

# Оптимизация структуры полевого компонента IP/MPLS/Ethernet сети связи специального назначения по показателю своевременности

## Optimizing the structure of the field component of the IP/MPLS/Ethernet special-purpose communications network in terms of timeliness

В.Э. Алексеенко<sup>1</sup> ©, К.Н. Ширин<sup>2</sup> ©, А.А. Филякин<sup>3</sup> ©      V.E. Alekseyenko<sup>1</sup> ©, K.N. Shirin<sup>2</sup> ©, A.A. Filyakin<sup>3</sup> ©

<sup>1</sup> Главный центр научных исследований Росгвардии, г. Москва, Российская Федерация

<sup>2,3</sup> Академия Федеральной службы Охраны Российской Федерации, г. Орел, Российская Федерация

<sup>1</sup> E-mail: wadmac@mail.ru

<sup>2</sup> E-mail: shirin.kostya@mail.ru

<sup>3</sup> E-mail: sec@academ.msk.rsnet.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены подходы к оптимизации структуры полевого компонента сети связи специального назначения с технологиями IP/MPLS/Ethernet, развертываемого в ходе ликвидации последствий кризисной ситуации. Исследована зависимость показателей своевременности доставки протокольных блоков данных от структуры полевого компонента такой сети и точек привязки полевых (мобильных) средств и комплексов связи к стационарной сети связи общего пользования.

**Abstract.** The article looks at the approaches to optimizing the structure of the field component of a special-purpose communication network with IP/MPLS/Ethernet technologies deployed in eliminating the consequences of a crisis. The dependence of timeliness of protocol data units on the structure of the field component of such a network and reference points of the field (mobile) communication means and complexes to the fixed public telecommunication is studied.

**Ключевые слова:** сеть связи специального назначения, полевой компонент, стационарная сеть связи общего пользования, своевременность доставки блоков данных, устойчивость, топология, коммутация пакетов, единица канального ресурса, ресурсопотребление, резервирование

**Keywords:** special-purpose communication network, field component, fixed public telecommunication, data units timeliness, stability, topology, packet switching, channel provision unit, resource consumption, redundancy

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Алексеенко В.Э., Ширин К.Н., Филякин А.А. Оптимизация структуры полевого компонента IP/MPLS/Ethernet сети связи специального назначения по показателю своевременности // Академический вестник войск национальной гвардии Российской Федерации. – 2025. – № 3. – С. 41–46.

Эффективность ликвидации последствий кризисных ситуаций (далее – КС) существенно зависит от оперативности и устойчивости управления привлекаемыми силами и средствами. Для обеспечения управления ликвидацией последствий КС в интересах должностных лиц (далее – ДЛ) оперативных штабов (далее – ОШ) развертывается сеть связи специального назначения (далее – СССН) [1], в составе которой принято выделять стационарный и полевой компоненты [2; 3]. В большинстве случаев стационарный компонент СССН в КС представляет собой узлы и линии связи сети связи общего пользования (далее – ССОП), функционирующие (уцелевшие) на данной территории. Полевой компонент объединяет полевые узлы (комплексы, аппаратные) связи силовых министерств и ведомств, применяемые как для усиления стационарного компонента, так и непосредственно для обеспечения связи ДЛ ОШ

в районах развертывания их пунктов управления (далее – ПУ).

Вследствие повсеместного оснащения ССОП оборудованием с коммутацией пакетов, например, с технологиями IP/MPLS/Ethernet, аналогичной модернизации стали подвергаться и полевые узлы (комплексы, аппаратные) связи силовых министерств и ведомств. Однако, несмотря на это, приемы и способы организации связи в ходе ликвидации КС остаются такими же, как и для технологий с коммутацией каналов.

