УДК 621.391.28

В.В. ПОПОВСКИЙ, д-р техн. наук, А.В. ЛЕМЕШКО, канд. техн. наук

ТЕНЗОРНЫЙ АНАЛИЗ В ЗАДАЧАХ СИСТЕМНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Решение многих важных задач по модернизации существующих и созданию перспективных телекоммуникационных систем (ТКС) на новых технологических основах связанно с необходимостью использования целостной, содержательной методологии исследований. В связи с этим как при решении проблем теоретического обоснования, так и практического воплощения требований, стоящих перед ТКС, имеет смысл воспользоваться результатами разработанной и хорошо развитой теории систем, которая ставит своей целью создание и изучение наиболее общих способов описания, законов функционирования и методов исследования сложных систем вне зависимости от их физической природы и представляет собой логическое средство описания реальных объектов в их многоаспектности и противоречивости. В рамках системологического рассмотрения ТКС трактуется как сложная организационно-техническая система. Основными факторами сложности в данном случае могут выступать многоаспектность, высокая размерность, динамический и стохастический характер функционирования, взаимодействие ТКС с другими системами, в первую очередь - обеспечение информационных и расчетно-аналитических систем различного назначения, а также наличие влияния внешних, нередко дестабилизирующих факторов. Попытки целостного представления ТКС обычно сопровождаются использованием системы математических моделей, полученных на уровнях морфологического, функционального и информационного описания. При этом каждая из моделей, а также связанные с ней методы исследования отражают тот или иной аспект рассмотрения ТКС. Зачастую задачи структурного и функционального синтеза решаются независимо, в лучшем случае, определяя друг для друга исходные данные, принятые допущения и ограничения.

В этой связи единый подход к исследованию ТКС как сложной системы позволяют получить тензорные методы анализа и синтеза [1]. Тензорное представление обладает максимальной целостностью, позволяя сконцентрировать основное внимание на самой системе вне зависимости от возможных координатных систем ее рассмотрения. В рамках тензорного анализа система представляется тензором, который отображает инвариантный геометрический объект, координаты которого при преобразовании системы координат изменяются по линейному закону. Это позволяет по известным проекциям тензора в одной системе координат получить его проекции в других системах, если известны законы перехода от одной системы координат к другой. С точки зрения системологии, смена системы координат может означать изменение аспекта рассмотрения исследуемой системы, а проекции тензора могут отображать величины показателей, характеризующие основные ее свойства в принятом для рассмотрения аспекте.

Особую актуальность при решении сетевых задач различной физической природы приобретают исследование американского ученого Г. Крона и его разработки в области тензорного анализа и диакоптики, которые базировались на использовании инвариантных величин, тензоров, которые подобно каркасу связывают преобразование структуры сложных систем [2,3]. Тензорный анализ сетей основан на совместном использовании функциональных уравнений системы и ее графо-топологического описания, представляющего дополнительный источник информации для эффективного составления и решения этих уравнений. Возможность совместного исследования структуры телекоммуникационной системы и протекающих в ней процессов представляется главным преимуществом тензорной методологии исследований, основанной на объединении возможностей дифференциальной геометрии с возможностями комбинаторной топологии.

Методология тензорного подхода к анализу ТКС как сложной системы состоит в следующем:

1. Геометризация системы: введение понятий пространства, систем координат и правил их преобразования.

2. Инвариантное представление уравнений поведения системы, ее основных свойств и характеристик.

3. Установление правил приведения исходной математической модели ТКС к тензорному виду: определение инвариантов, ковариантных и конравариантных величин.

4. Обоснование и выбор примитивной системы, для которой возможно осуществить расчет искомых параметров наиболее просто.

5. Формулирование правил прямого и обратного преобразования (интерпретации) от исследуемой системы к примитивной.

В отличие от однородного непрерывного пространства при исследовании ТКС следует рассматривать анизотропное пространство-стуктуру, определяемое составом и взаимосвязями элементов системы. Размерность такого пространства численно равна количеству ветвей, а переходя от сетевой терминологии [2] к телекоммуникационной – числу отдельных трактов передачи информации в ТКС. Совокупность независимых замкнутых и разомкнутых путей, проходящих по ветвям сети, образуют системы координат [1,2]. Из курса комбинаторной топологии известно, что количество ветвей в любой одномерной сети, представимой на плоскости в виде графа, численно равно сумме независимых замкнутых и разомкнутых путей, а численность независимых разомкнутых путей определяется разницей количества узлов в сети и числа несвязных подсетей [1]. Преобразование структуры сети с сохранением начального числа ветвей или переход от одной совокупности независимых путей к другой трактуется как преобразование системы координат. Таким образом, каждый путь ввиду своей независимости определяет в рамках рассматриваемого пространства-структуры координатную ось.

