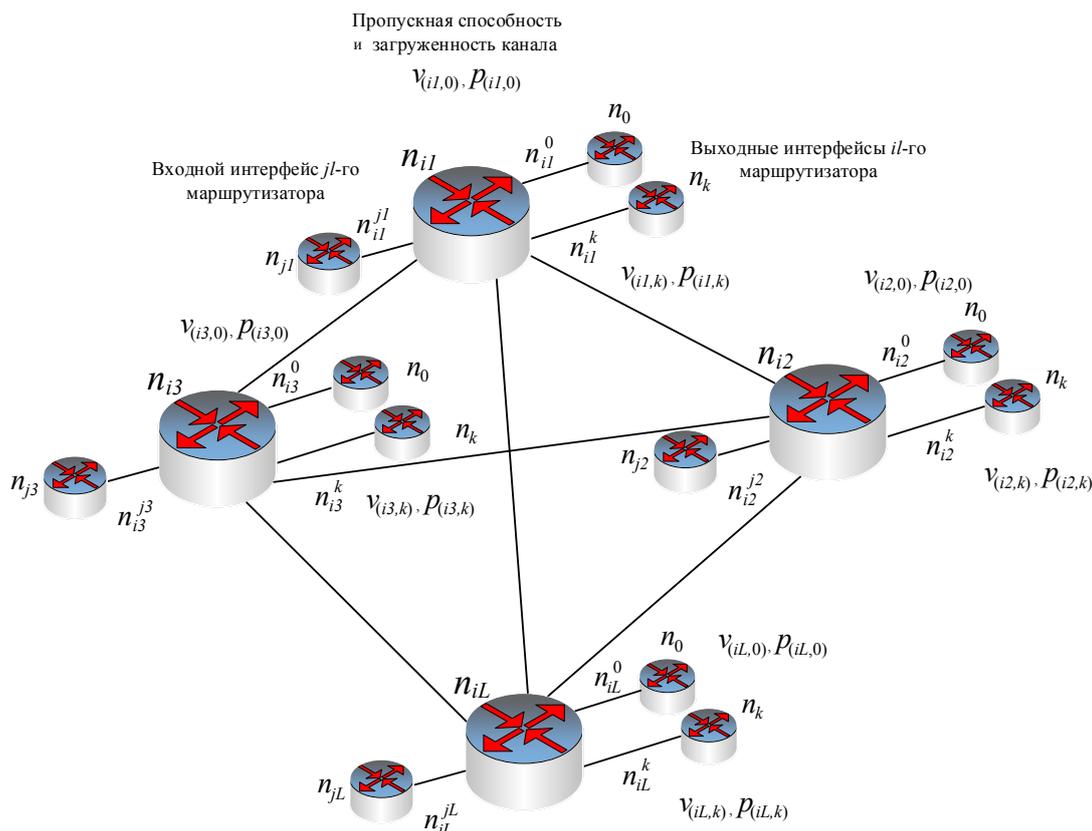


Рис. 5. Полиэдральная сеть, построенная на основе 2-симплекс-структуры

Fig. 5. The Poliedr network constructed on a basis a 2-simplex of frame

Матричное представление *задержки* передачи пакета для полиэдральной сети (рис. 5), функционирующей в условиях деструктивных воздействий, строится на основе применения *иерархии цепей пересечений*, порядок построения которой представлен в [17] и является перспективным продолжением данного направления исследования, связанного с применением тензорного пространства для моделирования состояния сетей и узлов связи, функционирующих в условиях деструктивных воздействий ЭМИ.