Так, взаимодействие полевого компонента со стационарным компонентом, а именно с узлами и станциями ССОП, до сих пор осуществляется без учета специфики функционирования программно-аппаратных средств IP/MPLS/Ethernet, то есть:

– районы развертывания полевых (мобильных) средств связи и точки привязки полевых (мобильных) узлов связи к элементам ССОП определяются

должностными лицами ССЧН субъективно, исходя из собственного опыта и знаний, без учета существенной зависимости времени доставки протокольных блоков данных (далее – ПБД) от конфигурации сети связи с коммутацией пакетов (далее – ССКП) в целом. Под временем доставки ПБД понимается разность между фактическим временем начала передачи до прибытия ПБД к корреспондирующему узлу связи (далее – УС) ПУ. На практике целесообразно пользоваться другим показателем своевременности – временем среднесетевой задержки ПБД в направлении связи,  $t_{сз\ ССЧН}$ . Ее физический смысл состоит в разнице между реальным временем передачи ПБД и требуемым, с учетом разницы допустимых значений, и оценивается в миллисекундах. Для оценки пригодности и выбора альтернатив вариантов ССЧН в целом, а не по направлению связи, рекомендуется оценивать их с помощью интегрального показателя: математического ожидания времени среднесетевой задержки ПБД в ССЧН в целом,  $M[t_{сз\ ССЧН}]$ ;

– устойчивость направлений связи обеспечивается многократным их линейным резервированием, без учета того, что применение технологии с коммутацией пакетов поддерживают экономически более эффективные сетевые методы обеспечения устойчивости связи, а именно  $t_{сз\ ССЧН}$  зависит не только от количества линий привязок, но и от конкретной точки подключения (узла доступа). Так, для сети связи, содержащей порядка семи узлов связи и 12-ти линий связи применение технологии коммутации пакетов позволяет снизить показатель среднесетевой задержки сообщений ( $t_{сз\ ССЧН}$ ) на 20–25 % [3];

– мониторинг параметров сетевых элементов, прогнозирование обстановки по связи и планирование применения средств связи производится отдельно для стационарного и полевого компонента, без учета того, что важнейшее влияние на качество обслуживания абонентов оказывают интегральные характеристики ССКП в целом.

В результате, для обеспечения необходимого качества обслуживания ДЛ ОШ в ССЧН с коммутацией пакетов требуются затраты дополнительного объема ресурсов полевых средств связи (узловые и линейные средства связи и личный состав экипажей).

Вышеизложенное позволяет утверждать, что в настоящее время актуальным является дальнейшее развитие научно-методических основ организации связи в районах ликвидации последствий КС. Злободневной является научная задача разработки инструментария оптимизации в целом структуры IP/MPLS/Ethernet-ССЧН, включающей в себя:

– стационарный компонент, имеющий известные (заданные) узловую основу и конфигурацию сетки линий связи ССОП;

– полевой компонент, в состав которого входят полевые (мобильные) УС ПУ, районы развертывания которых определены (заданы) ДЛ ОШ, а также остальная узловая основа (полевые узлы (комплексы, аппаратные) связи (далее – ПУС), развертываемые и функционирующие в интересах других министерств и ведомств) и конфигурация сетки линий связи полевого компонента (текущие инцидентности линий и УС ПУ), которые требуется найти.

Целью такой оптимизации является нахождение конфигурации полевого компонента, обеспечивающей требуемые значения показателей своевременности доставки ПБД и устойчивости IP/MPLS/Ethernet-ССЧН в целом при минимальных расходах ресурсов полевых средств и комплексов связи. В общем виде ее можно представить в виде следующей целевой функции:

$$C_{np}^{CCC} = \sum_{v=2}^V \left\{ \sum_{a=1}^{N_a} \delta_{a_v} \cdot n_{a_v} \cdot c_a^y + \sum_{b=1}^{N_b} \delta_{b_v} \cdot m_{b_v} \cdot c_b^T + \sum_{b=1}^{N_b} \delta_{b_{v-1}} \cdot m_{b_{v-1}} \cdot c_b^T + \sum_{s=1}^{N_s} \delta_{s_v} \cdot n_{s_v} \cdot c_s \right\} \left\{ K_{ГССС} \geq K_{ГТР}; \tau_{сз} \leq \tau_{сз\ ТР} \rightarrow \min \quad (1) \right.$$

