

УДК 621.391

*В.Л. СТЕРИН, канд. техн. наук, А.С. ЕРЕМЕНКО, канд. техн. наук, Н. ТАРИКИ*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СИНТЕЗА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

### Введение

Процесс сетевого планирования и проектирования является итеративным и многоуровневым, охватывая при этом такие этапы, как топологическое проектирование, структурно-функциональный синтез, реализацию сети, и направлен на то, чтобы телекоммуникационная сеть или вновь вводимая услуга отвечали требованиям оператора связи и конечного пользователя. Оптимальное проектирование сетей, главным образом, сводится к минимизации общей стоимости сети при выборе оборудования, распределении пропускных способностей каналов связи для удовлетворения требований к производительности, сформулированных при проектировании сети [1, 2].

Для решения общей проблемы проектирования телекоммуникационных систем (ТКС) важно обладать адекватными математическими моделями и эффективными расчетными методами решения основных проектных задач: выбора топологии, выбора пропускной способности трактов передачи, распределения потоков (маршрутизации) [3]. При этом в рамках данных моделей должен обеспечиваться комплексный характер решений перечисленных задач, а также учитываться протяженность процесса проектирования во времени [4 – 7]. По этой причине заслуживает внимание подход, основанный на использовании динамических технико-экономических математических моделей структурно-функционального синтеза ТКС, в рамках которых обеспечивается решение дополнительно, наряду с перечисленными задачами, задачи по распределению капиталовложений между этапами проектирования [8 – 10]. Таким образом, представляется актуальным проведение исследований существующих решений и математических моделей [8 – 10] при проектировании телекоммуникационных сетей с целью обоснования их эффективного применения и практической значимости.

### 1. Динамическая модель синтеза топологии и выбора пропускных способностей трактов передачи ТКС

Рассмотрим математическую модель, предложенную в [8], в которой принято допущение о том, что месторасположение узлов-маршрутизаторов транспортной сети фиксировано, а также известен порядок возможного подключения абонентов или сетей доступа к этим узлам. Тогда структура ТКС характеризуется 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 транспортной сети,  $N$  – их общее число (мощность множества  $R^*$ ); а также множество абонентов (или сетей доступа)  $R^{**} = \{R_j^{**}, j = \overline{1, M}\}$ , где  $R_j^{**}$  –  $j$ -й абонент (сеть доступа) ТКС,  $M$  – их общее число (мощность множества  $R^{**}$ ). Множество дуг  $L = L^* \cup L^{**}$  описывает множество возможных трактов передачи между узлами транспортной телекоммуникационной сети (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 предусматривается 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.

С точки зрения технико-экономической задачи структурно-функционального синтеза ТКС, предполагается, что известны следующие исходные данные:  $Q$  – общий объем капиталовложений в создаваемую ТКС, измеряемый, например, в гривнах (*грн.*);  $K$  – число временных интервалов (этапов, стадий) в общем процессе структурно-функционального синтеза ТКС;  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  – средняя длительность одного этапа структурно-функционального синтеза ТКС;  $t_k$  и  $t_{k+1}$  – времена начала и окончания  $k$ -го временного интервала;  $b_{i,j}(k)$  – удельная стоимость ввода единицы пропускной способности ТП  $L_{i,j}^*$  сети на  $k$ -м временном интервале, измеряемая в *грн./*(*бит/с*);  $k = \overline{1, K}$ ;  $a_{i,j}(k)$  – коэффициент потерь пропускной способности ТП  $L_{i,j}^*$  за  $k$ -й временной интервал.

Кроме того, введены следующие обозначения:  $q(k)$  – объем капиталовложений в создаваемую ТКС на  $k$ -м временном интервале (*грн.*);  $c_{i,j}(k)$  – 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

$$q_{i,j}(k) = Qu_{i,j}(k); \quad (1)$$

$\Delta c_{i,j}(k) = Qu_{i,j}(k)g_{i,j}(k)$  – приращение ПС ТП  $L_{i,j}^*$  за  $k$ -й временной интервал, которое подчиняется условию

$$0 \leq \Delta c_{i,j}(k) \leq \Delta c_{i,j}^{\max}(k), \quad (2)$$

где параметр  $\Delta c_{i,j}^{\max}(k)$  численно характеризует максимально возможную величину приращения ПС тракта передачи  $L_{i,j}^*$  за  $k$ -й временной интервал. Величина порога  $\Delta c_{i,j}^{\max}(k)$  зависит от организационно-технических возможностей проектной организации, используемой телекоммуникационной технологии и доступного ресурса по времени ( $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ ).