#### Анализ результатов

На основании проведенного исследования доказана возможность применения тензорного подхода к построению математической модели состояния сетей и узлов связи, функционирующих в условиях деструктивных воздействий по ним электромагнитным импульсом, на основе их представления в виде полиэдральной структуры, включающей в себя *2-симплекс-структуру* на уровне маршрутизаторов с множеством замкнутых и незамкнутых путей, соединяющих узлы, с общим количеством  $N$  возможных соединений с частной системой координат в  $N$ -мерном пространстве, соответ-

ствующем различным способам соединения  $N$  ветвей, с переходом от одного множества независимых путей к другому в рамках анализируемого пространства, что позволит в последующем применять данные модели в интересах защиты сетей и узлов связи различного назначения от угрозы негативного (деструктивного) воздействия.

#### Библиографические ссылки

1. Роль и место электромагнитного оружия при реализации наступательной стратегии в информационной специальной операции / В. А. Иванов, А. А. Двилянский, И. В. Иванов, Е. А. Гондаренко // Техника средств связи. 2022. № 3 (129). С. 62–73.
2. Libicki M. What is Information Warfare. National Defense University. ACIS paper 3. August 1995.
3. Двилянский А. А., Иванов В. А. Методология оценки комплексной защищенности объектов инфокоммуникационных систем от воздействия деструктивных электромагнитных излучений : монография. Орел : Академия ФСО России, 2018. 230 с. : цв. ил. + (1 вкл).
4. Одоевский С. М., Лебедев П. В. Методика оценки устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникацион-

ной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 152–189.

5. Курнышев Б. С., Данилов С. П. Тензорная методология в теории электротехнических систем : учеб. пособие. Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2002. 180 с.

6. Крон Г. Исследование сложных систем по частям (диакоптика) / пер. с англ. М. : Наука, 1974. 544 с.

7. Крон Г. Тензорный анализ сетей / пер. с англ. ; под ред. Л. Кузина, П. Г. Кузнецова. М. : Сов. радио, 1978. 720 с.

8. Петров А. Е. Тензорная методология в теории систем. М. : Радио и связь, 1985. 152 с. : ил.

9. Роль и место электромагнитного оружия при реализации наступательной стратегии в информационной специальной операции / В. А. Иванов, А. А. Двилянский, И. В. Иванов, Е. А. Гондаренко // Техника средств связи. 2022. № 3 (129). С. 62–73.

10. Лемешко А. В. Тензорная модель многопутевой маршрутизации с гарантиями качества обслуживания одновременно по множеству разнородных показателей // Проблемы телекоммуникаций. 2012. № 4 (9). С. 16–31.

11. Семенов А. Б., Зубилевич А. Л., Аббасова Т. С. Влияние конструктивных особенностей симметричных цепей передачи данных на процесс оптимизации физического уровня инфокоммуникационных систем // Информационно-технологический вестник. 2018. № 3 (17). С. 99–107.

12. Распределенное информационное пространство как ассоциативная среда инфокоммуникационных сетевых структур / Н. Р. Юсупбеков, Ш. М. Гулямов, В. Б. Тарасов, Н. Б. Усманова, М. Ю. Дошанова // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 3. С. 20–29.

13. Тамм Ю. А. Оптимизация размещения новых магистральных узловых станций при структурном расширении действующей инфокоммуникационной сети // Проектирование и технология электронных средств. 2019. № 2. С. 20–25.

14. Xi Han. Tensor-Based Information Monitoring Receiver in UAV-Aided MIMO Communication Systems / Xinyuan Zhao, Jiayi Ying, Feifei Gao // IEEE Wireless Communications Letters. Т. 11. № 1. 2022.

15. Lemeshko O. Research and Development of Delay-Sensitive Routing Tensor Model in iot Core Networks / Oleksandr Lemeshko, Jozef Papan, Oleksandra Yeremenko, Maryna Yevdokymenko, Pavel Segec // 2021, Sensors – Article.

16. Вычислитель оптимальной маршрутизации информационных потоков при деструктивных воздействиях на телекоммуникационные сети // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023615974. Рос. Федерация; заявители и патентообладатели Двилянский А. А., Иванов В. А., Деметьев А. Н., Гурьев Г. В., Гондаренко А. Н. Заявка № 2023614758 от 22.11.2019. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 21.03.2023.

