

УДК 621.391

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРНО- ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СИНТЕЗА ТРАНСПОРТНОЙ ТКС



[А.В. ЛЕМЕШКО](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники



[В.Л. СТЕРИН](#)

ЗАО «Киевстар Дж.Эс.Эм»

В статті запропонована динамічна модель структурно-функціонального синтезу транспортної телекомунікаційної мережі (ТТКМ). За допомогою моделі забезпечується погоджене розв'язання задач щодо вибору топології та пропускних здатностей трактів передачі ТТКМ, розподілу потоків та визначення порядку підключення абонентів до вузлів транспортної мережі.

The paper proposed a dynamic model of the structural-functional synthesis of transport telecommunication network (TTN). The model provides a consistent solution for problems of the choice of topology and channels bandwidth in TTN, flow distribution, and determine the order of connection fees to the nodes of the TTN.

В статье предложена динамическая модель структурно-функционального синтеза транспортной телекоммуникационной сети (ТТКС). С помощью модели обеспечивается согласованное решение задач по выбору топологии и пропускных способностей трактов передачи ТТКМ, распределения потоков и определения порядка подключения абонентов к узлам транспортной сети.

Введение

В соответствии с общемировыми тенденциями развития систем телекоммуникаций основной задачей отрасли связи Украины является создание интегральной мультисервисной сети связи, отвечающей всевозрастающим запросам пользователей к качеству обслуживания [1-3]. Ее успешное решение тесно сопряжено с необходимостью обобщения уже накопленного мирового опыта в сфере телекоммуникаций и всецело зависит от степени технологического внедрения передовых принципов проектирования подобного рода систем, управления ими, а также методов передачи и обработки информации.

Среди прочих проблема проектирования телекоммуникационной системы (ТКС) является, по мнению многих специалистов [3-5], одной из наиболее важных и сложных проблем системного характера. Важность данной проблемы состоит в том, что именно на этапе проектирования закладывается «фундамент» успешного решения большинства возлагаемых на синтезируемую ТКС задач, который должен минимизировать последующие затраты технологических средств управления и обслуживающего персонала на введение новых сетевых мощностей и их рационального использования. Сложность проблемы, связанной с проектированием ТКС, обусловлена необходимостью учета достаточно большого числа факторов (исходных данных), влияющих на эффективность ее решения. К основным из них, прежде всего, стоит отнести следующие:

– численность и размещение потенциальных пользователей (абонентов) ТКС, их требований к перечню и содержанию предоставляемых услуг связи, а также уровню качества обслуживания (Quality of Service, QoS);

– инвестиционные и технологические возможности фирм или компаний, осуществляющих проектирование ТКС;

– требования к срокам проектирования, окупаемости и т.д.

Проблема проектирования ТКС в соответствии с принятой архитектурой сетей следующего поколения (Next Generation Network, NGN) охватывает целый комплекс отдельных очень важных задач структурно-топологического и функционального синтеза сетей доступа, транспортной сети, систем сетевого управления и т.д. Решение подобных сложных по своему содержанию задач в рамках системного подхода, как правило, осуществляется комплексно: с использованием методов математического (аналитического и имитационного) моделирования получают искомые решения в первом приближении, а для их проверки и последующего уточнения используют возможности средств лабораторного эксперимента и натурных испытаний.

Важно отметить, что значения ключевых показателей качества обслуживания во многом зависят от объема заложенных на этапе проектирования структурных и функциональных ресурсов именно транспортной сети ТКС. К числу таких ресурсов можно отнести доступные маршруты (структурный ресурс), пропускную способность (ПС) трактов передачи, буферный ресурс маршрутизаторов сети (функциональный ресурс). В этой связи ключевое значение приобретают задачи выбора или разработки математических моделей структурно-функционального синтеза транспортных телекоммуникационных сетей (ТТКС).

I. Анализ решений в области структурно-функционального синтеза транспортных телекоммуникационных сетей

Сложность решения проблемы структурно-функционального синтеза ТТКС определила необходимость ее декомпозиционного представления на уровне следующих трех основных задач: выбор топологии (ВТ), выбор пропускных способностей (ВПС) и распределение потоков (РП) [6-14], которые должны решаться максимально согласованно с целью повышения качества конечных результатов. Обеспечить же максимальную согласованность отдельных задач структурно-функционального синтеза ТТКС возможно лишь основываясь на соответствующем математическом описании, формализующем анализируемые задачи с точки зрения их постановки и, что немаловажно, вариантов предполагаемого решения.