Для более наглядного понимания введенных понятий тензорного анализа рассмотрим следующую модель расчета сети связи, предполагающую выполнение следующих двух условий: одномерность элементов системы, т.е. воздействие, приложенное к элементу, и отклик на него задаются скалярами (числами); линейность связи между воздействием и откликом. Пусть изначально сеть представлена шестью несвязными ветвями (рис.1). Размерность введенного пространства-структуры (n) равна шести. В рассматриваемой сети количество разомкнутых путей, образуя базис пространства, соответствует числу ветвей и обозначается как $p_i, i=\overline{1,n}$.

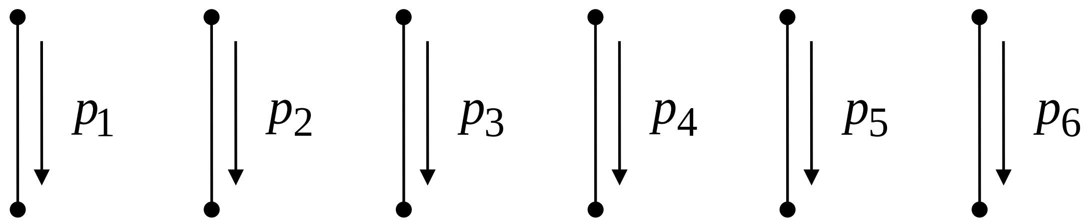

Рис.1

Каждая ветвь сети, моделирующая тракт передачи в ТКС, характеризуется целым рядом параметров, которые, в общем случае, зависят друг от друга. К основным из них отнесем нагрузку в ветви ($h^i, i=\overline{1,n}$), измеряемую в битах; пропускную способность ветви ($l_i, i=\overline{1,n}$), измеряемую в битах за секунду; задержку передачи в ветви ($t_i, i=\overline{1,n}$), измеряемую в секундах. Предполагая использование для каждого элемента сети в качестве воздействующей величины задержку t_i, а в качестве величины отклика – нагрузку h^i, эти величины можно связать между собой следующими уравнениями:

$$h^i = l_i \cdot t_i, \; i=\overline{1,n}. \tag{1}$$

Исходя из постулата первого обобщения Крона [2], форма записи уравнений (1), характеризующих поведение отдельных элементов сети, должна соответствовать уравнению поведения сети в целом, что обуславливает замену системы скалярных уравнений (1) векторно-матричным уравнением вида

$$H = L \cdot T, \tag{2}$$

где

$$H = \begin{bmatrix} h^1 \\ h^2 \\ \vdots \\ h^n \end{bmatrix}, \; T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_n \end{bmatrix}$$

- векторы, соответственно, загрузки ветвей сети и задержек в них размерности n; $L = \left\| l_{i,j} \right\|$ - матрица пропускных способностей сети размерности $n \times n$, на главной диагонали которой находятся собственные пропускные способности ветвей сети, т.е. $l_{i,i} = l_i, i = \overline{1,n}$, а недиагональные элементы матрицы для разомкнутой структуры сети (рис.1) равны нулю.

В зависимости от постановки задачи в качестве воздействующей величины можно принять нагрузку в ветви h^i, а в качестве величины отклика – задержку t_i, определив для расчета векторно-матричное уравнение следующего вида

$$T = R \cdot H, \text{ где } R = L^{-1}. \tag{3}$$

Пусть структура исходной сети, сохранив в качестве инварианта количество ветвей (n), равное шести, претерпела изменения (рис.2), образовав неориентированный полносвязный граф с четырьмя вершинами-узлами (k).

