

С. В. Кругликов¹, А. Ю. Зализко²

¹*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь*

СИНТЕЗ БЕСПРОВОДНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С АДАПТАЦИЕЙ К ОТКАЗАМ УЗЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СРЕДНЕЙ И ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Аннотация. Рассмотрена методика синтеза беспроводной цифровой сети связи с пакетной коммутацией, обеспечивающей передачу видеосообщений реального масштаба времени между элементами многофункциональной информационно-управляющей системы в условиях высокой интенсивности отказов узловых элементов. В качестве концептуальной модели телекоммуникационной сети принята сеть смешанной структуры, которая включает многофункциональные устройства, построенные на основе стандартов широкополосного радиодоступа с коммутацией пакетов и двумя взаимосвязанными уровнями сетевого взаимодействия элементов (локальным и магистральным). Методика синтеза беспроводной сети основывается на многоуровневой комбинированной адаптации телекоммуникационной сети в условиях отказов узловых элементов, основной задачей которой является рациональное изменение параметров, функций сетевых элементов в тесной взаимосвязи с целенаправленным преобразованием структуры подсетей телекоммуникационной системы. Основная цель проведения комбинированной адаптации сети заключается в достижении необходимой пропускной способности системы связи в зависимости от интенсивности отказов узловых элементов. Свойства многоуровневой адаптации исследовались в процессе осуществления комбинированного (структурно-параметрического) синтеза с использованием агрегативного подхода моделирования сложных технических систем. Эффективность указанной методики подтверждается результатами проведенного имитационного эксперимента с использованием ранее полученной агрегативной модели беспроводной сети передачи данных с коммутацией пакетов. Экспериментальные данные, полученные при натурном исследовании сетей широкополосной радиосвязи на основе стандартов 802.11b/g/n, показали, что время обработки пакетов сообщения зависит от использования существующих способов адаптации. В частности, применение эффективных алгоритмов адаптации (как параметрических, так и структурных) позволит сократить время нахождения информационных данных (пакетов) в широкополосных устройствах связи в несколько раз и тем самым обеспечить требуемую пропускную способность сети, функционирующей в условиях отказов узловых элементов.

Ключевые слова: беспроводная телекоммуникационная сеть, коммутация пакетов сообщений, комбинированная адаптация, агрегативная модель, структурно-параметрический синтез, имитационный эксперимент

Для цитирования: Кругликов, С. В. Синтез беспроводной телекоммуникационной сети с адаптацией к отказам узловых элементов средней и высокой интенсивности / С. В. Кругликов, А. Ю. Зализко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 117–128. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-117-128>

Sergey V. Kruglikov¹, Aliaksandr Yu. Zalizka²

¹*United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

SYNTHESIS OF WIRELESS TELECOMMUNICATION NETWORK WITH ADAPTATION TO REFUSALS OF CENTRAL ELEMENTS OF AVERAGE AND HIGH INTENSITY

Abstract. A technique of synthesis of a wireless digital communication network with package switching, providing transfer of video messages of real time scale between elements of multipurpose information-operating system in conditions of high failure rate of central elements, is considered. As conceptual model of a telecommunication network – the network of the mixed structure, including multipurpose devices, constructed on the basis of standards of a broadband radio access with switching of packages and two interconnected levels of network interaction of elements (local and main) is accepted. The technique of synthesis of a wireless network is based on the multilevel, combined adaptation of a telecommunication network in the conditions of refusals of central elements, which primary goal is rational change of parameters, functions of network elements in close interrelation with purposeful transformation of structure of telecommunication system subnetworks. The main objective of carrying out the combined adaptation of the network consists in achievement of necessary throughput of communication system depending on degree of failure rate of central elements. Properties of multilevel adaptation were investigated in the course of realization of the combined (structurally-parametrical) synthesis with use of the aggregate approach of modelling of difficult technical systems. Efficiency of the specified technique is proven by the results of the im-

itating experiment with use of the aggregate model of a wireless network of data transmission with switching of packages, obtained previously. The experimental data, received at natural research of networks of a broadband radio communication on the basis of standards 802.11 b/g/n, have shown, that time of processing of packages of a message essentially depends on use of existing ways of adaptation. In particular, application of effective algorithms of adaptation (both parametrical and structural) will allow to reduce the time of finding of details (packages) in broadband communication devices by several times and, thereby, to provide demanded throughput of the network functioning in the conditions of refusals of central elements.

Keywords: wireless telecommunication network, message packet switching, combined adaptation, aggregative model, structural-parametric synthesis, simulation experiment

For citation: Kruglikov S. V., Zalizka A. Yu. Synthesis of wireless telecommunication network with adaptation to refusals of central elements of average and high intensity. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 117–128 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-117-128>

Введение. Современные беспроводные телекоммуникационные сети (ТКС), входящие в состав информационно-управляющих систем (ИУС), должны обеспечивать достаточно высокую пропускную способность каналов передачи данных и устойчивое функционирование подсистемы связи в условиях внешних (вне сети) преднамеренных пространственных воздействий, приводящих к многочисленным отказам узловых элементов. Для повышения устойчивости ТКС к воздействию различного рода негативных факторов в [1] рассмотрен подход построения системы связи с учетом применения многоуровневой комбинированной адаптации. Согласно выдвинутой гипотезе, представленной в [1], механизм комбинированной адаптации должен включать определенную последовательность параметрических, структурных и функциональных способов (алгоритмов) повышения живучести сети в условиях отказа узловых элементов. В свою очередь многоуровневая адаптация может быть реализована в процессе комбинированного (структурно-параметрического) синтеза с целью достижения максимально возможной пропускной способности ТКС. Подход математического моделирования сложных динамических систем, представленный в [2] и основывающийся на описании беспроводной ТКС с помощью агрегатов [3], применяется в настоящей статье для подтверждения выдвинутой гипотезы.

Концептуальная модель, представленная в [2], ТКС смешанной структуры должна включать абонентские устройства (АУ), беспроводные средства связи с функциями коммутаторов и маршрутизаторов (локальные и магистральные узлы соответственно – узловые элементы ТКС), построенные на основе стандартов широкополосного радиодоступа с коммутацией пакетов и двумя взаимосвязанными уровнями сетевого взаимодействия элементов – локальным и магистральным [3, 4]. Узловые элементы (УЭ) взаимодействуют между собой в составе транспортной составляющей (ТрС) сети посредством широкополосных каналов связи (ШКС). Синтез адаптивной телекоммуникационной сети (АТКС) основывается на проведении математического моделирования агрегативной системы связи с коммутацией пакетов с учетом применения комбинированной адаптации.

Основная цель проведения *комбинированной адаптации ТКС* заключается в достижении необходимой пропускной способности *системы связи* в зависимости от отказов узловых элементов.

В целом методика структурно-параметрического синтеза АТКС представляется в следующем порядке (рис. 1):

1. Определение исходных данных синтеза АТКС.
2. Построение исходной математической модели ТКС без учета отказа УЭ, включающее последовательный структурно-параметрический синтез частных математических моделей сетевых устройств (СУ) в модели подсетей и сети связи в целом (блок формирования математической модели ТКС).
3. С учетом синтезированной модели ТКС проведение анализа ее пропускной способности $\overline{W}_{ТКС}$ при известных данных о пропускных способностях направлений связи между взаимодействующими АУ.
4. При несоответствии значения пропускной способности сети требуемому осуществляется выбор алгоритма адаптации с учетом степени отказов узловых элементов.
5. Корректировка исходных данных для синтеза ТКС при условии превышения потребных ресурсов над имеющимися в ходе проведения адаптации (блок адаптации ТКС к преднамеренным воздействиям).
6. Вывод результатов синтеза ТКС в виде параметров СУ и характеристик структур подсетей.

