

ОБЩЕСИСТЕМНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 519.216.8

В. В. ПОПОВСКИЙ, д-р техн. наук, Т. И. ГРИГОРЬЕВА

ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Исторический аспект. Каждая отрасль имеет свою основополагающую науку, определяющую ее содержание и перспективу. Еще до недавнего времени основополагающей отраслевой наукой считалась теория связи, на которой было воспитано несколько поколений связистов, составляющих на сегодняшний день кадровую основу нашей отрасли. Несколько углубившись в историю, можно утверждать, что наша отраслевая наука всегда тесно соприкасалась с потребностями практики и с развитием математики и радиофизики. Труды Белла, Попова, Маркони была заложена практическая основа проводной и радиосвязи. На тот момент были разработаны ряды Фурье, теория длинных линий, телеграфные уравнения, теория телетрафика, теория электромагнитного поля, элементы приемопередающей аппаратуры. Далее Шеннон, Палий, Котельников, Миддлтон [1–8] заложили основы теории сигналов и их обработки; по сути, была сформулирована нынешняя теория связи. В ее развитие много поработали советские ученые: Р.Л. Стратонович, Л.М. Финк, В.И. Тихонов, Д.Д. Кловский и многие другие [9–15]. Среди украинских ученых следует назвать: А.Г. Зюко, В.Л. Банкета, В.А. Игнатова, В.А. Омельченко, В.К. Стеклова, П.Ф. Полякова и многих других.

Можно отметить, что данная теория развивалась достаточно гармонично, разве что периодически возникали споры личностного характера между Б.Р. Левиным и В.И. Тихоновым, В.В. Шахгильдяном и Б.И. Шахтариним и др. А.М. Заездный попытался преодолеть барьер потенциальной помехоустойчивости, и тогда пришлось вмешаться Д.Е. Вакману [14]. Последний показал несостоятельность используемого определения фазы сигнала – отличного от того, которое следует из преобразования Гильберта.

Совсем в ином положении оказалась практика. Производители техники связи не очень то заботились, иногда и намеренно, об унификации оборудования и его параметров, о сопряжении отдельных узлов и комплексов, выпускаемых различными фирмами. Разнообразие структур сигналов, их уровней, методов модуляции, уплотнения и др. потребовало принятия согласованных решений по стандартизации и унификации параметров сигналов и соответствующей техники. По взаимной договоренности в Международном союзе электросвязи были стандартизованы параметры цифровых и аналоговых (речевых) сигналов и каналов, другие характеристики. Были стандартизованы различные интерфейсы и стыки. В 70-х гг. была принята семиуровневая модель взаимодействия открытых систем (ВОС). Это – в некотором смысле рубежная акция: систему связи удалось декомпозировать и на нее удалось посмотреть с единых системных позиций, определив ее полноту, завершенность и возможность сопоставления с другими. С принятием модели ВОС сама система связи «узаконенно» стала считаться распределенной.

Для теоретического обоснования тех или иных решений стало уместно использовать теорию систем [20; 23; 24; 26; 27]. Кроме того, сама теория связи не в состоянии дополнить теорию систем, ибо методы модуляции и демодуляции сигналов, методы кодирования и др. уже достаточно глубоко проработаны, формализованы и их реализация на современной цифровой элементной базе многократно проверена на практике. По сути, теория связи обеспечивает лишь первый (физический) и частично второй (канальный) уровни семиуровневой модели ВОС.

80-е и 90-е гг. стали периодом перехода на цифровую элементную базу, микропроцессоры, сигнальные процессоры; использование компьютеров стало повсеместным. Обозначилась эра информатизации, перехода к информационному обществу, в котором значение средств и систем связи возрастает необыкновенно [30]. Большую роль в создании средств, комплексов и систем связи сыграли ученые и инженеры – цифровики и компьютерщики, которым удалось формализовать многие практические задачи связи в рамках упомянутой модели ВОС. Их труды позволили подойти к созданию тех телекоммуникационных технологий, которые имеем на сегодняшний день [17; 29; 33–35].

Ныне для отраслевой технологии электросвязи наступил период расцвета. Вряд ли какая-либо другая отрасль может характеризоваться столь бурными темпами развития. Технология сменяет технологию каждые два-три года, а взаимопроникновение компьютерных и информационных технологий не дает расслабиться ни инженерам, ни ученым. В настоящее время трудно разделить ответственность между связистами и информационщиками, поскольку сама система связи стала подсистемой более общей информационной системы.