Тогда динамика изменения пропускной способности трактов передачи ТТКС в ходе ее структурно-функционального синтеза описывается системой разностных уравнений [10]:

$$c_{i,j}(k+1) = a_{i,j}(k)c_{i,j}(k) + Qu_{i,j}(k)g_{i,j}(k), \quad (3)$$

число которых соответствует мощности множества  $L^*$ , при этом  $g_{i,j}(k) = 1/b_{i,j}(k)$ .

С точки зрения решения задачи выбора топологии (ВТ) и пропускных способностей (ВПС) трактов передачи в системе уравнений (3), пропускные способности  $c_{i,j}(k)$  трактов передачи трактуются как переменные состояния процесса структурно-функционального синтеза ТКС, а переменные  $u_{i,j}(k)$  выступают в качестве управляющих, регламентирующих процесс перераспределения капиталовложений на создание отдельных ТП и наращивание их пропускной способности.

При проектировании считается, что ПС всех вероятных ТП равны нулю. Наличие на произвольном этапе в структуре проектируемой ТТКС ТП основывается на том, что его ПС  $c_{i,j}(k)$  становится больше нуля. Согласно физическому смыслу переменных  $u_{i,j}(k)$  на них накладываются такие ограничения:

$$0 \leq u_{i,j}(k), \quad \sum_{k=1}^K \sum_{L_{i,j}^*} u_{i,j}(k) \leq 1. \quad (4)$$

выполнение которых, вместе с условием (1) гарантирует отсутствие перерасхода денежных средств при структурно-функциональном синтезе ТКС.

Объем капиталовложений на каждом этапе проектирования и при создании отдельных трактов передачи можно рассчитать как

$$q(k) = Q \sum_{L_{i,j}^*} u_{i,j}(k) \text{ и } q(k) = \sum_{L_{i,j}^*} q_{i,j}(k) \quad (5)$$

при  $q_{i,j}(k) = Qu_{i,j}(k)$ .

В ряде случаев может возникнуть необходимость во введении ограничения

$$0 \leq q(k) \leq q^{\max}(k), \quad (6)$$

когда максимальный объем финансирования  $k$ -го временного этапа проектирования ( $q^{\max}(k)$ ) жестко лимитирован.

Выражения (1) – (6) в динамике описывают согласованное решение задач выбора топологии и пропускных способностей трактов передачи проектируемой ТКС с учетом многоэтапности процесса структурно-функционального синтеза. При этом закладывается фундамент для решения других задач по проектированию ТКС – задач управления трафиком.

## 2. Потокосая модель маршрутизации (распределения потоков) в ТТКС

Для математической формализации задач управления трафиком (распределения потоков – маршрутизации, ограничения трафика и т.д.), которые решаются при функциональной оптимизации ТКС, введен ряд обозначений:  $Z = \{Z_{h,m}; h = \overline{1, H}; m = \overline{1, M}\}$  – множество потоков, поступающих в ТТКС от абонентов и сетей доступа, причем  $Z_{h,m}$  –  $h$ -й поток пакетов, поступающих от  $m$ -го абонента (сети доступа) на узел транспортной сети;  $r_{h,m}(k)$  – средняя интенсивность потока  $Z_{h,m}$  на  $k$ -м временном интервале (бум/с);  $s_{h,m}$  и  $d_{h,m}$  – узел-источник и узел-получатель потока пакетов  $Z_{h,m} \in Z$  соответственно.