При выборе математической модели структурно-функционального синтеза ТТКС, как и при выборе любой другой модели, исходят из того, чтобы подобная модель, с одной стороны, максимально адекватно описывала моделируемый процесс, а с другой стороны, обеспечивала бы получение искомых результатов с приемлемыми вычислительными и временными затратами, не допуская перегиба в ту или иную сторону. Нередко в погоне за детальностью описания моделируемого процесса ис-

пользуемая модель настолько усложняется, что получение искомым результатов становится невозможным без введения дополнительных упрощений уже на этапе вычислений, что, в свою очередь, снижает достоверность конечных расчетов и, тем самым, ставит под сомнение адекватность самой модели.

Ввиду отсутствия в настоящее время целостной теории структурно-функционального синтеза ТТКС, не существует и универсальных рекомендаций, на основании которых с общих позиций могли бы быть сформулированы и решены перечисленные задачи. Это, в свою очередь, связано с тем, что даже точное решение некоторых задач в отдельности сопряжено со значительными трудностями описательного и вычислительного характера, и зачастую для их решения могут быть использованы лишь приближенные эвристические методы [1, 5, 6].

По мнению ряда ученых, занимающихся проблематикой структурно-функционального синтеза ТТКС [6-10], развитие существующих средств описания и решения подобных задач видится в использовании динамических моделей, способных адекватно представить проектирование не как разовое действие, а как сложный многошаговый процесс, протекающий во времени. Это вызвано тем, что процесс структурно-функционального синтеза ТТКС характеризуется достаточно большой длительностью (месяцы/годы), многоэтапным финансированием и связанным с этим этапным вводом в строй новых сетевых мощностей. В этой связи, целью данной статьи является разработка динамической модели структурно-функционального синтеза транспортной телекоммуникационной сети.

II. Разработка динамической модели структурно-функционального синтеза транспортной телекоммуникационной сети

При разработке математической модели структурно-функционального синтеза транспортной телекоммуникационной сети примем допущение о том, что месторасположение узлов (маршрутизаторов) ТТКС фиксировано, а также известен порядок вероятного подключения абонентов (сетей доступа) к этим узлам. Тогда предполагаемую структуру ТКС охарактеризуем графом $G(R, L)$, множество вершин которого $R = R^* \cup R^{**}$ моделирует множество узлов проектируемой сети $R^* = \{R_i^*, i = \overline{1, N}\}$, где R_i^* – i -й узел проектируемой транспортной сети, N – их общее число (мощность множества R^*); а также множество абонентов (сетей доступа) $R^{**} = \{R_j^{**}, j = \overline{1, M}\}$, где R_j^{**} – j -й абонент (сеть доступа) проектируемой ТКС, M – их общее число (мощность множества R^{**}). Множество дуг $L = L^* \cup L^{**}$ описывает множество вероятных трактов передачи между узлами ТТКС $L^* = \{L_{i,j}^*, i, j = \overline{1, N}; i \neq j\}$ и линий доступа $L^{**} = \{L_{m,s}^*, m = \overline{1, M}; s = \overline{1, N}\}$ между отдельными абонентами (сетями доступа) и приграничными узлами ТТКС, возможность создания которых заложена в ходе проектирования, т.е. $L_{i,j}^*$ – создаваемый тракт передачи (ТП) между i -м и j -м узлами транспортной сети, а $L_{m,s}^{**}$ – возможная линия доступа (ЛД) от m -го абонента (сети доступа) до s -го узла транспортной сети.

В качестве примера на рис. 1 представлен граф ТКС, в которой пять узлов ТТКС и семнадцать абонентов (сетей доступа). Возможные тракты передачи и линии доступа (ЛД) показаны штриховыми отрезками, сплошными же отрезками будут показаны ТП и ЛД, по которым в ходе расчетов будет принято решение об их создании в ходе проектирования. В общем случае граф $G(R, L)$ является неполносвязным.