Практика развития телекоммуникаций. Благодаря высокой (может быть, самой высокой среди некриминального бизнеса) прибыльности, отрасль успешно развивается и совершенствуется. Внедряются все более совершенные технологии. Можно отследить ряд тенденций в развитии телекоммуникаций [29; 34; 35].

Основная задача любой телекоммуникационной системы (ТКС) – успешно справиться с трафиком. Поскольку трафик носит нестационарный случайный характер, ибо порождается разнообразными пространственно-распределенными факторами, успешное функционирование ТКС, учитывая ограниченность ее ресурса, возможно только при оптимальном или близких к оптимальному режимах и при эффективной ее реструктуризации, соответствующей динамике изменяющихся запросов. Из теории систем известно [23; 28], что при анализе и синтезе сложных организационно-технических систем структурные и функциональные задачи объединить и совместно решить достаточно сложно, хотя отдельно каждая из них может быть решена существующими методами [27; 28]. В современных технологиях ТКС предпринимаются попытки как отдельного, так и совместного решения этих задач. Предложены [17] достаточно сложные подсистемы управления режимами распределенных сетевых элементов TMN, TINA и др., которые в силу высокой регламентации проявляют в ряде состояний особые свойства. Кроме того, не всегда эффективно используются наличные сетевые ресурсы.

Примерами тому могут служить широко применяемые в задачах маршрутизации технологии оптимального нахождения кратчайших маршрутов (алгоритмы Дейкстры, Форда–Фалкерсона). К таким относятся дистанционно-векторные протоколы (RIP) и протоколы состояния связей (OSPF, IS-IS), где кратчайший маршрут выбирается исходя из некоторой метрики сети. Можно показать, что последняя стратегия часто приводит к нерациональному использованию пропускной способности, когда отдельные направления связи оказываются перегруженными, в то время как другие – слабо или совсем не загруженными. Выбранный при этом критерий не учитывает текущей загрузки ресурсов сети, а сама нагрузка оказывается не сбалансированной с пропускными способностями различных направлений.

Предложена модернизированная технология, названная Traffic Engineering (TE). Она призвана обеспечить оптимальное использование сетевого ресурса данной сети S , когда максимальный коэффициент использования ресурса K_i по всем направлениям связи должен быть минимальным:

$$\Phi = \min_S \left(\max_i K_i \right), \quad (1)$$

где i – направления связи.

При этом достигаются две основные цели: улучшение качества обслуживания передаваемого трафика (уменьшение задержек, повышение интенсивности трафика) и обеспечение максимально возможного использования всех ресурсов сети.

Одновременно с модернизацией ТЕ предпринимаются попытки найти более общие решения по управлению режимами ТКС и перейти от жесткой регламентации к более мягким и гибким стратегиям передачи трафика, к адаптационным задачам.

На качество решаемых задач влияют не только нестационарность трафика и ограниченность сетевых ресурсов, но и уровень надежности и помехозащищенности передаваемой служебной и коммерческой информации. Надежность и помехозащищенность современных линий связи требуются на уровне до $P_{\text{ош}} \leq 10^{-8} \dots 10^{-9}$. Низкая вероятность ошибки обеспечивается благодаря волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) и высоконадежному цифровому оборудованию. При этом характерно, что основной вклад в снижение помехозащищенности вносит не ВОЛС, где $P_{\text{ош}} \leq 10^{-10} \dots 10^{-12}$, а оборудование (маршрутизаторы, коммутаторы, элементы систем управления и др.). Для повышения надежности и помехозащищенности сети, предотвращения отказа ТКС при выходе из строя одного из сетевых элементов разработан механизм рестарта BGP (Border Gateway Protocol). В соответствии с ним при сбое или отказе одного из маршрутизаторов в ТКС возникает явление отказов, ибо соседние маршрутизаторы, обеспечивая реструктуризацию сети, генерируют обновление маршрутных таблиц и рассылают данные во множество доменов маршрутизации. В условиях большой загрузки такая процедура приводит к состоянию, близкому к хаосу: оно называется «биением маршрутов», заикливанием.

