

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)
УДК 623.618.5

Поступила в редакцию 12.11.2018
Received 12.11.2018

Принята к публикации 03.12.2018
Accepted 03.12.2018

Модель беспроводной сети передачи данных динамической информационно-управляющей системы

С. В. Кругликов¹✉, И. В. Филипченко¹, А. Ю. Зализко², А. Р. Бекиш²

¹Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
✉E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

²Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлен подход к имитационному моделированию телекоммуникационной сети многофункциональной информационно-управляющей системы специального назначения. Моделирование цифровой сети связи с пакетной передачей сообщений основывается на агрегативном подходе к описанию сложных динамических систем, который в отличие от классического подхода учитывает возможность использования адаптивных свойств элементов системы и основных функций, выполняемых подвижными сетевыми узлами, а также принятые эффективные методы межэлементного взаимодействия. Адекватность полученной модели телекоммуникационной системы специального назначения проверялась в условиях перемещения по местности на реальной сети широкополосного радиодоступа.

Ключевые слова: телекоммуникационная сеть, информационно-управляющая система, агрегативный подход к имитационному моделированию, адаптивная сеть широкополосного радиодоступа, натурный эксперимент

Для цитирования. Модель беспроводной сети передачи данных динамической информационно-управляющей системы / С. В. Кругликов [и др.] // Информатика. – 2019. – Т. 16, № 1. – С. 58–74.

A model of a wireless data network of dynamic information-controlling system

Sergey V. Kruglikov¹✉, Igor V. Filipchenko¹, Alexander Y. Zalizko², Alexander R. Bekish²

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

✉E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

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

Abstract. The approach to imitation modeling the telecommunication network of multipurpose information-operating system of special purpose is presented. Modeling the digital communication network with a packet transmission of messages is based on the aggregate approach of the description of complex dynamic systems. The approach considers the possibility to use adaptive properties of system elements and the basic functions of mobile network knots, and also effective methods of inter-elements interaction. An adequacy of the model of telecommunication system was checked in real field conditions.

Keywords: telecommunication network, information and control system, aggregate approach to imitation modeling, network of a broadband radio access, full-scale experiment

For citation. Kruglikov S. V., Filipchenko I. V., Zalizko A. Y., Bekish A. R. A model of a wireless data network of dynamic information-controlling system. *Informatics*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 58–74 (in Russian).

Введение. Проектирование многофункциональных информационно-управляющих систем (МИУС) специального назначения (СН), функционирующих в реальном масштабе времени, требует применения телекоммуникационных технологий, обеспечивающих высокую пропускную способность каналов передачи данных между объектами МИУС и устойчивое функционирование (адаптацию) элементов подсистемы связи при воздействии внешних дестабилизирующих факторов [1].

Техническая сложность реализации механизма адаптации и высокая стоимость современных телекоммуникационных сетей (ТКС) не позволяют провести физический эксперимент на реальной исследуемой адаптивной сети связи с целью определения функциональных характеристик ее элементов и рациональной структуры транспортной составляющей (ТрС) сети. Поэтому для описания функций элементов и структуры сети требуется разработка универсальной комплексной имитационной модели [2], позволяющей применить полученные результаты моделирования при проектировании ТКС МИУС СН.

Комплексная имитационная модель ТКС СН – это представление в математических символах структуры МИУС СН, функций сетевых элементов системы связи и информационного взаимодействия между оконечными устройствами.

В качестве концептуальной модели ТКС СН с учетом функционирования ее в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов принята сеть смешанной структуры, включающая оконечные устройства (абонентские устройства (АУ)), узловые элементы (УЭ) с функциями коммутаторов и маршрутизаторов (локальные узлы (ЛУ) и магистральные узлы (МУ) соответственно), построенные на основе стандартов широкополосного радиодоступа с двумя взаимосвязанными уровнями взаимодействия элементов в составе ТрС сети – локальным и магистральным [3, 4].

Выбор метода математического моделирования сети связи. В настоящее время математическое моделирование сетей связи осуществляется с помощью:

- систем массового обслуживания, сетей Петри, моделей управляющих автоматов, дифференциальных моделей на элементарном уровне анализа систем [5–7];
- представления сложных технических систем на агрегативном уровне [5];
- моделей взаимодействия информационных процессов с применением математической логики, теоретико-множественного и графического представления сложных систем [8–10].

В связи с тем что ТКС СН является основным элементом системы управления, при математическом моделировании сети применим системный подход [11, 12], предполагающий последовательный переход от параметров сетевых устройств (СУ) к структурам подсетей и сети связи в целом. Такой переход осуществляется при проведении синтеза модели ТКС СН [13, 14].

Моделирование ТКС СН с помощью систем массового обслуживания приводит к итерационной процедуре проектирования сетей передачи данных. При этом по мере возрастания сложности задач исследования значительно увеличивается трудоемкость подготовки модели и повышаются требования к быстродействию и объему оперативной памяти ЭВМ [14]. В научной работе [15], связанной с методами моделирования, которые основываются на теории сетей и теории массового обслуживания, В. В. Поповский предлагает подходы предметного отражения основных свойств системы связи. Увеличение числа абонентских устройств ТКС СН, а также учет дополнительных возможностей маршрутизации и адресации для передачи сообщений различного вида усложняют построение системы дифференциальных уравнений, описывающих их работу.

Характерным признаком применения существующих моделей ТКС является также и то, что эти модели описывают функционирование в основном стационарных объектов связи на микроуровне и не учитывают ни структуры, ни функций элементов реальной сети. Что касается МИУС СН, то здесь сеть связи имеет высокую мобильность и техническую организацию. Это, в свою очередь, усложняет описание функционирования ТКС СН применяемыми моделями, так как необходимо учитывать дополнительные условия и факторы, влияющие на передачу информационных данных в ТрС исследуемой сети [16, 17].

Для разработки имитационной модели функционирования ТКС СН обязательным является использование альтернативных подходов ее математического описания. В процессе построения

комплексной имитационной модели ТКС СН необходимо учитывать сетевые параметры, характеризующие устойчивость к внешним дестабилизирующим факторам (ВДФ), а также применяемые способы адресации и маршрутизации.

Для математического описания функционирования ТКС СН целесообразно применить метод проведения имитационного моделирования на основе агрегативных систем, предложенный академиком Н. П. Бусленко [5]. При агрегативном описании система связи последовательно декомпозируется на конечное число подсистем (подсетей), сохраняя при этом связи для взаимодействия элементов ТКС. В рамках агрегативного подхода для моделирования СУ (АУ, ЛУ и МУ) используются динамические объекты, состояние которых изменяется во времени при поступлении входных сообщений от смежных элементов или оператора сети (системы мониторинга и управления сетью). Порядок и характер взаимодействия между элементами ТКС СН определяет оператор (администратор) сети с учетом принятой системы адресации и маршрутизации [5]. В качестве администратора сети могут выступать человек или комплекс программно-аппаратных средств, осуществляющие контроль и управление системой связи МИУС СН.

За показатель эффективности функционирования как элементов сети, так и телекоммуникационной системы в целом принята средняя пропускная способность сети в пакетах сообщений (битах в секунду) [18].

Описание комплексной имитационной модели беспроводной телекоммуникационной сети многофункциональной информационно-управляющей системы специального назначения. При описании агрегативной модели ТКС СН проводилась декомпозиция ее структуры по функциональному признаку подсетей на следующие части:

- локальные подсети (ЛП) в виде централизованных систем, включающих такие элементы ТКС, как точки доступа, абонентские станции и широкополосные каналы связи (ШКС), связывающие данные объекты в единую подсеть;

- магистральную подсеть (МП) в виде децентрализованной системы, представляющей собой набор беспроводных устройств с функциями маршрутизаторов, образующих каналы связи для локальных подсетей.

Декомпозиция сети в части обеспечения информационного обмена означает, что построение математической модели ТКС СН сводится к относительно независимому описанию конечного ряда моделей элементов подсетей. Взаимодействие между СУ внутри подсетей учитывается через операторов состояний агрегатов, а также алгоритмы принятой системы адресации и маршрутизации.

Для построения комплексной математической модели ТКС СН [19] используются агрегаты первого уровня, описывающие функционирование АУ; второго уровня, описывающие функционирование ЛУ, и третьего уровня, описывающие функционирование МУ.