В случае, когда в проектируемой ТКС решение задач маршрутизации предполагается осуществлять без предвычисления путей, в качестве маршрутной переменной может выступать величина  $x_{i,j}^{h,m}(k)$ , которая характеризует долю интенсивности потока  $Z_{h,m} \in Z$ , протекающего в тракте  $L_{i,j}^*$  ТТКС на  $k$ -м временном интервале. В рамках модели в качестве дополнительной управляющей переменной вводится величина  $\alpha_{h,m}$ , которая моделирует долю интенсивности потока  $Z_{h,m} \in Z$ , получившего отказ в обслуживании ТТКС на  $k$ -м временном интервале. Отказы в обслуживании в данном случае могут быть вызваны тем, что на  $k$ -м этапе проектирования сетевых ресурсов недостаточно для обслуживания потока заданной интенсивности ( $r_{h,m}(k)$ ). С целью недопущения потерь пакетов на сетевых узлах и в ТТКС в целом в ходе расчета маршрутных переменных  $x_{i,j}^{h,m}(k)$  и переменных отказов  $\alpha_{h,m}$  необходимо обеспечить выполнение условия сохранения потока [9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:L_{i,j}^* \in L} x_{i,j}^{h,m}(k) - \sum_{j:L_{j,i}^* \in L} x_{j,i}^{h,m}(k) = 0 \text{ при } Z_{h,m} \in Z, i \neq s_{h,m}, d_{h,m}; \\ \sum_{j:L_{i,j}^* \in L} x_{i,j}^{h,m}(k) - \sum_{j:L_{j,i}^* \in L} x_{j,i}^{h,m}(k) = 1 - \alpha_{h,m}(k) \text{ при } Z_{h,m} \in Z, i = s_{h,m}; \\ \sum_{j:L_{i,j}^* \in L} x_{i,j}^{h,m}(k) - \sum_{j:L_{j,i}^* \in L} x_{j,i}^{h,m}(k) = \alpha_{h,m}(k) - 1 \text{ при } Z_{h,m} \in Z, i = d_{h,m}, \end{array} \right. \quad (7)$$

а также условий предотвращения перегрузки трактов передачи ТТКС:

$$\sum_{Z_{h,m} \in Z} r_{h,m}(k) x_{i,j}^{h,m}(k) \leq c_{i,j}(k); L_{i,j}^* \in L. \quad (8)$$

В соответствии с физикой решаемой задачи (7) на маршрутные переменные  $x_{i,j}^{h,m}(k)$  также могут накладываться ограничения:

$$x_{i,j}^{h,m}(k) \in \{0,1\} \quad (9)$$

или

$$0 \leq x_{i,j}^{h,m}(k) \leq 1, \quad (10)$$

которые вводятся при моделировании процессов одно- (9) или многопутевой (10) маршрутизации в ходе решения задачи распределения потоков.

На переменные отказов в обслуживании  $\alpha_{h,m}(k)$  в соответствии с их физическим смыслом накладываются следующие ограничения:

$$0 \leq \alpha_{h,m}(k) \leq 1 \quad (11)$$

или

$$\alpha_{h,m}(k) \in \{0,1\}, \quad (12)$$

если на основе договора об уровне сервиса (SLA) допускается (11) или не допускается (12) частичное ограничение скорости доступа в транспортную сеть.

Таким образом, выражения (1) – (12) в целом описывают в динамике процесс структурно-функционального синтеза ТКС на уровне согласованного решения задач выбора топологии и пропускных способностей трактов передачи сети, распределения потоков (маршрутизации) и ограничения интенсивности трафика, поступающего в транспортную сеть от сетей доступа.

### 3. Критерий оптимальности решений по структурно-функциональному синтезу ТКС

Согласно выбранной стратегии проектирования ТТКС, в качестве критерия оптимальности решений при структурно-функциональном синтезе транспортной сети может выступать минимум или максимум свертки различных (технических, экономических или технико-экономических) показателей. Использование технических критериев, как правило, сводится к минимизации объемов используемого сетевого оборудования в ходе проектирования ТКС при выполнении комплекса ограничений, например, по обеспечению заданного уровня производительности сети. В случае использования технологических критериев допускается обратная постановка задачи: обеспечить максимум производительности проектируемой ТКС при заданных объемах сетевых ресурсов, доступных для ввода в строй. Введение экономических критериев связано или с минимизацией расходов на проектирование ТКС, или с максимизацией прибыли, ожидаемой от эксплуатации созданной телекоммуникационной системы. Техничко-экономические критерии ориентированы на комбинированный учет как технологических, так и экономических факторов.

Если приоритетной является только прибыль от обслуженного проектируемой ТКС трафика, то целесообразно использовать в качестве критерия максимум функционала:

$$J = \sum_{k=1}^K \sum_{Z_{h,m} \in Z} w_{h,m}(k) r_{h,m}(k) [1 - \alpha_{h,m}(k)], \quad (13)$$

в котором  $w_{h,m}(k)$  – удельная прибыль от обслуживания потока  $Z_{h,m}$ , измеряемая в  $\frac{\text{грн.}}{\text{бит/с}}$ , а выражение  $r_{h,m}(k) [1 - \alpha_{h,m}(k)]$  в функционале (13) фактически характеризует интенсивность потока  $Z_{h,m}$ , принятую к обслуживанию транспортной сетью. Тогда максими-

зация функционала (13) приведет к максимизации прибыли от предоставляемых услуг связи, начиная с первого этапа структурно-функционального синтеза.