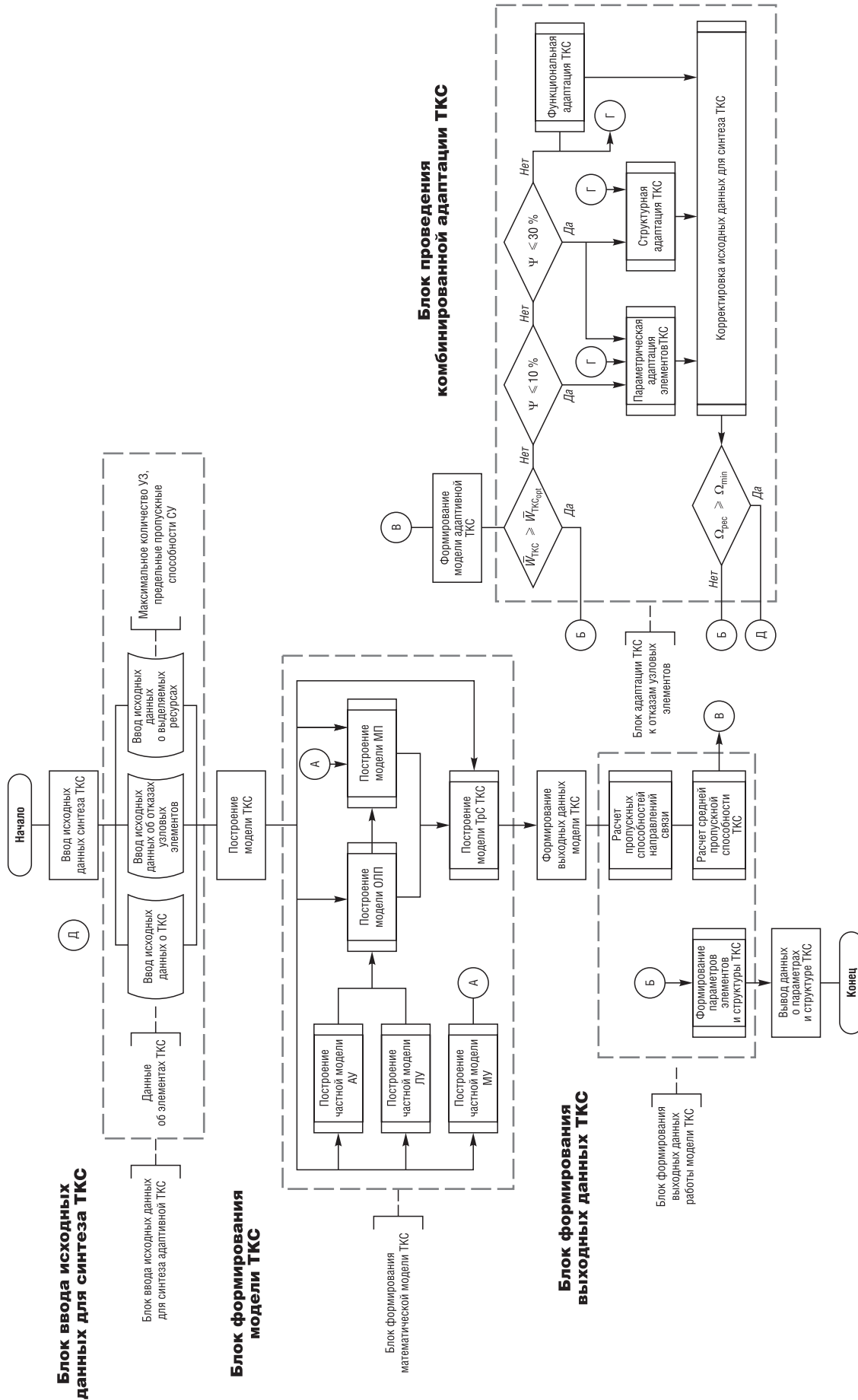


Рис. 1. Блок-схема структурно-параметрического синтеза адаптивной (самоорганизующейся) телекоммуникационной сети
 Fig. 1. The block diagram of structurally-parametrical synthesis of an adaptive telecommunication network

В качестве *исходных данных* проведения синтеза АТКС приняты:

непосредственно данные о ТКС ($S_{\text{ТКС}}$ – площадь (размеры) зоны обслуживания ТКС; Φ – общее (суммарное) количество АУ, зарегистрированных в ТКС; $\mathbf{A}_{xy}^{\text{АУ}}$ – матрица координат АУ [2]; параметры качества обслуживания QoS);

данные о выделяемых ресурсных затратах $\Omega_{\text{рес}}$ ($\max \Lambda$, $\max E$ – максимально выделяемое количество ЛУ и МУ соответственно; $\Delta \Lambda$, ΔE – избыточное (резервное) количество ЛУ и МУ соответственно; $\mathbf{R}_{\Lambda}^{\max}$, \mathbf{R}_E^{\max} – матрицы максимальных пропускных способностей ШКС, организуемых ЛУ и МУ соответственно; $N_{\text{алг.пар}}$, $N_{\text{алг.стр}}$ – количество алгоритмов (способов) параметрической и структурной адаптации соответственно);

данные о степени интенсивности отказов сетевых устройств, определяемые *матрицей воздействий на УЭ сети* $\mathbf{A}_{\Psi}^{\text{УЭ}}|_{t_0}$ в момент времени t_0 [5, 6].

За *выходные данные* синтеза АТКС приняты: Λ , E – текущее количество ЛУ и МУ соответственно; структура обобщающей локальной подсети (ОЛП) в виде матриц координат ЛУ $\mathbf{A}_{xy}^{\text{ЛУ}}$ и их пропускных способностей $\mathbf{A}_{W(\text{ЛУ})}^{\text{ТКС}}$; структура магистральной подсети (МП) в виде матриц координат МУ $\mathbf{A}_{xy}^{\text{МУ}}$ и их пропускных способностей $\mathbf{A}_{W(\text{МУ})}^{\text{ТКС}}$; $\mathbf{A}_W^{\text{ТКС}}$ – матрица пропускных способностей элементов ТКС, объединяющая матрицы $\mathbf{A}_{W(\text{ЛУ})}^{\text{ТКС}}$ и $\mathbf{A}_{W(\text{МУ})}^{\text{ТКС}}$; $\overline{W}_{\text{ТКС}}$ – пропускная способность ТКС [5, 6].