С учетом принятой структуры ТКС СН упрощенно ее комплексная имитационная модель $\mathbf{M}_{\text{ТКС}}$ может быть представлена совокупностью подмножеств:

$$\mathbf{M}_{\text{ТКС}} = \left\langle \left(\mathbf{A}_{\text{АУ}_1}, \dots, \mathbf{A}_{\text{АУ}_\Phi} \right), \left(\mathbf{A}_{\text{ЛУ}_1}, \dots, \mathbf{A}_{\text{ЛУ}_\Lambda} \right), \left(\mathbf{A}_{\text{МУ}_1}, \dots, \mathbf{A}_{\text{МУ}_\text{E}} \right), \mathbf{R} \right\rangle, \quad (1)$$

где $\left(\mathbf{A}_{\text{АУ}_1}, \dots, \mathbf{A}_{\text{АУ}_\Phi} \right), \left(\mathbf{A}_{\text{ЛУ}_1}, \dots, \mathbf{A}_{\text{ЛУ}_\Lambda} \right), \left(\mathbf{A}_{\text{МУ}_1}, \dots, \mathbf{A}_{\text{МУ}_\text{E}} \right)$ – подмножества частных моделей АУ, ЛУ и МУ соответственно;

Φ, Λ, E – количество функционирующих АУ, ЛУ и МУ в составе ТКС СН соответственно;

\mathbf{R} – подмножество взаимосвязей (отношений) между частными моделями элементов ТКС.

Композиция (синтез) частных моделей (1) описывает интегральные свойства ТКС по функциональным принадлежностям элементов сети. При этом элементы подмножества \mathbf{R} в основном определяются параметрами ШКС, а также принятой системой адресации и маршрутизации. Включение в состав частных математических моделей параметров ШКС подмножества \mathbf{R} позволяет в сравнении с классическим подходом построения агрегативных систем сократить количество агрегатов, описывающих функционирование системы связи МИУС СН, и раскрыть механизм параметрической адаптации элементов ТКС.

Частные имитационные модели сетевых устройств телекоммуникационной сети специального назначения. Целью описания частных имитационных моделей СУ ТКС СН является выявление основных свойств процесса последовательной обработки и передачи пакетов сообщений в элементарных каналах, входящих в состав ШКС. При этом в УЭ учитывается применение различных способов параметрической адаптации [3].

Частная имитационная модель оконечного элемента ТКС описывается в виде составного агрегата АУ (рис. 1). Она включает описание [19] приемной части в виде модели приемного агрегата $\mathbf{A}_{(AU)}^{(ПрМА)}$, состояния буфера памяти в виде модели агрегата памяти $\mathbf{A}_{(AU)}^{(АП)}$, состояний управления в виде модели решающего агрегата $\mathbf{A}_{(AU)}^{(РА)}$ и передающей части в виде модели передающего агрегата $\mathbf{A}_{(AU)}^{(ПрДА)}$.

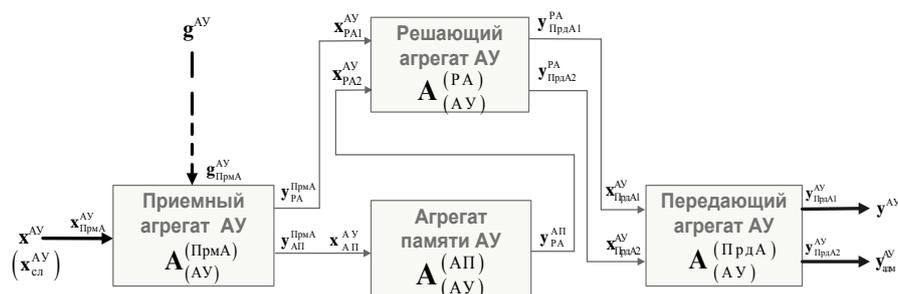


Рис. 1. Структура модели агрегата АУ

Основными функциями АУ в процессе передачи информационных сообщений в ТКС СН являются [20]:

- обеспечение взаимодействия внешних прикладных процессов (формирование и объединение пакетов сообщений);
- определение собственного состояния;
- определение адреса получателя и отправителя сообщений;
- прием и передача широкополосных сигналов с пакетами сообщений;
- определение ошибок в принятых пакетах.

Агрегат АУ характеризуется следующими операторами состояний (рис. 2):

1. Входными операторами:

$Z_{1A}^{(AY)}(t)$ – проверки уровня принимаемого сигнала $P_{\text{прм.ЛУ}}$ от смежного ЛУ в момент времени t :

$$Z_{1A}^{(AY)}(t + \tau_{\text{выб}}^{(AY)}) = \begin{cases} 1 & \text{при } P_{\text{прм.ЛУ}}(t) \geq P_{\text{необ}}; \\ 0 & \text{при } P_{\text{прм.ЛУ}}(t) < P_{\text{необ}}; \end{cases} \quad (2)$$

где $P_{\text{необ}}$ – минимальная мощность сигнала на входе приемника, обеспечивающая передачу пакетов сообщений с требуемой информационной скоростью.

$\tau_{\text{выб}}^{(AY)}$ – время, затрачиваемое на проведение выбора смежного УЭ (ЛУ);

$Z_{2A}^{(AY)}(t)$ – проверки среднего времени задержки пакета сообщения:

$$Z_{2A}^{(AY)}(t + \tau_{\text{з.пак}}) = \begin{cases} 1 & \text{при } (\tau_{\text{з}(ik)ki}(t) \leq \tau_{\text{з.доп}}) \wedge (Z_{1A}^{(AY)}(t) = 1); \\ 0 & \text{при } \tau_{\text{з}(ik)ki}(t) > \tau_{\text{з.доп}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\tau_{\text{з.пак}} = f_2(Z_{2A}^{(AY)})$ – время, затрачиваемое на проверку своевременности доставки пакета сообщения адресату.

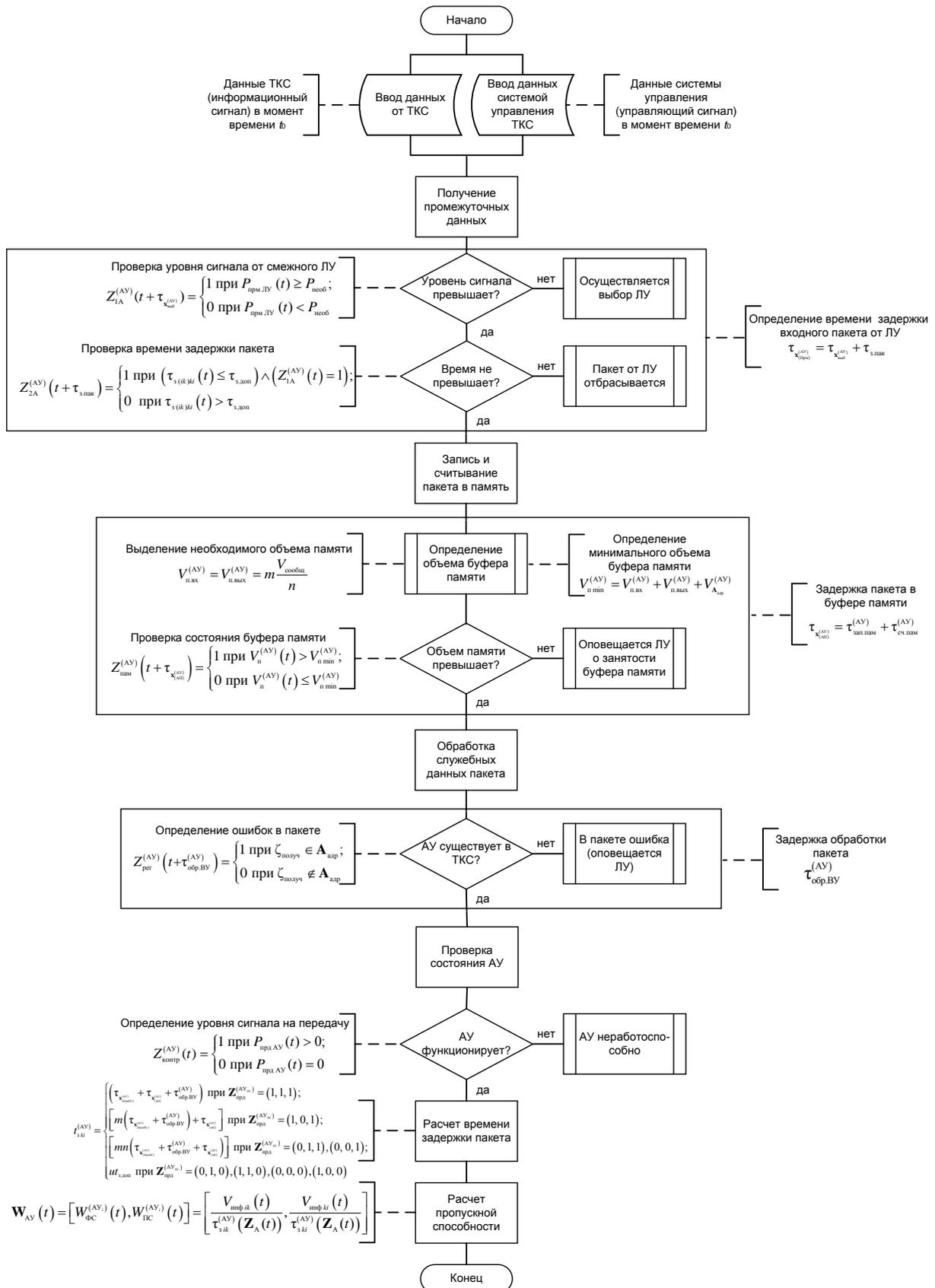


Рис. 2. Схема процесса определения пропускной способности АУ при обработке пакетов сообщений