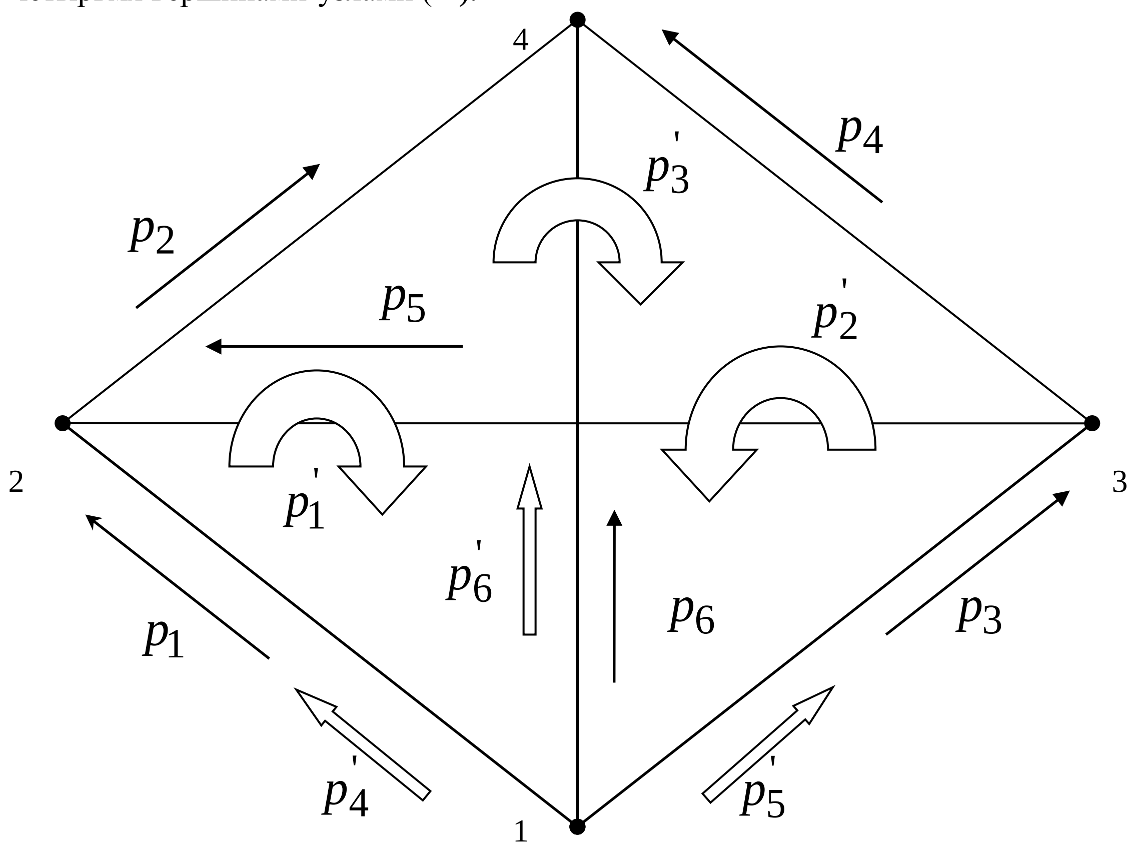

Рис.2

Вследствие вышеотмеченных закономерностей количество независимых разомкнутых путей (j) стало равно трем и численность независимых замкнутых путей – контуров (m) также равняется трем, что определяет в сумме общее число ветвей (n) в сети. К замкнутым относятся пути $\left(p_1^{'}, p_2^{'}, p_3^{'}\right)$ в контурах, соответственно, (1-2-4), (1-3-4) и (2-4-3), а к разомкнутым – пути $\left(p_4^{'}, p_5^{'}, p_6^{'}\right)$. Через пути $p_i, i=\overline{1,n}$, определяющие базис системы, можно выразить любой другой путь сети (рис.2). Причем алгебраическая сумма путей – это путь, проходящий по всем слагаемым суммы в соответствии с их ориентацией. Например, замкнутый путь (контур) $p_1^{'}$ можно представить в виде алгебраической суммы путей p_1, p_2 и p_6, где путь p_6 входит в выражение со знаком минус. По аналогии путь p_2 от узла 2 к узлу 4 находится как сумма путей $p_1^{'}$ и $p_3^{'}$ ввиду их одинаковой направленности.

Переход от разомкнутой структуры сети (рис.1) к соединенной структуре (рис.2) можно трактовать как переход к новой системе координат представления ТКС, как переход от базиса $p_i, i=\overline{1,n}$ к базису $p_i^{'}, i=\overline{1,n}$ в выбранном пространстве-структуре. Выразим компоненты старого базиса $p_i, i=\overline{1,n}$ через компоненты нового базиса $p_i^{'}, i=\overline{1,n}$:

$$\begin{cases} p_1 = p_4^{'}, \\ p_2 = p_1^{'} - p_4^{'} + p_6^{'}, \\ p_3 = p_5^{'}, \\ p_4 = p_2^{'} - p_5^{'} + p_6^{'}, \\ p_5 = -p_1^{'} + p_2^{'} + p_3^{'} + p_4^{'} - p_5^{'}, \\ p_6 = p_6^{'}. \end{cases} \tag{4}$$