17. Крон Г. Исследование сложных систем по частям (диакоптика) / пер. с англ. М. : Наука, 1974. 544 с.

## References

1. Ivanov V.A., Dvilyanskij A.A., Ivanov I.V., Gondarenko E.A. [The role and place of electromagnetic weapons in the implementation of an offensive strategy in the information special operation]. *Tekhnika sredstv svyazi*. 2022. No. 3. Pp. 62-73 (in Russ.).

2. Libicki M. What is Information Warfare. National Defense University. ACIS paper 3. August 1995.

3. Dvilyanskij A.A., Ivanov V.A. *Metodologiya ocenki kompleksnoj zashchishchennosti ob"ektov infokommunikacionnyh sistem ot vozdejstviya destruktivnyh elektro-magnitnyh izluchenij : monografiya* [Methodology of an assessment of complex security of objects Infocommunications systems from influence of the destructive electromagnetic radiations: the monography]. Oryol : Akademiya FSO Rossii, 2018. 230 p. (in Russ.).

4. Odоеvskij S.M., Lebedev P.V. [A method for assessing the stability of the functioning of a technological control system for a special-purpose infocommunication network with a given topological and functional structure]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2021. No. 1. Pp. 152-189 (in Russ.).

5. Kurnyshv B.S., Danilov S.P. *Tenzornaya metodologiya v teorii elektrotekhnicheskikh si-stem. ucheb. posobie* [Tensor methodology in the theory of electrical systems]. Ivanovo, The State Power university. 2002. 180 p. (in Russ.).

6. Kron G. *Issledovanie slozhnyh sistem po chastyam (diakoptika)* [Research of complex systems in parts (The Diacoptik)]. Moscow: Science Publ., 1974. 544 p. (in Russ.).

7. Kron G. *Tenzornyj analiz setej* [Tenzornyj the analysis of networks]. Moscow: Orls. Radio, 1978. 720 p. (in Russ.).

8. Petrov A.E. *Tenzornaya metodologiya v teorii sistem* [Tensor methodology in the theory of systems]. Moscow: Radio and communication, 1985. 152 p. (in Russ.).

9. Ivanov V.A., Dvilyanskij A.A., Ivanov I.V., Gondarenko E.A. [The role and place of electromagnetic weapons in the implementation of an offensive strategy in the information special operation]. *Tekhnika sredstv svyazi*. 2022. No. 3. Pp. 62-73 (in Russ.).

10. Lemeshko A.V. [Tensor model of multipath routing with guarantees of quality of service simultaneously on a set of heterogeneous indicators]. *Problemy telekommunikacij*. 2012. No. 4. Pp. 16-31 (in Russ.).

11. Semenov A.B., Zubilevich A.L., Abbasova T.S. [Influence of design features of symmetric data transmission circuits on the process of optimizing the physical level of info-communication systems]. *Informacionno-tekhnologicheskij vestnik*. 2018. No. 3. Pp. 99-107 (in Russ.).

12. Yusupbekov N.R., Gulyamov Sh.M., Tarasov V.B., Usmanova N.B., Yu M. [Distributed information space as an associative environment of infocommunications].

tion network structures]. Promyshlennye ASU i kontroly. 2019. No. 3. Pp. 20-29 (in Russ.).

13. Tamm Yu.A. [Optimization of the placement of new backbone junction stations with the structural expansion of the existing infocommunication network]. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnyh sredstv*. 2019. No. 2. Pp. 20-25 (in Russ.).

14. Xi Han. Tensor-Based Information Monitoring Receiver in UAV-Aided MIMO Communication Systems / Xinyuan Zhao, Jiayi Ying, Feifei Gao // *IEEE Wireless Communications Letters*. Vol. 11. No. 1. 2022.