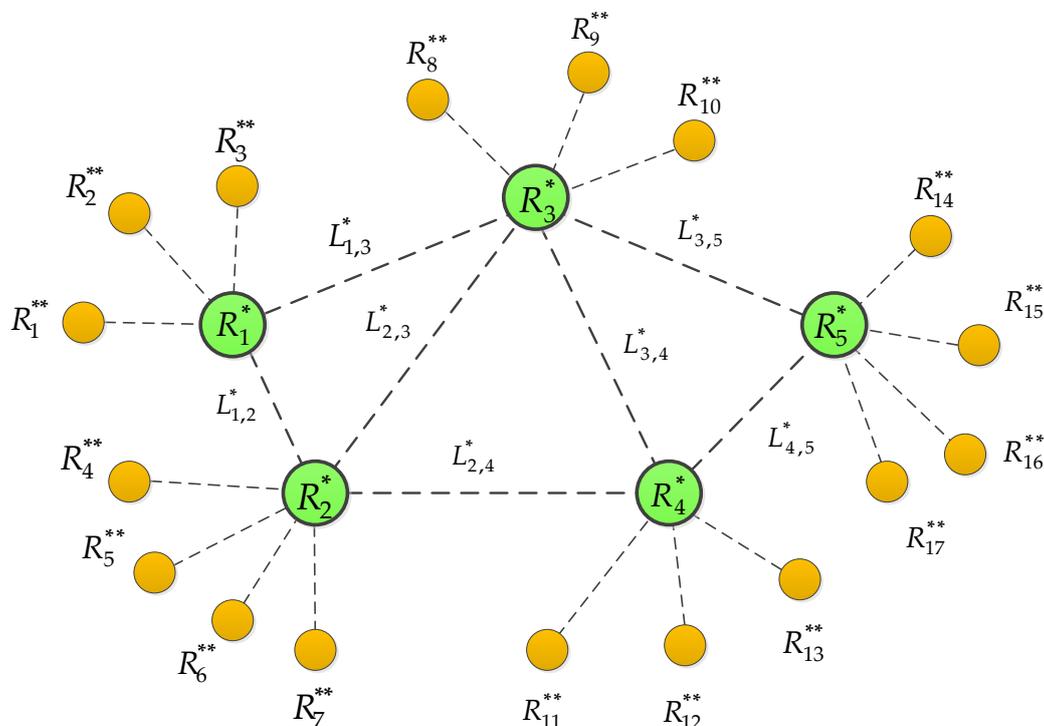


Рис. 1. Вариант графа $G(R, L)$

Предполагается также, что известны следующие исходные данные:

Q – общий объем капиталовложений в создаваемую ТТКС, измеряемый, например, в гривнах (грн);

$Z = \{Z_{h,m}; h = \overline{1, H}; m = \overline{1, M}\}$ – множество трафиков, поступающих в ТТКС от абонентов и сетей доступа, причем $Z_{h,m}$ – h -й трафик, поступающий от m -го абонента (сети доступа) на узел транспортной сети;

K – число временных интервалов (этапов, стадий) в общем процессе структурно-функционального синтеза ТТКС;

$\Delta t = t_{k+1} - t_k$ – средняя длительность одного этапа структурно-функционального синтеза ТТКС, t_k и t_{k+1} – времена начала и окончания k -го временного интервала;

$q(k)$ – объем капиталовложений в создаваемую ТТКС на k -м временном интервале (грн), т.е. имеет место равенство

$$\sum_{k=1}^K q(k) = Q; \quad (1)$$

$g_{i,j}(k)$ – удельная стоимость ввода в строй единицы пропускной способности ТП $L_{i,j}^*$ сети на k -м временном интервале, измеряемая в $\frac{\text{бит/с}}{\text{грн}}$; $k = \overline{1, K}$;

$a_{i,j}(k)$ – коэффициент потерь (снижения) пропускной способности ТП $L_{i,j}^*$ за k -й временной интервал;

$r_{h,m}(k)$ – средняя интенсивность трафика $Z_{h,m}$ на k -м временном интервале (бит/с).