Правило преобразования базисов (4) определяет следующую невырожденную матрицу преобразования координат при переходе от базиса $p_i^{'}, i=\overline{1,n}$ к базису $p_i, i=\overline{1,n}$:

$$A = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}. \tag{5}$$

В матричном виде правило преобразования (4) с учетом матричного представления (5) имеет вид

$$P = A \cdot P^{'}, \tag{6}$$

где

$$P = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_6 \end{bmatrix}, \ P^{'} = \begin{bmatrix} p_1^{'} \\ p_2^{'} \\ \vdots \\ p_6^{'} \end{bmatrix}$$

- векторные представления, соответственно, базиса разомкнутой структуры сети (рис.1) и базиса соединенной структуры сети (рис.2).

Следующим шагом после геометризации системы и определения инвариантного уравнения поведения системы (2) является приведение этого уравнения к тензорному виду с определением инвариантных, ковариантных и конравариантных величин, связанное с принятием постулата второго обобщения Г.Крона [2]. Второй постулат утверждает, что в уравнении системы (2) одному и тому же символу, например L, соответствует не одна матрица, а их большое количество, каждая из которых имеет одну и ту же размерность, но отличается значениями компонент. Каждый символ в уравнении образует новую математическую сущность, называемую «геометрический объект», с которым в каждой частной системе координат связана матрица исходной размерности. Для символа L - матрица размерности $n \times n$, для символов H и T - матрицы размерности $n \times 1$. При этом переход от одной системы координат к другой, от одного представления системы к другому производится с помощью матриц преобразования. Поскольку каждая новая система имеет свою собственную матрицу преобразования, то с каждым геометрическим объектом ассоциируется некоторая группа матриц преобразования. Постулат второго обобщения заменяет матричное уравнение, полученное в ходе принятия постулата первого обобщения и справедливое для каждой частной системы координат, на инвариантное уравнение, справедливое для всех координатных систем заданной размерности [2], слагаемыми которого являются уже не матрицы, а геометрические объекты - экстенсивы [4].

Свяжем правила преобразования экстенсивов H, T и L при переходе от одной системы координат к другой с правилами преобразования базисов этих координатных систем (6), показав тем самым их тензорный характер. Пусть в каждой ветви при разомкнутой структуре сети (рис.1) вне зависимости от типа возбуждения величины h^i и t_i $(i = \overline{1,n})$ сонаправлены с соответствующими базисными векторами $p_i, i = \overline{1,n}$. Аналогично, в каждой ветви связанной сети (рис.2) также выберем уже величины $h^{i'}$ и $t_i^{'}$ $(i = \overline{1,n})$ по направлениям новых базисных векторов $p_i^{'}, i = \overline{1,n}$, определив тем самым вектора нагрузок $H^{'*} = \left[h^{1'}, h^{2'} ..., h^{n'}\right]$ и задержек $T^{'*} = \left[t_1^{'}, t_2^{'}, ..., t_n^{'}\right]$ в этой сети, где * - символ транспонирования.

В сети с соединенной структурой понятия контурных (узловых) нагрузок и задержек вводятся виртуально: контурная нагрузка считается одинаковой для всех ветвей этого контура, а контурная задержка представляет собой алгебраическую сумму задержек в ветвях данного контура. На основании введенных понятий правила преобразования компонент векторов нагрузок и задержек имеют вид

$$\begin{cases} h^1 = h^{1'} + h^{4'}, \\ h^2 = h^{1'} + h^{3'}, \\ h^3 = h^{2'} + h^{5'}, \\ h^4 = h^{2'} - h^{3'}, \\ h^5 = h^{3'}, \\ h^6 = -h^{1'} - h^{2'} + h^{6'}; \end{cases} \qquad \begin{cases} t_1 = t_4^{'}, \\ t_2 = t_1^{'} - t_4^{'} + t_6^{'}, \\ t_3 = t_5^{'}, \\ t_4 = t_2^{'} - t_5^{'} + t_6^{'}, \\ t_5 = -t_1^{'} + t_2^{'} + t_3^{'} + t_4^{'} - t_5^{'}, \\ t_6 = t_6^{'}. \end{cases}$$

В матричной форме вышеприведенные правила преобразования выглядят следующим образом:

$$H = C \cdot H^{'}; \tag{7}$$

$$T = A \cdot T^{'}, \tag{8}$$

где матрица преобразования вектора нагрузки представима в форме

$$C = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}. \tag{9}$$

Заметим, что матрицы преобразования C и A связаны между собой условием ортогональности

$$C \cdot A^{*} = I,$$

где I - единичная матрица размерности $n \times n$.