Интегральный вид критерия (13) и наличие рекурсивного ограничения (3) позволяет отнести сформулированную задачу к задачам оптимального управления, что подразумевает необходимость использования соответствующих методов ее решения [11].

#### 4. Оценка эффективности предложенной модели структурно-функционального синтеза ТКС

##### 4.1. Выбор показателей эффективности процесса структурно-функционального синтеза ТКС

В рамках исследуемой модели структурного и функционального синтеза ТКС общие показатели эффективности формализуются и рассчитываются следующим образом:

- суммарная стоимость синтеза ТКС:

$$Q_{син} = Q \sum_{k=1}^K \sum_{L_{i,j}^*} u_{i,j}(k); \quad (14)$$

- результирующая пропускная способность (максимальная производительность) проектируемой ТКС:

$$P_{ТКС} = \sum_{k=1}^K \sum_{Z_{h,m} \in Z} r_{h,m}(k) [1 - \alpha_{h,m}(k)]. \quad (15)$$

Кроме того, введем параметр  $\Delta r$ , характеризующий точность прогнозирования параметров трафика, поступающего в сеть, а именно интенсивности  $r$ , который должен быть не ниже определенного предела, т.е.

$$\Delta r(k+s) \geq \Delta r^{don}, \quad (16)$$

при

$$\Delta r(k+s) = \left[ 1 - \frac{|r^{ucm}(k+s) - r^{np}(k+s)|}{r^{ucm}(k+s)} \right] 100\%, \quad s = \overline{1, K-1}, \quad (17)$$

где  $r^{ucm}(k+s)$  – истинное значение интенсивности потока на интервале времени  $k+s$ , которое определяется непосредственным измерением на этом же интервале при его наступлении во времени;  $r^{np}(k+s)$  – прогнозируемое значение интенсивности потока, которое будет на интервале времени  $k+s$ , при этом прогноз осуществляется в момент времени  $t_k$ .

Выражение (16) справедливо, если прогноз отличается от истинного значения не более чем в два раза, что отвечает возможностям существующих систем прогнозирования параметров трафика. В дальнейшем исследовалось влияние на численные значения общих показателей эффективности (14) и (15) изменения ключевых сетевых параметров.

##### 4.2. Исследование модели структурно-функционального синтеза ТКС

В работе проводился анализ влияния размерности проектируемой ТКС, числа этапов проектирования и точности прогнозирования состояния сети на суммарную стоимость созданной ТКС. В ходе исследования предполагалось, что

- число этапов проектирования ( $K$ ) изменялось от 3 до 5;

- максимальное количество создаваемых трактов передачи ( $n$ ) находилось в пределах от 50 до 900;

- связность ( $S$ ) узлов транспортной сети изменялась от 3 до 5, где под связностью понимался ранг этого узла в структуре сети, т.е. число инцидентных ему трактов передачи.

Сравнению подлежала суммарная стоимость созданной ТКС, полученная при одношаговой ( $K=1$ ) и многошаговой ( $K=3 \div 5$ ) стратегиях проектирования, по показателю

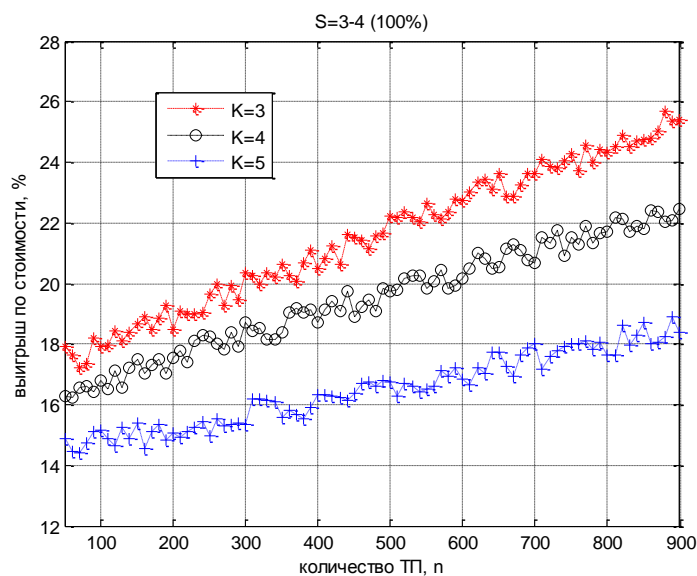
$$Q_6 = \frac{Q_{\text{син}}(1) - Q_{\text{син}}(K)}{Q_{\text{син}}(1)} 100\%, \quad (18)$$

который основан на использовании выражения (14).