2. Оператором $Z_{\text{пам}}^{(AY)}(t)$ состояния буфера памяти модели АУ:

$$Z_{\text{пам}}^{(AY)}\left(t + \tau_{\mathbf{A}_{\text{АП}}}^{(AY)}\right) = \begin{cases} 1 & \text{при } V_{\text{п}}^{(AY)}(t) > V_{\text{п min}}^{(AY)}; \\ 0 & \text{при } V_{\text{п}}^{(AY)}(t) \leq V_{\text{п min}}^{(AY)}, \end{cases} \quad (4)$$

где $V_{\text{п}}^{(AY)}(t) = V_{\text{инф ik}}(t) + V_{\text{инф ki}}(t) + V_{\mathbf{A}_{\text{адр}}}^{(AY)}$ – текущий объем данных, хранящихся в буфере агрегата $\mathbf{A}_{(AY)}^{(АП)}$ на момент времени t ;

$V_{\text{инф ik}}(t)$, $V_{\text{инф ki}}(t)$ – соответственно объемы выходных пакетов сообщений i -го АУ_{ФС} (АУ формирователя сообщения) и входных пакетов сообщения от удаленного k -го АУ_{ФС};

$V_{\mathbf{A}_{\text{адр}}}^{(AY)}$ – объем буфера памяти, выделяемый для хранения адресной матрицы $\mathbf{A}_{\text{адр}}$;

$\tau_{\mathbf{A}_{\text{АП}}}^{(AY)}$ – время задержки обработки принимаемых данных в агрегате памяти модели АУ.

3. Оператором дополнительного контроля $Z_{\text{рег}}^{(AY)}$ правильности ввода администратором сети входных данных:

$$Z_{\text{рег}}^{(AY)}\left(t + \tau_{\text{обр.ВУ}}^{(AY)}\right) = \begin{cases} 1 & \text{при } \zeta_{\text{получ}} \in \mathbf{A}_{\text{адр}}; \\ 0 & \text{при } \zeta_{\text{получ}} \notin \mathbf{A}_{\text{адр}}, \end{cases} \quad (5)$$

где $\zeta_{\text{получ}}$ – идентификатор АУ_{ПС} (АУ получателя сообщения);

$\tau_{\text{обр.ВУ}}^{(AY)}$ – время обработки данных информационного пакета в вычислительном элементе АУ.

4. Оператором состояния контроля функционирования АУ $Z_{\text{контр}}^{(AY)}(t)$:

$$Z_{\text{контр}}^{(AY)}(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } P_{\text{прд АУ}}(t) > 0; \\ 0 & \text{при } P_{\text{прд АУ}}(t) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где $P_{\text{прд АУ}}(t)$ – среднее значение мощности сигнала в момент времени t на выходе передающего устройства (радиомодема) АУ.

С помощью оператора (2), как и в модемах согласно рекомендаций ITU-TV.34, по результатам линейного зондирования осуществляется подстройка (адаптация) уровня мощности передачи ЛУ с учетом компенсации эхо-сигнала и поддержания необходимого отношения сигнал-шум. При превышении уровня принимаемого сигнала от смежного ЛУ значения $P_{\text{необ}}$ (см. выражение (2)) проверяется состояние среднего времени задержки пакетов сообщений $\tau_{z(i)ki}(t)$ относительного допустимого $\tau_{z, \text{доп}}$.

Частная математическая модель агрегата АУ имеет вид [19]

$$\mathbf{A}_{\text{АУ}} = \mathfrak{M} \left[\mathbf{A}_{(AY)}^{(\text{ПрМА})} \left(Z_{1A}^{(AY)}, Z_{2A}^{(AY)} \right) \times \mathbf{A}_{(AY)}^{(\text{АП})} \left(Z_{\text{пам}}^{(AY)} \right) \times \mathbf{A}_{(AY)}^{(\text{РА})} \left(Z_{\text{рег}}^{(AY)} \right) \times \mathbf{A}_{(AY)}^{(\text{ПрдА})} \left(Z_{\text{контр}}^{(AY)} \right) \right], \quad (7)$$

где \mathfrak{M} – знак системы множеств элементов (агрегатов) АУ;

\times – знак прямого произведения множеств, составляющих агрегат АУ.

С учетом операторов внутреннего состояния агрегата (2)–(6) среднее значение пропускной способности АУ находится из выражения

$$W_{AY}(t) = [W_{\Phi C}^{(AY_i)}(t), W_{\text{PC}}^{(AY_i)}(t)] = \left[\frac{V_{\text{инф } ik}(t)}{\tau_{3 ik}^{(AY)}(\mathbf{Z}_A(t))}, \frac{V_{\text{инф } ki}(t)}{\tau_{3 ki}^{(AY)}(\mathbf{Z}_A(t))} \right], \quad (8)$$

где $\mathbf{Z}_A(t) = [Z_{1A}^{(AY)}(t), Z_{2A}^{(AY)}(t), Z_{\text{пам}}^{(AY)}(t), Z_{\text{рег}}^{(AY)}, Z_{\text{контр}}^{(AY)}(t)]$ – обобщенный оператор состояния АУ.

В агрегате АУ, как и моделях УЭ, параметры ШКС определяются характеристиками радиомодемов, функционирующих на физическом уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем [8]. На примере рекомендаций ITU-TV.34 предложен подход по ускорению передачи данных [21]. Аналогично определяются внутренние состояния и средние пропускные способности агрегатов УЭ (ЛУ и МУ).

Структура частной модели ЛУ изображена на рис. 3.

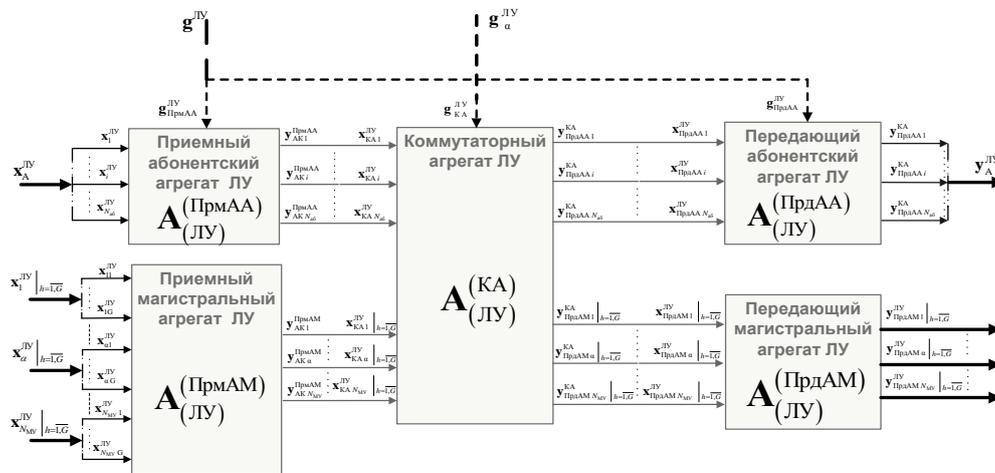


Рис. 3. Структура модели агрегата ЛУ

В целях уменьшения времени задержки обработки данных, поступающих в ЛУ от смежных элементов ТКС СН, и, следовательно, повышения пропускной способности направлений связи используется комбинация методов многостанционного доступа с параллельной обработкой данных в каждом элементарном канале.

Математическая модель агрегата ЛУ включает описание: приемной части в виде абонентского $A_{(ЛУ)}^{(ПрмАА)}$ и магистрального $A_{(ЛУ)}^{(ПрмАМ)}$ приемных агрегатов, процесса распределения пакетов сообщений в направлениях локальной и (или) магистральной подсетей в виде модели коммутационного агрегата $A_{(ЛУ)}^{(КА)}$, передающей части в виде абонентского $A_{(ЛУ)}^{(ПрдАА)}$ и магистрального $A_{(ЛУ)}^{(ПрдАМ)}$ передающих агрегатов.