Форум IETF в настоящее время предпринимает попытку найти механизм мягкого рестарта при отказе одного из маршрутизаторов. Протокол носит название Graceful Restart. Он обеспечивает сохранение информации о продвижении пакетов и о маршрутах до тех пор, пока вновь не запустится протокол TCP.

Более общим решением является управление на основе ПСП-правил системной политики (Policy-Based Network Management – PBNM). Вербальный критерий для такого управления может быть сформулирован как поддержание стабильной работы ТКС при динамическом ее состоянии. Комитет IETF, который предложил PBNM в документе REC 3198, характеризует подобную политику так: «Выбор среди альтернативных линий поведения или образ действий, определяющий принятие текущих решений в зависимости от складывающихся условий». Здесь предполагается, что имеют место три основных иерархических уровня управления:

- реконфигурация сети на основе ПСП (policy-based configuration);
- конфигурирование правил принятия ПСП (configuration of policy);
- конфигурирование самой системной политики на основе ПСП (policy-based configuration of policy).

Реализация технологии PBNM, так же, как и ТЕ, TMN, TINA и других, возможна лишь при наличии информации о видах и местах установки сетевого оборудования, о состоянии сетевых устройств, топологии сети – при условии наблюдаемости и управляемости теми устройствами, которые обеспечивают коррекцию режима или реконфигурации.

Для решения указанных задач требуется интенсивное использование результатов теории систем, прикладной математики, теории принятия решений в условиях неопределенности, методов адаптации и управления на основе получаемых оценок состояния различных сетевых элементов и их режимов. Нетривиальным является само представление математической модели этих сетевых элементов и их режимов в виде многомерной диаметрической системы:

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = F(\bar{x}(t), \bar{q}(t), t) \neq 0, \quad (2)$$

где \bar{x} – вектор случайных параметров динамической системы; \bar{q} – вектор дополнительных, в том числе мешающих, параметров.

Классическая схема перехода от математической модели (2) к управлению $\bar{u}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_N(t)]^T$ включает в себя получение результатов наблюдения

$$\bar{y}(t) = H(\bar{x}(t), \bar{q}(t), \bar{n}(t), t), \quad (3)$$

где $\bar{n}(t)$ – вектор параметров мешающих сигналов и условий, отображающих состояние системы S в эти результаты.

Если результаты наблюдений $\bar{y}(t)$ можно считать детерминированными, то они непосредственно используются для получения оптимальных решений, управлений и выводов. При стохастическом их характере требуются обработка статистики, получение соответствующих оценок $\hat{x}(t)$, на основе которых принимаются дальнейшие решения и находится управление

$$\bar{u}(t) = A(\bar{y}(t), \hat{x}(t), \bar{q}(t), \bar{n}(t), t). \quad (4)$$

Для синтеза стохастического оптимального управления $\bar{u}(t)$ уместно использовать теорему о разделении, в соответствии с которой при оптимальной среднеквадратической оценке состояния $\hat{x}(t)$ само управление может реализовываться в виде детерминированной процедуры.

Проблемы создания теории ТКС. При проектировании сетевых элементов, сетей и самих ТКС, на наш взгляд, еще недостаточно привлекаются основополагающие методы теории систем. Еще нет у специалистов уверенности в правильности выбора той или иной технологии. Примеров тому можно привести достаточно много. Так, известно, что для построения устойчивых систем можно использовать: энтропийный подход, при котором устойчивое состояние достигается за счет большого запаса ресурса; гомеостатический, когда усилия направляются на сохранения конфигурации; бихейворальный, осуществляемый путем реконфигурации системы. Каждый из подходов имеет свои определенные преимущества, но они пока в явном виде не проявляются.

Также имеется ряд более частных проблем. Нет системного истолкования широко принятого объектно-ориентированного подхода. Разночтения в методах маршрутизации привели к уже упомянутой концепции Traffic Engineering, которая, опять же, базируется в основном на инженерной интуиции. Неоднозначно трактуются условия каузальности, которые для сложных организационно-технических систем не всегда выполнимы.

Много проблем возникает при выборе адекватного математического аппарата и обеспечении корректности его применения. Основной объект внимания – матрица инцидентий, которая используется при изучении структурных свойств систем, – далеко не совершенен, ибо не обладает свойствами инвариантности. Решаемая с помощью этих матриц задача анализа носит во многом локальный, статический характер. Кроме того, результаты спектрального анализа таких матриц имеют ограниченную применимость в силу того, что компоненты их спектра зависят не только от состояния отдельных направлений, но и от порядка нумерации элементов графа сети.

