

УДК 654.026

М.И. Столярова

РЕКОНСТРУКЦИЯ СТРУКТУРЫ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Столярова Мария Ивановна, окончила факультет многоканальных телекоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, ведущий инженер ОАО «НИИ «Рубин». Имеет статьи в области построения, анализа и управления телекоммуникационными сетями специального назначения. [e-mail: inforubin@rubin-spb.ru].

Аннотация

Статья посвящена вопросам математического моделирования и разработки методики формирования рациональной структуры транспортной сети (ТС) с учетом ее реконструкции для использования в интересах должностных лиц по связи в телекоммуникационной системе специального назначения. Задача формирования структуры ТС возникает на этапах проектирования (планирования) и оперативного управления связью в телекоммуникационной системе специального назначения и характеризуется большой размерностью, наличием в ней логически самостоятельных составных частей. В статье предложено ее декомпозировать на ряд взаимосвязанных подзадач: синтеза структуры (топологической и потоковой) ТС; реконструкции структуры ТС; оценки воздействия внешних дестабилизирующих факторов на структуру ТС; распределения узлового и линейного ресурсов в ТС; оценки временных и материальных ресурсов, потребных для реализации сформированной структуры ТС. Приведены формализованное описание каждой из них и методические средства, целесообразные для решения указанных задач. Показано, что реализация предложенных модели и методики в специальном программном обеспечении комплексов средств автоматизированного управления связью систем связи специального назначения обеспечивает формирование структуры ТС с заданными характеристиками и позволяет оперативно вырабатывать варианты ее реконструкции при управлении восстановлением функционирования ТС.

Ключевые слова: транспортная сеть, синтез, реконструкция, топологическая структура, потоковая структура.

TRANSPORT NETWORK STRUCTURE RECONSTRUCTION OF A SPECIAL PURPOSE TELECOMMUNICATION SYSTEM

Maria Ivanovna Stoliarova, graduated from the Faculty of Multi-Channel Telecommunications at the Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications; a leading engineer at 'NII 'Rubin', JSC; an author of articles in the field of building, analysis, and control of special-purpose telecommunication networks. e-mail: inforubin@rubin-spb.ru.

Abstract

The article is devoted to mathematical modeling and methodology of the transport network rational structure formation given its reconstruction for use in the interests of the officials of a special purpose telecommunication system. The task of forming the transport network structure (TNS) occurs at the stage of design (planning) and operational-technical management of communication in a special purpose telecommunication system and is characterized by high dimension, by a presence in it logically independent component parts. In the article it is presented as interrelated sub-problems: TNS synthesis (topological and streaming); TNS reconstruction; estimations of external destabilizing factors (EDF) influence on a TNS; allocations of core and line resources in TNS; estimations of time and material resources, required for the formed TNS realization. It is offered the formal description of each sub-problems and methodical facilities for their decision. It is shown that realization of the offered model and methodology in the special software of automated communication control systems complexes of facilities of special purpose communications provides TNS forming with the specified characteristics and allows quickly generate variants of its reconstruction in managing the restoration of the transport network functioning.

Key words: transport network, synthesis, reconstruction, topological structure, streaming structure.

ВВЕДЕНИЕ

Характер и особенности эксплуатации телекоммуникационной системы связи специального назначения (ТКС СН) во многом определяются рациональностью построения их топологической, потоковой и физической структур. Особо актуален данный вопрос для современных мультисервисных сетей, в которых совокупный сетевой ресурс формируется в интересах выполнения требований потребителей по предоставлению различных услуг, качество которых зависит от характеристик транспортной сети (ТС) и, в первую очередь, от ее структуры.

Для решения задачи формирования рациональной структуры ТС, возникающей на этапах проектирования (планирования) и оперативного управления связью в ТКС СН, предлагается использовать подход, базирующийся на ее декомпозиции на ряд последовательных подзадач с объединением их едиными исходными данными, критерием в соответствующей математической модели.

1 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ ТС

Математическую модель структуры ТС [1] предлагается декомпозировать на следующий ряд последовательных взаимосвязанных модулей: синтеза, реконструкции структуры, оценки воздействия внешних дестабилизирующих факторов (ВДФ), распределения узлового и линейного ресурсов, оценки временных и материальных ресурсов.