Таким образом, при переходе от одной системы координат к другой компоненты (координаты) экстенсивов H и T преобразуются по линейному закону (7-8), что дает основание говорить об их тензорном характере. Полная совокупность всех матриц преобразования образует тензор преобразования $C_{p'}^{p}$ [2].

В целом ТКС можно представить в виде геометрического объекта – тензора N валентности (порядка, ранга) два

$$N = H \cdot T^{*}, \tag{10}$$

характеризуемого в каждой частной системе координат n^2 компонентами, а тензорный характер объекта подтверждается следующим выражением:

$$N^{'} = C^{*} \cdot N \cdot A.$$

Смешанный тензор N, выступая в выбранном пространстве-структуре в качестве модели ТКС, как следует из выражения (10), имеет два слагаемых. Их по виду правил своего преобразования при переходе от одной системы координат к другой (7-8) можно трактовать как контравариантные (H) и ковариантные (T). В тензорном исчислении принято контравариантные величины записывать с верхними индексами, а ковариантные с нижними, что объясняет вышепринятую индексную запись компонент тензоров нагрузок и задержек. Основываясь на постулате первого обобщения и форме правил преобразования (7-8), нетрудно определить правила преобразования для величин L и R

$$L^{'} = A^{*} \cdot L \cdot A; \tag{11}$$

$$R^{'} = C^{*} \cdot R \cdot C, \tag{12}$$

вид которых позволяет определить тензор пропускных способностей сети как дважды контравариантный метрический тензор, а обратный ему тензор как дважды ковариантный метрический тензор [2,4]. Для каждой частной системы координат тензор R представляется матрицей, называемой фундаментальной [4].

Установив правила преобразования проекций тензора N, актуальной становится задача выбора начальной координатной системы, для которой уже известны все искомые компоненты всех геометрических объектов и, опираясь на которую, можно рассчитать необходимые компоненты в заданной координатной системе. Сеть, соответствующая такой системе координат, называется простейшей или примитивной [2]. В случае, когда заранее рассчитанных сетей нет, в качестве примитивной выбирается сеть, в которой расчет искомых параметров ТКС являлся бы наиболее предпочтительным, вызывая минимальные вычислительные затруднения. Опыт решения подобных задач тензорными методами [1-3] подсказывает, что в качестве примитивной сети при расчете соединенной сети (рис.2) целесообразно выбрать несвязную сеть, состоящую из отдельных n ветвей (рис.1). Это может также быть связано с тем, что представления тензоров в инвариантном уравнении поведения системы при разомкнутой структуре сети соответствуют ее рассмотрению в ортогональной системе координат ввиду диагональной формы фундаментальной матрицы.

Целостность тензорного описания обеспечивает многоаспектность рассмотрения исследуемых явлений, процессов и системы в целом. Введенная тензорная интерпретация основных сетевых терминов и понятий позволит значительно упростить процесс расчета искомых параметров ТКС, придав ему требуемую системность. Это достигается путем сведения решения исходной задачи в непосредственном наблюдении к расчету примитивной сети, выбор которой соответствует переходу к наиболее предпочтительному аспекту рассмотрения. В свою очередь, переход от исходной постановки к примитивной осуществляется с помощью несложных матричных преобразований.

Эффективность и количественную интерпретацию использования тензорных методов расчета сетей связи продемонстрируем на примере решения такой важной задачи как нахождение максимального потока между двумя узлами сети. Известно, что в такой постановке она относится к классу потоковых задач и может решаться методами квадратичного программирования [5]. Однако более изящное и простое решение можно получить, сведя исходную задачу к задаче расчета электрической цепи [6], для решения которой разработаны и хорошо апробированы тензорные методы [1-3]. Это основано на доказательстве соответствия постановок задач квадратичного программирования и расчета электрических цепей [6], содержащих источники тока, напряжения и сопротивления. Их решение представляет собой особый случай распределения токов и напряжений, удовлетворяющих первому и второму законам Кирхгофа и минимизирующих мощность, рассеиваемую на сопротивлениях.