В рамках *параметрического синтеза* рассматривается уточненная совокупность ранее полученных выражений (см. [2, 7]) агрегативных моделей сетевых устройств ТКС:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}_{\text{АУ}i} |_{i=1, \overline{\Phi}} &= \mathfrak{M} \left[\begin{aligned} &\mathbf{A}_{(\text{АУ}i)}^{(\text{ПрМА})} \left(Z_{1\text{А}}^{(\text{АУ}i)}, Z_{2\text{А}}^{(\text{АУ}i)} \right) \times \mathbf{A}_{(\text{АУ}i)}^{(\text{АП})} \left(Z_{\text{пам}}^{(\text{АУ}i)} \right) \times \mathbf{A}_{(\text{АУ}i)}^{(\text{РА})} \left(Z_{\text{пер}}^{(\text{АУ}i)} \right) \times \\ &\times \mathbf{A}_{(\text{АУ}i)}^{(\text{ПрдА})} \left(Z_{\text{контр}}^{(\text{АУ}i)} \right) \end{aligned} \right], \\ \mathbf{A}_{\text{ЛУ}\beta} |_{\beta=1, \overline{\Lambda}} &= \mathfrak{M} \left[\begin{aligned} &\mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрМАА})} \left(Z_{1i}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{2i}^{(\text{ЛУ}\beta)} \right) \times \mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрМАМ})} \left(Z_{3\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{4\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)} \right) \times \\ &\times \mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{КА})} \left(Z_{7i}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{8i}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{9\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{10\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)} \right) \times \mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрдАА})} \left(Z_{11i}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{12i}^{(\text{ЛУ}\beta)} \right) \times \\ &\times \mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрдАМ})} \left(Z_{13\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)} \right) \end{aligned} \right], \\ \mathbf{A}_{\text{МУ}\alpha} |_{\alpha=1, \overline{E}} &= \mathfrak{M} \left[\begin{aligned} &\mathbf{A}_{(\text{МУ}\alpha)}^{(\text{Прм})} \left(Z_{1\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)} \right) \times \mathbf{A}_{(\text{МУ}\alpha)}^{(\text{Мрш})} \left(Z_{3\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)}, Z_{4\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)}, M \left(\mathbf{Z}_{(\text{Мрш})}^{(\text{МУ}\alpha)} \right) \right) \times \\ &\times \mathbf{A}_{(\text{МУ}\alpha)}^{(\text{Прд})} \left(Z_{5\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)} \right) \end{aligned} \right], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\mathbf{A}_{\text{АУ}i}$, $\mathbf{A}_{\text{ЛУ}\beta}$, $\mathbf{A}_{\text{МУ}\alpha}$ – частные математические модели i -го АУ, β -го ЛУ и α -го МУ соответственно; $\mathbf{A}_{(\text{АУ}i)}^{(\text{ПрМА})}$, $\mathbf{A}_{(\text{АУ}i)}^{(\text{АП})}$, $\mathbf{A}_{(\text{АУ}i)}^{(\text{РА})}$, $\mathbf{A}_{(\text{АУ}i)}^{(\text{ПрдА})}$ – приемный, памяти, решающий и передающий агрегаты модели i -го АУ соответственно; $\left[Z_{1\text{А}}^{(\text{АУ}i)}(t), Z_{2\text{А}}^{(\text{АУ}i)}(t), Z_{\text{пам}}^{(\text{АУ}i)}(t), Z_{\text{пер}}^{(\text{АУ}i)}(t), Z_{\text{контр}}^{(\text{АУ}i)}(t) \right]$ – операторы состояния i -го АУ; $\mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрМАА})}$, $\mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрМАМ})}$, $\mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{КА})}$, $\mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрдАА})}$, $\mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрдАМ})}$ – приемные абонентский и магистральный, коммутаторный, передающие абонентский и магистральный агрегаты модели β -го ЛУ соответственно; $\left[Z_{1i}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t), Z_{2i}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t), Z_{7i}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t), Z_{8i}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t), Z_{11i}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t) \right]$ – операторы адаптации в абонентской части модели β -го ЛУ; $Z_{12i}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t)$ – оператор проверки занятости памяти агрегата $\mathbf{A}_{\text{ЛУ}}^{\text{ПрдАА}}$; $\left[Z_{3\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{4\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{10\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t) \right]$ – операторы адаптации в магистральной части модели β -го ЛУ; $\left[Z_{9\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{13\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t) \right]$ – операторы состояния элементарных каналов модели β -го ЛУ в сторону α -го УЭ; $\mathbf{A}_{(\text{МУ}\alpha)}^{(\text{Прм})}$, $\mathbf{A}_{(\text{МУ}\alpha)}^{(\text{Мрш})}$, $\mathbf{A}_{(\text{МУ}\alpha)}^{(\text{Прд})}$ – приемный, маршрутный и передающий агрегаты модели α -го МУ соответственно; $\left[Z_{1\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)}(t), Z_{3\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)}, Z_{4\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)}, Z_{5\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)}, M \left(\mathbf{Z}_{(\text{Мрш})}^{(\text{МУ}\alpha)} \right) \right]$ – операторы состояния модели α -го МУ; \mathfrak{M} – знак системы множеств элементов (агрегатов); « \times » – знак прямого произведения множеств, составляющих агрегаты частных математических моделей.

Структурный синтез с учетом принятой в [2, 7] агрегативной модели системы связи включает определение состава, перечней типовых элементов, способов взаимодействия (связей) в подсетях (локальных и магистральных), ТКС в целом и математически представляется в виде

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{ТКС}} &= \mathfrak{M}(\mathbf{M}_{\text{ОЛП}} \cup \mathbf{M}_{\text{МП}}) \Big|_{\mathbf{A}_{\text{ТКС}}^W}, \\ \mathbf{M}_{\text{ОЛП}} &= \mathfrak{M}[(\mathbf{A}_{\text{АУ1}} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{АУ}i} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{АУФ}}) \cup (\mathbf{A}_{\text{ЛУ1}} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{ЛУ}i} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{ЛУЛ}})] \Big|_{\mathbf{A}_{\text{адр, Аком}}}, \\ \mathbf{M}_{\text{МП}} &= \mathfrak{M}(\mathbf{A}_{\text{МУ1}} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{МУ}\alpha} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{МУЕ}}) \Big|_{\mathbf{A}_{\text{мрш}}}, \\ W_{\text{эл } ij}(t) &= \min(\min W_{\text{ЛУ}}(t), \min W_{\text{МУ}}(t), \min C_{\text{шк}}(t)), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\mathbf{M}_{\text{ОЛП}}$ – модель ОЛП (множество СУ локальных подсетей), определяемая частными математическими моделями выражения (1), коммутационной $\mathbf{A}_{\text{ком}}$ и адресной $\mathbf{A}_{\text{адр}}$ матрицами (таблицами); $\mathbf{M}_{\text{МП}}$ – модель МП (множество СУ магистральной подсети), определяемая частной математической моделью выражения (1) и маршрутной матрицей (таблицей) $\mathbf{A}_{\text{мрш}}$; $W_{\text{эл } ij}(t)$ – пропускная способность ij -го элементарного канала связи [7]; $\min W_{\text{ЛУ}}(t) = \min[W_{\text{ЛУ1}}(t), \dots, W_{\text{ЛУЛ}}(t)]$ – минимальная пропускная способность множества ЛУ, выделяемая ij -му элементарному каналу связи; $\min W_{\text{МУ}}(t) = \min[W_{\text{МУ1}}(t), \dots, W_{\text{МУЕ}}(t)]$ – минимальная пропускная способность множества МУ, выделяемая ij -му элементарному каналу связи; $\min C_{\text{шк}}(t) = \min[C_{\text{шк } 12}(t), \dots, C_{\text{шк } (N-1)N}(t)]$ – минимальная пропускная способность ШКС между смежными СУ.

Выражения (1) и (2) структурно-параметрического синтеза модели ТКС применяются при рассмотрении комбинированной адаптации ее к отказам УЭ.

В процессе синтеза (см. рис. 1) АТКС осуществляется:

параметрическая адаптация в СУ беспроводной системы связи при низкой степени отказов (до 10 %) узловых элементов и ограничениях на пропускные способности ШКС;

адаптация структуры ТрС сети при средней степени отказов (от 10 до 30 %) узловых элементов и ограничениях на ресурсные затраты по количеству многофункциональных устройств связи;

функциональная адаптация элементов ТКС с учетом результатов проведения структурно-параметрической адаптации при высокой степени отказов (от 30 до 50 %) узловых элементов.

Эффективность функционирования полученной при использовании методики структурно-параметрического синтеза адаптивной системы связи проверялась в процессе проведения имитационного эксперимента с применением ранее полученных в [2] данных натурального эксперимента на сегменте сети широкополосного беспроводного доступа.

Синтез модели телекоммуникационной сети со структурно-параметрической (комплексной) адаптацией. Структурно-параметрическая (комплексная) адаптация ТКС возможна при рассмотрении целенаправленного изменения параметров элементов системы связи с учетом проведения структурной адаптации ТрС сети.