Основными функциями ЛУ относительно обеспечения процесса передачи пакетов сообщений в ШКС ТКС СН являются [20]:

- определение собственного местоположения;
- распределение пакетов сообщений между локальной и внешней подсетями;
- формирование таблицы коммутации пакетов сообщений для собственной локальной подсети;
- приоритетность передачи пакетов сообщений относительно времени задержки в сети.

Операторы состояний, используемые для описания частной математической модели ЛУ [20], сформированы с учетом основных функций, выполняемых указанным узлом в системе связи.

Основными элементами параметрической адаптации в ЛУ являются операторы $Z_{1i}^{(ЛУ)}$ (проверки вероятности ошибки в одном (тестовом) из i -х элементарных каналов связи), $Z_{2i}^{(ЛУ)}$ (проверки времени задержки пакетов сообщений от i -го АУ), $Z_{3\alpha}^{(ЛУ)}$ (среднего суммарного времени передачи пакетов сообщений), $Z_{4\alpha}^{(ЛУ)}$ (состояния локального адреса удаленного АУ), $Z_{7i}^{(ЛУ)}$ (определения направления передачи пакетов сообщений, поступающих от АУ собственной локальной подсети), $Z_{8i}^{(ЛУ)}$ (определения последовательности выдачи пакетов сообщений на локальные выходы), $Z_{11i}^{(ЛУ)}$ (проверки ограничения пропускной способности в элементарном канале i -го АУ) и $Z_{10\alpha}^{(ЛУ)}$ (определения последовательности выдачи пакетов сообщений на магистральные выходы).

В общем виде модель агрегата ЛУ с учетом характеристик проходящих элементарных каналов описывается следующим образом [19]:

$$\mathbf{A}_{ЛУ} = \mathfrak{M} \left[\mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрмАА)} \left(Z_{1i}^{(ЛУ)}, Z_{2i}^{(ЛУ)} \right) \times \mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрмАМ)} \left(Z_{3\alpha}^{(ЛУ)}, Z_{4\alpha}^{(ЛУ)} \right) \times \mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(КА)} \left(Z_{7i}^{(ЛУ)}, Z_{8i}^{(ЛУ)}, Z_{9\alpha}^{(ЛУ)}, Z_{10\alpha}^{(ЛУ)} \right) \times \right. \\ \left. \times \mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрдАА)} \left(Z_{11i}^{(ЛУ)}, Z_{12i}^{(ЛУ)} \right) \times \mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрдАМ)} \left(Z_{13\alpha}^{(ЛУ)} \right) \right]. \quad (9)$$

Функционально модель ЛУ (9) разделяется на две части: абонентскую и магистральную. При этом приемные ($\mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрмАА)}$, $\mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрмАМ)}$) и передающие ($\mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрдАА)}$, $\mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(ПрдАМ)}$) агрегаты определяют внешние, а агрегат $\mathbf{A}_{(ЛУ)}^{(КА)}$ – внутренние свойства модели ЛУ при обеспечении процесса обмена пакетами сообщений в ТрС ТКС СН.

Главной частью модели ЛУ (см. рис. 3) является коммутаторный агрегат, определяющий в совокупности с граничащими агрегатами ЛУ адаптивно параметрические свойства сетевого узла ТКС СН. Модель такого агрегата обеспечивает прохождение пакетов сообщений по элементарным каналам в сторону как УЭ, так и оконечных устройств ТКС СН.

С учетом описания операторов состояния агрегатов частной математической модели (9) значение средней пропускной способности ЛУ в момент времени t находится из выражения [19]

$$W_{ЛУ}(t) = N_{аб} W_{лок}(t) + G W_{маг}(t) = N_{аб} \sum_{i=1}^{N_{аб}} \frac{V_{инф}^{(АVi)}(t)}{\tau_{з.лок i}^{(ЛУ)} \left(\mathbf{Z}_{(ад.)i}^{(ЛУ)}, \mathbf{Z}_{12i}^{(ЛУ)} \right)} + G \sum_{\alpha=1}^{N_{УЭ}} \frac{V_{инф}^{(УЭ\alpha)}(t)}{\tau_{з.маг \alpha}^{(ЛУ)} \left(\mathbf{Z}_{(ад.)\alpha}^{(ЛУ)}, \mathbf{Z}_{\alpha}^{(ЛУ)} \right)}, \quad (10)$$

где $W_{лок}(t)$, $W_{маг}(t)$ – пропускная способность, выделяемая на один элементарный канал в локальной и магистральной частях ЛУ соответственно, бит/с;

$V_{инф}^{(АVi)}(t)$ – объем пакета сообщения в сторону i -го АУ в момент времени t , бит;

$\tau_{з.лок i}^{(ЛУ)} \left(\mathbf{Z}_{(ад.)i}^{(ЛУ)}, \mathbf{Z}_{12i}^{(ЛУ)} \right)$ – время задержки пакета сообщения в сторону i -го АУ, с;

$N_{аб}$ – количество зарегистрированных АУ на одном ЛУ;

$V_{инф}^{(УЭ\alpha)}(t)$ – объем пакета сообщений в сторону α -го УЭ в момент времени t , бит;

$\tau_{з.маг \alpha}^{(ЛУ)} \left(\mathbf{Z}_{(ад.)\alpha}^{(ЛУ)}, \mathbf{Z}_{\alpha}^{(ЛУ)} \right)$ – время задержки пакета сообщений в сторону α -го УЭ, с;

$N_{УЭ}$ – количество смежных с ЛУ узловых элементов (МУ);

$\mathbf{Z}_{(ад.)i}^{(ЛУ)} = (Z_{1i}^{(ЛУ)}, Z_{2i}^{(ЛУ)}, Z_{7i}^{(ЛУ)}, Z_{8i}^{(ЛУ)}, Z_{11i}^{(ЛУ)})$ – вектор операторов адаптации в абонентской части ЛУ;

$Z_{12i}^{(ЛУ)}$ – оператор проверки занятости памяти агрегата $\mathbf{A}_{ЛУ}^{ПрдАА}$ для пакетов сообщений i -го АУ;

$\mathbf{Z}_{(ад.)\alpha}^{(ЛУ)} = (Z_{3\alpha}^{(ЛУ)}, Z_{4\alpha}^{(ЛУ)}, Z_{10\alpha}^{(ЛУ)})$ – вектор операторов адаптации в магистральной части ЛУ;

$\mathbf{Z}_{\alpha}^{(ЛУ)} = (Z_{9\alpha}^{(ЛУ)}, Z_{13\alpha}^{(ЛУ)})$ – вектор операторов определения состояния элементарных каналов в сторону α -го УЭ.

Структура частной модели МУ представлена на рис. 4. С целью исключения возможности передачи информации по заведомо неисправному (отказавшему) ШКС его контроль осуществляется в МУ как в процессе передачи информации, так и при ее отсутствии.

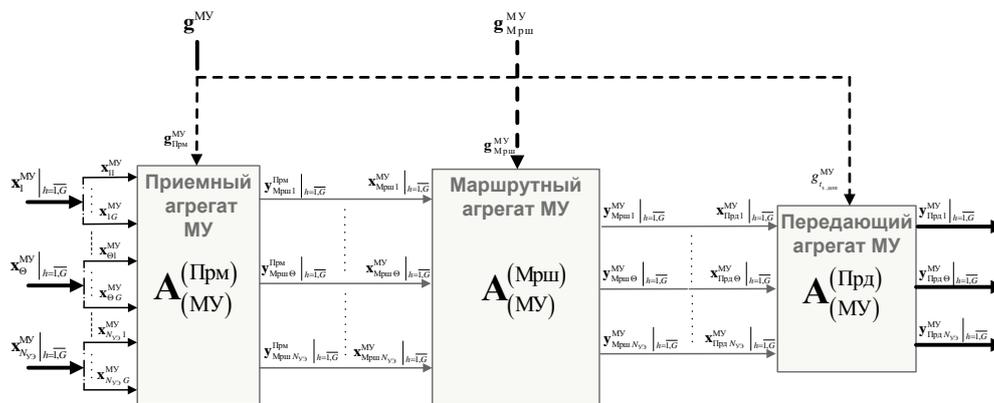


Рис. 4. Структура модели агрегата МУ

Модель МУ включает приемный $\mathbf{A}_{(МУ)}^{(Прм)}$, маршрутный $\mathbf{A}_{(МУ)}^{(Мрш)}$ и передающий $\mathbf{A}_{(МУ)}^{(Прд)}$ агрегаты.

Основными функциями МУ при обеспечении процесса передачи пакетов сообщений в ШКС транспортной составляющей ТКС СН являются [20]:

- определение собственного местоположения;
- формирование таблицы маршрутизации на основе структуры магистральной подсети;
- маршрутизация цифровых пакетов сообщений в зависимости от выбранного протокола маршрутизации.