Кроме того, введем следующие обозначения:

$c_{i,j}(k)$ – пропускная способность создаваемого ТП $L_{i,j}^*$ на k -м временном интервале (бит/с);

$q_{i,j}(k)$ – объем капиталовложений, направленный на наращивание ПС тракта передачи $L_{i,j}^*$ на k -м временном интервале (грн);

$u_{i,j}(k)$ – доля капиталовложений, доступных на k -м временном интервале, выделенная на наращивание ПС ТП $L_{i,j}^*$, т.е. имеет место равенство

$$q_{i,j}(k) = u_{i,j}(k)q(k); \quad (2)$$

$\Delta c_{i,j}(k) = u_{i,j}(k)q(k)g_{i,j}(k)$ – приращение ПС ТП $L_{i,j}^*$ за k -й временной интервал.

Тогда динамику изменения пропускной способности трактов передачи ТТКС в ходе ее структурно-функционального синтеза можно описать следующей системой разностных уравнений:

$$c_{i,j}(k+1) = a_{i,j}(k)c_{i,j}(k) + \underbrace{u_{i,j}(k)q(k)g_{i,j}(k)}_{\substack{q_{i,j}(k) \\ \Delta c_{i,j}(k)}}, \quad (3)$$

число которых соответствует мощности множества L .

С точки зрения решения задач ВТ и ВПС трактов передачи в системе уравнений (3) пропускные способности $c_{i,j}(k)$ трактов передачи трактуются как переменные состояния процесса структурно-функционального синтеза ТТКС, а переменные $u_{i,j}(k)$ выступают в качестве управляющих, регламентирующих процесс перераспределения капиталовложений на создание отдельных ТП и наращивание их пропускной способности. В начале процесса проектирования в рамках предлагаемых решений считается, что ПС всех вероятных ТП равны нулю. Наличие в рамках произвольного этапа в структуре проектируемой ТТКС того или иного ТП основывается на том, что его ПС $c_{i,j}(k)$ становится больше нуля. Согласно физическому смыслу переменных $u_{i,j}(k)$, в общем виде на них накладываются следующие ограничения:

$$\sum_{L_{i,j}} u_{i,j}(k) \leq 1, \quad (4)$$

выполнение которых, наряду с условием (1), гарантирует отсутствие перерасхода денежных средств в ходе структурно-функционального синтеза ТТКС.

В дополнение к изложенному, каждому трафику кроме его средней интенсивности сопоставим еще ряд параметров: $s_{h,m}$ и $d_{h,m}$ – узел-источник и узел-получатель трафика $Z_{h,m} \in Z$ соответственно. С точки зрения решения задачи распределения потоков в рамках общей проблемы структурно-функционального синтеза ТТКС управляющей (маршрутной) переменной также служит величина $x_{i,j}^{h,m}(k)$, которая характеризует долю интенсивности трафика $Z_{h,m} \in Z$, протекающего в тракте $L_{i,j}^*$ на k -м временном интервале. Кроме того вводится также величина $\alpha_{h,m}$, которая моделирует долю интенсивности трафика $Z_{h,m} \in Z$, получившей отказ в обслуживании ТТКС на k -м временном интервале.

С целью недопущения потерь пакетов на сетевых узлах и в ТТКС в целом в ходе расчета маршрутных переменных $x_{i,j}^{h,m}(k)$ необходимо обеспечить выполнение условия сохранения потока [14]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:L_{i,j} \in L} x_{i,j}^{h,m}(k) - \sum_{j:L_{j,i} \in L} x_{j,i}^{h,m}(k) = 0 \text{ при } Z_{h,m} \in Z, i \neq s_{h,m}, d_{h,m}; \\ \sum_{j:L_{i,j} \in L} x_{i,j}^{h,m}(k) - \sum_{j:L_{j,i} \in L} x_{j,i}^{h,m}(k) = 1 - \alpha_{h,m}(k) \text{ при } Z_{h,m} \in Z, i = s_{h,m}; \\ \sum_{j:L_{i,j} \in L} x_{i,j}^{h,m}(k) - \sum_{j:L_{j,i} \in L} x_{j,i}^{h,m}(k) = \alpha_{h,m}(k) - 1 \text{ при } Z_{h,m} \in Z, i = d_{h,m}, \end{array} \right. \quad (5)$$

а также условий предотвращения перегрузки трактов передачи ТТКС:

$$\sum_{Z_{h,m} \in Z} r_{h,m}(k) x_{i,j}^{h,m}(k) \leq c_{i,j}(k); L_{i,j} \in L. \quad (6)$$

В соответствии с физикой решаемой задачи (5), (6) на маршрутные переменные $x_{i,j}^{h,m}(k)$ накладываются такие ограничения:

$$x_{i,j}^{h,m}(k) \in \{0,1\} \quad (7) \quad \text{или} \quad 0 \leq x_{i,j}^{h,m}(k) \leq 1, \quad (8)$$

которые вводятся при моделировании процессов одно- (7) или многопутевой (8) маршрутизации в ходе решения задачи РП.