где  $n_{a_v}$  – число задействованных узлов связи в сегментах ССЧН;  $m_{b_v}, m_{b_{v-1}}$  – число каналов (трактов) в сегментах ССЧН;  $c_a^y, c_b^T, c_s$  – приведенные затраты ресурсов на узлы, каналы (тракты) и средства ССЧН; коэффициенты:

$$\delta_{a_v}, \delta_{b_v}, \delta_{b_{v-1}}, \delta_{s_v} = \begin{cases} 1, & \text{если } a, b, s \in v, (V-1, V) \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В качестве ограничений необходимо принять, что требуемое значение сетевой задержки для услуг реального времени, согласно [4], составляет значение 150 мс, а требуемое значение коэффициента готовности – 0,999 [5].

Видно, что при заданной топологии узлов ССОП самый весомый вклад в неопределенность решения задачи (1) для ССЧН в целом вносит тип топологии ее полевого компонента. В настоящее время решение о выборе той или иной топологии полевого компонента принимают ДЛ ОШ в соответствии со своими знаниями и опытом. В большинстве случаев эти решения ориентированы на традиционные схемы линейного и аппаратного резервирования, что противоречит принципам сетевого резервирования, принятым в ССКП.

**1. Общие положения разработки инструментария.** В соответствии с имеющейся в научной отрасли классификацией, сформулированная выше задача оптимизации может быть отнесена к структурно-сетевой. В качестве теоретического ядра разрабатываемого инструментария целесообразно использовать формализмы (математические выражения, описывающие исследуемый объект),

разработанные в предметной области для типовых ССКП, модифицировав их для условий поставленной выше задачи (1).

Канонические подходы к топологическому проектированию сетей связи [2; 3; 6; 7] трактуют следующий состав классической структурно-сетевой задачи (далее – ССЗ):

- оптимизация топологической структуры;
- оптимизация потоковой структуры (распределение потоков на графе топологии и выбор пропускных способностей, оценка вероятностно-временных характеристик);
- построение физической структуры (нахождение реализуемой структуры сети, исходя из имеющихся типонаименований оборудования).

Применительно к решению задачи (1) под оптимизацией топологической структуры принято понимать оптимизацию сетки линий связи, под построением физической структуры – подбор необходимого оборудования.

Далее в статье внимание будет сконцентрировано только на тех элементах инструментария, которые отличаются от существующих методов, методик и алгоритмов, а именно на оптимизации потоковой структуры. Для наглядности изложения разрабатываемый инструментарий будет применяться на примере примитивной ССКП (рис. 1), включающей в себя в качестве стационарного компонента объекты связи ССОП (сетевые и районные узлы связи, базовые станции операторов сотовой

связи), а в качестве полевого компонента – ПУС силовых министерств и ведомств.

Для ситуации, представленной на рисунке 1, ниже приводится анализ зависимости показателей своевременности доставки ПБД в сети в целом (величины математического ожидания среднесетевой задержки ПБД в сети,  $M\{t_{сзСССН}\}$ ) от конфигурации сетки линий ее полевого компонента. Данное исследование в совокупности с оценкой характеристик устойчивости сети в целом и расчетом ресурсов полевых средств (комплексов) связи позволит в дальнейшем выбрать оптимальный в данных условиях вариант построения IP/MPLS/Ethernet-СССН в районе ликвидации последствий КС.

Параметры и структура полевого компонента СССР влияют на характеристики IP/MPLS/Ethernet-СССН в целом, но в настоящий момент их оценивают автономно друг от друга, что противоречит технологиям с коммутацией пакетов.