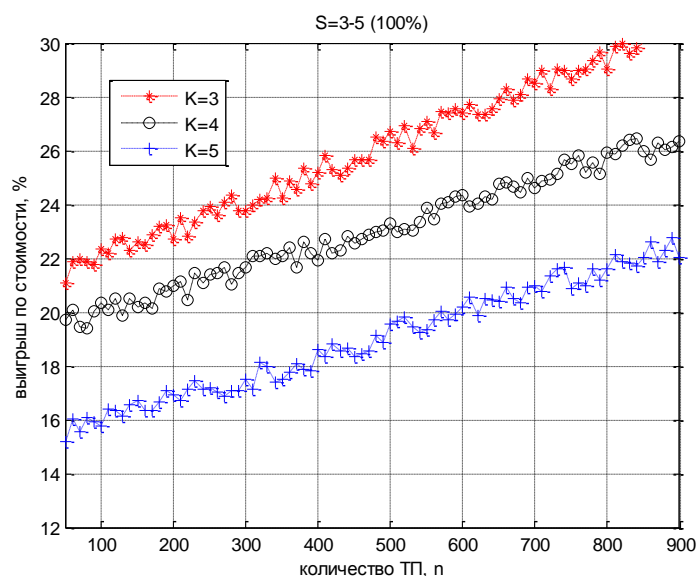
Результаты сравнительного анализа по показателю  $Q_6$  (18) свидетельствуют о том, что реализация многошаговой стратегии синтеза ТКС позволяет улучшить суммарную стоимость созданной ТКС при обеспечении той же величины производительности (15). Количественно результаты сравнения представлены в табл. 1, наполнение которой основано на графиках, приведенных на рис. 1 и 2.

Таблица 1

Точность $\Delta r$	Связность S	K=3	K=4	K=5
100 %	3÷4	14 – 18 %	16 – 22 %	17 – 25 %
	3÷5	15 – 22 %	19 – 26 %	21 – 30 %
75%	3÷4	12 – 16 %	14 – 19 %	15 – 23 %
	3÷5	14 – 19 %	17 – 23 %	19 – 27 %
50 %	3÷4	9 – 12 %	10 – 13 %	11 – 14 %
	3÷5	10 – 14 %	12 – 17 %	14 – 19 %