На рис. 5 показан процесс обработки пакетов сообщений МУ в одном из элементарных (логических) каналов связи и представлены операторы состояний (11), используемые для описания частной имитационной модели МУ.

В общем виде математическую модель агрегата МУ с учетом характеристик элементарных каналов, проходящих через смежные УЭ, можно описать формулой [19]

$$\mathbf{A}_{МУ} = \mathfrak{M} \left[\mathbf{A}_{(МУ)}^{(Прм)} \left(Z_{1\Theta}^{(МУ)} \right) \times \mathbf{A}_{(МУ)}^{(Мрш)} \left(Z_{3\Theta}^{(МУ)}, Z_{4\Theta}^{(МУ)}, M \left(Z_{(Мрш)\Theta}^{(МУ)} \Big|_{h=1, \bar{G}} \right) \right) \times \mathbf{A}_{(МУ)}^{(Прд)} \left(Z_{5\Theta}^{(МУ)} \right) \right]. \quad (11)$$

В частной модели МУ агрегаты $\mathbf{A}_{(МУ)}^{(Прм)}$ и $\mathbf{A}_{(МУ)}^{(Прд)}$ определяют внешние, а маршрутный агрегат $\mathbf{A}_{(МУ)}^{(Мрш)}$ – внутренние свойства модели МУ при обеспечении процесса обмена пакетами сообщений внутри магистральной подсети ТКС СН.

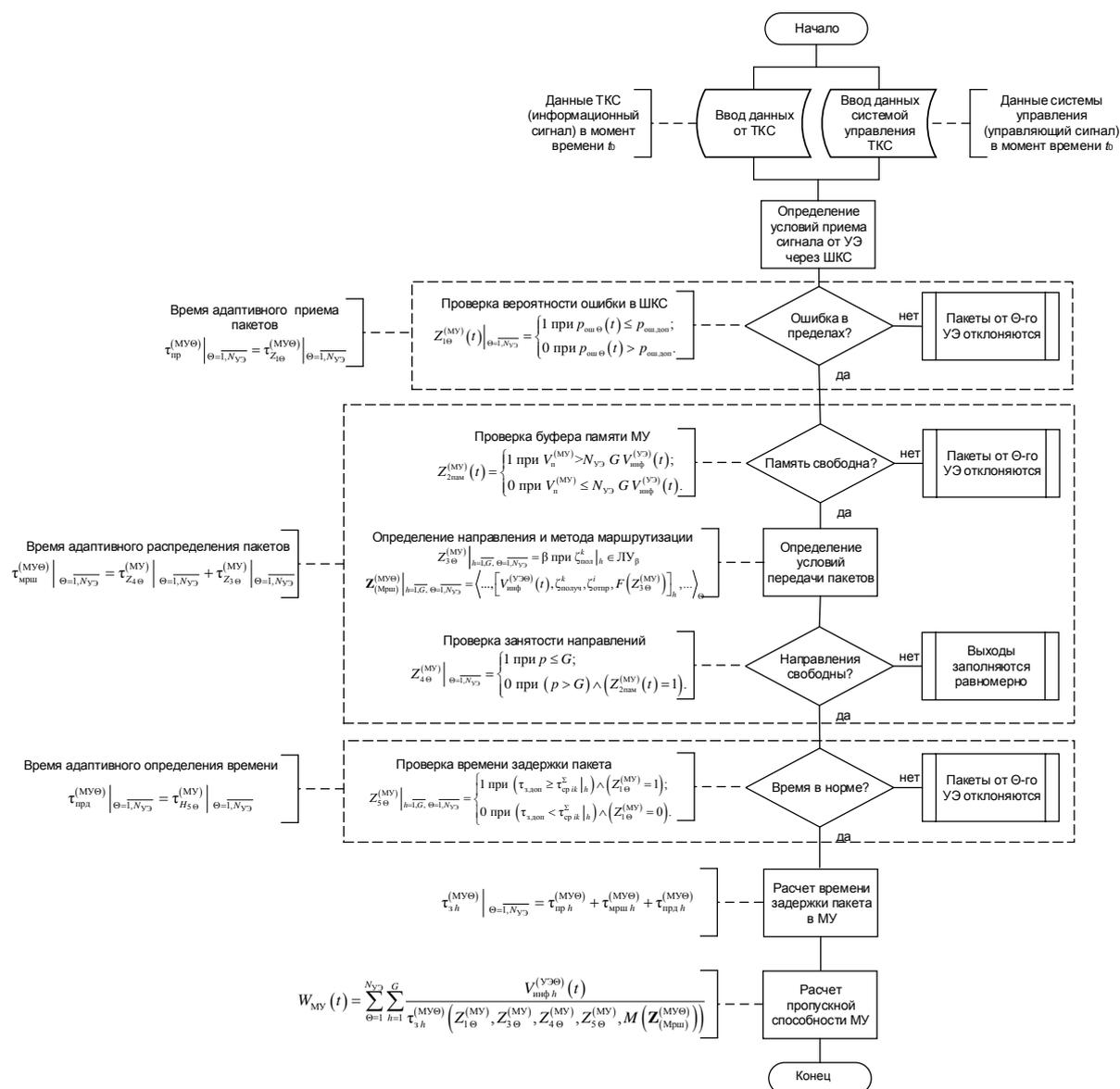


Рис. 5. Схема процесса определения пропускной способности МУ при обработке пакетов сообщений

Элементами параметрической адаптации в МУ являются операторы $Z_{1\theta}^{(MY)} \Big|_{\theta=1, N_{y3}}$, $Z_{3\theta}^{(MY)} \Big|_{h=1, G, \theta=1, N_{y3}}$, $Z_{5\theta}^{(MY)} \Big|_{\theta=1, N_{y3}}$ и адаптивный алгоритм поиска кратчайших путей (маршрутов) $M \left(Z_{(Mрш)}^{(MY)} \Big|_{h=1, G} \right)$ с учетом соблюдения условия двухсвязности сети, основанный на обеспечении прохождения пакетов сообщений между отправителем и получателем по двум независимым маршрутам с учетом анализа состояния связей между УЭ ТРС сети.

Выбор нескольких маршрутов продвижения пакетов сообщений в ТКС СН является процессом итеративным, направленным на сокращение времени нахождения пакетов в магистральной подсети. Из-за несоответствия параметров широкополосных радиоинтерфейсов оптимальным пакеты, не удовлетворяющие допустимому времени их передачи в сети, отбрасываются и считаются потерянными.

С учетом полученной частной математической модели МУ (11) можно записать:
– среднее значение задержки обработки h -го пакета на Θ -м выходе МУ

$$\tau_{3h}^{(MY\Theta)} \Big|_{\Theta=1, N_{Y\Theta}} = \tau_{пр h}^{(MY\Theta)} + \tau_{мрш h}^{(MY\Theta)} + \tau_{прд h}^{(MY\Theta)};$$

– среднее значение пропускной способности МУ

$$W_{МУ}(t) = \sum_{\Theta=1}^{N_{Y\Theta}} \sum_{h=1}^G \frac{V_{инф h}^{(Y\Theta)}(t)}{\tau_{3h}^{(MY\Theta)}(Z_{1\Theta}^{(MY)}, Z_{3\Theta}^{(MY)}, Z_{4\Theta}^{(MY)}, Z_{5\Theta}^{(MY)}, M(Z_{(Mрш)}^{(MY\Theta)}))}, \quad (12)$$

где $V_{инф h}^{(Y\Theta)}(t)$ – объем h -го пакета сообщений в сторону Θ -го УЭ в момент времени t , бит;

$\tau_{3h}^{(MY\Theta)}(Z_{1\Theta}^{(MY)}, Z_{3\Theta}^{(MY)}, Z_{4\Theta}^{(MY)}, Z_{5\Theta}^{(MY)}, M(Z_{(Mрш)}^{(MY\Theta)}))$ – среднее значение времени задержки h -го пакета сообщений в сторону Θ -го УЭ, с.

Из выражения (12) следует, что пропускная способность МУ в основном зависит от количества взаимодействующих УЭ ТРС ТКС СН и методов (операторов) адаптации потоков информационных пакетов к состоянию магистральной подсети. При этом на отдельном направлении связи со смежным МУ может использоваться свой алгоритм $M(Z_{(Mрш \Theta)}^{(MY)} |_{h=1, G})$.

В роли управляющего объекта ТКС СН могут рассматриваться оператор сети для автоматизированной системы и комплекс специальных программно-аппаратных средств для автоматической системы.