**2. Анализ исходных данных сформулированной ССЗ (1) и обоснование общего подхода к ее решению.**

Решение ССЗ по минимизации расходов ресурсов при выполнении требований по своевременности передачи ПБД (1) всегда базируется на совокупности допущений и ограничений. Так, определение начального плана распределения информации часто представляет собой реализацию одной из известных стратегий выбора пропускной способности в ССКП, например, представленных в [6; 7]. При этом существующие стратегии могут и должны быть модифицированы с учетом конкретных задач и специфики построения IP/MPLS/Ethernet-СССН в КС.

При классическом подходе для определения потоковой структуры ССКП (совокупности маршрутов ПБД в сети связи) считается заданной дисциплина обслуживания (заказная, немедленная, с приоритетами и т.д.), а также требования к качеству передачи и свойствам потоков ПБД, внешних по отношению к СССР (объем поступающей нагрузки, потерянная нагрузка). Следовательно, заданными являются:

$M_{инт.КС} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1N_y} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \dots & \gamma_{2N_y} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{N_y 1} & \gamma_{N_y 2} & \dots & \gamma_{N_y N_y} \end{bmatrix}$  – матрица интенсивностей потоков ПБД, поступающих в каналы (тракты) связи от q-го к h-му

УС ПУ;  $\gamma$  – сумма интенсивностей потоков ПБД, поступающих в каналы (тракты) связи;  $\gamma = \sum_{g=1}^{N_y} \sum_{h=1}^{N_y} \gamma_{gh}$ ;  $M_{инт.КС} = [\lambda_{N_y+1}, \lambda_{N_y+2}, \dots, \lambda_{N_{сз}}]$  – матрица-строка интенсивностей потоков ПБД в каналах (трактах) связи;  $\lambda_n$  – интенсивность

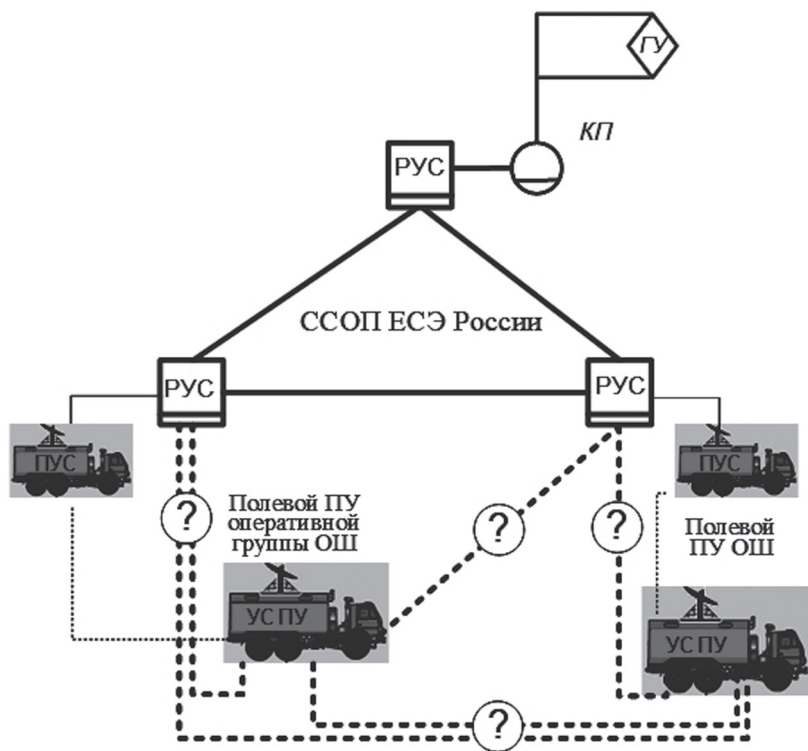


Рис. 1. Пример возможных вариантов подключения полевых (мобильных) средств связи к стационарному компоненту СССР в кризисной ситуации

потока ПБД в n-м канале (тракте) связи.