В основе математической модели структуры ТС лежит описание с применением теории графов ее структурно-функционального построения $G(A, B)$, отображающего элементы узловой (A) и линейной (B) основы ТС, а именно: магистральные (A_1), региональные (A_2), узлы доступа (A_3), узлы операторов сети связи общего пользования (A_4), узлы связи пользователей (A_5) и линии передачи между ними.

Модуль синтеза структуры ТС (1)–(20) описывает состав и местоположение узлов и линий передачи (вершины и ребра графа сети) (2)–(3), пропускных способностей систем передачи ребер графа (4), реализуемых узловым и линейным ресурсами (5) и (6), а также ограничения и допущения по их реализации (10)–(18).

$$G(A, B) \Rightarrow G(A, B, U, Y); \tag{1}$$

$$A = A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5; \tag{2}$$

$$B = \{b_{ij}\}, i, j = \overline{1, N}, i \neq j; \tag{3}$$

$$U = \{u_{ij}\}, i, j = \overline{1, N}, i \neq j; \tag{4}$$

$$R_y(A) = \{r^v, v = \overline{1, Q_y}\}; \tag{5}$$

$$R_n(B) = \{r^\mu, \mu = \overline{1, Q_n}\}; \tag{6}$$

$$W = W(r^v) + W(r^\mu) \Rightarrow \min; \tag{7}$$

$$W(r^v) = \sum_i \sum_v \gamma_i^v u_i^v, i = \overline{1, N}, v = \overline{1, Q_y}; \tag{8}$$

$$W(r^\mu) = \sum_{(ij)} \sum_\mu \gamma_{ij}^\mu l_{ij}^\mu, \tag{9}$$

$$i, j = \overline{1, N}, i \neq j, \mu = \overline{1, Q_n};$$

$$\overline{Y}^{TP} \Rightarrow \max; \tag{10}$$

$$k_{cbz_k} \geq k_{cbz_k}^{TP}; \tag{11}$$

$$K_{cb_{opt}} = \max_S \min_F K_{cb}(S_j, f_c); \tag{12}$$

$$Y(R_n) = \{y_{ij}(r_\mu), i, j = \overline{1, N}; \mu = \overline{1, Q_n}\}; \tag{13}$$

$$\rho(a_i) < \rho^{доп}(a_i), i = \overline{1, N}, \tag{14}$$

$$u_{ij} \geq \{v_{z_k}^{треб}\}, i, j = \overline{1, N}, i \neq j; \tag{15}$$

$$E = \{\varepsilon_\tau, \tau = \overline{1, H}\}; \tag{16}$$

$$v_{z_k} = \max \{v_{z_k}(\varepsilon_\tau), \tau = \overline{1, H}\}; k = \overline{1, m}; \tag{17}$$

$$k_{cbz_k}^{TP} = \max \{k_{cbz_k}^{TP}(\varepsilon_\tau), \tau = \overline{1, H}\}; k = \overline{1, K}; \tag{18}$$

$$\sum_{b_{ij} \in B} \alpha_k l_{ij} \Rightarrow \min; \tag{19}$$

$$\sum_{b_{ij} \in B} \alpha_k u_{ij} l_{ij} + \sum_{b_{ij} \in B} \alpha_k u_{ij}^p l_{ij}^p \Rightarrow \min, \tag{20}$$

где U – пропускная способность множества систем передачи на всех линиях передачи (ребрах) сети;

Y – структурная устойчивость ТС;

i и j – номера вершин графа $G(A, B)$, отображающего структуру ТС;

N – количество вершин в графе;

b_{ij} – ребра графа;

u_{ij} – пропускная способность линий (систем) передачи;

r^v – ресурс (средство) v -го типа на узле связи;

Q_y – количество типов узловых ресурсов (средств) на узлах в ТС;

r^μ – ресурс μ -го типа линий передачи;

Q_n – количество типов линейных ресурсов (средств) в ТС;

γ_i^v – стоимость порта коммутатора;

u_i^v – производительность коммутатора;

γ_{ij}^μ – отношение стоимости пропускной способности к единице длины линии передачи;

l_{ij} – длина линий передачи;

u_{ij}^μ – пропускная способность r^μ средства;

$S = \{S_j\}$ – множество стратегий построения ТС ТКС СН;

$F = \{f_c\}$ – множество стратегий по построению систем, обеспечивающих воздействия ВДФ;

$y_{ij}(r^u) = 1$ – если между узлами a_i и a_j возможно использование r^u средства, в противном случае – $y_{ij}(r^u) = 0$;

ξ_τ – τ -я степень боевой готовности из множества H ;

α_k – коэффициенты приведенной стоимости единицы линии передачи при ее строительстве или аренде;

u_{ij}^p – пропускная способность резервных линий передачи;

l_{ij}^p – длина резервных линий передачи.