15. Lemeshko O. Research and Development of Delay-Sensitive Routing Tensor Model in iot Core Networks / Oleksandr Lemeshko, Jozef Papan, Oleksandra Yeremenko, Maryna Yevdokymenko, Pavel Segec // 2021, *Sensors* – Article.

16. Vychislitel' optimal'noj marshrutizacii informacionnyh potokov pri destruktivnyh vozdeystviyah na telekommunikacionnye seti [The Calculator of optimum routeing of information streams at the destructive influences on telecommunication networks]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programm dlya EVM № 2023615974 Ros. Federaciya; zayaviteli i patentobladateli Dvilyanskij A.A., Ivanov V.A., Dement'ev A.N., Gur'ev G.V., Gondarenko A.N. Zayavka № 2023614758 ot 22.11.2019. Data gosudarstvennoj registracii v Reestre pro-gramm dlya EVM 21.03.2023 (in Russ.).

17. Kron G. Issledovanie slozhnyh sistem po chastyam (diakoptika) [Research of complex systems in parts (The Diacoptik)]. Moscow: Science Puble., 1974. 544 p. (in Russ.).

\*\*\*

### Mathematical Model of Network and Communication Node State in Tensor Field Algebraic Space Subject to Electromagnetic Pulse Lesion

A. A. Dviljansky, PhD in Engineering, Assoc. Prof., Academy of Federal Agency of Preservation of the Russian Federation, Orel, Russia

V. A. Ivanov, Doctor of Military Sciences, Professor, Corresponding Member «Academy of Cryptography of the Russian Federation», Chief Specialist of Scientifically-Organizational Department FGUP «Scientific and technical center «Orion», Moscow, Russia

M. Ju. Rytov, PhD in Engineering, Assoc. Prof, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia, Managing Chair «Information security System»

E. A. Gondarenko, Research Assistant FGUP «Scientific and technical center «Orion», Moscow, Russia

G. V. Gurjev, Academy of Federal Agency of Preservation of the Russian Federation, Orel, Russia

*The possibility of applying a tensor approach to the mathematical model construction of the network and communication node state in the algebraic space of tensor field is proposed, taking into account the factors of destructive impact by an electromagnetic pulse (EMP) causing functional damage to the structural elements of communication equipment (routers, controls, computing equipment and monitoring) of networks and communication nodes.*

*To construct the specified mathematical model under conditions of destructive influence, taking into account the provisions of network tensor analysis, a 2-simplex structure at the router level is introduced: a set of closed and open paths connecting nodes with N possible connections in total. The whole set of structures is considered as a particular coordinate system within N-dimensional space, corresponding to various ways of connecting N branches, while maintaining their original number or moving from one set of independent paths to another within the analyzed space without loss of quality and performance characteristics of the communication equipment of networks and communication nodes. Taking into account the size, quantity of source data and multi-criteria, the solution of problems of optimizing the characteristics, properties and structure of a communication system that is subject to destructive influence, including networks and routing nodes, is carried out in parts, iteratively involving special methods.*

*In future, the use of this model at the stage of the network and communication node parameter optimizing will allow to account them in the benefit of protection from negative (destructive) impact threats, followed by the mathematical model formation to ensure functional stability of networks and communication nodes of critical purpose.*

**Keywords:** networks and communication nodes, tensor, combinatorial topology, simplex, complex, polyhedral structure.

Получено: 19.04.23

#### Образец цитирования

Математическая модель состояния сетей и узлов связи в алгебраическом пространстве тензорного поля при их поражении электромагнитным импульсом / А. А. Двилянский, В. А. Иванов, М. Ю. Рытов, Е. А. Гондаренко, Г. В. Гурьев // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2023. Т. 21, № 2. С. 102–109. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-102-109.

#### For Citation

Dviljansky A.A., Ivanov V.A., Rytov M.Ju., Gondarenko E.A., Gurjev G.V. [Mathematical model of network and communication node state in tensor field algebraic space subject to electromagnetic pulse lesion]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 102-109 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-102-109.