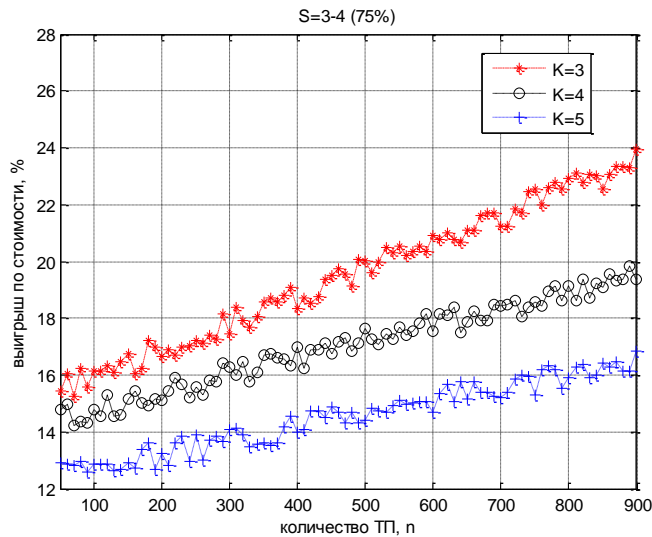


а) для связности  $S=3\div 4$

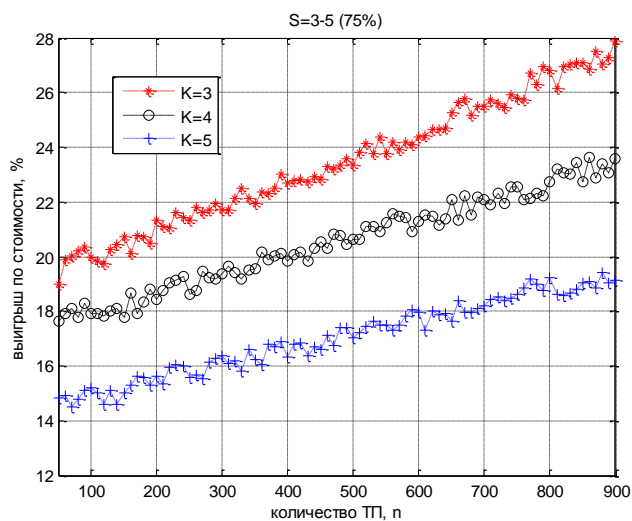


б) для связности  $S=3\div 5$

Рис. 1. Результаты сравнительного анализа для точности  $\Delta r=100\%$



а) для связности  $S=3-4$



б) для связности  $S=3-5$

Рис. 2. Результаты сравнительного анализа для точности  $\Delta r=75\%$

По результатам анализа можно сделать выводы, что при высокой точности прогнозирования состояния ТКС (интенсивности абонентских потоков) – 75 – 100 % выигрыш по суммарной стоимости ТКС при реализации многошаговой стратегии синтеза составляет в среднем от 12 – 15 % до 20 – 26 % при обеспечении той же величины производительности (15). В случаях, когда предполагаемая структура ТКС представлялась полностью связным графом, выигрыш для сетей высокой размерности ( $n > 1000$ ) достигал 40 – 55 %.

Снижение суммарной стоимости структурного и функционального синтеза ТКС напрямую влияло на улучшение и других экономических показателей. Таким образом, предлагаемый метод показал наибольшую эффективность с точки зрения экономических критериев при росте размерности проектируемой ТКС, связности ее узлов и приемлемой точности прогнозирования параметров сетевого трафика.

Кроме того, в работе проведен анализ влияния на показатели производительности (пропускной способности) числа этапов проектирования ( $K=3-5$ ); количества создаваемых трактов передачи ( $n=50-900$ ); связности узлов транспортной сети ( $S=3-5$ ) и точности прогнозирования характеристик потоков ( $\Delta r=50-100\%$ ) при условии, что на синтез ТКС выделялась одна и та же сумма средств. Выигрыш по пропускной способности синтезируемой ТКС, полученной при одношаговой ( $K=1$ ) и многошаговой ( $K=3-5$ ) стратегиях проектирования, оценивался по следующему показателю (аналог (18)):

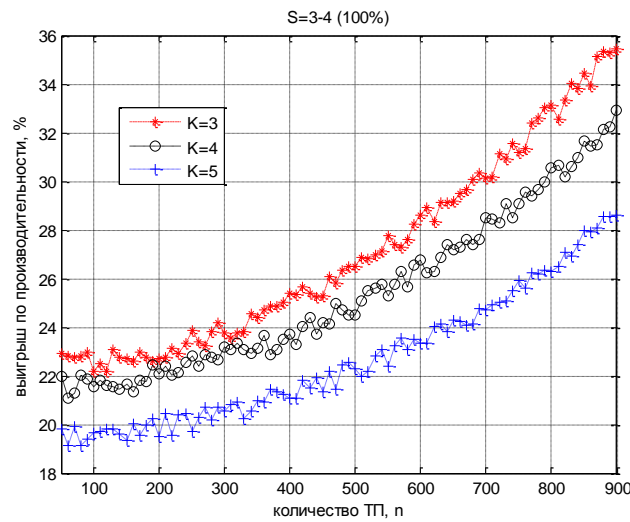
$$P_{\theta} = \frac{P_{TKC}(K) - P_{TKC}(1)}{P_{TKC}(1)} 100\%, \quad (19)$$

который, в свою очередь, основан на использовании выражения (17).

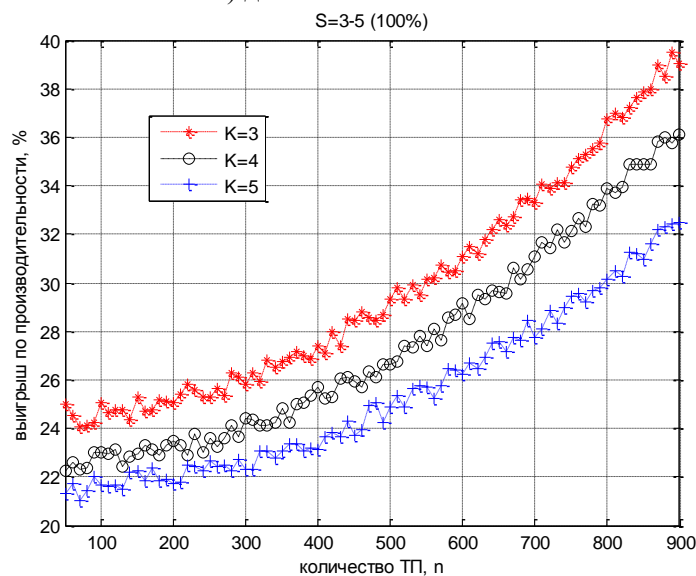
Результаты сравнительного анализа, основанного на расчете показателя  $P_{\theta}$  (22), подтвердили эффективность использования многошаговой стратегии синтеза ТКС. Как показано в табл. 2, это отразилось на росте производительности синтезируемой ТКС при том же объеме затрат на ее создание  $Q$ . Содержание табл. 2 основано на зависимостях, представленных на рис. 3 и 4.