Комплексная имитационная модель телекоммуникационной сети специального назначения. Основные функции внутреннего взаимодействия ТКС СН сосредоточены в магистральной и локальных подсетях и включают:

а) для локальной подсети:

- направление информационных потоков данных в сторону как удаленных абонентов, так и собственных зарегистрированных пользователей;
- обеспечение непрерывности передачи сообщений мобильным абонентам при перемещении их между смежными локальными сетями;
- обеспечение адресности при передаче сообщений от АУ;

б) для магистральной подсети:

- увеличение зоны покрытия ТКС СН с помощью прямых узловых ШКС;
- увеличение живучести ТКС СН за счет необходимой узловой избыточности и динамических протоколов маршрутизации.

Элементы подсетей обеспечивают формирование логических каналов передачи данных с помощью локальных и узловых ШКС. Пропускная способность элементарного ij -го (логического) канала связи определяется как минимальной пропускной способностью СУ, входящего в элементарный канал связи, так и минимальной пропускной способностью ШКС [18]:

$$W_{эл ij}(t) = \min(\min W_{ЛУ}(t), \min W_{МУ}(t), \min C_{шк}(t)), \quad (13)$$

где $\min W_{ЛУ}(t) = \min[W_{ЛУ1}(t), \dots, W_{ЛУ\Lambda}(t)]$ – минимальная пропускная способность множества ЛУ, выделяемая ij -му элементарному каналу связи;

$\min W_{МУ}(t) = \min[W_{МУ1}(t), \dots, W_{МУE}(t)]$ – минимальная пропускная способность множества МУ, выделяемая ij -му элементарному каналу связи;

$\min C_{\text{шк}}(t)$ – минимальная пропускная способность ШКС между элементами локальных узлов $[C_{\text{шк}1}(t), \dots, C_{\text{шк}N}(t)]$ и между элементами магистральных подсетей $[C_{\text{шк}12}(t), \dots, C_{\text{шк}(N-1)N}(t)]$.

Пропускные способности (13) определяют состояние ТКС СН при обеспечении информационного взаимодействия объектов МИУС СН.

Построение комплексной имитационной модели ТКС СН включает последовательную композицию (синтез) ее элементов (частных имитационных моделей) в подсети и сеть в целом с учетом информационного взаимодействия через широкополосные радиоинтерфейсы посредством системы адресации и маршрутизации.

С учетом применяемого способа адресации и маршрутизации комплексная математическая модель ТКС СН представляется в следующей интерпретации:

$$\mathbf{M}_{\text{ТКС}} = \mathfrak{M}(\mathbf{M}_{\text{ОЛП}} \cup \mathbf{M}_{\text{МП}}) \Big|_{\mathbf{A}_W^{\text{ТКС}}}, \quad (14)$$

где \mathfrak{M} – знак системы множеств сетевых элементов ТКС;

$\mathbf{A}_W^{\text{ТКС}}$ – матрица пропускной способности ТКС, элементами которой являются значения пропускных способностей каналов связи согласно выражению (13);

$\mathbf{M}_{\text{ОЛП}} = \mathfrak{M} \left[\left(\mathbf{A}_{\text{AV}_1} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{AV}_i} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{AV}_\phi} \right) \cup \left(\mathbf{A}_{\text{ЛВ}_1} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{ЛВ}_\beta} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{ЛВ}_\lambda} \right) \right] \Big|_{\mathbf{A}_{\text{адр}}, \mathbf{A}_{\text{ком}}}$ – модель объединенной локальной подсети (множество сетевых элементов локальной подсети), определяемая частными имитационными моделями (7), (9) и коммутационной матрицей $\mathbf{A}_{\text{ком}}$;

$\mathbf{M}_{\text{МП}} = \mathfrak{M} \left(\mathbf{A}_{\text{MV}_1} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{MV}_\alpha} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{MV}_\epsilon} \right) \Big|_{\mathbf{A}_{\text{мрш}}}$ – модель магистральной подсети (множество сетевых элементов магистральной подсети), определяемая частной имитационной моделью (11) и маршрутной матрицей $\mathbf{A}_{\text{мрш}}$.

В модели (14) в качестве матриц коммутации и маршрутизации ($\mathbf{A}_{\text{ком}}$, $\mathbf{A}_{\text{мрш}}$) могут применяться таблицы коммутации и маршрутизации, принятые для существующих протоколов стека TCP/IP с пакетной коммутацией сообщений.

Математическая модель подвижной ТКС СН (14) имеет следующие особенности:

- устранение дополнительных связей между одноименными сетевыми устройствами;
- исключение отдельного описания ШКС на этапе моделирования существующей ТКС СН, что позволяет сократить количество описываемых агрегатов в сравнении с классическим подходом построения агрегативных систем;
- описание процесса передачи пакетов сообщений с информацией, используемой приложениями, которые функционируют в реальном масштабе времени.

Результаты экспериментальных исследований беспроводной телекоммуникационной сети специального назначения с пакетной коммутацией сообщений. Для проверки адекватности и уточнения полученной имитационной модели ТКС СН проводился натурный эксперимент по передаче видеосообщений в сегменте сети стандартов 802.11 b/g/n (рис. 6), состоящем из шести устройств типа Bullet M2 и восьми встроенных в персональные вычислительные машины АУ. Устройства Bullet M2 функционировали как в режиме беспроводной точки доступа, так и в режиме базовой станции.

В качестве объектов эксперимента, проверяемых на адекватность, рассматривались модели ТКС СН с децентрализованным, централизованным и комбинированным типами структуры сети [22]. В процессе проведения эксперимента с моделями ТКС СН был применен имитационно-статистический метод, который включал достаточно большое количество реализаций на всем множестве комбинаций воздействий ВДФ на систему связи. Для выбранных значений доверительной вероятности ($\alpha = 0,95$) при заданной точности оценки ($\epsilon = 0,05$) получено число реализаций натурального эксперимента (количество испытаний) [23], которое составило более $N = 1552$.

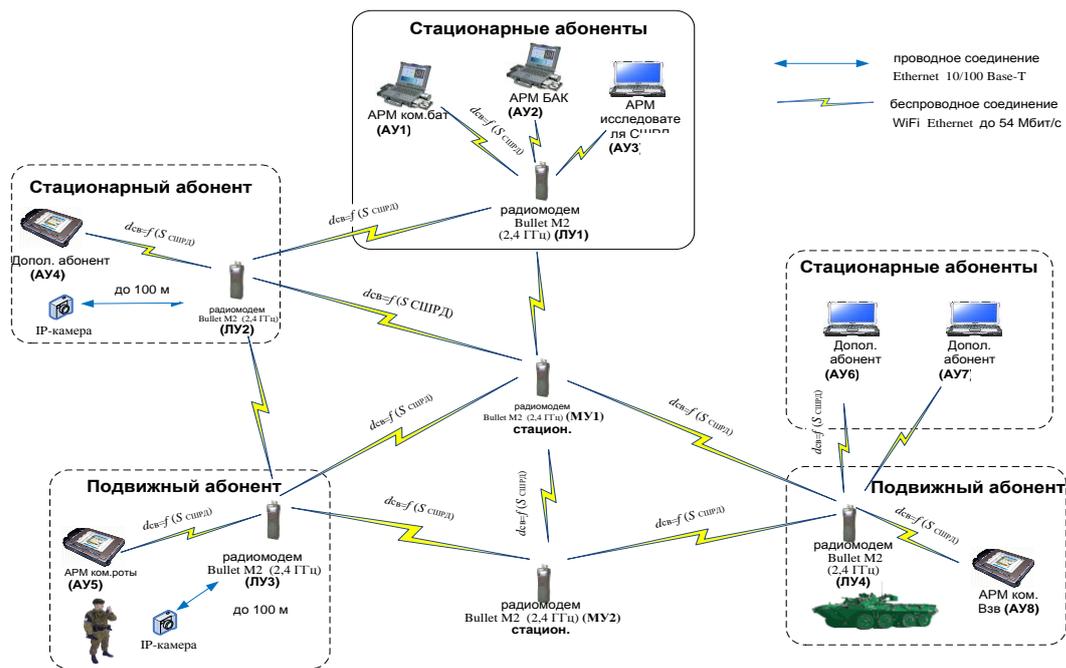


Рис. 6. Состав экспериментального макета сегмента ТКС СН

Условия проведения эксперимента:

- расстояние между смежными сетевыми устройствами до 700 м;
- размер тестового пакета сообщений 256 бит;
- параллельная передача от нескольких источников непрерывных видеосообщений при активном измерении в одном из элементарных каналов связи скорости передачи тестовых пакетов сообщений;
- при каждом прогоне натурной и имитационной моделей сегмента ТКС СН количество испытаний составляло не менее 80 (количество тестовых пакетов в каждом испытании – 4);
- зона обслуживания ТКС СН представлялась в виде окружности радиусом $R_{\text{ТКС СН}}$;
- минимальная задержка в обслуживании пакетов сообщений во всех однотипных широкополосных устройствах связи ТКС СН считалась одинаковой и зависела в основном от характеристик используемого встроенного в модем сетевого процессора.