В качестве критериев структурно-параметрической (комплексной) адаптации выбирались:

при осуществлении параметрической адаптации – максимальная пропускная способность p -го УЭ: $W_{pp} \Big|_{p \in (1, (\Lambda + E))} \rightarrow \max W_{pp} \Big|_{p \in (1, (\Lambda + E))}$;

при осуществлении структурной адаптации – минимально необходимое количество резервных (избыточных) УЭ ТрС сети: $(\Delta\Lambda + \Delta E) \rightarrow \min$.

Необходимо также отметить и то, что экспериментальные данные, полученные при исследовании сетей широкополосной радиосвязи на основе стандартов Wi-Fi [8], показали явную зависимость времени обработки пакетов сообщения от внедрения различных способов адаптации. В частности, применение эффективных алгоритмов адаптации (как параметрических, так и структурных) позволило сократить время нахождения информационных данных в широкополосных устройствах связи в несколько раз.

Параметрическая адаптация ТКС заключается в последовательном изменении во времени операторов состояний СУ системы связи в основном с целью уменьшения последствий воздействия преднамеренных помех (низкая степень отказа узловых элементов сети).

Последовательность адаптивного определения параметров ТКС осуществляется в следующем порядке:

1. Ввод исходных данных проведения параметрического синтеза: определение внутренних параметров (операторов состояний) частных математических моделей СУ (см. выражение (1)) в момент времени t_0 ; с учетом выбранной структуры ТКС установление фактических пропускных способностей ШКС; выбор ограничений при проведении параметрической адаптации ТКС – значений матриц максимальных пропускных способностей ШКС и количества алгоритмов параметрической адаптации.

2. Проверка ресурсов, выделяемых для проведения параметрической адаптации ТКС, основывается на сравнении текущих откорректированных пропускных способностей ШКС относительно заданных в ограничениях.

Математически указанный подпроцесс сравнения пропускных способностей имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} & \forall (\mathbf{A}_{\text{МУ}\alpha}, \alpha = \overline{1, \text{E}}), \exists \left(\left(\|a_{ij}\| \in \mathbf{A}_{\overline{W}(\text{МУ})}^{\text{ТКС}}, i = \overline{1, \text{E}}; j = \overline{1, \text{E}} \right) \wedge \left(\|r_{ml}\| \in \mathbf{R}_{\text{E}}^{\text{max}}, m = \overline{1, \text{E}}; l = \overline{1, \text{E}} \right) \right) : \\ & : \left\{ \|r_{ml}\| \geq \|a_{ij}\|, m = l, i = j \right\}, \\ & \forall (\mathbf{A}_{\text{ЛУ}\beta}, \beta = \overline{1, \Lambda}), \exists \left(\left(\|a_{ug}\| \in \mathbf{A}_{\overline{W}(\text{ЛУ})}^{\text{ТКС}}, u = \overline{1, \Lambda}; g = \overline{1, \Lambda} \right) \wedge \left(\|r_{nb}\| \in \mathbf{R}_{\Lambda}^{\text{max}}, n = \overline{1, \Lambda}; b = \overline{1, \Lambda} \right) \right) : \\ & : \left\{ \|r_{nb}\| \geq \|a_{ug}\|, n = u, b = g \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3. Из заданного перечня алгоритмов (способов) параметрической адаптации ТКС выбирается последовательно наиболее эффективный по критерию обеспечения наименьшей задержки пакета сообщения в сети:

$$\left. \begin{aligned} & \forall \left(\left(\mathbf{A}_{\text{МУ}\alpha}, \alpha = \overline{1, \text{E}} \right) \wedge \left(\mathbf{A}_{\text{ЛУ}\beta}, \beta = \overline{1, \Lambda} \right) \wedge \left(\mathbf{A}_{\text{АУ}i}, i = \overline{1, \Phi} \right) \right), \exists (\zeta_{\text{пар.}c} \in \text{P}_{\text{пар}}) : \\ & : \left\{ \left\langle \tau(\mathbf{Z}_{\text{ЛУ}\beta}(\Delta t_{\text{пар.}c})) < \tau(\mathbf{Z}_{\text{ЛУ}\beta}(t_0)) \right\rangle \wedge \left\langle \tau(\mathbf{Z}_{\text{МУ}\alpha}(\Delta t_{\text{пар.}c})) < \tau(\mathbf{Z}_{\text{МУ}\alpha}(t_0)) \right\rangle \right\} \wedge \\ & \wedge \left\langle \tau(\mathbf{Z}_{\text{АУ}i}(\Delta t_{\text{пар.}c})) < \tau(\mathbf{Z}_{\text{АУ}i}(t_0)) \right\rangle \left(V_{\text{инф.ЛУ}\beta}(t_0 + \Delta t_{\text{пар.}c}) = \text{const} \right) \wedge \\ & \wedge \left(V_{\text{инф.МУ}\alpha}(t_0 + \Delta t_{\text{пар.}c}) = \text{const} \right) \wedge \left(V_{\text{инф.АУ}i}(t_0 + \Delta t_{\text{пар.}c}) = \text{const} \right) \left. \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\zeta_{\text{пар.}c}$ – c -й алгоритм параметрической адаптации из множества $\text{P}_{\text{пар}}$; $\tau(\mathbf{Z}_{\text{СУ}}(t_{\text{пар.}c}))$ – время, затрачиваемое на обработку пакетов в СУ с учетом осуществления параметрической адаптации; $\tau(\mathbf{Z}_{\text{СУ}}(t_0))$ – время, затрачиваемое на обработку пакетов сообщений в СУ без учета параметрической адаптации; $\mathbf{Z}_{\text{АУ}i}(t)$, $\mathbf{Z}_{\text{ЛУ}\beta}(t)$, $\mathbf{Z}_{\text{МУ}\alpha}(t)$ – обобщенные операторы внутреннего состояния АУ, ЛУ и МУ соответственно [2, 7]; $\Delta t_{\text{пар.}c}$ – время проведения цикла параметрической адаптации; $V_{\text{инф.АУ}i}(t_0 + \Delta t_{\text{пар.}c})$, $V_{\text{инф.ЛУ}\beta}(t_0 + \Delta t_{\text{пар.}c})$, $V_{\text{инф.МУ}\alpha}(t_0 + \Delta t_{\text{пар.}c})$ – объем информационных данных (пакетов), обрабатываемых i -м АУ, β -м ЛУ и α -м МУ соответственно за время $\Delta t_{\text{пар.}c}$.

В выражении (4) в состав кроме обобщенных операторов внутреннего состояния СУ включены дополнительные компоненты, учитывающие механизм параметрической адаптации. Ограничением для выбора определенного способа (правила, алгоритма) адаптации является время обработки информационных данных. Иными словами, применение дополнительных операторов адаптации не только не должно ухудшить пропускную способность СУ (увеличить время нахождения пакета), а наоборот увеличить этот показатель.

В качестве основных алгоритмов (способов) параметрической адаптации ТКС могут выступать:

1. *Способ изменения назначения пакета.* В рамках параметрической адаптации доля служебных пакетов изменяется в зависимости от выбора с учетом структурной адаптации протоколов маршрутизации. То есть различные маршрутные алгоритмы отличаются затратами на служебную информацию. В нормальном режиме эксплуатации сети выбирается необходимая пропорция данных пакета сообщения [4], обеспечивающая передачу необходимых объемов информации за допустимое время.

2. *Оптимальное сочетание методов кодирования, модуляции, расширения спектра и обработки сигнала* [1]. Это достигается за счет применения на различных этапах функционирования ТКС (с отказами и без отказов УЭ) определенных протоколов сетевого, канального и физическо-го уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМОС) (например, протоколов случайного множественного доступа (СМД) P-ALOHA, S-ALOHA, CSMA/CD и т. д.) [9].