Более общим, а главное, обладающим инвариантным характером, математическим объектом может служить метрический тензор [39], задаваемый в произвольном n -мерном пространстве V_n в некоторой локальной системе координат $x = (x^1, x^2, \dots, x^n)$ функциями $g_{ij} = g_{ij}(x)$, где $i, j = 1, 2, \dots, n$. Здесь функции g_{ij} могут быть интерпретированы как пропускные способности, затухания или задержки сигнала. Наряду с метрическим тензором $g_{ij}(x)$, в пространстве V_n необходимо задать аффинорную структуру $F_i^h(x)$. Необходи-

мость задания последней определяется тем, что рассматриваемая нами система является динамической, ее представление в пространстве V_n дается в виде некоторой траектории.

Аффинорная структура обладает следующими свойствами. Во-первых, $g_{i\alpha} F_j^\alpha = F_j^\alpha g_{\alpha j}$, т.е. произведение матрицы метрического тензора и матрицы аффинорной структуры коммутативно. Во-вторых, $F_\alpha^h F_i^\alpha = 0$, т.е. аффинорная структура параболическая.

Метрический тензор, по определению, задается в любой точке указанного пространства и содержит всю информацию о процессах, происходящих в этом пространстве. Такое задание математической модели пригодно лишь для решения статических задач. Необходима же реализация динамического подхода. Для этого можно использовать методы геометрической динамики, согласно которым метрический тензор является аргументом компонентов объектов связности, представляющих собой символы Кристоффеля

$$\Gamma_{ij}^h = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial g_{i\alpha}}{\partial x^j} + \frac{\partial g_{j\alpha}}{\partial x^i} - \frac{\partial g_{ij}}{\partial x^\alpha} \right) g^{\alpha h}. \quad (5)$$

Здесь $g^{\alpha h}$ – компоненты матрицы, обратной к матрице метрического тензора. Из выражения (5) видно, что компоненты символов Кристоффеля заданы частными производными метрического тензора по каждой координате пространства и обуславливают скорость изменения тех или иных параметров информационных потоков в определенных направлениях.

Для получения численного результата в целях нахождения приращений скоростей воспользуемся отображением пространства V_n^k с метрическим тензором $g_{ij}(x)$ на пространство V_n^{k+1} с метрическим тензором $\bar{g}_{ij}(x)$. Будем считать, что V_n^k – состояние сети на k -м шаге, V_n^{k+1} – на $(k+1)$ -м шаге.

При отображениях соответственно изменяются компоненты объектов связности и образуют рекурсивную процедуру

$$\bar{\Gamma}_{ij}^h(x) = \Gamma_{ij}^h(x) + \psi_{(i}(x) \delta_{j)}^h + \varphi_{(i}(x) F_{j)}^h(x),$$

где $\bar{\Gamma}_{ij}^h(x)$, $\Gamma_{ij}^h(x)$ – компоненты объектов связности пространств V_n^k и V_n^{k+1} ; ψ_i, φ_i – некоторые векторы; δ_j^h – компоненты единичной матрицы; круглыми скобками возле нижних индексов обозначено симметрирование по i и j .

Если ввести в рассмотрение еще одну аффинорную структуру F_β^α , удовлетворяющую условиям $F_\beta^\alpha F_\beta^\alpha = n$ (очевидно, это можно сделать всегда, если $F_i^h \neq 0$), то можно показать возможность построения геометрического объекта тензорного характера, инвариантного относительно рассматриваемого отображения [38]:

$$\Pi_{ij}^h = F_{i,j}^h - \frac{1}{n} (\delta_j^h F_{i,\alpha}^\alpha + 2F_j^h F_{i,\beta}^\alpha F_\beta^\alpha). \quad (6)$$

Здесь запятой обозначена ковариантная производная в пространстве V_n^k . Уточним, что, по определению, эта производная

$$F_{i,j}^h = \frac{\partial F_i^h}{\partial x^j} + F_i^\alpha \Gamma_{\alpha j}^h - F_\alpha^h \Gamma_{ij}^\alpha.$$

Следовательно, ковариантная производная тензора содержит частную производную этого тензора и некую добавку, зависящую от компонентов объекта связности и состояния сети, описываемого тензором. Данная добавка может интерпретироваться как внешнее воздействие на систему, зависящее от результатов предыдущих наблюдений. Кроме того, эту добавку можно интерпретировать как результат проявлений нелинейных свойств данной системы.