В свою очередь переменные отказов в обслуживании $\alpha_p(k)$ связывают следующие ограничения:

$$0 \leq \alpha_{h,m}(k) \leq 1 \quad (9) \quad \text{или} \quad \alpha_{h,m}(k) \in \{0,1\}, \quad (10)$$

если на основе договора об уровне сервиса (SLA) допускается (9) или не допускается (10) частичное ограничение скорости доступа в сеть.

Выражения (1)-(10) в целом описывают в динамике процесс структурно-функционального синтеза ТТКС на уровне согласованного решения задач выбора

топологии и пропускных способностей трактов передачи сети. Необходимую согласованность в решение задач ВТ и ВПС ТП обеспечивает введение условия (6).

III. Формулировка критерия оптимальности решений по структурно-функциональному синтезу транспортной ТКС

В зависимости от выбранной стратегии проектирования ТТКС в качестве критерия оптимальности решений по структурно-функциональному синтезу транспортной сети может выступать минимум или максимум свертки технических, экономических или технико-экономических показателей. Использование технических (технологических) критериев, как правило, сводится к минимизации объемов используемого сетевого оборудования в ходе проектирования ТТКС при выполнении комплекса ограничений, например, по обеспечению заданного уровня производительности сети. В рамках использования технологических критериев допускается и обратная постановка задачи: обеспечить максимизацию производительности проектируемой ТТКС в рамках заданных объемов сетевых ресурсов, доступных для ввода в строй. Введение экономических критериев, так или иначе, связано с максимизацией прибыли, ожидаемой по окончании процесса проектирования. Техничко-экономические критерии ориентированы на комбинированный учет как технологических, так и экономических факторов.

В данной работе предлагается в качестве подобного критерия использовать максимум следующего функционала:

$$J = \sum_{k=1}^K \sum_{Z_{h,m} \in Z} w_{h,m}(k) r_{h,m}(k) [1 - \alpha_{h,m}(k)], \quad (11)$$

в котором $w_{h,m}(k)$ – удельная прибыль от обслуживания трафика $Z_{h,m}$, измеряемая в $\frac{грн}{бит/с}$, а выражение $r_{h,m}(k) [1 - \alpha_{h,m}(k)]$ в функционале (11) фактически характеризует интенсивность трафика $Z_{h,m}$, принятую к обслуживанию транспортной сетью. Тогда максимизация функционала (11) приведет к максимизации прибыли от предоставляемых услуг связи, начиная уже с первого этапа структурно-функционального синтеза.

Максимизация функционала (11) должно осуществляться при соблюдении системы ограничений, представленных в рамках модели (1)-(10). Интегральный вид критерия (11) и наличие рекурсивного ограничения (4) позволяет отнести сформулированную задачу к задачам оптимального управления, что подразумевает необходимость использования соответствующих методов ее решения [15].

Возможность обеспечить оптимальность решений задач структурно-функционального синтеза ТКС на всем протяжении процесса проектирования, благодаря выбору динамической модели (1)-(10) и критерия (11), является важным преимуществом по отношению к одношаговым стратегиям проектирования с точки зрения более высокой гибкости при введении (наращивании) новых сетевых ресурсов – трактов передачи (доступных маршрутов) и их пропускной способности. Не-

редко, пожертвовав некоторой прибылью на первых этапах проектирования, например по причине подключения к ТТКС бóльшего количества абонентов с невысокой $w(k)$, можно получить более высокую суммарную прибыль в конце процесса проектирования. Это связано с тем, что средняя интенсивность трафика ($r_{h,m}$), претендующего на обслуживание проектируемой ТТКС и поступающего от еще не подключенных к данной сети абонентов, с каждым этапом проектирования может существенно снижаться по причине подключения этих абонентов к другим сетям, т.е. ТКС других операторов. Учет отмеченного варианта развития событий, так или иначе, должен отразиться в конечном итоге на модели процессов $r_{h,m}(k)$. В рамках предлагаемых решений факт подключения абонента R_m^{**} к проектируемой ТТКС основывается на принятии к обслуживанию (частичному или полному) любого из генерируемых им трафиков.