Пропускная способность ШКС локальной подсети (ЛП) в выражении (2) при использовании различных протоколов СМД равна

$$C_{\text{ШКС}}(t) = \begin{cases} C_{\text{max}}(t)e^{-2C_{\text{max}}(t)}P_{\text{пр}} & \text{при P-ALOHA,} \\ C_{\text{max}}(t)e^{-C_{\text{max}}(t)}P_{\text{пр}} & \text{при S-ALOHA,} \end{cases} \quad (5)$$

где $C_{\text{max}}(t)$ – номинальная (максимальная по Шеннону) пропускная способность ШКС в момент времени t ; $P_{\text{пр}}$ – вероятность правильного приема пакета данных.

Для повышения пропускной способности ШКС выражения (5) необходимо использовать модификации *адаптивного протокола* с захватом сигнала CSMA/CD.

3. *Адаптивная борьба с интермодуляционными шумами* (устранение влияния других станций на базовую станцию) – автоматический контроль и регулирование мощности излучаемого сигнала [4].

4. *Адаптивная процедура выбора АУ локальной подсети*. Физический смысл адаптивной процедуры выбора регистрации абонентов состоит в том, что АУ, находящиеся на пересечении зон обслуживания нескольких ЛУ, регистрируются на той точке доступа, где обеспечивается наилучший прием радиосигнала. При равенстве дистанций связи регистрация осуществляется в ЛП с наименьшим количеством АУ.

В случае нахождения абонентов на пересечение зон обслуживания нескольких ЛУ выполняется адаптивная процедура выбора абонентским устройством ЛУ:

$$\exists (S_{\beta}, S_{(\beta+1)}), \forall [AУ_i \in (S_{\beta}, S_{(\beta+1)})]: \begin{cases} d_{\beta i} < d_{(\beta+1)i} \Rightarrow AУ_i \in ЛУ_{\beta}; \\ d_{\beta i} > d_{(\beta+1)i} \Rightarrow AУ_i \in ЛУ_{(\beta+1)}; \\ d_{\beta i} = d_{(\beta+1)i} \Rightarrow \begin{cases} AУ_i \in ЛУ_{\beta}, & \text{при } n_{ЛУ_{\beta}}^{AУ} < n_{ЛУ_{(\beta+1)}}^{AУ}; \\ AУ_i \in ЛУ_{\beta}, & \text{при } n_{ЛУ_{\beta}}^{AУ} > n_{ЛУ_{(\beta+1)}}^{AУ}, \end{cases} \end{cases}$$

где $S_{\beta}, S_{(\beta+1)}$ – зона обслуживания β -го и $(\beta+1)$ -го смежных ЛУ соответственно; $d_{\beta i} = \sqrt{(x_{\beta} - x_i)^2 + (y_{\beta} - y_i)^2}$ – расстояние между i -м АУ и β -м ЛУ; (x_{β}, y_{β}) – координаты β -го ЛУ в прямоугольной системе координат; (x_i, y_i) – координаты i -го АУ в прямоугольной системе координат; $d_{(\beta+1)i} = \sqrt{(x_{(\beta+1)} - x_i)^2 + (y_{(\beta+1)} - y_i)^2}$ – расстояние между i -м АУ и $(\beta+1)$ -м ЛУ; $(x_{(\beta+1)}, y_{(\beta+1)})$ – координаты $(\beta+1)$ -го ЛУ; $n_{ЛУ_{\beta}}^{AУ}, n_{ЛУ_{(\beta+1)}}^{AУ}$ – количество зарегистрированных абонентских устройств на β -м и $(\beta+1)$ -м ЛУ соответственно.

Что касается *структурно-параметрической (комплексной) адаптации*, то в процессе ее проведения последовательно во времени изменяются элементный состав подсетей и порядок взаимодействия между СУ. Порядок проведения адаптации в рамках параметрического синтеза приведен ранее в статье, поэтому далее более подробно остановимся на структурной адаптации.

Порядок проведения структурной адаптации с учетом параметрической включает способы (алгоритмы) определения рационального состава подсетей, в основном с целью замены (добавления) вышедших из строя (отказавших) СУ и восстановления целостности связей в ТРС сети. Также в качестве резервных УЭ могут выступать устройства, размещенные как на мобильных наземных (колесном и гусеничном автотранспорте), так и воздушных (пилотируемых и беспилотных летальных аппаратах) объектах.

В качестве основных *алгоритмов (способов) структурной адаптации* ТКС могут выступать:

1. В зависимости от состояния СУ рациональное использование (чередование) модифицированных детерминированных и поисковых методов распределения потоков внутри ТКС

(например, методы Флойда, Дейкстры, квазиминоров и обмена минимальными векторами весов) в составе процедур повышения надежности, обеспечивающих доставку пакетов сообщений по нескольким независимым маршрутам [10]. При этом выбор определенного способа маршрутизации в ТКС $M(\mathbf{Z}_{(Mrш)}^{(TKC)})$ основывается на уменьшении среднего времени $\tau_{3.T}$ передачи тестовых пакетов сообщений в сети:

$$M(\mathbf{Z}_{(Mrш)}^{(TKC)}) = \left[\begin{array}{l} \exists \langle \rho_{алг.k} \subset M(\mathbf{Z}_{(Mrш)}^{(M\sigma)}) \rangle \wedge \langle \mathbf{B}_{инф.s} \subset M(\mathbf{Z}_{(Mrш)}^{(M\sigma)}) \rangle : \\ \text{при } \langle G(\mathbf{M}\sigma) \in G(\mathbf{M}_{TKC}) \rangle \wedge \langle \tau_{3.T} \leq \tau_{пор.k} \rangle \end{array} \right], \quad (6)$$

где $\rho_{алг.k}$ – k -й модифицированный алгоритм нахождения кратчайшего маршрута между сетевыми устройствами $M\sigma$ -й подсети; $M(\mathbf{Z}_{(Mrш)}^{(M\sigma)})$ – маршрутный алгоритм $M\sigma$ -й подсети; $\mathbf{B}_{инф.s}$ – s -я информационная матрица; $G(\mathbf{M}\sigma)$ – структура $M\sigma$ -й подсети; $\tau_{пор.k}$ – пороговое время передачи пакета в подсети, которое соответствует $\rho_{алг.k}$ -му алгоритму.

Выражение (6) определяет порядок выбора рационального алгоритма распределения внутренних потоков пакетов сообщений в ТКС с учетом состояния подсетей, характеризующихся различными информационными матрицами $\mathbf{B}_{инф.s}$ (например, аккордной матрицей, матрицей весов и т. п. [10]) и собственными алгоритмами $M(\mathbf{Z}_{(Mrш)}^{(M\sigma)})$ нахождения кратчайших путей между СУ.