Таблица 2

Точность $\Delta r$	Связность S	K=3	K=4	K=5
100%	3÷4	19 – 28 %	21 – 32 %	22 – 35 %
	3÷5	21 – 32 %	22 – 36 %	24 – 39 %
75%	3÷4	14 – 22 %	15 – 26 %	17 – 29 %
	3÷5	15 – 25 %	17 – 28 %	19 – 32 %
50%	3÷4	7 – 11 %	9 – 14 %	13 – 18 %
	3÷5	8 – 13 %	10 – 17%	15 – 21%



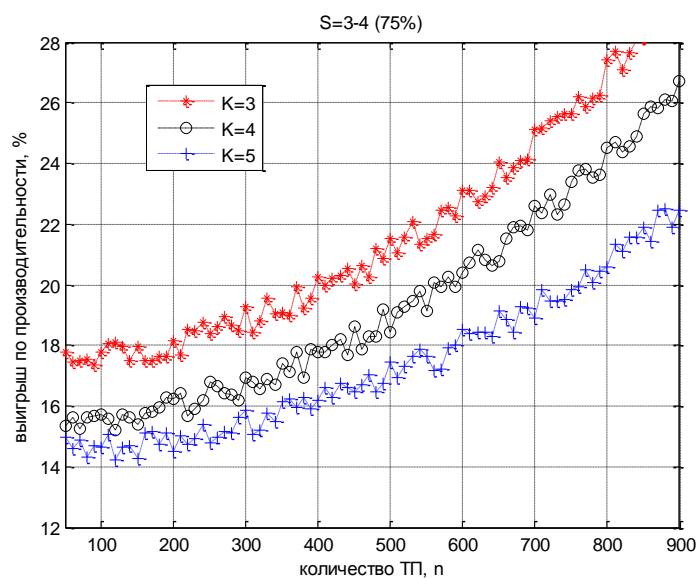
а) для связности S=3÷4



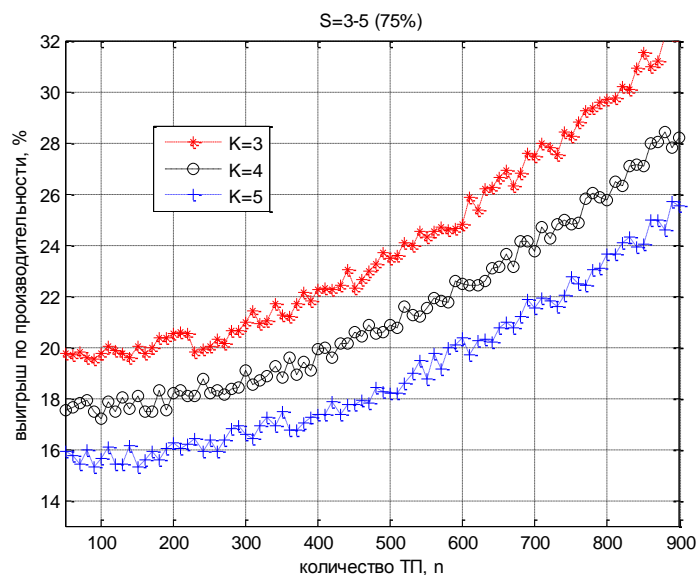
б) для связности S=3÷5

Рис. 3. Результаты сравнительного анализа для точности  $\Delta r = 100\%$





а) для связности  $S=3\div 4$



б) для связности  $S=3\div 5$

Рис. 4. Результаты сравнительного анализа для точности  $\Delta r = 75\%$

Анализ зависимостей (рис. 3 и 4) позволил сделать вывод о том, что как и экономические показатели, так и показатели сетевой производительности во многом чувствительны к точности прогнозирования характеристик абонентской нагрузки. Если обеспечить точность прогнозирования (17) на уровне 75 – 100 %, то выигрыш по производительности ТКС составит в среднем от 14 – 18 % до 28 – 37 % в зависимости от размерности синтезируемой сети и числа этапов проектирования.