$$\lambda_n = \sum_q \sum_h \gamma_{qh} \quad (2)$$

$q, h: B_n \in KTC_{qh}$

где  $\lambda$  – сумма интенсивностей потоков ПБД в каналах (трактах) связи, которые измеряются в условных единицах канального ресурса (цифровой поток со скоростью передачи 2048 кбит/с) (Е1):

$$\lambda = \sum_{n=N_y+1}^{N_{CЭ}-N_y} \lambda_n \quad (3)$$

При обеспечении связи в районах ликвидации последствий КС направления связи неравнозначны с точки зрения оперативной важности. Следовательно, в отличие от существующих подходов далее предлагается ввести и считать заданными характеристики оперативной важности направлений связи СССН:

$$M_{\text{важ. КТС}} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1N_y} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2N_y} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{N_y1} & w_{N_y2} & \dots & w_{N_yN_y} \end{bmatrix}$$

– матрица коэффициентов важности каналов (трактов) связи;  $w_{qh}$  – коэффициент важность каналов (трактов)

связи от q-го к h-му УС ПУ;  $w$  – сумма коэффициентов важности каналов (трактов) связи

$$w = \sum_{q=1}^{N_y} \sum_{h=1}^{N_y} w_{qh}$$

Для проведения расчетов в условиях, представленных на рисунке 1, значения важности направления связи предлагается задать в виде коэффициентов, приведенных в таблице 1.

**Таблица 1**  
**Коэффициенты важности направлений связи**

Направление связи	Коэффициент важности, $w_{N_yN_y}$
1. УС ПУ Росгвардии – УС ПУ ОШ	3
2. УС ПУ Росгвардии – УС ПУ оперативной группы ОШ	2
3. УС ПУ ОШ – УС ПУ оперативной группы ОШ	1

В ходе планирования СССН в КС такие коэффициенты позволяют распределять вес направлений связи в пределах одного класса важности пропорционально интенсивности передаваемой информации. На практике значения данных коэффициентов определяются заказчиками (представителями органов управления министерств и ведомств). В случае, когда все каналы (тракты) связи принадлежат одному классу важности, вес направления связи определяется лишь интенсивностью обслуживаемой нагрузки  $w_{gh} = \gamma_{gh}$ ,  $w = \gamma$ ,  $v_n = \lambda_n$ ,  $v = \lambda$ .

Данное предложение позволяет представить характеристики эффективности обслуживания ПБД в СССН с коммутацией пакетов с учетом параметров важности направлений связи в виде взвешенных значений математического ожидания (далее –МО) [3]:

$$M[t_{c3CCCH}] = M[t_{c3}^{OTC}] = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \frac{w_{ik}}{w} M[t_{ik}] = \sum_{n=N+1}^M \frac{v_n}{w} M[t_n] \quad (4)$$

и дисперсии

$$D[t_{c3CCCH}] = D[t_{c3}^{OTC}] = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \frac{w_{ik}}{w} D[t_{ik}] \quad (5)$$

величины  $t_{c3CCCH}$  среднесетевой задержки ПБД в СССН в целом. Здесь  $t_{ik}$  – задержка ПБД в канале связи от i-го к k-му УзСПУ;  $t_n$  – задержка ПБД в n-м линейном тракте.

Тогда задача разработки рационального плана распределения информации в IP/MPLS/Ethernet-СССН в КС может быть сформулирована, как задача построения полевого компонента СССН при условии минимизации МО величины  $t_{c3CCCH}$  при заданных в матрице интенсивностей поступления ПБД и топологии сети:

$$M[t_{c3CCCH}] = M[t_{c3}^{OTC}] \frac{M_{ПСТ}, M_{ИНТТ}}{w} \rightarrow \min \quad (6)$$

где  $M_{ПСТ}$  – матрица пропускных способностей трактов СССН с коммутацией пакетов в КС.