В качестве критерия эффективности решения задачи принимается минимизация затрат на реализацию структуры ТС, при безусловном выполнении сетью задач по образованию необходимого транспортного ресурса (7)–(9), т. е.:

- при синтезе топологической структуры путем минимизации общей длины линейной основы (19);

- при синтезе потоковой структуры путем минимизации расхода средств на обеспечение требуемой пропускной способности рациональной топологической структуры (20).

Модуль реконструкции структуры ТС (21)–(25) описывает с применением положений теории графов анализируемый вариант реконструкции структуры транспортной сети (21), требования, предъявляемые к ней по пропускной способности (22), стоимости реализации (23) и ограничения на пропускную способность систем передачи (24) и (25).

$$\sum_{l_{ij} \in D_1(i)} h_{ij} f_{ij} + \sum_{l_{ij} \in D_2(i)} f_{ij} - \sum_{l_{ji} \in R_1(i)} h_{ji} f_{ji} - \sum_{l_{ji} \in R_2(i)} f_{ji} = \begin{cases} v, & i = 1; \\ 0, & i = 2, n-1; \\ -v, & i = n \end{cases} \quad (21)$$

$$v \geq v_3; \quad (22)$$

$$\sum_{l_{ij} \in I(\psi)} h_{ij} \alpha_k l_{ij} \leq c_3; \quad (23)$$

$$0 \leq f_{ij} \leq u_{ij}, l_{ij} \in V; \quad (24)$$

$$h_{ji} = \{0, 1\}, l_{ij} \in E, \quad (25)$$

где $R_1(i)$ и $D_1(i)$ – множество дуг графа G , входящих и выходящих из вершины a_i соответственно;

$R_2(i)$, $D_2(i)$ – множество входящих и выходящих из вершины a_i дуг графа, отображающего существующую структуру ТС;

$v = \max\{f_{ij}\}$ – максимальный поток из $\{f_{ij}\}$;

v_3 – требуемое значение величины потока;

c_3 – заданная стоимость реконструкции сети;

V – множество ветвей графа, отображающего существующую структуру и структуру вариантов реконструкции ТС;

E – множество ветвей графа, отображающего структуру вариантов реконструкции ТС.

Модуль оценки ВДФ на структуру ТС в процессном представлении описывает способ определения и критерий выбора рационального варианта структуры ТС, функционирующей в условиях воздействий (26).

$$P(I_p(\psi)) = \max_{\psi} \left\{ \min_{\xi} P_{\psi\xi}(t_{\psi\xi} \leq t_d) \right\}, \quad \psi = \overline{1, V}, \xi = \overline{1, M}, \quad (26)$$

где ψ – очередной оцениваемый вариант структуры ТС;

V – количество оцениваемых вариантов;

ξ – очередное оцениваемое направление связи в варианте структуры ТС;

M – общее количество направлений связи в варианте;

$P_{\psi\xi}(t_{\psi\xi} \leq t_d)$ – требуемая вероятность своевременной доставки пакетов в ТС.

Модуль распределения узлового и линейного ресурсов в ТС в процессном представлении описывает рациональное решение задачи их распределения при реализации принятого варианта структуры в соответствии с критерием «золотой» пропорции (27).

$$x_k^t = \overline{\Phi}^{-i-1} \cdot 100\% / \sum_{j=1}^{k_j} \overline{\Phi}^{-i-1}, \quad i = \overline{1, \dots, k_j}, j = \overline{1, \dots, k_j}, i \leq j, \quad (27)$$

где $\overline{\Phi}$ – процентное соотношение распределяемого ресурса относительно 100% (при $k_j = 1$), для i -х независимых путей в порядке их возрастания.

Модуль оценки временных и материальных ресурсов, потребных для реализации сформированной структуры ТС, описывает критериальную часть решения задачи распределения ресурсов (людских, материальных, временных) (28) для реализации принятого варианта структуры ТС.

$$\Phi_{кач} = \min_i \left(\frac{R_i}{\alpha_r} + \frac{s(R_i)}{\alpha_s} + \frac{T(R_i)}{\alpha_t} \right), i = \overline{1, n}, \quad (28)$$

где R_i – необходимые ресурсы;

$s(R_i)$ – стоимость;

$T(R_i)$ – время выполнения этих работ с привлечением оптимального количества ресурсов;

$\alpha_r, \alpha_s, \alpha_t$ – нормирующие коэффициенты, определяемые с применением способа Фишборна;

n – количество работ.