2. Использование рациональной избыточности узловых элементов ТрС сети. Рациональная избыточность структуры ТКС $G(\mathbf{M}_{TKC})$ достигается за счет анализа состояния элементов матриц $\mathbf{A}_{\Psi}^{УЭ}$

$$G(\mathbf{M}_{TKC}) = \left\{ \begin{array}{l} \forall (\mathbf{A}_{ЛУ\beta}, \beta = \overline{1, \Lambda}), \exists (\psi_{ЛУ\beta} \in \mathbf{A}_{\Psi}^{УЭ}) : G(\mathbf{M}_{ОЛП} / \mathbf{A}_{ЛУ\beta}) \text{ при } [(\Lambda \leq \max \Lambda) \wedge \\ \wedge (W_{ЛУ\beta}(t) < W_{ЛУ\text{доп}}, W_{ЛУ\beta}(t) \in \mathbf{A}_{W(ЛУ)}^{TKC}) \wedge (\Delta\Lambda - 1)]; \\ \forall (\mathbf{A}_{МУ\alpha}, \alpha = \overline{1, E}), \exists (\psi_{МУ\alpha} \in \mathbf{A}_{\Psi}^{УЭ}) : G(\mathbf{M}_{МП} / \mathbf{A}_{МУ\alpha}) \text{ при } [(E \leq \max E) \wedge \\ \wedge (W_{МУ\alpha}(t) < W_{МУ\text{доп}}, W_{МУ\alpha}(t) \in \mathbf{A}_{W(МУ)}^{TKC}) \wedge (\Delta E - 1)]; \\ \forall (\mathbf{A}_{МУ\beta}, \beta = \overline{1, \Delta E}), \exists (G(\mathbf{M}_{МП})) : \deg[\mathbf{A}_{МУ\beta} \in G(\mathbf{M}_{МП})] \geq 2, \end{array} \right. \quad (7)$$

где $W_{ЛУ\text{доп}}$ – допустимая пропускная способность ЛУ, при которой обеспечивается эффективная передача информационных данных как в сторону зарегистрированных АУ, так и в сторону МП; $W_{МУ\text{доп}}$ – допустимая пропускная способность МУ, при которой обеспечивается эффективная передача данных между смежными УЭ; «/» – знак добавления УЭ; $G(\mathbf{M}_{МП})$ – структура МП; $\mathbf{A}_{МУ\beta}$ – модель резервного МУ.

Физический смысл выражения (7) заключается в том, что при отказе (выводе из строя) УЭ значительно уменьшается его пропускная способность. Последствия преднамеренных негативных воздействий могут быть устранены за счет добавления (замены) соответствующих УЭ резервными. При этом структурные изменения в МП должны обеспечить прохождение пакетов сообщений не менее чем по двум независимым маршрутам.

Процесс выбора типа (воздушного или наземного базирования) резервных УЭ носит адаптивный характер для структур ОЛП и МП:

$$G(\mathbf{M}_{ОЛП}) = \left\{ \begin{array}{l} \langle \forall (\mathbf{A}_{ЛУ\beta}, \beta = \overline{1, \Lambda}), \exists (\mathbf{A}_{ЛУ\beta}) : \mathbf{A}_{ЛУ\beta} \in P(\mathbf{A}_{ЛУ\text{наз}}) \rangle \\ \text{при } \langle D_{пр.св.\beta} \leq M(d_{св.\beta} (P_{прм} \geq P_{порог})) \rangle; \\ \langle \forall (\mathbf{A}_{ЛУ\beta}, \beta = \overline{1, \Lambda}), \exists (\mathbf{A}_{ЛУ\beta}) : \mathbf{A}_{ЛУ\beta} \in P(\mathbf{A}_{ЛУ\text{возд}}) \rangle \\ \text{при } \langle D_{пр.св.\beta} > M(d_{св.\beta} (P_{прм} \geq P_{порог})) \rangle, \end{array} \right.$$

$$G(\mathbf{M}_{МП}) = \begin{cases} \left\langle \forall (\mathbf{A}_{МУ\alpha}, \alpha = \overline{1, E}), \exists (\mathbf{A}_{МУ\beta}) : \mathbf{A}_{МУ\beta} \in P(\mathbf{A}_{МУ\text{наз}}) \right\rangle \\ \text{при } \left\langle D_{пр.св.\beta} \leq M(d_{св.\alpha} (P_{прм} \geq P_{порог})) \right\rangle; \\ \left\langle \forall (\mathbf{A}_{МУ\alpha}, \alpha = \overline{1, E}), \exists (\mathbf{A}_{МУ\beta}) : \mathbf{A}_{МУ\beta} \in P(\mathbf{A}_{МУ\text{возд}}) \right\rangle \\ \text{при } \left\langle D_{пр.св.\alpha} > M(d_{св.\alpha} (P_{прм} \geq P_{порог})) \right\rangle, \end{cases} \quad (8)$$

где $P(\mathbf{A}_{ЛУ\text{наз}})$, $P(\mathbf{A}_{ЛУ\text{возд}})$ – множества резервных наземных и воздушных ЛУ соответственно; $P(\mathbf{A}_{МУ\text{наз}})$, $P(\mathbf{A}_{МУ\text{возд}})$ – множества резервных наземных и воздушных МУ соответственно; $D_{пр.св.\beta}$, $D_{пр.св.\alpha}$ – дальность прямой видимости между смежными УЭ и заменяемым (резервируемым) ЛУ и МУ соответственно; $M(d_{св.\beta} (P_{прм} \geq P_{порог}))$, $M(d_{св.\alpha} (P_{прм} \geq P_{порог}))$ – среднее значение дистанции уверенной связи (при превышении мощности в точке приема сигнала $P_{прм}$ над пороговым $P_{порог}$) между смежными взаимодействующими СУ и заменяемым (резервируемым) ЛУ и МУ соответственно.

Процедура, представленная выражением (8), позволяет за счет изменения дальности прямой видимости более эффективно использовать резервные средства связи, обеспечивающие уверенный прием широкополосных радиосигналов на значительных дистанциях связи.

Синтез модели самоорганизующейся телекоммуникационной сети. Для завершения комбинированной адаптации к отказам узловых элементов высокой интенсивности проводится процедура функциональной адаптации по результатам структурно-параметрической.

Функциональная адаптация элементов ТКС осуществляется тогда, когда количество УЭ исчерпано, а алгоритмы параметрической адаптации не позволяют обеспечить эффективную передачу данных от АУ – формирователей сообщений ($\mathbf{A}_{УФС}$) к АУ – получателям сообщения ($\mathbf{A}_{УПС}$). При этом для проведения функциональной адаптации выбирается группа тех элементов, где наименьшая пропускная способность элементарного канала $W_{эл\ ij}(t)$, то есть путь π_{ik} между $\mathbf{A}_{У_i}$ ($\mathbf{A}_{УФС}$) и $\mathbf{A}_{У_k}$ ($\mathbf{A}_{УПС}$), через который проходит ij -логический канал.

Математически функциональную адаптацию можно представить в следующем виде:

$$\xi(\mathbf{M}_{ТКС}) = \begin{cases} \left\langle \xi(\mathbf{A}_{АУ_i}) / \xi_k(\mathbf{A}_{ЛУ\beta}) \right\rangle \text{ при } \left\langle G(\mathbf{M}_{ОЛП}) \setminus \mathbf{A}_{ЛУ\beta} \right\rangle \wedge \left\langle \mathbf{A}_{АУ_i} \in G(\mathbf{M}_{ЛУ\beta}) \right\rangle, \\ \left\langle \xi(\mathbf{A}_{ЛУ_j}) / \xi_m(\mathbf{A}_{МУ\alpha}) \right\rangle \text{ при } \left\langle G(\mathbf{M}_{МП}) \setminus \mathbf{A}_{МУ\alpha} \right\rangle \wedge \left\langle \mathbf{A}_{ЛУ_j} \cap \mathbf{A}_{МУ\alpha} \right\rangle, \end{cases} \quad (9)$$

где $\xi(\mathbf{M}_{ТКС})$ – множества функций, выполняемых ТКС; $\xi(\mathbf{A}_{АУ_i})$, $\xi(\mathbf{A}_{ЛУ_j})$ – множества функций, выполняемых i -м АУ и j -м ЛУ соответственно; $\xi_k(\mathbf{A}_{ЛУ\beta})$ – k -я функция β -го ЛУ; $\xi_m(\mathbf{A}_{МУ\alpha})$ – m -я функция α -го МУ; $G(\mathbf{M}_{ЛУ\beta})$ – структура β -й локальной подсети; « \setminus » – знак удаления.