Аналогия между задачами расчета сетей связи и электрических сетей заключается в установлении взаимнооднозначного соответствия между такими понятиями, как нагрузка (H) и ток (I), задержка (T) и напряжение (U), пропускная способность (L) и проводимость (Y). Воспользовавшись тензорным методом расчета электрических цепей [2] и сохранив понятийный аппарат сетей связи, сформулируем задачу нахождения максимального потока с ограничением на время доставки данных следующим образом. Для примитивной сети (рис.1) заданы пропускные способности ветвей таким образом, что фундаментальная матрица имеет вид

$$R = \begin{Vmatrix} 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.14 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix},$$

а необходимо рассчитать максимальную нагрузку между узлами 1 и 4 соединенной сети (рис.2), исполненную не более чем за 10 секунд. В приведенной постановке в качестве воздействующих величин выступают предельные задержки в ветвях

$$T^* = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -10].$$

В качестве искомых величин отклика выступают нагрузки в ветвях соединенной сети $H_в^{'}$. Тензорный метод решения подобного рода задач предполагает следующую очередность действий. Во-первых, производится расчет вектора задержек вдоль контуров соединенной сети (рис.2)

$$T_m^{'} = C_m^{*} \cdot T \ ,$$

где сингулярная матрица C_m - относится лишь к контурам соединенной сети, т.е.

$$C_m = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{Vmatrix},$$

$$T_m^{'} = \begin{Vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -10 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 10 \\ 10 \\ 0 \end{Vmatrix}.$$

Во-вторых, определяется контурная часть фундаментальной матрицы в соединенной сети

$$R_m^{'} = C_m^{*} \cdot R \cdot C_m ,$$

$$R_m^{'} = \begin{Vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.14 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 0.45 & 0 & 0.2 \\ 0 & 0.48 & -0.14 \\ 0.2 & -0.14 & 0.59 \end{Vmatrix}.$$

В-третьих, рассчитываются контурные нагрузки

$$H_m^{'} = \left(R_m^{'}\right)^{-1} \cdot T_m^{'} ,$$

$$H_m^{'} = \begin{Vmatrix} 2.65 & -0.29 & -0.96 \\ -0.29 & 2.3 & 0.65 \\ -0.96 & 0.65 & 2.17 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} 10 \\ 10 \\ 0 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 23.61 \\ 20.06 \\ -3.13 \end{Vmatrix}.$$

В-четвертых, производится расчет нагрузок в каждой ветви соединенной сети

$$H_в^{'} = C_m \cdot H_m^{'} ,$$

$$
H_{в}^{'} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} 23.61 \\ 20.06 \\ -3.13 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 23.61 \\ 20.48 \\ 20.06 \\ 23.19 \\ -3.13 \\ -43.67 \end{Vmatrix} .
$$

Значение шестого компонента вектора $H_{в}^{'}$ и определяет максимальный поток в сети (рис.2) между узлами 1 и 4 при введенном ограничении на время доставки данных.

Электротехническая интерпретация - не единственное свидетельство эффективного использования тензорных методов расчета сетей различной физической природы. На этом примере произведена наглядная демонстрация преимуществ тензорной методологии исследования ТКС как сложных систем. Использование наряду с функциональным описанием системы, представленным ее уравнением поведения, также графо-топологического портрета позволило отказаться от прямолинейности в расчетах основных параметров сети связи. Переход от представления системы, данного в непосредственном наблюдении, к другому (более предпочтительному в рамках выбранных критериев) аспекту рассмотрения, трактуя такой переход как смену координатных систем, возможен только за счет целостного (многоаспектного) описания систем телекоммуникаций с использованием тензорных методов анализа и синтеза. Тензорная методология позволяет объединить непрерывный анализ (уравнения) с дискретным (графы), создавая тем самым благоприятные условия для эффективного решения сложных задач системного исследования ТКС.

Список литературы: 1. *Петров А.Е.* Тензорная методология в теории систем. М: Радио и связь, 1985. 152 с. 2. *Крон Г.* Тензорный анализ сетей. М.: Сов. радио, 1978. 719 с. 3. *Крон Г.* Исследование сложных систем по частям – диакоптика. М.: Наука, 1972. 542 с. 4. *Победря Б.Е.* Лекции по тензорному анализу. М.: Из-во Московского ун-та, 1974. 206 с. 5. *Йенсен П.. Барнес Д.* Потоковое программирование. М.: Радио и связь, 1984. 392 с. 6. *Денис Дж.Б.* Математическое программирование и электрические цепи. М.: Из-во иностранной литературы, 1961. 215 с.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
Поступила в редколлегию 13.02.2002