При реальной организации связи в ходе ликвидации КС в задаче, сформулированной в постановке (6), необходимо учитывать ограничения на ресурсопотребление, сумму пропускных способностей трактов сети и устойчивость функционирования СССН в целом. Для решения данной задачи также целесообразно использовать существующие хорошо апробированные алгоритмы, в том числе представленные в [3], но с учетом различной важности направлений связи.

**3. Пример решения сформулированной структурно-сетевой задачи. Расчет показателей качества СССН с КП.** Для наглядности решения в качестве количественных характеристик пропускной способности направлений связи далее выступает условная единица канального ресурса (далее – ЕКР) – цифровой поток Е1 [4]. Пусть заданы матрица интенсивностей потоков БД, поступающих в каналы (тракты) связи от ПУ ОШ, и матрица коэффициентов важности (7):

$$M_{\text{инт. КТС}} = \begin{bmatrix} & 2 & 1 \\ 2 & & 1 \\ 1 & 1 & \end{bmatrix} \quad M_{\text{важ. КТС}} = \begin{bmatrix} & 3 & 2 \\ 3 & & 1 \\ 2 & 1 & \end{bmatrix} \quad (7)$$

Кроме того, далее принято, что задачи маршрутизации в СССН в КС были решены существующими методами, реализованными в применяемых программно-аппаратных средствах связи. На рисунке 2 показаны варианты альтернатив реализации топологий СССН для ситуации, представленной на рисунке 1, и распределения потоков по маршрутам, полученным методом последовательного распределения [6].

Таблица 2

Параметры, характеризующие альтернативы построения СССН в КС

Вариант	$M [t_{сзСССН}]$	КОД
а	185	3
б	150	63
в	142	187
г	122	320

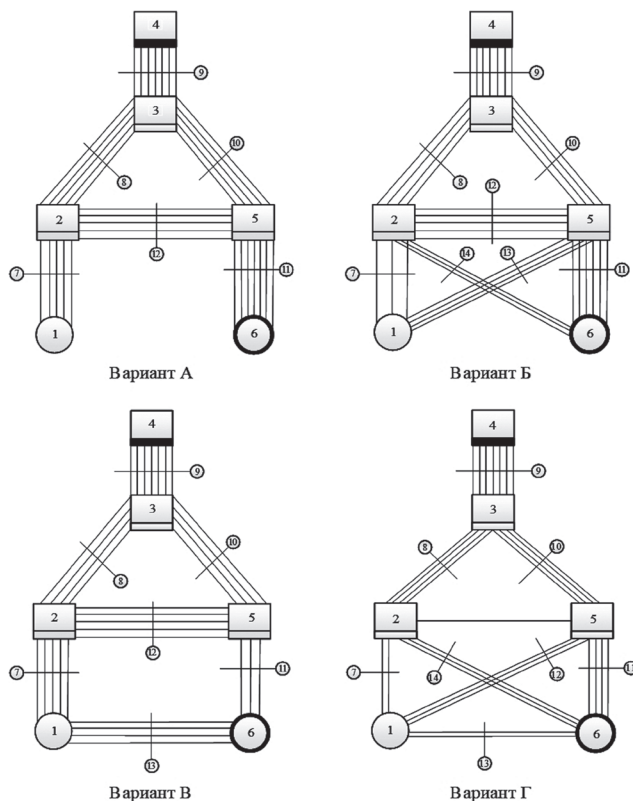


Рис. 2. Альтернативы топологий и потоковых структур построения СССН в КС

На рисунке 2 применяется сквозная нумерация сетевых элементов и используются следующие обозначения для узлов связи: 1 – УС ПУ оперативной группы ОШ; 2, 3, 5 – узлы связи (объекты связи) ССОП единой сети электросвязи России; 4 – УС ПУ Росгвардии; 6 – УС ПУ ОШ. Выносками с номерами 7–14 обозначены каналы (тракты) связи.