В качестве противодействия имитации воздействия помех применялись следующие способы:

- смена рабочих частот после проведения контроля частотного диапазона работы средств WiFi с помощью электронного анализатора спектра AirView;
- рациональное использование возможностей технологий AirMax (в режиме TDMA – централизованное назначение временных интервалов для каждого устройства связи) и AirSelect (динамическое изменение параметров беспроводного канала за счет периодического перехода на частоты с наилучшими характеристиками).

По результатам модельных и натурных экспериментов полученные оценки $\overline{\Delta W}_{\text{ТКС}}$ средней пропускной способности сети (рис. 7) в зависимости от степени воздействия ВДФ для различных типов структур ТКС СН практически совпадают (не превышают $\max \overline{\Delta W}_{\text{ТКС}} = 15\%$ при высокой степени воздействия ВДФ), что подтверждает адекватность разработанной имитационной модели ТКС.

Смешанный тип структуры ТКС СН позволяет обеспечить требуемую среднюю пропускную способность (не менее 2 Мбит/с) за счет применения механизма адаптации, уменьшающего время обработки пакетов сообщений в широкополосных устройствах связи.

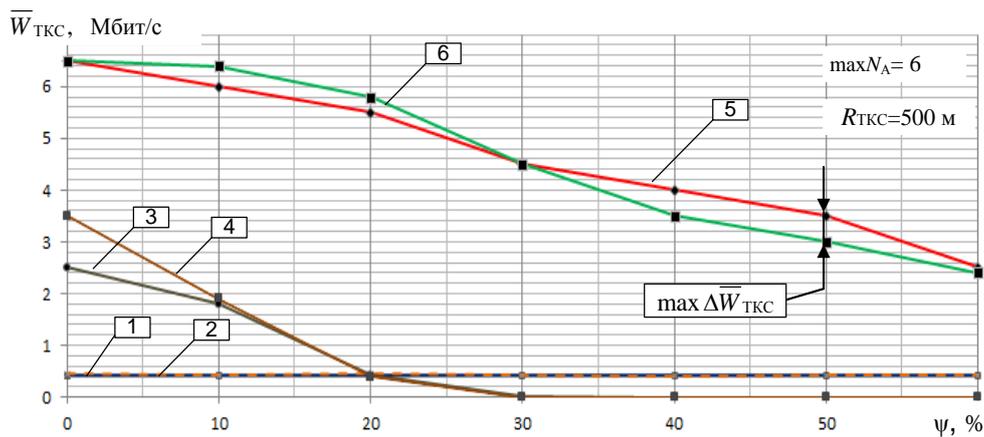


Рис. 7. Зависимости средней пропускной способности ТКС СН от степени воздействия ВДФ для различных типов структур при $N_{a6} = 6$ и $R_{ТКС\text{ СН}} = 500$ м

1, 3, 5 – математические модели децентрализованного, централизованного и смешанного типов структур ТКС СН соответственно; 2, 4, 6 – натурные модели децентрализованного, централизованного и смешанного типов структур ТКС СН соответственно

Применение различных методов маршрутизации и специальных адаптивных технологий в ТКС СН (например, технологий AirMax и AirSelect для устройств Bullet серии М) позволит не только повысить пропускную способность ТКС, но и ослабить действие дестабилизирующих факторов.

Целенаправленное изменение структуры ТКС СН и основных параметров ее элементов поможет создать адаптивные сети связи, способные функционировать в сложной обстановке.

Заключение. Декомпозиция сети на структурном уровне означает, что построение модели ТКС СН сводится к описанию функций агрегативных моделей сетевых устройств и подсетей. Взаимодействие между сетевыми устройствами внутри подсетей учитывается через операторы состояний агрегатов, а также алгоритмы принятой системы адресации и маршрутизации.

По результатам проведенного натурального эксперимента и имитационного моделирования ТКС СН можно сделать следующие выводы:

- наилучший тип структуры ТКС СН (смешанный тип) удовлетворяет требованиям по устойчивости и обеспечению необходимой средней пропускной способности (более 2 Мбит/с) при своевременной передаче трафика в реальном масштабе времени в транспортной составляющей сети не менее чем по двум независимым маршрутам;

- при построении адаптивной ТКС СН смешанного типа требуется учитывать то, что централизованное управление в локальных подсетях обеспечивает необходимую среднюю пропускную способность на значительных расстояниях между абонентскими устройствами и локальными узлами. В свою очередь, децентрализованное управление потоками информации в транспортной составляющей сети поддерживает требуемую среднюю пропускную способность системы связи в условиях воздействия ВДФ;

- эмпирические и теоретические оценки средней пропускной способности сети в зависимости от степени воздействия ВДФ для различных типов структур ТКС СН практически совпадают (не превышают 15 % при высокой степени воздействия ВДФ), что подтверждает адекватность разработанной комплексной математической модели ТКС.

Список использованных источников

1. Кругликов, С. В. Адаптивные информационно-управляющие системы специального назначения: теория и практика синтеза / С. В. Кругликов. – Минск : ВА РБ, 2014. – 233 с.

2. Булойчик, В. М. Военно-прикладные вопросы математического моделирования. Основы теории математического моделирования боя и боевых действий : учеб. издание / В. М. Булойчик. – Минск : ВА РБ, 2005. – 249 с.

3. 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.
4. Булойчик, В. М. Военно-прикладные вопросы математического моделирования : учеб. пособие : в 4 ч. / В. М. Булойчик. – Минск : ВА РБ, 2000. – Ч. 2 : Математические методы, используемые при моделировании процессов функционирования систем. – 155 с.
5. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М. : Наука, 1978. – 400 с.
6. Дудин, А. Н. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками / А. Н. Дудин, В. И. Клименко. – Минск : Изд-во БГУ, 2000. – 175 с.
7. Шварц, М. Сети ЭВМ. Анализ и проектирование : пер. с англ. / М. Шварц. – М. : Радио и связь, 1981. – 336 с.
8. Одоевский, С. М. Новые информационные и сетевые технологии в системах управления военного назначения : учеб. пособие : в 2 ч. / С. М. Одоевский. – СПб. : ВАС, 2010. – Ч. 1 : Новые сетевые технологии в системах управления военного назначения. – 432 с.
9. Величко, В. В. Модели и методы повышения живучести современных систем связи / В. В. Величко, Г. В. Попков. – М. : Горячая линия – Телеком, 2016. – 270 с.
10. Вишневский, В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В. М. Вишневский. – М. : Техносфера, 2007. – 512 с.
11. Егоров, Б. М. Параллельный метод стохастической оптимизации многопараметрических объектов / Б. М. Егоров. – Киев : Изд-во КГУ, 1979. – 191 с.
12. Советов, Б. Я. Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – 2-е изд. – М. : Высш. школа, 1998. – 263 с.
13. Синтез и анализ живучести сетевых систем / Ю. Ю. Громов [и др.] / Тамбовский гос. техн. ун-т. – М. : Машиностроение, 2007. – 152 с.
14. Ермаков, С. М. Математический эксперимент с моделями сложных стохастических систем / С. М. Ермаков, В. Б. Мелос. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 1993. – 204 с.
15. Поповский, В. В. Математическое моделирование сложных систем : краткий курс лекций / В. В. Поповский. – Ленинград : ВАС, 1990. – 136 с.
16. Кобозев, Ю. Н. Перспективы развития систем связи и телекоммуникаций в информационно-управляющих системах специального назначения // Материалы Всерос. науч. конф. «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения» : в 4 т. – Т. 4 : Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах ; под ред. Ю. В. Бородакия. – М. : ОАО «Концерн «Системпром», 2013. – С. 7–9.
17. Ермишян, А. Г. Теоретические и научно-практические основы построения систем связи в локальных войнах и вооруженных конфликтах / А. Г. Ермишян, Г. В. Сызранцев. – СПб. : ВАС, 2006. – 200 с.
18. Определение системы параметров и показателей эффективности перспективной широкополосной беспроводной сети связи / А. Ю. Зализко [и др.] // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2013. – № 2. – С. 91–100.
19. Зализко, А. Ю. Математическая модель перспективной военной системы широкополосного радиодоступа / А. Ю. Зализко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2014. – № 3. – С. 86–97.
20. Математическая модель беспроводной сети передачи данных динамической информационно-управляющей системы / С. В. Кругликов [и др.] // Доклады XVII Междунар. конф. «Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации». – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2018. – С. 291–297.
21. Григорьев, В. А. Передача сигналов в зарубежных информационно-технических системах / В. А. Григорьев. – СПб. : ВАС, 1998. – 440 с.
22. 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.
23. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения : учеб. пособие для вузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Высш. школа, 2000. – 480 с.