Отметим, что, в отличие от матриц смежности или инцидентности, которые не обладают свойством инвариантности, структура тензора (6) не меняется при производимых отображениях.

Инвариантный объект можно представить как ее трафик, совокупную пропускную способность сети, совокупную мощность передающих устройств радиосети и др.

Рассмотрим пример. Будем считать, что функции, задающие тензор, представляют собой на i -й линии затухания $e^{-\alpha_i L_i}$, где α – показатель затухания, L – протяженность линии связи. Ввиду того что тензор обладает свойством инвариантности, компоненты тензора, заданного в системе координат x в виде $g_{ij}(x) = e^{-\alpha(x)L(x)}$, при переходе к другой системе координат $y = y(x)$ преобразуются в компоненты тензора той же валентности $g'_{ij}(y)$, которые выражаются через $g_{ij}(x)$:

$$g'_{ij}(y) = g_{\alpha\beta}(x) \frac{\partial x^\alpha}{\partial y^i} \frac{\partial x^\beta}{\partial y^j}.$$

Таким образом, показана возможность представления математической модели сети в терминах тензорного анализа, а приведенный пример подтверждает факт сохранения инвариантности при преобразовании координат.

Серьезным тормозом в развитии теории ТКС стало широкое, если не повсеместное, использование в теории связи и остальных отраслевых науках гипотезы эргодичности при интерпретации случайных процессов и полей. Переход же к процессам и полям диффузионного типа, которые на сегодняшний день являются, пожалуй, наиболее перспективным направлением математического описания динамических систем, сдерживается консерватизмом самих специалистов. Слабо проработана теория многополосных сетей, результатов ее применения практически нет. Не совсем ясна роль вырожденных преобразований. Нет четких формулировок при использовании отображений, понижающих размерность. Много неясностей остается при решении нелинейных, нестационарных и негауссовых задач.

Серьезные проблемы возникают при производстве и использовании оборудования, особенно при попытках совместной эксплуатации средств различных производителей. Совместимое по основным интерфейсам, оно часто не совместимо по ряду служебных. Например, широко внедряемое в практику оборудование SDH-технологии совместимо по SDH-интерфейсам, однако оно не является таковым по системам управления. До настоящего времени даже у идеологов современных технологий нет четкого представления о том, каким системным свойствам должно отвечать само управление.

На наш взгляд, все изложенные и многие другие проблемы рано или поздно будут решены и будет создана теория ТКС. Предполагать, когда она появится и какова ее структура, очевидно, рано. Однако ее облик уже очерчивается и стараниями многих специалистов она будет сформулирована. Пока же технология отрасли больше опирается на инженерную интуицию, чем на строгую науку.