Предложенная математическая модель отличается наличием в ней элементов, описывающих не только синтез, но и реконструкцию ТС, в том числе для случаев воздействия на нее ВДФ, а также рациональное распределение временных и материальных ресурсов. Это позволяет использовать модель как на этапах планирования сети, так и оперативного управления сетью.

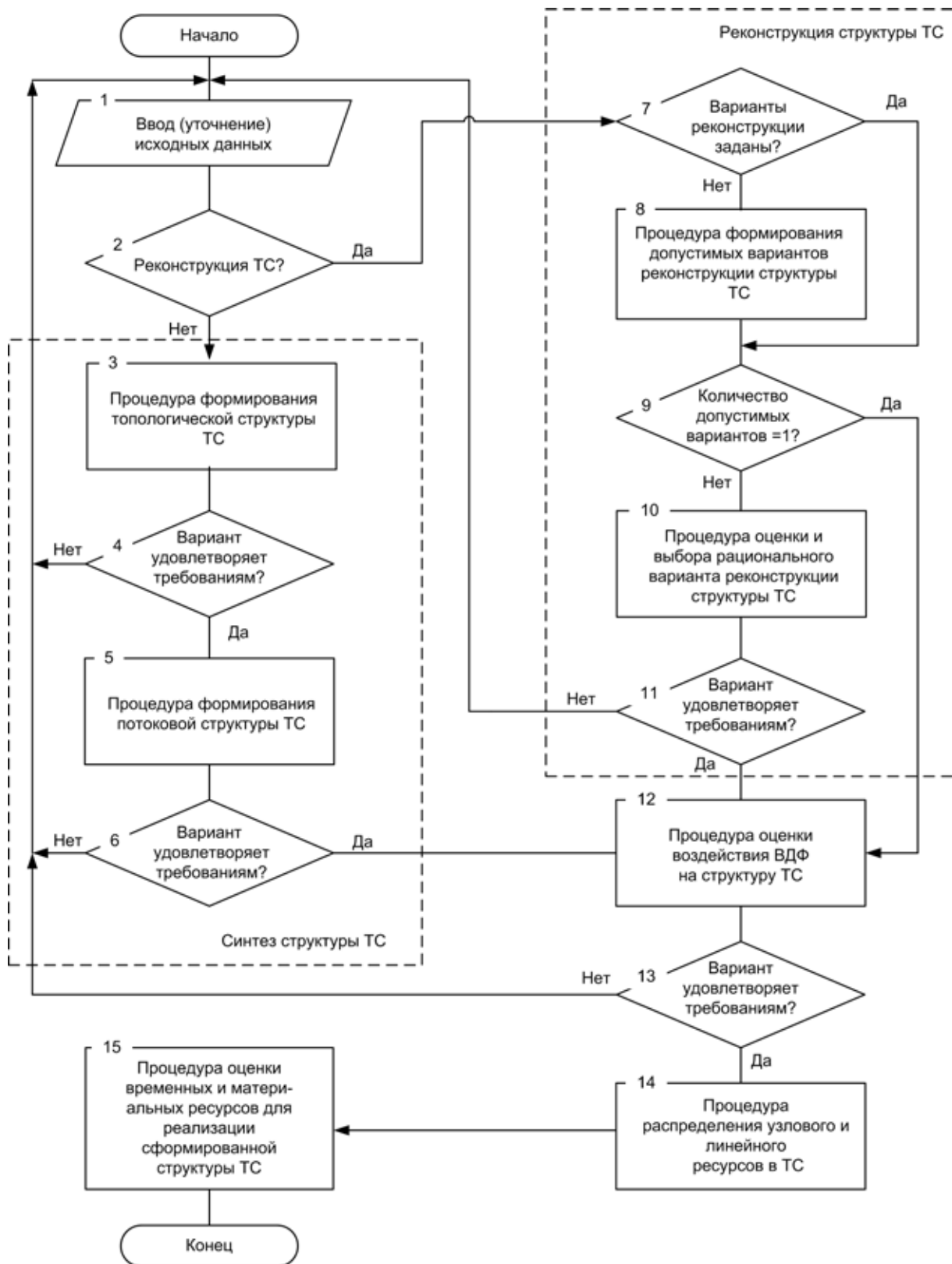


Рис. 1. Обобщенная схема методики формирования структуры ТС

2 МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТС

Методика формирования структуры ТС базируется на предложенной математической модели. Она предназначена для формирования рациональной структуры ТС ТКС СН, учитывающей условия ее применения. Целью разработки методики является повышение оперативности и обоснованности принятия решений должностными лицами по варианту структуры ТС. Методика состоит из совокупности логически взаимосвязанных этапов (рис. 1), отражающих синтез и реконструкцию структуры сети, и трех общих последовательно выполняемых процедур:

- оценки внешних дестабилизирующих факторов;
- распределения узлового и линейного ресурсов;
- оценки временных и других материальных ресурсов.

Непосредственно синтез структуры ТС заключается в формировании топологической и потоковой структур сети. Процедуру формирования топологической структуры ТС предложено реализовать с применением модифицированного комбинаторного подхода с использованием нижней оценки стоимости при наличии ограничений на структурную устойчивость сети [2]. Применение данного подхода позволяет существенно (примерно в 1,5 раза) сократить поиск рационального варианта решения задачи.

Процедура формирования потоковой структуры ТС реализуется с использованием метода базового распределения нагрузок (ресурсов) на основе «золотой» пропорции [3]. Ее формирование начинается с анализа графа, описывающего топологическую структуру сети, выработанную на предыдущем этапе. По найденным кратчайшим путям между корреспондирующими парами узлов проводится распределение потоков информации пользователей путем прямого и обратного преобразования непараллельно-последовательной структуры исходного графа в параллельно-последовательную структуру и определения значений процентного соотношения распределяемых потоков информации пользователей ТС по независимым путям с учетом значения требуемого коэффициента связности. В итоге определяются пропускные способности линий передачи ТС.

Реконструкция структуры ТС включает две процедуры:

- формирование допустимых вариантов реконструкции структуры сети;