References

1. Kruglikov S. V. *Adaptivnyye informatsionno-upravlyayushchiye sistemy spetsial'nogo naznacheniya: teoriya i praktika sinteza. Adaptive Information-Control Systems for Special Purposes: Theory and Practice of Synthesis*. Minsk, Voennaja akademija Respubliki Belarus', 2014, 233 p. (in Russian).
2. Bulojchik V. M. *Voенно-prikladnye voprosy matematicheskogo modelirovaniya. Osnovy teorii matematicheskogo modelirovaniya boya i boevyh dejstvij. Military-applied Problems of Mathematical*

Modeling. Fundamentals of the Theory of Mathematical Modeling of Combat and Fighting]. Minsk, Voennaja akademija Respubliki Belarus', 2005, 249 p. (in Russian).

3. Zalizko A. Y., Filipchenko I. V. Adaptaciya sistem shirokopolosnogo abonentskogo radiodostupa voennogo naznacheniya [*Adaptation of military broadband subscriber radio access systems*]. Nauka i voennaja bezopasnost' [*Science and Military Security*], 2013, no. 4, pp. 22–28 (in Russian).

4. Bulojchik V. M. Voенно-prikladnye voprosy matematicheskogo modelirovaniya [*Military-Applied Questions of Mathematical Modeling*]. Chast 2. Matematicheskie metody, ispol'zuyemye pri modelirovanii processov funkcionirovaniya system [*Part 2. Mathematical Methods Used in Modeling Systems Functioning Processes*]. Minsk, Voennaja akademija Respubliki Belarus', 2000, 155 p. (in Russian).

5. Buslenko N. P. Modelirovaniye slozhnykh system. *Simulation of Complex Systems*. Moscow, Nauka, 1978, 400 p. (in Russian).

6. Dudin A. N., Klimenko V. I. Sistemy massovogo obsluzhivaniya s korrelirovannymi potokami. *Queueing Systems with Correlated Flows*. Minsk, Izdatel'stvo Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta, 2000, 175 p. (in Russian).

7. Shvarc M. Seti EHVM. Analiz i proektirovanie. *Computer network. Analysis and Design*. Moscow, Radio i svyaz', 1981, 336 p. (in Russian).

8. Odoevskij S. M. Novye informacionnye i setevye tekhnologii v sistemah upravleniya voennogo naznacheniya [*New Information and Network Technologies in Military Control Systems*]. Chast 1. Novye setevye tekhnologii v sistemah upravleniya voennogo naznacheniya [*Part 2. New Networking Technologies in Control Systems for Military Use*]. Saint Petersburg, Voennaja akademija svyazi, 2010, 432 p. (in Russian).

9. Velichko V. V. Modeli i metody povysheniya zhivuchesti sovremennykh sistem svyazi. *Models and Methods of Improving the Survivability of Modern Communication Systems*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2016, 270 p. (in Russian).

10. Vishnevskij V. M. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya komp'yuternykh setej. *Theoretical Foundations of Computer Network Design*. Moscow, Tekhnosfera, 2007, 512 p. (in Russian).

11. Yegorov B. M. Parallelnyy metod stokhasticheskoy optimizatsii mnogoparametricheskikh ob'yektov [*Parallel Method of Stochastic Optimization of Multiparameter Objects*]. Kiev, Izdatel'stvo Kievskogo gosudarstvennogo universiteta, 1979, 191 p. (in Russian).

12. Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A. Modelirovanie system. *System Modeling*. Moscow, Vysshaja shkola, 1998, 263 p. (in Russian).

13. Gromov Yu. Yu., Drachev V. O., Nabatov K. A., Ivanova O. G. Sintez i analiz zhivuchesti setevykh sistem. *Synthesis and Analysis of the Survivability of Network Systems*. Moscow, Mashinostroenie, 2007, 152 p. (in Russian).

14. Ermakov S. M., Melos V. B. Matematicheskij ehksperiment s modelyami slozhnykh stohasticheskikh system. *Mathematical Experiment with Models of Complex Stochastic Systems*. Saint Petersburg, Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 1993, 204 p. (in Russian).

15. Popovskij V. V. Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh sistem. *Mathematical Modeling of Complex Systems*. Leningrad, Voennaja akademija svyazi, 1990, 136 p. (in Russian).

16. Kobozev Yu. N. Perspektivy razvitiya sistem svyazi i telekommunikacij v informacionno-upravlyayushchih sistemah special'nogo naznacheniya [*Prospects for the development of communication and telecommunications systems in information and control systems for special purposes*]. Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Sovremennye tendencii razvitiya teorii i praktiki upravleniya v sistemah special'nogo naznacheniya». T. 4 «Telekommunikacii i svyaz' v informacionno-upravlyayushchih sistemah»; pod red. Yu. V. Borodakiya [*Proceedings of the All-Russian scientific conference "Modern Trends in the Development of Theory and Practice of Management in Special Purpose Systems". Vol. 4 "Telecommunications and Communication in Information and Control Systems"*]. Moscow, Konzern "Sistemprom", 2013, pp. 7–9 (in Russian).

17. Ermishyan A. G., Syzrancev G. V. Teoreticheskie i nauchno-prakticheskie osnovy postroeniya sistem svyazi v lokal'nykh voynah i vooruzhennykh konfliktah. *Theoretical and Scientific-Practical Bases of Building Communication Systems in Local Wars and Armed Conflicts*. Saint Petersburg, Voennaja akademija svyazi, 2006, 200 p. (in Russian).

18. Zalizko A. Yu., Kruglikov S. V., Stankevich V. Eh., Filipchenko I. V. Opredelenie sistemy parametrov i pokazatelej jeffektivnosti perspektivnoj shirokopolosnoj besprovodnoj seti svyazi [*Determination of a system of parameters and performance indicators of a promising broadband wireless network*]. Vestnik Voенной akademii Respubliki Belarus' [*Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*], 2013, no. 2, pp. 91–100 (in Russian).

19. Zalizko A. Yu. Matematicheskaya model' perspektivnoj voенной sistemy shirokopolosnogo radiodostupa [*Mathematical model of perspective military system of broadband radio access*]. Vestnik Voенной akademii Respubliki Belarus' [*Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*], 2014, no. 3, pp. 86–97 (in Russian).

20. Kruglikov S. V., Filipchenko I. V., Zalizko A. Yu., Lazarenko V. E. Matematicheskaya model' besprovodnoj seti peredachi dannyh dinamicheskoy informacionno-upravlyayushchej sistemy [Mathematical model of wireless data transmission network of dynamic information management system]. Doklady XVII Mezhdunarodnoj konferencii «Razvitie informatizacii i gosudarstvennoj sistemy nauchno-tehnicheskoy informacii» [Reports of the XVII International Conference "Development of Informatization and the State System of Scientific and Technical Information"]. Minsk, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, 2018, pp. 291–297 (in Russian).

21. Grigor'ev V. A. Peredacha signalov v zarubezhnyh informacionno-tehnicheskikh sistemah. *Signal Transmission in Foreign Information Technology Systems*. Saint Petersburg, Voennaja akademija svjazi, 1998, 440 p. (in Russian).

22. Kruglikov S. V., Zalizko A. Yu. Ehksperimental'nye issledovaniya podvizhnoj seti shirokopolosnogo radiodostupa [Experimental studies of mobile broadband radio access network]. Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy [Information-Measuring and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 26–34 (in Russian).

23. Ventcel' E. S., Ovcharov L. A. Teoriya veroyatnostej i ee inzhenernye prilozheniya. *Probability Theory and its Engineering Applications*. Moscow, Vysshaja shkola, 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, Минск, Беларусь.
E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

Филипенко Игорь Викторович, кандидат технических наук, главный инженер, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
E-mail: filipchenko@newman.bas-net.by

Зализко Александр Юрьевич, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории системных проектов научно-исследовательской части, Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь.
E-mail: turbostok@tut.by

Бекиш Александр Романович, научный сотрудник научно-исследовательской части, Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь.
E-mail: beker1@rambler.ru

Information about the authors

Sergey V. Kruglikov, Dr. of Military Sciences, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Director General for Scientific and Innovative Work, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

Igor V. Filipchenko, Cand. Sci. (Eng.), Chief Engineer, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: filipchenko@newman.bas-net.by

Alexander Y. Zalizko, Researcher of the Scientific-Research Part, The Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: turbostok@tut.by

Alexander R. Bekish, Researcher of the Research Section, The Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: beker1@rambler.ru