Отдельно стоит отметить следующее: при получении результатов, представленных на рис. 1 – 4, предполагалось, что характеристики (интенсивности) абонентских потоков от одного этапа к другому изменялись в среднем на 25 – 30 %. Если этапные изменения интенсивности потоков не задавались, то выигрыша от реализации многошаговой стратегии проектирования практически не наблюдалось. И наоборот, при росте изменений до 45 – 50 % выигрыш по производительности дополнительно составил 12 – 17 %.

## Заклучение

Представлено исследование динамической технико-экономической модели структурного и функционального синтеза телекоммуникационных систем. Модель (1) – (13) состоит в том, что для описания процессов перераспределения капиталовложений на различных этапах проектирования ТКС и наращивания пропускных способностей трактов передачи использована система линейных разностных уравнений состояний телекоммуникационной системы, где в качестве переменных состояния выступали величины пропускных способностей трактов передачи создаваемой транспортной сети.

Проведено исследование предложенной модели с оценкой численных значений ключевых показателей эффективности процесса синтеза ТКС (18) – (19), в качестве которых в зависимости от особенностей постановки задачи выступали относительные суммарные затраты на синтез; прибыль от функционирования проектируемой системы; результирующая пропускная способность созданной ТКС; суммарная интенсивность трафика, получившего отказ в обслуживании и др.

По результатам расчетов показано, что использование предложенной модели позволяет обеспечить более эффективное использование имеющегося технико-экономического ресурса при проектировании ТКС: повысить пропускную способность проектируемой сети (уменьшить суммарную интенсивность трафика, получившего отказ в обслуживании) в среднем от 14 – 18 % до 28 – 37 % по сравнению с одношаговыми методами при одинаковых объемах доступного при проектировании технико-экономического ресурса, или уменьшить в среднем от 12 – 15 % до 20 – 26 % , а в отдельных случаях до 40 – 55 %, объем средств, выделяемых на синтез ТКС, по сравнению с одношаговыми методами при обеспечении той же пропускной способности телекоммуникационной системы.

**Список литературы:** 1. Михайлов Н.К. Концепции системного анализа и проектирования базовых телекоммуникационных средств единого информационного пространства Украины // Праці УНДІРТ. – 2004. – №2 (38). – С. 3 – 10. 2. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Проектування телекомунікаційних мереж : підруч. для студ. вищ. навч. закл. за напрямком «Телекомунікації» ; за ред. В. К. Стеклова. – К. : Техніка, 2002. – 792 с. 3. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями / Л. Клейнрок. – М. : Мир, 1979. – 600 с. 4. Evans S. Telecommunications Network Modeling, Planning and Design. – Institution of Electrical Engineers, 2003. – 226 p. 5. McCabe J.D. Network Analysis, Architecture, and Design / The Morgan Kaufmann Series in Networking. – Elsevier Inc., 2007. – 473 p. 6. Iversen V.B. Teletraffic engineering and network planning. – DTU Course 34340, 2010. – 623 p. 7. Oppenheimer P. Top-Down Network Design. Third Edition. – Cisco Systems, Inc., 2011. – 447 p. 8. Лемешко А.В. Динамическая модель структурно-функционального синтеза транспортной ТКС [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, В.Л. Стерин // Проблеми телекомунікацій. – 2011. – № 3 (5). – С. 8–17. – Режим доступа до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113\\_lemeshko\\_synthesis.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_lemeshko_synthesis.pdf). 9. Лемешко А.В., Стерин В.Л. Оптимизация структурного и функционального синтеза транспортной телекоммуникационной сети // Системи обробки інформації. – 2012. – Вип. 9 (107). – С. 186–190. 10. Стерин В.Л. Технико-экономическая модель многоэтапного структурного и функционального синтеза телекоммуникационной сети [Электронный ресурс] // Проблеми телекомунікацій. – 2013. – № 1 (10). – С. 3 – 12. – Режим доступа до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2013/1/1/131\\_sterin\\_design.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2013/1/1/131_sterin_design.pdf). 11. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления ; под ред. А.А. Красовского. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 712 с.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 26.02.2015