Первая строка правой части выражения (9) определяет порядок передачи части функций между элементами внутри локальной подсети, а вторая строка – между разнородными элементами локальной и магистральной подсетей. При этом передача функций осуществляется между смежными СУ, то есть физически – между устройствами, непосредственно обменивающимися служебными пакетами.

Таким образом, рациональное и последовательное применение алгоритмов комбинированной адаптации в условиях высокой интенсивности отказов узловых элементов наделяет ТКС следующими свойствами самоорганизации с характерными признаками [11]:

1. Сетевые устройства системы связи сами участвуют в управлении сетью.
2. Сетевые устройства взаимодействуют по средствам обмена служебными данными как при передаче информационных сообщений ИУС, так и в процессе адаптации (самоорганизации).
3. В процессе преднамеренных воздействий на систему связи сетевые устройства (подсети) формируют правила, обеспечивающие необходимые условия взаимодействия элементов ИУС.

Оценка эффективности функционирования адаптивной ТКС, построенной с помощью предложенной методики структурно-параметрического синтеза, осуществлялась по результатам проведения имитационного моделирования (эксперимента) с математическими моделями существующей и перспективной ТКС ИУС.

Сравнительные результаты имитационного моделирования беспроводной телекоммуникационной сети с пакетной коммутацией. Для оценки эффективности предложенной методики синтеза АТКС проводился имитационный эксперимент (ИЭ).

В процессе проведения эксперимента с математическими моделями ТКС применялся метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) [12], который предполагает многократное воспроизведение (имитацию) процессов обмена (передачи) пакетами сообщений между сетевыми устройствами с сохранением их порядка следования по времени с учетом случайных условий функционирования подсетей.

Математические модели ТКС изучались с использованием возможностей специального программного пакета MatLab. В качестве исследуемой структуры ТКС рассматривалась перспективная система связи, построенной на средствах широкополосной радиосвязи [8], которые должны обеспечить своевременную передачу видеосообщений между элементами ИУС.

В зависимости от используемого телекоммуникационного оборудования и на основании работы [8] нами выбрана средняя скорость в элементарных (логических) каналах ТКС:

достаточная $\bar{W}_{\text{порог}}$ (2,5 Мбит/с) – для мобильных автоматизированных рабочих мест (МАРМ) при обмене речевыми, видеосообщениями и данными. АТКС при уменьшении $\bar{W}_{\text{ТКС}}$ ниже $\bar{W}_{\text{порог}}$ системой управления принимается решение о переходе на более высокий уровень адаптации;

необходимая \bar{W}_n (2 Мбит/с) – МАРМ при приеме видеоданных от оптико-электронных средств разведки в режиме реального времени.

Имитационное моделирование АТКС проводилось поэтапно в условиях изменения:

количества функционирующих абонентских устройств при постоянных размерах зоны обслуживания и без учета отказов элементов сети;

интенсивности отказов узловых элементов при фиксированных значениях размеров зоны обслуживания и количества абонентских устройств сети.

Для выбранных значений доверительной вероятности $\alpha = 95$ и точности оценки $\varepsilon = 0,05$ получено число реализаций ИЭ (количество испытаний), которое составило более $N = 1552$ [12].

По результатам первого этапа ИЭ в условиях имитации отказов УЭ при фиксированной площади зоны обслуживания ($S_{\text{ТКС}} = 45 \text{ км}^2$) и с учетом обеспечения необходимой \bar{W}_n (более 2 Мбит/с) в существующей ТКС за значение максимального количества абонентских устройств выбрано число 12.

Экспериментальные данные второго этапа ИЭ показали, что математическая модель перспективной АТКС средних масштабов (от 10 до 60 АУ) (рис. 2, кривая 2) в меньшей степени подвержена отказам узловых элементов, чем модель существующей ТКС (рис. 2, кривая 1).

В модели АТКС сохраняется необходимая \bar{W}_n средняя пропускная способность (2 Мбит/с) при выходе из строя (отказе) до 40 % узловых элементов ТрС сети (рис. 2, точка А). При этом в результате увеличения внутри сети трафика служебной информации время реакции алгоритма комбинированной адаптации ($\Delta t_{\text{реак.комб}}$) больше, чем при параметрической и комплексной (структурно-параметрической) адаптациях ($\Delta t_{\text{реак.парам}}$, $\Delta t_{\text{реак.компл}}$) (см. рис. 2). Также временной эффект $\Delta t_{\text{компл.эф}}$ от проведения комплексной адаптации выше в сравнении с параметрической $\Delta t_{\text{парам.эф}}$ и комбинированной $\Delta t_{\text{комб.эф}}$ адаптациями по причине рационального использования резервных УЭ.

В процессе проведения ИЭ нами было выяснено, что устойчивость к отказам элементов модели перспективной АТКС достигается за счет уменьшения времени задержки обработки пакетов сообщений в УЭ при рациональном выборе операторов адаптации частных моделей, структуры подсетей ТрС и изменения функций СУ.

Относительная оценка пропускной способности моделей ТКС (до 12 АУ), согласно данным рис. 2, при различной интенсивности отказов узловых элементов приведена в таблице.

Относительная оценка пропускной способности телекоммуникационной сети в зависимости от интенсивности отказов узловых элементов

Relative estimation of throughput of a telecommunication network depending on failure rate of central elements

| Измеряемые параметры | Интенсивность отказов УЭ, % | | | | |
|--|-----------------------------|---------|-------|---------|-------|
| | низкая | средняя | | высокая | |
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 45 |
| $\bar{W}_{\text{ТКС}}$, Мбит/с | 2,2 | 0,55 | 0,102 | 0,024 | 0,024 |
| $\bar{W}_{\text{АТКС}}$, Мбит/с | 2,62 | 2,56 | 2,1 | 2,1 | 0,6 |
| $\Delta_{\text{отн}} = \bar{W}_{\text{АТКС}} / \bar{W}_{\text{ТКС}}$ | 1,19 | 4,65 | 20,58 | 87,5 | 25 |

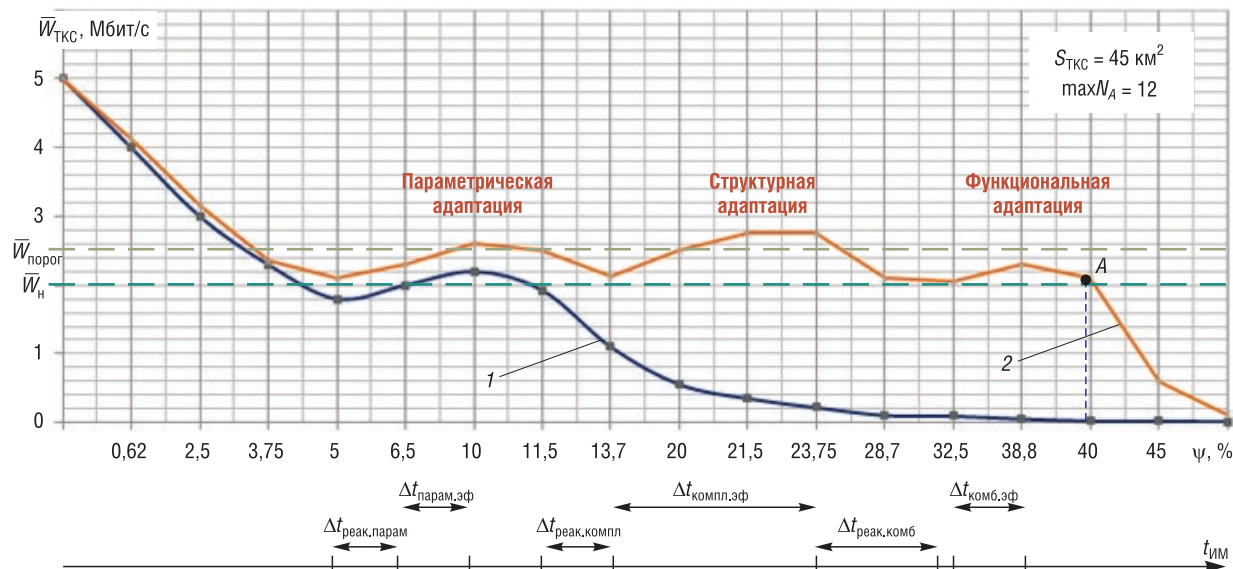


Рис. 2. График зависимости пропускной способности сети связи от интенсивности отказов узловых элементов в транспортной составляющей телекоммуникационной сети при $\max N_A = 12$ и $S_{ТКС} = 45 \text{ км}^2$: 1 – модель существующей телекоммуникационной сети, 2 – модель перспективной адаптивной телекоммуникационной сети