Для каждой из альтернатив по формуле 3 произведен расчет величины среднесетевой задержки ПБД для СССН в целом. Результаты расчетов приведены в таблице 2. Кроме значений показателей своевременности в таблице 2 представлены характеристики топологий альтернатив в виде количества остовных деревьев (далее – КОД) [3], которые позволят в перспективе оценить устойчивость рассматриваемых вариантов построения СССН в КС.

Значения  $M [t_{сзСССН}]$  в таблице 2 получены с помощью (4), а значения КОД – согласно [3]. Вместо

показателей МО среднесетевой задержки в данном подходе могут быть использованы и другие характеристики своевременности, например, вероятность доставки ПБД за время не больше допустимого [3; 4], и т.д. Также для описания устойчивости СССН в целом могут применяться такие параметры, как значение линейного функционала связности, коэффициента готовности сети и др. [8].

По данным таблицы 2, исходя из требований по устойчивости и наличия полевых средств связи, из множества альтернатив, представленных на рисунке 2, осуществляется выбор пригодного варианта построения СССН в КС. Так, например, вариант А ( $M [t_{сзСССН}] = 185$  мс), наиболее часто применяемый на практике, оказывается непригодным для реализации СССН на средствах с коммутацией пакетов по параметрам своевременности, так как требуемое значение сетевой задержки для услуг реального времени [4] составляет значение 150 мс.

Таким образом, в ходе моделирования установлено, что показатели качества функционирования IP/MPLS/Ethernet-СССН в целом ( $M t_{сзСССН}$  и КОД) имеют явную зависимость от конфигурации сетки линий полевого компонента. Значения параметров своевременности доставки протокольных блоков данных, в частности, в явном виде зависит от количества циклов в топологии сети в целом. КОД определяется разветвленностью топологии сети в целом и достигает своего максимума для радиально-цикловых структур.

Выявленная закономерность не учитывается существующими научно-методическими средствами планирования связи в КС. В результате не в полной мере используется ресурсосберегающий потенциал технологий с КП. В связи с изложенным выше, дальнейшие исследования в предметной области целесообразно вести в направлении разработки методик и алгоритмов многокритериальной оптимизации СССН с коммутацией пакетов, развернутой в интересах ликвидации последствий КС. Данный вывод вытекает из расчетов значений показателей альтернатив построения полевого компонента СССН с наличием циклов (рис. 2 б, в, г) и без них.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон от 07 июля 2003 г. № 126-ФЗ «О связи» (ред. от 26.12.2024). – URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (дата обращения: 17.02.2025).
2. Саитов И.А. Основы теории построения защищенных мультипротокольных оптических транспортных сетей телекоммуникационных систем: монография / И.А. Саитов. – Орел: Академия ФСО России, 2009. – 211 с.
3. Трегубов Р.Б. Теоретические основы анализа и оптимизации иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем: монография / Р.Б. Трегубов, И.А. Саитов. – Орел: Академия ФСО России, 2017. – 587 с.
4. Степанов С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей / С.Н. Степанов. – М.: ЭкоТрендз, 2010. – 392 с.
5. ГОСТ Р 53111–2008. Национальный стандарт Российской Федерации. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки (утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18.12.2008 г. № 529-ст). – М.: Стандартинформ, 2009. – 20 с.
6. Клейнрок Л. Коммутируемые сети (стохастические потоки и задержки сообщений) / Л. Клейнрок. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1970. – 256 с.
7. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок / пер. с англ. И.И. Грушко; ред. В.И. Нейман. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
8. Лохмотко В.В. Модели и методы оптимизации структуры телекоммуникационных сетей: дисс. докт. техн. наук / В.В. Лохмотко. – СПб.: СПб ГУТ, 1998. – 290 с.

*Статья проверена программой Антиплагиат. Оригинальность – 98 %.*

*Статья поступила в редакцию 17.02.2025; одобрена после рецензирования 17.03.2025; принята к публикации 31.07.2025.*