- оценка и выбор рационального варианта реконструкции сети.

В процедуре формирования допустимых вариантов реконструкции сети предлагается использовать полиномиальный алгоритм нахождения заданного числа лучших решений [4]. В этом алгоритме переход от одного плана решения задачи к другому осуществляется с понижением значения целевой функции до тех пор, пока целевые условия не войдут в заданные ограничения. С применением указанного метода осуществляется построение невозрастающей последовательности максимальных потоков через сеть, где каждый член последовательности соответствует некоторому плану реконструкции сети, для которого выполняются ограничения по пропускной способности и стоимости реализации. Достоинство метода состоит в том,

что при поиске рационального решения не рассматриваются заведомо непригодные решения, не укладываемые в последовательность.

В основе процедуры оценки и выбора рационального варианта реконструкции сети предложено использовать способ многопараметрической оценки по множеству показателей. Выбор рационального варианта осуществляется по критерию максимума значения обобщенного показателя качества, расчет которого осуществляется с использованием аддитивной свертки значений комплексных показателей качества по группам существенных и несущественных частных показателей качества структуры ТС.

Процедура оценки воздействия внешних дестабилизирующих факторов на структуру ТС обеспечивает проверку синтезированного (при планировании связи) или разработанного (при реконструкции) рационального варианта структуры ТС на соответствие предъявленным требованиям к воздействию на нее ВДФ. Выбор рационального варианта структуры ТС осуществляется по критерию максимума, в основе которого используется значение вероятности своевременной доставки пакетов, полученное с применением аппарата топологического преобразования стохастических сетей [5].

В процедуре распределения узлового и линейного ресурсов выбор средств сетевого оборудования предложено осуществить по критерию максимума значения обобщенного показателя качества каждого средства. Распределение систем передачи предложено осуществить с применением метода базового распределения нагрузок (ресурсов) на основе «золотой» пропорции [3]. Окончательное системотехническое решение по варианту построения ТС принимается после оценки соответствия вероятностно-временных характеристик информационного обмена пользователей ТКС СН требованиям. Вероятностно-временные характеристики предложено рассчитывать способом аппроксимации с применением семейства распределений Пирсона.