- Список литературы:** 1. Шеннон К. Двухсторонние каналы связи: Сб. ст.: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 248 с. 2. Котельников В.А. Теория обнаружения, оценок и модуляции. М.: Госэнергоиздат, 1956. 311 с. 3. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи: В 2 т.: Пер. с англ. М.: Совет. радио, 1961 – 1962. Т. 1. 1961. 782 с.; Т. 2. 1962. 831 с. 4. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь: Пер. с англ. М.: Совет. радио, 1974. 720 с. 5. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции: В 3 т.: Пер. с англ. М.: Совет. радио, 1972 – 1977. Т. 1. 1972. 734 с.; Т. 2. 1975. 344 с.; Т. 3. 1977. 662 с. 6. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Совет. радио, 1970. 727 с. 7. Хемминг Р. Коды с обнаружением и исправлением ошибок: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 248 с. 8. Кеннеди Р. Каналы связи с замиранием и рассеянием: Пер. с англ. М.: Совет. радио, 1973. 304 с. 9. Стратонович Р.Л. Теория информации. М.: Совет. радио, 1975. 424 с. 10. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники: В 3 т. М.: Совет. радио, 1974 – 1976. Т. 1. 1974. 550 с.; Т. 2. 1975. 392 с.; Т. 3. 1976. 288 с. 11. Кловский Д.Д. Модели непрерывных каналов связи на основе стохастических дифференциальных уравнений / Д.Д. Кловский, В.Я. Канторович, С.М. Широков. М.: Совет. радио, 1984. 248 с. 12. Петрович Н.Т. Системы связи с шумоподобными сигналами / Н.Т. Петрович, М.К. Размахнин. М.: Совет. радио, 1969. 232 с. 13. Зюко А.Т. Помехоустойчивость и эффективность систем связи. М.: Связь, 1972. 359 с. 14. Вакман Д.Е. Сложные сигналы и принципы неопределенности в радиолокации. М.: Совет. радио, 1965. 304 с. 15. Тихонов В.И. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов / В.И. Тихонов, Н.К. Кульман. М.: Совет. радио, 1975. 704 с. 16. Омельченко В.О. Теория электрической связи / В.О. Омельченко, В.Г. Санников. К.: Ин-т зем. магнетизму, 1997. 640 с. 17. Стеклов В.К. Управление в телекоммуникационных системах / В.К. Стеклов, Е.В. Кильчицкий. К.: Наука, 2002. 232 с. 18. Поляков П.Ф. Прием сигналов в многолучевых каналах. М.: Радио и связь, 1986. 248 с. 19. Родимов А.П. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов и помех в линиях связи / А.П. Родимов, В.В. Поповский. М.: Совет. радио, 1984. 284 с. 20. Олійник В.Ф. Основы теории систем связи. К.: Техніка, 2000. 154 с. 21. Акимов П.С. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович. М.: Радио и связь, 1984. 440 с. 22. Колесник В.Д. Курс теории информации / В.Д. Колесник, Г.Ш. Контырев. М.: Наука, 1982. 416 с. 23. Месарович Н. Общая теория систем: Пер. с англ. / Н. Месарович, Я. Такахара. М.: Мир, 1978. 236 с. 24. Теория систем и методы системного анализа в управлении и связи / В.Н. Волков, В.А. Воронков, А.А. Денисов и др. М.: Радио и связь, 1983. 270 с. 25. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 336 с. 26. Директор С. Введение в теорию систем: Пер. с англ. / С. Директор, Р. Рорер. М.: Мир, 1974. 356 с. 27. Мулен Э. Кооперативное принятие решений: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 464 с. 28. Основы теории систем связи / М.В. Захарченко, В.В. Поповский, В.Ф. Олійник, С.М. Горохов. О.: Одес. нац. акад. зв'язку, 2001. 194 с. 29. Поповский В.В. Основные тенденции мирового развития телекоммуникации // Радиотехника. 2001. Вып. 123. С. 4 – 8. 30. Орленко Н.П. Новые тенденции в телекоммуникационном регулировании / Н.П. Орленко, Н.М. Стародуб, В.М. Михайлов // Зв'язок. 2001. № 2. С. 66 – 72. 31. Уемов А.И. Системный подход и общая теория систем. М.: Мысль, 1978. 272 с. 32. Крон Г. Тензорный анализ сетей: Пер. с англ. М.: Совет. радио, 1978. 719 с. 33. Поповский В.В. Тензорный анализ в задачах системного исследования телекоммуникационных систем / В.В. Поповский, А.В. Лемешко // Радиотехника. 2001. Вып. 124. С. 16 – 21. 34. Олифер В.Г. Компьютерные сети / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. СПб.: Питер, 2000. 672 с. 35. Назаров А.Н. АТМ: Технология высокоскоростных сетей / А.Н. Назаров, М.В. Симонов. М.: Экотрендз, 1999. 252 с. 36. Бордман Б. Для тех, кто помешан на сетевом управлении / Б. Бордман, Д. Саперия // Сети и системы связи. 2002. № 6. С. 58 – 61. 37. Олифер В. Искусство оптимизации трафика / В. Олифер, Н. Олифер // Журн. сетевых решений. 2001. Дек. С. 39 – 47. 38. Григорьева Т.И. Тензорная модель телекоммуникационной сети // Тр. Укр. науч.-исслед. ин-та радио и телевидения (УНИИРТ). 2002. № 2. С. 12 – 17. 39. Рашевский П.К. Риманова геометрия и тензорный анализ. М.: Наука, 1967. 664 с. 40. Нитецки З. Введение в дифференциальную динамику: Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 302 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 17.04.2002