Качественный характер решений задач структурно-функционального синтеза ТТКС в рамках предложенной динамической модели (1)-(11) представлен на рис. 2.

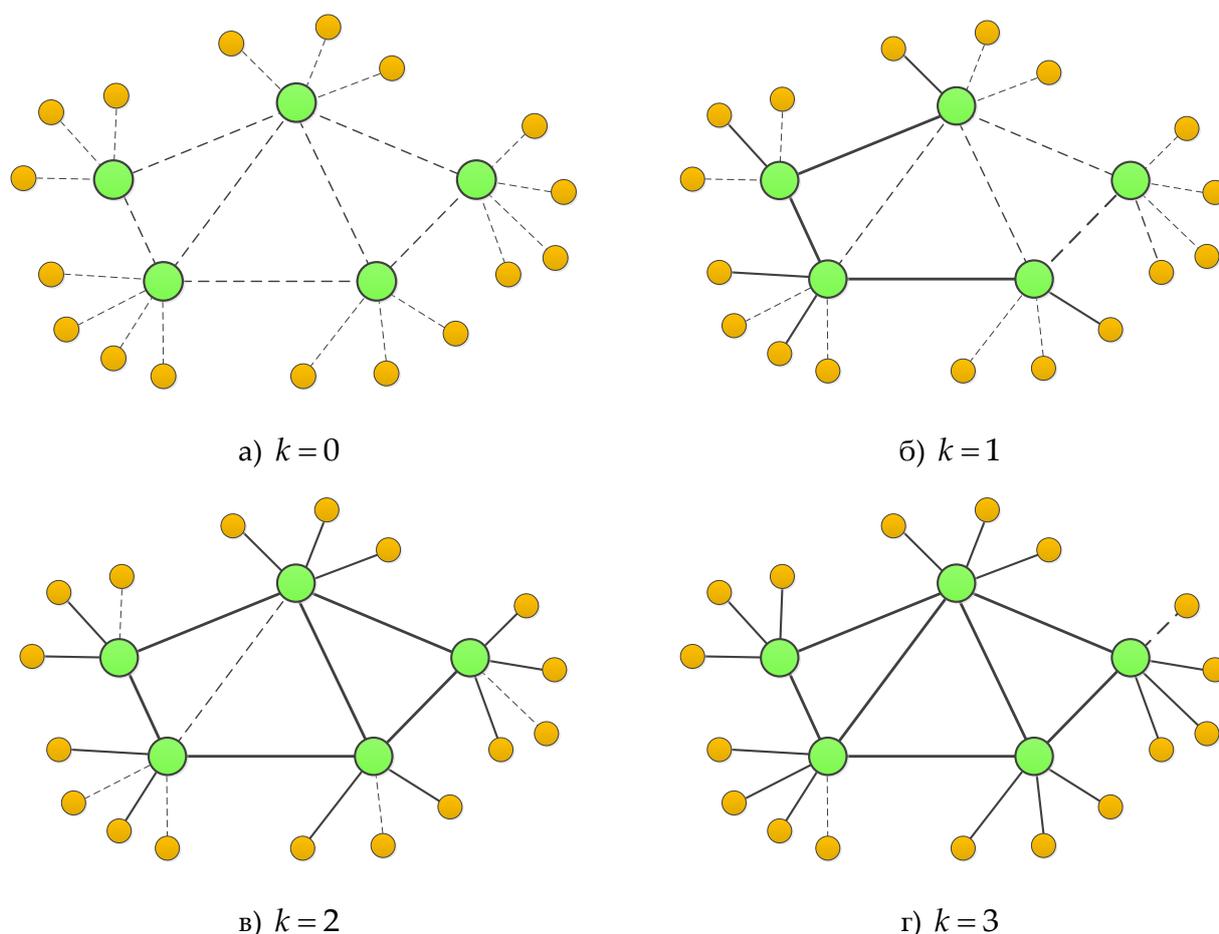


Рис. 2. Характер решений задач структурно-функционального синтеза ТТКС в рамках предложенной динамической модели