В основе процедуры оценки временных и материальных ресурсов для реализации структуры ТС лежит способ минимизации значения многомерного вектора, включающего минимальное количество ресурсов, их стоимость и время выполнения всего комплекса работ по формированию ТС [6]. Задачу в такой постановке предложено решить с применением теоретико-графовых моделей, базирующихся на методах дискретной математики. Это позволяет находить рациональное решение без поиска всех эквивалентных решений, исключая их перебор.

Таким образом, представленная методика позволяет сформировать рациональный вариант структуры ТС, соответствующий прогнозируемым условиям ее применения, и отличается комплексным подходом к синтезу и реконструкции сети, учетом условий ее функционирования, рациональным распределением ресурсов, возможностью ее применения как на этапе планирования, так и оперативного управления сетью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование предложенных математической модели структуры ТС и средств методики формирования структуры ТС позволяет комплексировать расчетные процедуры в математическом и программном обеспечении типового комплекса средств автоматизированного управления связью и на этой основе обеспечивать принятие обоснованных решений на этапе восстановления ТС ТКС СН в условиях воздействия ВДФ. С применением методики может осуществляться экспресс-оценка средств сетевого оборудования и документального обмена для принятия решения о целесообразности их применения в ТС, а также оценка вероятностно-временных характеристик информационного обмена в ТКС СН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Столярова М.И. Задача формирования структуры транспортной сети связи и ее математическая модель // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сб. науч. ст. / под ред. С.М. Доценко. – СПб. : Издательство СПбГУТ, 2013. – С. 514–518.
2. Вишнеvский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М. : Техносфера, 2003. – 512 с.
3. Ясинский С.А. Прикладная «золотая» математика и ее приложения в электросвязи. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 239 с.
4. Першин О.Ю. Метод нахождения последовательности лучших решений для задач оптимизации на конечных множествах и задача реконструкции сети // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 6. – С. 73–84.
5. Столярова М.И., Привалов А.А. Модель процесса передачи пакетов данных по IP-сети в нестационарных условиях // Телекоммуникационные технологии. Научно-технический журнал. – СПб. : ФГУП «НИИ «Рубин», 2006. – Вып. № 2. – С. 83–89.
6. Хадонов З.М. Теоретико-графовые модели информационных технологий при распределении ресурсов // Информационные технологии. – 1997. – № 10. – С. 31–34.

REFERENCES

1. Stolyarova M.I. Zadacha formirovaniya struktury transportnoysetisvyaziiematematicheskayamodel[Problem of Generation of a Transport Network and its Mathematical Model]. *Aktualnye problemy infotelekkommunikatsiy v nauke i obrazovanii: sbornik nauchn. statey pod red. S.M. Dotsenko* [Topical Issues of Infotelecommunications in Science and Education: Collection of scientific articles under the editorship of S.M. Dotsenko]. Sankt-Peterburg, SPbGUT Publ., 2013, pp. 514–518.
2. Vishnevsky V.M. *Teoreticheskiye osnovy proektirovaniya kompyuternykh setey* [Theoretical Principles of Computer Network Design]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2003. 512 p.
3. Yasinskiy S.A. *Prikladnaya 'zlotaya' matematika i ee prilozheniya v elektrosvyazi* [Applied 'Gold' Mathematics and its Application in Telecommunications]. Moscow, Goryachaya Liniya-Telekom Publ., 2004. 239 p.
4. Pershin O.Yu. *Metod nakhozheniyaposedovatelnosti luchshikh resheniy dlya zadach optimizatsii na konechnykh mnozhestvakh i zadacha rekonstruktsii seti* [Method to Find a Sequence of Best Solutions for Problems of Optimization on Finite Sets and Network Rebuilding Problem]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and Telemechanics], 2002, no. 6, pp. 73–84.
5. Stolyarova M.I., Privalov A.A. *Model protsessa peredachi paketov dannykh po IP-seti v nestatsionarnykh usloviyakh* [Model of Data-Package Transmission Process via IP-net under Transient Conditions]. *Telekommunikatsionniye Tekhnologii. Nauchno-tekhnicheskiy zhurnal* [Telecommunication Technologies. Scientific Journal], Sankt-Peterburg, FGUP 'NII 'Rubin' Publ., 2006, no. 2, pp. 83–89.
6. Khadonov Z.M. *Teoretiko-grafovye modeli informatsionnykh tekhnologiy pri raspredelenii resursov* [Graph-Theoretical Model of Information Technologies at Resource Allocation]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies Journal], 1997, no. 10, pp. 31–34.