Fig. 2. The schedule of dependence of throughput of a communication network from failure rate of central elements in transport component of a telecommunication network at $\max N_A = 12$ and $S_{ТКС} = 45 \text{ км}^2$: 1 – model of an existing telecommunication network, 2 – model perspective adaptive a telecommunication network

Из данных таблицы следует, что применение комбинированной адаптации в беспроводной ТКС позволяет повысить пропускную способность системы связи в 4–87 раз в зависимости от интенсивности отказов узловых элементов. Такой эффект может быть достигнут за счет осуществления самоорганизации на уровне сетевых устройств, непосредственной адаптации на уровне подсетей.

Следует также отметить, что динамически меняющиеся параметры и функции СУ, структура модели АТКС обеспечивали относительную стабильность информационного обмена между мобильными СУ (достаточную пропускную способность в логических каналах связи).

Заключение. Таким образом, основу представленной методики структурно-параметрического синтеза адаптивной беспроводной телекоммуникационной сети составляет комбинированная адаптация, позволяющая повысить (обеспечить требуемую) пропускную способность системы связи в условиях высокой интенсивности отказов устройств за счет добавления в структуру транспортной составляющей сети необходимого количества избыточных узловых элементов, использования альтернативных способов адресации и маршрутизации, проведения параметрической и функциональной адаптаций в сетевых элементах по критерию их максимальной пропускной способности (минимальному времени задержки пакетов). Также в ходе проведения имитационного эксперимента подтверждена гипотеза о том, что свойство самоорганизации проявляется на уровне сетевых устройств, а непосредственная адаптация может быть осуществлена на уровне подсетей (локальных и магистральных).

Список использованных источников

1. Зализко, А. Ю. Адаптация систем широкополосного абонентского радиодоступа военного назначения / А. Ю. Зализко, И. В. Филипченко // Наука и воен. безопасность. – 2013. – № 4. – С. 22–28.
2. Зализко, А. Ю. Математическая модель перспективной военной системы широкополосного радиодоступа / А. Ю. Зализко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2014. – № 3. – С. 86–97.
3. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
4. Григорьев, В. А. Передача сигналов в зарубежных информационно-технических системах / В. А. Григорьев. – СПб.: ВАС, 1998. – 440 с.
5. Разгуляев, Л. Перспективные мобильные адаптивные сети передачи информации для СВ США / Л. Разгуляев // Зарубеж. воен. обозрение. – 2008. – № 1. – С. 35–39.

6. Демин, В. Е. Боевое применение разнородных сил и средств РЭБ в общевойсковом бою / В. Е. Демин, И. И. Королев // Воен. мысль. – 2012. – № 2. – С. 34–40.
7. Математическая модель беспроводной сети передачи данных динамической информационно-управляющей системы / С. В. Кругликов [и др.] // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации: сб. тез. XVII Междунар. науч.-техн. конф. (РИНТИ-2018), Минск, 20 сент. 2018 г. – Минск, 2018. – С. 291–297.
8. Кругликов, С. В. Экспериментальные исследования подвижной сети широкополосного радиодоступа / С. В. Кругликов, А. Ю. Зализко // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – № 1. – С. 26–34.
9. Григорьев, В. А. Сети и системы радиодоступа / В. А. Григорьев. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с.
10. Основы построения систем и сетей передачи информации: учеб. пособие для вузов / В. В. Ломовицкий [и др.]. – М.: Горячая линия, 2005. – 382 с.
11. Трубецков, Д. И. Введение в теорию самоорганизации открытых систем / Д. И. Трубецков, Е. С. Мchedlova, Л. В. Красичков. – М.: Физматлит, 2005. – 221 с.
12. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.

References

1. Zalizko A. Yu., Filipchenko I. V. Adaptation of military broadband subscriber radio access systems. *Nauka i voennaya bezopasnost'* [Science and Military Security], 2013, no. 4, pp. 22–28 (in Russian).
2. Zalizko A. Yu. Mathematical model of perspective military system of broadband radio access. *Vestnik VoЕННОI akademii Respubliki Belarus'* [Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus], 2014, no. 3, pp. 86–97 (in Russian).
3. Buslenko N. P. *Simulation of Complex Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1978. 400 p. (in Russian).
4. Grigor'ev V. A. *Signal Transmission in Foreign Information Technology Systems*. St. Petersburg, VAS Publ., 1998. 440 p. (in Russian).
5. Razgulyaev L. Promising mobile adaptive information transmission networks for the United STATES. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign Military Review], 2008, no. 1, pp. 35–39 (in Russian).
6. Demin V. E., Korolev I. I. Combat use of heterogeneous forces and means of EW in combined arms combat. *Voennaya mysl'* = *Military Thought*, 2012, no. 2, pp. 34–40 (in Russian).
7. Kruglikov S. V., Filipchenko I. V., Zalizko A. Yu., Lazarenko V. E. Mathematical model of wireless data transmission network of dynamic information management system. *Razvitie informatizacii i gosudarstvennoi sistemy nauchno-tekhnicheskoi informacii: sb. tez. XVII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (RINTI-2018), Minsk, 20 sent. 2018*. [Development of Informatization and the State System of Scientific and Technical Information: Abstracts of the XVII International Scientific and Technical Conference (RINTI-2018), Minsk, 20 Sept. 2018]. Minsk, 2018, pp. 291–297 (in Russian).
8. Kruglikov S. V., Zalizko A. Yu. Experimental studies of the mobile broadband radio access network. *Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-Measuring and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 26–34 (in Russian).
9. Grigor'ev V. A. *Radio Access Networks and Systems*. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2005. 384 p. (in Russian).
10. Lomovitskii V. V., Mikhailov A. I., Shestak K. V., Shchekotikhin V. M. *Bases of Construction of Systems and Information Transfer Networks*. Moscow, Goryachaya liniya Publ., 2005. 382 p. (in Russian).
11. Trubeckov D. I., Mchedlova E. S., Krasichkov L. V. *Introduction to the Theory of Self-Organization of Open Systems*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 221 p. (in Russian).
12. Ventcel' E. S., Ovcharov L. A. *Probability Theory and Its Engineering Applications*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 480 p. (in Russian).

Информация об авторах

Кругликов Сергей Владимирович – доктор военных наук, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора по научной и инновационной работе, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

Зализко Александр Юрьевич – научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория системных проектов научно-исследовательской части, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, Минск, Республика Беларусь). E-mail: turbostok@tut.by

Information about the authors

Sergey V. Kruglikov – D. Sc. (Military), Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Deputy Director General for Scientific and Innovative Work, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

Aliaksandr Yu. Zalizka – Researcher of the Scientific-Research Part, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., Minsk, Republic of Belarus). E-mail: turbostok@tut.by