Из рис. 2 следует, что при многоэтапном проектировании ($K = 3$) наращивание структуры ТТКС и подключение абонентов (сетей доступа) происходит в соответствии со следующими закономерностями:

– в ходе первых этапов структура ТТКС стремится к остову, дабы обеспечить хотя бы один маршрут передачи пакетов трафика, поступающего от подключаемых к транспортной сети абонентов, минимизируя, тем самым, возможные отказы в обслуживании;

– с каждым новым этапом структура ТТКС наращивается, становясь более связной; осуществляется более интенсивное подключение абонентов (сетей доступа) к узлам транспортной сети;

– к окончанию процесса проектирования структура ТТКС насыщается в рамках доступных капиталовложений; происходит подключение тех абонентов (сетей доступа), которые за время прошедших этапов не подключились к сетям других операторов.

Выводы

В статье предложена динамическая модель структурно-функционального синтеза ТТКС (1)-(11), представленная как разностными уравнениями состояния (3), так и алгебраическими уравнениями. Новизной модели является то, что она ориентирует на многоэтапную оптимизацию процесса структурно-функционального синтеза ТТКС, обеспечивая согласованное решение следующих важных задач: выбор топологии транспортной сети, выбор пропускных способностей трактов передачи ТТКС, распределение потоков (маршрутизации), определение порядка подключения отдельных абонентов и сетей доступа к узлам транспортной сети.

В данной работе в качестве критерия оптимальности получаемых решений выбран максимум целевого функционала (11), определяющего размер получаемой прибыли от предоставляемых услуг связи на протяжении всех этапов проектирования. Разработка модели (1)-(10) и выбор на ее основе целевого функционала (11) позволила сформулировать задачу структурно-функционального синтеза ТТКС в виде математической задачи оптимального управления с обоснованием возможных методов ее решения – принципа максимума Понтрягина, метода динамического программирования Беллмана, метода Красовского и др.

Список литературы:

1. Закон України «Про телекомунікації» // Верховна Рада України; Закон від 18.11.2003 № 1280-IV. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=1280-15>.
2. Концепція конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні. – К.: Державний комітет зв'язку та інформатизації України, 2003. – 47 с.
3. Стеклов В.І., Беркман Л.Н. Проектування телекомунікаційних мереж. Підручник для студ. вищ. навч. закл. за напрямком "Телекомунікації". – К.: Техніка, 2002. – 792 с.
4. Семенов Ю.В. Проектирование сетей связи следующего поколения. – С.Пб.: Наука и техника, 2005. – 240 с.

5. Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П. Сети коммутации пакетов. – М.: Радио и связь. – 1986. – 408 с.
6. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
7. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За загал. ред. В.В. Поповського. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.
8. Зайченко Ю.П., Гонца Ю.В. Структурная оптимизация сетей ЭВМ. – К.: Техника, 1986. – 168 с.
9. Pióro M., Medhi D. Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks. – Morgan Kaufmann, 2004. – 765 p.
10. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ. Ч.1. – М.: Наука, 1992. – 336 с.
11. Minoux M. Networks synthesis and optimum network design problems: Models, solution methods and applications // Networks. – Vol. 19, Issue 3. – 1989. - P. 313–360.
12. Pedersen M.B. Optimization models and solution methods for intermodal transportation // PhD Thesis, REPORT 2005-3 / Centre for Traffic and Transport, Technical University of Denmark. – 171 p. – Режим доступа: http://www1.ctt.dtu.dk/personal/mbp/MBP_PhD_Thesis.pdf.
13. Лемешко А.В. Тензорная формализация задач структурного синтеза мультипротокольных телекоммуникационных сетей // Прикладная радиоэлектроника. – 2004. – Том.3. – Вып. № 2. – С. 36-46.
14. Лемешко А.В. Результаты исследования модели управления трафиком с учётом задаваемых приоритетов для многопродуктового и многополюсного случаев [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, Ю.Н. Добрышкин, О.А. Дробот // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 2 (2). – С. 33 – 41. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_lemeshko_rezults.pdf.
15. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.